

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ[®] № 1–2



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С 1955 г. WWW.RIFSM.RU WWW.JOURNAL-CM.RU ЯНВАРЬ–ФЕВРАЛЬ 2023 г. (810)



35 лет кафедре
строительного материаловедения
и дорожных технологий
Липецкого государственного
технического университета



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

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®

№ 1–2

Основан в 1955 г.

(810) Январь–февраль 2023 г.

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

К 35-летию кафедры строительного материаловедения и дорожных технологий ЛГТУ

А.В. БОНДАРЕНКО, Б.А. БОНДАРЕВ, П.В. БОРКОВ, М.Л. РУЭЛЛО, В.В. БОНДАРЕНКО Функциональные строительные материалы для пассивной деградации органических загрязнителей воздуха	3
Б.А. БОНДАРЕВ, А.Д. КОРНЕЕВ, П.В. БОРКОВ, А.Б. БОНДАРЕВ, В.К. ЖИДКОВ, Д.А. КОПАЛИН Исследование циклической долговечности стеклопластполимербетона для ремонта и восстановления конструкций транспортных сооружений	11
М.А. ГОНЧАРОВА, А.Г. ЗАЕВА Биологические аспекты эксплуатации комплекса чистых помещений	18
Современные проблемы строительного материаловедения обсудили в Липецке (Информация)	24
М.А. ГОНЧАРОВА, Е.С. ДЕРГУНОВА Особенности применения процесса биоминерализации для улучшения структурно-прочностных свойств бетона	25
М.А. ГОНЧАРОВА, И.А. ТКАЧЕВА Повышение прочности асфальтобетонных смесей для ремонта жестких дорожных покрытий	33
Р.Э. АГАМОВ, М.А. ГОНЧАРОВА, А.Р. ПАЧИН Высокопрочные фибробетоны в конструкциях общестроительного и специального назначения	39
В.А. СТУРОВА Сталефибробетон с применением отходов местных производств для транспортных сооружений	44
М.А. ГОНЧАРОВА, Л.В. ЗАМЫШЛЯЕВА, Х.Г.Х. АЛЬ-СУРРАЙВИ Модификация цементных систем твердения путем применения энергоэффективных технологических добавок отечественного производства	50
Международная научно-практическая конференция BetONconf'2022 (Информация)	55
Р.Э. АГАМОВ, М.А. ГОНЧАРОВА, А.В. МРАЕВ Сталеплавыльные шлаки как эффективное сырье в дорожном строительстве	56

Материалы и технологии

Х.-Б. ФИШЕР, Б.Б. ВТОРОВ, А.Ф. БУРЬЯНОВ Исследование влияния многокомпонентных активаторов твердения на свойства природного ангидрита	63
О.В. АЛЕКСАНДРОВА, НГУЕН ДЫК ВИНЬ КУАНГ, Б.И. БУЛГАКОВ Влияние минеральных добавок на коррозионную стойкость стальной арматуры в железобетонных конструкциях	69
О.Е. СМИРНОВА, А.П. ПИЧУГИН, В.Ф. ХРИТАНКОВ Композиционные материалы на основе органического сырья с наноразмерными добавками	76
Д.А. АЮПОВ, Р.И. КАЗАКУЛОВ Наномодифицированные полимерно-битумные вяжущие	82

Материалы для дорожного строительства

В.В. БАБКОВ, И.В. НЕДОСЕКО, А.О. ГЛАЗАЧЕВ, Д.А. СЕНИЦИН, А.А. ПАРФЕНОВА, Э.И. КАЮМОВА Композиционные материалы для дорожного строительства на основе отходов химической и металлургической промышленности	88
Д.Д. ХАМИДУЛИНА, С.А. НЕКРАСОВА, К.М. ВОРОНИН, М.М. СУРОВЦОВ, Т.А. ТКАЧЁВА Дорожный клинкер на основе вторичных сырьевых ресурсов	95

Результаты научных исследований

Т.В. РЕВЕНКО, В.В. СЛЕПЦОВ Микробиологические аспекты разработки препаратов для обработки поверхности материалов на основе коллоидных растворов меди	100
Т.В. ЖДАНОВА, Т.А. МАЦЕЕВИЧ, А.А. АСКАДСКИЙ Оценка модулей упругости смесей древесно-полимерных композитов с минеральным наполнителем	106

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

STROYTEL'NYE MATERIALY® № 1-2

Founded in 1955 (810) January-February 2023

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

To the 35th anniversary of the Department of Building Materials Science and Road Technologies of the LSTU

A.V. BONDARENKO, B.A. BONDAREV, P.V. BORKOV, M.L. RUELLO, V.V. BONDARENKO Functional Building Materials for Passive Degradation of Organic Air Pollutants	3
B.A. BONDAREV, A.D. KORNEEV, P.V. BORKOV, A.B. BONDAREV, V.K. ZHIDKOV, D.A. KOPALIN Study of the Cyclic Durability of Fiberglass Polymer Concrete for the Repair and Restoration of Structures of Transport Facilities	11
M.A. GONCHAROVA, A.G. ZAEVA Biological Aspects of Clean Room Complex Operation	18
Modern Problems of Construction Materials Science Discussed in Lipetsk (Information)	24
M.A. GONCHAROVA, E.S. DERGUNOVA Features of the Application of the Bio-Mineralization Process to Improve the Structural and Strength Properties of Concrete	25
M.A. GONCHAROVA, I.A. TKACHEVA Increasing the Strength of Asphalt Concrete Mixtures for the Repair of Rigid Road Pavements	33
R.E. AGAMOV, M.A. GONCHAROVA, A.R. PACHIN High-Strength Fiber-Reinforced Concrete in Structures for General Construction and Special Purposes	39
V.A. STUROVA Steel Fiber Concrete with the Use of Local Production Waste for Transport Facilities	44
M.A. GONCHAROVA, L.V. ZAMYSHLYAEVA, H.G.H. AL-SURRAYVI Modification of Cement Hardening Systems by Using Energy-Efficient Technological Additives of Domestic Production	50
International Scientific and Practical Conference BetONconf'2022 (Information)	55
M.A. GONCHAROVA, R.E. AGAMOV, A.V. MRAEV Steelmaking Slags as an Effective Raw Material in Road Construction	56

Materials and technologies

H.-B. FISHER, B.B. WTOROV, A.F. BURYANOV Study of the Effect of Multicomponent Hardening Activators on the Properties of Natural Anhydrite	63
O.V. ALEKSANDROVA, NGUYEN DUC VINH QUANG, B.I. BULGAKOV The Effect of Mineral Additives on the Corrosion Resistance of Steel Reinforcement in Reinforced Concrete Structures	69
O.E. SMIRNOVA, A.P. PICHUGIN, V.F. KHRITANKOV Composite Materials Based on Organic Raw Materials with Nanosized Additives	76
D.A. AYUPOV, R.I. KAZAKULOV Nanomodified Polymer-Bitumen Binders	82

Materials for road construction

V.V. BABKOV, I.V. NEDOSECO, A.O. GLAZACHEV, D.A. SINITSYN, A.A. PARFENOVA, E.I. KAYUMOVA Composite Materials for Road Construction Based on Waste from the Chemical and Metallurgical Industries	88
D.D. KHAMIDULINA, S.A. NEKRASOVA, K.M. VORONIN, M.M. SUROVTSOV, T.A. TKACHEVA Road Clinker Based on Secondary Raw Materials	95

Results of scientific research

T.V. REVENOK, V.V. SLEPTSOV Microbiological Aspects of the Preparations Development for Surface Materials Treatment Based on Copper Colloidal Solutions	100
T.V. ZHDANOVA, T.A. MATSEEVICH, A.A. ASKADSKII Evaluation of Elastic Modulus of Mixtures of Wood-Polymer Composites with Mineral Filler	106

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 (Saransk)

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)



К 70-ЛЕТИЮ Бориса Александровича БОНДАРЕВА

31 января 2023 г. исполнилось 70 лет доктору технических наук, профессору, почетному дорожнику РФ Борису Александровичу Бондареву.

После окончания в 1975 г. Ростовского-на-Дону инженерно-строительного института по специальности «Автомобильные дороги» Борис Александрович направлен в областное управление строительства и эксплуатации автомобильных дорог «Липецкавтодор».

С 1981 г. жизнь Бориса Александровича связана с преподавательской деятельностью в Липецком политехническом институте (позже ЛГТУ). В 1990 г. по окончании аспирантуры при Воронежском инженерно-строительном институте он защитил кандидатскую диссертацию на тему «Сопrotивляемость полимербетонных строительных элементов, армированных стеклопластиковой арматурой, циклическим нагрузкам». В 1993 г. был приглашен для работы в администрацию Липецкой области, где до 1998 г. возглавлял управление автомобильных дорог. В 1996 г. Борис Александрович защитил докторскую диссертацию «Шпалы из древесно-волоконистых композиционных материалов для лесовозных дорог широкой и узкой колеи». С 1998 г. по настоящее время Б.А. Бондарев работает профессором кафедры «Строительное материаловедение и дорожные технологии» Липецкого государственного технического университета. С 2003 по 2012 г. Борис Александрович возглавлял фирму «Автобан-Липецк», занимающуюся строительством и ремонтом городских автомобильных дорог, уникальных мостов в г. Ельце (1994–1997), набережной р. Воронеж в Липецке (2005), где внедрял свои научные разработки. Б.А. Бондарев, являясь депутатом Липецкого городского Совета депутатов, с 2004 по 2010 г. возглавлял комиссию по ЖКХ, строительству и землепользованию, а с 2015 г. комиссию по транспорту, дорожному хозяйству и благоустройству. За значительный вклад в развитие Липецка Борис Александрович отмечен званием «Почетный гражданин города Липецка», награжден медалями «За заслуги перед г. Липецком» и «Липецк – город мастеров».

Б.А. Бондарев – автор более 300 научных статей, 20 монографий и учебных пособий. Под его руководством подготовлено 12 кандидатов технических наук.

Коллеги, ученики, редакция и редакционный совет сердечно поздравляют Бориса Александровича Бондарева с 70-летием и желают успехов во всех начинаниях, дальнейших научных достижений и их внедрения, благополучия, долгого здоровья.

УДК 612.223.1

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-4-10>

А.В. БОНДАРЕНКО¹, канд. хим. наук (antonina.bondarenko@gmail.com),

Б.А. БОНДАРЕВ¹, д-р техн. наук (Lnsp-48@mail.ru),

П.В. БОРКОВ¹, канд. техн. наук (borkovpv@mail.ru);

М.Л. РУЭЛЛО², исследователь (m.l.ruello@staff.univpm.it);

В.В. БОНДАРЕНКО³, инженер (wolf091991@rambler.ru)

¹ Липецкий государственный технический университет (398042, г. Липецк, ул. Московская, 30)

² Политехнический институт Марке (Università Politecnica delle Marche) (60131, Италия, г. Анкона, ул. Бречче Бьянке, 12)

³ ООО «Интеллект Услуги Сервис» (398059, г. Липецк, Коммунальная пл., 9)

Функциональные строительные материалы для пассивной деградации органических поллютантов воздуха

Работа посвящена новой роли отделочных материалов – обеспечению пассивной деградации поллютантов воздуха жилых и производственных помещений. Приведена информация о международной стратегии Indoor Air Quality (IAQ), которая направлена на обеспечение качества воздуха внутри помещений, основные подходы к стратегии, в том числе обеспечение пассивной деградации поллютантов за счет применения функциональных добавок в отделочных строительных материалах. Показаны преимущества фотокаталитических добавок, которые обеспечивают разложение органических соединений до безопасных продуктов. Представлены результаты тестирования фотокаталитического материала, синтезированного нанесением слоя диоксида титана на каолинит, показаны его свойства, а также результаты применения этой добавки в шпатлевках, керамических и лакокрасочных покрытиях. Тестирование фотокаталитической активности материалов проводилось по снижению содержания метилэтилкетона в воздушной среде герметичного реактора при помещении туда материалов с функциональной добавкой и

базовых материалов. Наиболее устойчивый тренд на снижение концентрации при освещении ультрафиолетом получен при использовании в шпатлевках и покрытиях, полученном спеканием порошка до 900°C (ниже температуры спекания), где материал сохраняет свое исходное состояние. Использование в полиуретановом лаке приводит к протеканию сложных процессов, требующих дополнительного изучения, поэтому однозначно рекомендовать лаки и краски в качестве носителя на данном этапе изучения нельзя.

Ключевые слова: фотокатализ, функциональная добавка, отделочные строительные материалы, диоксид титана, каолинит.

Для цитирования: Бондаренко А.В., Бондарев Б.А., Борков П.В., Руэлло М.Л., Бондаренко В.В. Функциональные строительные материалы для пассивной деградации органических загрязнителей воздуха // *Строительные материалы*. 2023. № 1–2. С. 4–10. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-4-10>

A.V. BONDARENKO¹, Candidate of Sciences (Chemistry) (antonina.bondarenko@gmail.com),
B.A. BONDAREV¹, Doctor of Sciences (Engineering) (Lnsp-48@mail.ru),
P.V. BORKOV¹, Candidate of Sciences (Engineering) (borkov(pv@mail.ru);
M.L. RUELLLO², PhD, Researcher (m.l.ruello@staff.univpm.it);
V.V. BONDARENKO³, PhD, Engineer (wolf091991@rambler.ru)
¹ Lipetsk State Technical University (30, Moskovskaya Street, Lipetsk, 398042, Russian Federation)
² Università Politecnica delle Marche (12, Breccia Bianche Street, Ancona, 60131, Italy)
³ LLC "Intellett Uslugi Service" (9, Kommunalnaya Square, Lipetsk, 398059, Russian Federation)

Functional Building Materials for Passive Degradation of Organic Air Pollutants

The work is devoted to the new role of finishing materials – ensuring passive degradation of air pollutants in residential and industrial premises. Information is provided on the international Indoor Air Quality (IAQ) strategy, which is aimed at ensuring indoor air quality, the main approaches of the strategy including ensuring passive degradation of pollutants due to the use of functional additives in finishing building materials are presented. The advantages of photo-catalytic additives, which ensure the decomposition of organic compounds to safe products, are shown. The results of testing a photo-catalytic material synthesized by applying a layer of titanium dioxide on kaolinite are presented, its properties are shown, as well as the results of using this additive in fillers, ceramic and paint-and-lacquer coatings. The photocatalytic activity of materials was tested to reduce the content of methyl ethyl ketone in the air of a hermetic reactor when materials with a functional additive and base materials were placed there. The most stable trend for a decrease in concentration under ultraviolet illumination was obtained when used in putty and coating obtained by sintering powder to 900°C (below the sintering temperature), where the material retains its initial state. The use in polyurethane varnish leads to complex processes that require additional study, so it is impossible to unequivocally recommend varnishes and paints as a carrier at this stage of the study.

Keywords: photocatalysis, functional additive, finishing building materials, titanium dioxide, kaolinite.

For citation: Bondarenko A.V., Bondarev B.A., Borkov P.V., Ruello M.L., Bondarenko V.V. Functional building materials for passive degradation of organic air pollutants. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2023. No. 1–2, pp. 4–10. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-4-10>

На современном этапе развития общества и технологий задача обеспечения качественного уровня жизни для всего человечества приводит к внутреннему конфликту. С одной стороны, для того чтобы обеспечить нескольким миллиардам населения планеты приемлемые условия жизни, необходимо внедрять достижения науки и технологии в повседневную жизнь, с другой стороны, такое использование новых технологий приносит новые риски. Даже на бытовом уровне использование новых материалов при обустройстве жилых помещений, при обеспечении жизнедеятельности (строительные материалы, мебель, различные домашние устройства, бытовая химия и пр.) человека приводит к загрязнению среды обитания различными загрязнителями. При современных стандартах потребления невозможно обеспечить ограничение потребностей человека и умеренное использование только экологически чистых материалов и продуктов (напомним, что термин «экологически чистый» не означает «безопасный для человека»). Поэтому актуальной является стратегия обеспечения безопасности среды обитания человека, одним из направлений которой является Indoor Air Quality (IAQ) [1].

IAQ предлагает три метода улучшения качества воздуха в помещении, а именно: *контроль источни-*

ков эмиссии, усиленная вентиляция помещений и очистка воздуха [2]. Контроль источников часто неэффективен, если неорганизованные источники эмиссии представляют собой предметы быта, мебель, бытовую химию и пр. Эффективным способом является усиленная вентиляция, но при наличии качественного наружного воздуха. В противном случае она может повышать содержание загрязняющих веществ, привнося их из окружающей среды. Таким образом, очистка воздуха остается наиболее реальным вариантом улучшения качества воздуха в помещении [2].

Для очищения и кондиционирования воздуха в настоящее время предлагается множество устройств с различным механизмом действия, но не менее перспективной является стратегия пассивной деградации загрязнителей воздуха внутри жилых и производственных помещений. В этом случае строительные отделочные материалы могут играть новую роль: за счет использования функциональных добавок отделочные материалы физически и/или химически связывают химические загрязнители, а в идеальном случае обеспечивают их деградацию до безопасных соединений [3, 4].

Пассивная деградация загрязнителей воздуха посредством строительных материалов может быть осуществлена за счет трех подходов к выбору функцио-

нальных добавок: во-первых, использование адсорбционно-активных материалов в отделке [5–7]; во-вторых, применение материалов, химически связывающих поллютанты в твердые соединения или обеспечивающие их необратимую сорбцию (Naik T.R., Shah T.C., Krauss R.N., Canpolat F., Chung Y.-M. CO₂ sequestration in no-fines concrete. Report No. CBU-2005-15 August 2005 REP-586 Available: <http://www4.uwm.edu/cbu/Papers/2005%20CBU%20Reports/REP-586.pdf>; Naik T.R., Kumar R., Kraus R.N. Carbon dioxide sequestration in cementitious products//By Report No. CBU-2009-12 August 2009 REP-650 Available: <https://www4.uwm.edu/cbu/Papers/2009%20CBU%20Reports/REP-650.pdf>); в-третьих, использование каталитически активных материалов, способных обеспечить разложение поллютантов до безопасных соединений [1].

Недостатком первого подхода является то, что при измерении температуры в помещении, концентрации поллютанта и пр. возможна десорбция обратно в воздух, поэтому такой способ можно применить для регулирования влажности помещения, одоризации воздуха, когда десорбция вещества является необходимым этапом процесса. Второй подход подразумевает, что после насыщения материала или после расходования всего реагента отделочный материал теряет свою функцию пассивной деградации и требует нанесения нового свежего слоя. Этим недостатком лишен третий подход, так как снижение активности катализатора может протекать довольно медленно, а катализатор подвергается периодической реактивации [8]. Так как для условий помещения речь идет о низкотемпературном катализе, то особое внимание уделяется фотокаталитическим материалам, приобретающим активность при освещении светом определенного спектра, чаще всего ультрафиолетового. Известно несколько классов соединений, обладающих фотокаталитической активностью, подробный обзор которых представлен в [9], однако наиболее изученным и апробированным является диоксид титана [10]. К настоящему времени доказано, что диоксид титана способен разлагать многие летучие органические поллютанты, в том числе алканы, алкены, кетоны, ароматические углеводороды [10, 11].

Из публикаций по строительным и конструкционным материалам с фотокаталитическими компонентами наиболее полный обзор способов применения, в том числе на основе диоксида титана, представлен в [1], а также результаты исследований различного тестирования диоксида титана в качестве функциональной добавки приведены в [12–19].

Например, авторы [1] рассматривают уже реализованные на практике технологии использования фотокатализаторов в строительных материалах и в устройствах для очистки воздуха и воды.

Фотокаталитические стекла — тонкие пленки TiO₂ также могут поглощать частицы и, следовательно, разлагать органические и неорганические

(химически присутствующие в восстановленной форме) загрязняющие вещества, в конечном итоге высвобождая продукты их окисления путем легкого мытья простой водой, тем самым предотвращая стекло от загрязнения. Кроме того, супергидрофильная поверхность не может адсорбировать органические маслянистые жидкости, а напротив, сильно их вытесняет. Поскольку пленки TiO₂ фотокаталитически активны и супергидрофильны, они могут работать в обоих направлениях (фотокаталитическое разложение загрязняющих веществ, с одной стороны, и отторжение органических жидких частиц, вызванное супергидрофильными характеристиками, — с другой).

Цемент и керамика, модифицированные TiO₂. Бетонные материалы можно модифицировать простым добавлением определенного количества сухого диоксида титана в количестве 0,1–5% по отношению к основному материалу. Полученный материал обычно используется только во внешнем слое толщиной не более 1 см, так как внутренние необлученные участки не будут активны. Таким образом, следует использовать только тонкий внешний слой, поэтому компонент TiO₂ должен включать в себя внешний слой или наноситься как специальное покрытие, например для нанесения на него золя TiO₂ путем простого распыления. Применение фотокаталитических керамических плиток может обеспечить соответствующую стерилизацию благодаря их противомикробным свойствам. Фотокаталитическая плитка может разлагать бактерии, такие как кишечная палочка, после того как они адсорбируются на ее поверхности. Этот эффект значительно усиливается при легировании TiO₂ наночастицами серебра или меди. Кроме того, легирование серебром и медью обеспечивает умеренную противомикробную активность даже при отсутствии света, поэтому настоятельно рекомендуется, когда важен бактерицидный эффект даже на затененных поверхностях например, в больницах.

Устройства для очистки воды и воздуха. Описаны различные устройства для разложения пестицидов и цианидов в воде, а также различные устройства для очистки воздуха, пропускающие воздух через камеру, где установлен TiO₂-содержащий материал и источник ультрафиолета.

Однако сложность применения этого метода заключается в том, что далеко не все модификации диоксида титана проявляют каталитическую активность, имеют развитую удельную поверхность контакта фаз для обеспечения сорбционных свойств, испытывают влияние различных примесей, климатических условий и пр. Поэтому синтез фотокатализаторов на основе диоксида титана является важной задачей, чему посвящены многие исследования как за рубежом, так и в Российской Федерации [6, 10].

В настоящей статье представлены результаты исследования материалов, полученных нанесением



Рис. 1. Образец материала, полученного нанесением диоксида титана на каолинит

Fig. 1. Sample of material obtained by applying titanium dioxide to kaolinite

ем диоксида титана на мелкодисперсный порошок каолинита. В качестве сырья использовали титановую стружку механической обработки резанием металлического титана, каолинит седиментационной очистки, серную кислоту. При разработке способа синтеза учитывали, что нанесение тонкого слоя диоксида титана (толщиной несколько микрон) на подложку из оксидов алюминия и кремния способствует усилению фотокаталитической активности [20, 21]. В процессе синтеза использовали концентрированную серную кислоту, из-за чего примеси серы оставались в синтезированном материале более 1 мас. %, это позволяло рассматривать серу в качестве допирующего агента. Согласно результатам исследования [22] присутствие серы способствует формированию более активной модификации диоксида титана – анатаза, а также может привести к смещению активности материала в область видимого света. Результаты исследований материалов, полученных при синтезе, подробно описаны авторами в [23]; настоящая статья посвящена исследованию материала как компонента строительных материалов для финишной отделки помещений.

Как показано в [23], высокую активность и стабильность свойств во времени продемонстрировал образец, полученный при соотношении каолин – реакционный раствор 1:6 и температуре прокаливания 750°C – ID образца K(1:6)-750. Вид материала представлен на рис. 1.

Элементный состав образца, определенный методом SEM-EDXA с использованием оборудования FESEM ZEISS SUPRA 40, показал присутствие следующих элементов (мас. %): алюминий – 21,1; кремний – 15,54; кислород – 43,13; сера – 1,23; титан – 16,7, в пересчете на диоксид титана – 386,09 мг/г. Средний размер частиц порошка, рассчитанный методом секущих, по фотоснимкам оптической микроскопии составил $2,72 \pm 0,14$. Со структурными харак-



Рис. 2. Шпатлевка Vetonit LR+: а – шпатлевка без добавки; б – с TiO_2 -содержащим компонентом

Fig. 2. Vetonit LR+ putty: a – putty without additive; b – with TiO_2 -containing component

теристиками, исследованием адсорбционной и фотокаталитической активностей материала можно подробно ознакомиться в [22].

Оценка эффективности фотокатализаторов в строительных материалах является решающей целью реализации стратегии IAQ, поэтому для тестирования выбраны следующие материалы финишной отделки: шпатлевка, керамика, полиуретановый лак. Сравнение образца, содержащего материал K(1:6)-750, проводили по образцу товарного материала. Исследование проводили в емкостном герметичном реакторе объемом 0,45 л, в крышку которого вмонтировано девять источников УФ (LED DFL-5013UVC-380, длина волны излучения 380–400 нм). В качестве поллютанта использовали метилэтилкетон (МЭК), начальная концентрация которого составила 17,9 мг/л. Содержание МЭК в воздухе рабочей зоны реактора при интенсивном перемешивании контролировали периодически с использованием хроматографа «Кристалл 2000М».

Приведем краткую характеристику материалов и способы приготовления образцов.

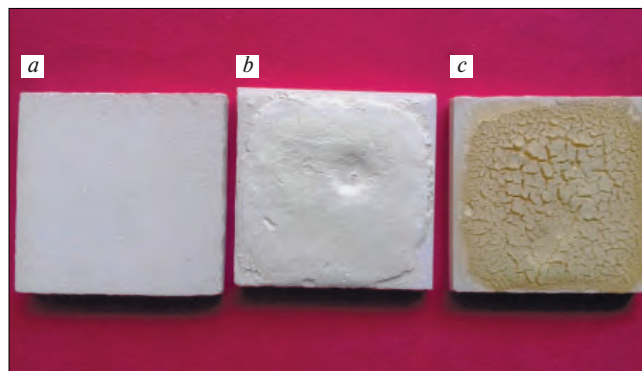


Рис. 3. Керамическое покрытие: а – основа; б – основа с TiO_2 -содержащим компонентом, температура спекания 900°C; с – основа с TiO_2 -содержащим компонентом, температура спекания 1120°C

Fig. 3. Ceramic coating: a – base; b – base with TiO_2 -containing component, sintering temperature 900°C; c – base with TiO_2 -containing component, sintering temperature 1120°C

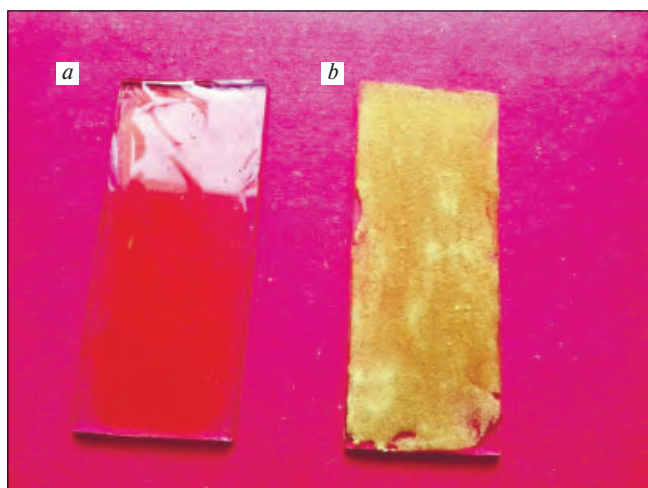


Рис. 4. Лак Parkettlack Düfa: а – лак; б – лак с TiO_2 -содержащим компонентом

Fig. 4. Parkettlack Düfa varnish: а – varnish; б – lacquer with TiO_2 -containing component

1. Шпатлевочное финишное покрытие.

Основной отделочный материал: шпатлевка финишная белая полимерная Vetonit LR+ производства компании Saint-Gobain, имеющая в составе наполнитель – известняк, связующее – полимерный клей. Для приготовления образца 3 г сухой штукатурки смешивали с водой и наносили на металлическую сетку площадью 10 см^2 . Вторым образцом готовили аналогично, но сразу после нанесения основного слоя добавили 0,3 г образца K(1:6)-750 на поверхность и загладили шпателем (рис. 2).

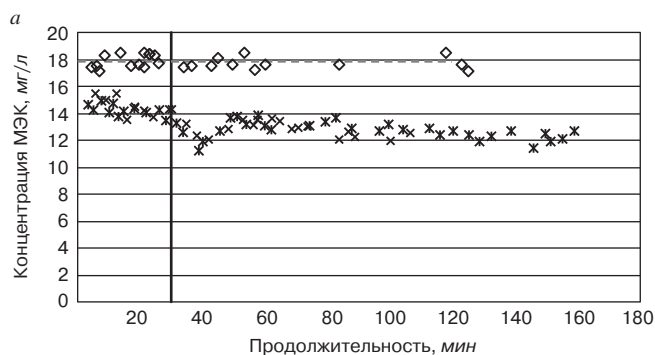
2. Керамическое покрытие.

В качестве подложки использовали заготовку для керамической плитки из белой глины размером 9 см^2 (рис. 3, а). Этот образец был использован как образец сравнения, на аналогичный материал наносили 0,5 г K(1:6)-750. Так как для спекания диоксида титана требуется высокая температура, то в качестве добавки, понижающей температуру, использовали каолинит 0,25 г к порошку материала. В исследовании участвовали два образца с разной температурой спекания, так как первый образец попытались получить при температуре 900°C (рис. 3, б) [24], однако температура была недостаточна для спекания, поэтому приготовили второй образец с таким же количеством материала, который спекался при температуре 1120°C (рис. 3, в). Так как в [24] описывалось снижение активности TiO_2 -содержащей керамики при повышении температуры спекания выше 900°C , то на УФ тестировали оба образца.

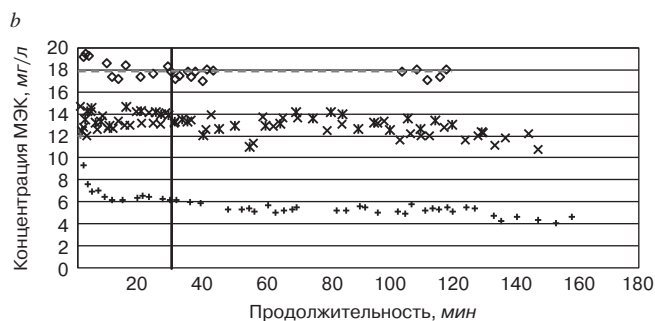
3. Лакокрасочное покрытие.

В качестве основы использовали паркетный лак Parkettlack производства компании Düfa на основе алкидных и полиуретановых смол. В качестве подложки использовали стекло площадью 10 см^2 , на которое наносили лак (0,41 г) и 0,2 г материала (рис. 4).

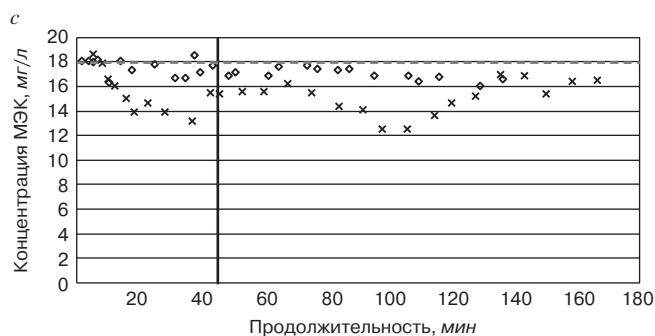
Образцы высушивали на воздухе несколько дней, а затем испытывали в реакторе, добавляя через мембрану 10 мкл МЭК и обеспечивая интен-



— Включение УФ
× Vetonite LH+ K(1:6)-750 (эксперимент 1)
× Vetonite LH+ K(1:6)-750 (эксперимент 2)
◇ Vetonite LH+ без диоксида титана



◇ Керамическая основа (черепок)
× Керамика+ K(1:6)-750, спекание 1120°C (эксперимент 1)
— Включение УФ
× Керамика+ K(1:6)-750, спекание 1120°C (эксперимент 2)
+ Керамика+ K(1:6)-750, спекание 900°C



◇ Лак без диоксида титана
× Лак+ K(1:6)-750
— Включение УФ

Рис. 5. Результаты тестирования строительных материалов: а – шпатлевка; б – керамическое покрытие; в – лак на основе алкидных и полиуретановых смол

Fig. 5. Test results of building materials: а – putty; б – ceramic coating; в – lacquer based on alkyd and polyurethane resins

сивное перемешивание воздуха. Так как в данном случае главным являлось определение качественного проявления активности материала, то принята следующая схема проведения эксперимента: первоначально после введения МЭК отбор проб проводился 0,5 ч в условиях светоизоляции, а затем подключали LEDs DFL-5013UVC-380 и дальнейшее изменение концентрации проводили в течение 2,5 ч.

Результаты всех тестов приведены на рис. 5.

Наиболее высокая эффективность деградации МЭК отмечена при использовании шпатлевки (рис. 5, а): в первые полчаса наблюдается снижение концентрации МЭК при условиях светоизоляции за счет адсорбции, а затем после включения источника УФ наблюдается устойчивый тренд на снижение концентрации. Затруднительно объяснить резкое понижение концентрации непосредственно после включения LEDs, которая затем несколько повышалась. Но такой эффект был замечен в нескольких повторениях.

Керамическое покрытие (рис. 5, б) несомненно активно только при термообработке 900°C, однако спекания при этой температуре не происходит: покрытие держится на черепке довольно прочно, но при контакте оставляет следы на руках. При более высокой температуре спекания слой проявляет адсорбционную активность, однако включение УФ не повлияло на снижение концентрации так же явно, как и первого образца. Есть снижение концентрации после 2 ч облучения, но оно проявляется не в каждом случае, а в основном уровень концентрации МЭК соответствует установившемуся после выдержки в условиях темноты.

В данном случае можно добиться снижения температуры спекания добавлением «плавней» — веществ, снижающих температуру спекания керамики. Самым простым вариантом является добавление хлорида натрия в таком количестве, чтобы содержание оксида натрия соответствовало 3–4 мас. % смеси. Однако в данном случае нужно рассмотреть, как изменится пористая структура покрытия и как натрий будет влиять на УФ-чувствительность материала.

Тестирование лакокрасочного покрытия (рис. 5, в) показало труднообъяснимые результаты: во-первых, при тестировании образца без диоксида титана наблюдалось снижение концентрации МЭК во всей продолжительности наблюдения; во-вторых, добавление активного компонента увеличило адсорбцию в условиях светоизоляции, но затем значение концентрации увеличилось, и наблюдался волнообразный процесс сорбции-десорбции. Для объяснения такого поведения в качестве предварительной версии можно предположить, что при УФ-облучении начинается взаимодействие наполнителя с компонентами лака или растворителя, а также необходимо учитывать влияние УФ на полиуретан, как и на все полимеры (УФ-деградация пластмасс). Возможно, такое использование материала в лакокрасочных покрытиях требует более строгого подхода к подбору пленкообразователя.

Остается дискуссионным вопрос появления промежуточных продуктов разложения, которые могут представлять большую опасность, чем сам поллютант. Но в этом случае считаем возможным сослаться на [25], где утверждается, что практика исследований разложения различных органических веществ не по-

зволила обнаружить в продуктах какие-то другие вещества, кроме диоксида углерода, воды и небольшого количества монооксида углерода.

Выводы

Таким образом, разработанный в результате исследований материал может являться компонентом строительных материалов для снижения уровня органических поллютантов воздуха, особенно при нанесении его на верхний слой шпатлевки, остальные два подхода требуют дополнительных исследований способов нанесения, использования дополнительных материалов, области использования.

Список литературы / References

1. Augugliaro V., Loddo V., Pagliaro M., Palmisano G., Palmisano L. Clean by light irradiation: practical applications of supported TiO₂. *The Royal Society of Chemistry*. Cambridge CB40WF, UK. 2010
2. Matsumoto H., Shimizu M., Sato H. The contaminant removal efficiency of an air cleaner using the adsorption/desorption effect. *Building and Environment*. 2009. Vol. 44, pp. 1371–1377. doi: 10.1016/j.buildenv.2008.09.006
3. Kunkel D., Gall E., Siegel J.A., Novoselac A., Morrison G.C., Corsi R.L., Passive reduction of human exposure to indoor ozone. *Building and Environment*. 2010. Vol. 45, pp. 445–452.
4. Senff L., Tobaldi D.M., Lucas S., Hotza D., Ferreira V.M., Labrincha J.A., Formulation of mortars with nano-SiO₂ and nano-TiO₂ for degradation of pollutants in buildings. *Journal of Composite Materials*. 2012. Vol. 44. Part B, pp. 40–47. doi: 10.1016/j.compositesb.2012.07.022
5. Liu Y., Zhou X., Wang D., Song C., Liu J. A prediction model of VOC partition coefficient in porous building materials based on adsorption potential theory. *Building and Environment*. 2015. Vol. 93, pp. 221–233.
6. Weschler Ch. J., Nazaroff W. W. Semivolatile organic compounds in indoor environments. *Atmospheric Environment*. 2008. Vol. 42, pp. 9018–9040.
7. Meininghaus R., Gunnarsen L., Knudsen H.N. Diffusion and sorption of volatile organic compounds in building materials-impact on indoor air quality. *Environmental Science & Technology*. 2000. Vol. 34, pp. 3101–3108. doi:10.1021/es991291i
8. Kozlov D. Titanium dioxide in gas-phase photocatalytic oxidation of aromatic and heteroatom organic substances: deactivation and reactivation of photocatalyst. *Theoretical and Experimental Chemistry*. 2014. Vol. 50. No. 3, pp. 133–154.
9. Paola A.D., García-López E., Marci G., Palmisano L. A survey of photocatalytic materials for environmental remediation. *Journal of Hazardous Materials*. 2012. Vol. 211–212, pp. 3–29.

10. Zhong L., Haghghat F. Photocatalytic air cleaners and materials technologies: Abilities and limitations. *Building and Environment*. 2015. Vol. 91, pp. 191–203.
11. Einaga H., Futamura S., Ibusuki T. Heterogeneous photocatalytic oxidation of benzene, toluene, cyclohexene and cyclohexane in humidified air: comparison of decomposition behavior on photoirradiated TiO₂ catalyst. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2002. Vol. 38, pp. 215–225.
12. Шестаков Н.И., Алексеева Д.С., Полосина Д.В. Применение фотокаталитических бетонов в дорожном строительстве // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2021. № 12. С. 16–26. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-12-16-26
12. Shestakov N.I., Alekseeva D.S., Polosina D.V. Application of photocatalytic concretes in road construction. *Vestnik BSTU name after V.G. Shukhov*. 2021. No. 12, pp. 16–26. (In Russian). DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-12-16-26
13. Антоненко М.В., Огурцова Ю.Н., Строкова В.В., Губарева Е.Н. Фотокаталитически активные самоочищающиеся материалы на основе цемента. Составы, свойства, применение // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020. № 3. С. 16–25. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-16-25
13. Antonenko M.V., Ogurtsova Yu.N., Strokova V.V., Gubareva E.N. Photocatalytically active self-cleaning materials based on cement. Compositions, properties, application. *Vestnik BSTU name after V.G. Shukhov*. 2020. No. 3, pp. 16–25. (In Russian). DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-16-25
14. Лукутцова Н.П., Постникова О.А., Соболева Г.Н., Ротарь Д.В., Оглоблина Е.В. Фотокаталитическое покрытие на основе добавки нанодисперсного диоксида титана // *Строительные материалы*. 2015. № 11. С. 5–8.
14. Lukutsova N.P., Postnikova O.A., Soboleva G.N., Rotar D.V., Ogloblina E.V. Photocatalytic coating based on the addition of nanodispersed titanium dioxide. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 11, pp. 5–8. (In Russian).
15. Хела Р., Боднарова Л. Исследование возможности тестирования эффективности фотокатализа TiO₂ в бетоне // *Строительные материалы*. 2015. № 2. С. 77–81.
15. Hela R., Bodnarova L. Study of the possibility of testing the efficiency of TiO₂ photocatalysis in concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 2, pp. 77–81. (In Russian).
16. Баженов В.К., Червонцева М.А. Эффективность применения фотокаталитических бетонов в городском строительстве // *Вестник МИТУ-МАСИ*. 2018. № 3. С. 27–31.
16. Vazhenov V.K., Chervontseva M.A. Efficiency of using photocatalytic concretes in urban construction. *Vestnik MITU-MASI*. 2018. No. 3, pp. 27–31. (In Russian).
17. Фаликман В.Р., Вайнер А.Я. Фотокаталитические цементные композиты, содержащие мезопористые наночастицы диоксида титана // *Нанотехнологии в строительстве*. 2014. Т. 6. № 1. С. 14–26.
17. Falikman V.R., Weiner A.Ya. Photocatalytic cement composites containing mesoporous titanium dioxide nanoparticles. *Nanotechnologii v stroitelstve*. 2014. Vol. 6. No. 1, pp. 14–26. (In Russian).
18. Фаликман В.Р., Вайнер А.Я. Новые высокоэффективные добавки для фотокаталитических бетонов. Синтез и исследование // *Нанотехнологии в строительстве*. 2015. Т. 7. № 1. С. 18–28. DOI: 10.15828/2075-8545-2015-7-1-18-28
18. Falikman V.R., Weiner A.Ya. New highly effective additives for photocatalytic concretes. Synthesis and research. *Nanotechnologii v stroitelstve*. 2015. Vol. 7. No. 1, pp. 18–28. (In Russian). DOI: 10.15828/2075-8545-2015-7-1-18-28
19. Ляпидевская О.Б., Фрайнт М.А. Фотокаталитический бетон для дорожного строительства // *Вестник МГСУ*. 2014. № 2. С. 125–130.
19. Lyapidevskaya O.B., Freint M.A. Photocatalytic concrete for road construction. *Vestnik MSUCE*. 2014. No. 2, pp. 125–130. (In Russian).
20. Anpo M., Kawamura T., Kodama S., Maruya K., Onishi T. Photocatalysis on titanium-aluminum binary metal oxides: enhancement of the photocatalytic activity of titania species. *Journal of Physical Chemistry*. 1988. Vol. 92 (2), pp. 438–440.
21. Anpo M., Nakaya H., Kodama S., Kubokawa Y., Domen K., Onishi T. Photocatalysis over binary metal oxides: enhancement of the photocatalytic activity of TiO₂ in titanium-silicon oxides. *Journal of Physical Chemistry*. 1986. Vol. 90, pp. 1633–1636.
22. Ohno B.T., Akiyoshi M., Umebayashi T., Asai K., Mitsui T., Matsumura M. Preparation of S-doped TiO₂ photocatalysts and their photocatalytic activities under visible light. *Applied Catalysis A: General*. 2004. Vol. 265, pp. 115–121.
23. Бондаренко В.В., Руэлло М.Л., Бондаренко А.В., Петухова Г.А., Дубинина Л.А. Исследование адсорбционно-структурных характеристик и фотоактивности композита TiO₂/каолинит. *Физико-химия поверхности и защита материалов*. 2019. Т. 55. № 2. С. 127–143.
23. Bondarenko V.V., Ruello M.L., Bondarenko A.V., Petukhova G.A., Dubinin L.A. A Study of the Adsorption-Structural Parameters and Photoactivity of TiO₂/kaolinite Composite. *Fiziko-khimiya poverkhnosti i zashchita materialov*. 2019. Vol. 55. No. 2, pp. 217–233. (In Russian).
24. Tobaldi D.M., Tucci A., Camera-Roda G., Baldi G., Esposito L. Photocatalytic activity for exposed building materials. *Journal of the European Ceramic Society*. 2008. Vol. 28, pp. 2645–2652.
25. Selishchev D.S., Kolobov N.S., Pershin A.A., Kozlov D.V. TiO₂ mediated photocatalytic oxidation of volatile organic compounds: formation of CO as a harmful by-product. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2017. Vol. 200, pp. 503–515. DOI: 10.1016/j.apcatb.2016.07.044



К 75-ЛЕТИЮ Александра Дмитриевича КОРНЕЕВА

Исполнилось 75 лет Александру Дмитриевичу Корнееву – доктору технических наук, профессору, заслуженному деятелю науки Российской Федерации.

Профессиональная деятельность А.Д. Корнеева связана с Липецким государственным техническим университетом, где он проработал более 40 лет и прошел путь от ассистента до заведующего кафедрой. Создание кафедры «Строительные материалы» и организация подготовки инженеров-строителей-технологов по специальности «Производство строительных материалов, изделий и конструкций» в 1988 г. осуществлялись при его непосредственном участии.

25 лет Александр Дмитриевич руководил этой кафедрой.

В стенах Липецкого государственного технического университета на инженерно-строительном факультете под руководством А.Д. Корнеева создана научная школа «Исследования структурообразования, технологии и проектирование составов строительных композиционных материалов специального назначения». У истоков создания научного коллектива стояли академик РААСН, д-р техн. наук В.И. Соломатов и канд. техн. наук А.К. Книппенберг.

Результаты научных исследований А.Д. Корнеева внедрены в практику в виде нормативных и рекомендательных материалов в «Рекомендациях по подбору составов полимерных связующих и полимербетонов» Минтяжстроя СССР и «Руководстве по проектированию конструкций из армополимербетона на полиэфирных смолах» Министерства цветной металлургии СССР.

Разработанная Александром Дмитриевичем технология приготовления полимербетонных смесей внедрена на объектах «ЦЧОсельстроймонтаж» в Липецке, Белгороде, Кишиневе при изготовлении теплопроводов для бесканальной прокладки теплопроводов, а также при устройстве монолитных непылящих и химически стойких полов на Лебедянском сахарном заводе (Липецкая обл.) и Липецком заводе пивобезалкогольных напитков. Методы исследований свойств строительных материалов и их компонентов получили промышленное внедрение в АО «Железобетон» г. Липецка, в НПО «Полимерстройматериалы», на Новосибирском заводе химконцентратов.

На протяжении ряда лет А.Д. Корнеев являлся членом диссертационных советов при Воронежском инженерно-строительном институте и Волгоградском государственном архитектурно-строительном университете. Им опубликовано более 300 печатных работ, в том числе 7 монографий, 24 авторских свидетельства на изобретения и патента. Под руководством Александра Дмитриевича защищены 15 кандидатских диссертаций и подготовлен доктор технических наук.

Редакция и редакционный совет, коллеги и ученики искренне поздравляют Александра Дмитриевича Корнеева с 75-летием и желают крепкого здоровья, бодрости духа, успехов во всех начинаниях и благополучия.

УДК 691.342

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-11-17>

Б.А. БОНДАРЕВ, д-р техн. наук (Lnsp-48@mail.ru), А.Д. КОРНЕЕВ, д-р техн. наук (smidt48@mail.ru), П.В. БОРКОВ, канд. техн. наук (borkovpv@mail.ru), А.Б. БОНДАРЕВ, канд. техн. наук (ialex-86@mail.ru), В.К. ЖИДКОВ, студент (gidkov_vova_1999@mail.ru), Д.А. КОПАЛИН, аспирант (terminato948@mail.ru)

Липецкий государственный технический университет (398055, г. Липецк, ул. Московская, 30)

Исследование циклической долговечности стеклопластполимербетона для ремонта и восстановления конструкций транспортных сооружений

Затронута проблема оценки остаточного ресурса эксплуатирующихся строительных конструкций транспортных сооружений. Разработан алгоритм реализации программы безопасной эксплуатации транспортных сооружений. На основе данных, полученных в ходе натурных обследований, установлены характерные дефекты строительных конструкций мостов из бетона и железобетона. Предложено восстановление поврежденных конструкций выполнять с помощью полимерных композиционных материалов. Представлены результаты исследования циклической долговечности полимербетона, армированного стеклопластиковой арматурой. При этом коэффициент выносливости выступает критерием оценки циклической долговечности, поскольку определяет долю сохранившейся прочности (несущей способности) по окончании воздействия повторно-переменной (циклической) нагрузки. Анализ полученных данных указывает на целесообразность использования полимербетона на основе фурафурацетонной смолы (ФАМ), армированного стеклопластиковой арматурой, при восстановлении и защите конструкций плит проезжей части пролетных строений мостов и путепроводов.

Ключевые слова: циклическая долговечность, стеклопластиковая арматура, полимербетон, плита проезжей части, коэффициент корреляции, выносливость.

Для цитирования: Бондарев Б.А., Корнеев А.Д., Борков П.В., Бондарев А.Б., Жидков В.К., Копалин Д.А. Исследование циклической долговечности стеклопластопolyмербетона для ремонта и восстановления конструкций транспортных сооружений // *Строительные материалы*. 2023. № 1–2. С. 11–17. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-11-17>

B.A. BONDAREV, Doctor of Sciences (Engineering) (lnsp-48@mail.ru), A.D. KORNEEV, Doctor of Sciences (Engineering) (smidt48@mail.ru), P.V. BORKOV, Candidate of Sciences (Engineering) (borkovpv@mail.ru), A.B. BONDAREV, Candidate of Sciences (Engineering), (ialex-86@mail.ru), V.K. ZHIDKOV, Student, (gidkov_vova_1999@mail.ru), D.A. KOPALIN, Postgraduate, (terminato948@mail.ru)
Lipetsk State Technical University (30, Moskovskaya Street, Lipetsk, 398055, Russian Federation)

Study of the Cyclic Durability of Fiberglass Polymer Concrete for the Repair and Restoration of Structures of Transport Facilities

The problem of assessing the residual resource of the operating building structures of transport facilities is touched upon. An algorithm for implementing the program of safe operation of transport facilities has been developed. On the basis of data obtained during field surveys, characteristic defects of building structures of bridges made of concrete and reinforced concrete have been established. It is proposed to restore damaged structures using polymer composite materials. The results of a study of the cyclic durability of polymer concrete reinforced with fiberglass reinforcement are presented. In this case, the endurance coefficient acts as a criterion for assessing cyclic durability, since it determines the proportion of the remaining strength (bearing capacity) after the end of the impact of a repeated-variable (cyclic) load. The analysis of the data obtained indicates the feasibility of using polymer concrete based on furfural acetone resin (FAR) reinforced with fiberglass reinforcement in the restoration and protection of the structures of the slabs of the roadway spans of bridges and overpasses.

Keywords: cyclic durability, fiberglass reinforcement, polymer concrete, roadway plate, correlation coefficient, endurance.

For citation: Bondarev B.A., Korneev A.D., Borkov P.V., Bondarev A.B., Zhidkov V.K., Kopalina D.A. Study of the cyclic durability of fiberglass polymer concrete for the repair and restoration of structures of transport facilities. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 1–2, pp. 11–17. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-11-17>

Проблеме установления долговечности строительных конструкций транспортных сооружений (ТС) и определению их остаточного ресурса на отдельных этапах эксплуатации посвящены работы ряда исследователей [1–3]. Во время эксплуатации элементы конструкций ТС испытывают многократные воздействия нагрузок и их количество зачастую достигает $2 \cdot 10^6$ и более циклов. Тогда основным параметром безопасной эксплуатации может выступать циклическая долговечность, т. е. срок службы элемента конструкции под воздействием многократно приложенных нагрузок. Решение подобных задач, касающихся надежности и работоспособности вышеуказанных элементов, можно осуществлять в соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 1.

В первую очередь выявляются опасные эксплуатационные факторы, оказывающие влияние на циклическую долговечность исследуемого элемента, производится обследование элементов конструкций и оценка их состояния с учетом конструктивных особенностей: нагрузки (динамические и статические); климатических условий; технологических факторов.

В дальнейшем оценивается фактическое состояние материала эксплуатирующейся конструкции путем выявления характера дефектов и повреждений, производится их детальное описание и инструментальное измерение, устанавливаются причины их возникновения.

Результаты обследований транспортных сооружений (мостов и путепроводов) со сталежелезобетонными пролетными строениями показывают, что наиболее уязвимым элементом является плита проезжей части, изготавливаемая, как правило, из желе-

зобетона. В качестве эффективной альтернативы железобетону для подобных конструкций целесообразнее использовать полимербетоны на различных связующих, обладающие высокой коррозионной стойкостью, армированные стеклопластиковой

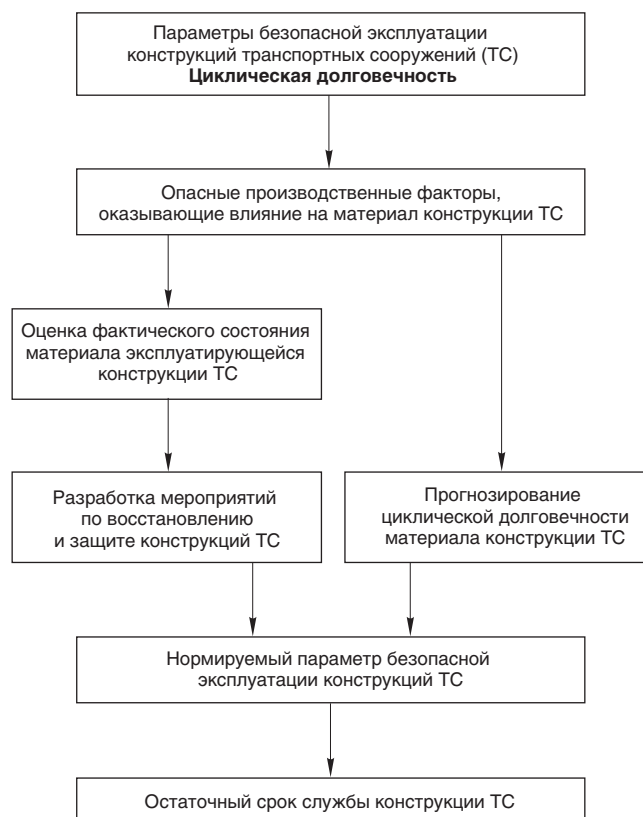


Рис. 1. Основные этапы реализации программы по безопасной эксплуатации транспортного сооружения
Fig. 1. The main stages of the implementation of the program for the safe operation of the transport facility



Рис. 2. Разрушение бетона с обнажением и коррозией арматуры
Fig. 2. Destruction of concrete with exposure and corrosion of reinforcement



Рис. 3. Дegrадационное разрушение бетона с обнажением и коррозией арматуры
Fig. 3. Degradation of concrete with exposure and corrosion of reinforcement



Рис. 4. Следы замкания поверхности бетона
Fig. 4. Traces of concrete surface blocking



Рис. 5. Шелушение поверхности бетона
Fig. 5. Exfoliation of concrete surface

арматурой (СПА) и способностью набирать прочность в кратчайшие сроки [4].

Практической стороной настоящего исследования является пример оценки циклической долговечности конкретного элемента транспортного сооружения во время технического обследования. На рис. 2–5 приведены основные дефекты и повреждения плиты проезжей части, обнаруженные при обследовании части моста по ул. Кирпичной в г. Белгороде.

На первом этапе были установлены характерные дефекты и повреждения материала конструкции: разрушение бетона и коррозия арматуры; деградационное разрушение бетона; следы замкания поверхности бетона; растрескивание и шелушение поверхности бетона; отслоение защитного слоя бетона.

На втором этапе работы проведена оценка фактического состояния материала плиты проезжей части, включающая в себя: измерение фактической прочности бетона плиты; определение толщины дорож-

ной одежды проезжей части; оценку степени коррозии рабочей и распределительной арматуры; измерение толщины защитного слоя бетона плиты; измерение глубины карбонизации бетона плиты; определение наличия хлоридов в защитном слое бетона плиты.

Затем осуществляют переход к третьему этапу, заключающемуся в разработке мероприятий по восстановлению и защите конструкций плиты с использованием полимерных композиционных материалов (ПКМ) или полной замене конструкции из железобетона на стеклопластполимербетонную [5–9]. Наряду с этим необходимо исследовать циклическую долговечность полимербетона, стеклопластиковой арматуры (СПА) и конструкций, армированных СПА, – стеклопластполимербетона.

В табл. 1 приведены рекомендательные характеристики для создания такой конструкции. Испытания проводят с определением параметров циклической долговечности (коэффициент выносливости, предел выносливости) по общепринятой методике в [7, 8].

Таблица 1
Table 1

Рекомендуемые составы полимерных композиционных материалов
Recommended compositions of polymer composite materials

Наименование ПКМ	мас. %								
	Щебень	Песок	Андезитовая мука	Смола	Нафтенат кобальта	Гипериз	Молотый кварц	ПЭПА	БСК
Полимербетон ПН-609-21М	52	28	22	9	8 (от массы смолы)	4 (от массы смолы)	–	–	–
Полимербетон ПН-1	52	28	–	9	8 (от массы смолы)	4 (от массы смолы)	11	–	–
Полимербетон ФАЭИС-30	50	19	26,5	12	–	–	–	2,5	–
Полимербетон ФАМ	52	28	10	10	–	–	–	–	2 (от массы смолы)

Таблица 2
Table 2

Нормативные и расчетные характеристики стеклопластиковой арматуры
Regulatory and design characteristics of the glass-reinforced plastic reinforcement

Вид характеристики	Нормативное значение	Выборочная дисперсия	Выборочное среднее квадратичное отклонение	Выборочный коэффициент вариации	Коэффициент изменчивости	Расчетное значение
Разрывное усилие, кН	39	2,89	1,7	4,36	0,87	34
Предельная растяжимость ($\varepsilon \cdot 10^{-4}$)	278,2	131,41	11,46	4,12	0,87	242
Модуль упругости, МПа	50125	4874130	2207,74	4,4	0,86	43105

Таблица 3
Table 3

Характеристики стеклопластиковой арматуры периодического профиля
Characteristics of glass-reinforced plastic reinforcement of periodic profile

Номинальный диаметр, мм	Прочность				Модуль упругости, МПа
	Предельная		Расчетная (долговременная)		
	кН	МПа	кН	МПа	
12	100	890	56	500	Не менее 45000
13	137		77		
16	179		100		
18	226		127		

При этом коэффициент выносливости является критерием оценки циклической долговечности ПКМ и его физический смысл заключается в том, что он показывает долю сохранившейся прочности или несущей способности после воздействия циклической нагрузки для принятой базы испытаний:

$$K_{в, pul} = \frac{R_{в, pul}}{R_{в}}, \quad (1)$$

где $R_{в, pul}$ – предел выносливости ПКМ; $R_{в}$ – предел прочности ПКМ при сжатии [5].

Циклическим испытаниям предшествовали испытания на кратковременное воздействие нагрузок с целью определения статически обоснованного предела прочности. Для ПКМ вышеуказанного состава $R_{в} = 64$ МПа [8]. Результаты испытаний на цикличе-

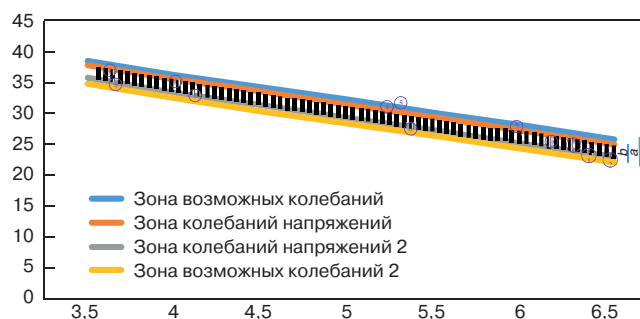


Рис. 6. Эмпирическая линия выносливости полимербетона ФАМ при $\rho=0,3$: а – зона возможных колебаний напряжений; б – зона колебаний напряжений

Fig. 6. Empirical endurance line of polymer concrete FАM at $\rho=0,3$: a – zone of possible stress fluctuations; b – voltage oscillation zone

ское воздействие нагрузки приводятся в табл. 2, а на рис. 6 показана эмпирическая линия выносливости полимербетона ФАМ. СПА испытывали на растяжение при $\rho=0,3$. Результаты приведены в [8, 10] и сведены в табл. 2 [11].

$$M_{ср, y} = \frac{\sum Y}{n} = \frac{351,2}{12} = 29,27 \text{ МПа};$$

$$M_{ср, x} = \frac{\sum X}{n} = \frac{62,923}{12} = 5,244 \text{ МПа}.$$

Отклонение от среднearифметических значений:

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum (Y - M_{ср, y})^2}{n}} = \sqrt{\frac{253,492}{12}} = \pm 4,596 \text{ МПа};$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (X - M_{ср, x})^2}{n}} = \sqrt{\frac{12,59}{12}} = \pm 1,02 \text{ МПа}.$$

**Таблица 4
Table 4**

**Результаты экспериментальных исследований циклической долговечности полимербетона
Results of experimental studies of cyclic durability of polymer concrete**

№ образца	Напряжение, МПа	Число циклов N	Отклонение напряжения от среднего значения	Квадрат. отклонение напряжения	LgN	Отклонение LgN от среднего значения	Квадрат. отклонение LgN	Произведение отклонений
П 1-3	36,2	5629	6,93	48,02	3,75	-1,494	2,232	-10,353
П 1-2	35	12305	5,72	32,83	4,09	-1,154	1,332	-4,304
П 1-5	33	17475	3,73	13,91	4,242	-1,002	1,004	-2,735
П 1-1	31	199753	1,73	2,99	5,3	0,0056	0,0031	0,098
П 1-4	30,5	184844	1,23	1,512	5,267	0,023	0,001	0,0282
П 1-9	28	210749	-1,27	1,613	5,324	0,08	0,0053	-0,1016
П 1-7	27,5	825612	-1,77	3,132	5,917	0,673	0,453	-1,191
П 1-8	34,5	4281	5,23	27,353	3,632	-1,612	2,599	-8,431
П 1-6	25,5	1416806	-3,77	14,213	6,151	0,907	0,83	-3,419
П 1-12	24,5	2172639	4,77	22,753	6,337	1,093	1,195	-5,214
П 1-11	23	2737157	6,27	39,313	6,437	1,193	1,423	-7,48
П 1-10	22,5	2993428	-6,77	45,833	6,476	1,232	1,518	-8,341
Σ	351,2	10780677	0	253,492	62,923	0	12,59	-51,443

**Таблица 5
Table 5**

**Результаты обработки экспериментальных данных по исследованию выносливости
стеклопластполимербетонных балок с $M=1,77\%$, $\sigma_{сop}=551,2$ МПа
Results of processing experimental data on the study of endurance of fiberglass polymer concrete
beams with $M=1,77\%$, $\sigma_{sop}=551,2$ MPa**

№ балки	Разрушающий изгибающий момент M_p (кН·м)	Отклонение от среднего значения	Квадратичное отклонение	Число циклов до разрушения	LgN	Отклонение от среднего значения	Квадратичное отклонение	Произведение отклонений
БН-1-7	1,45	0,1204	0,347	62200	4,793	-1	1	-0,347
БН-1-8	1,24	0,0188	0,137		5,415	-0,378	0,143	-0,0517
БН-1-9	1,03	0,0053	-0,073	750190	5,875	+0,082	0,00672	-0,00598
БН-1-10	1	0,0106	-0,103	910730	5,959	+0,166	0,0276	-0,0171
БН-1-11	0,95	0,0234	-0,153	1920520	6,283	+0,49	0,24	-0,0749
БН-1-12	0,95	0,0234	-0,153	2710800	6,433	+0,64	0,4096	-0,0979
$M_{cp} = 1,103 \Sigma = 0,202$			$LgN^{cp} = 5,793$			$\Sigma = 1,826 \Sigma = -0,594$		

**Таблица 6
Table 6**

**Сводная таблица результатов циклических испытаний
Summary table of cyclic test results**

№ п/п	Материал	Параметр. критерии усталостной прочности		Коэффициент асимметрии циклов, ρ	Предел прочности, МПа	Частное приложение нагрузки	Базовое число циклов N	Коэффициент выносливости $K_{в,рп}$
1	Полимербетон ФАМ	50,87	4,12	0,3	64	670	$2 \cdot 10^6$	$0,039R_B$
2	Стеклопластиковая арматура (СПА)	2004,6	215,6	0,3	1403	670	$2 \cdot 10^6$	$0,47R$
3	Стеклопластполимербетон	2,985	0,325	0,3	2,04	150	$2 \cdot 10^6$	$0,46M_p$

Коэффициент корреляции:

$$r = \sqrt{\frac{\Sigma(Y-M_{cp,y}) \cdot (X-M_{cp,x})}{n \cdot \sigma_y \cdot \sigma_x}} = \sqrt{\frac{51,448}{12 \cdot 4,596 \cdot 1,02}} = -0,914.$$

Отрицательное значение коэффициента корреляции подтверждает наличие обратной зависимости между σ и N . Увеличение σ соответствует уменьшению нагрузки N . С помощью вычисленных статистических характеристик можем составить линейное корреляционное уравнение:

$$y = M_{cp,y} \pm r \cdot \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (X - M_{cp,x}). \quad (2)$$

Тогда

$$y = 29,27 \pm 0,914 \cdot \frac{4,596}{1,02} \cdot (X - 5,244);$$

$$y = 50,87 - 4,12 \cdot LgN.$$

$$\text{При } N = 2 \cdot 10^6 \text{ и } x = LgN = 6,301$$

$$y = 50,87 - 4,12 \cdot 6,301 = 24,9 \text{ МПа.}$$

Пользуясь корреляционным уравнением для определения средних значений статистической величины Y , мы допускаем ряд ошибок, сумма квадратов которых будет наименьшей из всех возможных. Эта величина называется основной ошибкой корреляционного уравнения или мерой индивидуального рассеивания, выражающего зависимость y от x и обозначается σ_{xy} .

Мера индивидуального рассеивания:

$$\sigma_{xy} = \sigma_y \cdot \sqrt{1 - r^2} = \pm 4,596 \cdot \sqrt{1 - 0,914^2} = \pm 1,86 \text{ МПа.}$$

Вероятная ошибка в определении величин предела выносливости:

$$\sigma \cdot M_{cp,y} = \frac{\sigma_{xy}}{\sqrt{n}} = \frac{1,86}{\sqrt{12}} = \pm 0,538 \text{ МПа.}$$

Зона возможных отклонений предела выносливости с вероятностью 19:1:

$$\sigma_B = y \pm 2\sigma \cdot M_{cp,y} = 24,9 \pm 2 \cdot 0,538 = 25,976 \text{ и } 23,824 \text{ МПа.}$$

Зона индивидуальных отклонений предела выносливости с вероятностью 19:1:

$$\sigma_B = y \pm \sigma_{xy} = 24,9 \pm 1,86 \text{ МПа.}$$

Испытания стеклопластполимербетонных элементов проводились на специально изготовленном стенде, описание которого и методика подробно описаны в ряде работ авторов [5–8]. Необходимо отметить, что СПА в конструкциях, воспринимающих

циклическое воздействие нагрузок, должна быть с предварительным напряжением. В табл. 3 приведены результаты испытаний на циклическое воздействие нагрузки. Было испытано шесть элементов. Уровень нагружения изменялся от 9,8 до 6,5 кН. Наибольшее количество циклов до разрушения получено для БН-1-12, составляет $2,71 \cdot 10^6$, наименьшее количество циклов для БН-1-7 – 62200 циклов. При увеличении числа приложений нагрузки происходит снижение упругих свойств материала, на что указывает рост величины прогибов балок. Проследим этот процесс на примере балки БН-1-12. По прошествии $2 \cdot 10^5$ циклов величина прогиба в балке составляла 4,5 мм, при 10^6 циклов величина прогиба увеличилась до 4,7 мм, а на базе $2 \cdot 10^6$ циклов величина прогиба составила 5 мм. Начиная с $2 \cdot 10^6$ циклов величина прогиба изменялась незначительно и к моменту разрушения составила 5,4 мм. По сравнению с балкой Б-1-6, испытанной при $\rho = 0,1$, величина прогиба снизилась на 0,3 мм, т. е. увеличение коэффициента асимметрии цикла и степень контролируемого напряжения привели к уменьшению величины упругого прогиба. По результатам испытаний балок этой серии построена линия выносливости, уравнение которой запишется как:

$$N_N^{pul} = 2,985 - 0,325 LgN. \quad (3)$$

На базе $2 \cdot 10^6$ циклов $N_N^{pul} = 0,937$ кНм коэффициент корреляции $R = -0,98$, т. е. близок к единице, что говорит о тесной корреляционной связи между N и изгибающим моментом. Разрушение балок происходило из-за усталостного разрушения полимербетона.

На заключительном этапе исследований установим нормативные и расчетные характеристики полимербетона ФАМ, стеклопластиковой арматуры [5, 8].

Остаточный ресурс работы плиты проезжей части определен в соответствии с методикой, изложенной в Инструкции по проектированию зданий и сооружений из армополимербетона (М.: МЦМ, 1985. 128 с.) и [5–11].

Таким образом, результаты исследований полимербетона ФАМ, стеклопластиковой арматуры и плиты проезжей части из стеклопластполимербетона (табл. 6) показывают, что исследуемый конструктивный материал может быть применен в конструкциях плиты проезжей части стележелезобетонных пролетных строений мостов и путепроводов.

Список литературы

1. Овчинников И.И. Долговечность железобетонных конструкций транспортных сооружений // *Строительные материалы*. 2011. № 2. С. 60–62.
2. Бокарев С.А., Прибытков С.С., Ефимов С.В. Остаточный ресурс железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов // *Вестник*

References

1. Ovchinnikov I.I. Durability of reinforced concrete structures of transport structures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2011. No. 2, pp. 60–62. (In Russian).
2. Bokarev S.A., Pribytkov S.S., Efimov S.V. Residual life of reinforced concrete superstructures of railway bridge-

- Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 3. С. 169–183.
3. Васильев А.И. Оценка технического состояния мостовых сооружений. М.: КНОРУС, 2017. 256 с.
 4. Bondarev B.A., Borkov P.V., Bondarev A.B.. An outlook on the application of glass-reinforced plastic and polymer concrete components in bridge construction // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150, pp. 1617–1622.
 5. Бондарев А.Б. Прогнозирование циклической долговечности полимерных композиционных материалов: Дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2011. 180 с.
 6. Набоков В.Ф. Исследование полимербетонных конструкций, армированных стеклопластиковой арматурой, на основе полиэфирной смолы НПС-609-21М: Дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 1979. 231 с.
 7. Бондарев Б.А., Бондарев А.Б., Сапрыкин Р.Ю., Мелешкин М.Ф. Методика расчета конструкций из полимерных композиционных материалов, армированных стеклопластиковой арматурой, на выносливость // *Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Строительство и архитектура*. 2013. Вып. 31 (50). Ч. 2. Строительные науки. С. 91–95.
 8. Бондарев Б.А. Сопrotивляемость полимербетонных строительных элементов, армированных стеклопластиковой арматурой, циклическим нагружением: Дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 1990. 160 с.
 9. Бондарев Б.А., Харчевников В.И., Корнеев А.Д. Выносливость композиционных материалов в конструкциях железнодорожных шпал / Под ред. В.И. Харчевникова. Липецк: ЛГТУ, 2002. 220 с.
 10. Бондарев Б.А., Бондарев А.Б., Борков П.В., Жидков В.К., Копалин Д.А. Полимерные композиционные материалы в элементах конструкций сооружений транспортной инфраструктуры // *Вестник Липецкого государственного технического университета*. 2022. № 2 (48). С. 27–33.
 11. Бондарев Б.А., Комаров П.В., Борков П.В., Бондарев А.Б. Циклическая долговечность полимерных композиционных материалов строительного назначения. Тамбов, 2013. 111 с.
 - es. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2018. Vol. 20. No. 3, pp. 169–183. (In Russian).
 3. Vasil'ev A.I. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya mostovykh sooruzhenii [Technical conditions of bridge structures]. Moscow: KNORUS. 2017. 256 p. (In Russian).
 4. Bondarev B.A., Borkov P.V., Bondarev A.B. An outlook on the application of glass-reinforced plastic and polymer concrete components in bridge construction. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150, pp. 1617–1622.
 5. Bondarev A.B. Forecasting the cyclic durability of polymer composite materials. Cand. Diss. (Engineering). Volgograd. 2011. 180 p. (In Russian).
 6. Nabokov V.F. Investigation of polymer concrete structures reinforced with fiberglass reinforcement based on polyester resin NPS-609-21M. Cand. Diss. (Engineering). Voronezh. 1979. 231 p. (In Russian).
 7. Bondarev B.A., Bondarev A.B., Saprykin R.YU., Meleshkin M.F. Method of calculation of structures made of polymer composite materials reinforced with fiberglass reinforcement for endurance. *Vestnik VolgGASU. Stroitelstvo i arhitektura*. 2013. No. 31 (50). Path. 2, pp. 91–95. (In Russian).
 8. Bondarev B.A. Resistance of polymer concrete building elements reinforced with fiberglass reinforcement by cyclic loads. Cand. Diss. (Engineering). Voronezh. 1990. 160 p. (In Russian).
 9. Bondarev B.A., Harchevnikov V.I., Korneev A.D. Vynoslivost' kompozitsionnykh materialov v konstrukciyakh zheleznodorozhnykh shpal [Endurance of composite materials in railway sleepers structures]. Lipetsk: LGTU. 2002. 220 p.
 10. Bondarev B.A., Bondarev A.B., Borkov P.V., Zhidkov V.K., Kopalin D.A. Polymer composite materials in structural elements of transport infrastructure structures. *Vestnik LGTU*. 2022. No. 2 (48), pp. 27–33. (In Russian).
 11. Bondarev B.A., Komarov P.V., Borkov P.V., Bondarev A.B. Ciklicheskaya dolgovechnost' polimernykh kompozitsionnykh materialov stroitel'nogo naznacheniya [Cyclic durability of polymer composite materials for construction purposes]. Tambov. 2013. 111 p.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Учебное пособие «Промышленное и гражданское строительство. Введение в профессию»

Авторы: Грызлов В.С., Ворожбянов В.Н., Гендлина Ю.Б., Залипаева О.А., Каптюшина А.Г., Медведева Н.В., Петровская А.А., Поварова О.А., Чорная Т.Н.

Научный редактор – д-р техн. наук, проф. В.С. Грызлов

Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 276 с.

Дана общая характеристика профессии строитель. Приведены сведения из истории развития строительной отрасли. Предложено краткое описание видов строительной продукции, особенностей проектирования строительных объектов, технологии и порядка организации возведения зданий и сооружений; раскрыты вопросы менеджмента в строительстве. Подчеркнута важность строительной науки и цифровизации строительной деятельности. Отдельная глава посвящена особенностям организации инженерно-строительного обучения. Для студентов бакалавриата, начавших обучение по направлению «Строительство». Может быть использовано для профориентационной работы с выпускниками школ.

По вопросам приобретения обращайтесь в издательство «Инфра-Инженерия»



М.А. ГОНЧАРОВА, д-р техн. наук (magoncharova777@yandex.ru),
А.Г. ЗАЕВА, инженер (nastenkast08@mail.ru)

Липецкий государственный технический университет (398055, г. Липецк, ул. Московская, 30)

Биологические аспекты эксплуатации комплекса чистых помещений

Химическая, физическая и биологическая коррозия и их сочетания – частая причина разрушения зданий и сооружений. Среди коррозионных процессов наиболее вредными являются биологические. В общем виде биокоррозию подразделяют на бактериальную и микологическую. Причем микроорганизмы могут воздействовать даже на строительные материалы, обладающие высокой коррозионной стойкостью. В данной работе представлены результаты исследования биодеструкции минеральной ваты, входящей в состав сэндвич-панелей, применяемых для строительства чистых помещений. При этом суспензию микроорганизмов вносили в минвату в чистом виде (водная суспензия без добавления питательных веществ) и с добавлением агаризованных сред. В качестве тест-культур для проведения испытаний использовались такие виды микромицетов и бактерий, как *Aspergillus brasiliensis*, *Bacillus subtilis*, *Candida albicans*, *Pseudomonas aeruginosa*. В процессе эксперимента проводились смывы с поверхностей сэндвич-панелей чистого помещения 10×10 см. Результаты исследования показали сплошной рост грибов и бактерий внутри минеральной ваты спустя шесть лет эксплуатации. Это приводит к потере стабильности параметров чистого помещения с учетом условий его эксплуатации и технического обслуживания. Особенно это касается выполнения технологических процессов, чувствительных к микробным загрязнениям. Таким образом, использование многослойных ограждающих конструкций для строительства чистых помещений с применением материалов, подвергающихся биодеструкции, является потенциальной причиной несоответствия эксплуатационным показателям.

Ключевые слова: биодеструкция, минеральная вата, сэндвич-панели, чистые помещения.

Для цитирования: Гончарова М.А., Заева А.Г. Биологические аспекты эксплуатации комплекса чистых помещений // *Строительные материалы*. 2023. № 1–2. С. 18–22. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-18-22>

M.A. GONCHAROVA, Doctor of Sciences (Engineering) (magoncharova777@yandex.ru),
A.G. ZAEVA, engineer (nastenkast08@mail.ru),
Lipetsk State Technical University (30, Moskovskaya Street, Lipetsk, 398055, Russian Federation)

Biological Aspects of Clean Room Complex Operation

Chemical, physical and biological corrosion and their combinations are a common cause of destruction of buildings and structures. Among the corrosion processes, biological ones are the most undesirable. In general, biocorrosion is divided into bacterial and mycological. Moreover, microorganisms can even affect building materials with high corrosion resistance. This paper presents the results of a study of the biodegradation of mineral wool, which is part of sandwich panels used for the construction of clean rooms. At the same time, the suspension of microorganisms was introduced into the mineral wool in its pure form (an aqueous suspension without the addition of nutrients), with the addition of agarized media. Species of micro-mycetes and bacteria as *Aspergillus brasiliensis*, *Bacillus subtilis*, *Candida albicans*, *Pseudomonas aeruginosa* were used as test cultures for testing. During the experiment, flushes were carried out from the surfaces of sandwich panels of a clean room of 10×10 cm. The results of the study showed a continuous growth of fungi and bacteria inside the mineral wool after 6 years of operation. This leads to a loss of stability of the parameters of a clean room, taking into account the conditions of its operation and maintenance. This is especially true for the implementation of technological processes that are sensitive to microbial contamination. Thus, the use of multilayer enclosing structures for the construction of clean rooms with the use of biodegradable materials is a potential cause of non-compliance with operational indicators.

Keywords: biodegradation, mineral wool, sandwich panels, clean rooms.

For citation: Goncharova M.A., Zaeva A.G. Biological aspects of clean room complex operation. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 1–2, pp. 18–22. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-18-22>

Сохранение и поддержание надежности, устойчивости и эффективности функционирования человека и среды его пребывания, равно как сохранение и поддержание надежности, устойчивости и действенности (эффективности) биосферы, экологических систем и технических систем любой категории сложности, – трудноразрешимая проблема. Строительные конструкции, здания и сооружения подвержены влиянию различных неблагоприятных факторов, в результате чего развиваются коррозионные процессы. Эти механизмы достаточно сложные, потому что различные виды деструкций встречаются и срабаты-

вают во всех средах: в воздухе, в воде, в почве. Помимо этого они могут распространяться из одной среды в другую; кроме того, могут проявляться как последовательно, так и одновременно в любых сочетаниях, причем коррозия одной категории, изменяя свойства и признаки материала, способствует развитию коррозии другой категории [1].

Предотвращение разрушения зданий, сооружений и инженерных сетей в результате коррозии является одним из важнейших требований, выполнение которого необходимо для достижения экологического комфорта. Каждый застройщик, градостроитель

**Таблица 1
Table 1**

**Смывы с поверхностей чистого помещения
Flushing from the surfaces of a clean room**

Класс чистоты	Объект контроля	Метод смыва		
		Нормы КОЕ на две среды на чашках Петри	Результат / среда	
			Бактериальная № 2	Грибная № 1
B	Поверхность сэндвич-панелей (годовой мониторинг, два раза в неделю)	0	0	0
C	Поверхность сэндвич-панелей (годовой мониторинг, два раза в неделю)	0	0	0
D	Поверхность сэндвич-панелей (годовой мониторинг, два раза в неделю)	5	0	1

**Таблица 2
Table 1**

**Годовой мониторинг объектов
(седиментационный метод на чашках Петри)
Annual monitoring of objects
(sedimentation method on Petri dishes)**

Класс чистоты	Количество выросших колоний среднее на двух чашках Петри	
	Среда № 1	Среда № 2
A (годовой мониторинг, два раза в неделю)	0	0
B (годовой мониторинг, два раза в неделю)	5	0
C (годовой мониторинг, два раза в неделю)	17	1
D (годовой мониторинг, два раза в неделю)	35	1

**Таблица 3
Table 3**

**Годовой мониторинг сэндвич-панелей
(аспирационный метод)
Annual monitoring of sandwich panels
(aspiration method)**

Класс чистоты	Количество выросших колоний среднее на двух чашках Петри	
	Среда № 1	Среда № 2
A (годовой мониторинг, два раза в неделю)	1	0
B (годовой мониторинг, два раза в неделю)	7	0
C (годовой мониторинг, два раза в неделю)	24	1
D (годовой мониторинг, два раза в неделю)	76	2

должен ощущать внутреннюю потребность строить дома, комфортные для людей и безопасные для окружающей среды [1].

Особенно важно учитывать это при проектировании и строительстве чистых помещений. Без соблюдения условий, обеспечивающих чистоту, происходит загрязнение изготавливаемых изделий, в результате чего они или неправильно работают, или даже могут стать источником опасности для людей. В последние годы количество чистых помещений значительно увеличилось. Сейчас они используются в производстве компонентов компьютеров, автомобилей, самолетов, космических аппаратов, телевизионных приемников и многих других электронных и механических приборов, а также в производстве медицинских препаратов, медицинского оборудования и в пищевой промышленности [2].

Соответственно возникает задача определения оптимальных эксплуатационных характеристик строительных материалов, используемых в чистых зонах, в том числе и выявление биодеструкции, что является критически важным для стерильных зон и технологических операций, а также подтверждение целевых функций материала.

Приступая к рассмотрению технологических аспектов процессов биоповреждения строительных материалов, необходимо обозначить, что же такое биоповреждение и биодеструкция.

Биоповреждение – изменение физических и химических свойств материалов вследствие воздействия живых организмов в процессе их жизнедеятельности [3].

Биодеструкция – совокупность разрушающих строительный материал химических и физических процессов, вызванных действием организмов [3].

В большинстве случаев причинами для биоповреждений являются повышенная влажность и наличие органических компонентов в составе отделочных и других материалов. Первый фактор нередко обусловлен несоблюдением температурно-влажностного режима, повреждением гидроизоляции, появлением различных протечек, нарушением технологических требований условий хранения продукции.

В экспериментальном исследовании в качестве объекта были рассмотрены ограждающие конструкции в виде сэндвич-панелей, выполненные из двух металлических листов с внутренним наполнителем из минеральной ваты. Элементы конструкции панелей склеивались в автоматическом термопрессе с применением однокомпонентного полиуретанового клея.

Минеральная вата – наиболее распространенный в мире теплоизоляционный материал. В первую очередь это связано с ее высокой жаростойкостью, гигроскопичностью, удобством транспортировки, обработки и монтажа. Однако именно минеральная

Таблица 4
Table 4

Результаты мониторинга минеральной ваты
Mineral wool monitoring results

Помещения, класс чистоты	Объект контроля	Метод смыва		
		Нормы на чашках Петри	Результат / среда	
			Бактериальная № 1	Грибная № 2
B	Материал сэндвич-панелей (годовой мониторинг, один раз в неделю)	Не нормируется	7	341
C	Материал сэндвич-панелей (годовой мониторинг, один раз в неделю)	Не нормируется	1	247
D	Материал сэндвич-панелей (годовой мониторинг, один раз в неделю)	Не нормируется	4	542

Таблица 5
Table 5

Инкубационные исследования материала с использованием штаммов на твердых средах
Incubation studies of material using strains on solid media

Штамм	Результат роста в стерильной чистой воде	Результат роста в питательной среде
<i>Aspergillus brasiliensis</i>	Наблюдается рост выше внесенного количества на 10%	Сплошной рост
<i>Bacillus subtilis</i>	Рост отсутствует	Сплошной рост
<i>Candida albicans</i>	Наблюдается рост выше внесенного количества на 5%	Сплошной рост
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Наблюдается рост выше внесенного количества на 5%	Сплошной рост

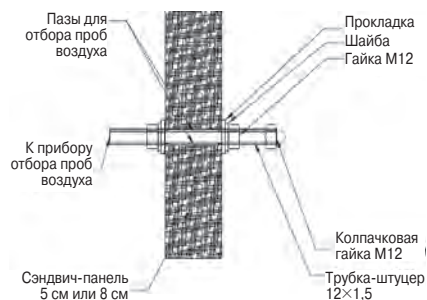


Рис. 1. Порт для отбора проб воздуха при непрерывном микробиологическом мониторинге
Fig. 1. Port for air sampling with continuous microbiological monitoring



Рис. 2. Биоповреждение теплоизоляционного слоя через полтора года с момента монтажа
Fig. 2. Bio-damage of the thermal insulation layer after one and a half years from the moment of installation

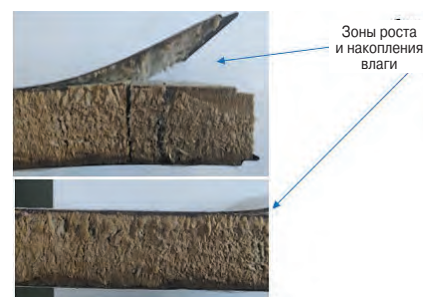


Рис. 3. Сэндвич-панели через шесть лет использования
Fig. 3. Sandwich panels after 6 years of use

вата может стать причиной биодеструкции сэндвич-панелей, поскольку в процессе монтажа (демонтажа) может нарушиться гидроизолирующий слой. В этом случае минеральная вата выступает как питательный субстрат для образования и размножения различных групп микроорганизмов. При планировании экспериментов были созданы условия, позволяющие выявить степень биодеструкции.

В качестве тест-культур для проведения испытаний использовались следующие виды микромицетов и бактерий: *Aspergillus brasiliensis*, *Bacillus subtilis*, *Candida albicans*, *Pseudomonas aeruginosa*.

Смывы с поверхностей сэндвич-панелей чистого помещения 10×10 см проводились согласно микробиологическому мониторингу производственной среды по Методическим указаниям МУК 4.2.734–99 (табл. 1).

Результаты седиментационного метода на чашках Петри согласно микробиологическому мониторингу

производственной среды (Методические указания МУК 4.2.734–99) представлены в табл. 2.

Кроме того, применили аспирационный метод, который основан на принудительной аспирации с помощью пробоотборника на 1 м³ (скорость пробоотбора 100 л/мин, время 10 мин). Результаты представлены в табл. 3.

В процессе стационарного мониторинга теплоизоляционного материала сэндвич-панелей с помощью специально сконструированного порта (рис. 1) использовали аспирационный метод (табл. 4). Также были проведены инкубационные исследования (табл. 5).

Принимая во внимание сочетание различных видов культур, выделили доминирующие виды, определяющие свойства биопленок и их агрессивность в отношении материалов. В испытаниях использовали биопленки различной сложности, которые были перенесены с естественного субстрата в условия культуры [4–14].

Во время испытания суспензию микроорганизмов вносили в структуру теплоизоляционного материала в чистом виде (водная суспензия без добавления питательных веществ), а также с добавлением агаризованных сред.

В результате поверхность минеральной ваты практически всегда оставалась чистой, однако грибы локально формировали биопленки внутри материала (там, где происходило накопление влаги). Понятно, что чистая минеральная вата содержит органические вещества, которые могут быть питательной средой для микроорганизмов. Также в состав клея могут входить питательные компоненты, способствующие развитию микроорганизмов при увлажнении. При механических повреждениях минеральной ваты могут накапливаться пылевые частицы, для которых загрязнения служат дополнительным источником питания. В результате попадания внешней влаги при образовании конденсата формируются микробные биопленки, способствующие началу роста и дальнейшего развития микроорганизмов.

Росту биопленки может способствовать структура материала. В минеральной вате присутствуют межволоконные пространства, поддерживающие комплексное и местное развитие биодеструкторов. Исследование сэндвич-панелей подтверждает биологическое повреждение минеральной ваты (рис. 2).

Минеральная вата способна поддерживать лишь незначительное развитие плесневых грибов. Однако

при добавлении питательных веществ в область инокуляции наблюдается активный рост грибов в зоне дополнительного питания.

Биоповреждения через шесть лет использования представлены на рис. 3.

Микроскопия показала сплошной рост грибов и бактерий внутри минеральной ваты спустя шесть лет эксплуатации (в случае нарушения технологического регламента монтажа-демонтажа сэндвич-панелей чистых помещений).

Выводы

По результатам проведенного эксперимента установлено, что использование многослойных ограждающих конструкций для строительства чистых помещений с применением материалов, подвергающихся биодеструкции, является потенциальной причиной несоответствия эксплуатационным показателям.

Это приводит к потере стабильности параметров чистого помещения с учетом условий его эксплуатации и технического обслуживания. Особенно это касается выполнения технологических процессов, чувствительных к микробным загрязнениям.

Решением данной проблемы является использование материалов, способных полностью исключить вероятность возникновения биокоррозии строительных конструкций (например, модульные системы из полимерных материалов с плотной структурой).

Список литературы

1. Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф., Светлов Д.А. Строительство, реконструкция и эксплуатация зданий и сооружений с учетом экологических и медицинских аспектов // *Вестник Приволжского территориального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук*. Н. Новгород, 2019. С. 219–232.
2. Уайт В. Технология чистых помещений: основы проектирования, испытаний и эксплуатации. М.: Клинрум, 2002. 304 с.
3. Гончарова М.А., Дергунова Е.С., Мраев А.В. Биоповреждение строительных материалов и защита от биокоррозии. Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2021. 91 с.
4. Каракеян В.И., Ларионов Н.М., Рябышенков А.С., Дисветова Н.М. Методология системного анализа в исследовании энергоэкологических характеристик чистых помещений // *Векторы развития современной науки*. 2016. № 1 (3). С. 83–89.
5. Севоян Т.Р. Основы обеспечения требуемых параметров воздушной среды в чистых помещениях различных классов. *XXIII Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки): материалы докладов*. Н. Новгород: Нижегородский государственный инженерно-экономический институт, 2018. С. 191–193.

References

1. Erofeev V.T., Smirnov V.F., Svetlov D.A. Construction, reconstruction and operation of buildings and structures taking into account environmental and medical aspects. *Vestnik of Privolzhsky territorial branch of the Russian Academy architecture and building sciences*. Nizhny Novgorod. 2019, pp. 219–232. (In Russian).
2. Uait V. Tekhnologiya chistyx pomeshchenii: osnovy proektirovaniya, ispytaniy i ekspluatatsii [Clean Room Technology: Basis of Design, Testing and Operation]. Moskva: Klinrum. 2002. 304 p.
3. Goncharova M.A., Dergunova E.S., Mraev A.V. Biopovrezhdenie stroitel'nykh materialov i zashchita ot biokorrozii [Bio-damage of building materials and protection against biocorrosion]. Lipetsk: LGTU. 2021. 91 p.
4. Karakeyan V.I., Larionov N.M., Ryabyshenkov A.S., Disvetova N. M. Methodology of system analysis in the study of energy-ecological characteristics of clean rooms. *Vektory razvitiya sovremennoi nauki*. 2016. No. 1 (3), pp. 83–89. (In Russian).
5. Sevoyan T.R. Basics of ensuring the required air environment parameters in clean rooms of various classes. *XXIII Nizhny Novgorod session of young scientists (technical, natural, mathematical sciences): report materials*. Novgorod: Nizhny Novgorod State Engineering and Economic Institute. 2018, pp. 191–193. (In Russian).

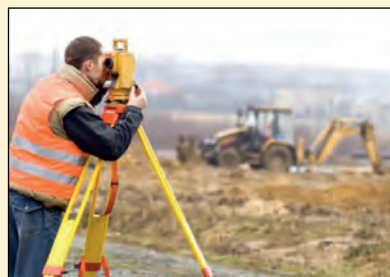
6. Ерофеев В.Т., Аль Дулайми С.Д.С., Дергунова А.В. Повышение долговечности и экологичности зданий и сооружений текстильной промышленности путем применения материалов, модифицированных микробиологической добавкой // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2021. № 3 (393). С. 141–146. DOI: 10.47367/0021-3497_2021_3_141
7. Anikina N.A., Smirnov V.F., Smirnova O.N., Zaharova E.A. Protection of construction materials based on acrylates from biodeterioration // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No. 5 (81), pp. 116–124. DOI: 10.18720/MCE.81.1
8. Ганин В.В., Лисицкая Т.Б., Великова Т.Д. Защита строительных материалов от биоповреждений микромицетами. *Неделя науки СПбПУ: Материалы научной конференции с международным участием*. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018. С. 252–254.
9. Строганов В.Ф., Сагадеев Е.В., Вахитов Б.Р. Моделирование процессов биоповреждения минеральных строительных материалов. *XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии: Тезисы докладов: В 5 т*. Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2016. С. 380.
10. Логинова С.А., Киселев В.А., Нармания Б.Е. Проблемы исследования биоповреждений строительных материалов // *Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера*. 2017. № 2. С. 491–492.
11. Ерофеев В.Т., Дергунова А.В., Богатов А.Д. Экономические потери от биоповреждений и технико-экономическая эффективность повышения биостойкости материалов и конструкций зданий и сооружений предприятий текстильной промышленности // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2020. № 5 (389). С. 97–102.
12. Кряжев Д.В., Смирнов В.Ф., Смирнова О.Н. Анализ методов оценки биостойкости промышленных материалов (критерии, подходы) // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2013. № 2–1. С. 118–124.
13. Заева А.Г., Гончарова М.А. Условия работы полов в агрессивной среде медицинских учреждений. *Современные проблемы материаловедения: Сборник научных трудов III Всероссийской (национальной) научно-практической конференции*. Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2022. С. 96–99.
14. Ярцев В.П., Струлев С.А., Мамонтов А.А. Оценка и оптимизация энергоэффективности зданий с различными ограждающими конструкциями, утепленными пенополистирольными и минераловатными плитами. Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2021. 80 с.
6. Erofeev V.T., Al Dulaimi S.D.S., Dergunova A.V. Increasing the durability and environmental friendliness of buildings and structures of the textile industry by using materials modified with a microbiological additive. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti*. 2021. No. 3 (393), pp. 141–146. (In Russian). DOI: 10.47367/0021-3497_2021_3_141
7. Anikina N.A., Smirnov V.F., Smirnova O.N., Zaharova E.A. Protection of construction materials based on acrylates from biodeterioration. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No. 5 (81), pp. 116–124. DOI: 10.18720/MCE.81.12
8. Ganin V.V., Lisitskaya T.B., Velikova T.D. Protection of building materials from biological damage by microfungi. *Science Week of St. Petersburg State University: Materials of a scientific conference with international participation*. Saint Petersburg: Saint Petersburg Polytechnic University of Peter the Great. 2018, pp. 252–254. (In Russian).
9. Stroganov V.F., Sagadeev E.V., Vakhitov B.R. Modeling of biological damage processes of mineral building material. *XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry: theses of reports in five volumes*. Yekaterinburg: RAASN. 2016, pp. 380. (In Russian).
10. Loginova S.A., Kiselev V.A., Narmania B.E. Problems of studying biological damage to building materials. *Molodye uchenye – razvitiyu tekstil'no-promyshlennogo klastera*. 2017. No. 2, pp. 491–492. (In Russian).
11. Erofeev V.T., Dergunova A.V., Bogatov A.D. Economic losses from biological damage and the technical and economic efficiency of increasing the biological resistance of materials and structures of buildings and structures of textile industry enterprises. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti*. 2020. No. 5 (389), pp. 97–102. (In Russian).
12. Kryazhev D.V., Smirnov V.F., Smirnova O.N. Analysis of methods for assessing the biological resistance of industrial materials (criteria, approaches). *Bulletin of Nizhny Novgorod University named after N.I. Lobachevsky*. 2013. No. 1–2, pp. 118–124. (In Russian).
13. Zaeva A.G., Goncharova M.A. Conditions for the work of floors in an aggressive environment of medical institutions. *Modern problems of materials science: Collection of scientific works of the III All-Russian (national) scientific and practical conference*. Lipetsk: LGTU. 2022, pp. 96–99. (In Russian).
14. Yartsev V.P., Strulev S.A., Mamontov A.A. Otsenka i optimizatsiya energoeffektivnosti zdaniy s razlichnymi ograzhdayushchimi konstruktsiyami, uteplennymi penopolistirolnymi i mineralovatnymi plitami [Assessment and optimization of energy efficiency of buildings with various enclosing structures, insulated polystyrene foam and mineral wool plates]. Tambov: Tambov State Technical University. 2021. 80 p.



Группа компаний «А7» – крупное, динамично развивающееся, строительное объединение полного цикла, успешно работающее на рынке с 2016 года.

На строительстве объектов трудится команда квалифицированных рабочих и инженерно-технических специалистов, которые обладают богатым инженерным опытом реализации проектов с использованием современных методов строительства.

Компания представляет услуги и работы по разработке проектной и рабочей документации, проектирование и строительство магистральных газопроводов, выполняет строительно-монтажные работы по реконструкции и ремонту автомобильных дорог, осуществляет строительство и реконструкцию автомобильных мостов и путепроводов, занимается строительством линий электропередач с полным комплексом последовательных работ.



**Юридический адрес: 392020, Тамбовская обл., г. Тамбов, ул. Н. Вирты, д.15а
ИНН 6829123414 КПП 682901001, ОГРН 1166820058613 ОКПО 03358558
Тел. 8(499)350-80-10. E-mail: info@a7stroy.ru**

Реклама

Группа компаний «АвтоСтройЭкспресс»

предлагает широкий спектр строительных услуг

- ✓ земляные работы, возведение фундаментов, стен, перекрытий
- ✓ монолитные работы
- ✓ монтаж металлоконструкций
- ✓ устройство различных видов кровли, фасада зданий
- ✓ монтаж внутренних и внешних инженерных сетей
- ✓ ремонтные и отделочные работы
- ✓ пусконаладочные работы
- ✓ комплекс электромонтажных работ
- ✓ комплекс работ по благоустройству
- ✓ услуги спецтехники
- ✓ полное документальное сопровождение в ходе строительства, включая ввод в эксплуатацию и сдачу в надзорные органы
- ✓ аренда большого количества опалубочного оборудования для выполнения бетонных работ любой сложности



Наши контакты:

**г. Липецк, Трубный проезд, 23
e-mail: 901099a@mail.ru; ts5022@mail.ru,
Тел.: строительный отдел 8(4742)90-20-99**

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ ОБСУДИЛИ В ЛИПЕЦКЕ

17 февраля 2023 года в г. Липецке состоялась IV Всероссийская (национальная) научно-практическая конференция «Современные проблемы материаловедения», посвященная 35-летию кафедры «Строительное материаловедение и дорожные технологии» Липецкого государственного технического университета. Организаторами конференции выступили Российская академия архитектуры и строительных наук, ПАО «НЛМК», администрация г. Липецка, журналы «Строительные материалы»® и «Жилищное строительство», кафедра «Строительное материаловедение и дорожные технологии» ЛГТУ.



В 1986 г. на базе кафедры «Промышленное и гражданское строительство» ЛГТУ под руководством канд. техн. наук А.Д. Корнеева началась работа по организации новой специальности «Производство строительных материалов, изделий и конструкций». По мере подготовки первого набора студентов, проведенного в 1988 г., возникла необходимость организации специальной кафедры «Строительные материалы». С этого времени и начался отсчет истории кафедры. Первый выпуск инженеров-строителей-технологов состоялся 1993 г. В 2015 г. на базе кафедры «Строительные материалы» в ЛГТУ под руководством д-ра техн. наук М.А. Гончаровой организована кафедра «Строительное материаловедение и дорожные технологии». Создание кафедры продиктовано крайней необходимостью подготовки специалистов с высшим образованием в области дорожного строительства, эксплуатации, реконструкции и ремонта автомобильных дорог для дорожно-строительных предприятий и организаций г. Липецка и Липецкой обл. С 1988 по 2022 г. специалистами кафедры подготовлено более 650 инженеров, бакалавров и магистров. Большинство выпускников кафедры работают в строительной отрасли.

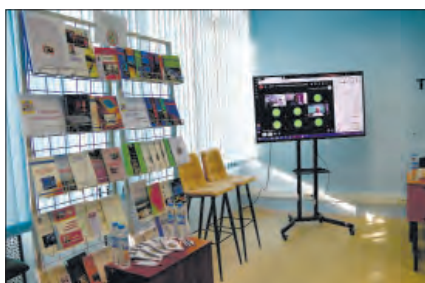
Пленарное заседание открыла и. о. ректора ЛГТУ Л.А. Загеева, которая отметила вклад специалистов кафедры в развитие университета, а также их заслуги перед городом в подготовке кадров для строительной отрасли Липецкой области и РФ. Поздравления прозвучали от Липецкого городского Совета депутатов, департамента благоустройства и дорожного хозяйства г. Липецка, Дорожного агентства Липецкой области, Управления по стоимостному инжинирингу ПАО «НЛМК», в которых отмечена тесная связь специалистов кафедры с производственными предприятиями области.

На пленарном заседании заслушаны доклады д-ра техн. наук, чл.-корр. РААСН П.В. Монастырева (Тамбовский государственный технический университет) о значении исследований в области

строительной физики для подготовки специалистов по научной специальности «Строительные конструкции, здания и сооружения»; д-ра техн. наук, чл.-корр. РААСН В.Д. Черкасова (Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва), который рассказал о самоклеящихся радиопоглощающих материалах. Доклад о становлении и развитии науки о строительных композиционных материалах на кафедре «Строительное материаловедение и дорожные технологии» представил канд. техн. наук П.В. Борков (ЛГТУ). Процессам коррозионной деградации строительных материалов и конструкций посвящено выступление д-ра техн. наук, чл.-корр. РААСН В.Е. Румянцевой (Ивановский государственный политехнический университет). Канд. техн. наук Е.С. Дергунова (ЛГТУ) сделала акцент на особенностях применения процесса биоминерализации для улучшения структурно-прочностных свойств бетона. О научных исследованиях кафедры рассказала д-р техн. наук, зав. кафедрой М.А. Гончарова. Особенности соединения тонколистовых конструкций посвящено выступление д-ра техн. наук В.В. Зверева (ЛГТУ). Далее работа велась по секциям «Новые технологии строительства и ремонта автомобильных дорог» и «Строительные технологии с использованием эффективных материалов. Организация инвестиционно-строительной деятельности».

В процессе обсуждения научных докладов участники дискуссии пришли к выводу, что основные направления научно-исследовательской работы кафедры: проблемы проектирования и создания композиционных материалов; их применение в строительстве; разработка и проектирование дорожно-строительных материалов и конструкций; разработка ресурсосберегающих технологий и материалов с использованием отходов производства; разработка эффективных тепло- и гидроизоляционных материалов для промышленного и гражданского строительства; исследование проблем создания бетонов для специального строительства; исследование проблем экономики и стратегического управления объектами жилищно-коммунального хозяйства – являются актуальными и наукоемкими на современном этапе развития народного хозяйства России. Деятельность кафедры по воспитанию и подготовке кадров для строительства и дорожного хозяйства востребована строительным комплексом Липецкой обл. Выпускники кафедры работают на многих предприятиях РФ.

С момента основания на кафедре подготовлены и защищены 5 докторских и 37 кандидатских диссертаций; опубликовано более 1500 научных работ, 170 монографий и учебных пособий; получено 75 патентов и авторских свидетельств на изобретения. По направлениям научных исследований, представленных в докладах, планируется в ближайшее время защита докторской и четырех кандидатских диссертаций.



М.А. ГОНЧАРОВА, д-р техн. наук (magoncharova777@yandex.ru),

Е.С. ДЕРГУНОВА, канд. хим. наук (dergunova14@yandex.ru)

Липецкий государственный технический университет (398055, г. Липецк, ул. Московская, 30)

Особенности применения процесса биоминерализации для улучшения структурно-прочностных свойств бетона

Представлены результаты применения процесса биоминерализации в бетонах для улучшения механических и прочностных свойств. В качестве биодобавки использовали изолированные штаммы бактерий *Sp. pasteurii* (A1), *B. Sphaericus* (A2), *B. Pseudofirmus* (A3) и микробный консорциум (A4), выделенный из почвы Липецкой области, обладающий уреазной активностью. Иммобилизацию уреазных бактерий проводили с использованием κ -каррагинана, альгината натрия и карбоксиметилцеллюлозы. Результаты исследования показали, что прочность при сжатии бетонов, изготовленных с применением биодобавок А1–А4 (оптимальная концентрация клеток 107 клеток/мл бактерий), увеличилась на 10–15% по сравнению с обычным бетоном без биодобавок. Аналогично бетон, изготовленный с различными биодобавками, показал более высокую устойчивость к кислотному воздействию. Улучшение свойств бетона за счет включения связано с осаждением кальцита и присутствием бактериальной биомассы в порах бетонной матрицы. Микроструктурные исследования также показали, что бетоны, изготовленные с использованием бактерий, имеют большее образование кальцита, что видно на изображениях сканирующей электронной микроскопии бетона. Таким образом, использование биодобавок является оптимальным для достижения улучшенных характеристик бетона.

Ключевые слова: биоминерализация, цемент, бетон, самовосстановление, прочность.

Для цитирования: Гончарова М.А., Дергунова Е.С. Особенности применения процесса биоминерализации для улучшения структурно-прочностных свойств бетона // *Строительные материалы*. 2023. № 1–2. С. 25–31.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-25-31>

M.A. GONCHAROVA, Doctor of Sciences (Engineering) (magoncharova777@yandex.ru),

E.S. DERGUNOVA, Candidate of Sciences (Chemistry) (dergunova14@yandex.ru)

Lipetsk State Technical University (30, Moskovskaya Street, Lipetsk, 398055, Russian Federation)

Features of the Application of the Bio-Mineralization Process to Improve the Structural and Strength Properties of Concrete

The results of the application of the bio-mineralization process in concretes to improve mechanical and strength properties are presented. Isolated strains of bacteria *Sp. pasteurii* (A1), *B. Sphaericus* (A2), *B. Pseudofirmus* (A3) and a microbial consortium (A4) isolated from the soil of the Lipetsk region with urease activity were used as a bio-additive. The immobilization of urease bacteria was carried out using κ -carrageenan, sodium alginate and carboxymethylcellulose. The results of the study showed that the compressive strength of concretes made with the use of A1–A4 bio-additives (the optimal cell concentration of 107 cells/ml of bacteria) increased by 10–15% compared to conventional concrete without bio-additives. Similarly, concrete made with various bio-additives showed higher resistance to acidic effects. The improvement of concrete properties due to inclusion was associated with calcite deposition and the presence of bacterial biomass in the pores of the concrete matrix. Microstructural studies have also shown that concretes made using bacteria have a greater calcite formation, which can be seen in the images of scanning electron microscopy of concrete. Thus, the use of bio-additives is optimal to achieve improved concrete characteristics.

Keywords: bio-mineralization, cement, concrete, self-healing, strength.

For citation: Goncharova M.A., Dergunova E.S. Features of the application of the bio-mineralization process to improve the structural and strength properties of concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 1–2, pp. 25–31. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-25-31>

Универсальность и преимущества, связанные с использованием бетона, наряду с доступностью местного сырья сделали его лучшим строительным материалом, но, несмотря на превосходные свойства бетона, он очень подвержен образованию трещин [1–4]. Трещины могут возникать в бетоне из-за различных физических, химических, механических и экологических факторов [5]. Внутренние реакции между компонентами в бетоне также могут привести к образованию трещин. Наличие этих трещин и микропор в бетоне оказывает негативное влияние на его общие свойства с точки зрения долговечности и механических характеристик. Трещины также создают путь для миграции различных вредных материалов в бетон, что приводит к

ухудшению эксплуатационных характеристик и физическому ухудшению. Ремонт этих трещин в бетоне может быть дорогостоящим, непрактичным или трудоемким [6, 7]. Крайне важно, чтобы при производстве бетона использовались различные способы предотвращения образования трещин в бетоне.

Одним из способов уменьшения образования трещин в бетоне является внедрение бактерий, способных осажать карбонат кальция в бетоне [8–9]. Этот процесс также можно назвать биоминерализацией. Было обнаружено, что осаждение кальцита в среде контролируется концентрацией кальция, pH среды, наличием центров зарождения и концентрацией растворенного органического углерода [10].

Присутствие бактерий в цементирующих материалах может повлиять на осаждение кальцита путем выработки ферментов уреазы, которые повышают рН и концентрацию карбонат-ионов в системе в результате гидролиза мочевины до диоксида углерода и аммиака [11–13]. Кроме того, это выгодно из-за способности к самовосстановлению.

Несколько видов бактерий включены в состав цементирующих материалов с целью улучшения эксплуатационных характеристик с точки зрения уменьшения образования трещин. В [6] сообщалось, что использование *Sporosarcina pasteurii* (*Bacillus pasteurii*) снижает проницаемость бетонных конструкций. Однако влияние концентрации бактерий и соответствующее влияние на механические или микроструктурные свойства не исследовались. Аналогичным образом исследователи [14] обнаружили, что бактерии *Sporosarcina pasteurii* могут быть включены в бетон для улучшения его поверхностных свойств. Однако оптимальная концентрация бактерий не была определена, и механические свойства не оценивались. Исследование [8] также показало, что прочность при сжатии через 28 сут может быть увеличена на 33% при использовании бактерий *Sporosarcina pasteurii*. В [9–10] использовали виды *Shewanella* для улучшения свойств цементирующих материалов. Недавнее исследование [11] показывает, что включение бактерий, обладающих уреазной активностью, улучшило сульфатостойкость бетона и способствовало самовосстановлению. Однако в исследовании только прочность при сжатии оценивалась как механическое свойство, создавая ограниченное понимание влияния бактерий на другие механические свойства, такие как прочность при изгибе и модуль упругости.

В [11–15] приводятся данные о снижении водопроницаемости бетона при внесении добавки бактерий *Bacillus subtilis* с концентрацией 10⁵ клеток/мл. Однако в исследовании не проводилась оценка меха-

нических свойств или микроструктурных исследований. Можно заметить, что в большинстве существующих исследований использовались только бактерии *Sporosarcina pasteurii* и исследовались только механические свойства или проницаемость. Кроме того, такие свойства, как кислотостойкость бетона, содержащего бактерии, обладающие уреазной активностью, мало изучены. Однако необходимо также исследовать влияние типа и концентрации бактерий на соответствующие механические, долговечные и микроструктурные свойства.

Таким образом, целью данного исследования является изучение влияния различных бактерий, таких как изолированные штаммы бактерий *Sp. pasteurii*, *B. Sphaericus*, *B. Pseudofirmus* и микробный консорциум, выделенный из почвы Липецкой области, на прочностные характеристики бетона. В задачи исследования входило изучить влияние вида микроорганизмов и концентрации бактериальных клеток на механические и прочностные свойства бетона, такие как прочность при сжатии, прочность при изгибе, устойчивость к воздействию кислот и водопроницаемость.

Экспериментальная часть

В качестве вяжущего в стандартной смеси использовался цемент марки ПЦ-400-Д0, соответствующий ГОСТ 10178–85 «Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия». В качестве мелкого заполнителя для обычных растворных смесей использовался полифракционный песок, соответствующий ГОСТ 6139–2003 «Песок для испытаний цемента. Технические условия», в качестве крупного заполнителя использовался гранитный щебень с размером частиц 15–19 мм (табл. 1). В растворной смеси использовалась вода технического назначения, соответствующая ГОСТ 23732–2011 «Межгосударственный стандарт. Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия».

Таблица 1
Table 1

Состав бетонных смесей без биодобавок
Composition of concrete mixes without bio-additives

Идентификатор смеси	Цемент, кг/м ³	Мелкий заполнитель, кг/м ³	Крупный заполнитель, кг/м ³	Вода, кг/м ³
СМ0	450	598	1135	225

Таблица 2
Table 2

Состав бетонных смесей на основе ПЦ-400-Д0 с различными биодобавками
Composition of concrete mixtures based on PC-400-D0 with various bio-additives

Концентрация биодобавки	Вид биодобавки				Реагент для иммобилизации
	A1	A2	A3	A4	
Без добавки	СМ0				–
10 ⁶	СМА1-6К	СМА2-6К	СМА3-6К	СМА4-6К	х-каррагинан
10 ⁷	СМА1-7А	СМА2-7А	СМА3-7А	СМА4-7А	Альгинат натрия
10 ⁸	СМА1-8КЦ	СМА2-8КЦ	СМА3-8КЦ	СМА4-8КЦ	Карбоксиметилцеллюлоза

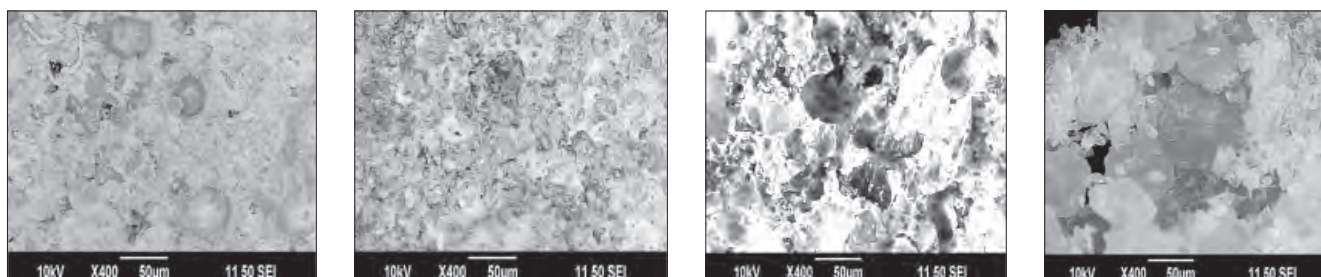


Рис. 1. SEM-изображения образцов бетона с биодобавками
Fig. 1. SEM-images of concrete samples with bioadditives

Физические испытания образцов бетона проводили по ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Оптимальной дозировкой биодобавки принимали такое ее количество, при котором обеспечивается консистенция цементного теста, определяемая распылом мини-конуса не менее 250–255 мм.

В качестве биодобавки использовали изолированные штаммы бактерий *Sp. pasteurii* (A1), *B. Sphaericus* (A2), *B. Pseudofirmus* (A3) и микробный консорциум (A4), выделенный из почвы Липецкой области (координаты места отбора почвы 52.60221°, 39.505094°) (табл. 2). Для определения уреазной активности использовали среду Кристенсена с мочевиной (состав, г/л: пептический перевар животной ткани – 1; глюкоза – 1; хлорид натрия – 5; гидрофосфат натрия – 1,2; дигидрофосфат калия – 0,8; феноловый красный – 0,012; агар-агар – 15).

Концентрацию аммиака, образующегося при гидролизе мочевины, определяли спектрофотометрически по поглощению индофенольной сини в реакции Бертло при длине волны 578 нм на двухлучевом спектрофотометре UV-1800 (SHIMADZU, Япония). КОЕ определяли с применением тест-средств «МикроБио» (Россия). Иммунизацию уреазных бактерий проводили с использованием κ -каррагинана и альгината натрия карбоксиметилцеллюлозы (Россия). Контроль процесса иммунизации – по остаточной уреазной активности микроорганизмов в маточном растворе. Для изучения закономерностей процесса роста новой фазы использовали данные, полученные методом сканирующей электронной микроскопии СЭМ (TESCAN VEGA 3).

Результаты и их обсуждение

В качестве биодобавки использовали изолированные штаммы бактерий *Sp. pasteurii* (A1), *B. Sphaericus* (A2), *B. Pseudofirmus* (A3) и микробный консорциум (A4), выделенный из почвы Липецкой области, обладающий уреазной активностью. Иммунизацию уреазных бактерий методом включения в гель проводили с использованием κ -каррагинана, альгината натрия и карбоксиметилцеллюлозы. Данный прием иммунизации – традиционный метод стабилизации, успешно применяемый для стабилизации и сохранения активности ферментов, клеток, белков и др. Благодаря своей про-

стоте и универсальности метод иммунизации широко распространен. Включение биоактивного вещества в структуру геля можно проводить несколькими способами. В нашей работе бактерии вводили в уже готовый раствор полимера, который потом переводят в состояние геля. Иммунизация данного типа имеет ряд преимуществ: позволяет равномерно распределить биологически активное вещество в объеме носителя, обеспечивает многократное использование иммобилизованного препарата. Как правило, иммобилизованные препараты на основе геля обладают достаточной механической прочностью, тепловой, химической и биологической стойкостью.

Улучшение свойств бетона за счет включения биодобавок было связано с осаждением кальцита и присутствием бактериальной биомассы в порах бетонной матрицы. Микроструктурные исследования также показали, что бетоны, изготовленные с использованием бактерий, имеют большее образование кальцита, что видно на изображениях сканирующей электронной микроскопии. Изображения с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM) бетона, содержащего различные типы бактериальной массы, показаны на рис. 1. Прочностные характеристики бетона в основном зависят от фазы кальций–кремнезем–гидрат (C–S–H), присутствующей в затвердевшем бетоне. Различные факторы влияют на фазу кальций–кремнезем–гидрат (C–S–H). Этими факторами являются размер и форма частиц, распределение частиц и структура пор.

Улучшение свойств бетона, содержащего биодобавку, можно объяснить микробным осаждением кальцита. Наблюдая за изображениями SEM, представляемыми на рис. 1, в бетоне, изготовленном с концентрацией биодобавок 10^6 – 10^8 клеток/мл, можно отметить, что внутри пор бетона образовалась сеть из мелкой сетки с некоторым количеством биоминералов в форме стержней на поверхности пор. Эти сетки представляют собой кальцинированные нити, которые образовались в результате метаболических действий бактерий. Образовавшиеся таким образом биоминеральные пробки будут действовать как заполнитель в трещинах бетона и, следовательно, уменьшат водопоглощение и пористость [16–18].

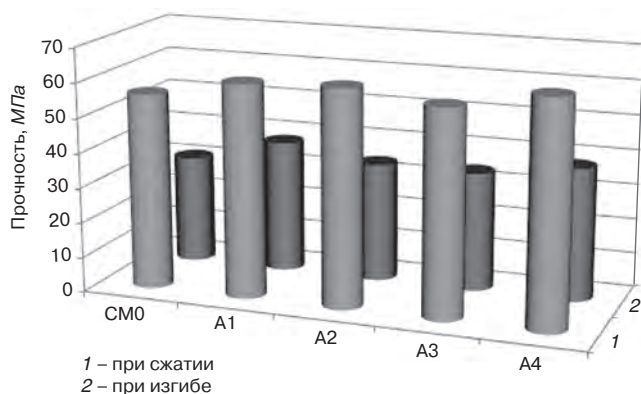


Рис. 2. Прочность бетонных смесей при сжатии и изгибе с биодобавками А1–А4, полученных с помощью κ -каррагинана

Fig. 2. Compressive and bending strength of concrete mixtures with A1–A4 bio-additives obtained using κ -carrageenan

Оценка прочности при сжатии и при изгибе.

Результаты испытаний на прочность при сжатии, представленные на рис. 2, показали, что прочность при сжатии бетона, содержащего бактерии, увеличивается. Так, например, прочность при сжатии бетона (28 сут) с добавкой, содержащей бактерии А4, иммобилизованных с помощью альгината натрия, содержащего в концентрации 10^6 , 10^7 и 10^8 клеток/мл, на 3,9; 12,3 и 7,4% выше, чем у контрольного образца (СМ0).

Повышение прочности бетона при сжатии на 28-й день в присутствии культуры бактерий можно объяснить биоминерализацией кальцита на поверхностях ячеек и в порах внутри матрицы бетона. Осаждение кальцита, приводящее к уплотнению матрицы, также может способствовать повышению прочности при сжатии. В нескольких исследованиях сообщалось, что включение и других видов бактерий в цементирующие материалы также повышает прочность при сжатии [5–9, 10–12].

С другой стороны, увеличение прочности при сжатии через 28 сут может быть результатом увеличения рН пористого материала. Увеличение рН в системе пор будет способствовать росту микробных клеток, что увеличивает образование осадка кальцита. Высокая щелочность порового раствора также может привести к щелочной активации непрореагировавших частиц цемента, что приводит к повышению прочности. Однако прочность при сжатии бетона, изготовленного с концентрацией 10^8 клеток/мл, ниже по сравнению с 10^7 клеток /мл, это может быть результатом чрезмерной реакции ферментов уреазы, приводящей к избыточному образованию аммиака [13, 17].

Изучение устойчивости биобетонов к воздействию кислот. Кислотостойкость образцов бетона оценивали в соответствии с ГОСТ Р 58896–2020 «Бетоны химически стойкие. Методы испытаний» путем погружения образцов в 5% H_2SO_4 и 5% HCl на срок до 30 сут после первоначального отверждения под водой в течение 28 сут. Растворы кислот заменяли каждые 10 сут, чтобы обеспечить относительно постоян-

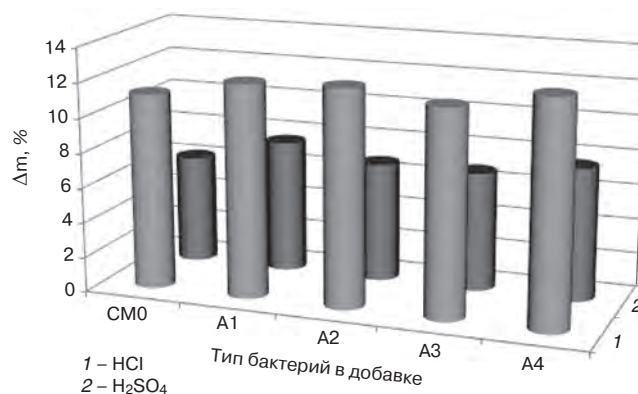


Рис. 3. Влияние кислот HCl и H_2SO_4 на потерю массы образцов бетона (Δm , %)

Fig. 3. Influence of acids HCl and H_2SO_4 on the weight loss of concrete samples (Δm , %)

ную концентрацию растворов на протяжении всего испытания.

Потеря массы образцов бетона (Δm , %) погруженных в 5% HCl и 5% H_2SO_4 , представлена на рис. 3, где показано, что бетон подвергается большему снижению массы при 5% H_2SO_4 по сравнению с 5% HCl , независимо от присутствия бактерий в смесях. Разрушение бетона в сернокислой среде происходит в результате реакции серной кислоты с гидроксидом кальция с образованием гипса. Образование гипса в бетоне приведет к значительным изменениям объема, что спровоцирует расширение и растрескивание бетона. С другой стороны, действие соляной кислоты обусловлено растворением гидроксида кальция и образованием растворимого хлористого кальция.

Введение бактерий в смеси в различных концентрациях уменьшило потерю массы, тем самым повы-

Таблица 3
Table 3

Коэффициент водопроницаемости Water permeability coefficient

№ п/п	Образец	Коэффициент водопроницаемости $\times 10^{-9}$, см/с	
		28 сут	60 сут
1	СМ0	8,86	0,821
2	СМА1-6К	51,7	0,887
3	СМА2-6К	57,3	0,892
4	СМА3-6К	57,8	0,992
5	СМА4-6К	49,4	0,792
6	СМА1-7А	50,3	0,89
7	СМА2-7А	52,7	1,015
8	СМА3-7А	47,1	0,721
9	СМА4-7А	52,3	0,765
10	СМА1-8КЦ	54,3	0,89
11	СМА2-8КЦ	18,2	8,85
12	СМА3-8КЦ	25,3	5,55
13	СМА4-8КЦ	29,8	1,25

сив стабильность бетонных смесей. Использование биодобавки А4 в концентрации 10^7 клеток/мл, подвергнутых воздействию 5% HCl в течение 30 сут, уменьшило потерю массы до 4,5%. Уменьшение потери массы бетона, содержащего биодобавки, можно объяснить заполнением пор биомассой бактерий и образованием кальцита в матрице бетона.

Исследование водопроницаемости биобетона. Водопроницаемость бетона является показателем его устойчивости к проникновению различных вредных материалов в окружающую среду, которой он подвергается. Водопроницаемость бетона с различной концентрацией клеток биодобавок представлена в табл. 3. Данные результаты показывают, что независимо от концентрации бактериальных клеток в бетоне водопроницаемость уменьшается с возрастом.

Коэффициент проницаемости за 60 сут для всех типов биодобавок уменьшился примерно в 60–80 раз по сравнению с коэффициентом проницаемости за 28 сут. Эти результаты указывают на непрерывное прогрессирование гидратации цемента, что привело к большему уплотнению микроструктуры и соответствующему снижению водопроницаемости.

Также можно заметить, что коэффициент проницаемости бетона, содержащего бактерии А1 и А4,

ниже, чем у бетонов с добавками бактерий А2 и А3 через 28 и 60 сут. Эти результаты указывают на сохранение активности бактерий в добавках, что способствует микробному осаждению кальцита, который дополнительно заполняет поры в бетоне и препятствует проницаемости воды. Полученные данные также согласуются с результатами исследований [14, 18], где было обнаружено, что включение *bacillus subtilis* в концентрации 10^5 клеток/мл в бетон снижает водопроницаемость.

Результаты этого исследования показали, что использование чистых культур микроорганизмов и микробного консорциума, выделенного из почвы Липецкой области, возможно использовать для улучшения свойств бетона. Следовательно, результаты этого исследования предлагают эффективный и инновационный способ уменьшения образования трещин и улучшения свойств бетона, который будет использоваться для строительства различных объектов инфраструктуры. Тем не менее рекомендуется провести будущие исследования для изучения характеристик такого биобетона, в частности морозостойкость, и оценить самовосстановление бетона, вызванного бактериями, наряду с всесторонним исследованием влияния бактерий на механизм гидратации.

Список литературы

1. Строкова В.В., Власов Д.Ю., Франк-Каменецкая О.В., Духанина У.Н., Балицкий Д.А. Применение микробной карбонатной биоминерализации в биотехнологиях создания и восстановления строительных материалов: анализ состояния и перспективы развития // *Строительные материалы*. 2019. № 9. С. 83–103. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-83-103>
2. Калёнов С.В., Градова Н.Б., Сивков С.П., Агалакова Е.В., Белов А.А., Суясов Н.А., Хохлачев Н.С., Панфилов В.И. Препарат на основе бактерий, выделенных из гиперсоленых сред, для улучшения функциональных и защитных характеристик бетона // *Биотехнология*. 2020. Т. 36. № 4. С. 21–28. DOI: <https://doi.org/10.21519/0234-2758-2020-36-4-21-28>
3. Строкова В.В., Духанина У.Н., Балицкий Д.А., Дроздов О.И., Нелюбова В.В., Франк-Каменецкая О.В., Власов Д.Ю. Полиморфизм и морфология карбонатов кальция в технологиях строительных материалов, использующих бактериальную биоминерализацию (обзор) // *Строительные материалы*. 2022. № 1–2. С. 82–122. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-82-122>
4. Строкова В.В., Духанина У.Н., Балицкий Д.А., Дроздов О.И., Нелюбова В.В., Франк-Каменецкая О.В., Власов Д.Ю. Влияние состава и дисперсности заполнителя на его цементацию при

References

1. Strokova V.V., Vlasov D.Yu., Frank-Kamenetskaya O.V., Dukhanina U.N., Balitskiy D.A. Application of microbial carbonate biomineralization in biotechnologies for the creation and restoration of building materials: analysis of the state and development prospects. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 9, pp. 83–103. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-83-103>
2. Kalenov S.V., Gradova N.B., Sivkov S.P., Agalakova E.V., Belov A.A., Suyasov N.A., Khokhlahev N.S., Panfilov V.I. A preparation based on bacteria isolated from hypersaline media to improve the functional and protective characteristics of concrete. *Biotechnologiya*. 2020. Vol. 36. No. 4, pp. 21–28. (In Russian). DOI: [10.21519/0234-2758-2020-36-4-21-28](https://doi.org/10.21519/0234-2758-2020-36-4-21-28)
3. Strokova V.V., Dukhanina U.N., Balitskiy D.A., Drozdov O.I., Nelyubova V.V., Frank-Kamenetskaya O.V., Vlasov D.Yu. Polymorphism and morphology of calcium carbonates in construction materials technologies using microbial biomineralization (Review). *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 1–2, pp. 82–122. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-82-122>
4. Strokova V.V., Dukhanina U.N., Balitskiy D.A., Drozdov O.I., Nelyubova V.V., Frank-Kamenetskaya O.V., Vlasov D.Yu. Influence of aggregate com-

- карбонатной биоминерализации // *Строительные материалы*. 2022. № 7. С. 63–70. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-804-7-63-70>
5. Liendo F., Arduino M., Deorsola F.A., Bensaid S. Factors controlling and influencing polymorphism, morphology and size of calcium carbonate synthesized through the carbonation route: A review. *Powder Technology*. 2022. Vol. 398. 117050. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.117050>
 6. Гончарова М.А., Дергунова Е.С. Разработка и применение биодобавок на основе бактерий с уреазной активностью в цементных системах // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2021. № 10 (754). С. 117–124. DOI: <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2021-754-10-117-124>
 7. Baffoe E., Ghahremaninezhad A. On the interaction between proteins and cracked cementitious surface. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 352. 128982. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128982>
 8. Liang H., Liu Y., Tian B., Li Z., Ou H. A sustainable production of biocement via microbially induced calcium carbonate precipitation. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2022. Vol. 172. 105422. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2022.105422>
 9. Bhutange S. P., Latkar M.V., Chakrabarti T. Influence of direct urease source incorporation on mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 301. 124116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124116>
 10. Marin S., Cabestrero O., Demergasso C., Olivares S., Zetola V., Vera M. An indigenous bacterium with enhanced performance of microbially-induced Calcium carbonate biomineralization under extreme alkaline conditions for concrete and soil-improvement industries. *Acta Biomaterialia*. 2021. Vol. 120, pp. 304–317. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.11.016>
 11. Vilar R. P., Ikuma K. Adsorption of urease as part of a complex protein mixture onto soil and its implications for enzymatic activity. *Biochemical Engineering Journal*. 2021. Vol. 171. 108026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2021.108026>
 12. Sridhar S., Bhatt N., Suraishkumar G.K. Mechanistic insights into ureolysis mediated calcite precipitation. *Biochemical Engineering Journal*. 2021. Vol. 176. 108214. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2021.108214>
 13. Гончарова М.А., Акчурин Т.К., Дергунова Е.С. Особенности использования уреазных биодобавок в цементных системах // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер. Строительство и архитектура*. 2022. № 3 (88). С. 64–69.
 14. Sharma M., Satyam N., Reddy K. R. Effect of freeze-thaw cycles on engineering properties of biocemented sand under different treatment conditions. *Engineering Geology*. 2021. Vol. 284. 106022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106022>
 - position and dispersion on its cementation during carbonate biomineralization). *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 7, pp. 63–70. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-804-7-63-70>
 5. Liendo F., Arduino M., Deorsola F.A., Bensaid S. Factors controlling and influencing polymorphism, morphology and size of calcium carbonate synthesized through the carbonation route: A review. *Powder Technology*. 2022. Vol. 398. 117050. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.117050>
 6. Goncharova M. A., Dergunova E. S. Development and application of biosubstances based on urease-bacteria in cement systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*. 2021. No. 10 (754), pp. 117–124. (In Russian). DOI: [10.32683/0536-1052-2021-754-10-117-124](https://doi.org/10.32683/0536-1052-2021-754-10-117-124)
 7. Baffoe E., Ghahremaninezhad A. On the interaction between proteins and cracked cementitious surface. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 352. 128982. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128982>
 8. Liang H., Liu Y., Tian B., Li Z., Ou H. A sustainable production of biocement via microbially induced calcium carbonate precipitation. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2022. Vol. 172. 105422. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2022.105422>
 9. Bhutange S. P., Latkar M.V., Chakrabarti T. Influence of direct urease source incorporation on mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 301. 124116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124116>
 10. Marin S., Cabestrero O., Demergasso C., Olivares S., Zetola V., Vera M. An indigenous bacterium with enhanced performance of microbially-induced Calcium carbonate biomineralization under extreme alkaline conditions for concrete and soil-improvement industries. *Acta Biomaterialia*. 2021. Vol. 120, pp. 304–317. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.11.016>
 11. Vilar R. P., Ikuma K. Adsorption of urease as part of a complex protein mixture onto soil and its implications for enzymatic activity. *Biochemical Engineering Journal*. 2021. Vol. 171. 108026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2021.108026>
 12. Sridhar S., Bhatt N., Suraishkumar G.K. Mechanistic insights into ureolysis mediated calcite precipitation. *Biochemical Engineering Journal*. 2021. Vol. 176. 108214. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2021.108214>
 13. Goncharova M. A., Akchurin T. K., Dergunova E. S. Features of the use of urease bioadditives in cement systems. *Bulletin of Volgograd state university of architecture and civil engineering. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*. 2022. No. 3 (88), pp. 64–69. (In Russian).
 14. Sharma M., Satyam N., Reddy K. R. Effect of freeze-thaw cycles on engineering properties of biocemented sand under different treatment conditions. *Engineering Geology*. 2021. Vol. 284. 106022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106022>

15. Chen B., Sun W., Sun X., Cui Ch., Lai J., Wang Y., Feng J. Crack sealing evaluation of self-healing mortar with *Sporosarcina pasteurii*: Influence of bacterial concentration and air-entraining agent. *Process Biochemistry*. 2021. Vol. 107, pp. 100–111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2021.05.001>
16. Aluko O., Awolusi T., Adesina A. Influence of Curing Media and Mixing Solution on the Compressive Strength of Laterized Concrete. *Silicon*. 2020. No. 12, pp. 2425–2432. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00343-x>
17. Chaerun S.K., Rahayu S., Rizki I.N., Pane I. Utilization of a New Locally Isolated Bacterial Strain for Promoting Mechanical Properties of Mortar. *International Journal of Civil Engineering*. 2020. Vol. 18, pp. 665–671. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40999-020-00500-z>
18. Vijay K., Murmu M. Evaluating durability parameters of concrete containing bacteria and basalt fiber. *J Build Rehabil*. 2022. Vol. 7, pp. 2. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41024-021-00138-x>
15. Chen B., Sun W., Sun X., Cui Ch., Lai J., Wang Y., Feng J. Crack sealing evaluation of self-healing mortar with *Sporosarcina pasteurii*: Influence of bacterial concentration and air-entraining agent. *Process Biochemistry*. 2021. Vol. 107, pp. 100–111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2021.05.001>
16. Aluko O., Awolusi T., Adesina A. Influence of curing media and mixing solution on the compressive strength of laterized concrete. *Silicon*. 2020. No. 12, pp. 2425–2432. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00343-x>
17. Chaerun S.K., Rahayu S., Rizki I.N., Pane I. Utilization of a New Locally Isolated Bacterial Strain for Promoting Mechanical Properties of Mortar. *International Journal of Civil Engineering*. 2020. Vol. 18, pp. 665–671. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40999-020-00500-z>
18. Vijay K., Murmu M. Evaluating durability parameters of concrete containing bacteria and basalt fiber. *J Build Rehabil*. 2022. Vol. 7, pp. 2. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41024-021-00138-x>



ООО «ЛипецкНИЦстройпроект» – профильная проектная организация в области автомобильных дорог и искусственных сооружений на них, основными направлениями деятельности которой являются: все виды обследования транспортных сооружений (мостов, путепроводов, эстакад и т. д.); проектирование автомобильных дорог и сооружений на них; диагностика и паспортизация автомобильных дорог; разработка проектов производства работ, квалифицированные консультации и разработка нормативных документов в области дорожного хозяйства, разработка мероприятий по повышению транспортно-эксплуатационных характеристик сооружений с применением композиционных материалов.

ООО «ЛипецкНИЦстройпроект» располагает не только квалифицированным инженерным составом, но и учеными, что позволяет оставаться уникальной организацией, которая объединяет в себе науку и практику и служит прочным мостом в развитии транспортной инфраструктуры нашей страны.



Почтовый адрес: 398002, г. Липецк, ул. Балмочных С.Ф., вл. 11, оф. 602.

ОГРН 1094823015649; ИНН 4825066641, КПП 482501001

тел.: 8(4742)724201; 89205090002; 89202404440. E-mail: Insp-48@mail.ru

Реклама

12-14 апреля
Уфа 2023 **ВДНХ ЭКСПО**

28 Специализированная выставка
УРАЛСТРОЙИНДУСТРИЯ

ОРГАНИЗАТОРЫ



ПРАВИТЕЛЬСТВО
РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН



МИНИСТЕРСТВО
СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ
РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН

 **БВК** БАШКИРСКАЯ
ВЫСТАВОЧНАЯ
КОМПАНИЯ

Свяжитесь
с нами

www.stroybvk.ru
stroy@bvkexpo.ru

+7 (347) 246-41-80
+7 (347) 246-42-37



УДК 625.861

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-33-37>

М.А. ГОНЧАРОВА, д-р техн. наук (magoncharova777@yandex.ru),

И.А. ТКАЧЕВА, инженер (itkaceva@yandex.ru)

Липецкий государственный технический университет (398055, г. Липецк, ул. Московская, 30)

Повышение прочности асфальтобетонных смесей для ремонта жестких дорожных покрытий

Проведен анализ видов твердых покрытий автомобильных дорог, а именно цементобетона с минеральным связующим веществом и асфальтобетона на органическом связующем. Выполнено сравнение этих композиционных материалов по различным физико-механическим и эксплуатационным показателям. Главные критерии сравнения: прочность, деформативность, качество сцепления компонентов составов асфальтобетонных и цементобетонных смесей, а также слоев дорожной конструкции между собой. В результате проведенного анализа были выявлены недостаточно изученные вопросы. Повышение прочности и сдвигустойчивости дорожной конструкции является одним из них. Этому способствует введение модифицирующих компонентов различного состава и генезиса. Предложен состав смеси, в котором присутствует минеральная составляющая – цемент, органическая составляющая – битумная эмульсия, а также инертные материалы из плотных горных пород. В результате проведенных испытаний выявлено значительное повышение прочности конечного композита. Предложен вариант решения проблемы сцепления разнородных компонентов композиционных смесей, а также слоев дорожной конструкции между собой. Введение минерального наполнителя в состав каркасной асфальтобетонной смеси может увеличить прочность и сдвигустойчивость дорожной конструкции в целом.

Ключевые слова: цементобетон, асфальтобетон, ремонтные смеси, минеральный наполнитель, прочность, сцепление.

Для цитирования: Гончарова М.А., Ткачева И.А. Повышение прочности асфальтобетонных смесей для ремонта жестких дорожных покрытий // *Строительные материалы*. 2023. № 1–2. С. 33–37. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-33-37>

M.A. GONCHAROVA, Doctor of Sciences (Engineering) (magoncharova777@yandex.ru),

I.A. TKACHEVA, Engineer (itkaceva@yandex.ru);

Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya Street, Lipetsk, 398055, Russian Federation)

Increasing the Strength of Asphalt Concrete Mixtures for the Repair of Rigid Road Pavements

The analysis of the types of rigid road surfaces, namely cement concrete with a mineral binder and asphalt concrete with an organic binder, was carried out. The comparison of these composite materials according to various physical and mechanical and operational parameters was carried out. The main comparison criteria are: strength, deformability, quality of adhesion of the components of the compositions of asphalt concrete and cement concrete mixtures, as well as the layers of the road structure to each other. As a result of the analysis made, insufficiently studied issues were identified. Increasing the strength and shear resistance of the road structure is one of them. This is facilitated by the introduction of modifying components of various composition and genesis. The composition of the mixture is proposed, in which the mineral component is cement, the organic component is bitumen emulsion, as well as there are inert materials from dense rocks. As a result of tests conducted, a significant increase in the strength of the final composite was revealed. A variant of solving the problem of adhesion of heterogeneous components of composite mixtures, as well as layers of a road structure to each other, is proposed. The introduction of mineral filler into the frame asphalt concrete mixture can increase the strength and shear resistance of the road structure as a whole.

Keywords: cement concrete, asphalt concrete, repair mixes, mineral filler, strength, adhesion.

For citation: Goncharova M.A., Tkacheva I.A. Increasing the strength of asphalt concrete mixtures for the repair of rigid road pavements. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 1–2, pp. 33–37. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-33-37>

Устройство автомобильных дорог с высокими эксплуатационными характеристиками и сроком службы более 10 лет из цементобетона является важной задачей развития дорожной отрасли [1]. В России происходит постепенный переход от асфальтобетонного верхнего слоя покрытий к цементобетонному. В последующем при эксплуатации дороги будет необходим ремонт подобных конструкций. Вопрос о наиболее оптимальном и долговечном покрытии автомобильных дорог поднимается уже давно.

На данный момент остается актуальным не только как именно необходимо ремонтировать цементобетонные покрытия, но и нужно ли их ремонтировать вообще. Сравнение качественных характеристик асфальто- и цементобетона было произведено многими учеными, а именно Н.Н. Ивановым, В.Ф. Бабковым, Е.Г. Чистяковым, А.В. Корочкиным

и др. Результаты проведенных исследований можно представить в виде таблицы и произвести сравнение по различным физико-механическим и эксплуатационным показателям: прочность, сдвигустойчивость, пористость, адгезия, деформативность и др. [2–6].

Исследование показало, что асфальтобетон менее прочен и надежен по сравнению с цементобетоном. При этом долговечность дорог с цементобетонным покрытием в 5–6 раз выше, максимальный срок службы может достигать до 50 лет. Если учитывать экономическую составляющую, изначально строительство цементобетонных дорог выше на 30%, но после периода эксплуатации в течение 30 лет данный вид покрытия содержит дешевле на 30–40% [7].

Дороги испытывают постоянное воздействие от проезжающих транспортных средств. Цементобетон можно рассматривать как жесткую основу, которая

**Сравнение асфальто- и цементобетон по различным показателям
Comparison of asphalt and cement concrete by various indicators**

Показатель	Цементобетон	Асфальтобетон
Прочность и надежность	Высокая прочность, морозоустойчивость	Менее прочные конструкции с ровной и гладкой поверхностью Высокая водонепроницаемость, водоустойчивость
Износ	Не более 0,1–0,2 мм в год	Не более 1–1,5 мм в год
Долговечность	Долговечен: стабильность формы при перепаде температуры, отсутствие ям, колейности, выбоин	Недостаточная долговечность
Сдвигоустойчивость	Устойчивость к сдвигу	Сдвигоустойчивость зависит от вида асфальтобетона и содержания битума
Пористость	6–8%	В среднем 4%
Изменение свойств с течением времени	Подверженность коррозии и истирающему воздействию, особенно в период зимней эксплуатации	Старение вяжущего под воздействием ультрафиолетового излучения
Зависимость от температуры	Большой температурный диапазон использования Устойчивость к экстремальным погодным условиям	Снижение качества при частых знакопеременных переходах температуры
Безопасность	Высокое сопротивление скольжению, повышенная освещенность	При дождливой погоде появление эффекта аквапланирования
Взаимодействие с окружающей средой	Снижение воздействия на окружающую среду вследствие более низкого выделения CO ₂	При укладке загрязнение воздуха вредными веществами
Сцепление с колесом	Высокий коэффициент сцепления с колесами автомобилей, практически не изменяющийся при увлажнении покрытия	Хорошее сцепление с колесами автомобиля
Особые свойства	Уменьшение расхода топлива в автомобилях на 15–20%	Способность к гашению колебаний (демпфирующая способность)
Срок службы	25–30 лет	8–12 лет

плохо воспринимает динамические воздействия. В свою очередь, асфальтобетон обладает упруго-пластическими свойствами и может сглаживать динамические колебания. Таким образом, при сочетании жестких и упругих свойств композитных материалов с минеральными и органическими составляющими можно получить прочную и надежную конструкцию дорожной одежды со сроком службы более 30 лет [8, 9]. В целом у обоих композитных материалов имеются свои достоинства и недостатки, выбор одного из них зависит от конкретных условий строительства дороги и эксплуатационных характеристик.

Анализ полученных сведений помог выявить некоторые недостаточно изученные вопросы – сцепление материалов на различных уровнях, исследование свойств на границе зон контакта материалов и слоев, изучение совместной работы материалов, применение каркасных органоминеральных композитов в качестве ремонтных смесей и совершенствование их составов. Кроме того, А.В. Корочкин отмечает отсутствие системного подхода к определению толщины и

параметров дорожной конструкции [10], в которой присутствуют два композитных материала с минеральными и органическими вяжущими.

Для ответа на поставленные вопросы необходимо рассмотреть уровни взаимодействия составляющих компонентов асфальтобетонных смесей (рис. 1) [11]. Анализируя взаимодействие веществ на каждом уровне, можно подобрать оптимальные составляющие смеси с высокими физико-механическими показателями конечного композита.

Слабым местом в конструкции жестких дорожных одежд с асфальтобетонными слоями, рассматриваемыми в данной статье как ремонтные смеси, является междуслойная контактная поверхность. При действии горизонтальных усилий от движения и торможения транспортных средств возникают сдвиги в виде наплывов, волн, складок. Эти деформации появляются в результате смещения материала покрытия на устойчивом основании. Для предотвращения сдвига необходимо создать сцепление, которое может противодействовать возникающим горизонтальным усилиям. Помимо этого, большую роль в обеспечении сдвигоустойчивости верхнего слоя автомобильной дороги играет шероховатость основания дорожной конструкции, обеспечивая тем самым достаточное сцепление разнородных слоев [12].

Сцепление различных материалов между собой можно обосновать двумя факторами: адгезией, или способностью связующего материала прилипать к поверхности минерального наполнителя, и когезией, т. е. взаимным притяжением молекул в слое связующего компонента.

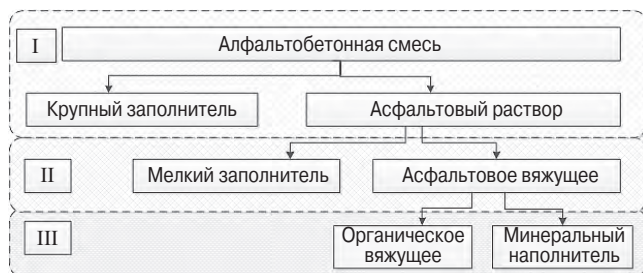


Рис. 1. Уровни взаимодействия компонентов в составе асфальтобетонных смесей

Fig. 1. Levels of interaction of components in asphalt concrete mixtures

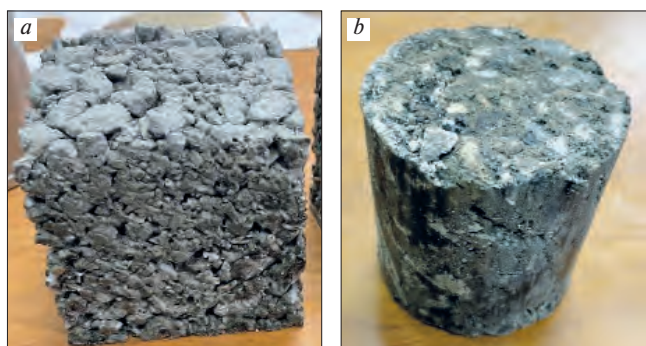


Рис. 2. Образцы смеси с минеральным и органическим связующим: а – куб; б – цилиндр

Fig. 2. Samples of a mixture with mineral and organic binders: а – cube; б – cylinder

По мнению Н.Н. Иванова, еще одним фактором, влияющим на сдвигустойчивость конструкции, является возникновение силы трения между слоями жесткого основания и упругого покрытия. Наиболее важными показателями при этом являются размер и форма зерен инертного заполнителя. Так, сопротивление трению выше при крупных, одноразмерных и остроугольных зернах заполнителя. С другой стороны, пустоты между минеральными зернами заполнены в том числе битумным связующим. Поэтому коэффициент трения может изменяться в зависимости от раздвижки крупных частиц мелкими, избыточное количество вяжущего вещества, а также от шероховатости поверхности [13–16].

Исходя из полученных условий наилучшим решением для ремонта цементобетонных дорог с помощью асфальтобетонных смесей можно назвать использование каркасного многощебенистого композита [14]. Если для каркасного инертного материала важными показателями являются прочность, кубовидность и размер зерна, то компоненты I уровня взаимодействия, а именно минеральный наполнитель и связующее вещество, требуют доработки.

Одним из вариантов повышения прочности дорожной одежды является использование смесей, сочетающих минеральные и органические вяжущие вещества. Были исследованы так называемые цементоасфальтобетонные ремонтные составы для автомобильных дорог. Отличительной особенностью является использование цемента в составе смеси в каче-

стве минерального наполнителя, а также применение битумной эмульсии как органического связующего. Прогнозировалось, что полученный состав будет обладать повышенными прочными характеристиками при сжатии и растяжении.

Для проведения экспериментальных исследований был разработан состав смеси, включающий щебень плотных горных пород фр. 5–20 мм – 47%; отсев дробления горных пород фр. 0–5 мм – 36,5%; цемент – 9,5%; битумную эмульсию – 5%; воду – 2%. Зерновой состав соответствовал требованиям для смесей типа Б марки I. Были изготовлены образцы (рис. 2) в виде кубов размером 10×10×10 см для испытания состава бетона и цилиндров $\varnothing 71,4$ мм для испытания в качестве асфальтобетона.

Главное контролируемое свойство – прочность при сжатии. Испытание образцов-цилиндров производилось на 2-е и 7-е сутки после формования; для образцов-кубов определялась прочность в 28-суточном возрасте. В результате проведенных испытаний было установлено, что прочность образцов-цилиндров на 2-е сутки превышала нормативное значение прочности при сжатии при температуре 20°C для асфальтобетонных смесей, равное 2,2 МПа, в 2,7 раза, а на 7-е сут – в 4,2 раза. При испытании образцов-кубов полученная прочность соответствовала классу бетона В7,5.

В результате проведенных испытаний установлено, что введение минерального материала может повысить прочность слоя дорожной одежды более чем в три раза. Таким образом, повысить прочность и сдвигустойчивость дорожной конструкции можно за счет введения минеральных компонентов. Помимо основного вида минеральных вяжущих веществ, а именно цемента ввиду его высокой стоимости, возможно применение модифицирующих компонентов различного состава и генезиса: цементная пыль, микрокремнезем, гранулированный шлак и др. Кроме того, дальнейшие исследования могут быть направлены на углубленное изучение взаимодействия битумной эмульсии и минерального наполнителя. Полученные результаты могут быть применены как для подбора оптимального состава ремонтных смесей с повышенными прочностными характеристиками, так и для повышения сцепления асфальтобетонных и цементобетонных слоев дорожной одежды.

Список литературы

1. Корочкин А.В. Особенности капитального ремонта и реконструкции жестких дорожных одежд // *Наука и техника в дорожной отрасли*. 2019. № 3 (89). С. 15–18.
2. Бондарев Б.А., Курочкин А.В., Коста А.А., Корнеева А.О. Методы капитального ремонта и реконструкции дорожных одежд с цементобетонными покрытиями. *Современная наука: теория, методология, практика: Материалы III Всероссийской (национальной) научно-практической конференции*. Тамбов. 2021. С. 206–207.

References

1. Korochkin A.V. Features of capital maintenance and reconstruction rigid road pavements. *Nauka i tekhnika v dorozhnoi otrasli*. 2019. No. 3 (89), pp. 15–18. (In Russian).
2. Bondarev B.A., Kurochkin A.V., Kosta A.A., Korneeva A.O. Methods of overhaul and reconstruction of road pavements with cement concrete coatings. *Modern Science: Theory, Methodology, Practice. Materials of the III All-Russian (national) scientific and practical conference*. Tambov. 2021, pp. 206–207. (In Russian).

3. Бородин Е.Ю., Гаранина Ю.И. Анализ использования жестких дорожных одежд. *Безопасность человека и устойчивое развитие общества перед вызовами глобальных трансформаций. Материалы международной междисциплинарной научной конференции.* Йошкар-Ола. 2021. Т. 1. Ч. 2. С. 99–100.
4. Акулова И.И., Артамонова О.В., Гончарова М.А. Научная школа академика РААСН Е.М. Чернышова (памяти учителя). Ч. 1. Разработка фундаментальных проблем материаловедения строительных композитов // *Научный журнал строительства и архитектуры.* 2022. № 4 (68). С. 72–82. DOI: <https://doi.org/10.36622/VSTU.2022.68.4.007>
5. Строкова В.В., Бабаев В.Б., Марков А.Ю. Сравнительная оценка конструкций дорожной одежды с использованием цементобетона // *Строительные материалы и изделия.* 2019. Т. 2. № 4. С. 56–63.
6. Ткачева И.А., Гончарова М.А. Состояние покрытий из цементобетона в России и их способы ремонта. *Современные проблемы материаловедения: Сборник научных трудов II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной 65-летию ЛГТУ.* Липецк, 2021. С. 297–300.
7. Корочкин А.В. Прогнозирование требуемой прочности дорожной одежды на весь срок службы согласно актуальным нормативным документам. *Проектирование автомобильных дорог: Сборник докладов 78-й международной научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, подсекции «Изыскания и проектирование дорог».* М., 2020. С. 30–38.
8. Чурсин Е.В., Гончарова М.А., Черноусов Н.Н. Повышение эксплуатационной надежности асфальтобетонных покрытий. *Инженерия в строительстве и транспорте. Актуальные исследования в современной науке. Материалы научно-практической конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета.* Липецк, 2020. С. 136–138.
9. Черноусов Н.Н., Бондарев Б.А., Стурова В.А. Аналитические зависимости влияния плотности материала на прочность и деформативность конструкционного бетона при осевом сжатии // *Строительные материалы.* 2022. № 5. С. 58–67. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-802-5-58-67>
10. Korochkin A.V. Influence of type and thickness of cement-concrete on the calculation of rigid road surfaces with asphalt-concrete pavement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Science and Technology Conference «FarEastCon 2019».* Vladivostok, Russky Island. 2020. Vol. 753, 2, Chapter 1. P. 022–029. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/753/2/022029>
11. Ткачева И.А. Взаимодействие органического связующего и минерального наполнителя в составах асфальтобетонных смесей. *Современные проблемы материаловедения: Сборник научных трудов III Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной памяти д-ра техн. наук,*
3. Borodin E.Yu., Garanina Yu.I. Determination of rigid pavement using. *Human Security and Sustainable Development of Society in the Face of the Challenges of Global Transformations. Materials of the international interdisciplinary scientific conference.* Ioshkar-Ola. Vol. 1. Part 2. 2021, pp. 99–100. (In Russian).
4. Akulova I.I., Artamonova O.V., Goncharova M.A. Scientific school of Academician RAASN E.M. Chernyshov (in memory of the teacher). Part 1. Development of fundamental problems of materials science of construction composites. *Scientific Journal of Construction and Architecture.* 2022. No. 4 (68), pp. 72–82. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.36622/VSTU.2022.68.4.007>
5. Strokova V.V., Babaev V.B., Markov A.Yu. Comparative evaluation of road pavement structures using cement concrete. *Stroitel'nye materialy i izdeliya.* 2019. Vol. 2. No. 4, pp. 56–63. (In Russian).
6. Tkacheva I.A., Goncharova M.A. Condition of cement concrete road surfaces in Russia and ways of repair. *Modern Problems of Materials Science: Scientific papers of the II All-Russian (national) scientific and practical conference devoted to the 65th anniversary of LSTU.* Lipetsk. 2021, pp. 297–300. (In Russian).
7. Korochkin A.V. Forecasting the required durability of road clothing for the weight of its period of service according to actual normative documents. *Road Design: Collection of reports of the 78th international scientific-methodical and research conference of MADI, subsection «Survey and design of roads».* Moscow. 2020, pp. 30–38. (In Russian).
8. Chursin E.V., Goncharova M.A., Chernousov N.N. Increasing operational reliability of asphalt concrete coatings. *Engineering in Construction and Transport. Actual Researches in Modern Science: Materials of the scientific-practical conference of students and graduate students of the Lipetsk State Technical University.* Lipetsk. 2020, pp. 136–138. (In Russian).
9. Chernousov N.N., Bondarev B.A., Sturova V.A. Analytical dependences of the effect of material density on the strength and deformability of structural concrete under axial compression. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials].* 2022. No. 5, pp. 58–67. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-802-5-58-67>
10. Korochkin A. V. Influence of type and thickness of cement-concrete on the calculation of rigid road surfaces with asphalt-concrete pavement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology Conference «FarEastCon 2019».* Vladivostok, Russky Island. 2020. Vol. 753, 2, Chapter 1, pp. 022–029. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/753/2/022029>
11. Tkacheva I.A. Interaction of organic binder and mineral filler in compositions of asphalt concrete mixtures. *Modern Problems of Materials Science: Scientific papers of the III All-Russian (national) scientific and practical conference devoted to the memory of Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences E.M.*

профессора, академика Российской академии архитектуры и строительных наук Е.М. Чернышова. Липецк, 2022. С. 70–74.

12. Корочкин А.В. Сдвигоустойчивость автомобильных слоев жесткой дорожной одежды // *Строительные материалы*. 2014. № 1–2. С. 65–67.
13. Корочкин А.В. Анализ сцепных качеств дорожных покрытий из асфальтобетона и цементобетона // *Строительные материалы*. 2019. № 7. С. 21–27. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-772-7-21-27>
14. Гончарова М.А., Ткачева И.А. Практический опыт применения щебеночно-мастичного асфальтобетона с использованием активированного минерального порошка // *Строительные материалы*. 2016. № 10. С. 80–82.
15. Pugin G., Yakontseva O.V., Salakhova V., Tyuryukhanov K.Y. Change in properties of bitumen used for road construction in bitumineral mixtures // *Materials Research Proceedings*. Temryuk, 2022. P. 183–188. DOI: <https://doi.org/10.21741/9781644901755-32>
16. Тюрюханов К.Ю. Факторы, влияющие на изменение физико-механических характеристик асфальтобетона. *Агротехнологии XXI века: стратегия развития, технологии и инновации. Материалы Всероссийской научно-практической конференции*. Пермь, 2021. С. 422–424.
- Chernyshov. Lipetsk. 2022, pp. 70–74. (In Russian).
12. Korochkin A.V. Shear resistance of automotive layers of rigid road clothing. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 1–2, pp. 65–67. (In Russian).
13. Korochkin A.V. Analysis of coupling qualities of road pavements of asphalt concrete and cement concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 7, pp. 21–27. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-772-7-21-27>
14. Goncharova M.A., Tkacheva I.A. Practical experience in applying the crushed stone-mastic asphalt concrete with the use of activated mineral powder. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2016. No. 10, pp. 80–82. (In Russian).
15. Pugin G., Yakontseva O.V., Salakhova V., Tyuryukhanov K.Y. Change in properties of bitumen used for road construction in bitumineral. *Materials Research Proceedings*. Temryuk. 2022, pp. 183–188. DOI: <https://doi.org/10.21741/9781644901755-32>
16. Tyuryukhanov K.Yu. Factors influencing on the change of physical and mechanical characteristics of asphalt concrete. *Agrotechnologies of the 21st Century: Development Strategy, Technologies and Innovations: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Permian. 2021, pp. 422–424. (In Russian).



РегионЭнергоСервис

ООО «РегионЭнергоСервис» – многопрофильная строительно-монтажная организация, основными направлениями деятельности которой являются промышленное и гражданское проектирование, монтаж и строительство объектов любой степени сложности, в том числе и опасных производственных.

Предприятие имеет большой опыт в проектировании и монтаже объектов энергетики – ЦРП, РП, ТП, производственных и отопительных котельных. Одним из направлений деятельности организации является строительство объектов сельского хозяйства, свинокомплексов и птицеферм.

ООО «РегионЭнергоСервис» выполняет весь комплекс строительно-монтажных работ с учетом жестких требований к качеству и срокам ввода объекта в эксплуатацию.



Юридический адрес: 398037, г. Липецк, ул. Агрономическая, 1, литер Б, офис № 9
Почтовый адрес: 398533, Липецкая обл., Липецкий р-н, с. Сырское, ул. Танкистов, 1
ИНН/КПП 4826075536/482501001, ОГРН 1104823016671
тел. +7 (4742) 57-00-13, e-mail: res048@mail.ru

Реклама

V МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ИНЖЕНЕРНАЯ ЗАЩИТА
ТЕРРИТОРИЙ, ЗДАНИЙ
И СООРУЖЕНИЙ»

22–23
МАРТА 2023



СОЧИ
ОТЕЛЬ «СИТИ ПАРК ОТЕЛЬ СОЧИ»

Организатор конференции



INTERNATIONAL
ASSOCIATION OF
FOUNDATION
CONTRACTORS

МЕЖДУНАРОДНАЯ
АССОЦИАЦИЯ
ФУНДАМЕНТОСТРОИТЕЛЕЙ

Генеральный спонсор
конференции



Спонсоры конференции



Генеральные информационные партнеры



УДК 666.983

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-39-43>

Р.Э. АГАМОВ, инженер (agamovr@inbox.ru),
М.А. ГОНЧАРОВА, д-р техн. наук (magoncharova777@yandex.ru),
А.Р. ПАЧИН, магистр (pa4in.aleks@yandex.ru)

Липецкий государственный технический университет (398055, г. Липецк, ул. Московская, 30)

Высокопрочные фибробетоны в конструкциях общестроительного и специального назначения

Показано, что повышение долговечности особо прочных конструкций зданий и защитных сооружений гражданской обороны является главной задачей на сегодня. Доказано, что применение высокопрочных композитов с дисперсным армированием на основе комбинированных вяжущих требует решения ряда проблем. В состав фибробетонов вовлекается техногенное сырье, в том числе шлаки металлургического производства. Рассмотрена проблема качества фибробетонов с учетом исходного состава, условий приготовления бетонной смеси, формования и твердения изделий. В качестве компонентов высокопрочного дисперсно-армированного бетона предложены тонкодисперсные добавки – наполнители с высокой активностью на основе техногенных отходов в сочетании с гиперпластификаторами и армирующими волокнами. Предложено решение для повышения качества лицевой поверхности до классов А1–А2. Установлено, что за счет оптимизации составов снизили расход клинкерной составляющей вяжущего на 20% без потери физико-механических свойств и повысили прочностные показатели более чем на 20 МПа. За счет применения дисперсного армирования увеличили прочность бетона при изгибе на растяжение на 15%. При этом базальтовые волокна в качестве армирующего компонента показали лучшую совместную работу с цементным камнем.

Ключевые слова: фибробетоны, поликарбоксилаты, лицевая поверхность, базальтовая фибра, полипропиленовая фибра, шлаки, тонкомолотые добавки, прочность.

Для цитирования: Агамов Р.Э., Гончарова М.А., Пачин А.Р. Высокопрочные фибробетоны в конструкциях общестроительного и специального назначения // *Строительные материалы*. 2023. № 1–2. С. 39–43. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-39-43>

R.E. AGAMOV, Engineer (agamovr@inbox.ru),

M.A. GONCHAROVA, Doctor of Sciences (Engineering) (magoncharova777@yandex.ru),

A.R. PACHIN, Master (pa4in.aleks@yandex.ru)

Lipetsk State Technical University (30, Moskovskaya Street, Lipetsk, 398055, Russian Federation)

High-Strength Fiber-Reinforced Concrete in Structures for General Construction and Special Purposes

It is shown that increasing the durability of particularly strong structures of buildings and protective structures of civil defense is the main task for today. It is proved that the use of high-strength composites with dispersed reinforcement based on combined binders requires solving a number of problems. Man-made raw materials, including slags of metallurgical production, are involved in the composition of fiber-reinforced concrete. The problem of the quality of fiber-reinforced concrete is considered, taking into account the initial composition, conditions for the preparation of a concrete mixture, molding and hardening of products. As components of high-strength dispersed reinforced concrete, finely dispersed filler – additives with high activity based on man-made waste in combination with hyperplasticizers and reinforcing fibers are proposed. A solution is proposed to improve the quality of the front surface to classes A1–A2. It was established that due to the optimization of the compositions, the consumption of the clinker component of the binder was reduced by 20% without loss of physical and mechanical properties and increased strength indicators by more than 20 MPa. Due to the use of dispersed reinforcement, the tensile strength of concrete in bending was increased by 15%. At the same time, basalt fibers as a reinforcing component showed better joint work with cement stone.

Keywords: fibroconcrete, polycarboxylates, front surface, basalt fiber, polypropylene fiber, slags, finely ground additives, strength.

For citation: Agamov R.E., Goncharova M.A., Pachin A.R. High-strength fiber-reinforced concrete in structures for general construction and special purposes. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 1–2, pp. 39–43. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-39-43>

Важные промышленные объекты экономики должны соответствовать высоким требованиям по устойчивости их функционирования не только в обычном режиме, но и в условиях чрезвычайных ситуаций военного и мирного времени, что весьма актуально в современных условиях.

Необходимость в укреплении обороноспособности страны путем повышения долговечности особо прочных конструкций зданий и защитных сооружений гражданской обороны, бункеров, взрыво- и взломоустойчивых конструкций, оборонных сооружений, специальных фортификационных сооружений Министерства обороны и других ведомств – главная задача в современных условиях. Обеспечить

ее можно путем применения вместо традиционных материалов композитов с дисперсным армированием на основе комбинированных вяжущих, стойких к знакопеременным динамическим нагрузкам и газопроницанию [1, 2]. В состав этих материалов вовлекается техногенное сырье, в том числе шлаки металлургического производства. Шлаки выступают в качестве компонентов, придающих специальные свойства, что, в свою очередь, способствует решению экологических задач [3].

Фибробетоны занимают одну из лидирующих позиций в числе наиболее востребованных строительных материалов. Они вытесняют керамику и металл в связи с возможностью изготовления на их основе

большеразмерных изделий не только плоской, но и разнообразной трехмерной формы с плавным сопряжением поверхностей. Такие изделия позволяют реализовать любые технические решения [4, 5]. При изготовлении и эксплуатации конструкций со сложной геометрией необходимо учитывать, что основной причиной разрушения лицевого слоя является накапливающаяся и замерзающая при отрицательных температурах влага в зимний период.

Потенциал увеличения прочности бетонов включает в себя большое количество приемов и методов. Упрочнение строительных композитов составляет одну из основных задач материаловедческой науки. Большое количество ученых-строителей занимались проблемой повышения строительно-технических свойств композитов с целью увеличения сроков их эксплуатации. Одно из направлений решения этой проблемы исследования в области уплотнения бетонных смесей технологическими приемами – прессование [6–8].

Практический интерес к прессованным изделиям из мелкозернистого бетона в современных условиях строительства непрерывно возрастает, что обусловлено расширением области применения таких изделий. Особую актуальность приобретают задачи повышения качества этих изделий.

Авторы рассматривают проблему качества комплексно, включая исходный состав бетона, условия приготовления бетонной смеси, формования и твердения изделий. Соответственно выделены периоды раннего (стадии приготовления формовочных смесей и формования изделий) и позднего структурообразования мелкозернистого бетона.

Постановка исследований, касающихся раннего структурообразования, не может быть успешно решена без привлечения фундаментальных научных положений физической и коллоидной химии, механики дисперсных систем, из которых определяющим для многих технологических вопросов является положение об избыточной поверхностной энергии, проявляемой на межфазных границах [9, 10].

Во влажных дисперсных системах, содержащих также газовую фазу, соотношение поверхностных энергий влияет прежде всего на силу связи воды с частицами твердой фазы и на ее распределение в дисперсной системе. При малых количествах вода вся распределяется в виде тончайших жестко структурированных пленок на поверхности твердых частиц, создавая расклинивающий (по Ребиндеру) эффект. По мере увеличения дозировки воды и утолщения пленок этот эффект усиливается и появляются условия для локализации определенного количества воды в межчастичных стыках с образованием на границе с газовой фазой вогнутых в сторону жидкости менисков. Такую воду принято считать капиллярной. Вогнутые мениски являются признаком пониженного (относительно атмосферного) давления, которое стремится сблизить частицы твердой фазы, и тогда в противовес расклинивающему возникает так назы-

ваемый стягивающий эффект. По мере повышения влажности формовочной смеси количество межчастичных стыков, аккумулирующих воду, возрастает, при этом капиллярный эффект также возрастает. И наконец, при степени заполнения межзерновых пор на 24 % и более от их объема отдельные влажностные «манжеты» (по Лыкову) объединяются в связную систему капилляров и стягивающий капиллярный эффект становится преобладающим.

Повышение прочности конструкции в целом является эффективным решением данной проблемы, однако и самым дорогостоящим, за счет увеличения расхода клинкерной составляющей и химических добавок – модификаторов. Можно было рассмотреть и гидрофобизацию поверхности бетона, но, по данным исследований [11], накопление и замерзание воды происходит в форме отдельных образований, прочно не связанных с поверхностью бетона, но оказывающих равное давление на выступающие элементы рельефа.

Таким образом, наиболее эффективным и экономически целесообразным решением является дисперсное армирование. В настоящее время в технологиях производства бетона используется несколько видов микроармирующих волокон: стальные, полипропиленовые, полиуретановые, базальтовые, стекловолоконные, асбестовые, хлопковые и др. Каждый вид имеет свои особенности, достоинства и недостатки, отличается специфической структурой, длиной волокна и толщиной. Над исследованием фиброармирующих материалов и фибробетонов работали многие российские ученые и производственники: Ю.М. Баженов, И.В. Волков, Б.А. Крылов, К.М. Королев, Л.Г. Курбатов, И.А. Лобанов, А.П. Павлов, Ф.Н. Рабинович, Г.К. Хайдуков и др.

Высокопрочный дисперсно-армированный бетон сочетает в себе высокоплотную и высокопрочную цементную матрицу с армирующими элементами (фиброй). В исследованиях кафедры строительного материаловедения и дорожных технологий ЛГТУ достигнута цель оптимизации составов и разработки технологии производства высокопрочных дисперсно-армированных бетонов класса В70 и более, снижения содержания дисперсной арматуры до 3% и применения супер- и гиперпластификаторов нового поколения, способствующих значительному снижению расхода воды в бетонных смесях.

Дисперсное армирование позволяет модифицировать бетон на двух уровнях: микроуровне – уровне цементной матрицы и макроуровне – уровне цементного бетона. Двухуровневое дисперсное армирование бетона рассматривается как эффективное средство повышения прочности при сжатии и растяжении, а также трещиностойкости и ударной вязкости.

В настоящих исследованиях в качестве компонентов комплексных модификаторов высокопрочного дисперсно-армированного бетона предлагаются тонкодисперсные добавки-наполнители с высокими пуццоланическими свойствами на основе

Свойства полученных фибробетонов
Properties of the obtained fiber-reinforced concrete

Состав	Подвижность (ОК), см	РК, см	Прочность при сжатии в нормативном возрасте, МПа	Прочность при растяжении при изгибе в нормативном возрасте, МПа
1	2	63	49,4	4,1
2	3		54,7	4,7
3	2		63,6	4,9
4	3		69	5
5	2		57,9	4,3
6	1		61,2	5,7
7	3		67,6	4,8
8	2		68,8	5,6
9	2		70,4	6,2

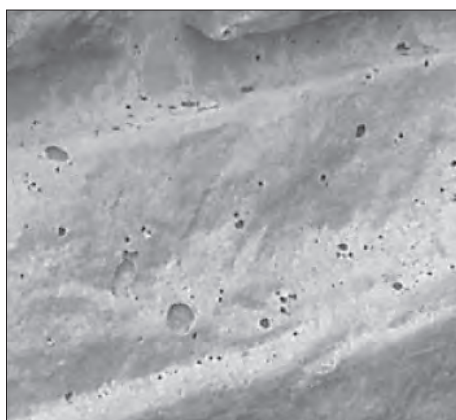


Рис. 1. Качество поверхности фибробетонов
Fig. 1. Surface quality of fiber-reinforced concrete

техногенных отходов в сочетании с гиперпластификаторами и армирующими волокнами.

При выборе вида армирующих волокон необходимо учитывать, что модуль упругости волокон должен превышать модуль упругости бетонной матрицы, волокна должны быть щелочестойкими и удобными в применении в выбранной технологии.

Если модуль упругости волокна существенно (в 3–10 раз) превышает модуль упругости бетона, то следует ожидать повышения механической прочности, трещиностойкости [5], снижения усадочных деформаций и улучшения других эксплуатационных свойств дисперсно-армированного бетона. По справочным данным деформативность фибры составляет 4–15% [12, 13], что почти в 1000 раз может превышать деформативность цементного камня.

Из принципов механики строительных материалов [8] следует, что если модуль упругости волокна больше модуля упругости бетона, то при разрыве матрицы фибра оказывается способной в каком-то диапазоне роста напряжений принимать всю нагрузку самостоятельно. Причем трещины, возникающие в бетонной матрице при напряжениях ниже предела упругости волокна, носят обратимый характер при условии снятия нагрузки [9]. Основным недостатком

фибробетонов является низкая коррозионная стойкость.

Применение нещелочестойких волокон может быть целесообразно на этапе формирования цементного камня для снижения усадочных деформаций при твердении, но в дальнейшем на месте волокон, которые распадаются в щелочной среде бетона, образуются продолговатой формы пустоты, которые резко снижают физико-механические свойства и качество выпускаемой продукции. Установлено, что наибольшей стойкостью к щелочному воздействию, доступностью, экономической и технологической эффективностью для повышения качества архитектурно-декоративного бетона обладают полипропиленовая фибра и базальтовое волокно [9–15].

Одной из главных задач, требующих решения при разработке составов высокопрочных фибробетонов, является повышение качества лицевой поверхности до классов А1–А2. При этом ставится задача увеличения стойкости к скалыванию рельефного слоя (рис. 1). Полученная вертикальная поверхность контрольных изделий имеет класс А1 по ГОСТ 13015–2012 «Изделия бе-

тонные и железобетонные для строительства. Общие технические требования. Правила приемки, маркировки, транспортирования и хранения». На отдельных участках рельефной поверхности имеются поры, однако характер их происхождения связан с вертикальной формовкой смеси и отсутствием выхода защемленного опалубкой воздуха, что является неизбежным для вибрационного способа формовки изделий.

Для исследования влияния наполнителей (известняковая мука Данковского карьера строительных известняков, конденсированный микрокремнезем производства ПАО «НЛМК» и другие тонкомолотые добавки в количестве от 15 до 25% от массы цемента) в составах применяли портландцемент марки ЦЕМ I 42,5 Н производства «Мордовцемент» (расход составлял от 380 до 450 кг/м³). Ограничительным технологическим условием являлось получение бетонных смесей с подвижностью П1 и расплывом конуса 65 см под действием вибрации. Это было реализовано за счет применения пластифицирующей добавки на поликарбоксилатной основе Sika Viscocrete 100Т.

В качестве крупного заполнителя использовали щебень из доменного шлака ПАО «НЛМК» фракции

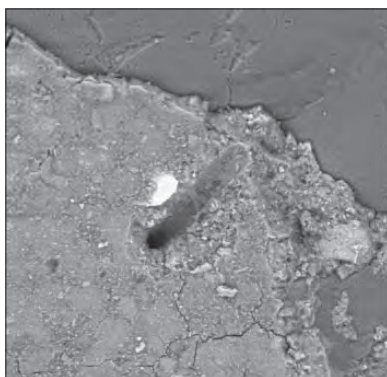


Рис. 2. Борозда в цементном камне после протергивания полипропиленовой фибры. Увеличение в 500 раз

Fig. 2. A furrow in the cement stone after pulling the polypropylene fiber. 500x magnification

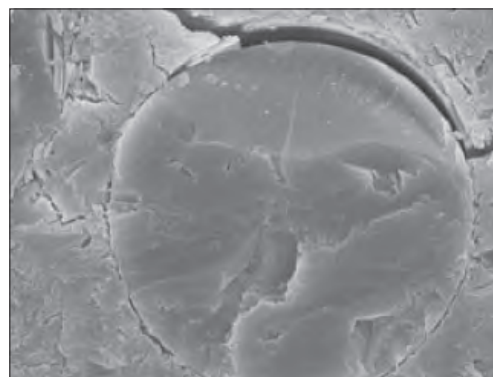
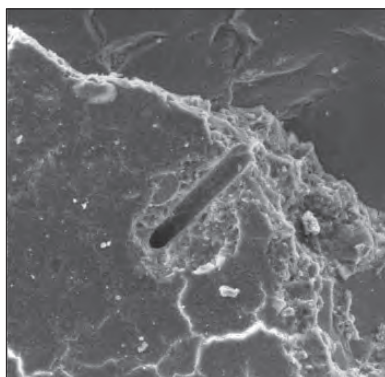


Рис. 3. Базальтовое волокно в цементном камне. Увеличение в 3100 раз

Fig. 3. Basalt fiber in cement stone. 3100 times magnification

5–20 мм (расход 1200–1350 кг/м³) и шлаковый песок с модулем крупности 2,1 (расход 430–450 кг/м³). Используемые армирующие материалы – базальтовая фибра с длиной волокна 10 мм производства ООО «Кратон», полипропиленовая фибра с длиной волокна 12 мм производства ООО «Пласт».

В таблице показано, что применение в составах фибробетонов тонкомолотых добавок в сочетании с эффективными суперпластификаторами позволяет снизить расход клинкерной составляющей вяжущего на 20% без потери физико-механических свойств и повысить прочностные показатели более чем на 20 МПа. За счет применения дисперсного армирования (в количестве от 1 до 3% от массы портландцемента) увеличили прочность бетона при изгибе при растяжении на 15% (по сравнению с контрольным составом); прирост прочностных показателей при применении полипропиленового волокна несколько ниже, это объясняется меньшей адгезией волокна к цементной матрице.

Список литературы / References

1. Goncharova M.A., Simbaev V.V., Karaseva O.V. Optimization of the composition of fine-grained concrete in order to improve the quality of the front surface of blocks. *Solid state phenomena*. 2018. Vol. 284, pp. 1052–1057. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.1052
2. Goncharova M.A., Krohotin V.V., Ivashkin A.N. The influence of fibrous reinforcement on the properties of self-compacting concrete mixture and reinforced concrete. *Solid state phenomena*. 2020. Vol. 299, pp. 112–117. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.112
3. Гончарова М.А., Черноусов Н.Н., Стурова В.А., Ливенцева А.А. Способ подбора оптимального состава мелкозернистого сталефиброблакопемзобетона // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2021. № 11 (755). С. 64–72. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-755-11-64-72
3. Goncharova M.A., Chernousov N.N., Sturova V.A., Liventseva A.A. Method for selecting the optimal composition of fine-grained steel-fiber-slash pum-concrete. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Stroitel'stvo*. 2021. No. 11 (755), pp. 64–72. (In Russian). DOI: 10.32683/0536-1052-2021-755-11-64-72
4. Гончарова М.А., Мраев А.В., Пачин А.Р., Акчурин Т.К. Прогнозирование долговечности шлакобетонов в условиях агрессивной сульфатной среды // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура*. 2022. № 3 (88). С. 70–75.
4. Goncharova M.A., Mraev A.V., Pachin A.R., Akchurin T.K. Forecasting the durability of cinder blocks in an aggressive sulfate environment. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*. 2022. No. 3, pp. 70–75. (In Russian).
5. Черноусов Н.Н., Бондарев Б.А., Стурова В.А., Бондарев А.Б., Ливенцева А.А. Аналитические зависимости влияния плотности материала на прочность и деформативность конструкционного

- бетона при осевом сжатии // *Строительные материалы*. 2022. № 5. С. 58–67. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-802-5-58-67>
5. Chernousov N.N., Bondarev V.A., Sturova V.A., Bondarev A.B., Liventseva A.A. Analytical dependences of the effect of material density on the strength and deformability of structural concrete under axial compression. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 5. С. 58–67. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-802-5-58-67>
 6. Bondarev V.A., Komarov P.V., Erofeev A.V., Bayazov V.A. Influence of the self-heating temperature on the cyclic durability of composite materials. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2022. №1(53), pp.39–45. DOI:10.36622/VSTU.2022.53.1.004
 7. Goncharova M., Agamov R., Pachin A. Optimization of compositions of refractory composites using mathematical experiment planning. *4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*. 2022, pp.01–05. DOI:10.1109/SUMMA57301.2022.9974045
 8. Моргун Л.В. Теоретическое обоснование и экспериментальная разработка технологии высокопрочных фибропенобетонов // *Строительные материалы*. 2005. № 6. С. 59–63.
 8. Morgun L.V. Theoretical substantiation and experimental development of high-strength fibropen concrete technology. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2005. No. 6, pp. 59–63. (In Russian).
 9. Маилян Л.Р., Налимова А.В., Маилян А.Л., Айвазян Э.С. Челночная технология изготовления фибробетона с агрегированным распределением фибр и его конструктивные свойства // *Инженерный вестник Дона*. 2011. № 4.
 9. Mailyan L.R., Nalimova A.V., Mailyan A.L., Ayvazyan E.S. Shuttle manufacturing technology of fiber concrete with aggregated fiber distribution and its structural properties. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2011. No. 4. (In Russian).
 10. Баранов А.С. Прочность и долговечность мелкоштучных изделий из гиперпрессованного фибробетона // *Градостроительство и архитектура*. 2017. Т. 7. № 3 (28). С. 46–49. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.03.8
 10. Baranov A.S. Strength and durability of small piece products made from fibre reinforced concrete. *Gradostroitelstvo i arhitektura*. 2017. Vol. 7. No. 3 (28), pp. 46–49. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.03.8
 11. Пустовгар А.П., Лавданский П.А., Журавлев А.В., Есенов А.В., Медведев В.В., Веденин А.Д. Тепловыделение при гидратации цемента серпентинитового бетона // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2014. № 5. С. 285–287.
 11. Pustovgar A.P., Lavdansky P.A., Zhuravlev A.V., Esenov A.V., Medvedev V.V., Vedenin A.D. Hydration Heat Release Of Cement In Serpentine Concrete. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzhya*. 2014. No. 5, pp. 285–287. (In Russian).
 12. Прошин А.П., Демьянова В.С., Калашников Д.В. Особо тяжелый высокопрочный бетон для защиты от радиации с использованием вторичных ресурсов. Пенза: ПГУАС, 2004. 140 с.
 12. Proshin A.P., Demyanova V.S., Kalashnikova D.V. Osobo yazhelyy vysokoprochnyy beton dlya zashchity ot radiatsii s ispolzovaniem vtovichnykh resursov [Extra heavy high-strength concrete for radiation protection using secondary resources]. Penza: PGUAS. 204. 140 p.
 13. Бондарев В.А., Черноусов Н.Н., Черноусов Р.Н., Стурова В.А. Исследование прочностных свойств сталефиброшлакобетона при осевом растяжении и сжатии с учетом его возраста // *Строительные материалы*. 2017. № 5. С. 20–24.
 13. Bondarev V.A., Chernousov N.N., Chernousov R.N., Sturova V.A. Research in strength properties of steel-fiber-slag concrete in the course of axial tension and compression with due regard for its age. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 5, pp. 20–24. (In Russian).
 14. Бондарев В.А., Черноусов Н.Н., Черноусов Р.Н., Стурова В.А. Исследование деформативных свойств сталефиброшлакобетона при осевом растяжении и сжатии с учетом его возраста // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. 2017. Т. 8. № 1. С. 18–31. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.1.02
 14. Bondarev V.A., Chernousov N.N., Chernousov R.N., Sturova V.A. Studying deformation properties of steel fiber slag reinforced concrete under axial tension and compression in view of its age. *Vestnik Permskogo Nacionalnogo Issledovatel'skogo Polytechnicheskogo Universiteta. Stroitelstvo i Arhitektura*. 2017. Vol. 8. No. 1, pp. 18–31. (In Russian). DOI: 10.15593/2224-9826/2017.1.02
 15. Rodríguez de Sensale G., Viacava I. R. A study on blended Portland cements containing residual rice husk ash and limestone filler. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 166, pp. 873–888. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.113>
 16. Alsubari B., Shafiqh P., Jumaat M.Z. Utilization of high-volume treated palm oil fuel ash to produce sustainable self-compacting concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 137, pp. 982–996. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.133>
 17. Ozturk O., Ozyurt N. Sustainability and cost-effectiveness of steel and polypropylene fiber reinforced concrete pavement mixtures. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 363. 132582. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132582>
 18. Fattouh M. S., Tayeh B. A., Agwa I. S., Elsayed E. K. Improvement in the flexural behaviour of road pavement slab concrete containing steel fibre and silica fume. *Case Studies in Construction Materials*. 2023. Vol. 18. e01720. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01720>

В.А. СТУРОВА, аспирант, инженер (v-livenceva@mail.ru)

Липецкий государственный технический университет (398055, г. Липецк, ул. Московская, 30)

Сталефибробетон с применением отходов местных производств для транспортных сооружений

Успехи в области изготовления строительных материалов за последние годы позволили создать ряд новых композиционных материалов, уровень свойств которых несравнимо выше уровня свойств традиционных бетонов. К таким материалам можно отнести сталефиброшлакобетон, в состав которого включена не только стальная фибра, создающая прочный каркас, но и отходы металлургии, такие как шлак, отсевы его дробления, шлаковый песок и др. Использование этих отходов способствует снижению негативного воздействия на окружающую среду и себестоимости работ. Проведен анализ свойств сталефибробетона с применением отходов местных производств для возможности применения данного материала при строительстве и ремонте транспортных сооружений стратегического назначения. Показано, что использование фибры в бетоне повышает момент образования трещин на 10% и существенно уменьшает раскрытие видимых трещин. Процентное содержание фибры по объему в матрице не должно превышать 1,5%.

Ключевые слова: прочность, истираемость, продавливание, сталефибробетон, трещиностойкость, усадка.

Для цитирования: Стурова В.А. Сталефибробетон с применением отходов местных производств для транспортных сооружений // *Строительные материалы*. 2023. № 1–2. С. 44–49. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-44-49>

V.A. STUROVA, Graduate Student, Engineer (v-livenceva@mail.ru)

Lipetsk State Technical University, (30, Moskovskaya Street, Lipetsk, 398055, Russian Federation)

Steel Fiber Concrete with the Use of Local Production Waste for Transport Facilities

Advances in the field of manufacturing building materials in recent years have made it possible to create a number of new composite materials, the level of properties of which is incomparably higher than the level of properties of traditional concrete. Such materials include steel fiber slag concrete, which includes not only steel fiber, which creates a strong frame, but also metallurgy waste, such as slag, screenings from its crushing, slag sand, etc. The use of these wastes helps to reduce the negative impact on the environment and the cost of work. The analysis of the properties of steel-fiber concrete with the use of waste from local industries for the possibility of using this material in the construction and repair of strategic transport facilities was carried out. It is shown that the use of fiber in concrete increases the moment of crack formation by 10% and significantly reduces the opening of visible cracks. The percentage of fiber by volume in the matrix should not exceed 1.5%.

Keywords: strength, abrasion, punching, steel fiber concrete, crack resistance, shrinkage.

For citation: Sturova V.A. Steel Fiber Concrete with the use of local production waste for transport facilities. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 1–2, pp. 44–49. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-44-49>

Важные строительные объекты стратегического назначения, транспортные сооружения, такие как мосты, тоннели, аэродромы, должны соответствовать высоким требованиям по устойчивости их функционирования не только в обычном режиме, но и в условиях чрезвычайных ситуаций военного и мирного времени, что весьма актуально в настоящее время.

Необходимость в повышении живучести транспортных сооружений — одна из главных задач на сегодня. Обеспечить которую можно путем применения вместо традиционных композиционных материалов с дисперсным армированием на основе цементных и других вяжущих, стойких к знакопеременным динамическим нагрузкам.

Однако применение таких материалов кроме явных преимуществ, таких как стойкость к знакопеременным и динамическим нагрузкам, повышенная прочность и деформативность, увеличенная трещиностойкость, имеет также один неоспоримый недостаток — это высокая стоимость для использования в транспортном строительстве. Решить эту проблему можно путем введения в состав композитов отходов

местных производств, таких как доменный шлак и отходы его дробления взамен кварцевого песка который также позволит снизить стоимость готового изделия, сохранив при этом все эксплуатационные характеристики.

Актуальность работы подтверждается следующими государственными заданиями: «Стратегия развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года»; «Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года»; национальный проект «Безопасные и качественные дороги».

Цель исследования заключается в разработке новых технологических решений для транспортных конструкций, в частности переходных плит и элементов мостов на основе сталефибробетона с применением отходов местных производств, с улучшенными физико-механическими, эксплуатационными и деформативными характеристиками.

Материал и методы исследования. Образцы из композиционного материала с применением стальной фибры и отходов местных производств, ком-



Рис. 1. Отходы местных производств: а – 5–20 мм, мелкофракционный; б – 0–5 мм, отсев дробления

Fig. 1. Waste of local industries: а – 5–20 mm, fine-grained; а – 0–5 mm, screening from crushing



Рис. 2. Виды фибры, применяемой в исследовании

Fig. 2. Types of fibers used in the study

плексные испытания работы различных видов фибр в мелкозернистом шлакобетоне для исследования их совместной работы, циклические испытания на прочность и усадку.

Сырьевые компоненты сталефиброшлакобетона: мелкозернистый шлакобетон на цементном вяжущем (использование портланд- и шлакопортландцементов марок 400 и 500); отсева дробления литого шлакового щебня производства ПАО НЛМК взамен кварцевого песка, применение которых обусловлено сравнением зерновых составов (рис. 1) [1]. В качестве дисперсной арматуры принимали одну из нижеперечисленных видов в зависимости от назначения:

а) фибра из стальных канатов волнистой формы для повышения сцепления с бетоном матрицы;

б) фибра, рубленая из холоднокатаной стальной проволоки;

в) гладкая стальная фибра и фибра Dramix диаметром 0,8 мм, длиной 60 мм с расчетным сопротивлением растяжению $R_f=1000-1100$ МПа (рис. 2) [8].

В зависимости от применения на фибру возможно нанесение покрытия, которое уменьшит трение, улучшит стойкость или адгезию с другими материалами.

Армирование стальными проволоками существует с 1970-х гг. и продолжает развиваться. Изгибы и

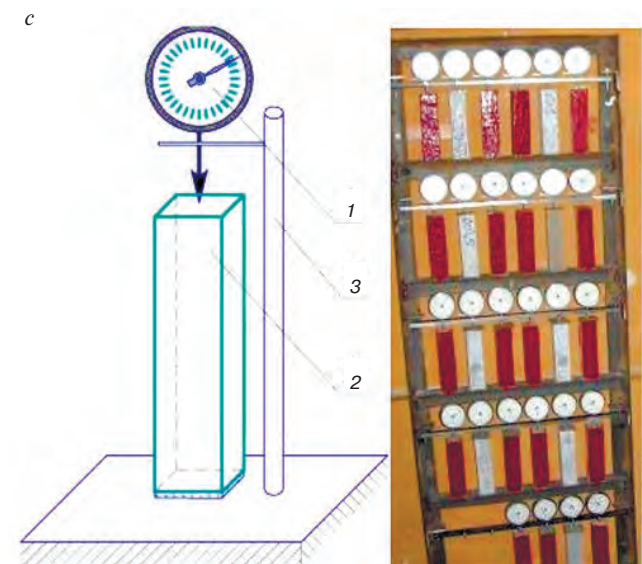


Рис. 3. Фотоиллюстрации образцов при экспериментах: а – определение призмной прочности; б – испытание на продавливание; с – определение деформаций усадки; 1 – индикатор часового типа; 2 – образец-призма; 3 – штатив

Fig. 3. Photo illustrations of samples during experiments: а – determination of prism strength; б – punching test; с – determination of shrinkage deformations (1 – clock type indicator; 2 – sample-prism; 3 – tripod)

крючки имеют решающее значение для закрепления волокна и последующей пластичности бетона. Эти характеристики в сочетании с удлинением стали явились основополагающими для выбора фибры Dramix для исследования.

Испытание образцов производилось в возрасте 28 сут на базе лабораторий ЛГТУ: «Общая механика» и «Строительное материаловедение и дорожные технологии». Общий вид образцов из сталефиброшлакобетона (СФШБ) и основного испытательного и регистрирующего оборудования показан на рис. 3, общий вид образцов на рис. 4.



Рис. 4. Определение физико-механических свойств СФШБ
Fig. 4. Determination of the physical and mechanical properties of SFSC

Определение физико-механических свойств СФШБ

Прочность. Экспериментальные исследования по определению прочностных показателей при сжатии и растяжении сталефибробетонных конструкций на основе отходов местных производств имеют важное значение, так как учет значений прочностных характеристик СФШБ в возрасте от 3 сут при укладке дорожных одежд может способствовать скорейшему вводу в эксплуатацию строительных объектов.

Образцы имели следующие размеры: кубы – 100×100×100 мм, призмы – 100×100×400 мм. На сжатие испытывались в прессе ИП-100 и на универсальной разрывной машине Р-20. На растяжение – на специальной экспериментальной установке. В исследуемых на растяжение и сжатие СФШБ-образцах использовалась бетон-матрица классов В5–В27,5 и различный процент армирования.

Проанализировав проведенные экспериментальные исследования, можно установить, что прочность при осевом растяжении образцов из мелкозернистого шлакобетона составляет приблизительно 0,03–0,08 кубиковой прочности. В результате обработки опытных данных удалось получить следующие зависимости:

$$R_{bt} = 0,19 \sqrt[3]{R_m^2}. \quad (1)$$

По результатам испытания образцов при сжатии можно спрогнозировать характер и вид деформирования изгибаемых элементов из шлакобетона, т. е. использовать сопротивление разрушению как интегральную конструкционную характеристику бетона. На основании опытных данных при испытании балок при изгибе получена зависимость прочности на растяжение при изгибе от прочности бетона при сжатии:

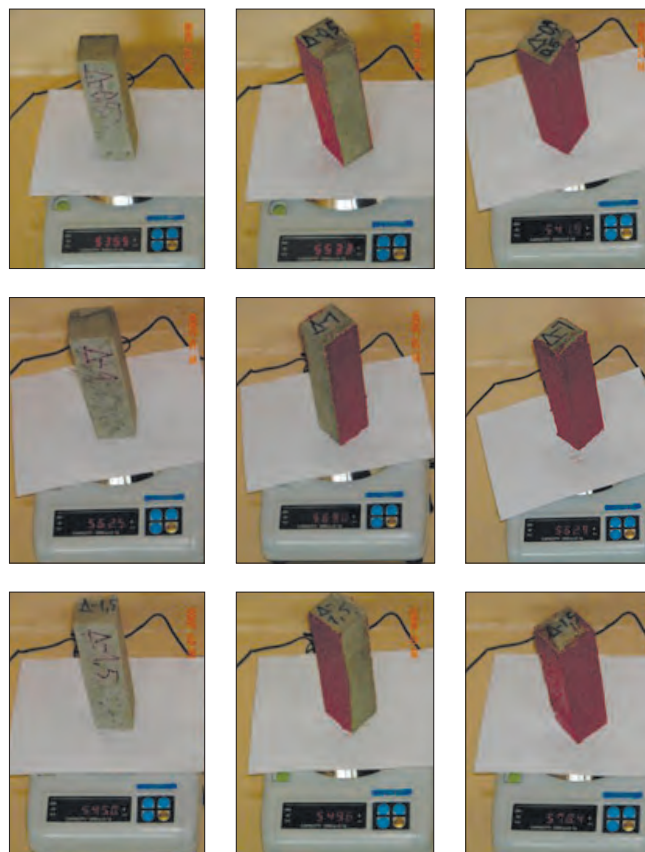


Рис. 5. Общий вид образцов для исследования усадки
Fig. 5. General view of the samples for the study of shrinkage

$$R_{btb} = \beta \cdot R_{bt} = 0,21 \cdot \alpha \cdot \beta \sqrt[3]{R_m^2}, \quad (2)$$

где β – масштабный коэффициент, учитывающий схему нагружения балки; R_{bt} – временное сопротив-

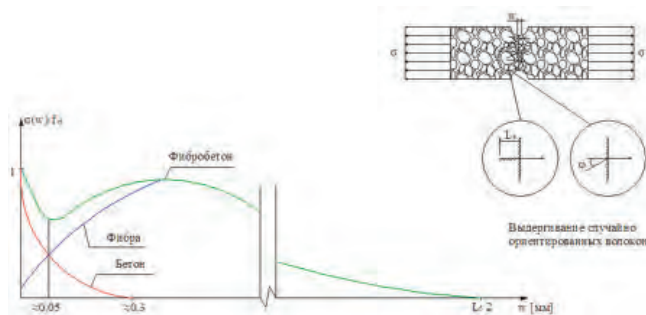


Рис. 6. Диаграмма растяжения различных материалов, фибры, бетона и фибробетона; соединение из фибробетона при одноосном растяжении

Fig. 6. Tensile diagram of various materials, fiber, concrete and fiber concrete; and fiber concrete joint in uniaxial tension

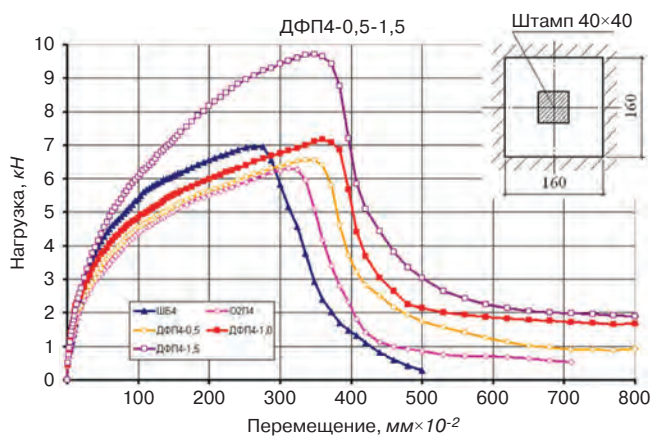


Рис. 7. График разрушения образцов с использованием фибры Dramix при продавливании штампом 40×40 мм

Fig. 7. Graph of the destruction of samples using Dramix fiber when punched with a 40×40 mm stamp

ление мелкозернистого шлакобетона осевому растяжению, МПа.

Усадка. Испытания по определению усадочных деформаций проводились на образцах-призмах 40×40×160 мм (рис. 5). По результатам исследования усадочных деформаций сталефибробетонных образцов была получена формула для практического определения усадочных деформаций в аналогичных по конфигурации конструкциях независимо от их размеров и формы:

$$\varepsilon \cdot 10^5 = \left\{ 1,24 \cdot \left[\ln \left(\frac{t}{b^2} \cdot \frac{V}{S} \right) \right]^2 + 8,54 \cdot \ln \left(\frac{t}{b^2} \cdot \frac{V}{S} \right) + 16,63 \right\} \cdot (1 - \alpha_{sh}), \quad (3)$$

где t – время, сут; b – расстояние между высушиваемыми поверхностями, см; V – объем образца, см³; S – поверхность образца, см²; α_{sh} – коэффициент, учитывающий фибровое армирование.

Трещиностойкость. Результаты наблюдения за трещинообразованием показали, что в среднем нагрузка трещинообразования, зафиксированная по показаниям прибора, растет с увеличением процентного армирования [6]. Нагрузка образования трещин шириной более 0,095 мм превышала нагрузку трещинообразования в среднем на 10–20%. В ходе анализа была получена диаграмма зависимости «нагрузка – относительная деформация» и с ее помощью рассчитана энергия, затраченная на разрушение образцов,

которая оказалась в 137 раз больше, чем у обычного бетона (рис. 6).

Следовательно, можно сказать, что открытие трещины в бетоне зависит в первую очередь от вида фибры, в том числе заполнителя, жесткости и прочности (или ударной вязкости), а также от текстуры поверхности, формы и содержания [13].

Продавливание. Испытания на продавливание, имеют важное значение, так как дорожные плиты при действии сосредоточенных сил могут разрушаться от продавливания по замкнутой поверхности [17]. С целью определения несущей способности таких конструкций были проведены испытания на данный вид загрузения опытных образцов сталефиброшлакобетонных плит с размерами 160×160, толщиной 20 мм.

Исследование продавливания и анализ опытных результатов сталефибробетонных дорожных покрытий (рис. 7) показали, что проектирование и дальнейший расчет таких сооружений необходимо вести с учетом зависимости:

$$F \leq F_u = 0,85 R_{bt} \cdot A_b, \quad (4)$$

где R_{bt} – расчетное сопротивление сталефиброшлакобетона растяжению, определяемое по ранее полученным формулам (10)–(12) в зависимости от вида армирующих волокон и прочности бетона-матрицы при сжатии.

Плотность. На основании полученных экспериментальных данных и математической обработки установлено влияние плотности материала на прочность и деформативность конструкционного бетона при осевом сжатии [4]. Прочность цементного камня в зависимости от его относительной плотности ($\rho_{ц}$) может быть описана формулой:

$$R_m = A \cdot \left(\frac{1 + 0,23 \alpha \rho_{ц}}{1 + \frac{B}{C} \cdot \rho_{ц}} \right)^n. \quad (5)$$

Все параметры, входящие в эту формулу, имеют определенный физический смысл и позволяют оценивать влияние на прочность цементного камня не только начального водоцементного отношения (B/C), но и степени гидратации цемента α (n имеет значение, близкое к двум, и может составлять $n=2,7$).

Истираемость. Истираемость – один из важных критериев обеспечения работоспособного состояния транспортных сооружений; в результате проведенных опытов установлено, что ее учет необходимо вести по формуле:

$$G_1 = \frac{m_1 - m_2}{F}, \quad (6)$$

где m_1 – масса образца до испытания, г; m_2 – масса образца после четырех циклов испытания, г; F – площадь истираемой грани образца, см².

Выводы

Проектирование составов сталефибробетонов на основе отходов местных производств для транспортных конструкций должно производиться с учетом многих характеристик [16]. Экспериментально, пу-

тем подбора, установить оптимальный состав любого материала чрезвычайно трудно. Однако, используя методы математического анализа и положения теории композиционного материала, указанную работу можно выполнить с минимальными затратами.

Проанализировав проделанную работу, можно отметить следующие факторы, которые влияют на структурообразование композитов из сталефибробетона: соотношение компонентов по массе; способы перемешивания сырьевых компонентов; геометрические характеристики стальных армирующих волокон; последовательность введения в состав компонентов.

Также на состав композиционного материала влияет учет следующих показателей: водоцементное отношение; уплотнение; жесткость смеси; отношение цемента к заполнителю. Эти факторы определя-

ют структуру композиционной матрицы и ее свойства. В результате был разработан способ оптимизации составов таких композитов, который позволяет получить более экономичные по расходу цемента составы бетонов, при этом сократить трудовые и материальные затраты по нахождению рационального соотношения компонентов и применять их в дорожном строительстве взамен традиционных [18].

По результатам исследований можно также отметить, что использование фибры в бетоне повышает до 10% момент образования трещин и существенно снижает раскрытие видимых трещин. Однако процентное содержание фибры по объему в матрице не должно превышать 1,5%, а прочность фибробетона при изгибе повышается с увеличением коэффициента армирования примерно до 70%.

Список литературы

1. Стурова В.А., Бондарев Б.А., Черноусов Н.Н., Бондарев А.Б., Жидков В.К. Основные дефекты и повреждения конструкций транспортных сооружений – переходных плит, элементов покрытия ездового полотна и возможность их устранения. *Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство и транспорт. Материалы IX Международной научно-практической конференции, посвященной памяти академика РААСН Чернышова Е.М.* 2022. С. 180–183.
2. Уфимцев В.М., Коробейников Л.А. Шлаки в составе бетона: новые возможности // *Технологии бетонов.* 2014. № 6. С. 50–53.
3. Черноусов Н.Н., Бондарев Б.А., Стурова В.А., Бондарев А.Б., Ливенцева А.А. Прогнозирование характера деформирования изгибаемых шлакобетонных элементов // *Строительные материалы.* 2022. № 3. С. 15–24. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-800-3-15-24>
4. Черноусов Н.Н., Бондарев Б.А., Стурова В.А., Бондарев А.Б., Ливенцева А.А. Аналитические зависимости влияния плотности материала на прочность и деформативность конструкционного бетона при осевом сжатии // *Строительные материалы.* 2022. № 5. С. 58–67. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-802-5-58-67>
5. Бондарев Б.А., Черноусов Н.Н., Черноусов Р.Н., Стурова В.А. Исследование прочностных свойств сталефиброшлакобетона при осевом растяжении и сжатии с учетом его возраста // *Строительные материалы.* 2017. № 5. С. 20–24.
6. Бондарев Б.А., Черноусов Н.Н., Черноусов Р.Н., Стурова В.А. Исследование деформативных свойств сталефиброшлакобетона при осевом растяжении и сжатии с учетом его возраста // *Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура.* 2017. Т. 8. № 1. С. 18–31. DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2017.1.02>
7. Бондарев Б.А., Стурова В.А., Ливенцева А.А. Фибробетон: свойства, поведение при растяже-

References

1. Sturova V.A., Bondarev B.A., Chernousov N.N., Bondarev A.B., Zhidkov V.K. The main defects and damages of the structures of transport structures – transition plates, elements of the roadbed coating and the possibility of their elimination. *Sustainable development of the region: architecture, construction and transport. Materials of the IXth International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of Academician RAASN Chernyshov E.M.* 2022. pp. 180–183. (In Russian).
2. Ufimtsev V.M., Korobeinikov L.A. Slags in concrete: new opportunities. *Tekhnologii betonov.* 2014. No. 6, pp. 50–53. (In Russian).
3. Chernousov N.N., Bondarev B.A., Sturova V.A., Bondarev A.B., Liventseva A.A. Forecasting the nature of deformation of bent slag concrete elements. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 3, pp. 15–24. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-800-3-15-24>
4. Chernousov N.N., Bondarev B.A., Sturova V.A., Bondarev A.B., Liventseva A.A. Analytical dependencies of the influence of material density on the strength and deformability of structural concrete under axial compression. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 5, pp. 58–67. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-802-5-58-67>
5. Bondarev B.A., Chernousov N.N., Chernousov R.N., Sturova V.A. Study of strength properties of steel-fibre-varnish concrete under axial tension and compression taking into account its age. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 5, pp. 20–24.
6. Bondarev B.A., Chernousov N.N., Chernousov R.N., Sturova V.A. Study of the deformative properties of steel-fibre-varnish concrete under axial tension and compression, taking into account its age. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura.* 2017. No. 1, pp. 18–31. DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2017.1.02>
7. Bondarev B.A., Sturova V.A., Liventseva A.A. Fibrobeton: properties, tension behavior. Modern problems of materials science. *Collection of scientific*

- нии. *Современные проблемы материаловедения: Сборник научных трудов II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной 65-летию ЛГТУ*. Липецк, 2021. С. 284–287.
8. Бондарев Б.А., Карасева О.В., Стурова В.А., Ливенцева А.А. Применение фибры DRAMIX производства компании Бекарт в строительстве. *Современные проблемы материаловедения: Сборник научных трудов II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной 65-летию ЛГТУ*. Липецк, 2021. С. 340–342.
 9. Бондарев Б.А., Черноусов Н.Н., Стурова В.А. Определение параметров деформативности бетонных образцов по формулам механики разрушения // *Construction and Geotechnics*. 2020. Т. 11. № 2. С. 88–98. DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2020.2.08>
 10. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радаikin О.В. К оценке прочности, жесткости, момента образования трещин и их раскрытия в зоне чистого изгиба железобетонных балок с применением нелинейной деформационной модели // *Известия вузов. Строительство*. 2016. № 3. С. 5–12.
 11. Shah S.P., Jehu R. Strain rate effects an mode crack propagation in Concrete. *Fract. Toughness and Fract. Energy: Coner. Proc. Conf. Lensaune*. 1985. Oct. 1–3. Amsterdam, 1986. P. 453–465.
 12. Jeng Y., Shah S.P. Two berameter fracture model for concrete // *J. Eng. Mech*. 1985. № 10. P. 1227–1241.
 13. Черноусов Н.Н., Стурова В.А. Математическая модель полной диаграммы деформирования шлакобетона при трехточечном изгибе // *Современные наукоемкие технологии*. 2020. № 3. С. 92–96.
 14. Черноусов Н.Н. Изгибаемые сталефиброшлакобетонные элементы // *Бетон и железобетон*. 2010. № 4. С. 7–11. DOI: <https://doi.org/10.17513/snt.37947>
 15. Moiseenko G.A. Method for construction of isochrondiagrams of high-strength steel fiber concrete and its matrix // *Building and Reconstruction*. 2020. № 5 (91). С. 32–45. DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2020-90-4-32-45>
 16. Бондарев Б.А., Стурова В.А., Костин С.В. Применение сталефиброшлакобетона в элементах конструкций транспортных сооружений. *Эффективные конструкции, материалы и технологии в строительстве. Материалы международной научно-практической конференции*. Липецк, 2019. С. 14–18.
 17. Бондарев Б.А., Черноусов Н.Н., Черноусов Р.Н., Стурова В. А. Исследование разрушения дорожных плит из сталефиброшлакобетона при продавливании // *Транспортное строительство*. 2018. № 7. С. 10–12.
 18. Гончарова М.А., Черноусов Н.Н., Стурова В.А., Ливенцева А.А. Способ подбора оптимального состава мелкозернистого сталефиброшлакопемзобетона // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2021. № 11 (755). С. 64–72. DOI: <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2021-755-11-64-72>
 - works of the II All-Russian (national) scientific and practical conference dedicated to the 65th anniversary of LSTU. Lipetsk. 2021, pp. 284–287.
 8. Bondarev B.A., Karaseva O.V., Sturova V.A., Liventseva A.A. The use of DRAMIX fiber manufactured by Bekart in construction. *Modern problems of materials science. Collection of scientific works of the II All-Russian (national) scientific and practical conference dedicated to the 65th anniversary of LSTU*. Lipetsk. 2021, pp. 340–342. (In Russian).
 9. Bondarev B.A., Chernousov N.N., Sturova V.A. Determination of the deformation parameters of concrete specimens by the formulas of fracture mechanics. *Construction and Geotechnics*. 2020. Vol. 11. No. 2, pp. 88–98. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2020.2.08>
 10. Karpenko N.I., Sokolov B.S., Radaykin O.V. To assess the strength, stiffness, moment of formation of cracks and their opening in the zone of pure bending of reinforced concrete beams using a nonlinear deformation model. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2016. No. 3, pp. 5–12. (In Russian).
 11. Shah S.P., Jehu R. Strain rate effects an mode crack propagation in Concrete. *Fract. Toughness and Fract. Energy: Coner. Proc. Conf. Lensaune*. Oct. 1–3. 1985. Amsterdam. 1986, pp. 453–465.
 12. Jeng Y., Shah S.P. Two berameter fracture model for concrete. *J. Eng. Mech*. 1985. No. 10, pp. 1227–1241.
 13. Chernousov N.N., Sturova V.A. Mathematical model of the complete diagram of deformation of cinder concrete at three-point bending. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2020. No. 3, pp. 92–96.
 14. Chernousov N.N. Bent steel-fibre-concrete elements. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete]. 2010. No. 4, pp. 7–11. DOI: <https://doi.org/10.17513/snt.37947>
 15. Moiseenko G.A. Method for construction of isochron-diagrams of high-strength steel fiber concrete and its matrix. *Building and Reconstruction*. 2020. No. 5 (91), pp. 32–45. DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2020-90-4-32-45>
 16. Bondarev B.A., Sturova V.A., Kostin S.V. The use of steel fiber slag concrete in structural elements of transport facilities. *Effective designs, materials and technologies in construction. Materials of the international scientific-practical conference*. Lipetsk. 2019, pp. 14–18. (In Russian).
 17. Bondarev B.A., Chernousov N.N., Chernousov R.N., Sturova V.A. Investigation of destruction of road slabs made of steel fiber slag concrete during punching. *Transportnoe stroitel'stvo*. 2018. No. 7, pp. 10–12. (In Russian).
 18. Goncharova M.A., Chernousov N.N., Sturova V.A., Liventseva A.A. A method for selecting the optimal composition of fine-grained steel-fiber slag-pemzo concrete. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2021. No. 11 (755), pp. 64–72. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2021-755-11-64-72>

М.А. ГОНЧАРОВА, д-р техн. наук (magoncharova777@yandex.ru),
Л.В. ЗАМЫШЛЯЕВА, магистр (zamyshlyaeva777@gmail.com),
Х.Г.Х. АЛЬ-СУРРАЙВИ, канд. техн. наук (smidt48@mail.ru)

Липецкий государственный технический университет (398055, г. Липецк, ул. Московская, 30)

Модификация цементных систем твердения путем применения энергоэффективных технологических добавок отечественного производства

Приведена комплексная оценка процесса интенсификации помола портландцементного клинкера, а также представлен анализ прочностных характеристик цемента в ранние сроки твердения. Рассмотрены основные физико-химические свойства и характеристики модифицирующих добавок. Установлено влияние интенсификаторов помола отечественного производства на раннюю прочность в цементных системах. Особое внимание уделено кинетике размоловоспособности портландцементного клинкера в зависимости от удельной поверхности частиц. Наибольшее внимание уделено исследованию характеристик образцов, содержащих добавки ООО «Полипласт». Увеличение ранней прочности систем твердения, содержащих добавки ИП-1 и ИМ-2, составляет 3,7 МПа. В разработанных составах отмечается также снижение коэффициента водоотделения.

Ключевые слова: цементный клинкер, модификаторы, системы твердения, ранняя прочность, интенсификатор помола, водоотделение, кинетика размоловоспособности.

Для цитирования: Гончарова М.А., Замышляева Л.В., Аль-Суррайви Х.Г.Х. Модификация цементных систем твердения путем применения энергоэффективных технологических добавок отечественного производства // *Строительные материалы*. 2023. № 1–2. С. 50–54. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-50-54>

M.A. GONCHAROVA, Doctor of Sciences (Engineering) (magoncharova777@yandex.ru),
L.V. ZAMYSHLYAEVA, Master (zamyshlyaeva777@gmail.com),
H.G.H. AL-SURRAYVI, Candidate of Sciences (Engineering)
Lipetsk State Technical University (30, Moskovskaya Street, Lipetsk, 398055, Russian Federation)

Modification of Cement Hardening Systems by Using Energy-Efficient Technological Additives of Domestic Production

A comprehensive assessment of the process of intensification of grinding of Portland cement clinker is given, as well as an analysis of the strength characteristics of early strength cement is presented. The basic physico-chemical properties and characteristics of modifying additives are considered. The influence of domestic grinding intensifiers on early strength in cement hardening systems has been established. Special attention is paid to the kinetics of the grinding capacity of Portland cement clinker depending on the specific surface of the particles. The greatest attention was paid to the study of the characteristics of samples containing additives of Polyplast LLC. The increase in the early strength of hardening systems containing additives IP-1 and IM-2 of Polyplast LLC is 3.7 MPa. In the proposed formulations, there is also a decrease in the coefficient of water separation.

Keywords: cement clinker, modifiers, hardening systems, early strength, grinding intensifier, water separation, grindability kinetics.

For citation: Goncharova M.A., Zamyshlyaeva L.V., Al-Surrayvi H.G.H. Modification of cement hardening systems by using energy-efficient technological additives of domestic production. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 1–2, pp. 50–54. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-50-54>

На фоне глобальных политических и экономических проблем перед производителями цемента поставлена важная задача по преодолению санкционных последствий [1–3].

По мнению экспертов, цементная отрасль зависит от поставок из-за рубежа примерно на 80%. Актуальным вопросом для ряда цементных заводов остается выбор отечественных специальных технологических добавок. Высокая энергоемкость при производстве цемента, в частности при помоле клинкера (около 50% всей энергии) диктует необходимость снижения и ограничения топливно-энергетических затрат. Эта проблема может быть решена за счет применения более эффективного оборудования в цементной промышленности [4–9]. При этом ставится задача повышения строительно-технических

свойств цементных систем твердения путем перехода к производству тонкомолотых многокомпонентных цементов, позволяющих улучшать характеристики бетонов и снижать расход матричных материалов в составе композиции [10–14].

Известно, что прочностная активность цементов зависит от тонкости помола (Blaine). Поэтому для получения продукции с высокой экономической и функциональной эффективностью необходимо совершенствовать процесс измельчения цементного клинкера. В России помольные цеха оборудованы шаровыми трубными мельницами, производительность которых зависит не только от физико-химических свойств клинкера, но и от агрегативности материалов, степени загрузки мелющими телами, чистоты броневого плит и других факторов. Поэтому

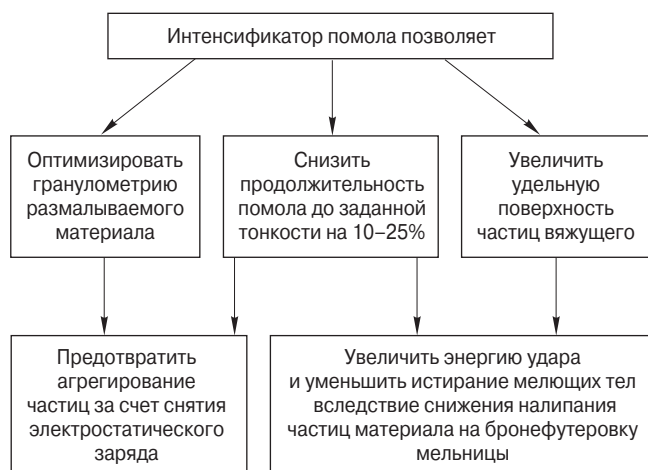


Рис. 1. Алгоритм интенсификации помола
Fig. 1. Grinding intensification algorithm

вопросы производительности помольных агрегатов и в конечном счете повышения качества цементов являются крайне актуальными.

Изучение основных реологических характеристик цементных суспензий и физико-механических свойств цементов и композиций на их основе с

применением интенсификаторов помола в своих трудах освещали Д.В. Ломаченко, В.Д. Барбанягрэ, Г.С. Крыхтин, Р.А. Черкасов, Л.Д. Шахова, А.Ф. Шевченко. В область исследования повышения эффективности процесса измельчения клинкера с применением интенсификаторов помола внесли существенный вклад ученые Н.П. Несмеянов, М.Л. Степанов, Е.Б. Александрова, Ю.М. Фадин. Многие материаловеды занимались разработкой составов добавок, интенсифицирующих механизм помола цементного клинкера: А.И. Вовк, А.Ф. Ковалев, И.З. Шамсутдинов, И.Б. Евзельман, С.М. Рояк, Л.И. Рябова, Г.Д. Харлампович, А.А. Кругликова, В.К. Новосадов, Л.Т. Игнатов, Я.Ш. Школьник, Л.А. Поскребышева, И.Ф. Кашеев, Ю.Б. Норкус, Н.М. Эндриксон, С.А. Полишук.

Одним из путей решения этой задачи является применение модифицирующих добавок, интенсифицирующих помол цементного клинкера (рис. 1).

Строительная индустрия в настоящее время выпускает достаточно технологических добавок для цементов отечественного производства. Чаще всего применяются модификаторы на основе: лигносульфонатов, продуктов конденсации нафталин-, мела-

Таблица 1
Table 1

Химико-минералогические показатели клинкера АО «Липецкцемент»
Chemical and mineralogical parameters of the clinker of JSC «Lipetsk cement»

Химический состав, %									н.о.	CaO _{св}	n	p
ППП	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	Сумма				
0,54	21,51	5,08	3,98	65,82	1,85	0,26	0,68	99,72	0,39	1,26	2,37	1,27

Таблица 2
Table 2

Физико-химические показатели интенсификаторов помола
Physical and chemical indicators of grinding intensifiers

Производитель	Модификация/наименование	Плотность, г/см ³	Показатель активности водородных ионов (рН) раствора	Свойства/предполагаемый эффект
АО «Полипласт», Новомосковск	Литопласт ИП-1	1,16	9	Позволяет улучшить технологические параметры процесса помола цементного клинкера
	Литопласт ИМ-2	1,187	8	Для повышения прочности цемента в ранние и/или поздние сроки твердения
ООО «Синтез ОКА», Нижегородская область	S 200	1,082	6,9	Улучшает процесс измельчения в шаровой мельнице, увеличивает ее производительность, позволяет придать порошкам требуемую текучесть
	FL 500	1,14	8,6	
	M 700	1,13	11,4	
АО «Пигмент», г. Тамбов	№ 2103264	1,126	10,8	Позволяет увеличить производительность мельниц на 10–30%, снизить энергозатраты на помол цемента, улучшить тонкость помола цемента, улучшить гранулометрический состав цемента, увеличить раннюю прочность цементов, увеличить марочную прочность цементов, повысить текучесть цемента, снизить водоотделение цемента
	№ 2103260	1,146	9,7	
	№ 2103263	1,116	9,7	

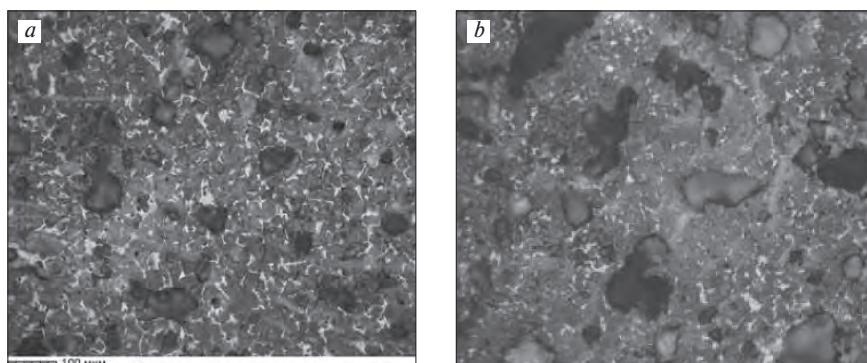


Рис. 2. Снимки минералогического состава клинкера методом петрографического анализа с помощью микроскопа Olympus GX51: а – структура алита; б – структура белита

Fig. 2. Pictures of the mineralogical composition of clinker by petrographic analysis method using an Olympus GX51 microscope: a – alite structure; b – belite structure

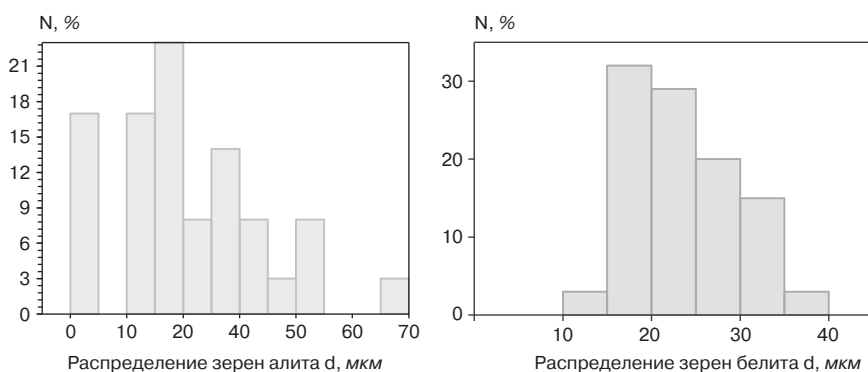


Рис. 3. Размерность зерен основных минералов цементного клинкера

Fig. 3. Dimension of grains of the main minerals of cement clinker

Состав шихты с добавками производства
АО «ГК Полипласт»
The composition of the charge with additives produced
by JSC “GK Poliplast”

Таблица 3
Table 3

Наименование	Состав шихты, г		
	Клинкер	Гипс	Интенсификатор
Состав 1 (контрольный)	5000	324	–
Состав 2 (с ИП-1)	5000	324	1,59
Состав 3 (с ИМ-2)	5000	324	1,59

минсульфокислоты и формальдегида, поликарбонатов и др. Однако при выборе добавок необходимо учитывать возможность получения бетона с заданными характеристиками, а это возможно только при изучении вопроса совместимости химических добавок разной природы.

Интенсификаторы помола чаще всего вводятся путем впрыскивания в мельницу через специальное устройство. В результате вновь образующиеся поверхности клинкера покрываются пленкой, что предотвращает агрегирование частиц. Кроме того, такие добавки проникают в микротрещины материала, понижая тем самым его сопротивляемость к размолу. В результате производительность мельницы увеличивается на 20–30% с соответствующим снижением удельного расхода электроэнергии.

Для получения требуемых свойств, предъявляемых к высококачественным цементам, необходимо в первую очередь получить клинкер с рациональной минералогической структурой. Поэтому проведение исследований структуры минералообразования клинкера на высокоточном оборудовании является одним из обязательных условий подбора интенсификатора помола (табл. 1, рис. 2).

Дальнейшие исследования посвятили подбору состава цементной шихты с интенсификаторами помола разных производителей; наименование и физико-химические показатели продуктов представлены в табл. 2.

Системы твердения состояли из предварительно подготовленных компонентов – размолотого клинкера, гипса и модификаторов. Дозировка интенсификаторов помола составляла 300 г на 1 т смеси. Помол осуществлялся до получения заданной удельной поверхности в зависимости от оптимальной размолоспособности клинкера (рис. 3).

На рис. 4 представлена зависимость удельной поверхности от времени помола.

Установлено, что размолоспособность клинкера за 40 мин увеличивается существенно (удельная поверхность возрастает более чем на 11 м²/кг).

Таблица 4
Table 4

Кинетика размолоспособности образцов
Sample grindability kinetics

№ образца	Удельная поверхность, м ² /кг						
	10 мин	20 мин	25 мин	30 мин	35 мин	40 мин	45 мин
Состав 1 (контрольный)	179	210	283	326	354	381	405
Состав 2 (с ИП-1)	173	220	295	314	346	384	407
Состав 3 (с ИМ-2)	177	201	277	308	336	362	385

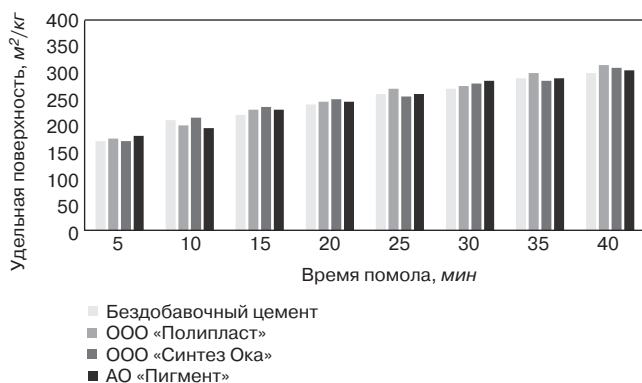


Рис. 4. Кинетика размолоспособности составов
Fig. 4. Kinetics of grindability of compositions

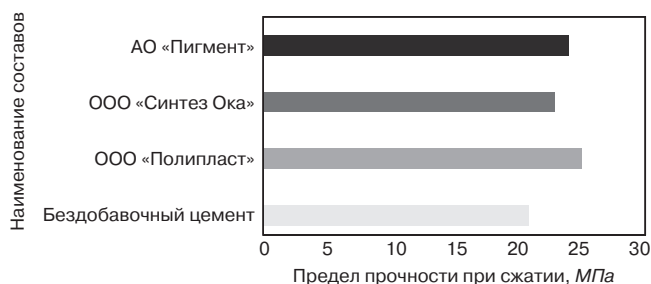


Рис. 5. Скорость набора прочности образцов
Fig. 5. The rate of strength gain of samples

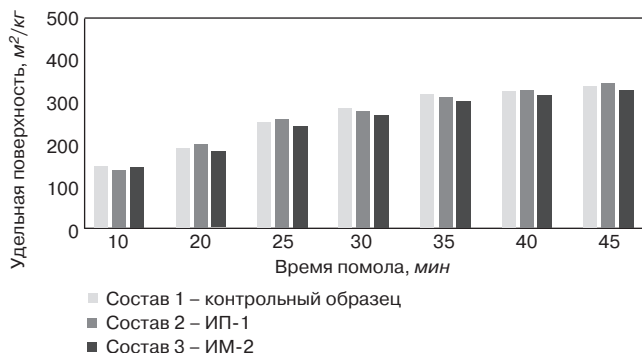


Рис. 6. График кинетики размолоспособности составов АО «Полипласт»
Fig. 6. Graph of the kinetics of the grindability of the compositions of JSC «Polyplast»

Испытания по определению ранней прочности проводились в соответствии с ГОСТ 30744–2001. Результаты представлены на рис. 5.

Экспериментальные исследования показали, что в первые двое суток рост прочности цементного камня оказывается значительным и увеличивается на 4,4 МПа.

В дальнейшем внимание уделили исследованию характеристик образцов, содержащих добавки ООО «Полипласт» (табл. 3). Во втором составе использовали добавку ИП-1 с расходом 300 г/т, в третьем – ИМ-2 с расходом 300 г/т.

Установлено, что смеси с добавками позволяют получить более высокую удельную поверхность уже за первые 10 мин помола. Это является результатом проникновения в микро- и макротрещины структуры клинкера добавки-модификатора. За счет «раз-

двигающего» действия на стенки дефектов клинкера формируется зона предразрушения. В результате снижается удельный расход электроэнергии на помол клинкера, повышается производительность цементной мельницы и формируется более узкий диапазон гранулометрического состава цементов.

Таким образом, в результате исследований доказано, что совместный помол клинкера с интенсификаторами помола является эффективным. Это подтверждается и строительно-техническими свойствами оптимальных составов цементных систем твердения строительных композитов. Наибольшая скорость набора составляет 3,7 МПа. Отмечается также снижение коэффициента водоотделения.

Список литературы / References

1. Goncharova M.A., Gorin R.A., Karaseva O.V. The formation of composite curing systems based on technogenic raw materials. *Solid State Phenomena*. 2018. Vol. 284, pp. 1058–1062. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.284.1058>
2. Goncharova M.A., Korneev K.A., Dedyayev G.S. Improving construction engineering properties of soils stabilized by a cement binder with techno-genic products. *Solid State Phenomena*. 2020. Vol. 299, pp. 26–31. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.26
3. Федюк Р.С., Мочалов А.В., Лесовик В.С. Современные способы активации вяжущего и бетонных смесей (обзор) // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2018. № 4 (37). С. 85–99. DOI: 10.5281/zenodo.2008670
3. Fedyuk R.S., Mochalov A.V., Lesovik V.S. Modern methods of activation of binder and concrete mixtures (review). *Vestnik Inzhenernoi shkoly DVFU, FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2018. No. 4 (37), pp. 85–99. (In Russian). DOI: 10.5281/zenodo.2008670
4. Аль-Суррайви Х.Г.Х., Гончарова М.А., Заева А.Г. Синтез композитов на основе местного сырья при воздействии агрессивной среды // *Строительные материалы*. 2021. № 5. С. 69–74. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-791-5-69-74>
4. Al-Surraivi H.G.H., Goncharova M.A., Zaeva A.G. Synthesis of composites based on local raw materials under the influence of an aggressive environment. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2021. No. 5, pp. 69–74. (In Russian). DOI: 10.31659/0585-430X-2021-791-5-69-74
5. Zawal D., Grabiec A. M. Influence of selected mineral additives on properties of recycled aggregate concrete (RAC) considering eco-efficiency coefficients. *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 17. e01405. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01405>
6. Prajna S.P., Anjum M.I., Lakshmi P.S., Gayathri G., Beulah M., Sudhir M.R. A comprehensive investigation of the effect of mineral additives to bituminous concrete. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 46, pp. 714–721. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.090>

7. Рахимов Р.З. Строительный комплекс. Экология и минеральные вяжущие вещества // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2022. № 2 (758). С. 5–15. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-758-2-5-15
7. Rakhimov R.Z. Building complex, Ecology and mineral binders. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2022. No. 2 (758), pp. 5–15. (In Russian). DOI: 10.32683/0536-1052-2022-758-2-5-15
8. Golewski G.L. An extensive investigations on fracture parameters of concretes based on quaternary binders (QBC) by means of the DIC technique. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 351. 128823. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128823>
9. Смирнова О.М., Казанская Л.Ф. Гибридные цементы на основе гранулированных доменных шлаков: основные направления исследований // *Эксперт: теория и практика*. 2022. № 3 (18). С. 59–65. DOI: 10.51608/26867818_2022_3_59
9. Smirnova O.M., Kazanskaya L.F. Hybrid cements based on granulated blast furnace slag: the main directions of research. *Expert: teoriya i praktika*. 2022. No. 3 (18), pp. 59–65. (In Russian). DOI: 10.51608/26867818_2022_3_59
10. Russo F., Eskandarsefat S., Venturini L., Viscione N. A complete study on an asphalt concrete modified with graphene and recycled hard-plastics: A case study. *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 17. e01437. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01437>
11. Amran M., Onaizi A. M., Qader D. N., Murali G. Innovative use of fly ash-finely powdered glass cullet as a nano additives for a sustainable concrete: Strength and microstructure and cost analysis. *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 17. e01688, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01688>
12. Bos F.P., Menna C., Pradena M., Kreiger E., Leal da Silva W.R., Rehman A.U., Weger D., Wolfs R.J.M., Zhang Y., Ferrara L., Mechtcherine V. The realities of additively manufactured concrete structures in practice. *Cement and Concrete Research*. 2022. Vol. 156. 106746. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106746>
13. Abdulfattah O., Alsarakji I.H., El-Qanni A., Samaaneh M., Najjar M., Abdallah R., Assaf I. Experimental evaluation of using pyrolyzed carbon black derived from waste tires as additive towards sustainable concrete. *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 16. e00938. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00938>
14. Odeyemi S.O., Atoyebi O.D., Kegbeyale O.S., Anifowose M.A., Odeyemi O.T., Adeniyi A.G., Orisadare O.A. Mechanical properties and microstructure of High-Performance Concrete with bamboo leaf ash as additive. *Cleaner Engineering and Technology*. 2022. Vol. 6. 100352. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100352>

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:



ПРАВИТЕЛЬСТВО
УДМУРТСКОЙ РЕСПУБЛИКИ



СОЮЗ
«ТОРГОВО-ПРОМЫШЛЕННАЯ
ПАЛАТА УДМУРТСКОЙ
РЕСПУБЛИКИ»



АДМИНИСТРАЦИЯ
ГОРОДА ИЖЕВСКА



СОЮЗ
СТРОИТЕЛЕЙ УР

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ПАРТНЕР ФОРУМА



УДМУРТСКИЙ
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ
КЛАСТЕР

ОРГАНИЗАТОР



УДМУРТИЯ
ВЫСТАВОЧНЫЙ
ЦЕНТР

ТЕМАТИЧЕСКИЕ РАЗДЕЛЫ:

- Строительные технологии • Строительные и отделочные материалы • Инструмент • Бытовое и промышленное климатическое оборудование • Дизайн и архитектура
- Технологии для сферы ЖКХ и благоустройства территории
- Всё для освещения и энергосбережения
- Мебель и деревообработка • Новостройки • Банковские услуги • Услуги строительно-монтажных работ, по дизайну интерьера и декорированию

**ГОРОД
XXI
ВЕКА**

**ФОРУМ СТРОИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
12-14 апреля / 2023 / Ижевск**

16+

**ПРИГЛАШАЕМ
К УЧАСТИЮ!**

БРОНИРОВАНИЕ СТЕНДОВ: 8-912-856-13-93
evgenia@vcudm.ru | сайт форума: stroy-udm.ru

Международная научно-практическая конференция BetONconf'2022

В Москве состоялось ежегодное мероприятие строительной отрасли – 11-я международная научно-практическая конференция *BetONconf'2022*, организованная компанией «Полипласт Новомосковск». Конференция объединила около 400 представителей компаний – производителей товарного бетона, железобетонных изделий и конструкций, строительных растворов со всей страны, а также представителей смежных отраслей – производителей цемента, оборудования и материалов. Мероприятие привлекло научных деятелей – профессоров и преподавателей научно-исследовательских институтов, представителей общественных и саморегулируемых организаций строительного комплекса, средства массовой информации. Журналы «Строительные материалы»® и «Жилищное строительство» выступили информационными партнерами конференции *BetONconf'2022*.

Основной задачей конференции в 2022 г. стало получение знаний о новейших технологиях в области производства бетона и железобетона, поиск способов практического применения инноваций в отрасли в современных экономических условиях, а также укрепление делового и научного сотрудничества. В программу мероприятия были включены самые актуальные темы и вопросы, касающиеся не только производственной и научной деятельности, но и их развития в санкционных условиях.

Конференция *BetONconf'2022* традиционно состояла из трех секций, которые включали в себя не только выступления спикеров, но и интерактивное общение, вопросы слушателей и обсуждение наиболее важных проблем отрасли.

Открыл официальную часть мероприятия директор по продажам компании «Полипласт Новомосковск» **С.А. Молчанов**, который рассказал о планах и перспективах развития компании, а также о новых разрабатываемых продуктах и продуктовых направлениях. Благодаря поддержке правительства Тульской области, в том числе в рамках глобальной стратегии по развитию промышленного потенциала региона, компания успешно завершила ряд крупных инвестиционных проектов: значительно увеличены мощности реакционного отделения, модернизирован участок по производству основного сырья. В мае 2022 г. закончено строительство производственного комплекса по выпуску сухих функциональных добавок. Продукция, производимая комплексом, поставляется как на внутренний рынок, так и на экспорт.

В настоящее время на площадке «Полипласт Новомосковск» ведутся работы по созданию нового производства технологичных высокомолекулярных полимеров, которые необходимы для обеспечения потребности страны в специализированной химии. На церемонии вручения премии «Тульский бизнес-2022» компания «Полипласт Новомосковск» признана промышленной компанией 2022 года. Это первая независимая премия в области бизнеса в Тульском регионе, которая призвана содействовать привлечению инвестиций в тульскую экономику, помогать компаниям-номинантам расширять свой бизнес, повышать репутацию и конкурентоспособность на рынке Тульской области и России.

На мероприятии обсуждались развитие промышленности строительных материалов в современных условиях; состояние и развитие нормативной базы в индустрии бетона и железобетона; новые подходы к технологии бетона и перспективы развития; изменения рынка добавок в бетон; литые и самоуплотняющиеся бетонные смеси и бетоны нового поколения; проблемы разрушения и ремонта железобетона; вопросы строительства и ремонта цементобетонных дорожных покрытий; микроцементы российского производства и их применение в современном строительстве.

Конференция *BetONconf'2022* вызвала живой интерес со стороны профессионального сообщества, что является главной целью организаторов.



УДК 625.861

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-56-60>

Р.Э. АГАМОВ, инженер (agamovr@inbox.ru),
М.А. ГОНЧАРОВА, д-р техн. наук (magoncharova777@yandex.ru),
А.В. МРАЕВ, аспирант (mraevs@mail.ru)

Липецкий государственный технический университет (398055, г. Липецк, ул. Московская, 30)

Сталеплавильные шлаки как эффективное сырье в дорожном строительстве

Показано, что около 60% отходов металлургии являются источниками загрязнения городской экосистемы. Очевидным решением проблемы твердых отходов металлургического производства является строительно-технологическая их утилизация. Проблема вовлечения сталеплавильного шлака в хозяйственную деятельность продолжает оставаться актуальной для крупных металлургических производств, чьи объемы ежегодного образования данного побочного продукта исчисляются миллионами тонн. Дорожное строительство является одной из приоритетных отраслей. Установлено, что в процессе дальнейшей переработки шлаков (дробления и фракционирования) рекомендуется предусмотреть дополнительные меры по отделению пылевидных фракций до величины, нормируемой действующими документами на приготовление щебеночно-песчаных смесей типа С5–С8. Выполнено внедрение разработанных составов для устройства оснований дорожных одежд на объектах Липецкой области. При расклинцовке шлаками оптимальной гранулометрии модуль упругости дорожного основания увеличивается незначительно (на 5,1% в сравнении с обычным основанием без расклинцовки). Доказано, что организация отдельного сбора основных составляющих смешанного сталеплавильного шлака позволит обеспечить возможность выпуска готовых активных щебеночно-песчаных или песчаных смесей, внедрения более эффективных проектных решений конструкций дорожных одежд, отличающихся высокими транспортно-эксплуатационными показателями.

Ключевые слова: отходы металлургии, техногенное сырье, сталеплавильные шлаки, дорожное основание, активность, металлические примеси, устойчивость против распада, тонкомолотые добавки, прочность.

Для цитирования: Агамов Р.Э., Гончарова М.А., Мраев А.В. Сталеплавильные шлаки как эффективное сырье в дорожном строительстве // *Строительные материалы*. 2023. № 1–2. С. 56–60. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-56-60>

M.A. GONCHAROVA, Doctor of Sciences (Engineering) (magoncharova777@yandex.ru),
R.E. AGAMOV, Engineer (agamovr@inbox.ru),
A.V. MRAEV, Master (pa4in.aleks@yandex.ru)
Lipetsk State Technical University (30, Moskovskaya Street, Lipetsk, 398055, Russian Federation)

Steelmaking Slags as an Effective Raw Material in Road Construction

It is shown that about 60% of metallurgical waste is a source of pollution of the urban ecosystem. The obvious solution to the "problem of solid waste" of metallurgical production is their construction and technological disposal. The problem of involving steelmaking slag in economic activity continues to be relevant for large metallurgical industries, whose annual production volumes of this by-product amount to millions of tons. Road construction is one of the priority sectors. It is established that in the process of further processing of slags (crushing and fractionation), it is recommended to provide additional measures for the separation of pulverized fractions to the value normalized by the current documents for the preparation of crushed stone-sand mixtures of type C5–C8. The implementation of the developed compositions for the construction of the bases of road pavements at the facilities of the Lipetsk region has been carried out. When splinting with slags of optimal granulometry, the modulus of elasticity of the road base increases slightly (by 5.1% compared to a conventional base without splinting). It has been proved that the organization of separate collection of the main components of mixed steelmaking slag will make it possible to produce ready-made active crushed stone-sand or sand mixtures, the introduction of more efficient design solutions for pavement structures, characterized by high transport and operational performance, with the use of steelmaking slags.

Keywords: metallurgy waste, technogenic raw materials, steelmaking slags, road base, activity, metal impurities, resistance against decay, finely ground additives, strength.

For citation: Agamov R.E., Goncharova M.A., Mraev A.V. Steelmaking slags as an effective raw material in road construction. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 1–2, pp. 56–60. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-56-60>

На современных металлургических предприятиях системы природоохранных объектов внедрение ресурсосберегающих и малоотходных технологий постоянно совершенствуется. Этот процесс сопровождается развитием системы экологического контроля выбросов и загрязнений. Но несмотря на положительные тенденции, проблема использования отходов производства остается крайне актуальной [1–3].

Только сталеплавильных шлаков образуется более 2 млн т в год, поскольку для получения 1 т стали необходимо 10 т сырья (рис. 1).

Многие отходы металлургии уже являются товарной продукцией, использование их регламентируется нормативными документами [4]. Но большое их количество остается не востребованным и малоиспользуемым. Тем не менее потенциальные ценные свойства диктуют необходимость их утилизации. И вопросы эти лежат не только в плоскости экономической эффективности, но и экологической безопасности. Около 60% отходов являются источниками загрязнения городской экосистемы. Очевидно, что система комплексного использования металлургических шла-

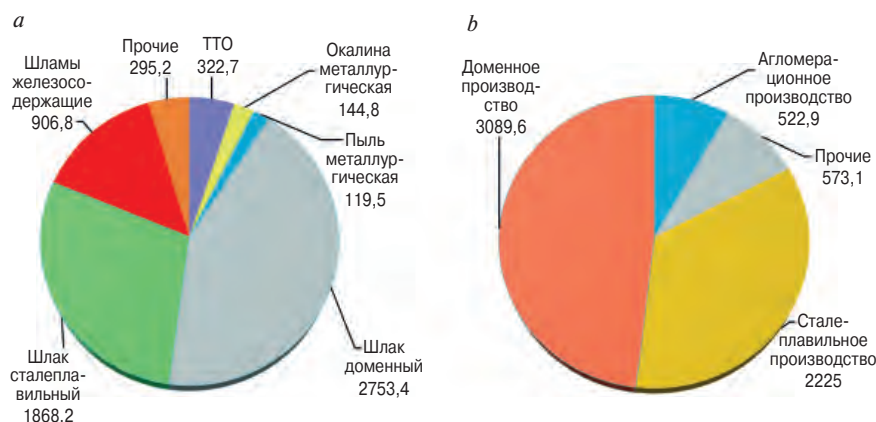


Рис. 1. Структура образования отходов, тыс. т, на ПАО «НЛМК»: а – по видам; б – по производствам

Fig. 1. The structure of wasted generation (in thousand tons) at NLMK PJSC: a – by type; b – by productions

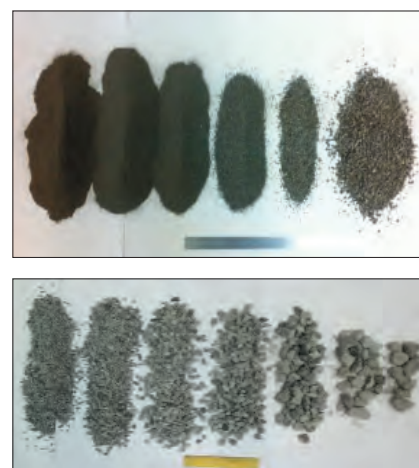


Рис. 2. Рассев сталеплавильного шлака по фракциям

Fig. 2. Screening of steelmaking slag by fractions

Таблица 1
Table 1

Соответствие granulометрического состава сталеплавильных шлаков по фракциям нормативных документов
Compliance of the granulometric composition of steelmaking slags by fractions with regulatory documents

Вид металлургического шлака	Фракция, мм	Модуль крупности	Группа по крупности в соответствии с ГОСТ 32826–2014
Вид 1	0–4	2,6	Средний
	4–8	–	Соответствует
Вид 2	0–4	3,38	Повышенной крупности
	4–8	–	Соответствует
	8–16	–	Соответствует
Вид 3	0–4	2,36	Средний
	4–8	–	Соответствует
	8–16	–	Соответствует

ков направлена на решение экологических проблем и вносит вклад в создание биосферно-совместимой безопасной среды обитания человека в регионе [5–7].

Очевидным решением проблемы твердых отходов металлургического производства является строительно-технологическая утилизация. Дорожное строительство является одной из приоритетных отраслей, объемы потребления фракционированных материалов которой позволили бы перерабатывать столь значительное количество сталеплавильных шлаков.

Однако из-за ряда свойств, обусловленных как происхождением сталеплавильного шлака, так и особенностями переработки данного побочного продукта на ПАО «НЛМК», его применение ограничено. Подробное изучение свойств сталеплавильных шлаков выявило возможность более эффективного их применения, позволяющего решить как проблемы нестабильности свойств материала, так и проблемы, связанные с его переработкой [8–10].

На сегодняшний день строительство дорог в Центральном федеральном и соседних округах происходит с устройством основания именно из фрак-

Таблица 2
Table 2

Результаты определения марки по дробимости
Results of determining the grade by crushability

Вид металлургического шлака	Фракция, мм	Потери по массе, %	Марка по ГОСТ 32826–2014
Вид 1	4–8	8	M1400
Вид 2	4–8	12,3	M1000
	8–16	12,7	M1000
Вид 3	4–8	4,8	M1400
	8–16	6,2	M1400

Таблица 3
Table 3

Результаты испытаний определения активности
Results of activity determination tests

Вид металлургического шлака	Фракция, мм	Прочность при сжатии, МПа	Активность по нормативным документам
Вид 1	0–4	1,9	Слабоактивный
	4–8	1,3	Слабоактивный
Вид 2	0–4	0,4	Неактивный
	4–8	0,1	Неактивный
	8–16	0,1	Неактивный
Вид 3	0–4	17,3	Высокоактивный
	4–8	13,5	Высокоактивный
	8–16	7,7	Высокоактивный

ционированных материалов с расклинцовкой «мелочью», что обусловлено отсутствием производств готовых щебеночно-песчаных смесей, а соответственно и сведений у основных проектных организаций о возможности применения в дорожном конструктиве именно щебеночно-песчаных смесей [11–13].

Совсем иначе дело обстоит со щебнем из сталеплавильного шлака. Отдельные свойства данного типа материала ограничивают сферу его применения.

Однако, принимая во внимание происхождение шлака, некоторую стабилизацию его свойств до достаточного уровня и способ переработки, считаем

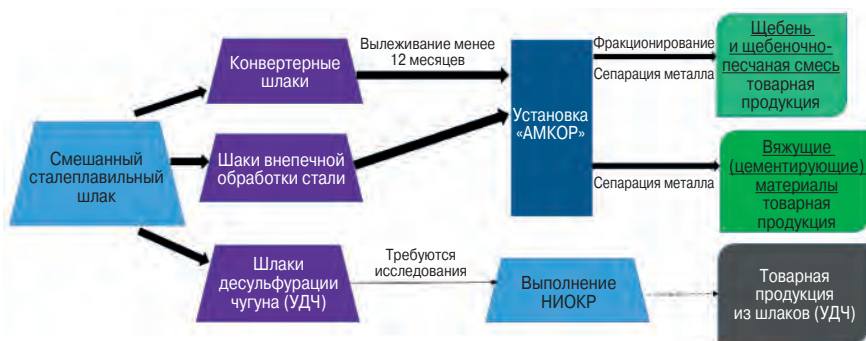


Рис. 3. Способы переработки сталеплавильных шлаков
Fig. 3. Methods of processing steelmaking slags



Рис. 4. Обустройство дороги с использованием сталеплавильных шлаков
Fig. 4. Road construction using steelmaking slags

целесообразным его применение в дорожной отрасли в качестве готовых щебеночно-песчаных смесей.

Высокие показатели прочности (дробимости) сталеплавильного шлака в случае стабилизации его отдельных свойств (устойчивости и морозостойкости) до достаточного уровня позволяют применять данный материал даже для строительства оснований дорог I категории (в зависимости от климатического района). Известно, что организация производства щебеночно-песчаных смесей на основе сталеплавильного шлака позволит вовлечь в производство пылевидную и песчаную составляющие шлака [14, 15].

В случае организации раздельного сбора шлаков станет возможным выпуск уникального и более эффективного продукта — неорганического вяжущего (активного материала) и готовых смесей на его основе (смесей, обработанных неорганическим вяжущим).

Производство готовых щебеночно-песчаных смесей или готовых смесей, обработанных неорганическим вяжущим, для устройства дорожных оснований позволило бы значительно улучшить физико-механические и эксплуатационные показатели дорожно-основания или снизить материалоемкость конструкции дорожной одежды.

Ни один из представленных на сегодняшний день на рынке нерудных материалов не обладает таким широким спектром преимуществ и возможностей.

Сталеплавильные шлаки — это общее название нескольких видов. Зачастую они складываются в одном месте. Чаще всего они включают в себя следующие виды — сталеплавильный шлак (вид 1); конвертерный шлак (вид 2); шлак внепечной обработки (вид 3). По содержанию примесей металла не соответствуют нормативным требованиям фракции 0–4 мм любого типа

из всех видов исследуемых проб (за исключением сталеплавильных шлаков фракции 4–8 мм). Поэтому в процессе технологической переработки шлакового массива в товарную продукцию следует предусмотреть меры по сепарации металлических примесей.

Первый этап проведения работ включал следующие лабораторные испытания сталеплавильных шлаков по их видам (отобранным из разных мест хранения и образования): определение гранулометрического состава шлакового щебня и песка (рис. 2, табл. 1); содержания пылевидных и глинистых частиц в шлаковом щебне и песке; содержания зерен пластинчатой (лещадной) и игольчатой формы; сопротивление дроблению и износу; испытание на прочность (дробному).

По гранулометрическому составу не соответствуют нормативным требованиям только песчаные

фракции — по содержанию пылевидных частиц (в других фракциях отсутствие пылевидных включений обусловлено методикой проводимых исследований). Результаты лабораторных испытаний на прочность шлакового щебня приведены в табл. 2.

По дробимости, наличию игольчатых и лещадных частиц, морозостойкости анализируемые пробы шлаков соответствуют требованиям нормативной документации. Результаты испытаний образцов с оптимальной влажностью образцов шлака приведены в табл. 3.

По содержанию слабых зерен в соответствии с ГОСТ 32861–2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и песок шлаковые. Технические требования» в исследуемых видах шлаков выявлено несоответствие нормативным требованиям только для проб из конвертерных шлаков фракции 8–16 мм.

В процессе дальнейшей переработки шлаков (дробления и фракционирования) рекомендуется предусмотреть дополнительные меры по отделению пылевидных фракций до величины, нормируемой действующими документами на приготовление щебеночно-песчаных смесей типа С5–С8 (ГОСТ 25607–2009 «Смеси щебеночно-гравийно-песчаные для покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов»).

По устойчивости против всех видов распадов исследуемые типы конвертерных шлаков и шлаков внепечной обработки относятся к неустойчивым. В то же время сталеплавильные (смешанные) шлаки относятся к среднеустойчивым.

Для повышения устойчивости шлаков против распадов рекомендуются следующие мероприятия:

— стабилизационное вылеживание в течение 1–3 лет с равномерным перемешиванием и увлажнением шлакового массива;

– применение специальных методов, позволяющих повысить устойчивость структуры ускоренным способом (с завершением всех видов физико-химических процессов).

На основании анализа полученных характеристик сталеплавильных шлаков (смешанных и отдельного сбора) целесообразно производить доработку данного материала в более эффективные продукты (рис. 3), отличающиеся высокими техническими и экономическими потребительскими свойствами в сравнении с традиционно применяемыми материалами:

1) готовые щебеночно-песчаные смеси (с максимальной крупностью до 80 мм) непрерывной гранулометрии по ГОСТ 25607–2009 для устройства дорожных оснований и покрытий;

2) готовые активные щебеночно-песчаные или песчаные смеси (с максимальной крупностью до 10 мм) по ГОСТ 25607–2009 для устройства дорожных оснований.

Высокие показатели прочности (дробимости) сталеплавильного шлака в случае стабилизации его отдельных характеристик (устойчивости и морозостойкости) до достаточного уровня позволяют применять данный материал даже для строительства оснований дорог I категории (в зависимости от климатического района).

Выполнено обустройство оснований дорожных одежд на объекте: Реконструкция автомобильной дороги Липецк–Данков на участке км 43+100 – 44+900 в Лебедянском р-не Липецкой обл. В качестве обустраиваемого участка выступал разъезд (перекресток) в селе Хмелевка на отметке ПК-3 (рис. 4).

Выполнение работ по обустройству дорожной одежды происходило в несколько этапов:

1. Равномерное распределение щебеночно-песчаной смеси из сталеплавильных шлаков.

2. Уплотнение распределенного материала.

3. Дополнительное вдавливание расклинцовки при помощи вибратора катка.

Выводы

При расклинцовке инертными компонентами модуль упругости дорожного основания увеличивается незначительно (на 5,1% в сравнении с обычным основанием без расклинцовки).

При расклинцовке высокоактивными материалами наблюдается повышение модуля упругости дорожного основания (на 11,2% в сравнении с обычным основанием; на 7,1% в сравнении с расклинцовкой доменным шлаком).

За счет расклинцовки уменьшается количество пор в основании из крупного щебня и повышается его плотность, что соответственно повышает водонепроницаемость и морозостойкость, а следовательно, и долговечность основания.

Таким образом, организация отдельного сбора основных составляющих смешанного сталеплавильного шлака позволила бы:

– обеспечить возможность выпуска готовых активных щебеночно-песчаных или песчаных смесей с целью значительного улучшения физико-механических и эксплуатационных показателей дорожного основания или снижения материалоемкости конструкции дорожной одежды;

– обеспечить внедрение более эффективных проектных решений конструкций дорожных одежд, отличающихся высокими транспортно-эксплуатационными показателями, с применением сталеплавильных шлаков;

– использовать активную составляющую сталеплавильных шлаков (шлак внепечной обработки стали) для дорожных оснований всех категорий дорог.

Список литературы / References

1. Goncharova M.A., Gorin R.A., Karaseva O.V. The formation of composite curing systems based on technogenic raw materials. *Solid State Phenomena*. 2018. Vol. 284, pp. 1058–1062. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.1058
2. Goncharova M.A., Simbaev V.V., Karaseva O.V. Optimization of fine-grained concrete composition in order to improve the quality of units' front surface. *Solid State Phenomena*. 2018. Vol. 284, pp. 1052–1057. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.1052
3. Goncharova M.A., Karaseva O.V., Maklakov S.V., Bakhaev K.V. Refractory materials for steel-making equipment lining. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2018. Vol. 53. No. 5, pp. 924–928.
4. Goncharova M.A., Korneev K.A., Dedyayev G.S. Improving construction engineering properties of soils stabilized by a cement binder with technogenic products. *Solid State Phenomena*. 2020. Vol. 299, pp. 26–31. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.26
5. Goncharova M.A., Tkacheva I.A., Zagorulko M.G. The identification of the mineralogical composition of converter slags on the basis of testing and diagnostics. *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 989, pp. 248–253. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.989.248
6. Гончарова М.А., Аль-Суррайви Х.Г.Х. Исследование цементных систем твердения на основе отсевов дробления бетонного лома. *ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси*. 2020. № 3 (60). С. 22–29.
6. Goncharova M.A., Al-Surraivi H.G.H. Investigation of cement hardening systems based on crushing screenings of concrete scrap. *ALITinform: Cement. Concrete. Dry mixes*. 2020. No. 3 (60), pp. 22–29. (In Russian).
7. Аль-Суррайви Х.Г.Х., Гончарова М.А., Заева А.Г. Синтез композитов на основе местного сырья при воздействии агрессивной среды. *Строительные материалы*. 2021. № 5. С. 69–74. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-791-5-69-74
7. Al-Surraivi H.G.H., Goncharova M.A., Zaeva A.G. Synthesis of composites based on local raw materials

- under the influence of an aggressive environment. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 5, pp. 69–74. (In Russian). DOI: 10.31659/0585-430X-2021-791-5-69-74
8. Гончарова М.А., Мраев А.В., Пачин А.Р., Акчурин Т.К. Прогнозирование долговечности шлакобетонов в условиях агрессивной сульфатной среды. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура*. 2022. № 3 (88). С. 70–75.
 8. Goncharova M.A., Mraev A.V., Pachin A.R., Akchurin T.K. Forecasting the durability of cinder blocks in an aggressive sulfate environment. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*. 2022. No. 3, pp. 70–75. (In Russian).
 9. Гончарова М.А., Черноусов Н.Н., Стурова В.А., Ливенцева А.А. Способ подбора оптимального состава мелкозернистого сталефибробшлакопемзобетона. *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2021. № 11 (755). С. 64–72. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-755-11-64-72
 9. Goncharova M.A., Chernousov N.N., Sturova V.A., Liventseva A.A. Method for selecting the optimal composition of fine-grained steel-fiber-slag pum-concrete. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Stroitel'stvo*. 2021. No. 11 (755), pp. 64–72. (In Russian). DOI: 10.32683/0536-1052-2021-755-11-64-72
 10. Goncharova M. A., Tkacheva I. A., Zagorulko M. G. The Identification of the Mineralogical Composition of Converter Slags on the Basis of Testing and Diagnostics. *In Materials Science Forum: Trans Tech Publications, Ltd*. 2020. Vol. 989, pp. 248–253. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.989.248>
 11. Левкович Т.И., Машенко Т.В., Мевлидинов З.А., Синявский Р.С. Об утилизации шлаков и освобождении занятых городских территорий промышленных зон с использованием шлака в дорожном строительстве // *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*. 2017. № 4 (20). С. 113–122.
 11. Levkovich T.I., Mashchenko T. V., Mevlidinov Z. A., Sinyavskiy R. S. On the disposal of slag and the liberation of occupied territories in the city industrial zones, the use of slag in road construction. *Biospheric compatibility: human, region, technologies*. 2017. No. 4 (20), pp. 113–122. (In Russian).
 12. Шешуков О.Ю., Михеенков М.А., Некрасов И.В., Метелкин А.А., Егизарьян Д.К. Оптимизация состава шлака внепечной обработки стали с целью повышения стойкости огнеупоров и возможности утилизации шлака // *Металлург*. 2018. № 8. С. 9–12.
 12. Sheshukov O.Yu., Mikheenkoy M.A., Nekrasov I.V., Metelkin A.A., Egiazar'yan D.K. Optimization of slag composition of steel ladle treatment for the purpose of increasing refractories resistance and possibility of slag utilization. *Metallurg*. 2018. No. 8, pp. 9–12. (In Russian).
 13. Грейарт Э., Де Бели Н. Степень гидратации цемента и шлака в цементной пасте с добавками шлака // *Цемент и его применение*. 2012. № 1. С. 152–159.
 13. Gruyaert E., Belie N. De. Hydration degree of cement and slag in slag blended cement pastes. *Cement i ego primenenie*. 2012. No. 1, pp. 152–159. (In Russian).
 14. Tleugabulov S.M., Aitkenov N.B., Zhabalova G.G., Belichko A.G., Uleva G. A. Metallurgical processing of converter slag. *Complex Use of Mineral Resources*. 2021. Vol. 3. Is. 318, pp. 35–42. <https://doi.org/10.31643/2021/6445.26>
 15. Liu G., Rong H., Wang J. Valorization of converter steel slag in sustainable mortars by a combined alkali and carbonation activation. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 370. 133519. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133519>

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Коррозия строительных материалов: проблемы, пути решения

Авторы: Федосов С.В., Степанова В.Ф., Румянцева В.Е., Котлов В.Г., Степанов А.Ю., Коновалов В.С.

Москва: АСВ, 2022. 399 с. ISBN 978-5-4323-0435-3

В монографии обобщены научные данные о коррозионных процессах, протекающих под влиянием окружающей среды, в бетонах, металлах и железобетонах того или иного состава: принципиальные схемы химических реакций; математические описания некоторых коррозионных процессов; системы нормативных документов по борьбе с коррозией; представлены результаты экспериментальных исследований в форме математических моделей, позволяющих с требуемой точностью рассчитать долговечность бетонных и железобетонных конструкций. Методы математического моделирования при исследовании процессов коррозии бетона, металлов и железобетона еще недостаточно широко применяются на практике, хотя их преимущества очевидны. Причем, применение математических моделей позволяет экономически обоснованно назначать средства защиты и устанавливать сроки их применения.

Авторами обоснована общность методологического подхода к моделированию массопереноса при жидкостной коррозии строительных материалов; исследованы основные физико-химические процессы в пограничном слое «жидкость – твердое тело» на начальных этапах коррозионного массопереноса, дающие возможность прогнозировать изменение прочностных характеристик строительного объекта.

Материал монографии изложен понятно для широкого круга специалистов, имеет практическое значение для строительных организаций, полезен научным и инженерно-техническим работникам.

Представленная монография является значительным шагом в разработке научно обоснованных рекомендаций по повышению коррозионной стойкости строительных конструкций для снижения затрат на ликвидацию последствий техногенных катастроф, обусловленных выходом из строя объектов жилищно-коммунального комплекса, зданий и сооружений различного назначения; для повышения уровня безопасности жизнедеятельности.



7–8 ИЮНЯ 2023
ОМСК, РОССИЯ
ГК «ТУРИСТ»

7–8 on JUNE, 2023
RUSSIA, OMSK
THE HOTEL COMPLEX TOURIST



МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«РАЗВИТИЕ КЕРАМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ»

КЕРАМТЭКС

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ СПОНСОР КОНФЕРЕНЦИИ ООО «ИНТА-СТРОЙ»
«Институт новых технологий и автоматизации промышленности строительных материалов»



ИНСТИТУТ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И АВТОМАТИЗАЦИИ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ



Посещение



Кирпичный завод
КЕРАМИКСТРОЙ

Кирпичного завода «КЕРАМИКСТРОЙ»



КОНТУР

и НПО «КОНТУР»

Партнер МИАП KERAMTEX

Where Innovations Thrive



**CERAMICS
CHINA
2023**

**The 37th Edition of China Int'l Exhibition for
Ceramics Technology, Equipment & Product**

June 19-22, 2023

Area A, Canton Fair Complex, Guangzhou



**China Ceramic
Industrial Association**



**UNIFAIR
EXHIBITION SERVICE**

Tel: 0086 – 20 – 8327 6369 / 6389
Facebook: @Ceramics China
Twitter: @ceramics_china

Email: ceramicschina@unifair.com
Web: www.ceramicschina.com.cn



К 70-летию Ханса-Бертрама ФИШЕРА

доктора-инженера, профессора Института строительства Веймарского университета (Bauhaushaus-Universität Weimar), члена редсовета журнала «Строительные материалы»®.

21 февраля 2023 г. исполняется 70 лет известному ученому в области гипсовых материалов, выдающемуся организатору и замечательному человеку – Хансу-Бертраму Фишеру. Высшее образование Х.-Б. Фишер получил в Харьковском политехническом институте, который окончил в 1977 г. по специальности химическая технология вяжущих веществ. Годы учебы в СССР дали молодому ученому не только прекрасное знание русского языка, истории и экономики страны, но и множество друзей и коллег в России и странах СНГ, с которыми он поддерживает отношения на протяжении всей жизни.

Преимущество советского образования – ценнейший научный багаж советских ученых, который в сочетании с возможностями европейской исследовательской базы позволил Х.-Б. Фишеру стать одним из ведущих ученых-гипсовиков в Европе. В 1992 г. он подготовил и блестяще защитил диссертацию на тему «Влияние химических добавок на строительный гипс – кондуктометрические исследования».

Вся трудовая деятельность юбиляра связана с Институтом строительства Веймарского университета, где он более 30 лет возглавлял гипсовое направление. Кроме того, в течение этого времени Х.-Б. Фишер был главным организатором и душой крупнейшей европейской конференции по строительным материалам – IBAUSIL, инициатором и главным организатором веймарских гипсовых конференций. Доктор Х.-Б. Фишер – почетный профессор родного Харьковского политехнического института, Ташкентского института архитектуры и строительства, многих вузов России. Он автор более 200 научных работ по гипсу, опубликованных в зарубежных и российских изданиях, в том числе в соавторстве с российскими коллегами, с которыми он ведет совместные научные исследования.

Отдельно следует отметить активное участие доктора Фишера в научных конференциях. Он постоянно выступает с докладами в Германии, Канаде, Китае, Австрии, Швейцарии, странах СНГ и, конечно, в России.

В течение многих лет Х.-Б. Фишер является членом редакционного совета журнала «Строительные материалы»®. Он активный автор и рецензент, научный консультант, беспристрастный член жюри конкурса статей «Технологическая безопасность гипсовой отрасли», который редакция проводит совместно с Российской гипсовой ассоциацией.

Редакция, друзья и коллеги сердечно поздравляют Х.-Б. Фишера с юбилеем, желают крепкого здоровья, творческих успехов, побед в шахматных состязаниях, удачи и успеха во всех делах и начинаниях!

УДК 691.311

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-63-68>

Х.-Б. ФИШЕР¹, доктор-инженер;
Б.Б. ВТОРОВ², канд. техн. наук (wtorov@mail.ru);
А.Ф. БУРЬЯНОВ³, д-р техн. наук (rga-service@mail.ru)

¹ Веймарский строительный университет (Германия, 99421, Веймар Цоудрайштрассе, 11)

² ООО «БАУМИТ» (141982, Московская область, г. Дубна, ул. Университетская, 11)

³ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

Исследование влияния многокомпонентных активаторов твердения на свойства природного ангидрита

Рассмотрено применение комплексных активаторов твердения ангидритового вяжущего, полученного из природного ангидрита. Такие активаторы позволяют расширить возможности использования ангидритовых вяжущих в строительстве. В исследовании применялись современные методы с использованием математического планирования эксперимента. В качестве факторов эксперимента были приняты добавки сульфатов, придающие материалу наилучшие эксплуатационные и эстетические свойства, – $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$, $CuSO_4$, $ZnSO_4 \cdot H_2O$. Установлено, что многокомпонентные активаторы твердения направленно регулируют свойства ангидритового вяжущего: увеличение концентраций изученных в данной работе активаторов твердения всегда ведет к росту степени гидратации вяжущего. Прямая зависимость между степенью гидратации и прочностью при сжатии сохраняется только на участке малых и средних концентраций активизирующих добавок.

Ключевые слова: ангидритовое вяжущее, активатор твердения, степень гидратации, концентрация.

Для цитирования: Фишер Х.-Б., Второв Б.Б., Бурьянов А.Ф. Исследование влияния многокомпонентных активаторов твердения на свойства природного ангидрита // *Строительные материалы*. 2023. № 1–2. С. 63–68.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-63-68>

H.-B. FISHER¹, Doctor-Engineer; B.B. WTOROV², Candidate of Sciences (Engineering); A.F. BURYANOV³, Doctor of Sciences (Engineering)

¹ Bauhaus- Universität Weimarei (Coudraystraße, 11, 99421, Weimar, Deutschland)

² BAUMIT LLC (11, Universitetskaja Street, Dubna, 141982, Moscow Region, Russian Federation)

³ National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

Study of the Effect of Multicomponent Hardening Activators on the Properties of Natural Anhydrite

The application of complex activators of hardening of anhydrite binder obtained from natural anhydrite is considered. Such activators make it possible to expand the possibilities of using anhydrite binders in construction. The study used modern methods using mathematical planning of the experiment. Sulfate additives were used as experimental factors, giving the material the best operational and aesthetic properties: $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$, $CuSO_4$, $ZnSO_4 \cdot H_2O$. It has been established that multicomponent hardening activators directly regulate the properties of the anhydrite binder. It has been established that an increase in the concentrations of the hardening activators studied in this work always leads to an increase in the degree of hydration of the binder. The direct relationship between the degree of hydration and compressive strength is preserved only in the area of small and medium concentrations of activating additives.

Keywords: anhydrite binder, hardening activator, degree of hydration, concentration.

For citation: Fisher H.-B., Wtorov B.B., Buryanov A.F. Study of the effect of multicomponent hardening activators on the properties of natural anhydrite. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 1–2, pp. 63–68. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-63-68>

Строительные материалы на ангидритовом вяжущем отличаются хорошими потребительскими свойствами и обладают рядом преимуществ по сравнению с материалами на основе других неорганических вяжущих. По срокам схватывания и прочности растворы на ангидритовом вяжущем сравнимы с цементными растворами или даже превосходят их. Материалы с использованием ангидритового цемента негорючи, обладают высокой теплопроводностью, хорошими цветовыми характеристиками (благодаря белому цвету используемого сырья). При правильном ведении строительных работ объемные изменения ангидритовых растворов очень малы. Поэтому в настоящее время ангидритовое вяжущее прежде всего применяется в качестве вяжущего смесей для устройства бесшовных монолитных полов в жилищном, гражданском и промышленном строительстве [1, 2].

В последние годы усилиями ученых России и Германии разработаны технологии получения обжиговых ангидритовых вяжущих из гипсового камня и отходов промышленности, а также сухих строительных смесей различного назначения на их основе [3–7]. Однако вопросам использования природного ангидрита уделялось недостаточное внимание в силу различных причин.

Вяжущие на основе природного ангидрита благодаря низкой себестоимости сырья и невысоким затратам на его переработку находят широкое применение в строительной индустрии Германии.

В настоящее время в связи с появлением новых требований к строительной продукции и проведению строительных работ приобретает актуальность проблема направленного регулирования свойств ангидритовых вяжущих.

В отличие от полуводного гипса, который в процессе гидратации быстро и полно взаимодействует с водой до образования дигидрата, преобразование ангидрита в двухводный гипс протекает сравнительно медленно и зачастую не доходит до завершения. Для ускорения реакции гидратации и твердения ангидритового вяжущего на практике применяются специальные добавки — активаторы твердения.

Принцип действия активаторов основывается на их способности влиять на процессы растворения

ангидрита в воде затворения. Наиболее распространенные способы активации твердения можно разделить по химическому составу вводимых добавок: сульфатная активация (с помощью сульфатов щелочных металлов, сульфатов тяжелых металлов, кислых сульфатов), щелочная активация ($Ca(OH)_2$, $NaOH$), преимущественно щелочная активация (портландцементный клинкер, доменный шлак и др.), смешанная активация (щелочной компонент и добавка сульфата) [8].

Известно, что сульфатные активаторы повышают прочность, а щелочные придают материалу постоянство объема [9]. Для получения на основе ангидрита материала с комплексом заданных свойств целесообразным является использование многокомпонентных активаторов твердения. Главной задачей данной работы стало изучение влияния многокомпонентных активаторов (смешанный способ активации) на свойства ангидритового вяжущего на примере природного ангидрита в начальный период твердения.

В ходе предварительных исследований было изучено влияние K_2SO_4 и $Ca(OH)_2$ как базовых ускорителей твердения на свойства вяжущего и принята рецептура базового состава. Водно-ангидритовое отношение принято равным 0,38. Далее было изучено действие сульфатов ($KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$, Na_2SO_4 , $(NH_4)_2SO_4$, $CuSO_4$, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, $ZnSO_4 \cdot H_2O$, $NaHSO_4 \cdot H_2O$, $KHSO_4$) на характеристики базового состава. Установлено, что влияние сульфатов на свойства вяжущего очень различно по характеру, это имеет связь с водородным показателем смеси [8, 10, 11].

В дальнейших исследованиях применялись методы математического планирования эксперимента. В качестве факторов эксперимента были приняты добавки сульфатов, придающие материалу наилучшие эксплуатационные и эстетические свойства: $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$, $CuSO_4$, $ZnSO_4 \cdot H_2O$. Эти три соли способствуют также повышению кислотности смеси.

В таблице приведены факторы и уровни их варьирования. В качестве исследуемых параметров были выбраны степень гидратации и прочность при сжатии через 3 сут твердения, конец схватывания вяжущего, относительное удлинение в первые 70 ч гидратации и пористость материала. Эксперименты про-

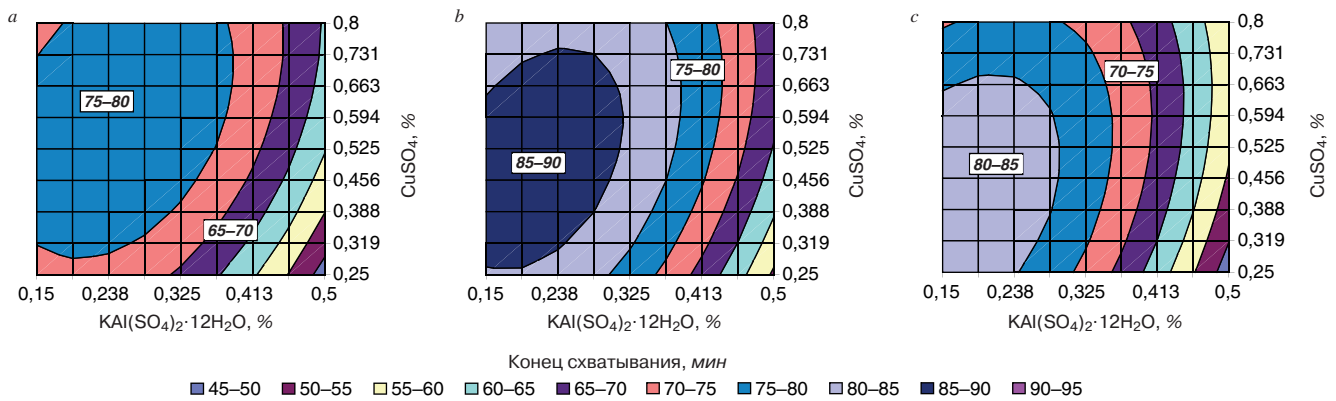


Рис. 1. Конец схватывания ангидритового вяжущего в зависимости от концентрации активаторов твердения при постоянном содержании K_2SO_4 (2%); $Ca(OH)_2$ (0,3%) и $ZnSO_4 \cdot H_2O$: $a - 0,8\%$; $b - 0,525\%$; $c - 0,25\%$

Fig. 1. The end setting of the anhydrite binder depending on the concentration of hardening activators at a constant content of K_2SO_4 (2%); $Ca(OH)_2$ (0.3%) and $ZnSO_4 \cdot H_2O$: $a - 0.8\%$; $b - 0.525\%$; $c - 0.25\%$

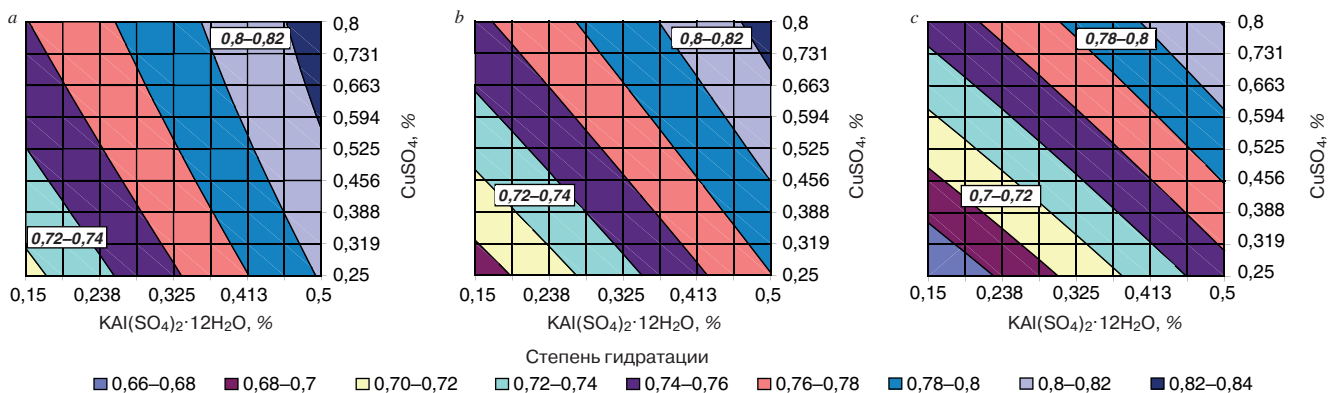


Рис. 2. Степень гидратации ангидритового вяжущего через 3 сут твердения в зависимости от концентрации активаторов при постоянном содержании K_2SO_4 (2%); $Ca(OH)_2$ (0,3%) и $ZnSO_4 \cdot H_2O$: $a - 0,8\%$; $b - 0,525\%$; $c - 0,25\%$

Fig. 2. The degree of hydration of the anhydrite binder after 3 days of hardening, depending on the concentration of activators at a constant content of K_2SO_4 (2%); $Ca(OH)_2$ (0.3%) and $ZnSO_4 \cdot H_2O$: $a - 0.8\%$; $b - 0.525\%$; $c - 0.25\%$

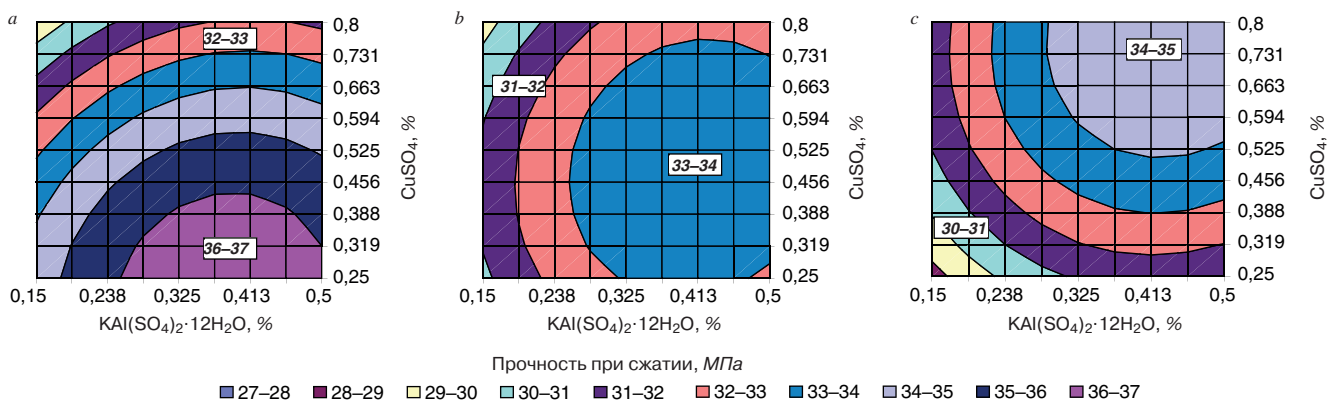


Рис. 3. Прочность ангидритового вяжущего при сжатии через 3 сут твердения в зависимости от концентрации активаторов при постоянном содержании K_2SO_4 (2%); $Ca(OH)_2$ (0,3%) и $ZnSO_4 \cdot H_2O$: $a - 0,8\%$; $b - 0,525\%$; $c - 0,25\%$

Fig. 3. The strength of the anhydrite binder in compression after 3 days of hardening, depending on the concentration of activators at a constant content of K_2SO_4 (2%); $Ca(OH)_2$ (0.3%) and $ZnSO_4 \cdot H_2O$: $a - 0.8\%$; $b - 0.525\%$; $c - 0.25\%$

водились в соответствии с центральным композиционным планом.

После вычисления значений коэффициентов регрессии были составлены математические зависимости исследуемых параметров от факторов (x_1, x_2, x_3) в виде полинома второй степени:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 - b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3.$$

Графические интерпретации полученных зависимостей наглядно демонстрируют влияние многокомпонентного активатора на характер изменения и величину исследуемых параметров (рис. 1–4, 6).

При увеличении концентрации сульфатов в составе многокомпонентного активатора сначала происходит некоторый рост сроков схватывания ангидритового теста (конец схватывания 75–90 мин), а затем с приближением к максимальным концентрациям –

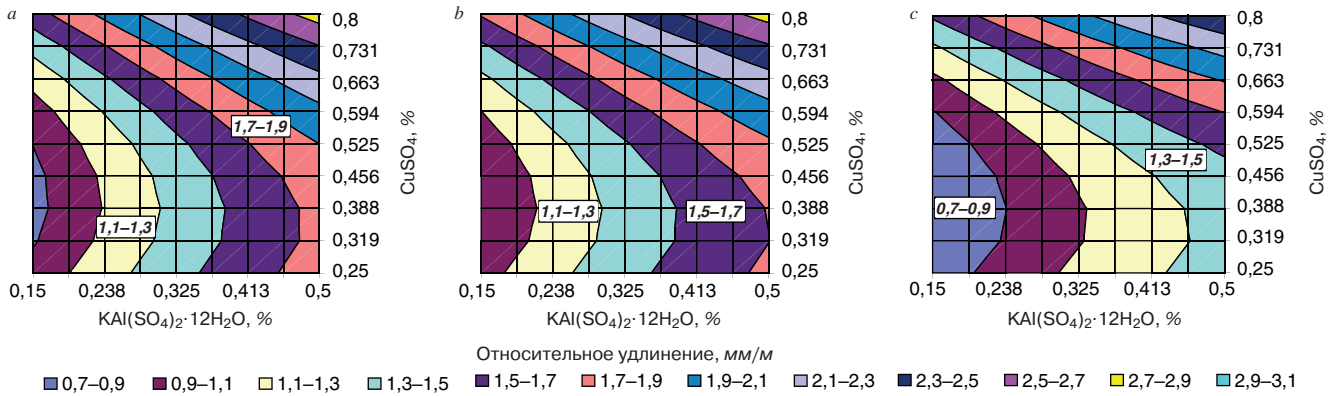


Рис. 4. Относительное удлинение образцов в течение первых 70 ч гидратации в зависимости от концентрации активаторов при постоянном содержании K_2SO_4 (2%); $Ca(OH)_2$ (0,3%) и $ZnSO_4 \cdot H_2O$: а – 0,8%; б – 0,525%; в – 0,25%

Fig. 4. Relative elongation of samples during the first 70 h of hydration depending on the concentration of activators at a constant content of K_2SO_4 (2%); $Ca(OH)_2$ (0.3%) and $ZnSO_4 \cdot H_2O$: а – 0.8%; б – 0.525%; в – 0.25%

Факторы и уровни их варьирования
Factors and levels of their variation

Факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
Натуральный вид	Кодированный вид	-1	0	+1	
$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$, %	x_1	0,15	0,325	0,5	0,175
$CuSO_4$, %	x_2	0,25	0,525	0,8	0,275
$ZnSO_4 \cdot H_2O$, %	x_3	0,25	0,525	0,8	0,275

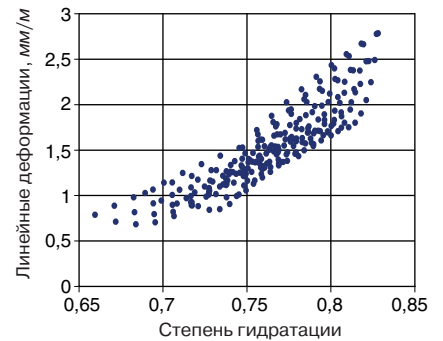


Рис. 5. Зависимость относительного удлинения образцов (70 ч твердения) от степени гидратации вяжущего (3 сут)

Fig. 5. Dependence of the relative elongation of the samples (70 hours of hardening) on the degree of hydration of the binder (3 days)

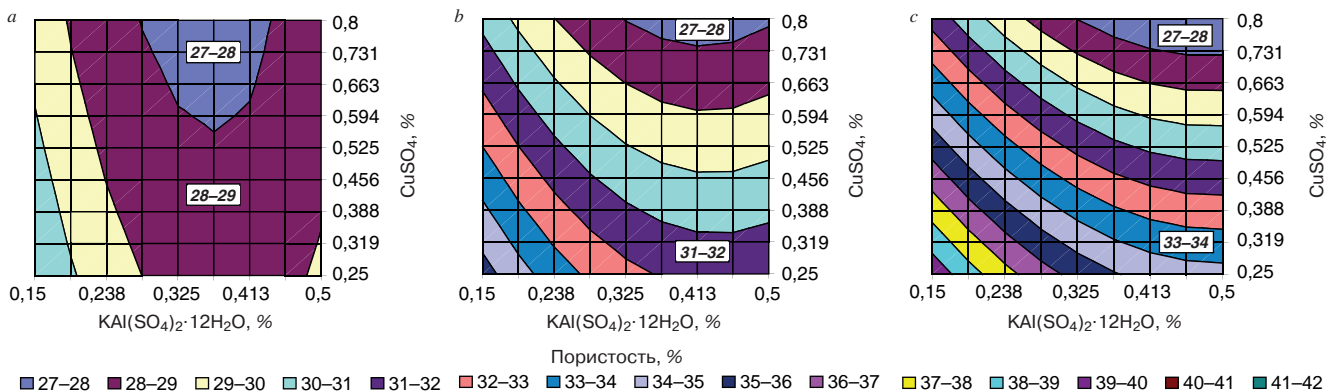


Рис. 6. Пористость затвердевшего ангидритового вяжущего в зависимости от концентрации активаторов твердения при постоянном содержании K_2SO_4 (2%); $Ca(OH)_2$ (0,3%) и $ZnSO_4 \cdot H_2O$: а – 0,8%; б – 0,525%; в – 0,25%

Fig. 6. The porosity of the hardened anhydrite binder depending on the concentration of hardening activators at a constant content of K_2SO_4 (2%); $Ca(OH)_2$ (0.3%) and $ZnSO_4 \cdot H_2O$: а – 0.8%; б – 0.525%; в – 0.25%

резкое снижение сроков схватывания (конец схватывания 60–65 мин). Минимальное значение конца схватывания (50–60 мин) отмечается, однако, при наибольшем содержании в смеси $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ и наименьшем содержании $CuSO_4$ (рис. 1).

Наиболее интенсивно гидратация ангидрита протекает в первые трое суток (рис. 2). При этом степень гидратации достигает 0,66–0,84. Увеличение концентрации активаторов в вяжущем всегда ведет к росту доли двухводного гипса в затвердевших образцах. Максимальное значение степени гидрата-

ции 0,83 отмечается при наибольшей концентрации добавок.

Все компоненты комплексного активатора на отдельных участках способствуют росту прочности материала (рис. 3). Наибольшее влияние на прочность оказывает добавка $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$. Добавки $CuSO_4$ и $ZnSO_4 \cdot H_2O$ повышают прочность материала только при малых и средних концентрациях других компонентов.

Характерно, что прямая зависимость между степенью гидратации и прочностью при сжатии сохра-

няется только на участке малых и средних концентраций активизирующих добавок (рис. 2, с, 3, с).

Основной рост линейных деформаций ангидритового вяжущего происходит в первые сутки твердения. Используемый в работе метод позволяет измерять деформации начиная с момента приготовления смеси. Наибольшее влияние на величину относительного удлинения вяжущего оказывают добавки $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ и $CuSO_4$ (рис. 4). Через 70 ч гидратации максимальное значение линейных деформаций 2,78 мм/м отмечено при наибольших концентрациях всех активаторов в смеси.

Множество точек (рис. 5), построенное с использованием уравнений регрессии, проходит по графику широкой полосой, подтверждая наличие прямой зависимости между относительным удлинением и степенью гидратации.

Следует отметить, что минимальным значениям относительного удлинения соответствуют более поздние сроки схватывания вяжущего.

Увеличение содержания сульфатов в составе комплексного активатора ведет к снижению пористости материала (определение методом ртутной порометрии). При этом в области максимальных концентраций этот эффект заметно снижается (рис. 6).

Список литературы

1. Israel D. Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Hydratationsgrad, Biegezugfestigkeit, und Gefüge abbindenden Anhydrits. *ZKG INTERNATIONAL*. 49 (1996). No. 4, pp. 228–234.
2. Гранданс Ю.А., Гирш Е.В., Моисеева Е.В., Меднис И.А., Клявиня А.П. Самонивелирующиеся стяжки под полы на основе ангидритового вяжущего из фосфогипса // *Строительные материалы*. 1989. № 12.
3. Гальцева Н.А., Бурьянов А.Ф., Булдыжова Е.Н., Соловьев В.Г. Использование синтетического ангидрита сульфата кальция для производства закладочных смесей // *Строительные материалы*. 2015. № 6. С. 76–77.
4. Клименко В.Г. Роль двойных солей на основе сульфатов Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , NH_4^+ в технологии получения ангидритовых вяжущих // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2017. № 12. С. 119–125.
5. Гальцева Н.А., Бурьянов А.Ф., Соловьев В.Г., Ткаченко Д.И. Модифицированное вяжущее на основе синтетического ангидрита для закладочных смесей // *Строительные материалы*. 2017. № 7. С. 74–76.
6. Бурьянов А.Ф., Фишер Х.-Б., Гальцева Н.А., Махортов Д.Н., Хасаншин Р.Р. Исследование влияния различных активизирующих добавок на свойства ангидритового вяжущего // *Строительные материалы*. 2020. № 7. С. 4–9. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-4-9>
7. Бурьянов А.Ф., Фишер Х.-Б., Гальцева Н.А., Булдыжова Е.Н. Исследование роли сульфата

Почти во всем исследуемом диапазоне концентраций добавок между степенью гидратации вяжущего и пористостью, а также линейным удлинением материала существует обратная зависимость. Процесс роста кристаллов дигидрата кальция (рост степени гидратации) сопровождается как расширением материала на начальном этапе твердения, так и последующим самоуплотнением его структуры (заполнение пор и снижение пористости).

Вывод

Многокомпонентными активаторами твердения удается направленно регулировать свойства ангидритового вяжущего. Установлено, что увеличение концентрации изученных в данной работе активаторов твердения всегда ведет к росту степени гидратации вяжущего. Прямая зависимость между степенью гидратации и прочностью при сжатии сохраняется только на участке малых и средних концентраций активизирующих добавок. Почти на всем исследуемом диапазоне концентраций добавок между пористостью и степенью гидратации вяжущего, а также линейным удлинением материала существует обратная зависимость, что объясняется особенностью роста кристаллов двухводного гипса на начальном этапе твердения.

References

1. Israel D. Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Hydratationsgrad, Biegezugfestigkeit, und Gefüge abbindenden Anhydrits. *ZKG INTERNATIONAL*. 49 (1996). No. 4, pp. 228–234.
2. Grandans Yu.A., Girsh E.V., Moiseeva E.V., Mednis I.A., Klyavinya A.P. Self-levelling floor screeds based on anhydrite binder made of phosphogypsum. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 1989. No. 12. (In Russian).
3. Galtseva N.A., Buryanov A.F., Buldyzhova E.N., Soloviev V.G. The use of synthetic calcium sulfate anhydrite for the production of backfill mixtures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 6, pp. 76–77. (In Russian).
4. Klimenko V.G. The role of double salts based on sulfates Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , NH_4^+ in the technology of obtaining anhydrite binders. *Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov*. 2017. No. 12, pp. 119–125. (In Russian).
5. Galtseva N.A., Buryanov A.F., Soloviev V.G., Tkachenko D.I. Modified binder based on synthetic anhydrite for filling mixtures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 7, pp. 74–76. (In Russian).
6. Buryanov A.F., Fisher H.-B., Gal'tseva N.A., Machortov D.N., Hasanshin R.R. Research in the influence of various activating additives on the properties of anhydrite binder. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 7, pp. 4–9. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-4-9>

- калия при проектировании активатора твердения // *Строительные материалы*. 2021. № 8. С. 34–38. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-34-38>
8. Wtorov B.; Fischer H.-B.; Stark J. Zur Anregung von Naturanhydrit. Weimar, 2000. 14. ibausil, Tagungsband 1. S. 1069–1082.
 9. Grimme H. In Mitteldeutschland entwickelte Anhydritbinderarten. *Zement-Kalk-Gips*. 1962. No. 7.
 10. Фишер Х.-Б., Второв Б. Влияние активаторов твердения на свойства природного ангидрита. *II Международное совещание по химии и технологии цемента*. Т. 2. М., 2000. С. 53–61.
 11. Второв Б., Фишер Х.-Б. Подбор и оптимизация состава ангидритового вяжущего. *Моделирование и оптимизация в материаловедении: Материалы к 40-му международному семинару по моделированию и оптимизации композитов*. Одесса, 2001. С. 66–67.
7. Buryanov A.F., Fisher H.-B., Gal'tseva N.A., Buldyzhova E.N. Investigation of the role of potassium sulfate in the design of a hardening activator. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 8, pp. 34–38. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-34-38>
 8. Wtorov B.; Fischer H.-B.; Stark J. Zur Anregung von Naturanhydrit. Weimar, 2000. 14. ibausil, Tagungsband 1. S. 1069–1082.
 9. Grimme H. In Mitteldeutschland entwickelte Anhydritbinderarten. *Zement-Kalk-Gips*. 1962. No. 7.
 10. Fisher H.-B., Wtorov B. Influence of hardening activators on the properties of natural anhydrite. *II International Conference on Chemistry and Technology of Cement*. Vol. 2. Moscow. 2000, pp. 53–61. (In Russian).
 11. Wtorov B., Fisher H.-B. Selection and optimization of the anhydrite binder composition. *Modeling and Optimization in Materials Science: Proceedings for the 40th International Seminar on Modeling and Optimization of Composites*. Odessa. 2001, pp. 66–67. (In Russian).



Немецкий стандарт

КОНКУРС

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ



РОССИЙСКАЯ
ГИПСОВАЯ
АССОЦИАЦИЯ

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИХ СТАТЕЙ

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

УДК 666.97

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-69-75>

О.В. АЛЕКСАНДРОВА¹, канд. техн. наук (AleksandrovaOV@mgsu.ru);
 НГУЕН ДЫК ВИНЬ КУАНГ², канд. техн. наук (ndvquang@hueic.edu.vn);
 Б.И. БУЛГАКОВ¹, канд. техн. наук (BulgakovBI@mgsu.ru)

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
 (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

² Индустриальный колледж Хюэ (530000, Социалистическая Республика Вьетнам, г. Хюэ, Нгуен Хюэ Стрит, 70)

Влияние минеральных добавок на коррозионную стойкость стальной арматуры в железобетонных конструкциях

Одной из основных причин утраты работоспособности железобетонными конструкциями в процессе их эксплуатации является коррозия стальной арматуры. Процесс коррозии арматуры вызывает повреждение строительных конструкций вследствие уменьшения силы сцепления цементного камня бетона с арматурой в результате растрескивания и отслаивания защитного бетонного слоя от поверхности арматурных стержней. В статье рассматриваются экспериментальные результаты изучения последствий введения в бетонную смесь тяжелого бетона тонкодисперсных активных минеральных добавок, обладающих большой пуццоланической активностью из-за высокого содержания в их составе аморфного диоксида кремния в виде микрокремнезема и топливной низкокальциевой кислой золы-уноса, а также нанодисперсного кремнезема совместно с водоредуцирующим поликарбоксилатным суперпластификатором и их влияния на коррозионную стойкость стальной арматуры в бетоне со структурой, модифицированной указанными добавками. Проводилась оценка коррозионной стойкости стальной арматуры в железобетонной конструкции, подверженной воздействию агрессивных сред, содержащих высокие концентрации ионов хлора. Выявлено, что частичная замена сульфатостойкого портландцемента в составе разработанного многокомпонентного вяжущего тонкодисперсными минеральными добавками повышает коррозионную стойкость стальных арматурных стержней и снижает потери массы арматурной стали, а также длину, ширину и глубину питтинга трещин на поверхности арматуры, вызываемых коррозией, в результате уплотнения структуры модифицированных бетонов использованными химическими, а также нано- и тонкодисперсными минеральными добавками.

Ключевые слова: модификация структуры бетона, коррозия стальной арматуры, тонкодисперсные минеральные добавки, микрокремнезем, нанокремнезем, топливная низкокальциевая зола-уноса, плотность тока коррозии, закон Фарадея.

Для цитирования: Александрова О.В., Нгуен Дык Винь Куанг, Булгаков Б.И. Влияние минеральных добавок на коррозионную стойкость стальной арматуры в железобетонных конструкциях // *Строительные материалы*. 2023. № 1–2. С. 69–75.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-69-75>

O.V. ALEKSANDROVA¹, Candidate of Sciences (Engineering) (AleksandrovaOV@mgsu.ru);

NGUYEN DUC VINH QUANG², Candidate of Sciences (Engineering) (ndvquang@hueic.edu.vn);

B.I. BULGAKOV¹, Candidate of Sciences (Engineering) (BulgakovBI@mgsu.ru)

¹ Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavl Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

² Hue Industrial College (70, Nguyen Hue Street, Hue, 530000, Vietnam)

The Effect of Mineral Additives on the Corrosion Resistance of Steel Reinforcement in Reinforced Concrete Structures

One of the main reasons for the loss of operability of reinforced concrete structures during their operation is the corrosion of steel reinforcement. The process of reinforcement corrosion causes damage to building structures as a result of a decrease in the adhesion of concrete cement stone with reinforcement as a result of cracking and peeling of the protective concrete layer from the surface of reinforcement rods. The article examines the effect of the introduction of finely dispersed active mineral additives into the concrete mixture of heavy concrete, which have a high pozzolanic activity due to the high content of amorphous silicon dioxide in their composition, in the form of microsilicon and low-calcium acid fly ash, as well as nano-dispersed silica together with a water-reducing polycarboxylate superplasticizer on the corrosion resistance of steel reinforcement in concrete with a structure, modified by the specified additives. An assessment was made of the corrosion resistance of steel reinforcement in a reinforced concrete structure exposed to aggressive environments containing high concentrations of chlorine ions. Partial replacement of sulfate-resistant Portland cement as part of the developed multicomponent binder with finely dispersed mineral additives increases the corrosion resistance of steel reinforcing bars and reduces the weight loss of reinforcing steel, as well as the length, width and depth of pitting cracks on the surface of the reinforcement caused by corrosion as a result of compaction of the structure of modified concrete with used chemical, as well as nano- and finely dispersed mineral additives.

Keywords: modification of concrete structure, corrosion of steel reinforcement, fine mineral additives, microsilicon, nanosilicon, low-calcium fly ash fuel, corrosion current density, Faraday's law.

For citation: Aleksandrova O.V., Nguyen Duc Vinh Quang, Bulgakov B.I. The effect of mineral additives on the corrosion resistance of steel reinforcement in reinforced concrete structures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 1–2, pp. 69–75. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-69-75>

В настоящее время коррозия железобетонных конструкций является одной из основных проблем, препятствующих повышению долговечности и работоспособности зданий и сооружений. Управление коррозией и мониторинг состояния железобетонных конструкций промышленных и гражданских зданий

и инженерных сооружений необходимы для того, чтобы гарантировать требуемый срок их службы. Современные методы диагностики состояния и математического моделирования могут способствовать усилению коррозионной стойкости железобетонных конструкций, тем самым повышая безопасность экс-

плуатации зданий и сооружений различного назначения и продлевая срок их службы.

Коррозия стальной арматуры в железобетонных конструкциях представляет собой электрохимический процесс на границе раздела бетон–сталь, при котором в результате протекания анодного процесса железо стали окисляется под действием поровой жидкой фазы бетона, содержащей растворенный кислород [1]. При этом поровая вода бетона действует как электролит, а сама стальная арматура обеспечивает электрическое соединение, необходимое для переноса электронов, между анодными и катодными участками ее поверхности.

Арматура в железобетоне физически изолирована от коррозии защитным бетонным слоем и пассивным слоем продуктов коррозии железа на ее поверхности в виде пленки. Этот защитный пассивный слой значительно снижает подвижность ионов на границе между арматурной сталью и окружающим ее бетоном, в результате чего скорость коррозии резко падает. Считается, что этот слой представляет собой ультратонкую (<10 нм) защитную оксидную или гидроксидную пленку, которая снижает скорость коррозии стали [2, 3].

Поэтому в большинстве условий эксплуатации правильно спроектированные и выполненные железобетонные конструкции будут обладать требуемыми эксплуатационными показателями и долговечностью, поскольку сам бетон благодаря наличию в теле конструкции щелочной среды из-за присутствия свободного гидроксида кальция обеспечит защиту арматурной стали от коррозии. Тем не менее коррозия арматуры остается одной из основных проблем, влияющих на долговечность железобетонных конструкций.

В нормальных условиях эксплуатации защита арматуры, обеспечиваемая бетоном, препятствует иницированию ее электрохимической коррозии, поскольку, во-первых, бетон, не подвергающийся внешним воздействиям, обычно имеет рН поровой жидкости от 12,5 до 13,5, а во-вторых, из-за его низкой электропроводности. Тем не менее в течение жизненного цикла железобетонной конструкции внешние воздействия, приводящие к депассивации – частичной или полной потере защитного пас-

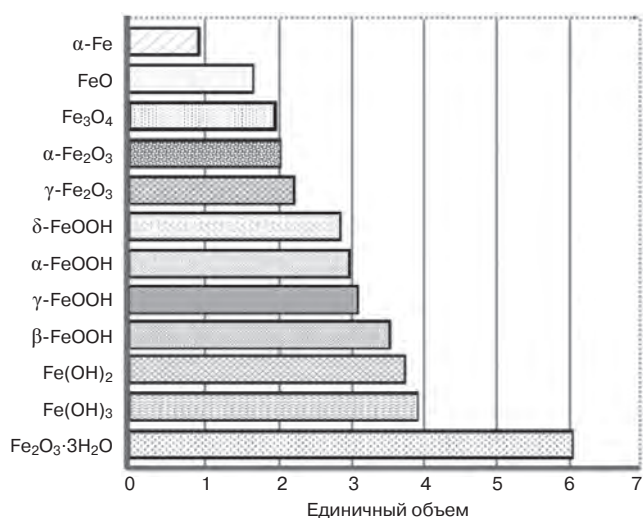


Рис. 1. Сравнение объемов продуктов коррозии арматурной стали, образующихся в железобетоне [3]

Fig. 1. Comparison of the volumes of corrosion products of reinforcing steel formed in reinforced concrete [3]

сивного слоя на поверхности арматурных стержней, благоприятствуют началу и протеканию электрохимической коррозии стальной арматуры [4].

Коррозионные продукты окисления железа являются экспансивными, и их образование может вызвать растрескивание и дальнейшее разрушение бетона. При этом разрушение пассивной пленки, защищающей арматурную сталь, может протекать по двум механизмам:

а) карбонизация – углекислый газ, присутствующий в атмосфере, проникает через поровую сеть в бетон, где реагирует со свободным гидроксидом кальция, снижая щелочность поровой жидкой фазы бетона до рН<10, что в итоге приводит к растворению защитного пассивного слоя;

б) воздействие хлорид-ионов Cl⁻, поступающих в основном из морской водной среды, растворов антиобледенительных солей или из других источников, которые могут проникать через поры в бетон путем капиллярного всасывания или диффузии, что приводит к локальному разрушению пассивной пленки на поверхности арматурной стали и тем самым провоцирует ее коррозию.

Таблица 1
Table 1

Составы бетонов
Concrete compositions

Состав бетона	Вязущие материалы, кг/м ³					Заполнители, кг/м ³		Вода л	СП л	(В+СП)/Вяз
	Ц	МК	ЗУ	Нано-SiO ₂		Щ	П			
				%	кг					
2а	550	–	–	–	–	1088	592	156	9,9	0,3
5аS0	357,5	27,5	165	–	–	1088	592	156	9,9	0,3
5аS1	352	27,5	165	1	5,5	1088	592	156	9,9	0,3
5аS2	346,5	27,5	165	2	11	1088	592	156	9,9	0,3

Примечание. Ц – сульфатостойкий портландцемент; МК – микрокремнезем; ЗУ – низкокальциевая (кислая) зола-уноса; Щ – щебень; П – кварцевый песок; СП – поликарбоксилатный суперпластификатор; В – вода; Вяз – вязущие материалы.

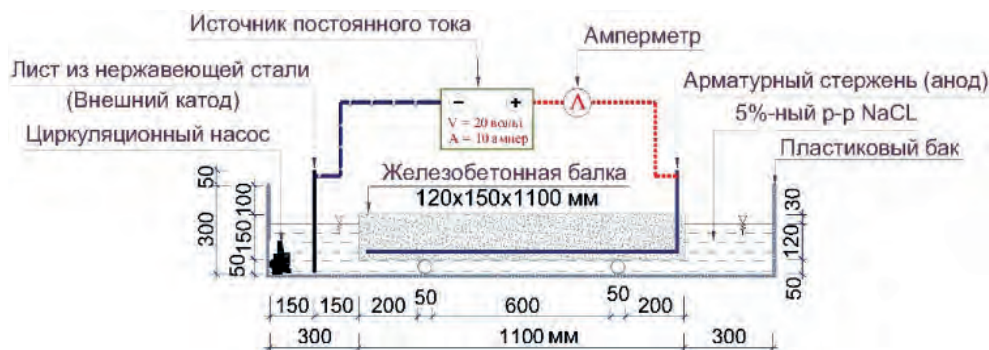


Рис. 2. Схема анодного ускорения коррозии стальной арматуры в бетонном образце-балке
Fig. 2. Scheme of anodic acceleration of corrosion of steel reinforcement in a concrete sample beam

Вызванная хлоридами коррозия имеет точечную форму, и образование продуктов коррозии на границе раздела бетон–стальная арматура является явным признаком протекания коррозионного процесса [5].

Недостаточное количество кислорода для сохранения пассивной пленки, образование гальванических элементов от контакта различных металлов и блуждающие токи являются другими факторами, которые могут вызвать активную коррозию в железобетонных конструкциях [6].

Исследования состава продуктов коррозии показали их зависимость от коррозионной стойкости арматурной стали, состава бетона и концентрации кислорода [7–9]. Как видно на рис. 1, различные продукты коррозии стали занимают разные объемы.

Целью исследования являлось изучение влияния введения в бетонную смесь тяжелого бетона тонкодисперсных активных минеральных добавок, обладающих большой пуццоланической активностью из-за высокого содержания в их составе аморфного диоксида кремния, в виде микрокремнезема и низкокальциевой кислой золы-уноса, а также нанодисперсного кремнезема совместно с водоредуцирующим поликарбоксилатным суперпластификатором на коррозионную стойкость стальной арматуры в бетоне со структурой, модифицированной указанными добавками.

Исследование выполнялось с применением методологических основ системно-структурного подхода строительного материаловедения «состав–структура–свойства» [10–12].

Методы исследований

Оценка коррозионной стойкости стальной арматуры в железобетонной конструкции, подверженной воздействию агрессивных сред, содержащих высокие концентрации ионов хлора, проводилась в соответствии с TCVN 9346:2012 и ГОСТ 31384–2017 «Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования».

Для расчета теоретической потери массы стальной арматуры в бетонных образцах при ускоренном испытании на стойкость к коррозии с использованием анодного электротока был применен закон Фарадея. Схема установки для проведения испытаний показана

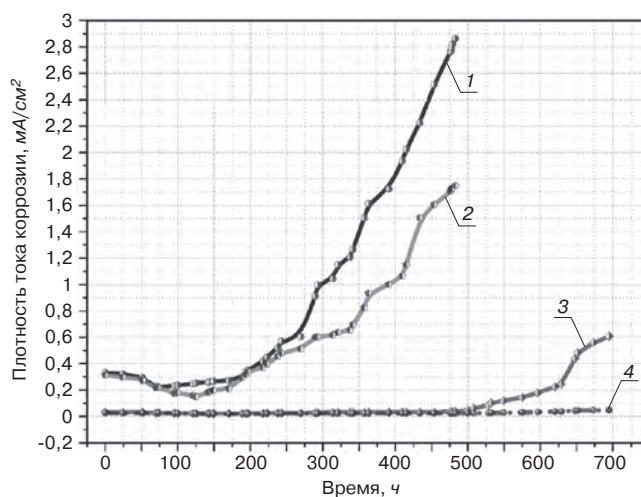


Рис. 3. Влияние введения в бетонные смеси тонкодисперсных минеральных наполнителей на величину плотности тока коррозии в бетонных образцах-балках, армированных стальными стержнями: 1 – 2а (100% ПЦ); 2 – 5аS0 (65% Ц+5% МК+30% ЗУ); 3 – 5аS1 (64% Ц+5% МК+30% ЗУ+1% nano-SiO₂); 4 – 5аS2 (63% Ц+5% МК+30% ЗУ+2% nano-SiO₂)

Fig. 3. Influence of the introduction of fine mineral fillers into concrete mixtures on the value of the corrosion current density in concrete specimens-beams reinforced with steel rods: 1 – 2а (100% PC); 2 – 5аS0 (65% C + 5% MC + 30% fly ash); 3 – 5аS1 (64% C+5% MC +30% fly ash+1% nano-SiO₂); 4 – 5аS2 (63% C+5% MC +30% fly ash+2% nano-SiO₂)

на рис. 2. При этом лист из нержавеющей стали был соединен с отрицательной клеммой источника постоянного тока и выполнял роль катода.

Принцип ускоренной коррозии с помощью импрессионированного анодного тока действует путем превращения арматурной стали в анод в перевернутой системе катодной защиты. С использованием трансформатора, выпрямителя и конденсатора был создан источник постоянного тока силой 10 А и напряжением 20 В. Отрицательная клемма источника постоянного тока была соединена с листом из нержавеющей стали (катодом), в то время как арматурный стальной стержень соединялся с положительной клеммой источника, что делало арматурный стержень анодом. Образцы-балки погружали в водную среду, содержащую 5%-ный раствор NaCl, для обеспечения полного насыщения порового пространства бетона. Приложенный ток вызывал коррозию в арматурном стальном стержне, в то время как внешний катод в виде листа из нержавеющей стали был защищен от коррозии.

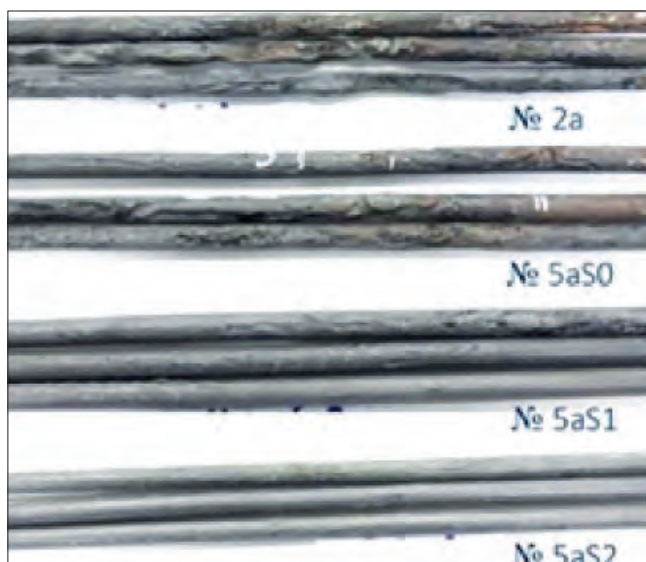


Рис. 4. Поверхность стальных арматурных стержней после испытаний
Fig. 4. Surface of steel reinforcing bars after testing

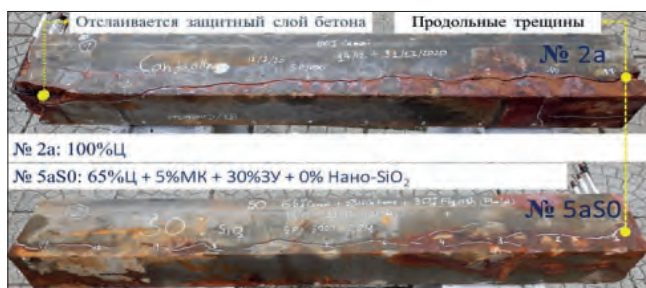


Рис. 5. Коррозионные трещины на поверхности армированных бетонных образцов-балок составов № 2a и 5aS0
Fig. 5. Corrosion cracks on the surface of reinforced concrete sample-beams of compositions No. 2a and 5aS0

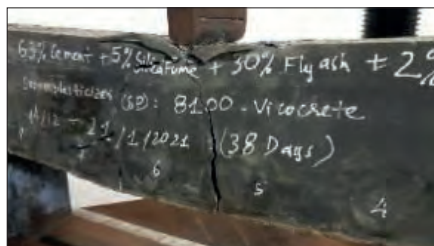
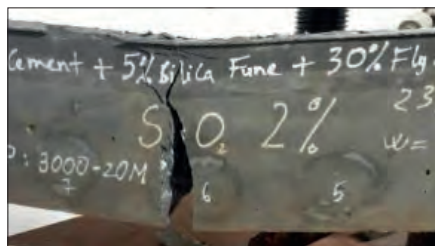


Рис. 6. Результаты испытаний на растяжение при изгибе бетонных образцов-балок, стальные арматурные стержни в которых были подвергнуты коррозии под действием постоянного электрического тока
Fig. 6. Results of tensile tests in bending of concrete specimens-beams, steel reinforcing bars in which were subjected to corrosion under the action of direct electric current

Результаты исследования

Определение силы тока при ускоренной коррозии арматуры в образцах-балках

Образцы-балки из бетонов четырех составов, приведенных в табл. 1, подвергались ускоренной коррозии путем приложения постоянного тока к находящимся в них стальным арматурным стержням [13–17].

Плотность электрического тока коррозии. При подаче постоянного напряжения контролировалась сила тока, приложенного ко всем бетонным образцам-балкам. Плотность коррозионного тока определяется как отношение величины силы тока к единице площади поверхности стальных арматурных стержней. Зависимости между плотностями коррозионных токов и временем проведения испытаний приведены на рис. 3.

Из приведенных на рис. 3 экспериментальных результатов следует, что плотность тока коррозии уменьшается по мере увеличения содержания нанокремнезема в составе многокомпонентного вяжущего. Установлено, что в бетонном образце-балке отсутствует коррозия арматуры, когда бетонная смесь содержит нано-SiO₂ в количестве 2% от массы многокомпонентного вяжущего [18–20].

Визуальный контроль корродированных арматурных стержней. После окончания испытаний поверхность корродированных арматурных стальных стержней была визуально исследована для определения степени их коррозии. На рис. 4 показано, что при подаче на образцы постоянного тока напряжением 20 В большая и обширная локальная коррозия появилась на всех трех стержнях контрольных образцов-балок состава № 2a, в то время как области локализованной коррозии значительно уменьшились при введении активных минеральных добавок в количестве 35–37 мас. % в состав многокомпонентного вяжущего взамен части сульфатостойкого портландцемента (составы № 5aS0, 5aS1 и 5aS2). При введении 1% нанокремнезема от массы вяжущего (состав № 5aS1) видна общая коррозия и наблюдается небольшая локализованная коррозия, а при 2% нанокремнезема (состав № 5aS2) локализованная коррозия не видна и имеется лишь небольшая общая коррозия. Это объясняется снижением плотности тока коррозии стальных стержней по мере увеличения содержания нанокремнезема в составе вяжущего.

Степень коррозии стальной арматуры. Коррозию арматуры можно определить по потере массы металла, которая измеряется разницей в массе металла, очищенного от оксидной пленки

Таблица 2
Table 2Теоретическая степень коррозии арматурных стержней и их потери массы после коррозионных испытаний
Theoretical degree of corrosion of reinforcing bars and their mass loss after corrosion tests

Состав бетона	L , см	D , см	S , см ²	T , год	I , А	$i = I/S$, мА/см ²	C_1 , %	Δm_2 , г	m_1 , г	m_2 , г	Δm_1 , г	Δm , %
2a	115	0,818	887,72	0,0551	0,62	2,095	3,29	93,91	473	381,1	91,93	2,1
5aS0	115	0,818	887,72	0,0551	0,369	1,248	1,96	55,95	473	430	43	23,15
5aS1	115	0,818	887,72	0,0855	0,084	0,284	0,691	19,71	473	454,2	18,83	4,46
5aS2	115	0,818	887,72	0,0855	0,024	0,081	0,197	5,61	473	468,5	4,5	19,77

Примечание. L – средняя длина трех арматурных стержней, см; D – средний фактический диаметр трех арматурных стержней, см; S – суммарная площадь поверхности трех арматурных стержней, см²; T – продолжительность испытаний армированных бетонных образцов, требуемая для их разрушения, год; I – средняя сила тока коррозии, проходящего через три арматурных стержня, А; i – плотность тока коррозии, мА/см²; m_1 – средняя измеренная масса трех арматурных стержней до коррозии, г; m_2 – средняя измеренная масса трех арматурных стержней после коррозии, г; Δm_1 – средняя измеренная потеря массы трех арматурных стержней г; Δm_2 – теоретическая потеря массы арматурного стержня, г, рассчитанная по закону Фарадея; Δm – разница между измеренной потерей массы и теоретической потерей массы, %; C_1 – средняя теоретическая степень коррозии арматурных стержней, %.

Таблица 3
Table 3Результаты определения разрушающих изгибающих нагрузок для образцов-балок исследованных составов бетонов после проведения коррозионных испытаний
The results of determining the breaking bending loads for beam samples of the studied concrete compositions after corrosion tests

Состав бетона	Продолжительность испытаний, сут	Средний диаметр арматурных стержней до проведения коррозионных испытаний, мм	Средний диаметр арматурных стержней после проведения коррозионных испытаний, мм	Разрушающая нагрузка после коррозионных испытаний бетонных образцов, кН
2a	21	7,16	7,33	28
5aS0	31	7,52	7,79	34,5
5aS1	31	8,04	8,06	55,3
5aS2	31	8,12	8,13	58,2

до проведения испытаний, и после их завершения. Теоретическая степень коррозии стальных арматурных стержней была рассчитана по закону Фарадея с помощью гравиметрического метода. Регистрировался ток, проходящий через стальные стержни, после чего среднее его значение использовалось для расчета потери их массы. Теоретическая степень коррозии арматурных стержней и их потери массы после коррозионных испытаний приведена в табл. 2.

Результаты испытаний, приведенные в табл. 2, показывают, что введение нанокремнезема в бетонную смесь приводит к уменьшению степени коррозии стальных арматурных стержней и их потери массы после коррозионных испытаний.

В результате проведенных испытаний было установлено, что введение в бетонные смеси минеральных добавок в виде микрокремнезема, а также низкокальциевой золы-уноса снижает степень коррозии арматуры в бетоне (рис. 5).

Помимо коррозионных пятен, трещины на бетонной поверхности вдоль проржавевшего стального стержня являются еще одним признаком коррозии стальных арматурных стержней, что не только влияет на внешний вид и работоспособность конструкций, но также может уменьшить их срок службы.

Взаимосвязь между разрушающими нагрузками при изгибе и характером растрескивания. Режимы разрушения образцов-балок варьировались в зависимости от уровня индуцированной коррозии. Результаты испытаний, изображенные на рис. 6 и приведенные в табл. 3, показывают, что контрольная балка состава № 2a (100% сульфатостойкого цемента в составе вяжущего) вышла из строя из-за разрыва стальных стержней, в то время как бетон в зоне сжатия не разрушился. Это вторичный тип разрушения железобетонных балок, и его необходимо избегать. Балки составов № 5aS1 (1% от массы многокомпонентного вяжущего нано-SiO₂) и № 5aS2 (2% от массы вяжущего нано-SiO₂) разрушились из-за первоначального растрескивания бетона в центральной зоне на нижней их поверхности (зона растяжения), и это разрушение продолжилось с выходом арматурных стальных стержней (нижняя растяжимая арматура) до точки дробления бетона в зоне сжатия. Это пластический способ разрушения, обычно наблюдаемый при растяжении. Также можно видеть, что разрушающие нагрузки, требуемые для растрескивания образцов-балок, в которых сульфатостойкий портландцемент частично заменен микро- и нанокремнеземом, а также низкокальциевой золой-уноса, повысились по

сравнению с контрольной балкой без тонкодисперсных активных минеральных добавок.

Из приведенных в табл. 3 результатов испытаний можно сделать следующие выводы. Видно, что продолжительность испытаний, требуемая для коррозионного разрушения образцов-балок на основе модифицированных бетонов разработанных составов № 5aS0, 5aS1 и 5aS2, примерно в 1,5 раза больше, чем для образцов из контрольного состава бетона 2a. При этом коррозия арматуры в бетонных образцах при добавлении в смесь наночастиц SiO₂ в количестве 2% от массы многокомпонентного вяжущего практически отсутствует.

Полученные результаты объясняются повышением плотности исследованных бетонов за счет модификации их структур разработанным комплексом минеральных добавок при его совместном использовании с поликарбоксилатным суперпластификатором, что способствует не только росту их прочности, но и усилению сопротивляемости коррозионному растрескиванию, это, в свою очередь, способствует повышению уровня защищенности стальной арматуры от коррозии. Все эти факторы приводят к увеличению длительности безремонтной эксплуатации и повышению долговечности железобетонных конструкций на бетонах с добавлением наночастиц SiO₂ в сочетании с микрокремнеземом, кислой золой-уноса ТЭС и суперпластификатором.

Выводы

На основании полученных экспериментальных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Результаты проведенных исследований показали, что частичная замена сульфатостойкого портландцемента в составе многокомпонентного вяжущего на нано-SiO₂ повышает коррозионную стойкость стальных арматурных стержней в бетонных образцах за счет уменьшения величины генерируемого коррозионного тока и степени коррозии арматуры. При этом установлено, что чем выше доля замещения сульфатостойкого портландцемента микрокремнеземом в границах исследованного диапазона от 0 до 2 мас. %, тем выше коррозионная стойкость арматурной стали. На основании полученных экспериментальных результатов можно предположить, что введение в бетонную смесь разработанного комплекса активных минеральных добавок, состоящего из микро- и микрокремнезема, а также низкокальциевой золы-уноса в сочетании с поликарбоксилатным суперпластификатором приведет к повышению долговечности и увеличению срока безремонтной эксплуатации железобетонных изделий и конструкций из модифицированных бетонов разработанных составов.

2. Показано, что постоянный электрический ток напряжением 20 В приводит к локализованной коррозии стальной арматуры, вызывающей внезапный выход из строя железобетонных балок под нагрузкой. Дополнительное введение 2 мас. % микрокремнезема в состав многокомпонентного вяжущего взамен ча-

сти сульфатостойкого портландцемента приводит к большему уплотнению структуры модифицированного бетона по сравнению как с бетоном, содержащим 1 мас. % микрокремнезема, так и с бетоном без микрокремнезема, содержащим тонкодисперсные активные минеральные добавки в виде микрокремнезема и низкокальциевой золы-уноса, а также с бетоном контрольного состава, не содержащим указанных добавок. Установлена меньшая, примерно на 80–90%, потеря массы арматурной стали из-за коррозии в бетонных образцах, содержащих нано-SiO₂ в составе многокомпонентного вяжущего, по сравнению с бетоном контрольного состава, не содержащим активные минеральные добавки. Длина, ширина и глубина питтинга трещин, вызванных коррозией стальной арматуры, также были меньше в образцах, содержащих микрокремнезем. Было установлено, что частицы нано-SiO₂ повышают коррозионную стойкость арматурной стали в железобетонных конструкциях, а также сопротивляемость бетона указанных конструкций к коррозионному растрескиванию, что делает их пригодными для использования при строительстве сооружений, подверженных воздействию агрессивных водных сред.

Список литературы / References

1. Hans Böhni. Corrosion in reinforced concrete structures. A Volume in Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. 2005. 264 p.
2. Carnot A. Corrosion mechanisms of steel concrete moulds in the presence of a demoulding agent. *Journal of Applied Electrochemistry*. 2002. Vol. 32, pp. 865–869.
3. Trần Đ.H., Nguyễn Q.H. Đánh giá chất lượng nước vùng cửa sông và biển ven bờ để định hướng giải pháp công nghệ xử lý phù hợp cho mục đích cấp nước sinh hoạt. *Tạp chí khoa học công nghệ Xây dựng*. 2019. Vol. 10, pp. 89–98.
4. Степанов С.Н. Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций, работающих в агрессивных средах с учетом коррозионного износа рабочей арматуры: Дис. ... канд. техн. наук. Н. Новгород, 2005. 213 с.
4. Stepanov S.N. Forecasting the durability of reinforced concrete structures operating in aggressive environments, taking into account the corrosion wear of working fittings. Diss... Candidate of Sciences (Engineering). N. Novgorod. 2005. 213 p. (In Russian).
5. Li C., Chen Q., Wang R., Wu M., Jiang Z. Corrosion assessment of reinforced concrete structures exposed to chloride environments in underground tunnels: Theoretical insights and practical data interpretations. *Cement and Concrete Composites*. 2020. Vol. 112. 103652. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103652
6. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Коновалова С.В., Караваев И.В. Скорость проникновения хлорид-ионов к поверхности стальной арматуры в гидрофобизированных бетонах // *Современные наукоемкие технологии*. 2018. № 4 (56). С. 93–99.

6. Fedosov S.V., Rummyantseva V.E., Konovalova S.V., Karavaev I.V. The rate of penetration of chloride ions to the surface of steel reinforcement in hydrophobized concrete. *Sovremennyye naukoymekkiye tekhnologii*. 2018. No. 4 (56), pp. 93–99. (In Russian).
7. Amir Poursaee. Corrosion of steel in concrete structures. Elsevier Ltd. 2016. 294 p.
8. Булгаков Б.И., Танг Ван Лам. Исследование ускоренным методом коррозионной стойкости стальной арматуры в зависимости от структуры мелкозернистого бетона // *Промышленное и гражданское строительство*. 2016. № 5. С. 26–30.
8. Bulgakov B.I., Tang Van Lam. Investigation by accelerated method of corrosion resistance of steel reinforcement depending on the structure of fine-grained concrete. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2016. No. 5, pp. 26–30. (In Russian).
9. Said A.M., Zeidan M.S., Bassuoni M., Tian Y. Properties of concrete incorporating nano-silica. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 36, pp. 838–844. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.044>
10. Каюмов Р.А., Федосов С.В., Румянцева В.Е., Хрунов В.А., Манохина Ю.В., Красильников И.В. Математическое моделирование коррозионного массопереноса гетерогенной системы «жидкая агрессивная среда – цементный бетон». Частные случаи решения // *Известия КГАСУ*. 2013. № 4 (26). С. 343–348.
10. Kayumov R.A., Fedosov S.V., Rummyantseva V.E., Khrunov V.A., Manohina Yu.V., Krasilnikov I.V. Mathematical modeling of corrosion mass transfer of the heterogeneous system «corrosive liquids – cement concrete». Special cases of the solutions. *Izvestiya KGASU*. 2013. No. 4 (26), pp. 343–348. (In Russian).
11. Lei M., Peng L., Shi C., W S. Experimental study on the damage mechanism of tunnel structure suffering from sulfate attack. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2013. Vol. 36, pp. 5–13. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.01.007>
12. Синицин Д.А., Халиков Р.М., Булатов Б.Г., Галицков К.С., Недосеко И.В. Технологичные подходы направленного структурообразования нанокomпозитов строительного назначения с повышенной коррозионной устойчивостью // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. 2019. Т. 11. № 2. С. 153–164.
12. Sinitsin D.A., Khalikov R.M., Bulatov B.G., Galitskov K.S., Nedoseko I.V. Technological approaches to directed structure formation of building nanocomposites with increased corrosion resistance // *Nanotekhnologii v stroitel'stve: nauchnyy internet-zhurnal*. 2019. Vol. 11. No. 2, pp. 153–164. (In Russian).
13. Fedosov S., Bulgakov B., Ngo H.X., Aleksandrova O., Solovev V. Theoretical and experimental models to evaluate the possibility of corrosion resistant concrete for coastal offshore structures. *Materials*. 2022. Vol. 15 (13). 4697. <https://doi.org/10.3390/ma15134697/>
14. Хунг Н.С., Булгаков Б.И., Александрова О.В. Влияние минеральных добавок на прочность сцепления цементного камня бетона со стальной арматурой // *Промышленное и гражданское строительство*. 2022. № 6. С. 25–31. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.06.25-31
14. Hung N.S., Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V. Influence of mineral additives on the adhesion strength of cement stone concrete with steel reinforcement. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2022. No. 6, pp. 25–31. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.06.25-31. (In Russian).
15. Федосов С.В., Александрова О.В., Нгуен Дык Винь Куанг, Федосеев В.Н., Логинова С.А. Физико-математическое обоснование теоретических и инженерных изысканий по разработке коррозионно-стойких материалов для заглубленных сооружений прибрежных зон // *Техника и технология силикатов*. 2022. Т. 29. № 1. С. 45–54.
15. Fedosov S.V., Aleksandrova O.V., Nguyen Duc Vinh Quang, Fedoseev V.N., Loginova S.A. Physico-mathematical substantiation of theoretical and engineering surveys for the development of corrosion-resistant materials for buried structures in coastal zones. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov*. 2022. Vol. 29. No. 1, pp. 45–54. (In Russian).
16. Нгуен Дык Винь Куанг, Баженов Ю.М., Александрова О.В. Влияние кварцевого порошка и минеральных добавок на свойства высокоэффективных бетонов // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. Вып. 1. С. 102–117. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.1.102-117
16. Nguyen Duc Vinh Quang, Bazhenov Y.M., Aleksandrova O.V. Effect of quartz powder and mineral admixtures on the properties of high-performance concrete. *Vestnik MGSU*. Vol. 14. No. 1, 2019. pp. 102–117. doi:10.22227/1997–0935.2019.1.102-117
17. Petropavlovskaya V., Novichenkova T., Petropavlovskii K., Aleksandrova O.V., Fischer H.B. Application of Fuel ash as a microfiller in cement dispersion systems. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1037. pp. 729–736. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1037.729>
18. Wang L. Zheng D., Zhang S., Cui H., Li D. Effect of nano-SiO₂ on the hydration and microstructure of Portland cement. *Nanomaterials (Basel)*. 2016. Vol. 6 (12). 241. DOI: 10.3390/nano6120241
19. Feng H., Wang Z., Sheikh M.N., Zhao X., Gao D., Hadi M.N. The effect of nano-SiO₂, nano-Al₂O₃, and nano-Fe₂O₃ on the compressive strength and workability of magnesium phosphate cement-based mortar. *Advance Civil Engineering Materials*. 2019. Vol. 8, pp. 192–208. DOI: 10.1520/ACEM20190014
20. Snehal K., Das B., Akanksha M. Early age, hydration, mechanical and microstructure properties of nano-silica blended cementitious composites. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 233. 117212. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117212>

О.Е. СМІРНОВА, канд. техн. наук (smirnova.olj@yandex.ru),
А.П. ПИЧУГИН, д-р техн. наук (gmunsau@mail.ru),
В.Ф. ХРИТАНКОВ, д-р техн. наук (vl_hritankov@minwateu.net)

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

Композиционные материалы на основе органического сырья с наноразмерными добавками

Рассмотрена возможность использования органического сырья для получения композиционных материалов. Исследован вещественный состав сырья – костры льна и отхода деревообработки (опилок). Приведены результаты ИК-спектроскопического исследования органических продуктов с полимерсиликатными связующими, модифицированными наноразмерными добавками. Установлено, что модифицированное связующее вступает во взаимодействие на химическом уровне с гидроксильными группами целлюлозы и карбоксильными группами лигнина органического наполнителя. Определено влияние наноразмерных добавок на эффективность взаимодействия полимерсиликатного связующего с кострой льна и древесными опилками. При этом отличается механизм взаимодействия с карбоксильными группами лигнина и гидроксильными группами целлюлозы льняной костры и древесных опилок сосны.

Ключевые слова: костра льна, лигнин, целлюлоза, спектроскопия, полимерсиликатное связующее, наноразмерная добавка.

Выражается благодарность сотрудникам Института неорганической химии СО РАН г. Новосибирск.

Для цитирования: Смирнова О.Е., Пичугин А.П., Хританков В.Ф. Композиционные материалы на основе органического сырья с наноразмерными добавками // *Строительные материалы*. 2023. № 1–2. С. 76–81.
DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-76-81>

O.E. SMIRNOVA, Candidate of Sciences (Engineering) (smirnova.olj@yandex.ru),
A.P. PICHUGIN, Doctor of Sciences (Engineering) (gmunsau@mail.ru),
V.F. KHRITANKOV, Doctor of Sciences (Engineering) (vl_hritankov@minwateu.net)
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (113, Leningradskaya Street, Novosibirsk, 630008, Russian Federation)

Composite Materials Based on Organic Raw Materials with Nanosized Additives

The possibility of using vegetable raw materials for obtaining heat-insulating materials is considered, the material composition of organic raw materials flax processing waste and wood-working waste (sawdust) is considered. The results of an infrared spectroscopic study of raw materials with polymer-silicate binders modified with nanosized additives are presented. It has been established that the modified binder interacts at the chemical level with the hydroxyl groups of cellulose and the carboxyl groups of lignin of the organic filler. The influence of nanosized additives on the efficiency of interaction of the polymer silicate binder with flax waste and sawdust has been determined. At the same time, the mechanism of interaction with the carboxyl groups of lignin and the hydroxyl groups of the cellulose of flaxseed and pine sawdust is different.

Keywords: flax processing waste, lignin, cellulose, spectroscopy, polymer silicate binder, nanoscale additive.

Thanks are expressed to the staff of the Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk.

For citation: Smirnova O.E., Pichugin A.P., Khritankov V.F. Composite materials based on organic raw materials with nanosized additives. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 1–2, pp. 76–81. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-76-81>

Актуальность переработки растительного сырья и органических отходов определяется многими факторами. Так, известно, что ежегодно в России образуется 630–650 млн т сельскохозяйственных отходов и более 700 млн т отходов лесо- и деревообработки. Все это приводит к интенсивному засорению рек и водоемов, гниению отходов или их сжиганию, что негативно сказывается на экологической обстановке в регионах.

Научным исследованиям данного направления уделяется повышенное внимание. Решение проблемы получения строительных материалов на основе органического сырья нашло отражение в трудах российских ученых В.И. Бухаркина, Ю.П. Горлова, В.М. Курдюмовой, И.Х. Наназашвили, Б.Н. Понома-

ренко, И.А. Рыбьева, Н.И. Склизкова, В.М. Хрулева, В.Г. Хозина, С.А. Угрюмова и др. [1–6].

При этом строительные материалы на основе растительного сырья (торфоплиты, камышит и др.) не могут быть отнесены к перспективным изоляционным материалам ввиду их горючести, недостаточной водо- и биостойкости. Как правило, они используются лишь во временных зданиях и сооружениях.

Вместе с тем в последнее десятилетие произошел качественный скачок в технологии получения композиционных материалов, обусловленный применением наноразмерных добавок и развитием нанотехнологий, что открывает новые возможности для совершенствования производства строительных материалов на растительном сырье. Современное

состояние развития и использования нанотехнологий базируется в основном на получении новых материалов специального назначения. Требуется также отметить, что большинство работ по строительному материаловедению посвящены минеральным вяжущим и бетонам, что позволило получать высокопрочные эффективные бетонные и железобетонные конструкции различного назначения. Кроме того, известен ряд работ в области улучшения качества композиционных материалов на основе минерального и органического сырья.

Развитие нанотехнологий в производстве строительных материалов определяет необходимость изучения влияния процессов наномодифицирования на изменение химического состава растительных наполнителей и, как следствие, изменение эксплуатационных свойств композиционных материалов [7].

Ранее авторами было установлено, что в контактной зоне полимерного связующего и органического сырья образуются зоны кристаллизации наноразмерных компонентов. Элементарная ячейка в местах контакта растительного наполнителя и полимерной композиции содержит несколько контактных зон: отвержденное полимерное покрытие; внутренняя зона полимерного покрытия с наноразмерными добавками; зона непосредственного контакта пропитывающей композиции с наполнителем; зона диффузионного проникновения наноразмерных компонентов.

В связи с этим целью данного исследования стало изучение изменения структуры и характера взаимодействия растительного наполнителя (костра льна, опилки) и полимерсиликатного связующего, модифицированного наноразмерными добавками.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования рассматривали органический наполнитель костру льна и древесные опилки сосны, связующие и наноразмерные добавки.

Костра льна является побочным продуктом от переработки льна и одним из распространенных сельскохозяйственных отходов. Стебли льна при выделении волокна в процессах мятья и трепания разрушаются, а отпадающие одревесневшие части образуют костру [8, 9]. Размеры этих частиц колеблются от 1 до 10 мм по длине, толщина в пределах 0,3–1,5 мм.

Опилки древесные из хвойных пород (сосна), образуются в результате распила древесины, плотность 520–580 кг/м³ в зависимости от уровня влажности, коэффициент теплопроводности равен 0,061 Вт/(м²·°С). Размер опилок от 2,5 до 5 мм [10–13].

Рассматривая данные сырьевые ресурсы растительного происхождения, следует отметить целый ряд объединяющих их свойств [14, 15]: по химическому и элементному составу, по степени агрегации, по возможности использования для тех или иных

технологических переделов, по виду получаемых материалов и изделий (табл. 1, 2).

Согласно представленным химическому и элементному составам сырья растительного происхождения можно установить следующую закономерность. Целлюлоза в большем количестве содержится в костре льна (до 97%), тогда как в отходах деревообработки ее содержание не превышает 50%, а кора деревьев содержит минимальное количество целлюлозы [6, 15]. Лигнина больше всего в древесной коре, опилках и станочной стружке. Минимальное содержание лигнина отмечено в торфе и хлопчатнике – 3–5%. Важным показателем, обуславливающим использование того или иного технологического приема переработки растительного сырья, является растворимость его в горячей воде и эфире. По этим свойствам опилки значительно превосходят костру льна. Еще одним важным показателем изучаемого сырья является его зольность, т. е. наличие минеральных составляющих в растительной массе; у костры льна и опилок она варьируется от 0,1 до 2%.

В качестве связующих в работе применяли:

- жидкое стекло – R₂O·nSiO₂, удовлетворяющее требованиям ГОСТ 13078–81 «Стекло натриевое жидкое. Технические условия», силикатный модуль 3,25–3,3, плотность 1,47 г/см³, рН=13, условная вязкость 35–37 с;

- поливинилацетатную эмульсию, содержащую в своем составе до 58% смолы, плотность 1,45 г/см³, условная вязкость 90–95 с, содержание сухого остатка 49–49,5%, рН=10,9;

- бутадиен-стирольный латекс, представляющий собой продукт глубокой полимеризации дивинила и стирола (35:65 вес. ч.) в водной эмульсии, плотность 1,02 г/см³, условная вязкость 8–10 с, содержание сухого остатка 47–48%, рН=11,5.

В качестве нанодобавок применяли кремнезоли (кислые и щелочные), устойчивые коллоидные растворы наночастиц SiO₂ двуокиси аморфного кремния, как правило, в водной среде, производитель ОАО «КазХимНИИ»; плотность 1180–1220 кг/м³; концентрация 30%; массовая концентрация SiO₂ 330–340 г/л; массовая концентрация Na₂O 33–34 г/л; многослойные углеродные нанотрубки (УНТ), марки С-100 «Агсета»; плотность 50–150 кг/м³; концентрация 3–3,1%; удельная поверхность 119,33 м²/г; нанодобавку фирмы Tuball «TUBALL™ LATEX», представляющую собой суспензию графеновых нанотрубок на водной основе.

Изучение процессов, протекающих в контактной зоне при твердении связующих, модифицированных наноразмерными добавками и органических наполнителей, производилось методом инфракрасной спектроскопии. Вещественный состав компонентов изучался на ИК-спектрометре «Scimitar FTS 2000». Для исследования ИК-спектров костры льна готовились твердые образцы методом прессования таблеток с KBr. Костра льна предварительно высушивалась

Таблица 1
Table 1

Элементный состав растительного сырья
Elemental composition of plant raw materials

Материал	Состав золы, %					Элементный состав, %			
	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SO ₃	C	H	N	O
Древесная кора	0,2–0,8	0,9–1,4	0,1–0,2	0,7–0,9	–	23,7–42,1	6,4–7,1	0,2–0,4	45,4–47,8
Солома	1,3–4,4	4,1–18,5	0,1–0,2	2,1–8,7	0,04–0,33	27,8–35,7	6,5–8,2	0,5–1,4	29,4–43,1
Опилки хвойных пород	0,1–0,3	30,2–35,6	0,1–0,2	2,5–8,6	–	50–52,1	5,8–6,7	3,2–4,7	23,3–29,6
Древесная мука	0,1–0,3	18,4–31,8	0,1–0,2	1,9–7,5	–	46,2–50,9	4,7–7,2	2,9–4,4	22,8–31,4
Костра	0,1–0,2	0,2–0,5	0,2–0,4	0,3–0,6	0,7–1,4	41,2–50,1	2,8–6,6	3–5,2	33,2–38,6

Таблица 2
Table 2

Химический состав сырья растительного происхождения
The chemical composition of raw materials of plant origin

Материал	Целлюлоза	Лигнин	Гемицеллюлоза		Вещества, растворимые в горячей воде	Вещества, растворимые в эфире	Зольность
			Гексозаны	Пентозаны			
Древесная кора	12–19	12–38	6–17	5–13	15–48	14–39	1,5–5,3
Солома	23–41	24–29	–	20–26	18–23	12–39	4,1–6,2
Опилки хвойных пород	25–46	19–38	3–16	7–25	20–27	40–61	0,1–0,8
Древесная мука	42–51	20–38	7–16	5–33	4–12	32–57	0,2–1,7
Костра	55–97	15–23	15–19	21–26	12–19	4–8	0,5–2

Таблица 3
Table 3

Составы композиционного материала на основе органического сырья
Compositions of a composite material based on organic raw materials

Состав	Костра	Опилки	Жидкое стекло	ПВА	Латекс	Кремнезоль кислый	Кремнезоль щелочной	Tuball	УНТ
	мас. %								
1	100	–	–	–	–	–	–	–	–
2	35–40	35–40	17–20	6–10	–	0,5–1	–	–	–
3	35–40	35–40	17–20	6–10	–	–	0,5–1	–	–
4	35–40	35–40	17–20	6–10	–	–	–	0,5–1	–
5	35–40	35–40	17–20	6–10	–	–	–	0,5–1	–
6	35–40	35–40	17–20	–	6–10	0,5–1	–	–	–
7	35–40	35–40	17–20	–	6–10	–	0,5–1	–	–
8	35–40	35–40	17–20	–	6–10	–	–	0,5–1	–
9	35–40	35–40	17–20	–	6–10	–	–	–	0,5–1
10	–	100	–	–	–	–	–	–	–

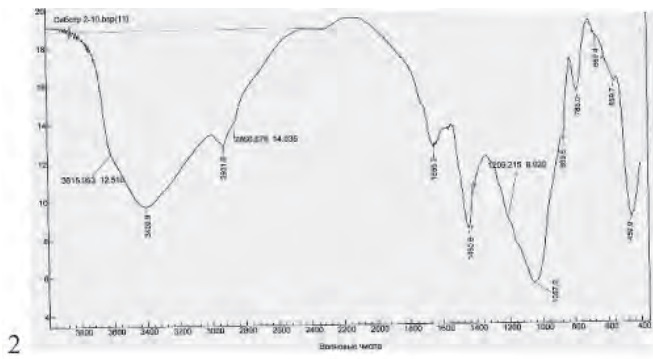
при температуре 500°С и растиралась в агатовой ступке. Количество исходного вещества 1 мг на 6 КВт. Далее приготавливалась таблетка и записывался спектр вещества. В качестве объектов исследования использовали составы, приведенные в табл. 3.

Результаты и обсуждение

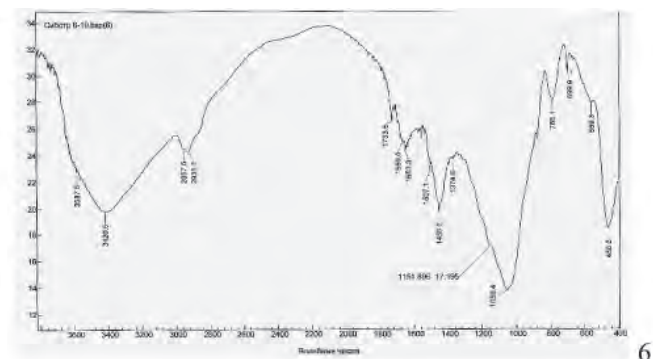
Проводился анализ смещения максимумов полос поглощения и изменение их интенсивности относи-

тельно соседних пиков в зависимости от вида связующего и нанодобавок (см. рисунок).

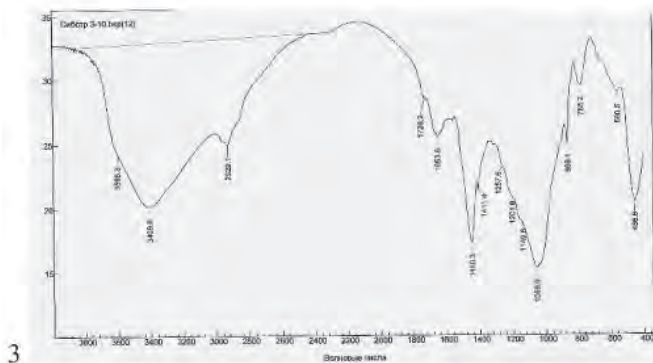
Полученные спектры с добавлением жидкого стекла содержат интенсивные полосы при 1038 и 1055 см⁻¹ соответствующие валентным колебаниям Si–O-группы. Полосы поглощения при 794; 782 и 453 см⁻¹ относятся к Si–O-группе. В результате взаимодействия с растительным наполнителем уменьшилась интенсивность полосы 1650 см⁻¹ и появил-



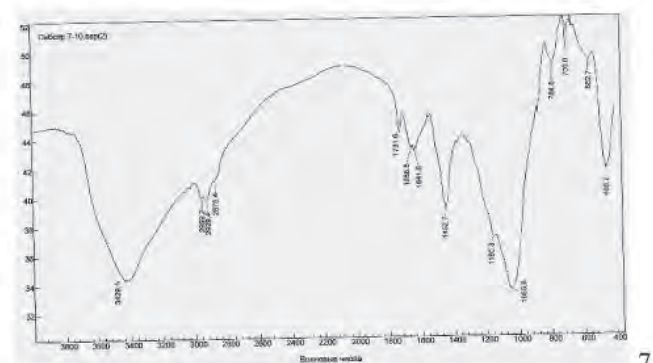
2



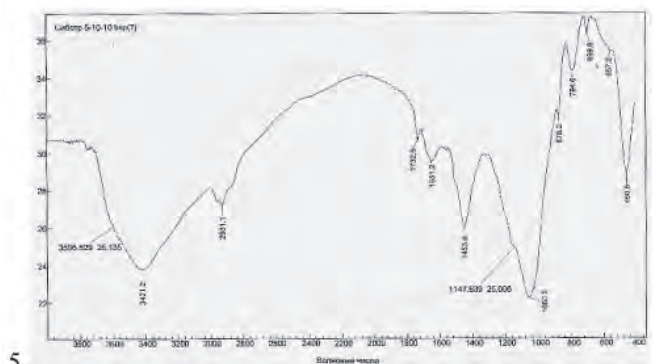
6



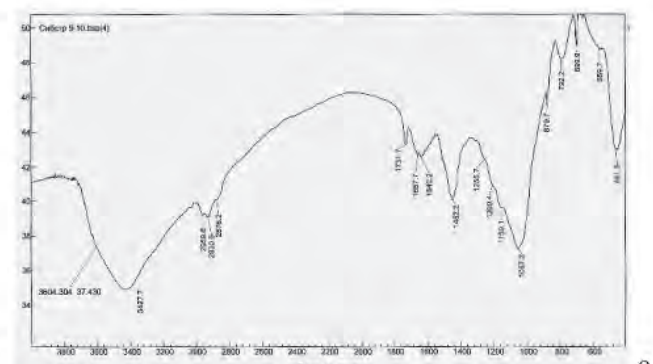
3



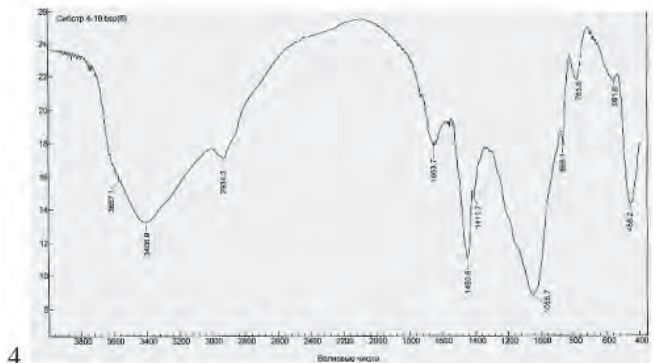
7



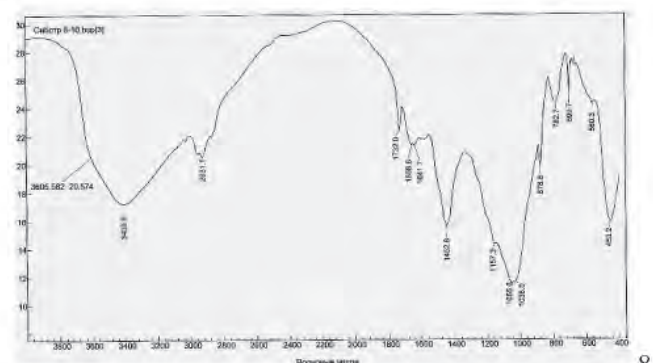
5



9



4



8

ИК-спектры композиционного материала на основе растительного сырья и органоминерального связующего, модифицированного нанодобавками (номера спектров соответствуют номерам составов в табл. 3)
 IR spectra of a composite material based on plant raw materials and an organomineral binder modified with nanoadditives (the numbers of the spectra correspond to the numbers of the compositions in Table 3)

ся ряд полос в интервале 1658–1565 см⁻¹, данные полосы относятся к колебаниям ароматического кольца лигнина. Это может свидетельствовать о том, что при модифицировании нанодобавками не происходит разрушения ароматических колец лигнина и наблюдаемое смещение указывает на образование более прочных связей в композиционном материале.

При добавлении органоминерального связующего на основе жидкого стекла и бутадиев-стирольного латекса, которому соответствуют полосы поглощения при 1452; 1450; 878; 778 и 699 см⁻¹, валентные колебания карбоксильных и карбонильных групп лигнина и гемицеллюлозы при 1732–1735 см⁻¹ значительно усиливаются по сравнению со спектрами на основе ПВА. Уменьшение интенсивности данной полосы на спектрах композиционного материала по сравнению со спектрами костры льна и опилок указывает на химическое взаимодействие молекул органоминерального связующего, модифицированного нанодобавками, с С=О-группами лигнина и гемицеллюлозы.

Широкой и сильной является полоса поглощения в области 3600–3400 см⁻¹ которая связана с валентными колебаниями различного типа гидроксильных групп. При введении нанодобавок происходит смещение максимумов в высокочастотную область, это указывает на образование более проч-

ных водородных связей, что, вероятно, связано с взаимодействием молекул модифицирующих нанодобавок с ОН-группами аморфных областей компонентов опилок и костры льна и увеличением упорядоченности модифицированных продуктов за счет возникновения водородных связей.

Стоит отметить, что интенсивность полос и смещение максимумов в высокочастотную область более выражено при органоминеральном связующем на основе жидкого стекла и латекса и добавок УНТ и Tuball; при связующем на основе ПВА лучший эффект показали кислый и щелочной кремнезоли.

Выводы

Установлено, что модифицированное связующее вступает во взаимодействие на химическом уровне с гидроксильными группами целлюлозы и карбоксильными группами лигнина органического заполнителя; взаимодействие усиливается прямо пропорционально в зависимости от содержания лигнина и целлюлозы в исходных растительных компонентах.

Определено влияние наноразмерных добавок на эффективность взаимодействия полимерсиликатного связующего с кострой льна и древесными опилками. При этом отличается механизм взаимодействия с карбоксильными группами лигнина и гидроксильными группами целлюлозы льняной костры и древесных опилок сосны.

Список литературы

1. Яковлев Г.И., Гинчицкая Ю.Н., Бурьянов А.Ф. Костромит на основе цементно-силикатного вяжущего. *Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании: Сборник материалов международной научной конференции*. М., 2017. С. 655–656.
2. Smirnova O., Pichugin A., Sebelev I. Research of pressed thermal insulation materials, based on organic waste. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. XIII International Scientific Conference Architecture and Construction 2020*. Bristol. 2020. С. 012051.
3. Батова М.Д., Семенова Ю.А., Гордина А.Ф., Яковлев Г.И., Эльрефаи А.Э.М.М., Саидова З.С., Хазеев Д.Р. Модификация материалов на основе сульфата кальция комплексными минеральными добавками // *Строительные материалы*. 2021. № 1–2. С. 13–21. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-788-1-2-13-21>
4. Пичугин А.П., Хританков В.Ф. и др. Прочность гранул крупного пористого заполнителя из растительного сырья в легком бетоне // *Известия вузов. Строительство*. 2020. № 11. С. 28–41.
5. Lesovik V., Tolstoy A., Fediuk R., Amran M., Azevedo A., Ali M., Ali Mosaberpanah M., Asaad M.A. Four-component high-strength

References

1. Yakovlev G.I., Ginchitskaya Yu.N., Buryanov A.F. Kostromit based on cement-silicate binder. *Integration, partnership and innovation in building science and education: collection of materials of the international scientific conference*. Moscow. 2017, pp. 655–656. (In Russian).
2. Smirnova O., Pichugin A., Sebelev I. Research of pressed thermal insulation materials, based on organic waste. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. XIII International Scientific Conference Architecture and Construction 2020*. Bristol. 2020. P. 012051.
3. Batova M.D., Semenova Yu.A., Gordina A.F., Yakovlev G.I., Elrefai A.E.M.M., Saidova Z.S., Khazeev D.R. Complex mineral additives for the modification of calcium sulphate based materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 1–2, pp. 13–21. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-788-1-2-13-21>
4. Pichugin A.P., Khritankov V.F. Strength of granules of large porous filler from vegetable raw materials in lightweight concrete. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2020. No. 11, pp. 28–41. (In Russian).
5. Lesovik V., Tolstoy A., Fediuk R., Amran M., Azevedo A., Ali M., Ali Mosaberpanah M., Asaad M.A. Four-component high-strength polymin-

- polymneral binders. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 316. 125934. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125934>
6. Патент РФ 2775585. Наномодифицирующий высокопрочный легкий бетон на композиционном вяжущем / Гришина А.Н., Иноземцев А.С., Королев Е.В. Заявл. 10.12.2021. Оpubл. 05.07.2022. Бюл. № 2.
 7. Матвеева Л.Ю., Мокрова М.В., Хирхасова В.И., Баранец И.В. Исследование методом оптической микроскопии высокого разрешения структуры и морфологии наноцеллюлозы – микродобавки строительных композитов // *Вестник гражданских инженеров*. 2021. № 1 (84). С. 109–116.
 8. Proshin A.P., Volkova E.A., Beregovoi A.M., Soldatov S.N. New thermal insulated materials. *Problems and protects in ecological engineering Program, report and information at International scientific and technical conference*. 25 May 2001. Tenerife, Spain, pp. 108–110.
 9. Смирнова О.Е. и др. Эффективные технологии при использовании растительного сырья в строительстве: монография. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2020. 224 с.
 10. Абдрахманова Л.А., Галеев Р.Р., Хантимиров А.Г., Хозин В.Г. Эффективность углеродных наноструктур в составе древесно-полимерных композитов на основе поливинилхлорида // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. 2021. Т. 13. № 3. С. 150–157.
 11. Ибрагимов Р.А., Потапова Л.И., Королев Е.В. Исследование структурообразования активированного наномодифицированного цементного камня методом ИК-спектроскопии // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2021. № 3 (57). С. 41–49.
 12. Патент РФ 2701911. Способ получения гидрозоля монодисперсного нанокремнезема для изготовления бетона / Баскаков П.С., Строкова В.В., Кузьмин Е.О. Заявл. 20.03.2019. Оpubл. 02.10.2019. Бюл. № 7.
 13. Пичугин А.П., Хританков В.Ф., Смирнова О.Е., Пименов Е.Г., Никитенко К.А. Защитно-отделочные составы и композиции для ремонтных работ и обеспечения долговечности зданий // *Известия вузов. Строительство*. 2019. № 9. С. 109–120.
 14. Пичугин А.П., Хританков В.Ф., Смирнова О.Е., Пименов Е.Г. Трещинообразование в крупнопористом бетоне с интегральным расположением крупного заполнителя // *Эксперт: теория и практика*. 2020. № 4 (7). С. 47–51.
 15. Наназашвили И.Х., Минас А.И., Склизков Н.И. Влияние специфических свойств древесного заполнителя на структурную прочность арболита // *Труды ЦНИИЭПсельстроя*. 1975. № 12. С. 98–105.
 6. Patent RF 2775585. Nano-modifying high-strength lightweight concrete based on composite binder / Grishina A.N., Inozemtsev A.S., Korolev E.V. Appl. 12.10.2021. Published 07.05.2022. Bull. No. 2. (In Russian).
 7. Matveeva L.Yu., Mokrova M.V., Khirkhasova V.I., Baranets I.V. A study by high-resolution optical microscopy of the structure and morphology of nanocellulose – microadditives of building composites. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2021. No. 1 (84), pp. 109–116. (In Russian).
 8. Proshin A.P., Volkova E.A., Beregovoi A.M., Soldatov S.N. New thermal insulated materials. *Problems and protects in ecological engineering Program, report and information at International scientific and technical conference*. 25 May 2001. Tenerife, Spain, pp. 108–110.
 9. Smirnova O.E. Effektivnyye tekhnologii pri ispol'zovanie vegetative'noi rychnoi v stroitel'stve: monografiya [Effective technologies when using vegetable raw materials in construction: a monograph]. Novosibirsk: NGASU (Sibstrin). 2020. 224 p.
 10. Abdrakhmanova L.A., Galeev R.R., Khantimirov A.G., Khozin V.G. Efficiency of carbon nanostructures in the composition of wood-polymer composites based on polyvinyl chloride. *Nanotekhnologii v stroitel'stve: nauchnyy internet-zhurnal*. 2021. Vol. 13. No. 3, pp. 150–157. (In Russian).
 11. Ibragimov R.A., Potapova L.I., Korolev E.V. Study of the structure formation of activated nanomodified cement stone by IR spectroscopy. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2021. No. 3 (57), pp. 41–49. (In Russian).
 12. Patent RF 2701911. Method for obtaining a hydrosol of monodisperse nanosilica for the manufacture of concrete / Baskakov P.S., Strokov V.V., Kuzmin E.O. Appl. 03.20.2019. Published 02.10.2019. Bull. No. 7. (In Russian).
 13. Pichugin A.P., Khritankov V.F., Smirnova O.E., Pimenov E.G., Nikitenko K.A. Protective and finishing compositions and compositions for repair work and ensuring the durability of buildings. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2019. No. 9, pp. 109–120. (In Russian).
 14. Pichugin A.P., Khritankov V.F., Smirnova O.E., Pimenov E.G. Cracking in large-porous concrete with an integral arrangement of large aggregate. *Ekspert: teoriya i praktika*. 2020. No. 4 (7), pp. 47–51. (In Russian).
 15. Nanazashvili I.Kh., Minas A.I., Sklizkov N.I. Influence of specific properties of wood filler on the structural strength of wood concrete. *Trudy of TsNIIPEselstroy*. 1975. No. 12, pp. 98–105. (In Russian).

Д.А. АЮПОВ, канд. техн. наук (ayupov_damir@rambler.ru),

Р.И. КАЗАКУЛОВ, аспирант (Rauf-kazakulov@mail.ru)

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

Наномодифицированные полимерно-битумные вяжущие

Осуществлена модификация нефтяного дорожного битума путем девулканизации в нем резиновой крошки и введения в него дисперсии однослойных углеродных нанотрубок (ОУНТ) в индустриальном масле (И-20А), распределенных при помощи ультразвукового воздействия. Дисперсия вводилась как до, так и после девулканизации. Оптимальное время диспергирования определялось на основании данных лазерного анализатора частиц, а также по оптической плотности и коэффициенту пропускания дисперсии и составило 10 мин. Обнаружено, что введение нанотрубок пластифицирует вяжущее, это видно по показателям температуры размягчения и растяжимости с одновременным увеличением эластичности, что нетипично. Также при введении ОУНТ наблюдается увеличение твердости вяжущих и снижение индекса пенетрации, характеризующего степень коллоидности композиции, т. е. влияние дисперсной фазы на ее свойства.

Ключевые слова: модификация битума, битумно-резиновое вяжущее, полимерно-битумное вяжущее, наномодифицированные ПБВ.

Для цитирования: Аюпов Д.А., Казакулов Р.И. Наномодифицированные полимерно-битумные вяжущие // *Строительные материалы*. 2023. № 1–2. С. 82–86. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-82-86>

D.A. AYUPOV, Candidate of Sciences (Engineering) (ayupov_damir@rambler.ru),

R.I. KAZAKULOV, Engi(Graduate student)

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

Nanomodified Polymer-Bitumen Binders

A modification of petroleum bitumen for road building was carried out by devulcanizing rubber crumb and adding modified dispersion, consisting of single-walled carbon nanotubes (SWCNT), distributed in industrial oil (I-20A). It was found that the particle size after sonication became significantly smaller. In this case, the optimal dispersion time was 10 minutes, because further ultrasonic exposure was not accompanied by a change in particle size, according to the HoribaLA-95 laser analyzer. It has been experimentally determined that the optimal wavelength for measuring optical density and transmittance is $\lambda=430$ nm. It was found that the introduction of nanotubes plasticizes the binder. In this case, the introduction of SWCNTs increases its hardness. It was also noted that the effect of the dispersed phase on the properties decreases with the introduction of nanotubes.

Keywords: bitumen modification, bitumen-rubberbinder, polymer-bitumen binder, nanomodified PBB.

For citation: Ayupov D.A., Kazakulov R.I. Nanomodified polymer-bitumen binders. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 1–2, pp. 82–86. (In Russian).

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-82-86>

Модификация применяется для улучшения свойств всех видов строительных материалов [1–3]. Модификация нефтяных битумов полимерами позволяет, как известно [4–6], устранить ряд недостатков. Наиболее важные из них – узкий температурный интервал пластичности [7, 8], низкая эластичность [9, 10] и недостаточная стойкость к атмосферному старению [11–13]. Однако высокая стоимость полимера ведет к сильному удорожанию конечного продукта.

Ранее [14] была разработана битумполимерная композиция, получаемая девулканизацией резиновой крошки в среде битума, обладающая высоким комплексом свойств и способная решить проблемы дороговизны битумполимерных вяжущих (БПВ) и загрязнения окружающей среды. Технология модификации была следующей: в разогретый нефтяной битум при постоянном перемешивании вводили резиновую крошку и девулканизирующий агент (ДА). Композиция, однако, обладала низкой растяжимостью. Указанные недостатки являются общими для всех БПВ [15, 16], что тем не менее ограничивает их применение. Эти недостатки можно устранить путем введения пластификаторов, однако их применение

приводит к снижению температуры размягчения и увеличению склонности к старению за счет термодистилляции [17–19]. При этом известен парадоксальный эффект снижения вязкости вяжущих (и связующих) при введении углеродных наноматериалов, например, в битумы [20].

Для равномерного распределения нанотрубок в битумполимерном вяжущем также необходимо использовать пластификатор, однако итоговое количество его в вяжущем при этом значительно меньше. Авторами в качестве пластификатора было использовано индустриальное масло марки И-20А.

Из литературных источников [13, 14, 18, 21] известно, что при добавлении в битум однослойных углеродных нанотрубок (ОУНТ) комплекс получаемых свойств выше, чем при модификации его многослойными (МУНТ). Для ОУНТ характерны такие факторы, как высокая прочность sp²-связей С–С, большая плотность упаковки атомов в графенах, отсутствие или малая плотность дефектов структуры. В работе были использованы ОУНТ «Tubal», г. Новосибирск. Характеристики применяемых ОУНТ представлены в таблице.

Характеристики TUBALLTM (Номер партии 73-21052015)
Characteristics of TUBALLTM (Batch number 73-21052015)

Параметры	Ед. изм.	Значения	Метод оценки
Содержание углерода	мас. %	92 ± 1	ТГА, ЭДА
Содержание УНТ	мас. %	76 ± 1	ПЭМ, ТГА
Металлические примеси	мас. %	8 ± 1	ЭДА, ТГА
Количество стенок в УНТ	ед.	1–2	ПЭМ
Длина	мкм	>5	АСМ
Внешний средний диаметр УНТ	нм	1,4 ± 0,15	КР-спектроскопия, ПЭМ
Коэффициент G/D	ед.	161	КР-спектроскопия, 488 нм
Полная удельная поверхность	м ² /г	450	Адсорбция N ₂ при 77К

Первоначально УНТ вводились в индустриальное масло, а затем полученной дисперсией осуществляли модификацию вяжущего. Эта дисперсия, а также модельная система в виде чистого масла И-20А без ОУНТ вводились двумя способами: либо одновременно с резиновой крошкой (РК), либо после процесса девулканизации в готовое битумполимерное вяжущее. Оптимальной концентрацией нанотрубок в битуме считали, согласно [14], 5×10^{-5} м.ч. При этом содержание пластификатора рассчитывалось таким образом, чтобы оптимальная концентрация нанотрубок в битуме достигалась при концентрации пластификатора 2%, что соответствует его обычному содержанию. Максимальная концентрация пластификатора первоначально ограничивалась четырьмя процентами.

Для решения задачи распределения нанотрубок в индустриальном масле И-20А необходимо разбить их агрегаты с помощью ультразвука. Распределение ОУНТ определялось с помощью лазерного анализатора Horiba LA-950, а также фотоэлектрического фотометра КФК-3.

Для наглядности определялось распределение частиц дисперсии по размерам до (рис. 1, а) и после (рис. 1, б) обработки ультразвуком.

При диспергировании гистограмма смещается влево, что вид-

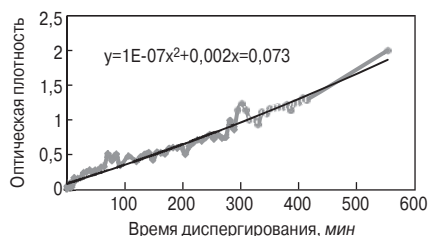


Рис. 2. График зависимости оптической плотности от времени диспергирования
Fig. 2. A graph of optical density versus dispersion time

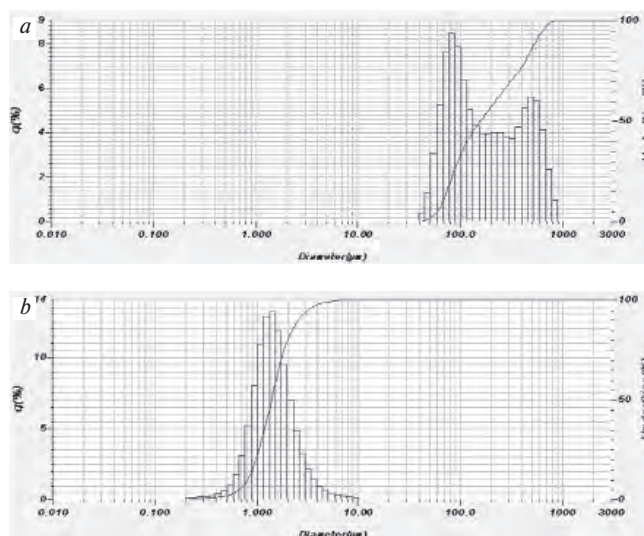


Рис. 1. Размер частиц: а – до обработки ультразвуком; б – после 10 мин обработки ультразвуком
Fig. 1. Particle size: a – before sonication; b – after 10 minutes of sonication

но при сравнении данных рис. 1, т. е. размер частиц после обработки ультразвуком стал значительно меньше. Оптимальное время диспергирования *t* составило 10 мин, так как дальнейшее ультразвуковое воздействие не сопровождается изменением гистограммы. При этом абсолютный размер частиц, согласно лазерному анализатору, не достигает уровня нано, однако необходимо помнить, что прибор предназначен для определения размеров частиц сферической формы. Необходимо также отметить, что гауссово распределение на рис. 1, б говорит о наличии одного доминирующего размера в исходном продукте ОУНТ, т. е. о его чистоте.

Фотометр фотоэлектрический КФК-3 предназначен для измерения коэффициентов пропускания и оптической плотности прозрачных растворов и прозрачных твердых образцов.



Рис. 3. Зависимость температуры размягчения вяжущего от концентрации дисперсии: 1 – Tr-°C(И-20А) после девулканизации; 2 – Tr-°C(И-20А+ОУНТ) после девулканизации; 3 – Tr-°C(И-20А) до девулканизации; 4 – Tr-°C(И-20А+ОУНТ) до девулканизации

Fig. 3. Dependence of the softening point of the binder on the concentration of the dispersion: 1 – Tr-°C(I-20A) after devulcanization; 2 – Tr-°C(I-20A + SWCNT) after devulcanization; 3 – Tr-°C(I-20A) before devulcanization; 4 – Tr-°C(I-20A+SWCNT) before devulcanization

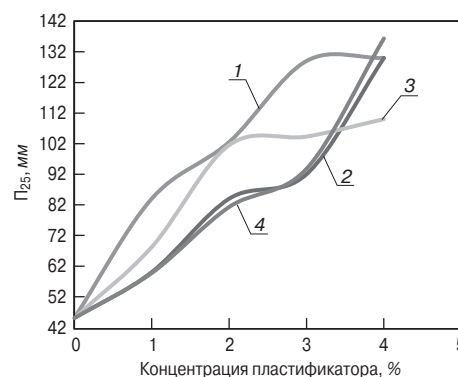


Рис. 4. Зависимость пенетрации вяжущего от концентрации модифицирующей дисперсии: 1 – P25-°C(И-20А) после девулканизации; 2 – P25-°C(И-20А+ОУНТ) после девулканизации; 3 – P25-°C(И-20А) до девулканизации; 4 – P25-°C(И-20А+ОУНТ) до девулканизации

Fig. 4. Dependence of the binder penetration on the concentration of the modifying dispersion: 1 – P25-°C(I-20A) after devulcanization; 2 – P25-°C(I-20A + SWCNT) after devulcanization; 3 – P25-°C(I-20A) before devulcanization; 4 – P25-°C(I-20A+SWCNT) before devulcanization

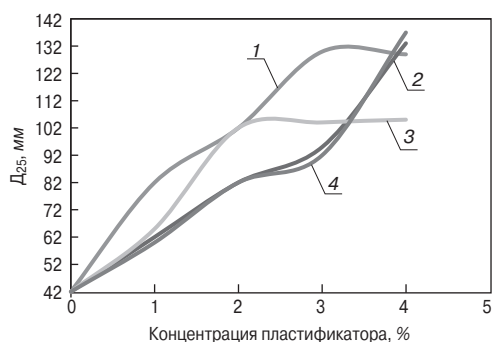


Рис. 5. Зависимость дуктильности вяжущего от концентрации модифицирующей дисперсии: 1 – D25-°C(I-20A) после девулканизации; 2 – D25-°C(I-20A+OУНТ) после девулканизации; 3 – D25-°C(I-20A) до девулканизации; 4 – D25-°C(I-20A+OУНТ) до девулканизации

Fig. 5. Dependence of the ductility of the binder on the concentration of the modifying dispersion: 1 – D25-°C(I-20A) after devulcanization; 2 – D25-°C(I-20A + SWCNT) after devulcanization; 3 – D25-°C(I-20A) before devulcanization; 4 – D25-°C(I-20A+SWCNT) before devulcanization

Принцип действия фотометра основан на сравнении светового потока Φ_0 , прошедшего через стандартный раствор, по отношению к которому проводится измерение, и светового потока Φ , прошедшего через исследуемый раствор. Световые потоки Φ_0 и Φ фотоприемником преобразуются в электрические сигналы U_0 , U и UT (UT -сигнал при неосвещенном приемнике), которые обрабатываются микро-ЭВМ фотометра и представляются на цифровом табло в виде коэффициента пропускания T и оптической плотности D .

Экспериментально было определено, что для измерения оптической плотности и коэффициента пропускания оптимальной является длина волны $\lambda=430$ нм. Диспергирование производилось в ультразвуковой ванне, оптическая плотность замерялась каждые 30 с. Увеличение оптической плотности с ростом времени ультразвуковой обработки показано на рис. 2. Коэффициент пропускания интенсивно убывает с ростом оптической плотности и зависит от нее, как известно, следующим образом: $T=10^{-D}$. При оптической плотности, равной двум, коэффициент пропускания становится настолько малым (0,01), что перестает регистрироваться фотометром.

Таким образом, по результатам данных, полученных с помощью NoGiba LA-950 и спектрофотометра КФК-3, оптимальным, необходимым для распределения нанотрубок в масле временем диспергирования было принято $t=10$ мин.

На рис. 3 представлена зависимость температуры размягчения вяжущего от концентрации модифицирующей дисперсии.

Как видно из сравнения кривых 3 и 4, введение нанотрубок пластифицирует вяжущее, вероятно, за счет снижения термодистилляции масла во время девулканизации. Сравнение кривых 1 и 2 показывает, что наличие нанотрубок в дисперсии при введении ее после девулканизации не дает эффекта.

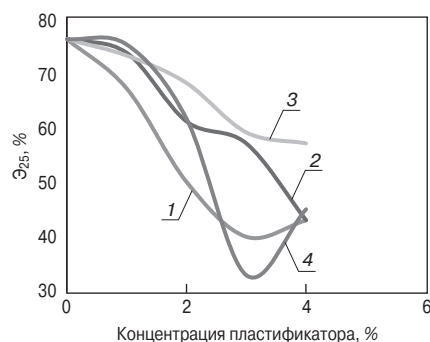


Рис. 6. Зависимость эластичности вяжущего от концентрации модифицирующей дисперсии: 1 – E25-°C(I-20A) после девулканизации; 2 – E25-°C(I-20A+OУНТ) после девулканизации; 3 – E25-°C(I-20A) до девулканизации; 4 – E25-°C(I-20A+OУНТ) до девулканизации

Fig. 6. Dependence of the elasticity of the binder on the concentration of the modifying dispersion: 1 – E25-°C(I-20A) after devulcanization; 2 – E25-°C(I-20A + SWCNT) after devulcanization; 3 – E25-°C(I-20A) before devulcanization; 4 – E25-°C(I-20A+SWCNT) before devulcanization

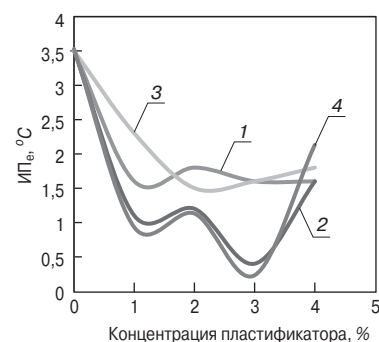


Рис. 7. Зависимость индекса пенетрации битума от концентрации ОУНТ: 1 – ИПе(I-20A) после девулканизации; 2 – ИПе(I-20A+OУНТ) после девулканизации; 3 – ИПе(I-20A) до девулканизации; 4 – ИПе(I-20A+OУНТ) до девулканизации

Fig. 7. Dependence of the bitumen penetration index on the SWCNT concentration: 1 – IPe (I-20A) after devulcanization; 2 – IPe (I-20A + SWCNT) after devulcanization; 3 – IPe (I-20A) before devulcanization; 4 – IPe (I-20A+SWCNT) before devulcanization

Кривая 3 лежит выше кривой 1, это говорит об улету-чивании масла при девулканизации, однако кривые 2 и 4 находятся близко друг к другу, что вновь говорит о том, что в присутствии нанотрубок масло либо не термодистиллирует в процессе девулканизации, либо термодистилляция компенсируется пластифицирующим эффектом трубок. Этот эффект подтверждается данными пенетрации (рис. 4). При этом введение ОУНТ вне зависимости от способа приготовления вяжущего увеличивает его твердость, что видно из сравнения кривых 1 и 2, а также кривых 3 и 4 на рис. 4.

На рис. 5 показана зависимость дуктильности вяжущего от концентрации модифицирующей дисперсии. Обращает на себя внимание экстремум при 3% дисперсии. Очевидно, что трубки существенно увеличивают растяжимость вяжущего. При этом известно, что чем больше битум отклоняется от ньютоновского течения, тем меньше его растяжимость. Таким образом, углеродные нанотрубки не структурируют вяжущее, а напротив, приближают характер его течения к ньютоновскому.

Необходимо отметить, что нанотрубки, введенные в готовую композицию, увеличивают одновременно и дуктильность, и эластичность (кривые 1 и 2 рис. 5, 6), что наблюдается редко. Этот эффект не проявляется после термической обработки вяжущего в процессе девулканизации, и низкая эластичность композиций с ОУНТ (кривые 3 и 4 на рис. 6) связана с повышением пластичности БПВ, отраженным в результатах дуктильности.

Кривые 2 и 4, характеризующие вяжущие с нанотрубками, лежат ниже кривых 1 и 3 (рис. 7), т. е. при введении нанотрубок степень коллоидности вяжущего, т. е. влияние дисперсной фазы на свойства, снижается.

Необходимо отметить, что все разработанные вяжущие обладают недостатками, характерными для

пластифицированных битумов. Однако введение углеродных нанотрубок через пластификатор позволяет равномерно их распределить в объеме вяжущего, а приведенные результаты позволяют увидеть их влияние на свойства композиции.

Выводы

1. Введение нанотрубок до девулканизации пластифицирует вяжущее за счет снижения термоди-

Список литературы

1. Хантимиров А.Г., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К., Хозин В.Г. Древесно-полимерные композиты на основе поливинилхлорида, усиленные базальтовой фиброй // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2022. № 3 (61). С. 75–81. DOI: 10.52409/20731523_2022_3_75
2. Хузиахметова К.Р., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К., Потапова Л.И. Структура смесей полимеров на основе поливинилхлорида // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2022. № 3 (61). С. 82–89. DOI: 10.52409/20731523_2022_3_82
3. Авксентьев В.И., Красиникова Н.М., Степанов С.В., Макаров Д.Б. Свойства и фазовый состав гидратированного цементного камня, модифицированного шламом химической водоочистки теплоэлектроцентралей // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2020. № 2 (52). С. 24–33.
4. Вольфсон С.И., Хакимуллин Ю.Н., Закирова Л.Ю., Хусаинов А.Д., Вольфсон И.С., Макаров Д.Б., Хозин В.Г. Модификация битумов, как способ повышения их эксплуатационных свойств // *Вестник технологического университета*. 2016. Т. 19. № 17. С. 29–33.
5. Киселев В.П., Шевченко В.А., Васильевская Г.В., Иванова Л.А., Ворончихин В.Д. Устойчивость к старению нефтяного дорожного битума, модифицированного малокарбокислированными полибутадиенами // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2015. № 3 (675). С. 78–84.
6. Мардиросова И.В., Черных Д.С. Исследование влияния резино-полимерного модификатора на структурные свойства дорожного битума в процессе старения. *Строительство и архитектура – 2015: Материалы международной научно-практической конференции*. Ростов н/Д, 2015. С. 175–177.
7. Xiaohu L. Chemical and rheological evaluation of ageing properties of SBS polymer modified bitumens. *Fuel*. 1998. Vol. 77. No. 9–10, pp. 961–972. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(97\)00283-4](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(97)00283-4)
8. Isacsson U. Characterization of bitumens modified with SEBS, EVA and EBA polymers. *Journal of Materials Science*. 1999. Vol. 34. No. 15, pp. 3737–3745. <https://doi.org/10.1023/A:1004636329521>
9. Lu X. Modification of road bitumens with thermoplastic polymers // *Polymer Testing*. 2000.

стиляции масла во время девулканизации либо за счет пластифицирующего эффекта нанотрубок.

2. Наличие нанотрубок в дисперсии при введении ее после девулканизации не дает пластифицирующего эффекта, однако увеличивает одновременно и ductility, и эластичность, что наблюдается редко.

3. При введении нанотрубок влияние дисперсной фазы на свойства снижается.

References

1. Khantimirov A.G., Abdrakhmanova L.A., Nizamov R.K., Khozin V.G. Wood-polymer composites based on polyvinyl chloride, reinforced with basalt fiber. *Izvestiya of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2022. No. 3 (61), pp. 75–81. DOI: 10.52409/20731523_2022_3_75 (In Russian).
2. Khuziakhmetova K.R., Abdrakhmanova L.A., Nizamov R.K., Potapova L.I. The structure of mixtures of polymers based on polyvinyl chloride. *Izvestiya of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2022. No. 3 (61), pp. 82–89. DOI: 10.52409/20731523_2022_3_82 (In Russian).
3. Avksentiev V.I., Krasinikova N.M., Stepanov S.V., Makarov D.B. Properties and phase composition of hydrated cement stone modified with sludge of chemical water treatment of thermal power plants. *Izvestiya of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2020. No. 2 (52), pp. 24–33. (In Russian).
4. Volfson S.I., Khakimullin Yu.N., Zakirova L.Yu., Khusainov A.D., Volfson I.S., Makarov D.B., Khozin V.G. Modification of bitumens as a way to improve their operational properties. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2016. Vol. 19. No. 17, pp. 29–33. (In Russian).
5. Kiselev V.P., Shevchenko V.A., Vasilovskaya G.V., Ivanova L.A., Voronchikhin V.D. Aging resistance of petroleum road bitumen modified with low-carboxylated polybutadienes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*. 2015. No. 3 (675), pp. 78–84. (In Russian).
6. Mardirosova I.V., Chernykh D.S. Study of the influence of rubber-polymer modifier on the structural properties of road bitumen during aging. *Construction and architecture – 2015: Materials of the international scientific and practical conference*. Rostov-on-Don. 2015, pp. 175–177. (In Russian).
7. Xiaohu L. Chemical and rheological evaluation of ageing properties of SBS polymer modified bitumens. *Fuel*. 1998. Vol. 77. No. 9–10, pp. 961–972. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(97\)00283-4](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(97)00283-4)
8. Isacsson U. Characterization of bitumens modified with SEBS, EVA and EBA polymers. *Journal of Materials Science*. 1999. Vol. 34. No. 15, pp. 3737–3745. <https://doi.org/10.1023/A:1004636329521>
9. Lu X. Modification of road bitumens with thermoplastic polymers. *Polymer Testing*. 2000. Vol. 20. No. 1, pp. 77–86. [https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(00\)00004-0](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(00)00004-0)

- Vol. 20. No. 1, pp. 77–86. [https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(00\)00004-0](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(00)00004-0)
10. Dubina S.I. et al. Composite Rubber-Polymer Binder in the Design and Construction of Amur Bridge. In: Sinitsyn, A. (eds) Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives. SES 2020. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 141. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67654-4_14
 11. Аюпов Д.А., Мурафа А.В., Макаров Д.Б., Хакимуллин Ю.Н., Хозин В.Г. Наномодифицированные битумные вяжущие для асфальтобетона // *Строительные материалы*. 2010. № 10. С. 34–35.
 12. Илиополов С.К. Современные пути повышения долговечности асфальтобетонных покрытий // *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*. 2008. № 40. С. 57–58.
 13. Урханова Л.А., Шестаков Н.И., Буянтуев С.Л., Семенов А.П., Смирнягина Н.Н. Улучшение свойств битума и асфальтобетона введением углеродного наномодификатора. В сборнике: *Научно-технические технологии и инновации. Юбилейная Международная научно-практическая конференция, посвященная 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова (XXI научные чтения)*. 2014. С. 391–398.
 14. Шеховцова С.Ю. Эффективный асфальтобетон на основе наномодифицированного полимерно-битумного вяжущего: Дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2016. 192 с.
 15. Гун Р.Б. Нефтяные битумы. М.: Химия, 1973. 432 с.
 16. Калинина М.О. Применение инновационных материалов в дорожном строительстве. *Современные технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации: Сборник статей победителей III Международной научно-практической конференции*. Пенза, 2016. С. 19–22.
 17. Киндеев О.Н., Высоцкая М.А., Шеховцова С.Ю. Влияние вида пластификатора на свойства битума и полимерно-битумных вяжущих // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2016. № 1. С. 26–30.
 18. Шеховцова С.Ю., Высоцкая М.А. Влияние углеродных нанотрубок на свойства ПБВ и асфальтобетона // *Вестник МГСУ*. 2015. № 11. С. 110–119.
 19. Беспалов В.Л. Битумополимерные вяжущие и асфальтополимербетоны, модифицированные Элвалом АМ и бутадиенметилстирольным каучуком СКМС-30 // *Современное промышленное и гражданское строительство*. 2015. Т. 11. № 1. С. 27–33.
 20. Хозин В. Г., Низамов Р. К., Старовойтова И. А., Зыкова Е.С., Аюпов Д.А., Эльрефаи А.Э.М.М. Аномальные эффекты изменения вязкости эпоксиных смол и пластичности битума при введении углеродных нанотрубок // *Строительные материалы*. 2019. № 1–2. С. 11–15. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-11-15
 21. Ali S.I.A. Characterization of asphalt binders blended with nanomaterial and polymer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 800. 012002. DOI: 10.1088/1757-899X/800/1/012002
 10. Dubina S.I. et al. Composite Rubber-Polymer Binder in the Design and Construction of Amur Bridge. In: Sinitsyn, A. (eds) Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives. SES 2020. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 141. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67654-4_14
 11. Ayupov D.A., Murafa A.V., Makarov D.B., Khakimullin Yu.N., Khozin V.G. Nanomodified bituminous binders for asphalt concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2010. No. 10, pp. 34–35. (In Russian).
 12. Iliopolov S.K. Modern ways to improve the durability of asphalt concrete coatings. *Vestnik of the Kharkov National Automobile and Road University*. 2008. No. 40, pp. 57–58. (In Russian).
 13. Urkhanova L.A., Shestakov N.I., Buyantuev S.L., Semenov A.P., Smirnyagina N.N. Improvement of the properties of bitumen and asphalt concrete by the introduction of a carbon nanomodifier. In the collection: *high technologies and innovations Anniversary International scientific and practical conference dedicated to the 60th anniversary of BSTU named after V.G. Shukhov (XXI scientific readings)*. 2014, pp. 391–398. (In Russian).
 14. Shekhovtsova S.Yu. Efficient asphalt concrete based on nanomodified polymer-bitumen binder. Dis... Candidate of Sciences (Engineering). Belgorod. 2016. 192 p. (In Russian).
 15. Gun R.B. Neftyanyye bitумы [Oil bitumen]. Moscow: Khimiya. 1973. 432 p.
 16. Kalinina M.O. Application of innovative materials in road construction. *Modern technologies: current issues, achievements and innovations: a collection of articles by the winners of the III International Scientific and Practical Conference*. Penza. 2016, pp. 19–22. (In Russian).
 17. Kindeev O.N., Vysotskaya M.A., Shekhovtsova S.Yu. Influence of the type of plasticizer on the properties of bitumen and polymer-bitumen binders. *Vestnik of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2016. No. 1, pp. 26–30. (In Russian).
 18. Shekhovtsova S.Yu., Vysotskaya M.A. Influence of carbon nanotubes on the properties of PBB and asphalt concrete. *Vestnik MSUCE*. 2015. No. 11, pp. 110–119. (In Russian).
 19. Bespalov V.L. Bitumen-polymer binders and asphalt-polymer concretes modified with Elvaloy AM and styrene-butadiene rubber SKMS-30. *Sovremennoye promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2015. Vol. 11. No. 1, pp. 27–33. (In Russian).
 20. Khozin V.G., Nizamov R.K., Starovoitova I.A., Zykova E.S., Ayupov D.A., Elrefai A.E.M.M. Anomalous effects of changes in the viscosity of epoxy resins and the plasticity of bitumen when introducing carbon nanotubes. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 1–2, pp. 11–15. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-11-15>
 21. S.I.A. Characterization of asphalt binders blended with nanomaterial and polymer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 800. 012002. DOI: 10.1088/1757-899X/800/1/012002

Информация предварительная. Возможны изменения!



Комитет Торгово-промышленной палаты РФ
по предпринимательству в сфере строительства
АО «ЦНИИЭП жилища – институт комплексного проектирования
жилых и общественных зданий» (АО «ЦНИИЭП жилища»)
Новосибирский государственный архитектурно-строительный
университет (СИБСТРИН)

Объединенная редакция научно-технических журналов
«Жилищное строительство» и «Строительные материалы»®



XIII Международная научно-практическая конференция
«**InterConPan-2023: инновации для индустриального домостроения**»

InterConPan-2023

International Conference of Large-panel Construction

16–18 мая 2023 г.

г. Новосибирск

ПРОГРАММА:

1-й день

Пленарное заседание

Секции:

«Архитектура индустриальных зданий
и комплексное развитие территорий»;
«Инновационная технология предприятий
индустриального домостроения»

2-й день

Выездная сессия

ЗАО ЗЖБИ «Строительные Технологии
и Материалы»
Центр машиностроения
и металлообработки RODEN
ООО ЗКПД «Арматон»; ЖК «Весенний»

3-й день

Выездная сессия

ООО «Брусника»
ЖК «Пшеница» (ГК «Брусника»)



ТЕМАТИКА:

- Оборудование и технологии для обеспечения технологического суверенитета индустриального домостроения
- Инновационные строительные системы
- BIM-технологии в сборном домостроении
- Современные инновационные строительные материалы
- Архитектура и планировочные решения
- Малоэтажное индустриальное строительство
- Инновационная организация строительного производства
- Комплексное развитие территорий застройки

Генеральный спонсор



Постоянный партнер

PBS
Petro Building Systems

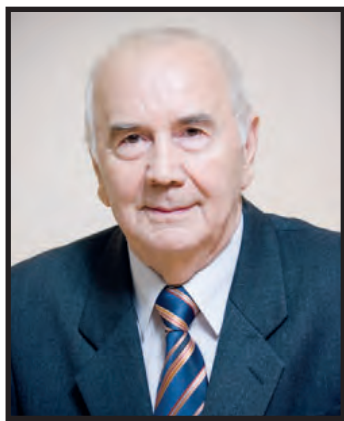
Партнеры



К проведению конференции будут подготовлены тематические номера журналов «Жилищное строительство» № 3 и «Строительные материалы» № 3.
Представление статей и рекламных материалов до 01.03.2023 г.

www.interconpan.ru

Организационный комитет: +7 (499) 976-20-36; 976-22-08
kpd-conf@mail.ru; mail@rifsm.ru www.rifsm.ru



Вадим Васильевич Бабков 20.03.1935—16.01.2023

16 января 2023 г. ушел из жизни известный ученый, заслуженный строитель Российской Федерации, заслуженный деятель науки Республики Башкортостан, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции», внесший существенный вклад в развитие отечественного строительного материаловедения, более полувека посвятивший подготовке специалистов для строительной отрасли и стоявший у истоков создания Архитектурно-строительного факультета (ныне института) Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Вадим Васильевич Бабков родился 20 марта 1935 г. в с. Кимильтей Зиминского района Иркутской области. В 1958 г. окончил Новосибирский институт инженеров железнодорожного транспорта по специальности «Мосты и тоннели».

Трудовую деятельность Вадим Васильевич начал в институте «БашНИИСтрой», где прошел все этапы, от инженера до заместителя директора по научной работе. В Уфимском нефтяном институте (ныне УГНТУ) работал с 1971 г., стал доцентом, профессором (1992–2023) и заведующим кафедрой «Строительные конструкции» (1992–2002). Являлся одним из основателей кафедры «Строительные конструкции» и продолжателем научной школы профессора А.Ф. Полака.

Под научным руководством В.В. Бабкова было защищено 33 кандидатских и 3 докторские диссертации. В качестве педагога, председателя и члена государственных аттестационных комиссий дал путевку в жизнь многим дипломированным специалистам по направлению «Строительство». До последних дней своей жизни вел учебную работу, руководил научными исследованиями студентов, магистрантов и аспирантов.

Вадим Васильевич – автор более 500 научных и учебных трудов, в том числе 20 монографий, учебников, учебных пособий, свыше 70 нормативных документов федерального и регионального уровня. За свои разработки получил 32 патента и авторских свидетельства на изобретение, многие из которых были внедрены в практику строительного производства России и Республики Башкортостан.

В.В. Бабков активно занимался общественной деятельностью, входил в состав многих научных и ученых советов при Министерстве строительства и архитектуры Республики Башкортостан, БашНИИСтроя, УГНТУ, СамГТУ и прочих профильных организаций.

За свою плодотворную трудовую и общественную деятельность был награжден орденом Салавата Юлаева (2018), званиями «Заслуженный деятель науки Республики Башкортостан» (1995) и «Заслуженный строитель Российской Федерации» (2003), почетной грамотой Минпромстроя СССР (1980), почетной грамотой Верховного Совета Башкирской АССР (1981), почетной грамотой Министерства строительства, архитектуры и дорожного комплекса Республики Башкортостан (2000) и прочими государственными и ведомственными наградами.

Светлая память об учителе, коллеге и друге Вадиме Васильевиче Бабкове навсегда сохранится в сердцах сотрудников кафедры «Строительные конструкции», а также Архитектурно-строительного института и Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Светлая память!

УДК 625.861

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-88-94>

[В.В. БАБКОВ], д-р техн. наук, профессор,
И.В. НЕДОСЕКО, д-р техн. наук, профессор (nedoseko1964@mail.ru),
А.О. ГЛАЗАЧЕВ, канд. техн. наук, (anton.glazachev@mail.ru),
Д.А. СЕНИЦИН, канд. техн. наук, (d4013438@yandex.ru),
А.А. ПАРФЕНОВА, инженер (аспирант) (nastya10092011@mail.ru),
Э.И. КАЮМОВА, инженер (старший преподаватель) (khalilova.ru@mail.ru)

Уфимский государственный нефтяной технический университет (450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1)

Композиционные материалы для дорожного строительства на основе отходов химической и металлургической промышленности

Важнейшими задачами утвержденной постановлением Правительства Российской Федерации от 17.11.2022 г. отраслевой программы «Применение вторичных ресурсов и вторичного сырья из отходов в промышленном производстве» являются создание технологической инфраструктуры вовлечения вторичного сырья в промышленность и увеличение доли продукции, произведенной с использованием вторичного сырья, в общем объеме выпуска продукции. Помимо экологического эффекта – экономии невозобновляемых дефицитных природных ресурсов, уменьшения площадей шламохранилищ и отвалов – использование вто-

ричных ресурсов позволяет получить также и значительный экономический эффект. В частности, в строительстве и производстве строительных материалов использование вторичных ресурсов и побочных отходов промышленных производств при современном научно-техническом сопровождении открывает значительные резервы для экономии материальных и топливно-энергетических ресурсов, что подтверждено многочисленными лабораторными исследованиями и производственными экспериментами. В настоящей статье представлены результаты исследований возможности применения бесклинкерного известково-шлакового вяжущего на основе минерального продукта содового производства и металлургических шлаков для стабилизации и укрепления грунтов с целью их использования в конструкциях дорожных одежд при строительстве автомобильных дорог различного назначения. Экспериментально показано, что добавление вяжущего в количестве 8–10% от сухой массы как связного (суглинок, супесь), так и несвязного (песок мелкий) грунта позволяет получить укрепленный грунт с высокими прочностными и деформационными характеристиками, который может быть использован вместо дефицитного природного щебня при устройстве слоев оснований при строительстве и реконструкции автомобильных дорог.

Ключевые слова: отходы промышленных производств, вторичные ресурсы, минеральный продукт содового производства, шлаки металлургические, композиционные бесклинкерные минеральные вяжущие, стабилизация и укрепление грунтов, дорожная одежда автомобильных дорог.

Для цитирования: Бабков В.В., Недосеко И.В., Глазачев А.О., Синицын Д.А., Парфенова А.А., Каюмова Э.И. Композиционные материалы для дорожного строительства на основе отходов химической и металлургической промышленности // *Строительные материалы*. 2023. № 1–2. С. 88–94. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-88-94>

V.V. BABKOV, Doctor of Sciences (Engineering),

I.V. NEDOSECO, Doctor of Sciences (Engineering), Professor (nedoseko1964@mail.ru),

A.O. GLAZACHEV, Candidate of Sciences (Engineering) (anton.glazachev@mail.ru),

D.A. SINITSYN, Candidate of Sciences (Engineering), (d4013438@yandex.ru),

A.A. PARFENOVA, Engineer (postgraduate student) (nastya10092011@mail.ru),

E.I. KAYUMOVA, Engineer (senior lecturer) (khalilova.ru@mail.ru)

Ufa State Petroleum Technological University (1, Kosmonavtov Street, Ufa, 450062, Russian Federation)

Composite Materials for Road Construction Based on Waste from the Chemical and Metallurgical Industries

The most important tasks of the industry program “Use of secondary resources and secondary raw materials from waste in industrial production” approved by the Decree of the Government of the Russian Federation of November 17, 2022 are the creation of a technological infrastructure for the involvement of secondary raw materials in industry and an increase in the share of products manufactured using secondary raw materials, in the total volume of output. In addition to the environmental effect – saving non-renewable scarce natural resources, reducing the area of sludge storage and landfills – the use of secondary resources also makes it possible to get a significant economic effect. In particular, in the construction and production of building materials, the use of secondary resources and by-products of industrial production with modern scientific and technical support opens up significant reserves for saving material and fuel and energy resources, which is confirmed by numerous laboratory studies and production experiments. This article presents the results of studies on the possibility of using a clinker-free lime-slag binder based on a mineral product of soda production and metallurgical slags for stabilizing and strengthening soils in order to use them in pavement structures when constructing highways for various purposes. It has been experimentally shown that the addition of a binder in the amount of 8–10% of the dry mass of both cohesive (loam, sandy loam) and non-cohesive (fine sand) soil makes it possible to obtain a reinforced soil with high strength and deformation characteristics, which can be used instead of scarce natural crushed stone in the construction of base layers during the construction and reconstruction of highways.

Keywords: industrial waste, secondary resources, mineral product of soda production, metallurgical slag, composite non-clinker mineral binders, stabilization and strengthening of soils, pavement of highways.

For citation: Babkov V.V., Nedoseco I.V., Glazachev A.O., Sinitsyn D.A., Parfenova A.A., Kayumova E.N Composite materials for road construction based on waste from the chemical and metallurgical industries. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 1–2, pp. 88–94. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-88-94>

Проблема нахождения минеральных сырьевых ресурсов для дорожного строительства, причем во все возрастающих объемах, остро стоит во всем мире, в частности в России и странах Евразийского содружества, Северной Африки, Азии и Латинской Америки [1]. Общеизвестно, что дорожная отрасль является крупнейшим потребителем нерудных минеральных ресурсов, используемых как при производстве инертных заполнителей — щебня, гравия, песка, так и при производстве клинкерных вяжущих (известки и цемента) [2]. Однако за последнее столетие наиболее доступные месторождения инертных заполнителей (песка и графия), которые, как правило располагались вблизи крупных рек и населенных пунктов, оказались практически исчерпаны, завозить же качественный щебень за сотни и тысячи километров в большинстве случаев является экономически нецелесообразным [3].

Большим резервом в получении сырьевых ресурсов для дорожного строительства, причем в самой материалоемкой части автомобильных дорог — устройства оснований и подстилающих слоев дорожных одежд, являются так называемые некондиционные сырьевые материалы, такие как мелкие и пылеватые пески, супеси и суглинки, а также крупнотоннажные отходы металлургической (доменные и сталеплавильные шлаки), топливно-энергетической (золы, отходы углеобогащения) и химической промышленности (отходы содового производства, фосфогипс и др.) [4–7]. Как известно, некондиционные мелкие пески, супеси и суглинки, которые нельзя использовать для производства конструктивных тяжелых бетонов или строительной керамики, можно с успехом применять для получения грунтоцементных композиций различной прочности, которые могут использоваться в составе нижних слоев

дорожных одежд [8], и если в прошлом внедрение этих эффективных технологий сдерживало отсутствие дорожной техники для приготовления, укладки и уплотнения грунтоцементных композиций, то в последние десятилетия многие предприятия, как отечественные, так и зарубежные, освоили выпуск данного оборудования (причем достаточно производительного, надежного и с высокой степенью автоматизации производственного процесса). Другой не менее важной задачей является расширение выпуска дешевых и доступных минеральных вяжущих, полученных прежде всего из отходов и побочных продуктов промышленности, таких как известково-шлаковые, сульфатно-шлаковые, гипсоизвестковошлаковые, известково-глинитные и др. [9–12], которые, на наш взгляд, могут успешно заменить дорогостоящие вяжущие на клинкерной основе – цемент и известь, более востребованные в других сферах строительства, в частности при возведении транспортных сооружений, гражданских и промышленных зданий.

Для Российской Федерации значительный интерес представляет использование твердых отходов содового производства как крупнотоннажного отхода, накопления которого только на производственной площадке АО «Башкирская содовая компания» в городе Стерлитамак Республики Башкортостан превышает 20 млн т [13], при этом подобные производства по выпуску соды и соответствующие им накопления отходов имеются также в Пермском крае и Республике Крым. Исходя из проведенного анализа минералогического состава [14], продукт содового производства состоит преимущественно из карбонатов кальция CaCO_3 и магния MgCO_3 (в сумме от 60 до 70%), гидроксидов кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и магния $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (в сумме от 5 до 8%), двуводного $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и полуводного $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ гипса (в сумме от 10 до 15%); имеются также примеси хлоридов кальция и натрия в количестве 4–8%. После фильтрационного прессования и отжима излишков дистиллерной жидкости минеральный продукт содового производства имеет влажность 30–35%, при этом образцы (куски) МПСР представляют собой малопрочные конгломераты с капиллярно-пористой структурой. Результатами лабораторных исследований и опытно-промышленных испытаний в рамках проекта «Создание технологического комплекса для производства и применения продуктов переработки минерального продукта содового производства АО «БСК» (МПСР) в дорожном, сельском и жилищно-коммунальном хозяйстве», реализуемого по контракту с АО «БСК» и ООО «ВЭБ Инжиниринг», была подтверждена возможность использования крупнотоннажных отходов промышленности – минерального продукта содового производства и металлургических шлаков в качестве сырьевых компонентов композиционного минерального вяжущего для стабилизации и укрепления грунтов слоев дорожных одежд при строительстве автомобильных дорог [14]. Кроме того, минеральный продукт содового производства, состоящий преимущественно из карбонатов кальция и магния, после сушки и активации незначительным количеством (1–2%) твердых отходов нефтепереработки может использоваться в качестве активированного минерального порошка (МП-1 в соответствии с ГОСТ Р 52129–2003 «Порошок минеральный для асфальтобетонных и органоминеральных смесей. Технические условия»).

Таблица 1
Table 1
Усредненный минералогический состав МПСР
после обжига при температуре 950°C
Averaged mineralogical composition of MPSP
sample after firing at a temperature of 950°C

Наименование минерала	Химическая формула	Количественное содержание, %
Оксид кальция	CaO	58–60
Оксид магния	MgO	10–12
Двухкальциевый силикат	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	12–14
Трехкальциевый силикат	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	3,5–5
Двухкальциевый алюмосиликат (геленит)	$2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$	4–5
Ангидрит	CaSO_4	5–6
Карбонат кальция	CaCO_3	2–3
Хлорид натрия	NaCl	2–4

Также, по мнению авторов, значительный интерес с точки зрения массового внедрения представляет использование обожженного отхода содового производства для получения заменителя дорогостоящей товарной извести, что позволит, во-первых, существенно снизить затраты на добычу и подготовку известнякового сырья (исключаются затраты на добычу, помол и транспортировку известнякового камня) и, во-вторых, снизить температуру обжига продукта примерно на 100°C (с 1000–1050 до 900–950°C). Технология производства бесцементного известково-кремнеземистого вяжущего путем совместного помола обожженного при температуре 900–950°C отхода содового производства с кварцевым песком была разработана институтом «НИИпромстрой» (г. Уфа) еще в 1970-х гг. [15, 16], а в 1980-х гг. на основе этого вяжущего по автоклавной технологии выпускались силикатный кирпич и газобетонные блоки плотностью 600–700 кг/м³ [17].

Как показывают результаты рентгенофазового анализа нескольких проб МПСР после обжига при температуре 950°C, выполненного с использованием рентгеновского дифрактометра BRUKER D2, общее содержание свободных оксидов $(\text{CaO} + \text{MgO})_{\text{акт}}$ в МПСР составляет около 70%, при этом содержание свободного оксида кальция CaO составляет 58–60%, а содержание свободного оксида магния MgO 10–12%, т. е. содержание оксида магния значи-

тельно выше допустимых значений для извести согласно ГОСТ 9179–2018 (не более 5%). Помимо этого, в составе присутствуют цементные минералы двухкальциевый силикат C_2S (12–14%) и трехкальциевый силикат C_3S (3,5–5%), а также ангидрит $CaSO_4$ в количестве 5–6%. Усредненный минералогический состав МПСР после обжига представлен в табл. 1.

Минералогический состав обожженного МПСР, а именно значительное содержание свободного оксида магния (более 10%), создает сложности по применению данного известьесодержащего вяжущего на основе МПСР в качестве замены извести при производстве автоклавных ячеистых бетонов, но при этом не препятствует применению данного материала в качестве компонента смешанных гидравлических вяжущих (известково-золевое, известково-шлаковое, известково-глинитное), которые могут быть использованы в качестве минеральных вяжущих для стабилизации и укрепления грунтов при устройстве слоев дорожных одежд автомобильных дорог.

Архитектурно-строительным институтом Уфимского государственного нефтяного технического университета в рамках реализации программы Министерства науки и высшего образования РФ «Приоритет-2030» в 2022 г. был проведен комплекс исследований по разработке минеральных вяжущих для укрепления грунтов на основе вторичных ресурсов Республики Башкортостан и соседних регионов. На основании результатов анализа минералогического состава известных вторичных ресурсов для дальнейших исследований было выбрано гидравлическое бесклинкерное известково-шлаковое вяжущее с использованием в качестве сырьевых компонентов минерального продукта содового производства после обжига при температуре 950°C и шлака доменного гранулированного молотого, поставляе-

мого ООО «Мечел-Материалы» в соответствии с ТУ 38.32.22-012-99126491–2017. Минералогический состав данного шлака представлен преимущественно трехкальциевым силикатом C_3S (около 25%) и двухкальциевым алюмосиликатом C_2AS (40%); содержание двухкальциевого силиката C_2S не превышает 5–10%, также имеется значительное количество ангидрита $CaSO_4$ и двухводного гипса $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (в сумме от 10 до 15%). Гидравлическая активность молотого гранулированного доменного шлака составляет от 10 до 15 МПа.

Приготовление известково-шлакового вяжущего производилось путем совместного помола сырьевых компонентов до удельной поверхности, соответствующей остатку на сите № 0,08 мм не более 5 мас. %; определение активности полученного вяжущего проводилось по методике ГОСТ 310.4. Результаты испытаний образцов вяжущего при различном соотношении сырьевых компонентов в возрасте 3, 7 и 28 сут нормального твердения представлены в табл. 2.

Как видно из результатов испытаний, активность бесцементного известково-шлакового вяжущего при соотношении МПСР : доменный шлак в пределах от 2:3 до 3:1 в возрасте 28 сут составляет от 15 до 21 МПа, т. е. разработанные бесклинкерные вяжущие соответствуют маркам по прочности при сжатии М150 и М200. Очевидно, что наиболее рациональной областью применения таких низкомарочных вяжущих является стабилизация и укрепления грунтов при устройстве слоев дорожных одежд. Разработанное гидравлическое известково-шлаковое вяжущее полностью соответствует III виду (композиционное вяжущее) в соответствии с ГОСТ 23558–94, т. е. может быть использовано для стабилизации и укрепления грунтов различного гранулометрического состава (как связных, так и несвязных) при строительстве автомобильных дорог.

Таблица 2
Table 2

Результаты испытаний образцов известково-шлакового вяжущего на основе МПСР
Test results of samples of lime-slag binder based on MPSP

№ п/п	Соотношение компонентов, %		Прочность при сжатии после суток нормального твердения, МПа					
	МПСР	ДШ	3		7		28	
			Единичные значения	Среднее значение	Единичные значения	Среднее значение	Единичные значения	Среднее значение
1	40	60	4,02 3,22 3,14	3,46	10,47 11,5 10,5	10,82	16,89 17,47 17,21	17,19
2	50	50	2,59 2,63 2,5	2,57	8,51 9,02 10,32	9,28	20,74 21,33 20,86	20,98
3	67	33	2,07 1,92 2,09	2,03	4,42 5,42 4,8	4,88	14,38 15,4 14,48	14,75
4	75	25	1,61 1,73 1,54	1,63	4,24 4,73 4,47	4,48	9,62 11,49 10,36	10,49

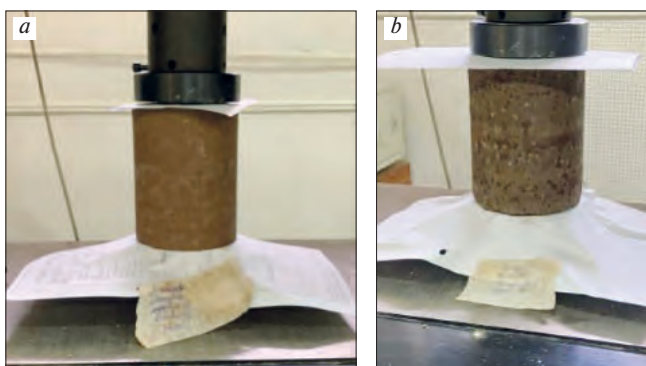


Рис. 1. Испытание при сжатии образцов связного (а) и несвязного (б) укрепленного грунта

Fig. 1. Compressive test on samples of cohesive (a) and non-cohesive (b) reinforced soil

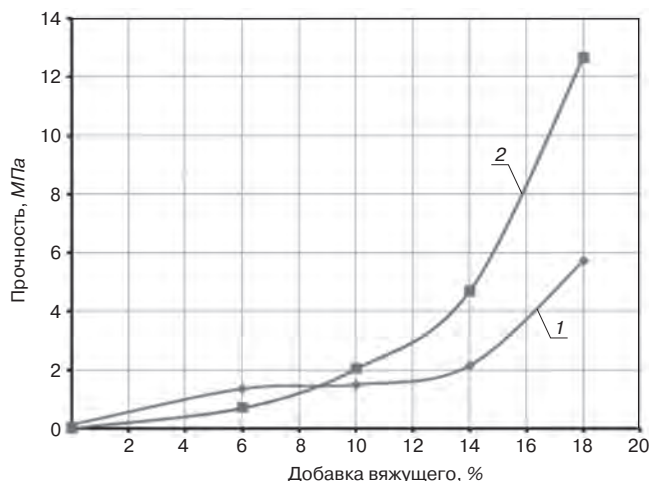


Рис. 2. Результаты испытания прочности при сжатии укрепленных образцов связного (1) и несвязного (2) грунта (в замоченном состоянии)

Fig. 2. Results of testing the compressive strength of reinforced samples of cohesive (1) and non-cohesive (2) soil (in the soaked state)

На следующем этапе работы был определен оптимальный расход разработанного вяжущего для укрепления различных типов грунтов. Для подготовки образцов с заданной плотностью/влажностью к пробе грунта добавлялось определенное количество известково-шлакового вяжущего и воды, необходимое для получения заданной рецептуры смеси. Смесь тщательно перемешивалась в лабораторном бетономесителе принудительного действия и выдерживалась в эксикаторе в течение 6 ч для получения связного грунта, затем с помощью прибора стандартного уплотнения ПСУ СОЮЗДОРНИИ изготавливались образцы-цилиндры диаметром 100 мм высотой 135–145 мм. После изготовления образцы выдерживались в течение 28 сут в камере нормального твердения. Далее определялась прочность при сжатии укрепленных грунтов по методике ГОСТ 28570–2019 (рис. 1).

Результаты испытаний изготовленных в лаборатории образцов в виде графиков изменения прочности связного и несвязного укрепленного грунта в замоченном состоянии, в зависимости от количества добавленного вяжущего, представлены на рис. 2.

Таблица 3
Table 3
Возможные направления применения укрепленного грунта с добавкой 8–10% известково-шлакового вяжущего в конструкциях дорожных одежд
Possible areas of application of reinforced soil with the addition of 8–10% lime-slag binder in pavement structures

Вариант исполнения	Конструкция дорожной одежды	Обозначения
1		1 – слой покрытия, обработанный вяжущим 2 – укрепленный слой основания ГС – геосинтетический материал
2		1 – укрепленный слой покрытия ГС – геосинтетический материал
3		1, 2 – слои покрытия 3, 4, 5 – слои основания 6 – укрепленный дополнительный слой основания ГС – геосинтетический материал

Как видно из полученных результатов, для связного грунта при добавке вяжущего в диапазоне от 6 до 12% происходит слабый прирост прочности грунта, что обусловлено в большей степени его стабилизацией, чем укреплением. На данном этапе у связного грунта снижается пластичность и появляются новые связи между глинистыми частицами и агрегатами, которые и отвечают за прочность образца в целом. Помимо прироста прочности грунта за счет гидравлического твердения частиц вяжущего, прирост прочности укрепленного грунта определяется также наличием в составе вяжущего определенного количества щелочных соединений ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ и $\text{Mg}(\text{OH})_2$), которые вступают в химическое взаимодействие с частицами глинистых минералов. После введения вяжущего в количестве 14% и более в структуре грунта формируется пространственный каркас из этого вяжущего, который в дальнейшем и определяет рост прочности грунта.

Для несвязного грунта при его нулевой начальной прочности ее прирост имеет более ярко выраженный характер: при добавке вяжущего около 8% его прочность становится равной прочности связного грунта

при той же дозировке добавки; при дальнейшем увеличении дозировки вяжущего происходит еще более ускоренный прирост прочности; при дозировке вяжущего более 14% несвязный грунт по структуре становится аналогом малоцементного (тощего) бетона классов по прочности при сжатии В3,5–В5.

Дальнейшие исследования показали, что образцы укрепленного связного грунта (суглинка) с содержанием вяжущего 8 и 10% при испытании в сухом состоянии соответствуют маркам по прочности при сжатии М30 и М40 соответственно, характеризуются коэффициентом водостойкости не менее 0,8, что полностью соответствует действующим нормативам. Исходя из полученного значения прочности, модуль упругости грунта, укрепленного известково-шлаковым вяжущим, ориентировочно составляет не менее 300 МПа, что позволяет, согласно ГОСТ 70452–2022, использовать такой укрепленный грунт в условиях средней полосы России (III дорожно-климатическая зона) в конструкциях дорожных одежд, представленных в табл. 3:

– нижние слои оснований под однослойное покрытие из щебеночно-гравийно-песчаных смесей,

обработанных органическими или неорганическими вяжущими, дорожных одежд переходного типа (вариант 1);

– однослойное покрытие из укрепленного грунта с поверхностной обработкой (вариант 2);

– дополнительные слои основания под двухслойное асфальтобетонное или монолитное цементобетонное покрытие дорожных одежд капитального или облегченного типа (вариант 3).

Проведенные исследования показывают, что природные грунты (суглинки, супеси, мелкие пески), укрепленные с использованием минеральных вяжущих на основе крупнотоннажных отходов химической и металлургической промышленности, могут стать эффективной заменой природных инертных материалов (щебня, гравия, кондиционных песков) при устройстве слоев дорожных одежд автомобильных дорог. Это позволяет несколько снизить стоимость дорожного строительства и, самое главное, за счет экономии природных материалов уменьшить уровень воздействия на окружающую среду.

Список литературы

1. Аристов С.А., Вадивасов Д.М., Давыдов Э.М., Дербенев А.В., Зворыкина Ю.В., Коган В.В. и др. Экологические показатели ресурсо- и энергоэффективности дорожных объектов с учетом их жизненного цикла в рамках экологического декларирования // *Мир дорог*. 2021. Вып. 141. С. 42–47.
2. Зворыкина Ю.В., Станкевич В.Г., Марьев А.В., Мамулат С.Л. Устойчивое развитие транспортной инфраструктуры – «зеленый» ориентир курса на развитие экономики «замкнутого» цикла и повышение качества жизни // *Мир дорог*. 2020. Апрель. С. 10–39.
3. Алехин Ю.А., Люсов А.Н. Экономическая эффективность использования вторичных ресурсов в производстве строительных материалов. М.: Стройиздат, 1988. 344 с.
4. Ватин Н.И., Петросов Д.В., Калачев А.И., Лахтинен П. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве // *Инженерно-строительный журнал*. 2011. № 4 (22). С. 16–21.
5. Мирсаев Р.Н., Бабков В.В., Чуйкин А.Е. и др. Промышленные отходы предприятий Урало-Башкирского региона в строительных технологиях // *Строительные материалы*. 2003. № 10. С. 22–24.
6. Вагапов Р.Ф., Синицин Д.А., Оратовская А.А., Тэненбаум Г.В. Строительные материалы на основе промышленных отходов Республики Башкортостан // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2012. № 4 (22). С. 279–284.
7. Рязанова В.А., Давыдов А.Д. Технические и экологические аспекты использования отходов ТЭЦ

References

1. Aristov S.A., Vadivasov D.M., Davydov E.M., Derbenev A.V., Zvorykina Yu.V., Kogan V.V. Ecological indicators of resource and energy efficiency of road facilities, taking into account their life cycle in the framework of environmental declaration. *Mir dorog*. 2021. Iss. 141, pp. 42–47. (In Russian).
2. Zvorykina Yu.V., Stankevich V.G., Maryev A.V., Mamulat S.L. Sustainable development of transport infrastructure - a “green” benchmark for the development of a “closed” cycle economy and improving the quality of life. *Mir dorog*. April 2020, pp. 10–39. (In Russian).
3. Alekhin Yu.A., Lyusov A.N. Ekonomicheskaya effektivnost' ispol'zovaniya vtorichnykh resursov v proizvodstve stroitel'nykh materialov [Economic efficiency of the use of secondary resources in the production of building materials]. Moscow: Sroyizdat. 1988. 344 p.
4. Vatin N.I., Petrosov D.V., Kalachev A.I., Lakhtinen P. The use of ashes and ash and slag waste in construction. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2011. No. 4 (22), pp. 16–21.
5. Mirsaev R.N., Babkov V.V., Chuikin A.E. et al. Industrial wastes of enterprises of the Ural-Bashkir region in construction technologies. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2003. No. 10, pp. 22–24. (In Russian).
6. Vagapov R.F., Sinitsin D.A., Oratovskaya A.A., Tenenbaum G.V. Building materials based on industrial waste of the Republic of Bashkortostan. *Izvestiya of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2012. No. 4 (22), pp. 279–284. (In Russian).
7. Ryazanova V.A., Davydov A.D. Technical and environmental aspects of the use of waste from the thermal

- Башкортостана. *Проблемы строительного комплекса России: материалы XXII Международной научно-технической конференции*. Уфа. 28.02.2018. С. 10–12.
8. Фурсов С.Г. Строительство конструктивных слоев дорожных одежд из грунтов, укрепленных вяжущими материалами // *Автомобильные дороги и мосты*. 2007. Вып. 3. С. 17–21.
 9. Волженский А.В., Иванов И.А., Виноградов Б.Н. Применение зол и топливных шлаков в производстве строительных материалов. М.: Стройиздат, 1984. 255 с.
 10. Бабков В.В., Мирсаев Р.Н., Шатов А.А., Недосеко И.В. и др. Безобжиговые вяжущие на основе промышленных отходов предприятий Урало-Башкирского региона // *Башкирский химический журнал*. 1999. Т. 6. № 2–3. С. 95–99.
 11. Бабков В.В., Комохов П.Г., Шатов А.А., Мирсаев Р.Н., Недосеко И.В. и др. Активированные шлаковые вяжущие на основе промышленных отходов предприятий Урало-Башкирского региона // *Цемент и его применение*. 1998. № 2. С. 37.
 12. Рязанов А.Н., Винниченко В.И., Недосеко И.В., Рязанова В.А., Рязанов А.А. Структура и свойства известково-золяного цемента и его модификация // *Строительные материалы*. 2018. № 1–2. С. 18–22.
 13. Рязанов А.Н., Синицин Д.А., Шагигалин Г.Ю., Бикбулатов М.Р., Недосеко И.В. Твердые отходы содового производства – важный резерв расширения сырьевой базы получения извести и низкоэнергоемких бесклинкерных вяжущих на ее основе // *Строительные материалы*. 2020. № 4–5. С. 14–17.
 14. Мамулат С.Л., Бабков В.В., Давыдов Э.М., Коган В.В., Кузнецов Д.В., Рязанов А.Н., Синицин Д.А., Фаткуллин Р.Н. Анализ состава, свойств и перспективы применения минерального продукта содового производства АО «Башкирская содовая компания» для изготовления энергоэффективных вяжущих // *Строительные материалы*. 2022. № 3. С. 61–73. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-800-3-61-73>
 15. Оратовская А.А., Смирнова Н.Ф., Кравцов В.М. Вяжущее на основе отходов содового производства. *Твердение цемента. Тезисы докладов и сообщений Всемирного совещания*. г. Уфа. 1974.
 16. Оратовская А.А., Синицин Д.А., Галеева Л.Ш., Бабков В.В., Шатов А.А. Использование отходов производства кальцинированной соды для получения известьесодержащих вяжущих и строительных материалов на их основе // *Строительные материалы*. 2012. № 2. С. 52–54.
 17. Оратовская А.А., Меркулов Ю.И., Хабиров Д.М., Галеева Л.Ш., Шатов А.А., Якимцева Г.В. и др. Автоклавный ячеистый бетон в Республике Башкортостан. // *Строительные материалы*. 2005. № 1. С. 52–54.
8. Fursov S.G. Construction of structural layers of pavements from soils reinforced with binders. *Avtomobil'nyye dorogi i mosty*. 2007. Iss. 3, pp. 17–21. (In Russian).
 9. Volzhensky A.V., Ivanov I.A., Vinogradov B.N. The use of ashes and fuel slags in the production of building materials. Moscow: Stroyizdat. 1984. 255 p.
 10. Babkov V.V., Mirsaev R.N., Shatov A.A., Nedoseko I.V. et al. Non-firing binders based on industrial waste from enterprises of the Ural-Bashkir region. *Bashkirskiy khimicheskiy zhurnal*. 1999. Vol. 6. No. 2–3, pp. 95–99.
 11. Babkov V.V., Komokhov P.G., Shatov A.A., Mirsaev R.N., Nedoseko I.V. Activated slag binders based on industrial waste from enterprises of the Ural-Bashkir region. *Tsement i ego primeneniye*. 1998. No. 2, p. 37.
 12. Ryazanov A.N., Vinnichenko V.I., Nedoseko I.V., Ryazanova V.A., Ryazanov A.A. Structure and properties of lime-ash cement and its modification. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 1–2, pp. 18–22. (In Russian).
 13. Ryazanov A.N., Sinitsin D.A., Shagigalin G.Yu., Bikbulatov M.R., Nedoseko I.V. Solid wastes of soda production - an important reserve for expanding the raw material base for obtaining lime and low-energy clinker-free binders based on it. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 4–5, pp. 14–17. (In Russian).
 14. Mamulat S.L., Babkov V.V., Davydov E.M., Kogan V.V., Kuznetsov D.V., Ryazanov A.N., Sinitsin D.A., Fatkullin R.N. Analysis of the composition, properties and prospects of application of the mineral product of soda production of Bashkir Soda Company JSC for the manufacture of energy-efficient binders. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 3, pp. 61–73. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-800-3-61-73>
 15. Oratovskaya A.A., Smirnova N.F., Kravtsov V.M. A binder based on waste soda production. *Hardening of cement. Abstracts of reports and reports of the World Conference*. Ufa. 1974.
 16. Oratovskaya A.A., Sinitsin D.A., Galeeva L.Sh., Babkov V.V., Shatov A.A. The use of soda ash production waste for obtaining lime-containing binders and building materials based on them. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 2, pp. 52–54. (In Russian).
 17. Oratovskaya A.A., Merkulov Yu.I., Khabirov D.M., Galeeva L.Sh., Shatov A.A., Yakimtseva G.V. and others. Autoclaved cellular concrete in the Republic of Bashkortostan. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2005. No. 1, pp. 52–54. (In Russian).

УДК 666.71.022

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-95-99>

Д.Д. ХАМИДУЛИНА, канд. техн. наук (loza_mgn@mail.ru),
 С.А. НЕКРАСОВА, канд. техн. наук (snek-mgn@mail.ru),
 К.М. ВОРОНИН, канд. техн. наук (voronin.km@mail.ru),
 М.М. СУРОВЦОВ, канд. техн. наук (mm.surovtsov@magtu.ru),
 Т.А. ТКАЧЁВА, студентка (tanya_tkacheva_2001@mail.ru)

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

Дорожный клинкер на основе вторичных сырьевых ресурсов

Сокращение использования природного сырья в производстве строительных материалов является одной из приоритетных задач. Не менее актуальным является вопрос утилизации вторичного сырья, тем более что строительная индустрия обладает наибольшим потенциалом в данной области. С другой стороны, выбор долговечного и декоративно привлекательного материала для обустройства уличных общественных пространств также имеет важное значение. Применение в строительстве отходов различных производств, в том числе металлургических, позволяет значительно снизить растущую нагрузку на окружающую среду, уменьшить расход дефицитных и дорогостоящих природных сырьевых материалов, тем самым повысив экономическую эффективность. Целью представленного исследования явилась разработка состава дорожного клинкера на основе никелевого шлака, молотого стекла и глины. Исследованы эксплуатационные и физико-механические свойства образцов различных составов. По результатам испытаний выбран состав с максимальными качественными и эксплуатационными характеристиками. Химическое взаимодействие острых стекловидных граней никелевого шлака с расплавом стекла и взаимодействие стекла с минералами глины в тонких пленках обеспечивают повышенную прочность. Установлена перспективность получения дорожных элементов повышенной долговечности на основе никелевого шлака с эксплуатационными характеристиками, не уступающими традиционно используемым бетонным и природным дорожным материалам.

Ключевые слова: дорожный клинкер, никелевый шлак, молотое стекло, глина, средняя плотность, морозостойкость, прочность, отходы.

Для цитирования: Хамидулина Д.Д., Некрасова С.А., Воронин К.М., Суровцов М.М., Ткачёва Т.А. Дорожный клинкер на основе вторичных сырьевых ресурсов // *Строительные материалы*. 2023. № 1–2. С. 95–99.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-95-99>

D.D. KHAMIDULINA, Candidate of Sciences (Engineering) (loza_mgn@mail.ru), S.A. NEKRASOVA, Candidate of Sciences (Engineering) (snek-mgn@mail.ru), K.M. VORONIN, Candidate of Sciences (Engineering) (voronin.km@mail.ru), M.M. SUROVTSOV, Candidate of Sciences (Engineering) (mm.surovtsov@magtu.ru), T.A. TKACHEVA, Student (tanya_tkacheva_2001@mail.ru)
 Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, Lenin Street, Magnitogorsk, 455000, Russian Federation)

Road Clinker Based on Secondary Raw Materials

Reducing the use of natural raw materials in the production of building materials is one of the priority tasks. No less urgent is the issue of recycling of secondary raw materials, especially since the construction industry has the greatest potential in this area. On the other hand, the choice of durable and decoratively attractive material for the arrangement of outdoor public spaces is also important. The use in construction of waste from various industries, including metallurgical, can significantly reduce the growing burden on the environment, reduce the consumption of scarce and expensive natural raw materials, thereby increasing economic efficiency. The purpose of this work is to develop a composition of road clinker based on nickel slag, ground glass and clay. Researches of operational and physical-mechanical properties of samples of various compositions are carried out. According to the results of studies the composition with the maximum qualitative and operational characteristics has been chosen. Chemical interaction of sharp glassy facets of nickel slag with glass melt and interaction of glass with and minerals of clay in thin films provides the increased strength. High perspective of obtaining road elements of increased durability on the basis of nickel slag with operating characteristics not inferior to traditionally used concrete and natural road materials has been established.

Keywords: road clinker, nickel slag, ground glass, clay, medium density, frost resistance, strength, waste.

For citation: Khamidulina D.D., Nekrasova S.A., Voronin K.M., Surovtsov M.M., Tkacheva T.A. Road clinker on the basis of secondary raw materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 1–2, pp. 95–99. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-95-99>

Актуальным вопросом является выбор долговечного и декоративно привлекательного материала для обустройства уличных общественных пространств. Во многих европейских странах преимущественно используется клинкерный дорожный кирпич [1]. В первую очередь это связано с его высокими эксплуатационными характеристиками и декоративностью. Дорожный клинкер имеет высокое сопротивление динамическим и статическим нагрузкам, поэтому такой материал рекомендуется использовать не только для пешеходных зон, но и для участков с

интенсивным транспортным движением. Дорожный клинкер отличается богатством цветовой палитры от классических цветов (красный, коричневый, желтый) до более ярких оттенков, что позволяет создавать уникальные цветовые решения в сочетании со стилистикой современной городской среды.

Несмотря на то что российские климатические условия объективно благоприятствуют применению дорожного клинкера, в России он не получил широкого распространения. В настоящее время нет импортозамещающего массового производства дорожного клин-

кера, поскольку привычным дорожным материалом до сих пор являются элементы мощения из вибропрессованного мелкозернистого бетона [2–5]. Однако качество и долговечность такого материала не всегда оправданы, в период долгой и интенсивной эксплуатации в различных природных условиях по всей территории России.

Вместе с тем сокращение использования природного сырья в производстве большинства строительных материалов также является приоритетной задачей. Тем более что строительная индустрия обладает наибольшим потенциалом в вопросах утилизации вторичного сырья. Наиболее перспективными для строительной отрасли являются отходы горнорудной, химической, энергетической и металлургической отраслей [6, 7].

Растущие объемы техногенных отходов и вторичных продуктов промышленности, значительная часть которых до сих пор не используется, складывается в отвалах, увеличивая негативное воздействие на окружающую среду определенных регионов [8–10]. Так, складирование шлаков при длительном хранении в отвалах может привести к вымыванию из них тяжелых металлов, загрязняющих природные поверхностные и подземные воды [11]. Кроме экологических накопление отходов приводит к экономическим проблемам, так как их содержание требует высоких капитальных и материальных затрат [12, 13].

Применение в строительстве отходов различных производств, в том числе металлургических, позволит значительно снизить растущую нагрузку на окружающую среду, уменьшит расход дефицитных и дорогостоящих природных сырьевых материалов, тем самым повышая экономическую эффективность [2, 14].

Никелевый шлак в производстве строительных материалов практически не используется из-за трудности его переработки и химической инертности. Частично отвальные никелевые шлаки можно механически переработать для извлечения металлической фазы – корольков. Для извлечения из шлаков никеля, железа и кобальта в чистом виде необходимы более сложные технологические процессы тонкого измельчения и переплавки [15].

Стекольный бой – это другой вид отхода, который относится к твердым бытовым отходам, переработка которого в России составляет около 20%. Такой отход можно утилизировать, активно вовлекая в составы различных строительных материалов как в виде стеклобоя, так и в виде молотого стекла. Стеклобой допускается повторно использовать при производстве стекла и тем самым экономить природный кварцевый песок, снижать температуру варки стекломассы различного назначения и при этом экономить топливо. Также на основе цветного стеклобоя возможно получать декоративные бетоны. Молотое стекло используется для получения плиток различной цветовой гаммы, керамических стеновых материалов, теплоизоляционных материалов (пеностекло) при производстве лакокрасочных материалов. В дорожном

Таблица 1
Table 1

Зерновой состав никелевого шлака
Grain composition of nickel slag

Материал	Массовая доля на сите, %				
	2,5	1,6	0,63	0,4	0,315
Шлак никелевый	4	68	24	3	1

Таблица 2
Table 2

Химический состав никелевого шлака
Chemical composition of nickel slag

Массовая доля оксидов, %						
SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Ni ₂ O ₃
35–50	6–11	11–18	0,2–3,5	17–30	0,2–3,5	0,1–0,9

Таблица 3
Table 3

Химический состав молотого стекла
Chemical composition of ground glass

Массовая доля оксидов, %						
SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	SO ₃
71,8–73,5	2–3,4	4,1–5,3	6,7–8,1	9,7–14,8	0,1	0,5

Таблица 4
Table 4

Зерновой состав молотого стекла
Grain composition of ground glass

Материал	Массовая доля на сите, %					
	0,315	0,2	0,16	0,063	0,05	-0,005
Стекло молотое	–	0,59	0,17	0,22	0,62	98,39

Таблица 5
Table 5

Основные свойства глины
Main properties of clay

Показатель	Значение
Число пластичности	16
Формовочная влажность, %	35,5
Спекаемость, °С	1100
Воздушная усадка, %	12
Общая усадка	12

строительстве стеклобой различных фракций используется в качестве заполнителя [16–20].

Целью данного исследования является разработка состава дорожного клинкера на основе никелевого шлака, молотого стекла и глины.

Свойства сырья имеют первостепенное значение при выборе технологии производства и основного оборудования.

В качестве заполнителя для дорожного клинкера использовались отвальные никелевые шлаки усредненного состава, зерновой и химический составы которого приведены в табл. 1, 2.

Применяемый никелевый шлак обладает следующими физико-механическими свойствами:

- твердость по шкале Мооса 6 ед.;
- истинная плотность 2,6 г/см³;

Таблица 6
Table 6Химический состав глины
Chemical composition of Clay

Материал	Содержание оксидов, %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	ППП
Глина	52,1–59,64	14,05–32,25	2–6,5	0,92–7,25	0,97–2,67	0,17	8,46–12,7

Таблица 7
Table 7Физико-механические свойства сырца
Physico-mechanical properties of raw clay

№ состава	Состав шихты	Средняя плотность, кг/м ³	Предел прочности при сжатии, МПа
1	Никелевый шлак 70, молотое стекло 30	2325	0,01
2	Никелевый шлак 70, молотое стекло 30, глина 10	2310	0,27
3	Никелевый шлак 70, молотое стекло 30, глина 15	2274	0,45
4	Никелевый шлак 70, молотое стекло 30, глина 20	2260	0,91
5	Никелевый шлак 70, молотое стекло 30, глина 25	2254	1,15

Таблица 8
Table 8Свойства полученных образцов
Properties of obtained samples

№ состава	Средняя плотность, кг/м ³	Предел прочности при сжатии, МПа	Истираемость, г/см ²	Марка по морозостойкости
3	2351	83,4	0,61	F 250
4	2384	95,1	0,45	F 300
5	2376	91,3	0,73	F 250

- насыпная плотность 1,8 г/см³;
- коэффициент динамической прочности 14 1/мм;
- коэффициент абразивной способности 4,5 мм.

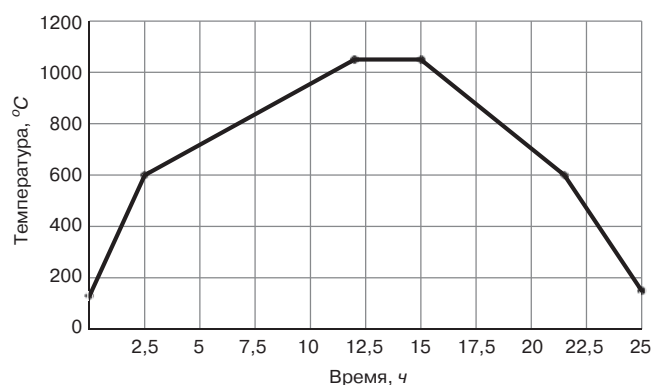
В качестве флюсующей добавки применяли молотое стекло, химический и зерновой составы которого приведены в табл. 3, 4.

В качестве связующего в работе использовалась глина месторождения Красная Башкирия, основные свойства которой представлены в табл. 5, химический состав – в табл. 6.

Гранулометрический состав глины определялся по методу Рутковского:

- глинистые частицы, %, менее 0,005 мм 40,86;
- пылеватые частицы, %, 0,05–0,005 мм 55,14;
- песчаные частицы, %, 0,05–5 мм 4.

Контрольные образцы с влажностью шихты 8% формовали методом полусухого двухстадийного двустороннего прессования при давлении 10 МПа. Для равномерного распределения влаги в составе керамической смеси вода добавлялась с помощью пульверизатора и тщательно перемешивалась в течение 10 мин. Формовочная масса вылеживалась в течение 24 ч при нормальных условиях для выравнивания влажности в

Режим обжига
Firing mode

объеме образцов. Далее производилось формование образцов-цилиндров диаметром и высотой 50 мм.

Составы и их характеристики представлены в табл. 7.

Поскольку образец, состоящий из шлака и стекла, не имел прочности, необходимой для дальнейшей перекачки и транспортировки, что подтверждают данные табл. 7, для обеспечения необходимой прочности в состав шихты добавляли глину (сверх 100%). Было установлено, что введение 10% глины и более обеспечивает необходимую прочность.

Обжиг до спекания образцов из составов 3, 4 и 5 производился в лабораторной электрической печи с автоматическим терморегулированием в окислительной атмосфере по режиму, представленному на рисунке.

В результате получены опытные образцы дорожного клинкера, характеризующиеся физико-механическими эксплуатационными свойствами, приведенными в табл. 8.

По мнению авторов, высокая однородность молотого стекла и глины способствует достижению высоких физико-механических и эксплуатационных характеристик за счет равномерного плавления молотого стекла и спекания глины. Частицы глины и молотого стекла, равномерно распределенные в шихте, выступают в роли центров образования жидкой фазы. Начальный период характеризуется спеканием легкоплавких соединений. Возникшая жидкая фаза связывает более тугоплавкую составляющую – частицы глины. При дальнейшем повышении температуры жидкая фаза, полученная из глины и молотого стекла, связывает частицы шлака в конгломератную структуру.

На основании полученных результатов (табл. 8) можно сделать вывод, что оптимальными эксплуатационными свойствами обладает состав № 4. Повышенная прочность данного состава обусловлена химическим взаимодействием острых стекловидных граней никелевого шлака с расплавом стекла и взаимодействием стекла с минералами глины в тонких пленках. Снижение истираемости состава № 3 обусловлено недостатком стекольно-глинистого расплава. Состав № 5 из-за избытка расплава имеет незна-

чительные деформации и значительную раздвижку зерен никелевого шлака, что приводит к снижению истираемости.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлена высокая перспективность полу-

чения дорожных элементов повышенной долговечности на основе никелевого шлака с эксплуатационными характеристиками, не уступающих традиционно используемым бетонным и природным дорожным материалам.

Список литературы

1. Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х., Бабаев З.К., Джуманиязов З.Б. Возможность получения дорожной клинкерной керамики и ее применение в условиях Приаралья. *Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования: Всероссийская научная конференция*. Белгород. 14–18 октября 2019 г. С. 230–234.
2. Воронин К.М., Хамидулина Д.Д., Некрасова С.А., Трубкин И.С. Вибропрессованные элементы мощения с использованием сталеплавильных шлаков // *Строительные материалы*. 2017. № 12. С. 71–73.
3. Корепанова В.Ф., Гринфельд Г.И. Производство клинкерного кирпича на Никольском кирпичном заводе Группы ЛСР // *Строительные материалы*. 2014. № 4. С. 10–13.
4. Гаврилов А.В., Гринфельд Г.И. Краткий обзор истории, состояния и перспектив рынка клинкерного кирпича в России // *Строительные материалы*. 2013. № 4. С. 20–22.
5. Жиронкин П.В., Герашенко В.Н., Гринфельд Г.И. История и перспективы промышленности керамических строительных материалов в России // *Строительные материалы*. 2012. № 5. С. 13–18.
6. Дергунов С.А., Альбакасов А.И., Сериков С.В., Мазепа А.К. Направления утилизации отходов промышленности в России и странах Европы. *Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: Материалы Всероссийской научно-методической конференции (с международным участием)*. Оренбург. 25–27 января 2021 г. С. 104–111.
7. Пугин К.Г., Вайсман Я.И., Волков Г.Н., Мальцев А.В. Оценка негативного воздействия на окружающую среду строительных материалов, содержащих отходы черной металлургии // *Современные проблемы науки и образования*. 2012. № 2 URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=5990> (дата обращения: 04.11.2022).
8. Гуревич Б.И., Тюкавкина В.В. Шлаки из отвала комбината «Североникель». *Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Материалы Международной конференции*. Апатиты. 31 августа – 03 сентября 2004 г. С. 107–108.
9. Майорова Е.А., Касиков А.Г., Тюкавкина В.В., Гуревич Б.И. Влияние отвальных шлаков комбината «Печенганикель» на загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами и возможные способы его снижения. *Сб. докл. XII Международной науч. конф. студентов и аспирантов «Проблемы*

References

1. Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Babaev Z.K., Dzhumaniyazov Z.B. The possibility of obtaining road clinker ceramics and its use in the conditions of the Aral Sea. *Safety, protection and environmental protection: fundamental and applied research: All-Russian Scientific Conference*. Belgorod. October 14–18, 2019, pp. 230–234.
2. Voronin K.M., Khamidulina D.D., Nekrasova S.A., Trubkin I.S. Vibrocompressed paving elements using steelmaking slags. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 12, pp. 71–73. (In Russian).
3. Korepanova V.F., Korepanova G.I. Production of clinker bricks at the Nikolsky Brick Plant of the LSR Group. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 4, pp. 10–13. (In Russian).
4. Gavrillov A.V., Greenfeld G.I. A brief overview of the history, state and prospects of the market for clinker bricks in Russia. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 4, pp. 20–22.
5. Zhironkin P.V., Gerashchenko V.N., Greenfeld G.I. History and prospects of the ceramic building materials industry in Russia. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 5, pp. 13–18.
6. Dergunov S.A., Albasov A.I., Serikov S.V., Mazepa A.K. Directions of industrial waste disposal in Russia and European countries. *University complex as a regional center of education, science and culture: materials of the All-Russian scientific and methodological conference (with international participation)*. Orenburg. January 25–27, 2021, pp. 104–111.
7. Pugin K.G., Vaisman Y.I., Volkov G.N., Maltsev A.V. Assessment of the negative impact on the environment of building materials containing ferrous metallurgy waste. *Modern problems of science and education*. 2012. No. 2. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=5990> (accessed date: 04.11.2022)
8. Gurevich B.I., Tyukavkina V.V. Slags from the dump of the Severonickel plant. *Environmental problems of the northern regions and ways to solve them: Materials of the International Conference*. Apatity. August 31 – September 03, 2004, pp. 107–108.
9. Mayorova E.A., Kasikov A.G., Tyukavkina V.V., Gurevich B.I. Impact of dump slags of the Pechenganickel plant on the pollution of the environment with heavy metals and possible ways to reduce it. *Collection of reports of the XII International Scientific Conference of Students and Postgraduates "Problems of the Arctic Region"*. Murmansk. May 15, 2012, pp. 23–24.

- арктического региона». Мурманск. 15 мая 2012 г. С. 23–24.
10. Чантурия В.А., Чаплыгин Н.Н., Вигдергауз В.Е. Современные направления в области создания ресурсосберегающих технологий и охраны окружающей среды при переработке минерального сырья // *Горный журнал*. 2007. № 2. С. 91–96.
 11. Макаров В.Н., Васильева Т.Н., Макаров Д.В. Потенциальная экологическая опасность выведенных из эксплуатации хранилищ хвостов обогащения медно-никелевых руд // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2005. Т. 13. № 1. С. 85–93.
 12. Макаров Д.В., Маслобоев В.А., Кошкина Л.Б. Исследования по обоснованию снижения экологической опасности отходов горнопромышленного комплекса: основные результаты и перспективы научного направления // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2018. Т. 9. № 9–6. С. 104–160. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.9.104-160.
 13. Макаров Д.В., Мелконян Р.Г., Суворова О.В., Кумарова В.А. Перспективы использования промышленных отходов для получения керамических строительных материалов // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2016. № 5. С. 254–281.
 14. Илларионов И.Е., Стрельников И.А. О применении техногенных отходов в литейном производстве // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2016. Т. 14. № 4. С. 36–41. DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-4-36-41.
 15. Веселовский А.А., Рошин В.Е., Лайхан С.А. Химико-термическая обработка отвальных никелевых шлаков с целью извлечения никеля и железа // *Вестник ЮУрГУ. Сер. Металлургия*. 2017. Т. 17. № 4. С. 22–31.
 16. Чупрова Л.В., Мишурина О.А. Экологические и экономические аспекты утилизации отходов стекла // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. № 11–2. С. 222–225.
 17. Белых С.А., Артюхова П.Н., Казыева А.И., Сивкова В.И. Пути использования стеклобоя в технологии строительных материалов. *Молодая мысль: наука, технологии, инновации: Материалы IX (XV) Всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых*. Братск. 20–24 марта 2017 г. С. 13–17.
 18. Трушин А.В. Факторы, оказывающие влияние на развитие российского рынка стеклобоя // *Аллея науки*. 2018. Т. 6. № 10 (26). С. 348–351.
 19. Воронин К.М., Трубкин И.С. Элементы мощения из отходов промышленности. *Строительные материалы, конструкции и технологии XXI века: Межвузовский сборник научных трудов* / Под ред. М.Б. Пермякова. Магнитогорск, 2019. С. 68–70.
 20. Воронин К.М., Некрасова С.А., Зубулина Н.И. Элементы мощения из отходов стекла и кварцевой пыли // *Стекло и керамика*. 2014. № 3. С. 11–12.
 10. Chanturia V.A., Chaplygin N.N., Vigdergauz V.E. Modern directions in the field of creating resource-saving technologies and environmental protection during processing of mineral raw materials. *Gornyj zhurnal*. 2007. No. 2, pp. 91–96.
 11. Makarov V.N., Vasilyeva T.N., Makarov D.V. et al. Potential environmental hazard of decommissioned copper-nickel ore processing tailings storage facilities *Himija v interesah ustojchivogo razvitija*. 2005. Vol. 13. No. 1, pp. 85–93. (In Russian).
 12. Makarov D.V., Masloboev V.A., Koshkina L.B. et al. Studies to justify the reduction of the environmental hazard of mining waste: the main results and prospects of the scientific direction. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN*. 2018. Vol. 9. No. 9–6, pp. 104–160. (In Russian). DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.9.104-160
 13. Makarov D.V., Melkonyan R.G., Suvorova O.V., Kumarova V.A. Prospects for the use of industrial waste for the production of ceramic building materials. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' (scientific and technical journal)*. 2016. No. 5, pp. 254–281. (In Russian).
 14. Illarionov I.E., Strelnikov I.A. On the use of man-made waste in foundry. *Vestnik of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov*. 2016. Vol. 14. No. 4, pp. 36–41. (In Russian). DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-4-36-41
 15. Veselovsky A.A., Roshchin V.E., Laikhan S.A. Chemical and thermal treatment of nickel dump slags in order to extract nickel and iron. *Vestnik JuUrGU. Serija «Metallurgija»*. 2017. Vol. 17. No. 4, pp. 22–31. (In Russian).
 16. Chuprova L.V., Mishurina O.A. Environmental and economic aspects of glass waste disposal. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij*. 2016. No. 11–2, pp. 222–225.
 17. Belykh S.A., Artyukhova P.N., Kazyeva A.I., Sivkova V.I. Ways to use glass fiber in the technology of building materials. *Young thought: science, technology, innovation: materials of the IX (XV) All-Russian scientific and technical conference of students, undergraduates, graduate students and young scientists*. Bratsk. March 20–24, 2017, pp. 13–17.
 18. Trushin A.V. Factors influencing the development of the Russian glass fiber market. *Alley of Science*. 2018. Vol. 6. No. 10 (26), pp. 348–351.
 19. Voronin K.M., Trubkin I.S. Paving elements from industrial waste. *Construction materials, structures and technologies of the 21st century: Intercollegiate collection of scientific works*. Edited by M.B. Permyakov. Magnitogorsk. 2019, pp. 68–70.
 20. Voronin K.M., Nekrasova S.A., Zubulina N.I. Paving elements from glass and quartz dust waste. *Steklo i keramika*. 2014. No. 3, pp. 11–12. (In Russian).

Т.В. РЕВЕНОК¹, канд. хим. наук, доцент (trevenok@gmail.com);
В.В. СЛЕПЦОВ², д-р техн. наук, профессор (08fraktal@inbox.ru)

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

² Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (125993, г. Москва, Волоколамское ш., 4)

Микробиологические аспекты разработки препаратов для обработки поверхности материалов на основе коллоидных растворов меди

В последнее время с учетом резистентности биопатогенов к воздействию антибиотиков и антисептиков актуальным является поиск новых биоцидных материалов. Проведено исследование биоцидных свойств коллоидных растворов меди, полученных методом импульсно-дугового диспергирования. Показано, что коллоидные растворы меди с концентрацией 75 мг/л обладают выраженным биоцидным действием в отношении тест-культур *Staphylococcus aureus* и *Escherichia coli*. Продемонстрирована зависимость биоцидных свойств от концентрации коллоидного раствора меди. Отмечено, что размер наночастиц металлов влияет на бактерицидные свойства растворов. Показано, что обработка стальных, керамических и пластиковых поверхностей коллоидным раствором меди с концентрацией 75 мг/л оказывает дезинфицирующее действие. Испытания по приданию биоцидных свойств текстильным материалам методом пропитки продемонстрировали, что материалы, обработанные раствором коллоидной меди, полученным электроискровым методом, обладают выраженной бактерицидной активностью. Полученные коллоидные растворы могут применяться для биоцидной обработки текстильных и волокнистых материалов, используемых в производстве отделочных, теплоизоляционных и композиционных материалов для строительной, текстильной и сельскохозяйственной отраслей промышленности.

Ключевые слова: коллоидный раствор меди, наночастицы, метод импульсно-дугового диспергирования, биоцидные материалы, бактерицидная обработка поверхности материалов, текстильные и волокнистые материалы.

Для цитирования: Ревенок Т.В., Слепцов В.В. Микробиологические аспекты разработки препаратов для обработки поверхности материалов на основе коллоидных растворов меди // *Строительные материалы*. 2023. № 1–2. С. 100–105.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-100-105>

T.V. REVENOK¹, Candidate of Sciences (Chemistry), assistant professor, (trevenok@gmail.com);

V.V. SLEPTSOV², Doctor of Sciences (Engineering), professor, (08fraktal@inbox.ru)

¹ National Research Moscow State University Of Civil Engineering (26, Yaroslavskoye Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

² Moscow Aviation Institute (National Research University) (4, Volokolamskoye Highway, Moscow, 125993, Russian Federation)

Microbiological Aspects of the Preparations Development for Surface Materials Treatment Based on Copper Colloidal Solutions

In recent years, taking into account the biopathogens resistance to the effects of antibiotics and antiseptics, the search for new biocidal materials has become relevant. A study of the biocidal properties of copper colloidal solutions obtained by the pulse-arc dispersion method in was carried out. It has been shown that copper colloidal solutions with a concentration of 75 mg/l have a pronounced biocidal effect on the *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* test cultures. The dependence of biocidal properties on the copper colloidal solution concentration has been demonstrated. It has been noted that the metal nanoparticles size affects the solutions bactericidal properties. It has been shown that the treatment of steel, ceramic and plastic surfaces with a copper colloidal solution at a concentration of 75 mg/l has a disinfecting effect. Tests to impart biocidal properties to textile materials by the impregnation method demonstrated that materials treated with a colloidal copper solution obtained by the electric spark method have a pronounced bactericidal activity. The obtained colloidal solutions can be used for biocidal treatment of textile and fibrous materials used in the production of finishing, heat-insulating and composite materials for the construction, textile and agricultural industries.

Keywords: copper colloidal solution, nanosized particles, pulse-arc dispersion method, biocidal materials, bactericidal surface treatment of materials, textile and fibrous materials.

For citation: Revenok T.V., Sleptsov V.V. Microbiological aspects of the preparations development for surface materials treatment based on copper colloidal solutions. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 1–2, pp. 100–105. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-100-105>

В последнее время с учетом развития новых биологических технологий разрабатываются современные методики улучшения состояния окружающей среды. Ведутся перспективные разработки в сфере строительства и создания прогрессивных строительных материалов. От повреждения строительных материалов под влиянием микроорганизмов напрямую зависит долговечность и прочность зданий и сооружений [1]. Патогенные микроорганизмы не только разрушают материалы, но и формируют неудовлетворительные воздушные условия, которые негативно влияют на здоровье человека. К вариантам сохране-

ния целостности строительных материалов и обеспечения эколого-гигиенической безопасности окружающей среды относится обработка поверхности изделий комплексными биоцидными препаратами [2].

Одним из направлений решения этой проблемы является использование коллоидных растворов металлов. В числе наноматериалов особое место занимают препараты серебра, меди, цинка, титана, золота, палладия, обладающие антибактериальными свойствами [3–6]. Высокая стоимость серебра и других металлов этого ряда не позволяет широко использовать их в больших объемах. Поэтому в качестве исход-

ных компонентов могут быть использованы сравнительно недорогие составы на основе меди [7, 8].

При разработке биоцидных препаратов особое внимание уделяется таким показателям, как эффективность, нетоксичность, отсутствие аллергии и раздражения для организма человека. Исследования бактерицидных свойств наночастиц меди показали отсутствие их негативного воздействия на здоровье человека [9]. Частицы меди имеют небольшой размер, способны адсорбироваться на клеточной мембране и проникать в глубь бактерии, что существенно увеличивает их противомикробную активность [10]. Биоцидные свойства коллоидных растворов меди обуславливают их применение в качестве препаратов для модифицирования различного типа поверхностей и материалов, используемых при отделке помещений [11–13]. Получение биоцидной суспензии для настенных покрытий включает введение в лакокрасочный материал коллоидных частиц меди. Такая биоцидная суспензия пригодна для нанесения на обои с приданием им бактерицидных свойств.

Основным преимуществом использования коллоидных растворов меди в дистиллированной воде в сравнении с препаратами, полученными другими способами, являются низкие значения вязкости раствора, что обеспечивает его глубокое проникновение в структуру материала при пропитке. В отличие от способов магнетронного распыления, когда осаждаемое вещество не полностью проникает в структуру материала, при обработке в коллоидных растворах частицы меди полностью покрывают структурные элементы материала, придавая им антимикробные свойства [14].

В настоящее время противомикробная обработка текстильных материалов приобрела важное значение в производстве отделочных, изоляционных и композиционных материалов. Также возрастает интерес к изделиям из волокнистых материалов, которые способны заменить минеральную вату в производстве теплоизоляционных материалов. Волокна обладают хорошей сорбционной активностью по отношению к наночастицам меди, выступающим в качестве активного противомикробного компонента [15, 16]. Применение наночастиц меди для модификации текстильных материалов является весьма актуальным ввиду их высоких бактерицидных свойств.

Материалы и методы

В работе были изучены бактерицидные свойства коллоидных растворов меди, полученных методом электроискрового разряда [17]. К преимуществам используемого метода для приготовления препаратов коллоидной меди относится высокая производительность и непрерывность работы. В качестве источника ионов и наночастиц металла в установке были использованы вращающиеся электроды, при этом предусмотрена прокачка жидкости в разрядном промежутке. В отличие от растворов, полученных химическими, биохимическими и смешанными методами, использование способа диспергирования металла в чистой

деионизированной воде позволяет исключить присутствие в составе раствора токсичных солей и нерастворимых в воде примесей [18–20]. К особенностям таких растворов относится наличие наночастиц, имеющих форму, близкую к сферической, которые состоят из кристаллического металла размерами до 50 нм.

Бактерицидные свойства препаратов изучали с использованием питательных сред на основе перевара Хоттингера. Оценка антибактериальных свойств коллоидных растворов проводилась с помощью определения зон задержки микробного роста диско-диффузионным методом. Реактивы, препараты и сырье, которые использовались в работе, соответствовали требованиям нормативных документов.

Антибактериальную активность растворов кластерной меди изучали на препаратах тест-культур *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*. Для изучения бактерицидных свойств поверхностей керамической плитки, стали, пластика и резины изготавливали тест-объекты в виде стерильных пластин размером 10×10 см². На поверхность тест-объектов исследуемых материалов были искусственно контаминированы бактерии. Обработку тест-объектов проводили коллоидным раствором, содержащим наночастицы меди с концентрацией 75 мг/л.

Модифицирование текстильных материалов проводили, используя емкость с коллоидным раствором, через которую был пропущен текстильный материал. В качестве образцов были использованы гидрофобный и гидрофильно-гидрофобный нетканые материалы типа «Бурсофит». Вес 1 м² гидрофобного нетканого материала составлял 14 г, ширина 600 мм. Вес 1 м² гидрофильно-гидрофобного материала составлял 23 г, ширина 790 мм. Определение количества наночастиц меди, нанесенных на ткань, производили методом мокрого привеса взвешиванием образцов до и после пропускания через емкость с коллоидным раствором. Сушка материала проходила при температуре 50°C. По результатам взвешивания образцов до и после обработки с учетом концентрации наночастиц меди в коллоидном растворе рассчитывалось количество меди, нанесенной на текстильный материал.

Таблица 1

Table 1

Антибактериальная активность коллоидных растворов металлов в отношении тест-штаммов бактерий
Antibacterial activity of metal colloidal solutions in relation to bacteria test stains

Номер образца	Диспергируемый материал	Антибактериальная активность ультрадисперсных систем в отношении патогенов	
		<i>Escherichia coli</i>	<i>Staphylococcus aureus</i>
1	Ti	+	+++
2	Zr	+++	+++
3	Cu	+++	+++
4	W	+	+++
5	Ag	+++	+++
6	Ni	+++	+++

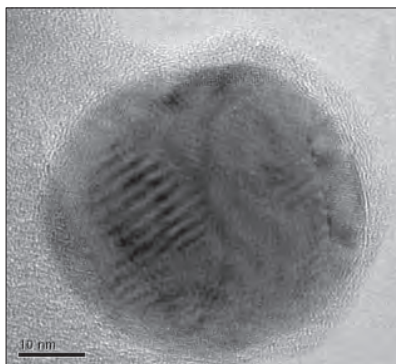
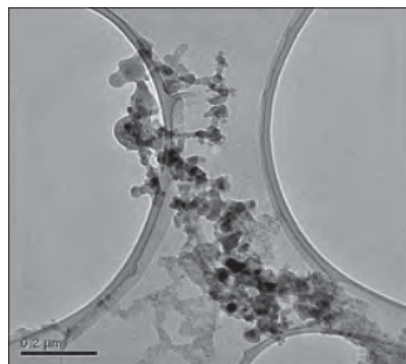
Результаты

В работе было проведено сопоставление антимикробных свойств коллоидных растворов Cu, Ti, Ag, Ni, Zr, W, полученных методом электроискрового разряда в дистиллированной воде, в отношении патогенов *Staphylococcus aureus* и *Escherichia coli*. Сравнительная оценка чувствительности тест-штаммов патогенов к воздействию этих растворов представлена в табл. 1.

Для образцов коллоидных растворов серебра, меди, никеля и циркония характерна высокая антибактериальная активность. Для образцов растворов вольфрама и титана в отношении бактерии *Escherichia coli* бактерицидный эффект менее выражен. Снижение эффективности бактерицидного воздействия для этих препаратов может объясняться сдвигом кривой распределения по размерам в сторону больших размеров частиц металла. Вследствие преимуществ коллоидных растворов меди в сравнении с другими препаратами, их невысокой стоимости, антимикробной активности и отсутствия негативного воздействия на здоровье человека в работе были проведены исследования бактерицидных свойств поверхностей различных материалов, обработанных препаратами коллоидной меди.

Проведенные исследования с использованием метода просвечивающей электронной микроскопии показали присутствие в растворе наноразмерных частиц меди. Фотографии с электронного микроскопа представлены на рисунке. В образцах коллоидного раствора наблюдается наличие мелких и крупных частиц, а также образованных ими агрегатов. Присутствие мелких частиц приводит к увеличению суммарной поверхности активного компонента, что влечет за собой увеличение его бактерицидной активности [8]. Повышенное содержание частиц размером до 50 нм обуславливает повышенную антимикробную активность коллоидных растворов меди.

В работе было проведено испытание бактерицидной активности растворов коллоидной меди с концентрацией 75 мг/л в отношении тест-культур *Staphylococcus aureus* и *Escherichia coli* с использованием питательных сред на основе перевара Хоттингера. Результаты испытаний представлены в табл. 2.



Наночастицы меди в коллоидном растворе. Фотографии с электронного микроскопа
Copper nanoparticles in a colloidal solution. Photographs from an electron microscope

Таблица 2

Table 2

Антимикробная активность растворов кластерной меди
Antimicrobial activity of cluster copper solutions

Патоген	Величина задержки микробного роста, мм		
	Концентрация раствора кластерной меди		
	75 мг/л	50 мг/л	25 мг/л
<i>Staphylococcus aureus</i>	15	11	4
<i>Escherichia coli</i>	23	16	10

По результатам исследований раствор коллоидной меди оказывал бактерицидное действие в отношении *Escherichia coli* начиная с концентрации 25 мг/л. В отношении *Staphylococcus aureus* растворы коллоидной меди оказывали бактерицидное действие начиная с концентраций 50 мг/л. К достоинствам метода импульсно-дугового диспергирования металла в дистиллированной воде относится эффект образования однородных по форме и размеру высокодисперсных частиц меди с низкой агломерируемостью и устойчивыми бактерицидными свойствами. В коллоидной наносуспензии металл присутствует как в ионной форме, так и в виде металлических наночастиц. С течением времени происходит рост наночастиц за счет присутствующих в растворе ионов. Однако агрегация наночастиц в водном растворе вследствие кристаллизации аморфных частиц и их дальнейшего послыоного роста является медленным процессом. Особенностью таких коллоидных растворов является их стабильность в течение долгого времени [18]. Коллоидные растворы могут присутствовать в качестве одного из компонентов в составе специальных бактерицидных пропиток и лакокрасочных покрытий.

С точки зрения производства изделий и материалов, обладающих бактерицидными свойствами, особый интерес представляют текстильные материалы, имеющие в своей структуре волокна с большим количеством микропор. В результате их обработки коллоидными растворами металлов достаточно легко протекает процесс адсорбции бактерицидных веществ, особенно в области низких концентраций растворов [19]. Результаты проведенных исследований по приданию нетканым материалам бактерицидных свойств путем их пропитки коллоидным раствором меди с концентрацией 75 мг/л приведены в табл. 3.

Расчеты показали, что в результате пропитки коллоидным раствором меди на материал было нанесено от 0,48 до 0,72 мг наночастиц меди на 1 м². По результатам анализа обобщенных литературных данных можно заключить: обработка раствором меди с концентрацией 0,7–53 мг/л является достаточной, чтобы придать текстильному материалу биоцидные свойства. На обработанных коллоидным раствором меди образцах проис-

Таблица 3
Table 3Вес меди, нанесенной на материал
Weight of copper deposited on the material

Материал	Гидрофобный нетканый материал типа «Бурсофит»	Гидрофильно-гидрофобный нетканый материал типа «Бурсофит»
Вес ткани до обработки	14 г/м ²	23 г/м ²
Вес нанесенной на ткань коллоидной меди	0,48 мг/м ²	0,72 мг/м ²

ходит угнетение роста бактерий *Staphylococcus aureus*. С возрастанием концентрации меди на поверхности ткани наблюдается повышение ее антибактериальных свойств [15, 21]. Можно предположить, что количество наночастиц меди, нанесенных на нетканый материал типа «Бурсофит», является достаточным для придания ему необходимых антимикробных свойств. Пористая поверхность волокон ткани адсорбирует наночастицы из раствора коллоидной меди, что позволяет использовать ткань как биоцидный материал для многих целей. Применение этой технологии открывает перспективы использования текстильных и волокнистых биоцидных материалов в промышленности строительных материалов и других отраслях.

Одним из способов предотвращения возникновения биокоррозии, которая зачастую развивается в условиях повышенной влажности, является обработка поверхности материалов специальными пропитками и красками. Результаты испытаний бактерицидных свойств различных типов поверхностей, обработанных раствором коллоидной меди в концентрации 75 мг/л, представлены в табл. 4.

Изучение тест-объектов из стали, керамической плитки, пластика и резины после обработки раствором, содержащим коллоидную медь в концентрации 75 мг/л в течение 3 ч, обнаружило отсутствие роста бактерий на поверхности образцов. На поверхности резиновой пластины интенсивность роста бактерий была понижена. Таким образом, исследования показали, что бактерицидный эффект коллоидных растворов меди наиболее выражен на гладкой поверхности. Выводы об эффективности применения коллоидного раствора для материалов с пористой поверхностью потребуют проведения дополнительных исследований. Возможно также использование пре-

паратов в составе лакокрасочных покрытий или специальных пропиток.

Заключение

Наночастицы металлов можно рассматривать как основу для создания антибактериальных средств нового поколения. При использовании коллоидных растворов меди не наблюдается отрицательного влияния на организм человека. Их отличительной особенностью является небольшая стоимость препаратов по сравнению с составами, содержащими наночастицы благородных металлов, а также отсутствие механизма адаптации к препарату у микроорганизмов. Растворы, содержащие наночастицы меди с концентрацией от 75 мг/л, обладают устойчивым бактерицидным и бактериостатическим действием в отношении тест-культур *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*. Разработка технологии получения коллоидных растворов меди методом импульсно-дугового диспергирования в дистиллированной воде делает возможным использование чистых стабильных растворов для модификации поверхности материалов, что открывает перспективы получения новых противомикробных препаратов.

Показано, что поверхность стальных, керамических и пластиковых изделий, обработанная раствором коллоидной меди с концентрацией 75 мг/л, обладает бактерицидной активностью. Определение концентрации растворов для обработки пористых поверхностей требует проведения дальнейших исследований с увеличением количества активного компонента. Одним из вариантов решения проблемы может стать нанесение лакокрасочных покрытий на основе водно-дисперсных систем с наноразмерными частицами меди, что будет способствовать ингибированию процесса размножения патогенных микроорганизмов и устранению их из воздуха помещения.

Продемонстрирована возможность нанесения покрытий на нетканый материал из коллоидного раствора наночастиц меди. Разработка технологии биоцидной модификации материалов, обладающих устойчивыми антимикробными свойствами, открывает перспективы их использования в производстве отделочных, изоляционных и композиционных материалов и изделий в различных отраслях промышленности, что также будет способствовать обеспечению экологической безопасности окружающей среды.

Таблица 4
Table 4Антибактериальная активность раствора коллоидной меди на поверхности различных материалов
Antibacterial activity of copper colloidal solution on the surface of various materials

Материал тест-объекта	Наличие роста бактерий <i>Escherichia coli</i>				Наличие роста бактерий <i>Staphylococcus aureus</i>			
	Время наблюдения после обработки, ч							
	24	48	72	120	24	48	72	120
Керамическая плитка	-	-	-	-	-	-	-	-
Стальная пластина	-	-	-	-	-	-	-	-
Пластиковая пластина	-	-	-	-	-	-	-	-
Резиновая пластина	-	-	-	Интенсивность роста понижена	-	-	-	Интенсивность роста понижена

Список литературы

1. Батин М.О., Пичугин А.П., Хританков В.Ф., Кудряшов А.Ю. Повышение биологической стойкости полов из модифицированной древесины введением наноразмерных добавок // *Строительные материалы*. 2018. № 1–2. С. 52–57. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-756-1-2-52-57>
2. Строкова В.В., Нелубова В.В., Сивальнева М.Н., Рыкунова М.Д., Шаповалов Н.А. Устойчивость вяжущих систем различного состава к действию плесневых грибов // *Строительные материалы*. 2020. № 11. С. 41–46. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-786-11-41-46>
3. Погорельский И.П., Фролов Г.А., Гуринов К.И., Чернядьев А.В., Дурнев Е.А., Лундовских Е.А., Яснов С.Н., Кунгуров А.В. Микробиологические аспекты отбора наночастиц металлов для создания на их основе антимикробных дезинфицирующих композиций // *Дезинфекционное дело*. 2012. № 4. С. 37–40.
4. Джанпаизова В.М., Ташменов Р.С., Токсанбаева Ж.С., Аширбекова Г.Ш., Торебаев Б.П. Влияние на регенерацию экспериментальных ран перевязочных материалов, пропитанных наночастицами металлов // *Наука и мир*. 2019. № 6–1 (70). С. 26–28.
5. Бураков В.С., Севастенко Н.А., Тарасенко Н.В., Неваев Е.А. Синтез наночастиц методом импульсного электрического разряда в жидкости // *Журнал прикладной спектроскопии*. 2008. Т. 75. № 1. С. 111–120.
6. Ivanov L.F., Xu L.D., Bokova E.S., Ishkov A.D., Borisova O.N. Inventions in the area of nanomaterials and nanotechnologies. Part I. *Nanotechnologies in construction*. 2022. No. 14 (1), pp. 18–26. DOI: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-1-18-26>
7. Лукин А.А., Голубцова Ю.В., Сухих С.А. Изучение антимикробной активности коллоидного раствора меди // *Естественные и технические науки*. 2019. № 1 (127). С. 24–27.
8. Красочко П.А., Корочкин Р.Б., Понаськов М.А., Кашко Л.С., Кугелев И.М. Использование метода атомно-силовой микроскопии при изучении антибактериального действия коллоидных частиц серебра и меди. *Международная научная конференция «Тенденции повышения конкурентоспособности и экспортного потенциала продукции агропромышленного комплекса»: тезисы докладов*. Смоленск. 2021. С. 114–120.
9. Захарова О.В., Гусев А.А., Алтабаева Ю.В., Перова С.Ю. Биологические эффекты воздействия свежеприготовленных и суточных водных дисперсий наночастиц меди и оксида меди на бактерии E.COLI // *Российские нанотехнологии*. 2018. Т. 13. № 3–4. С. 69–75.
10. Бирюкова М.И., Юрков Г.Ю., Миргород Ю.А. Синтез наночастиц меди и их использование в модификации натуральных тканей. *Физика волоконистых материалов: Структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX)*. 2012. № 1. С. 49–55.

References

1. Batin M.A., Pichugin A.P., Khritankov V.F., Kudryashov A.Y. To improve the biological resistance floors made of modified wood the introduction of nano-scale additives. *Stroitel'nye Materialy* [Construction materials]. 2018. No. 1–2, pp. 52–57. (In Russian). DOI: <http://10.31659/0585-430X-2018-756-1-2-52-57>
2. Strokova V.V., Nelubova V.V., Sivalneva M.N., Rykunova M.D., Shapovalov N.A. Resistance of binding systems of various compositions to the action of molds. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 11, pp. 41–46. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-786-11-41-46>
3. Pogorelsky I.P., Frolov G.A., Gurin K.I., Chernyadiev A.V., Durnev E.A., Lundovskikh E.A., Yasnov S.N., Kungurov A.V. Microbiological aspects of the selection of metal nanoparticles to create antimicrobial disinfectant compositions. *Dezinfektsionnoye delo*. 2012. No. 4, pp. 37–40. (In Russian).
4. Dzhanpaizova V.M., Tashmenov R.S., Toksanbaeva Zh.S., Ashirbekova G.Sh. Torebaev B.P. Influence on the regeneration of experimental wounds of dressings impregnated with metal nanoparticles. *Nauka i Mir*. 2019. No. 6–1 (70), pp. 26–28. (In Russian).
5. Burakov V.S., Sevastenko N.A., Tarasenko N.V., Nevar E.A. Synthesis of nanoparticles using a pulsed electrical discharge in a liquid. *Zhurnal prikladnoy spektroskopii*. 2008. Vol. 75. No. 1, pp. 111–120. (In Russian).
6. Ivanov L.F., Xu L.D., Bokova E.S., Ishkov A.D., Borisova O.N. Inventions in the area of nanomaterials and nanotechnologies. Part I. *Nanotechnologies in Construction*. 2022. No. 14 (1), pp. 18–26. DOI: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-1-18-26>
7. Lukin A.A., Golubtsova Yu.V., Sukhikh S.A. Studying the antimicrobial activity of a colloidal copper solution. *Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki*. 2019. No. 1 (127), pp. 24–27. (In Russian).
8. Krasochko P.A., Korochkin R.B., Ponaskov M.A., Kashko L.S., Kugelev I.M. The use of atomic force microscopy in the study of the antibacterial effect of colloidal particles of silver and copper. *International Scientific conference "Tendencies to Increase Competitiveness and Export Potential of Agricultural Products": theses of reports*. Smolensk. 2021, pp. 114–120. (In Russian).
9. Zakharova O.V., Gusev A.A., Altabaeva Yu.V., Perova S.Yu. Biological effects of freshly prepared and 24-h aqueous dispersions of copper and copper oxide nanoparticles on E.COLI bacteria. *Rossiyskiye nanotekhnologii*. 2018. Vol. 13. No. 3–4, pp. 69–75. (In Russian).
10. Biryukova M.I., Yurkov G.Yu., Mirgorod Yu.A. Synthesis of copper nanoparticles and their use in modifying natural tissues. *Fizika voloknistykh materialov: Struktura, svoystva, naukoymkiye tekhnologii i materialy (SMARTEX)*. 2012. No. 1, pp. 49–55. (In Russian).
11. Grishina A.N., Korolev E.V. Nanosized diocidal modifiers based on silicate of metals for binders. *Stroitel'nye materialy, oborudovaniye, tekhnologii*

11. Гришина А.Н., Королев Е.В. Наноразмерные модификаторы на силикатной основе для вяжущих веществ // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2019. № 5–6 (244–245). С. 21–23.
12. Рахимова С.М., Виг А., Таусарова Б.Р., Кутжанова А.Ж. Использование наноразмерных частиц оксидов металлов для антимикробной отделки хлопковой ткани // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2015. № 3 (357). С. 202–205.
13. Тимошина Ю. А., Сергеева Е.А. Обзор современных методов получения текстильных материалов с антибактериальными свойствами // *Вестник Казанского технологического университета*. 2014. Т. 17. № 2. С. 94–96.
14. Shahidi S., Jamali A., Ghomi H., Dalal Sharifi S. In-situ synthesis of CuO nanoparticles on cotton fabrics using spark discharge method to fabricate antibacterial textile. *Journal of Natural Fibers*. 2018. Vol. 15. No. 6, pp. 870–881. DOI: 10.1080/15440478.2017.1376302
15. Таусарова Б.Р., Рахимова С.М. Целлюлозные текстильные материалы с антибактериальными свойствами, модифицированные наночастицами меди // *Химия растительного сырья*. 2018. № 1. С. 163–169. DOI: 10.14258/jcprm.2018012190
16. Миргород Ю.А., Борщ Н.А., Бородина В.Г., Юрков Г.Ю. Получение и характеристика хлопчатобумажной ткани, модифицированной наночастицами меди // *Химическая промышленность. Применение химической продукции*. 2012. Т. 89. № 6. С. 310–316.
17. Ostroukhov N.N., Tyanginskii A.Yu., Sleptsov V.V., Tserulev M.V. Electric discharge technology of production and diagnosis of metallic hydrosols with nanosized particles. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2014. Vol. 5 (3), pp. 284–288. DOI: 10.1134/S2075113314030113
18. Kristavchuk O.V., Sohatsky A.S., Skoi V.V., Kuklin A.I., Trofimov V.V., Nechaev A.N., Apel' P.Y., Kozlovskiy V.I., Sleptsov V.V. Structural characteristics and ionic composition of a colloidal solution of silver nanoparticles obtained by electrical-spark discharge in water. *Colloid Journal*. 2021. Vol. 83. No. 4, pp. 448–460. DOI: 10.1134/S1061933X21040049
19. Кудрявцева Е.В., Буринская А.А. Исследование влияния стабилизаторов на устойчивость коллоидных растворов биметаллических наночастиц медь-серебро // *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Сер. I: Естественные и технические науки*. 2021. № 2. С. 101–106.
20. Tyurnina A.E., Shur V.Y., Kozin R.V., Kuznetsov D.K., Pryakhina V.I., Burban G.V. Synthesis and investigation of stable copper nanoparticle colloids. *Physics of the Solid State*. 2014. Vol. 56. No. 7, pp. 1431–1437. DOI: 10.1134/S1063783414070324
21. Eivazihollagh A., Bäckström J., Dahlström C., Carlsson F., Ibrahim I., Lindman B., Edlund H., Norgren M. One-pot synthesis of cellulose-templated copper nanoparticles with antibacterial properties. *Materials Letters*. 2017. Vol. 187, pp. 170–172. DOI: 10.1016/j.matlet.2016.10.026
- XXI veka. 2019. No. 5–6 (244–245), pp. 21–23. (In Russian).
12. Rakhimova S.M., Vig A., Tausarova B.R., Kutzhanova A.Zh. The use of nanosized particles of metal oxides for antimicrobial finishing of cotton fabrics. *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*. 2015. No. 3 (357), pp. 202–205. (In Russian).
13. Timoshina Yu. A., Sergeeva E.A. Review of modern methods for obtaining textile materials with antibacterial properties. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2014. Vol. 17. No. 2, pp. 94–96. (In Russian).
14. Shahidi S., Jamali A., Ghomi H., Dalal Sharifi S. In-situ synthesis of CuO nanoparticles on cotton fabrics using spark discharge method to fabricate antibacterial textile. *Journal of Natural Fibers*. 2018. Vol. 15. No. 6, pp. 870–881. DOI: 10.1080/15440478.2017.1376302
15. Tausarova B.R., Rakhimova S.M. Cellulosic textile materials with antibacterial properties modified with copper nanoparticles. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*. 2018. No. 1, pp. 163–169. DOI: 10.14258/jcprm.2018012190. (In Russian).
16. Mirgorod Yu.A., Borshch N.A., Borodina V.G., Yurkov G.Yu. Obtaining and characterization of cotton fabric modified with copper nanoparticles. *Khimicheskaya promyshlennost'. Primeneniye khimicheskoy produktsii*. 2012. Vol. 89. No. 6, pp. 310–316. (In Russian).
17. Ostroukhov N.N., Tyanginskii A.Yu., Sleptsov V.V., Tserulev M.V. Electric discharge technology of production and diagnosis of metallic hydrosols with nanosized particles. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2014. Vol. 5 (3), pp. 284–288. DOI: 10.1134/S2075113314030113
18. Kristavchuk O.V., Sohatsky A.S., Skoi V.V., Kuklin A.I., Trofimov V.V., Nechaev A.N., Apel' P.Y., Kozlovskiy V.I., Sleptsov V.V. Structural characteristics and ionic composition of a colloidal solution of silver nanoparticles obtained by electrical-spark discharge in water. *Colloid Journal*. 2021. Vol. 83. No. 4, pp. 448–460. DOI: 10.1134/S1061933X21040049
19. Kudriavtseva E.V., Burinskaya A.A. Investigation of the effect of stabilizers on the stability of colloidal solutions of bimetallic copper-silver nanoparticles. *Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Ser. I: Natural and technical sciences*. 2021. No. 2, pp. 101–106. (In Russian).
20. Tyurnina A.E., Shur V.Y., Kozin R.V., Kuznetsov D.K., Pryakhina V.I., Burban G.V. Synthesis and investigation of stable copper nanoparticle colloids. *Physics of the Solid State*. 2014. Vol. 56. No. 7, pp. 1431–1437. DOI: 10.1134/S1063783414070324
21. Eivazihollagh A., Bäckström J., Dahlström C., Carlsson F., Ibrahim I., Lindman B., Edlund H., Norgren M. One-pot synthesis of cellulose-templated copper nanoparticles with antibacterial properties. *Materials Letters*. 2017. Vol. 187, pp. 170–172. DOI: 10.1016/j.matlet.2016.10.026

Т.В. ЖДАНОВА¹, инженер (аспирант) (zhdanovatv@mgsu.ru),
Т.А. МАЦЕЕВИЧ¹, д-р физ.-мат. наук (MatseevichTA@mgsu.ru);
А.А. АСКАДСКИЙ^{1,2}, д-р хим. наук (andrey@ineos.ac.ru)

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

² Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН (119991, г. Москва, ул. Вавилова, 28)

Оценка модулей упругости смесей древесно-полимерных композитов с минеральным наполнителем

Изложен способ прогнозирования модуля упругости материалов на основе древесно-полимерных композитов, содержащих в качестве наполнителя CaCO₃. Эти материалы содержат тонкие дисперсии поливинилхлорида, древесной муки и кальцита. Проанализированы модули упругости при одноосном сжатии, модули сдвига и модули объемной упругости. Построены зависимости модулей упругости при одноосном нагружении, модулей сдвига и модулей объемной упругости от содержания CaCO₃. Введение минерального наполнителя в виде CaCO₃ приводит к увеличению модуля упругости при одноосном нагружении в условиях сжатия E до 3230 МПа при содержании CaCO₃ по отношению к древесному наполнителю, равном 42%. Прогноз модуля упругости для композитов, содержащих тосо-бамбук в качестве древесного наполнителя, показывает, что при содержании древесного наполнителя 42% модуль упругости E может возрасти до 4400 МПа. Модуль сдвига G при таком же содержании CaCO₃ имеет значение 1320 МПа, а модуль объемной упругости K – значение 3120 МПа.

Ключевые слова: модули упругости при сжатии, константы Ламе, ван-дер-ваальсовы объемы, модуль сдвига, модуль объемной упругости, поливинилхлорид, древесина хвойных пород, кальцит, коэффициент Пуассона.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект «Теоретико-экспериментальное конструирование новых композитных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенных и биогенных угроз» № FSWG-2020-0007 (МГСУ) и в рамках Государственного задания ИНЭОС РАН № 075-03-2023-642 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Для цитирования: Жданова Т.В., Матеевич Т.А., Аскадский А.А. Оценка модулей упругости смесей древесно-полимерных композитов с минеральным наполнителем // *Строительные материалы*. 2023. № 1–2. С. 106–111.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-106-111>

T.V. ZHDANOVA¹, Engineer (zhdanovatv@mgsu.ru),

T.A. MATSEEVICH¹, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics) (MatseevichTA@mgsu.ru);

A.A. ASKADSKII^{1,2}, Doctor of Sciences (Chemistry) (andrey@ineos.ac.ru)

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavl Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

² A.N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of Russian Academy of Sciences (INEOS RAS)

(28, Vavilova Street, Moscow, 119991, Russian Federation)

Evaluation of Elastic Modulus of Mixtures of Wood-Polymer Composites with Mineral Filler

The method for predicting the elasticity modulus of materials based on wood-polymer composites containing CaCO₃ as the filler is described. These materials contain fine dispersions of PVC, wood flour and calcite. Moduli of elasticity under uniaxial compression, shear moduli and moduli of bulk elasticity are analyzed. The dependences of elastic moduli under uniaxial loading, shear moduli, and bulk elasticity moduli on CaCO₃ content are plotted. The introduction of a mineral filler in the form of CaCO₃ leads to an increase in the modulus of elasticity under uniaxial loading under compression conditions E up to 3230 MPa at a CaCO₃ content of 42% relative to the wood filler. The prediction of the modulus of elasticity for composites containing moso bamboo as wood filler shows that with the wood filler content of 42%, the modulus of elasticity E can increase to 4400 MPa. The shear modulus G at the same CaCO₃ content is 1320 MPa, and the bulk modulus K is 3120 MPa.

Keywords: compressive moduli, Lamé constants, van der Waals volumes, shear modulus, bulk modulus, polyvinyl chloride, softwood, calcite, Poisson's ratio.

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Contract No. 075-03-2023-642).

For citation: Zhdanova T.V., Matseevich T.A., Askadskii A.A. Evaluation of elastic modulus of mixtures of wood-polymer composites with mineral filler. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 1–2, pp. 106–111. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-106-111>

Кратко рассмотрим работы, связанные с программированием механических свойств смесей полимеров. Интересное наблюдение для смесей полистирола и АБС-пластика проведено в работе [1]. Механические свойства смесей оказались лучше, чем для компонентов, из которых смеси были изготовлены. Авторы работы [1] объясняют это хорошей совместимостью данных полимеров. Проверим это. Оценим совместимость АБС-пластика с полистиролом с помощью

критерия совместимости, изложенного в монографии [2] и учебном издании [3]. Критерий состоит из двух частей. Если в первый полимер вводится небольшое количество второго полимера, то в случае совместимости критерий выглядит следующим образом:

$$\mu_1 = \frac{\delta_{п,1}^2}{\delta_{п,2}^2} < 1,374 \Phi(\Phi - \sqrt{\Phi^2 - 1 + a_1}) = 2\rho\beta_1, \quad (1)$$

где $\delta_{п,1}$ – параметр растворимости полимера 1; $\delta_{п,2}$ – параметр растворимости полимера 2;

$a_1 = \gamma_{n,1;n,2} / \gamma_{n,2}$; $\gamma_{n,1;n,2}$ – межфазное натяжение; $\gamma_{n,2}$ – поверхностная энергия полимера 2.

Величина Φ определяется из соотношения:

$$\Phi = \frac{4(V_{n,1} \cdot V_{n,2})^{1/3}}{(V_{n,1}^{1/3} \cdot V_{n,2}^{1/3})^2}, \quad (2)$$

где $V_{n,1}$ и $V_{n,2}$ – мольные объемы полимеров 1 и 2 соответственно.

Величина $\gamma_{n,1;n,2}$ определяется с помощью формулы:

$$\gamma_{n,1;n,2} = \gamma_{n,1} + \gamma_{n,2} - 2\Phi(\gamma_{n,1} \cdot \gamma_{n,2})^{1/2}. \quad (3)$$

Если во второй полимер вводится небольшое количество первого полимера, то в случае совместимости критерий выглядит следующим образом:

$$\mu_2 = \frac{\delta_{n,2}^2}{\delta_{n,1}^2} < 1,374\Phi(\Phi - \sqrt{\Phi^2 - 1 + a_2}) = 2\rho\beta_2, \quad (4)$$

где $a_2 = \gamma_{n,1;n,2} / \gamma_{n,1}$.

При содержании в АБС-пластике 20% полиакрилонитрила, 20% полибутадиена и 60% полистирола получены следующие характеристики: мольный объем $V_m = 79,9 \text{ см}^3/\text{моль}$; параметр растворимости $\delta = 19 \text{ (Дж/см}^3)^{1/2}$; поверхностная энергия $\gamma = 40,8 \text{ мН/м}$. Для полистирола $V_m = 97,1 \text{ см}^3/\text{моль}$; $\delta = 18,7 \text{ (Дж/см}^3)^{1/2}$; $\gamma = 40,4 \text{ мН/м}$. Если в полистирол добавляется небольшое количество АБС-пластика, то $\mu_1 = 0,97$ и $2\rho\beta_1 = 1,36$. Если в АБС-пластик добавляется небольшое количество полистирола, то $\mu_2 = 1,03$ и $2\rho\beta_2 = 1,36$. Во всех случаях левая часть критерия совместимости полимеров меньше правой. Это свидетельствует о полной совместимости компонентов.

Различные расчетные методы оценки зависимости модуля упругости от состава смесей рассмотрены в работе [4]. Эти зависимости часто являются экстремальными и обладают максимумами, т. е. модули упругости смесей могут превосходить средние значения для различных составов.

Морфология и свойства смесей полистирола с сополимером стирола и акрилонитрила исследованы в работе [5]. Измеренные модули упругости смесей сравнивали с расчетными значениями, которые описывали с помощью теории Дои [5]. Нашли, что основную роль играет увеличение размера частиц, связанное с изменением межфазного натяжения и вязкости смесей. Влияние межфазного натяжения в несовместимых смесях полимеров изучалось в ряде работ [6–10]. Большое внимание уделяется морфологии смесей, размерам частиц, попыткам приготовления тонкодисперсных смесей и влиянию всех этих факторов на модуль упругости и другие механические свойства [11–14].

Несмотря на наличие большого числа работ, посвященных структуре и механическим свойствам смесей, тема, анализируемая в данной работе, тем не менее до конца не исследована. Это относится к возможности предсказания совместимости полимеров на основе их химического строения и фазового состояния, оценке модуля упругости смеси с учетом фазового и физического состояния смешиваемых полимеров (дисперсия двух твердых полимеров, дисперсия этих полимеров и минерального наполнителя). Все это влияет на модуль

упругости материалов на основе смесей полимеров и минерального наполнителя. В данной статье рассмотрена дисперсия поливинилхлорида, древесной муки и минерального наполнителя в виде кальцита.

Расчетная часть

Испытания механических свойств проводили согласно ГОСТ 4651–82 «Пластмассы. Метод испытания на сжатие». Высота образца h при испытаниях на сжатие рассчитывается по формуле:

$$h = \frac{\lambda}{3,46} a, \quad (5)$$

где λ – константа; a – размер ребра квадратного основания образца.

При условии, если устойчивость образца (стержня) гарантируется, величина $\lambda = 6$. В нашем случае использовались образцы размером $4 \times 4 \times 6 \text{ мм}$. Если образец имеет величину $a = 4 \text{ мм}$, расчет по формуле (5) приводит к значению $h \approx 7 \text{ мм}$. Следовательно, устойчивость образцов высотой 6 мм при нагружении будет обеспечена.

Задача потери устойчивости стержня решена Эйлером. По формуле Эйлера критическая сила $F_{кр}$, при которой теряется устойчивость стержня, определяется:

$$F_{кр} = \frac{\pi^2 E J_{min}}{(\mu \cdot l)^2}, \quad (6)$$

где E – модуль упругости; J_{min} – минимальный момент инерции; $\mu \cdot l$ – приведенная длина стержня (образца); l – фактическая длина стержня; μ – коэффициент приведения длины, показывающий, во сколько раз необходимо изменить длину стержня, чтобы критическая сила для этого стержня стала равна критической силе для шарнирно опертой балки.

Вернемся к модулю упругости. Модуль упругости при одноосном нагружении в общем виде зависит от коэффициента Пуассона ν :

$$\nu_{xy} = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}; \quad \nu_{zx} = \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x}, \quad (7)$$

где ε_x , ε_y , ε_z – относительные деформации по соответствующим осям.

Такой модуль упругости связан с константами Ламе λ . Первая константа Ламе λ_1 связывает модуль упругости при одноосном нагружении с коэффициентом Пуассона:

$$\lambda_1 = \frac{E\nu}{[(1+\nu) \cdot (1-2\nu)]}; \quad (8)$$

$$\lambda_1 = K - \frac{2}{3}\lambda_2, \quad (9)$$

где ν – коэффициент Пуассона, K – модуль объемного сжатия.

Вторая константа Ламе λ_2 связывает модуль упругости E с модулем сдвига, причем они равны друг другу:

$$\lambda_2 = G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (10)$$

где $G = r/\alpha$; r – касательное напряжение; α – угол сдвига.

Рассмотрим соотношения, связывающие модуль упругости при сжатии E с модулями сдвига и с моду-

лем объемной упругости. Связь модуля упругости при сжатии E с модулем сдвига G и с объемным модулем K определяется соотношениями:

$$E = G \frac{3\lambda + 2G}{\lambda + G}; \quad (11)$$

$$E = 2G(1 + \lambda); \quad (12)$$

$$E = 9K \frac{K - \lambda}{3K - \lambda}; \quad (13)$$

$$E = 3K(1 - 2\lambda). \quad (14)$$

Проанализируем зависимости модулей упругости от содержания природного полимера – древесины. Древесина вводится в технологическую смесь с ПВХ, в результате чего модуль упругости существенно возрастает. Для расчета модуля упругости необходимо знать состав древесины разных пород и физические параметры ПВХ и компонентов древесины. Эти параметры заимствованы из литературных источников [15–19] и представлены в табл. 1 и 2.

Молекулярная масса древесины, которая является вторым полимером, вводимым в смесь с ПВХ, рассчитывалась по формуле:

$$M_2 = \alpha_{ц} \cdot M_{ц} + \alpha_{л} \cdot M_{л} + \alpha_{гц} \cdot M_{гц}, \quad (15)$$

где $\alpha_{ц}$, $\alpha_{л}$ и $\alpha_{гц}$ – доли целлюлозы, лигнина и гемицеллюлоз соответственно; $M_{ц}$, $M_{л}$ и $M_{гц}$ – молекулярные массы целлюлозы, лигнина и гемицеллюлоз соответственно.

Величины молекулярных масс лигнинов и гемицеллюлоз взяты в расчет как средние значения. Например, для гемицеллюлоз среднее значение рассчитывалось на основе значений молекулярных масс для шестнадцати гемицеллюлоз различного химического строения. Эти данные приведены в монографии [12].

Аналогичным образом рассчитывали ван-дер-ваальсовы объемы древесины:

$$\left(\sum_i \Delta V_i\right)_2 = \alpha_{ц} \cdot \left(\sum_i \Delta V_i\right)_{ц} + \alpha_{л} \cdot \left(\sum_i \Delta V_i\right)_{л} + \alpha_{гц} \cdot \left(\sum_i \Delta V_i\right)_{гц},$$

– ван-дер-ваальсовы объемы целлюлозы, лигнина и гемицеллюлоз соответственно.

Таблица 1
Table 1

Основной состав древесины
The main composition of wood

Древесина	Целлюлоза, %	Лигнин, %	Гемицеллюлоза, %
Хвойные породы	42,5	28,5	22,5
Мосо-бамбук	44,6	20,3	23,6

Таблица 2
Table 2

Физические параметры основных компонентов
древесины хвойных пород
Physical parameters of the main components of softwood

Компоненты древесины	Молекулярная масса повторяющегося звена	Ван-дер-ваальсов объем, Å ³
Целлюлоза	162	102,6
Лигнин	340	302
Гемицеллюлозы	292	203

Используя значения всех параметров в табл. 1 и 2, с помощью уравнения (17), получили зависимости модуля упругости от весовой доли древесины хвойных пород и мосо-бамбука, показанные на рис. 1:

$$E = \frac{1 + \frac{\left[\left(\sum_i \Delta V_i\right)_{p2} / \left(\sum_i \Delta V_i\right)_{p1} - 1\right]}{1 + \frac{M_{p2}}{M_{p1}} \left(\frac{1}{\alpha_{w2}} - 1\right)}}{\frac{1}{E_1} + \frac{\left[\frac{\left(\sum_i \Delta V_i\right)_{p2} / \left(\sum_i \Delta V_i\right)_{p1} - \frac{1}{E_1}}{1 + \frac{M_{p2}}{M_{p1}} \left(\frac{1}{\alpha_{w2}} - 1\right)}\right]}{1 + \frac{M_{p2}}{M_{p1}} \left(\frac{1}{\alpha_{w2}} - 1\right)}}. \quad (17)$$

На рис. 1 показаны модули упругости, измеренные при растяжении композитов ПВХ с древесиной. Модуль упругости E композита с древесиной хвойных пород существенно возрастает с увеличением концентрации древесины. При соотношении ПВХ и древесины 40:60, которое применяется при изготовлении композитов в отечественной компании, модуль упругости при растяжении E возрастает от 2400 до 4660 МПа. Это отражено точкой на кривой 1 на графике. Как видно из графика, экспериментально измеренный модуль упругости хорошо совпадает с расчетным модулем. При введении в ПВХ мосо-бамбука модуль упругости при растяжении также возрастает, но не столь значительно по сравнению с модулем упругости при введении древесины хвойных пород. Этот вывод нуждается в экспериментальном подтверждении.

Теперь рассчитаем зависимости модулей сдвига G и модуля объемной упругости K от весовой доли второго полимера. Для этого подставим в формулу (17) вместо E_1 и E_2 модули G_1 и G_2 , а затем подставим значения K_1 и K_2 . Значения G_1 и G_2 , а также K_1 и K_2 рассчитывали по формулам (12) и (14). Коэффициенты Пуассона и величины модулей G и K показаны в табл. 3. При этом величина коэффициента Пуассона для древесины взята из работы [20], для поливинилхлорида и кальцита – из Интернета.

Зависимость модуля сдвига от весовой доли второго полимера показана на рис. 2.

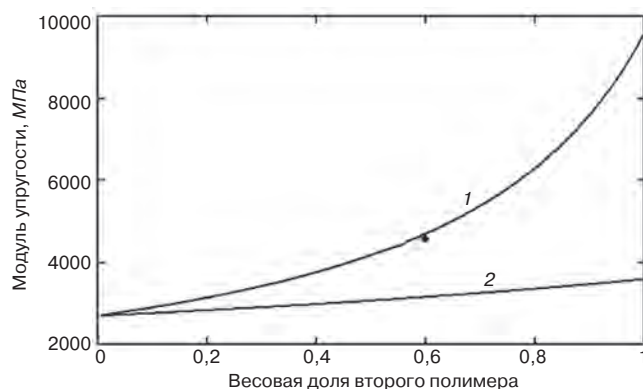


Рис. 1. Зависимости модуля упругости от весовой доли второго полимера: 1 – древесина хвойных пород; 2 – древесина мосо-бамбука
Fig. 1. Dependences of the elastic modulus on the weight fraction of the second polymer: 1 – coniferous wood; 2 – moso-bamboo wood

Таблица 3
Table 3

Значения коэффициентов Пуассона
и величин модулей G и K
Values of Poisson's ratios and moduli G and K

Компоненты	Коэффициент Пуассона	E , МПа	G , МПа	K , МПа
Древесина	0,08	9500	4400	3770
Поливинилхлорид	0,37	2400	880	3080
Кальцит CaCO_3	0,3	6500	1080	5420

Зависимость модуля объемной упругости K от весовой доли второго полимера показана на рис. 3.

Теперь проанализируем зависимость модуля упругости композитов, в которых часть древесной муки заменена на минеральный наполнитель, от весовой доли наполнителя. Воспользуемся уравнени-

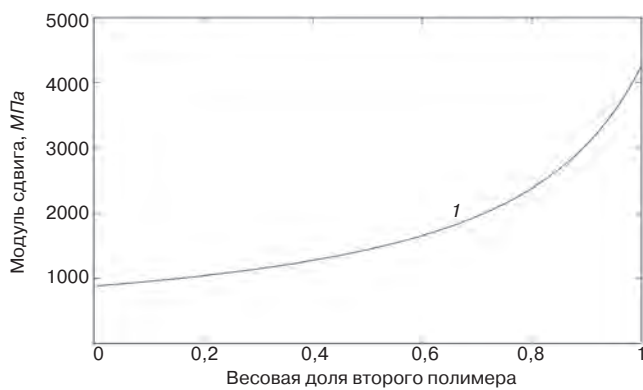


Рис. 2. Зависимость модуля сдвига от весовой доли второго полимера
Fig. 2. Dependence of the shear modulus on the weight fraction of the second polymer

ем (17), подставив в него вместо E_1 и E_2 модули G_1 и G_2 , а затем значения K_1 и K_2 .

Модули упругости при одноосном нагружении E были определены из кривых сжатия, измеренных для всех образцов, содержащих разное количество CaCO_3 . Были проведены параллельные измерения для трех образцов каждой серии. Измерения проведены на приборе для микромеханических испытаний конструкции Дубова–Регеля, модифицированного с целью преобразования показаний фотоэлектрооптического динамометра в электрические сигналы, которые регистрируются с помощью гальванометра. Все данные автоматически записываются на компьютере, в том числе и результаты измерений и расчетов. Использовались образцы размером $4 \times 4 \times 6$ мм с плоскопараллельными гранями. Скорость сжатия составляла $0,187$ мм/мин. Кривые сжатия показаны на рис. 4.

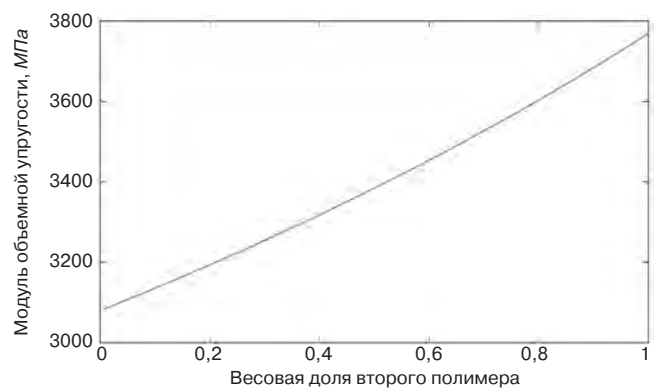


Рис. 3. Зависимости модуля объемной упругости от весовой доли второго полимера

Fig. 3. Dependences of the bulk elasticity modulus on the weight fraction of the second polymer

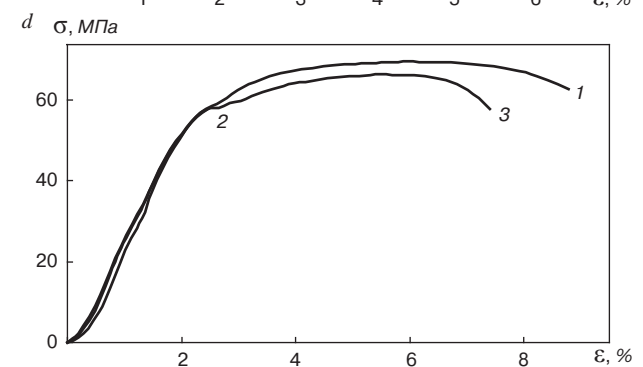
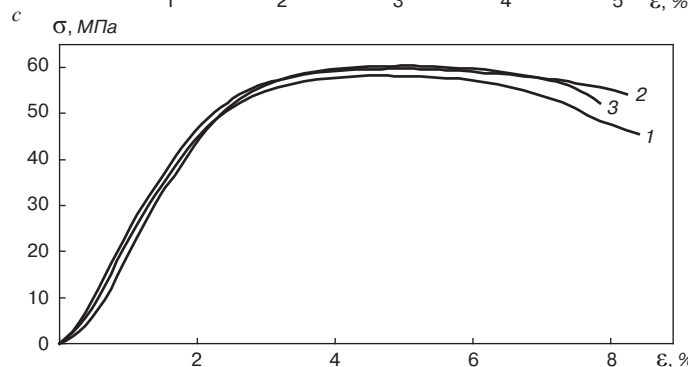
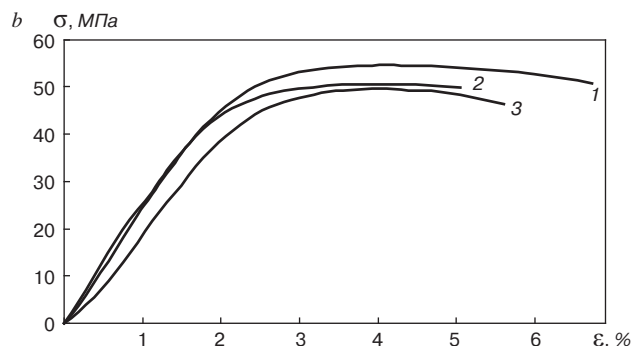
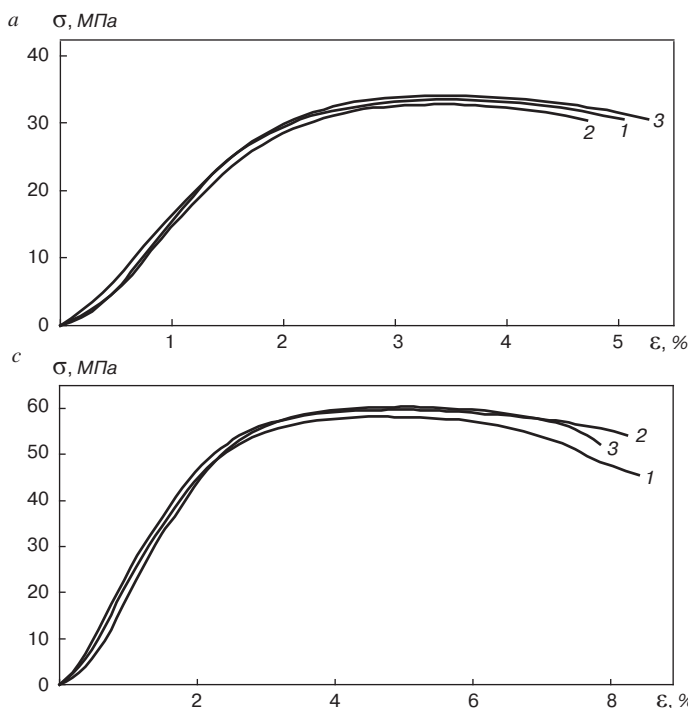


Рис. 4. Кривые сжатия образцов композитов, содержащих полимерное связующее и минеральный наполнитель. Содержание CaCO_3 равно 0% (a); 30% (b); 40% (c); 60% (d) по отношению к древесной муке. Номера на кривых соответствуют номерам параллельных измерений

Fig. 4. Compression curves of composite samples containing a polymeric binder and a mineral filler. The content of CaCO_3 is 0% (a); 30% (b); 40% (c); 60% (d) in relation to wood flour. The numbers on the curves correspond to the numbers of parallel measurements

Таблица 4
Table 4

Модули упругости E образцов при одноосном сжатии
Elastic moduli E of specimens under uniaxial compression

Образец	Доля CaCO_3 , %	Усредненный модуль упругости E , МПа
<i>a</i>	0	1930
<i>b</i>	30	2660
<i>c</i>	40	2900
<i>d</i>	60	3230
CaCO_3	100	6500

Значения модуля упругости приведены в табл. 4.

Прогноз модуля упругости был сделан для двухкомпонентной системы. Первый компонент – это древесно-полимерный композит, содержащий ПВХ и древесную муку, полученную из хвойных пород. Второй компонент – CaCO_3 . Эффективный ван-дер-ваальсов объем этого компонента был рассчитан в работе [21]:

$$\left(\sum_i \Delta V_i\right)_{\text{CaCO}_3} = 140 \cdot \text{Å}^3.$$

Модуль упругости E_1 при одноосном нагружении для древесно-полимерного композита, не содержащего минеральный наполнитель, равен 1930 МПа. Средний модуль упругости E_2 CaCO_3 равен 6500 МПа. Используя это значение, можно рассчитать модуль упругости по уравнению (17) для всех концентраций минерального наполнителя и сравнить с экспериментальными данными. В результате получается зависимость модуля упругости от концентрации CaCO_3 , показанная на рис. 5.

Из данных, приведенных в табл. 4 и на рис. 5, видно, что модуль упругости при сжатии возрастает при увеличении концентрации минерального наполнителя. Одновременно можно заключить, что экспериментальные значения модулей упругости совпадают с расчетными значениями.

Проведем такие же расчеты для модулей сдвига G и модуля объемной упругости K . Расчеты величин G и K проведены по формулам (12) и (14), а зависимости G и K – по формуле (17), в которую вместо величин модуля E подставлены величины модулей G и K . На рис. 6 показаны зависимости модуля сдвига от весовой доли CaCO_3 по отношению к древесному наполнителю.

На рис. 7 показаны аналогичные зависимости модуля объемной упругости.

Обе зависимости свидетельствуют о повышении модулей G и K с ростом содержания минерального наполнителя в композиции ДПК.

Заключение

Возможность расчета модулей упругости материалов на основе смесей твердых полимеров и минерального наполнителя продемонстрирована на примере смеси поливинилхлорида и древесины 1 с кальцитом 2. Зависимости модулей упругости от мольной и весовой доли обладают различной формой, связанной с ван-дер-ваальсовым объемом компонентов, молекулярной массой повторяющихся звеньев, плотностью компонентов. Найдено, что добавление минерального наполнителя в смесь ПВХ и древесины

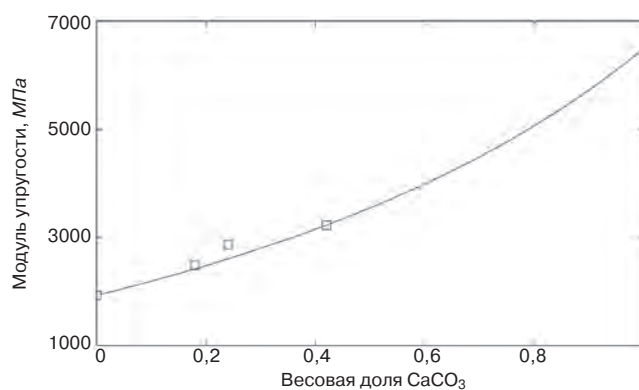


Рис. 5. Зависимость модуля упругости E от весовой доли CaCO_3 по отношению к древесному наполнителю. Кривая – расчетная, точки – экспериментальные

Fig. 5. Dependence of the elastic modulus E on the weight fraction of CaCO_3 in relation to the wood filler. The curve is calculated, the points are experimental

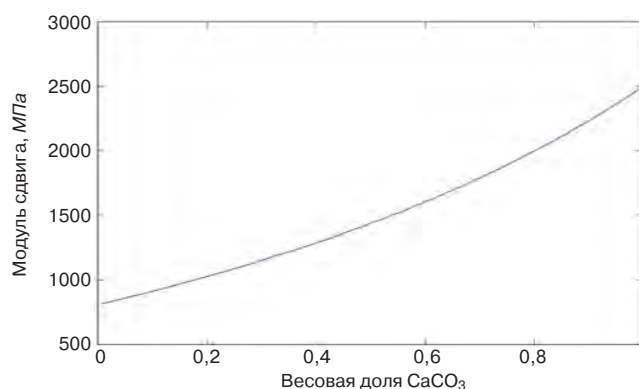


Рис. 6. Зависимость модуля сдвига от весовой доли CaCO_3 по отношению к древесному наполнителю

Fig. 6. Dependence of the shear modulus on the weight fraction of CaCO_3 in relation to the wood filler

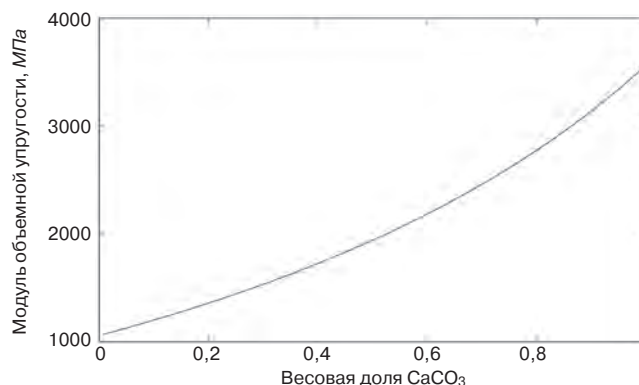


Рис. 7. Зависимость модуля объемной упругости от весовой доли CaCO_3 по отношению к древесному наполнителю

Fig. 7. Dependence of the modulus of bulk elasticity on the weight fraction of CaCO_3 in relation to the wood filler

способствует возрастанию модуля упругости. Модуль при одноосном нагружении E имеет значение 3230 МПа при содержании CaCO_3 по отношению к древесному наполнителю, равном 42%. Модуль сдвига G при таком же содержании CaCO_3 имеет значение 1320 МПа, а модуль объемной упругости – значение 3120 МПа. Таким образом, можно заменой части древесины на минеральный наполнитель добиться значительного увеличения модулей упругости в древесно-полимерных композитах.

Список литературы / References

- Buthaina A. Ibrahim, Karrer M. Kadum. Influence of polymer blending on mechanical and thermal properties. *Modern Applied Science*. 2010. Vol. 4. No. 9, pp. 157–161. DOI: 10.5539/mas.v4n9p157
- Аскадский А.А., Кондращенко В.И. Компьютерное материаловедение полимеров. Т. 1. Атомно-молекулярный уровень. М.: Издательство Научный Мир, 1999. 543 с.
- Askadsky A.A., Kondrashchenko V.I. Komp'yuternoye materialovedeniye polimerov. T. 1. Atomno-molekulyarnyy uroven' [Computer materials science of polymers. T. 1. Atomic-molecular level]. Moscow: Nauchniy Mir Publishing House. 1999. 543 p.
- Аскадский А.А., Попова М.Н., Кондращенко В.И. Физико-химия полимерных материалов и методы их исследования. М.: Издательство АСВ, 2015. 407 с.
- Askadsky A.A., Popova M.N., Kondrashchenko V.I. Fiziko-khimiya polimernykh materialov i metody ikh issledovaniya [Physico-chemistry of polymeric materials and methods of their research]. Moscow: ASV Publishing House. 2015. 407 p.
- Saxe P., Freeman C., Rigby D. Mechanical properties of glassy polymer blends and thermosets. Materials Design, Inc., Angel Fire, NM and San Diego, CA. LAMMPS Users' Workshop and Symposium, Albuquerque, NM, August 8, 2013.
- Doi M., Ohta T. Dynamics and rheology of complex interfaces. I. *The Journal of Chemical Physics*. 1991. Vol. 95, p. 1242. <https://doi.org/10.1063/1.461156>
- Anastasiadis S.H., Gancarz I., Koberstein J.T. Interfacial tension of immiscible polymer blends: temperature and molecular weight dependence. *Macromolecules*. 1988. Vol. 21 (10), pp. 2980–2987.
- Biresaw G., Carriere C., Sammler R. Effect of temperature and molecular weight on the interfacial tension of PS/PDMS blends. *Rheologica Acta*. 2003. Vol. 42. Iss. 1–2, pp. 142–147.
- Ellingson P.C., Strand D.A., Cohen A., Sammler R.L., Carriere C.J. Molecular weight dependence of polystyrene/poly(methyl methacrylate) interfacial tension probed by imbedded-fiber retraction. *Macromolecules*. 1994. Vol. 27. Iss. 6, pp. 1643–1647.
- Gramespacher H., Meissner J. Interfacial tension between polymer melts measured by shear oscillations of their blends. *Journal of Rheology*. 1992. Vol. 36, pp. 1127–1142. <https://doi.org/10.1122/1.550304>
- Lacroix C., Bousmina M., Carreau P.J., Favis B.D., Michel A. Properties of PETG/EVA blends: 1. Viscoelastic, morphological and interfacial properties. *Polymer*. 1996. Vol. 37. Iss. 14, pp. 2939–2947. [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(96\)89389-X](https://doi.org/10.1016/0032-3861(96)89389-X)
- Li R., Yu W., Zhou C. Rheological characterization of droplet-matrix versus co-continuous morphology. *Journal of Macromolecular Science, Part B. Physics*. 2006. Vol. 45. Iss. 5, pp. 889–898. <https://doi.org/10.1080/00222340600777496>
- Chopra D., Kontopoulou M., Vlassopoulos D., Hatzikiriakos S.G. Effect of maleic anhydride content on the rheology and phase behavior of poly(styrene-co-maleic anhydride)/poly(methyl methacrylate) blends. *Rheologica Acta*. 2002. Vol. 41 (1), pp. 10–24. DOI: 10.1007/s003970200001
- Guenther G.K., Baird D.G. An evaluation of the Doi-Ohta theory for an immiscible polymer blend. *Journal of Rheology*. 1996. Vol. 40, Iss. 1. <https://doi.org/10.1122/1.550785>
- Hashimoto T., Takenaka M., Jinnai H. Scattering studies of self-assembling processes of polymer blends in spinodal decomposition. *Journal of Applied Crystallography*. 1991. Vol. 24. Iss. 5, pp. 457–466. <https://doi.org/10.1107/S0021889891000444>
- Bicerano J. Prediction of polymer properties. New-York, Marcel Dekker, Inc. 1996. 669 p.
- Аскадский А.А., Ван С., Курская Е.А., Кондращенко В.И., Жданова Т.В., Матеевич Т.А. Возможности предсказания коэффициента термического расширения материалов на основе поливинилхлорида // *Строительные материалы*. 2019. № 11. С. 57–65. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-776-11-57-65>
- Askadskii A.A., Wang C., Kurskaya E.A., Kondrashchenko V.I., Zhdanova T.V., Matseevich T.A. Possibilities for predicting the coefficient of thermal expansion of materials based on polyvinyl chloride. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 11, pp. 57–65. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-776-11-57-65>
- Azeez M.A., Orege J.I. Bamboo, its chemical modification and products. Bamboo: Current and Future Prospects. 2018. 25 p.
- Li X. Physical, chemical, and mechanical properties of bamboo and its utilization potential for fiberboard manufacturing. LSU Master's Theses. 2004. 866 p.
- Болобова А.В., Аскадский А.А., Кондращенко В.И., Рабинович М.Л. Теоретические основы биотехнологии древесных композитов. Ферменты, модели, процессы. М.: Наука, 2002. 343 с.
- Bolobova A.V., Askadsky A.A., Kondrashchenko V.I., Rabinovich M.L. Teoreticheskiye osnovy biotekhnologii drevesnykh kompozitov. Fermenty, modeli, protsessy [Theoretical bases of biotechnology of wood composites. Enzymes, models, processes]. Moscow: Nauka. 2002. 343 p.
- Мюллер О.Д. Совершенствование технологии производства древесных гранул: Дис. ... д-ра техн. наук. Северодвинск, 2015. 289 с.
- Muller O.D. Improving the technology of production of wood pellets. Diss. Doctor of Science (Engineering). Severodvinsk. 2015. 289 p. (In Russian).
- Жданова Т.В. Структурообразование древесно-полимерных композитов и влияние жидких агрессивных сред на их физико-механические характеристики: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2022.
- Zhdanova T.V. Structure formation of wood-polymer composites and the influence of liquid aggressive media on their physical and mechanical characteristics. Diss... Cand. of Sciences (Engineering). Moscow. 2022. (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 графическом редакторе Adobe Illustrator (не выше v.CS6) и сохранен в форматах *.ai, *.eps соответственно. Сканирование графического материала и импорт 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>

ADDE®

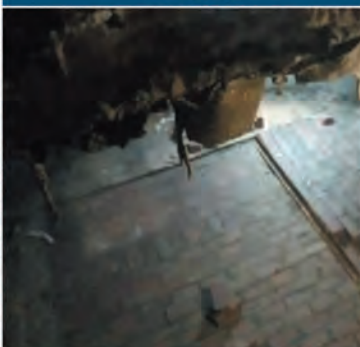


Бак адсорбционной жидкости
серной кислоты 1-5%, фосфорной кислоты 1-5% до 100 °С

ДО



ПОСЛЕ

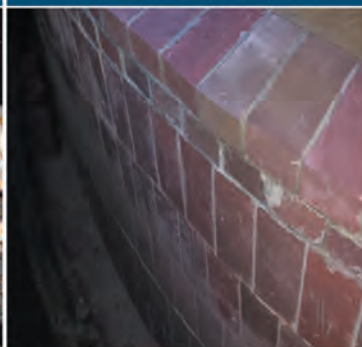


Фундамент хранилища азотной кислоты,
конц. кислоты 55%

ДО



ПОСЛЕ



Экстрактор фосфорной кислоты
конц. 1-4% t до 100 °С

ДО



ПОСЛЕ



Емкости фосфорной кислоты,
конц. 1-5%, t +60 °С

ПОДГОТОВЛЕННЫЙ РЕМОНТНЫЙ
УЧАСТОК



ПОСЛЕ



Емкости фосфорной кислоты,
конц. 1-5%, t +60 °С

ЗАГУММИРОВАННАЯ ПОВЕРХНОСТЬ
РЕМОНТНОГО УЧАСТКА



ПОСЛЕ

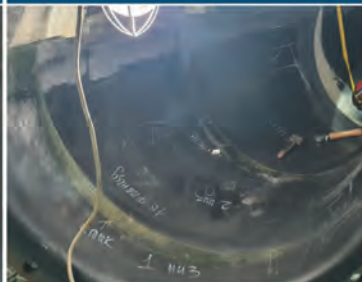


Секция газоходовентиллятора
до 100 °С

ПОДГОТОВЛЕННАЯ СЕКЦИЯ К
ГУММИРОВКЕ



ПОСЛЕ



КОМПЛЕКСНОЕ РЕШЕНИЕ ПО ЗАЩИТЕ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ АГРЕССИВНЫХ СРЕД



<http://spechimprotekt.ru>



spechimprotekt@mail.ru



8-920-517-70-55