



IN THE ISSUE:

В НОМЕРЕ:

- The Journal "Nanotechnology in Construction" is in 1st place in the SCIENCE INDEX ranking list for 2022 under the category "Construction. Architecture"
- Study on the Influence of Zeolite Nanoparticles on Selected Properties of Portland Cement
- Construction heat and sound insulating composite materials with high tensile strength
- How to properly test and apply BETOPRESS® lyophobic sols and sol-based modifiers in cement concrete
- Журнал «Нанотехнологии в строительстве» – на 1 месте в рейтинге SCIENCE INDEX по тематике «Строительство. Архитектура»
- Исследование влияния наночастиц цеолита на некоторые свойства тампонажного портландцемента
- Строительные тепло- и звукоизоляционные композиционные материалы с высоким сопротивлением к растяжению
- Как правильно испытать и применить лиофобные золи «БЕТОПРЕСС»® и золь-модификаторы на их основе в цементном бетоне

www.nanobuild.ru

e-mail: info@nanobuild.ru

ISSUED WITH SUPPORT OF



RUSSIAN ACADEMY
OF ENGINEERING



INTERNATIONAL ACADEMY
OF ENGINEERING



WUHAN UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY (CHINA)



BEIJING INSTITUTE
OF INTELLECTUAL
PROPERTY (CHINA)



NANOTECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION

ISSN 2075-8545 (online)

NANOTEKHNOLOGII V STROITEL'STVE

НАНОТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: НАУЧНЫЙ ИНТЕРНЕТ-ЖУРНАЛ

«Nanotechnologies in Construction» is a peer-reviewed journal.

The main aim of the Journal is to provide information support for the process of invention and practical application of science intensive technologies (mostly nanotechnological products) in construction, communal and housing services, joint areas (industry, power et al.).

The main tasks:

- Providing scientists and specialists from different countries with the opportunity to publish the results of their research and receive information about modern technologies and materials, high-performance equipment in construction, communal and housing services, joint areas (industry, power et al.).
- To provide information support and participate in the events (forums, conferences, symposia, workshops, exhibitions, round tables etc) devoted to nanoindustry and problems of application of nanoindustry in construction and housing and communal services, which are perspective and of great importance.

The Journal has been published since 2009. Frequency: bimonthly.

These are the topics of the papers published in the journal: creation of new functional materials; nanostructured systems strength and penetrability formation theory development; the problems of nanomaterials and nanotechnologies implementation in construction and building materials; diagnostics of building systems nanostructures and nanomaterials; technologies aimed at studying nanomaterial properties; technological principles of nanostructures creation (liquid melts, sol and gel synthesis). The topics may be different, directly or indirectly related to the areas mentioned above.

The journal can also publish: original papers; reviews; discussing materials, comments, other information materials.

The language of publication: English; Russian.

The edition's readers and authors are:

- students, lecturers, post-graduates and people working for doctor's degree;
- scientists and specialists of research institutes and nanotechnological centers;
- heads and specialists of the institutions, organizations and factories from the sphere of construction and housing and communal services;
- scientists and specialists of the industries which are adjacent to construction;
- experts of the enterprise-producers manufacturing nanoindustrial output.

EDITORS

CHIEF EDITOR – Boris V. GUSEV, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of Department «Construction Materials and Technologies» Russian University of transport, President of the Russian Academy of Engineering and the International Academy of Engineering, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Laureate of the USSR and the Russian Federation State Prizes, Laureate of 5 Governmental Prizes of the Russian Federation in the field of science and education, Honored Scientist of Russian Federation, Moscow, Russian Federation
Contacts: e-mail: info@nanobuild.ru, info-rae@mail.ru

EXECUTIVE EDITORIAL SECRETARY – Vladimir I. VEDENYAPIN, Moscow, Russian Federation
Contacts: e-mail: pr@nanobuild.ru, info@nanobuild.ru

DEPUTY CHIEF EDITOR – Leonid A. IVANOV, Cand. Sci. (Eng.), Russian Academy of Engineering, International Academy of Engineering, Center for New Technologies «NanoStroitelstvo», Moscow, Russian Federation
Contacts: e-mail: info@nanobuild.ru, l.a.ivanov@mail.ru

EXECUTIVE EDITOR – Yulia A. EVSTIGNEEVA, Member of Russian Association of Journalists, Moscow, Russian Federation
Contacts: e-mail: info@nanobuild.ru, evstigneeva.ju@yandex.ru

HEAD OF DESIGN DEPARTMENT – Andrey S. REZNICHENKO, Businessman, Moscow, Russian Federation
Contacts: e-mail: info@nanobuild.ru, ras77222@yandex.ru

CHIEF FOR FOREIGN RELATIONS – Zhanna V. PISARENKO, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Saint-Petersburg State University, Economic Faculty, Department of Risk Management and Insurance, Saint-Petersburg, Russian Federation
Contacts: e-mail: info@nanobuild.ru, z.pisarenko@spbu.ru



EDITORIAL BOARD

Peter J.M. BARTOS, Prof., Queen's University of Belfast, RILEM Technical Committee TC 197-NCM on Nanotechnology in Construction Materials (2002–2009), Scottish Centre for Nanotechnology in Construction Materials (University of West Scotland), Belfast, UK

Vyacheslav R. FALIKMAN, Dr. (Mater.), Scientific Research Center «Construction», Structural Concrete Association, International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM), Technical Committee of American Concrete Institute ACI 241 «Nanotechnologies of Concrete», Moscow, Russian Federation

Wenlong BAI, Ph.D., Beijing Institute of Intellectual Property, Beijing, China

Oleg L. FIGOVSKY, Dr. Sci. (Eng.), Israel Polymate research center, Nanotech Industries, Inc., Daly City, California, USA; Migdal HaEmek, Israel

Zhengyi FU, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Wuhan University of Technology, State Key Lab of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan, China

Leonid A. IVANOV, Cand. Sci. (Eng.), Russian Academy of Engineering, International Academy of Engineering, Center for New Technologies «NanoStroitelstvo», Moscow, Russian Federation

Sergei V. KALIUZHNIY, Dr. Sci. (Chem.), Prof., RUSNANO, Moscow, Russian Federation

Vadim G. KHOZIN, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Kazan State University of Architecture and Engineering, Department «Technology of Construction Materials, Products and Structures», Kazan, Russian Federation

Evgeniy V. KOROLEV, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Vice Rector for Research, Saint Petersburg, Russian Federation

Leonid M. LYNKOV, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Department «Information Security», Minsk, Belarus

Polad MALKIN, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Ben-Gurion University in the Negev, StartUpLab, Beer-Sheva, Israel

Viktor S. MECHTCHERINE, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Technical University of Dresden, Institute of Construction Materials, Dresden, Germany

Surendra P. SHAH, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Northwestern University, Evanston, Illinois, USA

Vladimir Y. SHEVCHENKO, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Institute of Silicate Chemistry named after I.V. Grebenchikov of Russian Academy of Sciences, Coordinating Council on Development of Nanotechnologies attached to the Committee of the Council of the Federation of the Federal Assembly of the RF on Science, Culture, Education, Medicine and Ecology, Saint-Petersburg, Russian Federation

Pawel SIKORA, Ph.D., Associate Professor, West Pomeranian University of Technology in Szczecin, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Department of General Civil Engineering, Szczecin, Poland

Konstantin G. SOBOLEV, Prof., University of Wisconsin-Milwaukee, Technical Committee of American Concrete Institute ACI 241 «Nanotechnologies of Concrete», Milwaukee, Wisconsin, USA

Valeriy I. TELICHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Larisa A. URKHANOVA, Dr. Sci. (Eng.), Prof., East-Siberian State University of Technologies and Management, Department «Production of Building Materials and Wares», Ulan-Ude, Russian Federation

Rongming WANG, Ph.D., Prof., Beijing Advanced Innovation Center for Materials Genome Engineering, School of Mathematics and Physics University of Science and Technology Beijing, Beijing Key Laboratory for Magneto-Photoelectrical Composite and Interface Science, Beijing, China

Li D. XU, Ph.D., Prof., Old Dominion University, of Information Technologies & Decision Sciences Department; Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Norfolk, Virginia, USA

The Journal is registered as an independent mass media in the Ministry of Communication and Mass Media of the Russian Federation.
(Registration Certificate № ФС77 – 35813 of 31 March 2009 issued by the Federal Service on Supervision in the Sphere of Connection and Mass Communications).

Founder and Publisher – Center for New Technologies «Nanostroitel'stvo», Korolev, Moscow region, Russian Federation

Contacts: e-mail: l.a.ivanov@mail.ru

Address of edition: Russian Federation, 125009, Moscow, Gazetny per., bld. 9, str. 4

Contacts: e-mail: info@nanobuild.ru

Website: <http://nanobuild.ru/>

Release date of № 1 (Vol. 16) is 20.02.2024

ISSUED WITH SUPPORT OF



RUSSIAN ACADEMY
OF ENGINEERING



INTERNATIONAL ACADEMY
OF ENGINEERING



WUHAN UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY (CHINA)



BEIJING INSTITUTE
OF INTELLECTUAL PROPERTY
(CHINA)



NANOTECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION: A Scientific Internet-Journal

2024 • Vol. 16 • No. 1

NANOTEKHNOLOGII V STROITEL'STVE

CONTENTS

PUBLISHER INFORMATION	2
TO THE AUTHORS AND READERS	
The Journal "Nanotechnology in Construction" is in the 1st place in the SCIENCE INDEX ranking list for 2022 under the category "Construction. Architecture"	5
CONSTRUCTION MATERIALS SCIENCE	
<i>Pukharenko Yu.V., Khrenov G.M., Tkachenko V.I.</i>	
Effect of nanofibrillar cellulose on the cement paste setting kinetics	6
THE STUDY OF THE PROPERTIES OF NANOMATERIALS	
<i>Mohammedameen A.I.M., Agzamov F.A., Ismakov R.A.</i>	
Study on the influence of zeolite nanoparticles on selected properties of Portland cement.....	12
MANUFACTURING TECHNOLOGY FOR BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS	
<i>Kozhevnikova O.V., Bokova E.S., Dedov A.V., Nazarov V.G., Ivanov L.A.</i>	
Construction heat and sound insulating composite materials with high tensile strength.....	22
<i>Vikhareva I.N., Antipin V.E.</i>	
Modern strategies for the creation of polymer coatings. Part I	32
INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL COOPERATION	
<i>Wuhan University of Technology.....</i>	44
EFFICIENT USE OF RECYCLED RESOURCES	
<i>Graneva A.V., Lushin K.I., Pulyaev I.S., Kudryavtseva V.D.</i>	
Circular economy in recycling concrete and reinforced concrete waste	50
APPLICATION OF NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION	
<i>Khovansky V.E.</i>	
How to properly test and apply «БЕТОПРЕСС»® lyophobic sols and sol-based modifiers in cement concrete	59
<i>Cherkashina N.I., Pavlenko Z.V., Domarev S.N., Ruchiy A.Yu., Solgalov V.V.</i>	
Creation of a composite material based on plant components.....	67
PUBLISHING ETHICS	77
AUTHOR GUIDELINES.....	81



НАНОТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: НАУЧНЫЙ ИНТЕРНЕТ-ЖУРНАЛ NANOTECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION NANOTEKHNOLOGII V STROITEL'STVE

ISSN 2075-8545 (online)

«Нанотехнологии в строительстве» – рецензируемый научный журнал.

Основной целью журнала является информационное обеспечение процесса создания и внедрения в мире научно-технических технологий (прежде всего – нанотехнологической продукции) в области строительства, жилищно-коммунального хозяйства, смежных отраслей (промышленности, энергетики и др.).

Основные задачи:

- Предоставление ученым и специалистам из разных стран возможности публиковать результаты своих исследований и получать информацию о современных технологиях и материалах, высокоеффективном оборудовании в области строительства, жилищно-коммунального хозяйства, смежных отраслей (промышленности, энергетики и др.).
- Информационная поддержка и участие в мероприятиях (форумах, конференциях, симпозиумах, семинарах, выставках, круглых столах и т.д.) по наноиндустрии и прикладным вопросам нанотехнологий в области строительства и жилищно-коммунального хозяйства, имеющих актуальное и перспективное практическое значение.

Журнал издается с 2009 года. Периодичность – 6 номеров в год.

В журнале публикуются работы по следующим темам: создание новых функциональных материалов; разработка теории формирования прочности и непроницаемости наноструктурированных систем; проблемы применения наноматериалов и нанотехнологий в строительстве и строительных материалах; диагностика наноструктур и наноматериалов строительных систем; технологии исследования свойств наноматериалов; технологические принципы создания наноструктур (расплавы, золь-гелевый синтез и др.). Тематика статей может быть иной, прямо или косвенно связанной с перечисленными направлениями.

Журнал принимает к публикации: оригинальные статьи, обзоры, дискуссионные материалы, комментарии, другие информационные материалы.

Язык издания: русский; английский.

Авторами и читателями издания являются:

- студенты, преподаватели, аспиранты и докторанты вузов;
- ученые и специалисты научно-исследовательских институтов и нанотехнологических центров;
- руководители и специалисты учреждений, организаций и предприятий строительного комплекса и жилищно-коммунального хозяйства;
- ученые и специалисты смежных со строительством отраслей;
- эксперты фирм-производителей продукции наноиндустрии.

РЕДАКЦИЯ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР – ГУСЕВ Борис Владимирович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные материалы и технологии» Российского университета транспорта, президент Российской инженерной академии и Международной инженерной академии, член-корреспондент РАН, лауреат Государственных премий СССР и РФ, 5-ти премий Правительства РФ в области науки и образования, заслуженный деятель науки РФ, г. Москва, Российская Федерация

Контакты: e-mail: info@nanobuild.ru, info-rae@mail.ru

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ РЕДАКЦИИ – ВЕДЕНИЯПИН Владимир Иванович, г. Москва, Российская Федерация

Контакты: e-mail: pr@nanobuild.ru, info@nanobuild.ru

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА – ИВАНОВ Леонид Алексеевич, канд. техн. наук, Российская инженерная академия, Международная инженерная академия, Центр новых технологий «НаноСтроительство», г. Москва, Российская Федерация

Контакты: e-mail: info@nanobuild.ru, l.a.ivanov@mail.ru

ШЕФ-РЕДАКТОР – ЕВСТИГНЕЕВА Юлия Анатольевна, член Союза журналистов России, г. Москва, Российская Федерация

Контакты: e-mail: info@nanobuild.ru, evstigneeva.ju@yandex.ru

НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА ДИЗАЙНА И ВЕРСТКИ – РЕЗНИЧЕНКО Андрей Сергеевич, индивидуальный предприниматель, г. Москва, Российская Федерация

Контакты: e-mail: info@nanobuild.ru, ras77222@yandex.ru

РУКОВОДИТЕЛЬ ГРУППЫ ПО ВНЕШНИМ СВЯЗЯМ – ПИСАРЕНКО Жанна Викторовна, д-р экон. наук, профессор кафедры управления рисками и страхования экономического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Контакты: e-mail: info@nanobuild.ru, z.pisarenko@spbu.ru

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Питер Дж. М. БАРТОШ, профессор, Королевский Университет Белфаста, Технический комитет по нанотехнологиям в строительных материалах РИЛЕМ (2002–2009 гг.), Шотландский центр по нанотехнологиям в строительных материалах (Университет Западной Шотландии), г. Белфаст, Великобритания

ФАЛИКМАН Вячеслав Рувимович, д-р материаловедения, Научно-исследовательский центр «Строительство», ассоциация «Железобетон», Международный союз экспертов и лабораторий по испытанию строительных материалов, систем и конструкций (РИЛЕМ), технический комитет Американского института бетона ACI 241 «Нанотехнологии в бетоне», г. Москва, Российская Федерация

БАЙ Вэньлун, д-р философии, Пекинский институт интеллектуальной собственности, г. Пекин, Китай

ФИГОВСКИЙ Олег Львович, д-р техн. наук, Израильский исследовательский центр Polymate, Nanotech Industries, Inc., г. Дейли-Сити, Калифорния, США; г. Мигдал-ха-Эмек, Израиль

Фу ДЖЕНЬИ, д-р техн. наук, профессор, Уханьский технологический университет, Государственная главная лаборатория передовых технологий для синтеза и обработки материалов, г. Ухань, Китай

ИВАНОВ Леонид Алексеевич, канд. техн. наук, Российская инженерная академия, Международная инженерная академия, Центр новых технологий «НаноСтроительство», г. Москва, Российская Федерация

КАЛЮЖНЫЙ Сергей Владимирович, д-р хим. наук, профессор, ОАО «РОСНАНО», г. Москва, Российская Федерация

ХОЗИН Вадим Григорьевич, д-р техн. наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, кафедра «Технологии строительных материалов, изделий и конструкций», г. Казань, Российская Федерация

КОРОЛЁВ Евгений Валерьевич, д-р техн. наук, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, проректор по научной работе, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

ЛЫНЬКОВ Леонид Михайлович, д-р техн. наук, профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, кафедра «Защита информации», г. Минск, Беларусь

МАЛКИН Полад, д-р ф.-м. наук, Университет Бен-Гуриона в Негеве, StartUpLab, г. Беэр-Шева, Израиль

МЕЩЕРИН Виктор Сергеевич, д-р техн. наук, профессор, Технический университет Дрездена, Институт строительных материалов, г. Дрезден, Германия

СУРЕНДРА П. Шах, д-р техн. наук, профессор, Северо-Западный Университет, г. Эванстон, Иллинойс, США

ШЕВЧЕНКО Владимир Ярославович, д-р хим. наук, профессор, Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН, Координационный совет по развитию нанотехнологий при Комитете Совета Федерации ФС РФ по науке, культуре, образованию, здравоохранению и экологии, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

СИКОРА Павел, доктор наук, Западно-Поморский технологический университет, факультет гражданского и экологического строительства, факультет общего гражданского строительства, г. Щецин, Польша

СОБОЛЕВ Константин Геннадиевич, профессор, Университет Висконсин-Милуоки, технический комитет Американского института бетона ACI 241 «Нанотехнологии в бетоне», г. Милуоки, Висконсин, США

ТЕЛИЧЕНКО Валерий Иванович, д-р техн. наук, профессор, Московский государственный строительный университет (Научно-исследовательский университет), г. Москва, Российская Федерация

УРХАНОВА Лариса Алексеевна, д-р техн. наук, профессор, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, кафедра «Производство строительных материалов и изделий», г. Улан-Удэ, Российская Федерация

ВАН ЖУНМИН, д-р философии, профессор, Пекинский Центр передовых инноваций в области геномной инженерии материалов, Школа математики и физики Пекинского университета науки и технологий, Пекинская ключевая лаборатория магнито-фотоэлектрических композитов и интерфейсов, г. Пекин, Китай

СЮЙ ЛИ ДА, д-р философии, профессор, Университет Олд Доминион, Отдел информационных технологий; Институт инженеров по электротехнике и электронике (IEEE), г. Норфолк, Вирджиния, США

Журнал зарегистрирован как самостоятельное средство массовой информации в Федеральной службе по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций Министерства связи и массовых коммуникаций Российской Федерации (свидетельство о регистрации средства массовой информации Эл № ФС77 – 35813 от 31 марта 2009 г.).

Учредитель и издатель – ООО «Центр Новых Технологий «Наностроительство», г. Королев, Московская область, Российская Федерация
Контакты: e-mail: l.a.ivanov@mail.ru

Адрес редакции: Российская Федерация, 125009, г. Москва, Газетный пер., дом 9, стр. 4
Контакты: e-mail: info@nanobuild.ru; **Сайт:** <http://nanobuild.ru/>

Дата выхода в свет № 1, Том 16, 2024: 20.02.2024 г.

ИЗДАЕТСЯ ПРИ ПОДДЕРЖКЕ



РОССИЙСКОЙ
ИНЖЕНЕРНОЙ АКАДЕМИИ



МЕЖДУНАРОДНОЙ
ИНЖЕНЕРНОЙ АКАДЕМИИ



УХАНЬСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ТЕХНОЛОГИЙ (КИТАЙ)



ПЕКИНСКОГО ИНСТИТУТА
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ (КИТАЙ)

НАНОТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: научный Интернет-журнал

2024 • Том 16 • № 1

СОДЕРЖАНИЕ

ИЗДАТЕЛЬСКИЕ СВЕДЕНИЯ	2
К АВТОРАМ И ЧИТАТЕЛЯМ	
Журнал «Нанотехнологии в строительстве» – на 1 месте в рейтинге SCIENCE INDEX за 2022 год	
по тематике «Строительство. Архитектура!	5
СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ	
Пухаренко Ю.В., Хренов Г.М., Ткаченко В.И.	
Влияние нанофибрillлярной целлюлозы на кинетику схватывания цементного теста	6
ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НАНОМАТЕРИАЛОВ	
Мохаммедамина Али И.М., Агзамов Ф.А., Исмаков Р.А.	
Исследование влияния наночастиц цеолита на некоторые свойства тампонажного	
портландцемента	12
ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ	
Кожевникова О.В., Бокова Е.С., Дедов А.В., Назаров В.Г., Иванов Л.А.	
Строительные тепло- и звукоизоляционные композиционные материалы	
с высоким сопротивлением к растяжению	22
Вихарева И.Н., Антипов В.Е.	
Современные стратегии формирования полимерных покрытий. Часть 1	32
МЕЖДУНАРОДНОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО	
Уханьский технологический университет	44
ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ	
Гранева А.В., Лушин К.И., Пуляев И.С., Кудрявцева В.Д.	
Экономика замкнутого цикла при переработке отходов из бетона и железобетона	50
ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ	
Хованский В.Е.	
Как правильно испытать и применить лиофобные золы «БЕТОПРЕСС»® и золь-модификаторы	
на их основе в цементном бетоне	59
Черкашина Н.И., Павленко З.В., Домарев С.Н., Ручий А.Ю., Солгалов В.В.	
Создание композиционного материала на основе растительных компонентов.....	67
ПУБЛИКАЦИОННАЯ ЭТИКА	77
ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ.....	81

TO AUTHORS AND READERS

The Journal "Nanotechnology in Construction" is in the 1st place in the SCIENCE INDEX ranking list for 2022 under the category "Construction. Architecture"

Dear Colleagues!

We are pleased to announce that the updated SCIENCE INDEX indicators of journals for 2022 have been published on the website of the Scientific Electronic Library eLIBRARY.RU. The performance indicators of the journal "Nanotechnology in Construction" have improved for the year 2022.

1 out of 89 scientific journals ranking in the Science Index for 2022 under the category "Construction. Architecture" (compared to 4 in 2021).

Overall ranking in the SCIENCE INDEX for 2022: 243 out of 4017 scientific journals (compared to 312 in 2021). Percentile in the SCIENCE INDEX ranking for 2022: 7% (compared to 8% in 2021).

You can find more details on the following link: https://www.elibrary.ru/title_profile.asp?id=28655

We would like to congratulate the authors and readers of the journal on this achievement! This result was made possible through the active collaboration and support of the editorial board members, fruitful cooperation with experts of the Association of Science Editors and Publishers (ASEP), the high-quality contributions from the authors, adherence to the editorial guidelines, comprehensive evaluation of articles by reviewers, and the dedicated and professional approach of our editorial staff.

The motto of the journal since its foundation has been "GIGA success is being built from NANO", and over the past 15 years, this has increasingly become a reality.

We extend our sincere gratitude to all those who contribute to the publication of the journal, as well as the leading Russian and foreign scientists and specialists who utilize the journal's materials in their publications.

We invite leading scientists and specialists to submit their research materials for publication in our journal.

We look forward to continued fruitful cooperation.

If you have any questions, please contact us via e-mail: info@nanobuild.ru

Publishing House of the journal "Nanotechnologies in Construction"



КАВТОРАМ И ЧИТАТЕЛЯМ

Журнал «Нанотехнологии в строительстве» – на 1 месте в рейтинге SCIENCE INDEX за 2022 год по тематике «Строительство. Архитектура»

Уважаемые коллеги!

Сообщаем Вам, что на сайте Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU опубликованы уточненные показатели SCIENCE INDEX журналов за 2022 год. Показатели журнала «Нанотехнологии в строительстве» повысились:

- **1 место** из 89 изданий в рейтинге SCIENCE INDEX за 2022 год по тематике «Строительство. Архитектура» (в 2021 году – 4 место);
- 243 место из 4017 изданий в общем рейтинге SCIENCE INDEX за 2022 год (в 2021 году – 312 место);
- процентиль в рейтинге SCIENCE INDEX за 2022 год – 7% (в 2021 году – 8%).

Ссылка – https://www.elibrary.ru/title_profile.asp?id=28655

Поздравляем авторов и читателей журнала с этим событием! Такого результата удалось добиться благодаря активной работе и помощи членов редакционной коллегии, эффективному сотрудничеству с экспертами Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ), высококачественным материалам авторов и выполнению ими требований редакции, всесторонней оценке статей рецензентами, высокопрофессиональному и ответственному отношению к делу сотрудников редакции.

Девиз журнала с момента его создания – «из НАНО строится ГИГА успех», и это за прошедшие 15 лет все больше становится реальностью.

Большое спасибо всем, кто участвует в выпуске журнала, а также ведущим российским и зарубежным ученым и специалистам, которые используют материалы журнала в своих публикациях!

Приглашаем ведущих ученых и специалистов к публикации материалов о своих исследованиях.

Надеемся на дальнейшее плодотворное сотрудничество.

По всем вопросам просим обращаться по e-mail: info@nanobuild.ru

Издательство журнала «Нанотехнологии в строительстве»



Original article

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-1-6-11>

CC BY 4.0

Effect of nanofibrillar cellulose on the cement paste setting kinetics

Yury V. Pukharenko , Georgii M. Khrenov* , Victoria I. Tkachenko 

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia

* Corresponding author: e-mail: g.khrenov@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The study addresses the effect of nanofibrillar cellulose (NFC) on the setting process of cement paste during the first hours of gauging. A brief justification of the research topic relevance is given. It has been noted that the modification of cement materials by nanoscale additives has sparked significant scientific and practical interest in recent years. NFC has emerged as one such additive, and the potential impacts of its incorporation into cement systems are currently under active investigation. The study aims at investigating the effect of NFC on the cement paste setting kinetics during the first hours of gauging. **Materials and methods.** We present the materials used in the research and their characteristics, in particular, two types of cement characterized by the presence or absence of false setting, as well as cement paste compositions with different NFC consumption (from 0 to 0.24% of dry matter by weight of cement). The technique of measuring conditional viscosity in time with a laboratory rheometer and a special measuring system is described. **Results.** The results of cement paste tests are presented in the form of setting process diagrams. **Discussion.** The results obtained and experimental data are given. The complex character of NFC influence on the cement paste setting kinetics has been noted, which depends on the cement quality and additive consumption. For cement without signs of false setting, a decrease in setting onset time was observed when increasing the NFC content. Conversely, increase in the amount of NFC leads to an increase in the setting onset time for cements with signs of false setting. Conclusion. NFC has a noticeable effect on cement paste setting kinetics in the first 3 hours: it accelerates the process when using cement without false setting and slows down the setting when using cement with false setting.

KEYWORDS: cement paste, nanofibrillar cellulose, setting.

FOR CITATION:

Pukharenko Yu.V., Khrenov G.M., Tkachenko V.I. Effect of nanofibrillar cellulose on the cement paste setting kinetics. *Nanotechnology in construction*. 2024; 16(1): 6–11. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-1-6-11>. – EDN: QOESME.

INTRODUCTION

Modern construction industry uses about 4 billion tons of cement annually to produce various construction materials based on it [1]. At the same time, the largest volume of application falls on the production of concretes and mortars, the properties of which are regulated, in particular, by means of directed changes in the structure of cement paste and stone.

Methods for controlling the structure of cement systems have been continuously developed for decades and in recent years have reached the nanoscale. The introduction of very small amounts of various nanoscale additives into the mixtures made it possible to significantly improve the technical and economic performance of cement com-

posites. This is achieved either by improving the properties of nanomodified materials, such as strength, frost resistance, water resistance, delamination, storability, etc., or by reducing the cement consumption in the composition of mixtures, taking into account the provision of the required characteristics [2, 3, 4].

The published research results indicate serious prospects for nanostructuring of concretes and mortars. Carbon-based [5, 6, 7, 8] and silica nanoparticle-based modifiers [9, 10, 11] have been deeply studied and are already in practical use. Meanwhile, researchers continue to search for and study new nanoscale additives, such as nanofibrillar cellulose (NFC).

NFC is a product of dispersing plant cellulose-containing materials to the nanoscale. It represents tiny flex-

ible fibers with high strength and deformation characteristics [12, 13]. Many scientists have noted the positive effect of NFC on the properties of cement composites, including increased strength [14, 15, 16, 17], reduced shrinkage deformations [18, 19], and improved processability of the mixture (reducing delamination) [20] and others. Since the results of studying NFC as a modifier of cement systems are relatively new, the search for possible effects of its application is still far from being finalized. Taking this into account, this study aims to investigate the effect of NFC on the cement paste setting kinetics during the first hours of gauging.

MATERIAL AND METHODS

The following materials were used in the study: two samples of Portland cement CEM I 42.5 H differing in terms of the presence and absence of false setting signs; technical water according to GOST 23732-2011; aqueous suspension of NFC Bang&Bonsomer N-25 with a concentration of nanoparticles of 1.7% by volume (Fig. 1).

In order to evaluate the setting kinetics, the Anton Paar MCR-102 oscillation-rotational rheometer equipped with a special measuring system developed at Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering was used (Fig. 2). This system is equipped with a metal needle that impinges on a material sample by moving circumferentially at a speed of 0.2 rpm/hour. The sample is in a disposable plastic container. The rheometer records

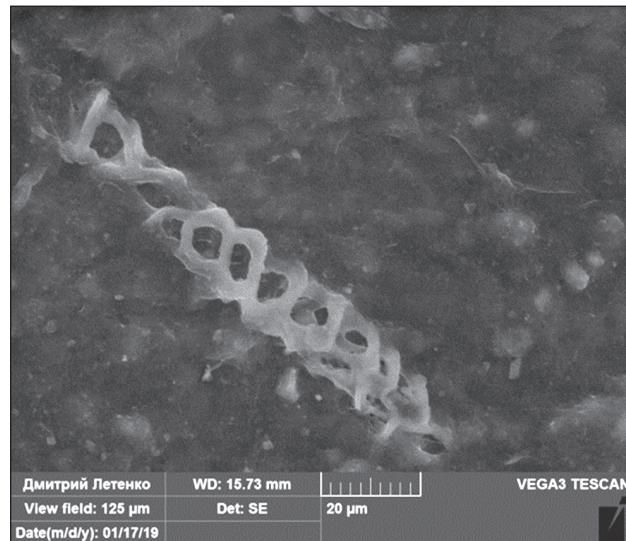


Fig. 1. Microphotography of NFC after dispersion in an ultrasonic bath

the torque required to maintain a given speed, which is then converted to conditional viscosity. It is not possible to calculate the absolute value of the viscosity due to the complex deformation pattern of the material sample. Nevertheless, the conditional viscosity is considered to be sufficient for early setting of the cement paste, since it is the change in the resistance of the material to the specified effect, not its absolute value, that is important.



Fig. 2. Diagram and photos of the measuring system for controlling the kinetics of mineral binder setting

Table
Specification of cement paste of normal density

Indicator	Value for composition 1–8							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Portland cement	No signs of false setting				With signs of false setting			
W/C	0.26	0.261	0.262	0.275	0.266	0.267	0.271	0.295
NFC consumption, %	0	0.0024	0.024	0.24	0	0.0024	0.024	0.24

In order to evaluate the effect of NFC on the cement paste setting kinetics, 8 cement paste compositions of normal density were made (see Table), in which the cellulose content is indicated by dry matter as a percentage of cement weight.

RESULTS

The results of testing the cement paste compositions No. 1–8 are shown graphically (Figs. 3 and 4).

DISCUSSION

Fig. 3 shows that the conditional viscosity of the cement paste without NFC (line 1) increases smoothly and starts to set after 160 minutes from gauging, reaching a value of 500 kPa*s. The NFC introduction has a noticeable effect on the viscosity change: at a rate

of 0.0024% it slightly slows down the process of structure formation between 40 and 140 minutes, and then slightly accelerates it (line 2). The beginning of setting occurs after 145 minutes. Introduction of 0.024% of NFC leads to acceleration of the structure formation process in the whole time interval of the experiment, the beginning of setting occurs after 150 minutes (line 3). A significant acceleration of viscosity build-up is observed at 0.24% of NFC consumption, and the beginning of setting occurs after 70 minutes (line 4). Thus, the addition of NFC decreases the time of setting onset, but its significant effect is observed only at a high consumption of 0.24% by cement weight. In this case, NFC can be considered as a cement setting accelerator provided there is no evidence of false setting in the cement.

Fig. 4 shows the test results of cement paste compositions with signs of false setting, which is clearly visible by the sharp increase in the conditional viscosity on line 5

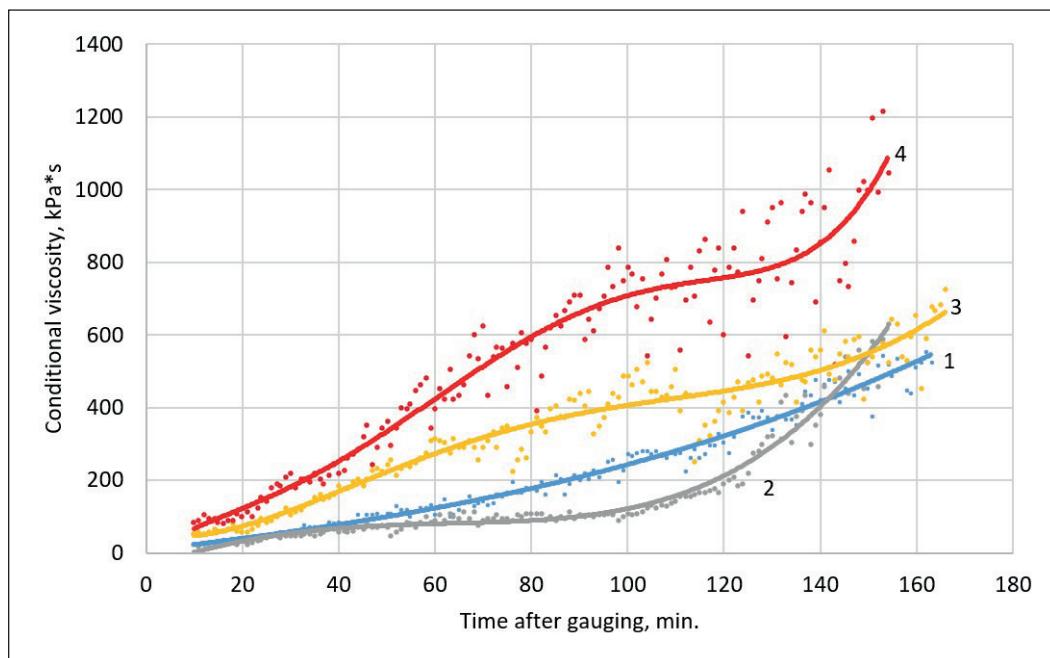


Fig. 3. Kinetics of cement paste setting (compositions No. 1–4): 1 – without NFC;
2 – 0.0024% of NFC; 3 – 0.024% of NFC; 4 – 0.24% of NFC

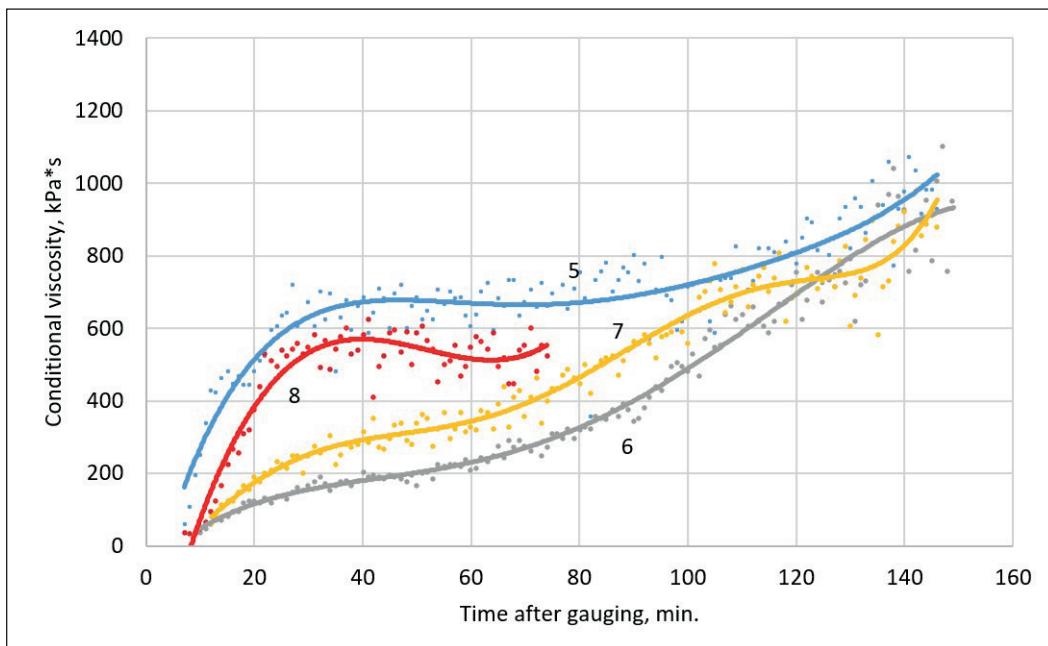


Fig. 4. Kinetics of cement paste setting (compositions No. 5–8): 5 – without NFC;
6 – 0.0024% of NFC; 7 – 0.024% of NFC; 8 – 0.24% of NFC

in the first 30 minutes after gauging. The time of setting beginning (false setting in this case) is 20 minutes. The addition of 0.0024% NFC results in a smoother increase in viscosity (line 6), and the setting onset time is 105 minutes. Further increase of NFC consumption up to 0.024% also restrains the setting onset time, but only up to 85 minutes (line 7). The addition of 0.24% NFC does not noticeably affect the viscosity value of the cement compared to the additive-free cement test: its intensive growth in the first 30–35 minutes is also observed, and the setting time has not practically increased and is 25 minutes (Composition 8).

The results obtained indicate the potential application of NFC as an additive to compensate false setting when its signs are detected in cement. At the same time, the most effective dosages do not exceed 0.024% of cement weight.

CONCLUSION

1. The introduction of nanofibrillar cellulose has a noticeable effect on the setting kinetics of cement paste at early periods of gauging, with the degree and nature of this effect depending on the quality of Portland cement.

2. In case of quality cements (without signs of false setting), NFC can be considered as an additive that accelerates the setting of cement paste during the initial (up to 3 hours) curing period. The optimum consumption of NFC in this case is about 0.024% of cement weight in the dry matter equivalent.

3. NFC can be considered as an additive for cements with signs of false setting, compensating for this effect in the cement paste and thus increasing its workability. An NFC consumption of about 0.0024% of the cement weight should be considered optimal for this purpose.

REFERENCES

1. Ergashev M.M. Nanotechnology application in cement production . Economics and Socium. 2020;1(68): 952-955.
2. Balmakov M.D., Pukharenko Y.V. Nanocomposite material science . Civil Engineers' Bulletin. 2005; 3(4): 53-57.
3. Pukharenko Yu.V., Aubakirova I.U., Nikitin V.A., Letenko D.G., Staroverov V.D. Cement composites modification by mixed nanocarbon material of fulleroid type. Concrete Technology. 2013; 12 (89): 13-15.
4. Chernyshev E.M., Artamonova O.V., Slavcheva G.S. Nanomodification of cement composites at the technological stage of life cycle. Nanotechnologies in Construction: A Scientific Internet-Journal. 2020; 12(3): 130-139. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-3-130-139>. EDN NDNJES

5. Pukharenko Yu.V., Ryzhov D.I., Staroverov V.D. Features of cement composites structure formation in the presence of carbon nanoparticles of fulleroid type . Bulletin of MSCU. 2017; 12: 7(106): 718-723. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.7.718-723>. EDN ZATDHP
6. Pukharenko Yu.V., Staroverov V.D., Ryzhov D.I. Fulleroid carbon-based nanoparticles for concrete modification. Concrete Technology. 2015; 3-4(104-105): 40-43. EDN TTMPBN
7. Kovaleva, A.Yu.; Belyaeva, Zh.V.; Aubakirova, I.U.; Staroverov, V.D. The experience of industrial application of nanomodified concrete mixtures. Civil Engineers' Bulletin. 2008; 3(16): 74-76.
8. Ryzhov D.I., About the durability of concrete from nanomodified mixtures . Civil Engineers' Bulletin. 2013; 2(37):146-151. EDN QZJSGZ
9. Prudkov E.N., Zakurazhnov M.S. Modification of fine-grained concrete with nanosilica . Scientific Bulletin of Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. A series: Physico-chemical problems and high technologies of building materials science. 2014; 1(8): 44-48. EDN SUFKBP
10. Potapov V., Efimenko Y., Mikhailova N., Kashutin A., Gorev D. Application of nanosilica to increase the strength of concrete. Nanoindustry. 2014; 7(53): 64-69. EDN SZIQED
11. Urkhanova L.A., Lkhasaranyov S.A., Bardakhanov S.P. Modified concrete with nanodisperse additives. Construction Materials. 2014; 8:52-55. EDN SJVXOJ
12. Toptunov E.A., Sevastyanova Yu.V. Powder cellulosic materials: review, classification, characteristics and applications. Chemistry of plant raw materials. 2021; 4: 31-45. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021049186>. EDN PIMJOE
13. Revol J. F., Bradford H., Giasson J., Marchessault R. H., Gray D. G. Helicoidal self-ordering of cellulose microfibrils in aqueous suspension. International Journal of Biological Macromolecules. 1992; 14(3):170-172.
14. Hisseine O.A., Wilson W., Sorelli L., Tolnai B., Tagnit-Hamou A. Nanocellulose for improved concrete performance: A macro-to-micro investigation for disclosing the effects of cellulose filaments on strength of cement systems. Construction and Building Materials. 206: 84–96.
15. Jiao L.Su.M., Chen L., Wang Y., Zhu H., Dai H. Natural Cellulose Nanofibers as Sustainable Enhancers in Construction Cement. PLOS ONE. 11(12). e0168422.
16. Khirkhasova, V. I. Effect of nanocellulose on the process of Portland cement hydration and concrete properties. Civil Engineers' Bulletin. 2020; 5(82): 155-160. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-5-155-160>. EDN LKNNNJO
17. Cao Y., Zavaterri P., Youngblood J., Moon R., Weiss J. The influence of cellulose nanocrystal additions on the performance of cement paste. Cement and Concrete Composites. 2015. Vol. 56: 73-83.
18. Pukharenko Yu.V., Aubakirova I.U., Khirkhasova V.I. Cellulose in concrete: a new direction in construction nanotechnology development. Construction Materials. 2020; 7: 39-44. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-39-44>. EDN WORYOY
19. Lee H.-J., Kim S.-K., Lee H.-S., Kim W. A Study on the Drying Shrinkage and Mechanical Properties of Fiber Reinforced Cement Composites Using Cellulose Nanocrystals. International Journal of Concrete Structures and Materials. 2019; 13(39).
20. Pukharenko Yu.V., Khrenov G.M., Rerikh A.V. Effect of nanocellulose on the manufacturability of masonry mortar mixtures. ALITinform: Cement. Concrete. Dry mixes. 2022; 3(68): 62-68. EDN WPYMED

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yury V. Pukharenko – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding member of the Russian academy of architecture and building sciences, Head of Department Technology of Construction Materials and Metrology, Saint Petersburg State university of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia, tsmm@spbgasu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1989-0595>

Georgii M. Khrenov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Technology of Construction Materials and Metrology, Saint Petersburg State university of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia, g.khrenov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8888-5648>

Victoria I. Tkachenko – assistant, Department of Technology of Construction Materials and Metrology, Saint Petersburg State university of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia, tsmm@spbgasu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6052-9633>

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Yury V. Pukharenko – scientific guidance, final conclusions.

Georgii M. Khrenov – conducting the experiment, analyzing the results, preparing the text.

Victoria I Tkachenko – experiment planning; text preparation.

The authors declare no conflicts of interest.

The article was submitted 10.01.2024; approved after reviewing 02.02.2024; accepted for publication 07.02.2024.

Влияние нанофибриллярной целлюлозы на кинетику схватывания цементного теста

Юрий Владимирович Пухаренко , Георгий Михайлович Хренов* , Виктория Игоревна Ткаченко 

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: g.khrenov@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье рассматривается вопрос влияния нанофибриллярной целлюлозы (НФЦ) на процесс схватывания цементного теста в первые часы от затворения. Приведено краткое обоснование актуальности темы исследования. Отмечено, что в последние годы большой научный и практический интерес вызывают вопросы модификации цементных материалов наноразмерными добавками. НФЦ рассматривается в качестве такой добавки недавно, и в настоящее время осуществляется активный поиск возможных эффектов от ее использования в цементных системах. Целью работы является изучение влияния НФЦ на кинетику схватывания цементного теста в первые часы от затворения. **Материалы и методы.** Приводятся используемые в работе материалы и их характеристики, в частности два вида цемента, отличающиеся наличием и отсутствием ложного схватывания, а также составы цементного теста с различным расходом НФЦ (от 0 до 0,24% сух. вещ. от массы цемента). Описывается методика измерения условной вязкости во времени с помощью лабораторного реометра и специальной измерительной системы. **Результаты.** Представлены результаты испытаний цементного теста в виде диаграмм процесса схватывания. **Обсуждение.** Приводятся результаты анализа полученных экспериментальных данных. Отмечается сложный характер влияния НФЦ на кинетику схватывания цементного теста, который зависит от качества цемента и расхода добавки. Для цемента без признаков ложного схватывания наблюдается уменьшение времени начала схватывания при увеличении содержания НФЦ. Для цемента с признаками ложного схватывания, наоборот, повышение количества НФЦ приводит к увеличению времени начала схватывания. **Выводы.** НФЦ оказывает заметное влияние на кинетику схватывания цементного теста в первые 3 часа: ускоряет процесс при использовании цемента без ложного схватывания и замедляет схватывание при использовании цемента с ложным схватыванием.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цементное тесто, нанофибриллярная целлюлоза, схватывание.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Пухаренко Ю.В., Хренов Г.М., Ткаченко В.И. Влияние нанофибриллярной целлюлозы на кинетику схватывания цементного теста // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т. 16, № 1. С. 6–11. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-1-6-11>. – EDN: QUESME.

ВВЕДЕНИЕ

Современное строительство ежегодно использует порядка 4 миллиардов тонн цемента для производства различных строительных материалов на его основе [1]. При этом наибольший объем применения приходится на выпуск бетонов и растворов, регулирование свойств которых осуществляется в том числе за счет направленного изменения структуры цементного теста и камня.

Методы управления структурой цементных систем непрерывно развиваются десятки лет и в последние годы касаются наноразмерного уровня.

За счет введения в смеси весьма незначительных количеств различных наноразмерных добавок стало возможным существенное улучшение технико-экономических показателей цементных композитов. Достигается это либо улучшением характеристик наномодифицированных материалов, таких как прочность, морозостойкость, водонепроницаемость, расслаиваемость, сохраняемость и др., либо за счет сокращения расхода цемента в составе смесей с учетом обеспечения требуемых характеристик [2, 3, 4].

Опубликованные результаты исследований свидетельствуют о серьезных перспективахnanoструктурирования бетонов и растворов. Сегодня глубоко

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

изучены и уже получили практическое применение модификаторы на основе углеродных [5, 6, 7, 8] и кремнеземистых наночастиц [9, 10, 11]. При этом продолжается поиск и исследование новых наноразмерных добавок, к числу которых относится нанофибрillярная целлюлоза (НФЦ).

НФЦ является продуктом диспергирования до наноразмеров растительных целлюлозосодержащих материалов и представляет собой мельчайшие гибкие волокна с высокими прочностными и деформационными характеристиками [12, 13]. Многие исследователи отмечают положительное влияние НФЦ на свойства цементных композитов, а именно наблюдается повышение прочности [14, 15, 16, 17], снижение усадочных деформаций [18, 19], улучшение технологичности смеси (снижение расслаиваемости) [20] и другие. Поскольку результаты исследования НФЦ в качестве модификатора цементных систем проводятся относительно недавно, поиск возможных эффектов от ее применения еще далек от завершения. Учитывая это, цель данной работы состоит в изучении влияния НФЦ на кинетику схватывания цементного теста в первые часы от затворения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использовались следующие материалы: две пробы портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н, отличающиеся наличием и отсутствием признаков ложного

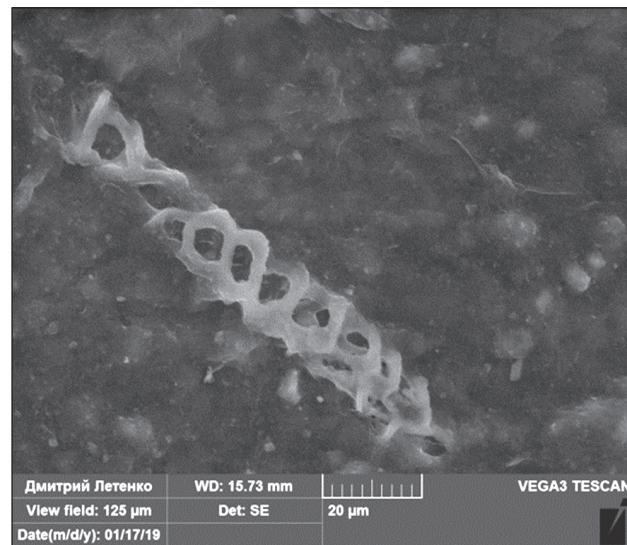


Рис. 1. Микрофотография НФЦ после диспергирования в ультразвуковой ванне

схватывания; вода техническая по ГОСТ 23732-2011; водная суспензия НФЦ *Bang&Bonsomer N-25* с концентрацией наночастиц 1,7 % по объему (рис. 1).

Для оценки кинетики схватывания использовался осцилляционно-ротационный реометр *Anton Paar MCR-102*, снабженный специальной измерительной системой, разработанной в СПбГАСУ (рис. 2). Данная система оснащена металлической иглой, которая



Рис. 2. Схема и фотографии измерительной системы для контроля кинетики схватывания минеральных вяжущих

Таблица
Характеристика цементного теста нормальной густоты

Показатель	Значение для состава №№ 1–8							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Портландцемент	Без признаков ложного схватывания						С признаками ложного схватывания	
В/Ц	0,26	0,261	0,262	0,275	0,266	0,267	0,271	0,295
Расход НФЦ, %	0	0,0024	0,024	0,24	0	0,0024	0,024	0,24

воздействует на пробу материала, двигаясь по окружности со скоростью 0,2 об/час. Проба при этом находится в одноразовой пластиковой емкости. Реометр фиксирует крутящий момент, который требуется для поддержания заданной скорости и который затем пересчитывается в условную вязкость. Рассчитать абсолютное значение вязкости не представляется возможным из-за сложного характера деформации пробы материала. Тем не менее, условной вязкости достаточно для отсаживания процесса схватывания цементного теста в ранние сроки, поскольку важно именно изменение сопротивления материала указанному воздействию, а не его абсолютное значение.

Для оценки влияния НФЦ на кинетику схватывания цементного теста было изготовлено 8 составов цементного теста нормальной густоты (см. табл.), в которых содержание целлюлозы указано по сухому веществу в процентах от массы цемента.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты испытания цементного теста составов №№ 1–8 приведены в графическом виде (рис. 3 и 4).

ОБСУЖДЕНИЕ

По рис. 3 видно, что условная вязкость цементного теста без НФЦ (линия 1) плавно возрастает и через 160 минут от затворения начинает схватываться, достигая значения 500 кПа·с. Введение НФЦ оказывает заметное влияние на изменение вязкости: при расходе 0,0024% она несколько замедляет процесс структурообразования в интервале от 40 до 140 минут, а затем незначительно его ускоряет (линия 2). Начало схватывания наступает на 145 минуте. Введение 0,024% НФЦ приводит к ускорению процесса структурообразования во всем интервале

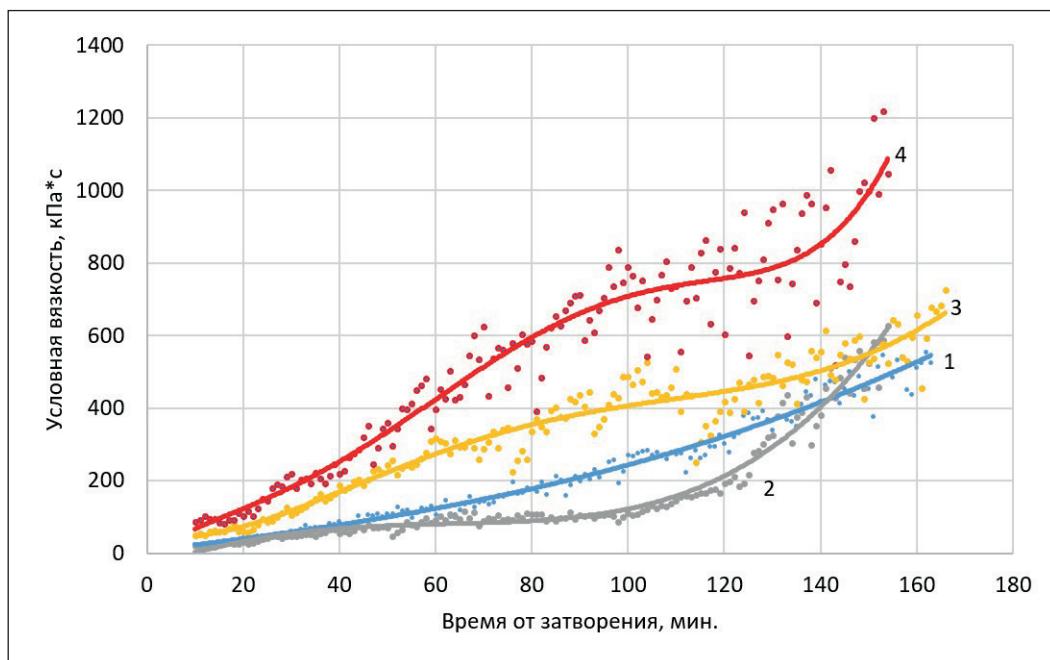


Рис. 3. Кинетика схватывания цементного теста (составы № 1–4): 1 – без НФЦ; 2 – 0,0024% НФЦ; 3 – 0,024% НФЦ; 4 – 0,24% НФЦ.

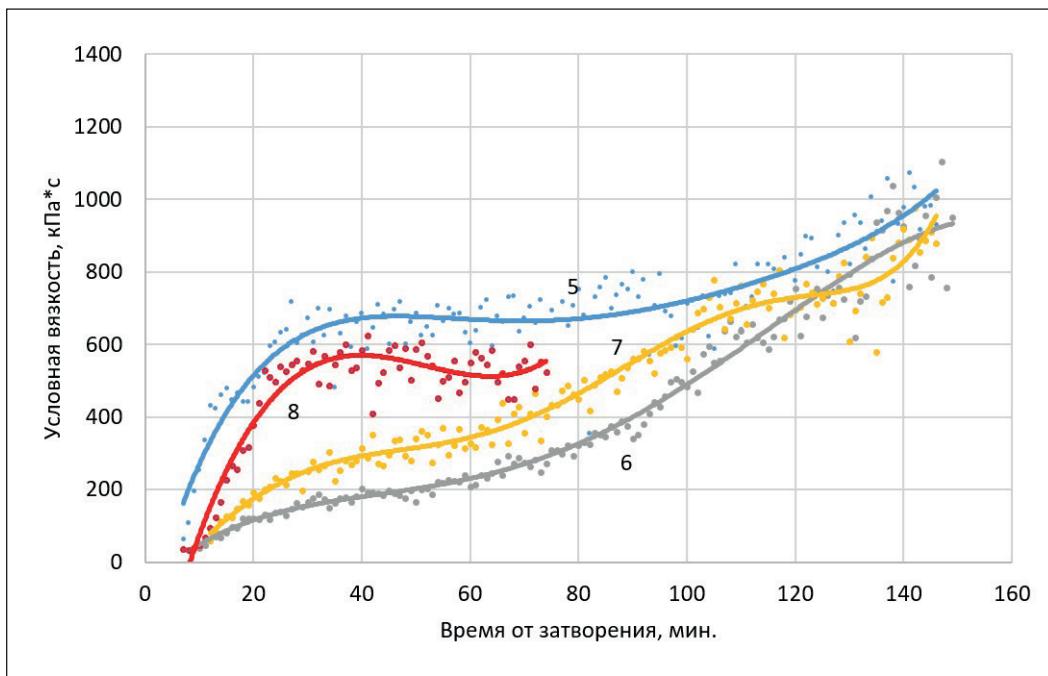


Рис. 4. Кинетика схватывания цементного теста (составы № 5–8): 5 – без НФЦ; 6 – 0,0024% НФЦ; 7 – 0,024% НФЦ; 8 – 0,24% НФЦ.

времени проведения эксперимента, начало схватывания наступает через 150 минут (линия 3). При расходе НФЦ 0,24% наблюдается значительное ускорение нарастания вязкости, и начало схватывания наступает уже через 70 минут (линия 4). Таким образом, добавка НФЦ уменьшает время начала схватывания, однако значимое ее влияние наблюдается лишь при большом расходе, равном 0,24% от массы цемента. В этом случае НФЦ можно рассматривать в качестве ускорителя схватывания цемента при отсутствии в нем признаков ложного схватывания.

На рис. 4 приведены результаты испытания составов цементного теста с признаками ложного схватывания, что отчетливо видно по резкому увеличению условной вязкости на линии 5 в первые 30 минут от затворения. Время начала схватывания (в данном случае ложного) составляет 20 минут. Введение 0,0024% НФЦ придает процессу возрастания вязкости более плавный характер (линия 6), и время начала схватывания составляет уже 105 минут. Дальнейшее увеличение расхода НФЦ до 0,024% также сдерживает время начала схватывания, но уже до 85 минут (линия 7). При введении 0,24% НФЦ заметного изменения величины вязкости по сравнению с бездобавочным цементным тестом не происходит: также наблюдается ее интенсивный рост в первые 30–35 минут, а время начала схватывания

практически не увеличилось и составляет 25 минут (состав 8).

Полученные результаты свидетельствуют о потенциально возможном применении НФЦ в качестве добавки, компенсирующей ложное схватывание при обнаружении его признаков в цементе. При этом наиболее эффективными представляются дозировки, не превышающие 0,024% от массы цемента.

ВЫВОДЫ

1. Введение нанофибрillлярной целлюлозы оказывает заметное влияние на кинетику схватывания цементного теста в ранние сроки от затворения, при этом степень и характер этого влияния зависит от качества портландцемента.

2. Для качественных цементов (без признаков ложного схватывания) НФЦ можно рассматривать как добавку, ускоряющую схватывание цементного теста в начальный (до 3-х часов) период твердения. Оптимальный расход НФЦ при этом составляет около 0,24% от массы цемента в пересчете на сухое вещество.

3. Для цементов с признаками ложного схватывания НФЦ можно рассматривать как добавку, компенсирующую этот эффект в цементном тесте и повышающую, таким образом, его сохраняемость. Оптимальным для этого следует считать расход НФЦ порядка 0,0024% от массы цемента.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Эргашев М.М. Применение нанотехнологий в производстве цемента // Экономика и социум. 2020. № 1(68). С. 952–955.
2. Бальмаков М.Д., Пухаренко Ю.В. Нанокомпозиционное материаловедение // Вестник гражданских инженеров. 2005. № 3(4). С. 53–57.
3. Пухаренко Ю.В., Аубакирова И.У., Никитин В.А., Летенко Д.Г., Староверов В.Д. Модифицирование цементных композитов смешанным наноуглеродным материалом фуллероидного типа // Технология бетонов. 2013. № 12 (89). С. 13–15.
4. Чернышев Е.М., Артамонова О.В., Славчева Г.С. Наномодифицирование цементных композитов на технологической стадии жизненного цикла // Нанотехнологии в строительстве. 2020. Т. 12, № 3. С. 130–139. – <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-3-130-139>
5. Пухаренко Ю.В., Рыжов Д.И., Староверов В.Д. Особенности структурообразования цементных композитов в присутствии углеродных наночастиц фуллероидного типа // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12, № 7(106). С. 718–723. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.7.718-723>
6. Пухаренко Ю.В., Староверов В.Д., Рыжов Д.И. Фуллероидные углеродные наночастицы для модификации бетонов // Технологии бетонов. 2015. № 3-4(104–105). С. 40–43. EDN TTMRPBV
7. Ковалева А.Ю., Беляева Ж.В., Аубакирова И.У., Староверов В.Д. Опыт промышленного применения наномодифицированных бетонных смесей // Вестник гражданских инженеров, 2008. № 3(16). С. 74–76.
8. Рыжов Д. И. О долговечности бетонов из наномодифицированных смесей // Вестник гражданских инженеров. 2013. № 2(37). С. 146–151. EDN QZJSGZ
9. Прудков Е.Н., Закуражнов М.С. Модифицирование мелкозернистого бетона нанокремнеземом // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. 2014. № 1(8). С. 44–48. EDN SUFKBP.
10. Потапов В., Ефименко Ю., Михайлова Н., Кащутин А., Горев Д. Применение нанокремнезема для повышения прочности бетона // Наноиндустрия. 2014. № 7(53). С. 64–69. EDN SZIQED
11. Урханова Л.А., Лхасаранов С.А., Бардаханов С.П. Модифицированный бетон с нанодисперсными добавками // Строительные материалы. 2014. № 8. С. 52–55. EDN SJVXOJ
12. Топтунов Е.А., Севастьянова Ю.В. Порошковые целлюлозные материалы: обзор, классификация, характеристики и области применения // Химия растительного сырья. 2021. № 4. С. 31–45. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021049186>. EDN PIMJOE
13. Revol J. F., Bradford H., Giasson J., Marchessault R. H., Gray D. G. Helicoidal self-ordering of cellulose microfibrils in aqueous suspension // International Journal of Biological Macromolecules. 1992. Vol. 14. No. 3. Pp. 170–172.
14. Hisseine O.A., Wilson W., Sorelli L., Tolnai B., Tagnit-Hamou A. Nanocellulose for improved concrete performance: A macro-to-micro investigation for disclosing the effects of cellulose filaments on strength of cement systems // Construction and Building Materials, 206, 84–96.
15. Jiao L.Su.M., Chen L., Wang Y., Zhu H., Dai H. Natural Cellulose Nanofibers As Sustainable Enhancers in Construction Cement // PLOS ONE, 11(12), e0168422.
16. Хирхасова, В. И. Влияние наноцеллюлозы на процесс гидратации портландцемента и свойства бетона // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 5(82). С. 155–160. – <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-5-155-160>. EDN LKNNJO
17. Cao Y., Zavaterri P., Youngblood J., Moon R., Weiss J. The influence of cellulose nanocrystal additions on the performance of cement paste // Cement and Concrete Composites. 2015. Vol. 56. Pp. 73–83.
18. Пухаренко Ю.В., Аубакирова И.У., Хирхасова В.И. Целлюлоза в бетоне: новое направление развития строительной нанотехнологии // Строительные материалы. 2020. № 7. С. 39–44. – <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-39-44>
19. Lee H.-J., Kim S.-K., Lee H.-S., Kim W. A Study on the Drying Shrinkage and Mechanical Properties of Fiber Reinforced Cement Composites Using Cellulose Nanocrystals // International Journal of Concrete Structures and Materials. 2019. Vol. 13 (39).
20. Пухаренко Ю.В., Хренов Г.М., Рерих А.В. Влияние наноцеллюлозы на технологичность кладочных растворных смесей // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2022. № 3(68). С. 62–68. – EDN WPYMED

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пухаренко Юрий Владимирович – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии архитектуры и строительных наук, заведующий кафедрой «Технологии строительных материалов и метрологии», Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия, tsmm@spbgasu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1989-0595>

Хренов Георгий Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии строительных материалов и метрологии», Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия, g.khrenov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8888-5648>

Ткаченко Виктория Игоревна – ассистент кафедры «Технологии строительных материалов и метрологии», Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия, tsmm@spbgasu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6052-9633>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Пухаренко Ю.В. – научное руководство, итоговые выводы.

Хренов Г.М. – проведение эксперимента, анализ результатов, подготовка текста.

Ткаченко В.И. – планирование эксперимента; подготовка текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 10.01.2024; одобрена после рецензирования 02.02.2024; принятая к публикации 07.02.2024.

Original article

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-1-12-21>

CC BY 4.0

Study on the influence of zeolite nanoparticles on selected properties of portland cement

Ali I. M. Mohammedameen* , Farit A. Agzamov , Rustem A. Ismakov 

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

* Corresponding author: e-mail: alimestudent@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. Cement microstructure imaging is an emerging field of non-destructive compositional investigation. Some data may be available via one method but not the other due to various physical and chemical mechanisms that could cause cement decay. In order to quantitatively and qualitatively evaluate cement stone, it is necessary to investigate it as a complex multi-phase composite material, identify its crystalline phases, and estimate the precise size of its nanoparticles. **Materials and methods.** This work presents the results of a microscopic study of the effect of Nanozeolites (particle size ≤ 100 nm) on cements for cementing wells. To study the surface properties (chemical bonds between molecules, analysis of mineral composition, and surface topography and morphology) of class G cement stone, three types of microscopes – IR spectrum, X-ray diffraction (XRD), and atomic force microscopy (AFM) – were used. Zeolite nanoparticle additives were introduced at varying concentrations (0.5%, 1%, 1.5% by weight of cement) after 8 hours of curing in a water bath at atmospheric pressure and a heating temperature of 60°C (140°F). **Results and discussion.** The infrared spectra revealed changes in surface properties, indicating a decrease in free water and an increase in the strength of the system with the addition of nano zeolite. X-ray diffraction method (XRD) allowed for the identification of the main phases of crystalline hydration. The highest peak intensity is due to calcium hydroxide CH, which decreases with the addition of nano zeolite. This phenomenon elucidates the pozzolanic behavior of nano zeolite, which reacts with precipitated calcium hydroxide upon hydration to form C-S-H, reduces the calcium hydroxide content of the layered structure and increases C-S-H. The topography and surface morphology of the samples were studied at the nanoscale using atomic force microscopy. The images show the nanoparticles propagate along the cracks and appear to increase the surface layer's resistance to deformation and stress relaxation in cement-based materials. In addition, they promote viscoelastic C-S-H behavior. **Conclusion.** Adding nano zeolite to Portland cement affects the process of early hydration of cement stone and increases its early strength. Additionally, the introduction of 1.5% nano zeolite into cement results in the formation of irregular peaks and valleys of low porosity filler, ultimately enhancing the cement's strength.

KEYWORDS: nano-zeolite, IR spectroscopy, calcium silicate hydrate (C-S-H), calcium hydroxide (CH), X-ray diffraction (XRD), atomic force microscopy (AFM).

FOR CITATION:

Mohammedameen A.I.M.. Agzamov F.A.. Ismakov R.A. Study on the influence of zeolite nanoparticles on selected properties of portland cement. *Nanotechnologies in Construction*. 2024; 16(1): 12–21. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-1-12-21>. – EDN: RJYBNW.

INTRODUCTION

After the mixture has hardened, the composition of the cement stone includes various crystalline and amorphous phases, as well as water and pores of various sizes. During the hydration process, calcium-silicate-hydrate (C-S-H) is formed, which constitutes up to 60% of the volume of hydrated cement and about 25% of the solution volume is calcium hydroxide (CH) crystals. To study such systems, infrared spectroscopy in combination with X-ray

analysis and microscopy is a useful tool for characterizing the phases [1, 2].

Nano-zeolite is a type of nanomaterial that has received insufficient attention as an additive in well cementing. This may be due to the wide availability of many nano-materials, with the use of nano-zeolite in a number of other industrial applications.

In general, nano-zeolites are crystalline aluminosilicates with a distinct porous structure and molecular pore sizes in the range of 0.3–2 nm (within an open three-

dimensional structure of tetrahedral silica SiO_4 and aluminum oxide AlO_4). Nano-sized zeolite has been found in both volcanic and sedimentary rocks. In industry, zeolite has proven itself as an ion exchanger, catalyst and adsorbent, which is used in oil refining, petrochemicals, agriculture, soil management, water and wastewater treatment [3]. Therefore, the formula for the crystallographic unit cell can be used to describe all zeolites; $\text{M}_n/\text{n}[(\text{AlO}_2)_a(\text{SiO}_4)_b]\cdot\text{XH}_2\text{O}$. Where M denotes cations, n is the valence of the cation, the ratio b:a ≥ 1 and 5, and X is the number of moles of water trapped within the zeolite structure[4].

This study is aimed at assessing the effectiveness of using nano zeolite as an additive for cementing oil wells. The study focused on analyzing the surface morphology and structure of all samples using X-ray diffraction, IR and AFM techniques. The results of this study may help determine the potential of nano-zeolites as an alternative component in cement slurry to maintain long-term well integrity.

MATERIALS AND METHODS

For the experiments, oil well cement (Glass G) and zeolite nanoparticle powder with a particle size of less than 100 nm, called (Sapo-11 nano zeolite powder 4A) was used in the form of a white powder (Fig. 1) with a pore volume ($\geq 0.16 \text{ cm}^3/\text{g}$) and specific surface area ($\text{SSA} \geq 180 \text{ m}^2/\text{g}$). The chemical composition are ($\text{SiO}_2 \sim 6\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 48\%$, and $\text{Na}_2\text{O} \leq 0.2\%$).

Deionized water with a water/cement ratio of 0.44 was used for sample preparation. The tested cement mortar was placed in prepared molds (50 mm*50 mm*50 mm) at various dosages of 0.5%, 1% and 1.5% nano-zeolite. Samples were cured hermetically by storing the slurry inside copper molds with lids tightly attached and immediately immersing them in the curing bath, at atmospheric pressure and a heating temperature of 60°C (140°F) for 8 hours



Fig. 1. Nano zeolite appearance



Fig. 2. Water path used in this research for curing samples at atmospheric pressure and heating temperature 60°C (140°F)

Fig. 2. The entire process of preparing cement mixtures was carried out at room temperature. The procedure was performed in accordance with API Spec. 10A, 2019 [5].

After a specified time (8 hours), all samples were removed from the curing bath and the cubes were removed from the molds. The samples were dried at room temperature for 24 hours. Cement samples were crushed and sieved. Studies of the morphology and microstructure and phase composition of the formed hydrates were carried out using X-ray diffraction patterns (XRD-6000 Shimadzu with an incident angle of 0.154 nm using Cu-K α radiation), Fourier transform infrared spectra (FTIR) (Sigmadzu model 1800, Japan) and atomic force microscopy (NaioAFM 2022, Nanosurf, Switzerland).

RESULTS AND DISCUSSION

Analysis of cement powder by infrared spectra

Spectroscopy analysis of four mixtures (pure cement and with nano zeolite additives Z 0.5%, Z 1% and Z 1.5%) is presented below. Four samples were ground into powder and tested to study surface properties in terms of chemical bonds between molecules. In Fourier transform infrared (IR) spectrum is denoted as wavenumber (1/cm) and covers the range from 400 cm^{-1} at the far right to 4000 cm^{-1} at the far left, scaling by a factor of 2 at 2000 cm^{-1} . The vertical axis, denoted as percent transmittance (%T), ranges from 0 at the beginning of the y-axis to 100 at the

top. Characteristic peaks in the infrared spectrum were identified [6]. Some chemical elements in cement have different functional groups; including H_2O , $\text{Al}-\text{O}$, $\text{Si}-\text{O}$, SO_4^{2-} , CO_3^{2-} and OH^- , are active in the infrared range [7]. The transmission spectra of pure cement mortar and cement with different amounts of nano-zeolite are shown in Fig. 3 (a, b, c and d, respectively).

From Fig. 3(a), it can be seen that the band value at 3641.60 cm^{-1} decreases to 424.34 cm^{-1} , which suggests the formation of C–S–H gel. From Figure 3 (b), (c) and (d) with the addition of nano-zeolite, the band value between 3641.60 cm^{-1} and 3637.75 cm^{-1} decreases to 416.62 cm^{-1} at 0.5% nano-zeolite and 420.48 cm^{-1} at 1.5% nano-zeolite. It can be seen that the lowest band value is observed with the addition of 0.5% nano-zeolite, and a decrease in the band value means a decrease in free water and an increase

in the strength of the system. All peak values are given in Table. 1.

Spectral analysis of all solution samples revealed the presence of broad bands in the range from 3641.60 to 3637.75 cm^{-1} . These bands can be attributed to overlapping stretching vibrations of the structural OH groups of portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$, resulting from the hydration process involving C_3S and C_2S . The band associated with nano zeolite (Z 1.5%) decreased as the hydration process progressed, indicating a decrease in the presence of unbound water and the formation of C–S–H bonds [7,8].

The waveband in the range of 3417.86 – 3444.87 cm^{-1} is often associated with OH stretching of water molecules bound to the cement matrix. The wavelength range of cement mortar without nano-zeolite had a reduced size compared to cement containing nano-zeolite. This re-

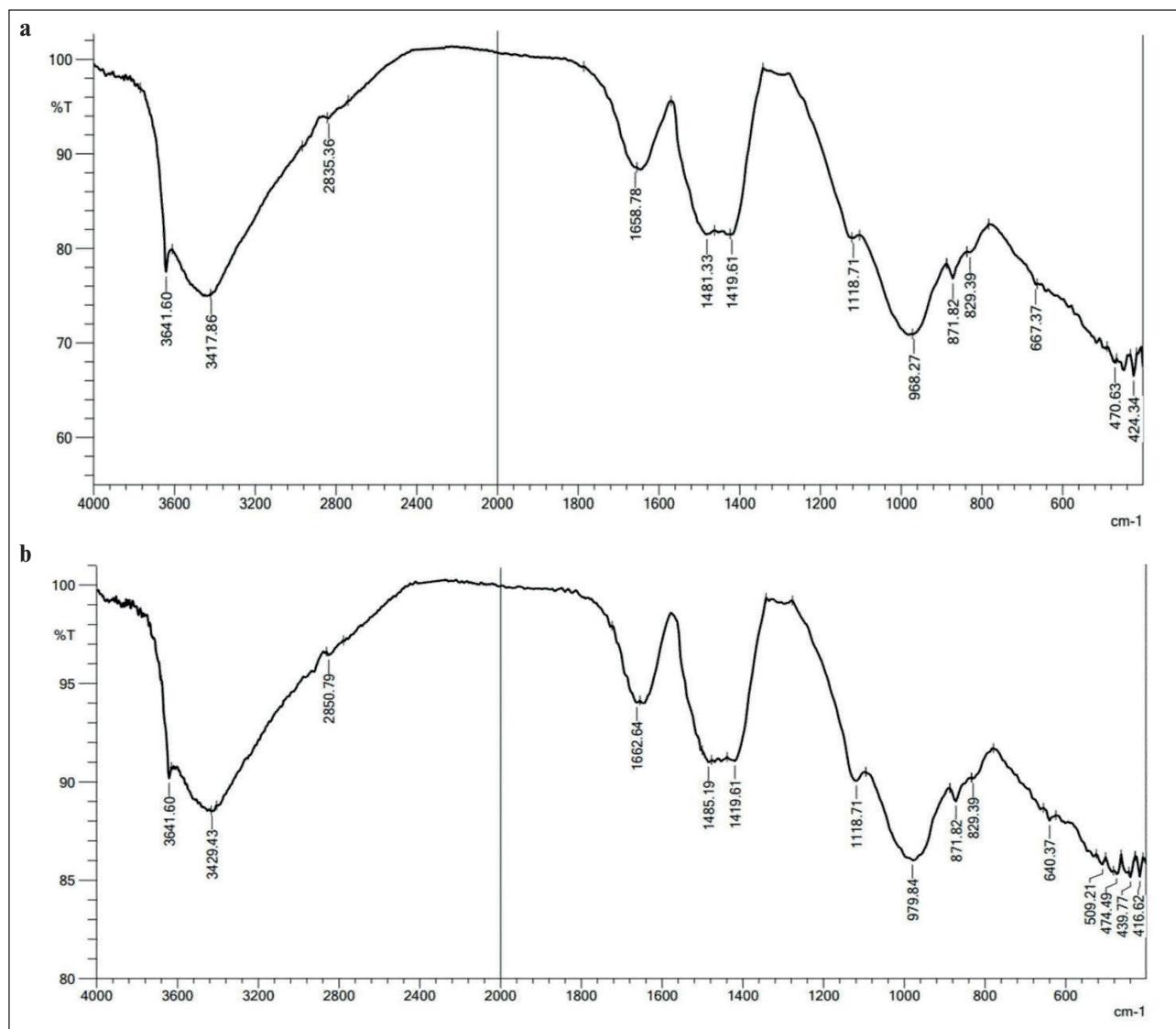


Fig. 3. IR spectrum of cement mixtures with nano-zeolite: a – Net cement, b – Cement with 0.5% nano-zeolite; c – Cement with 1% nano-zeolite; d – Cement with 1.5% nano-zeolite

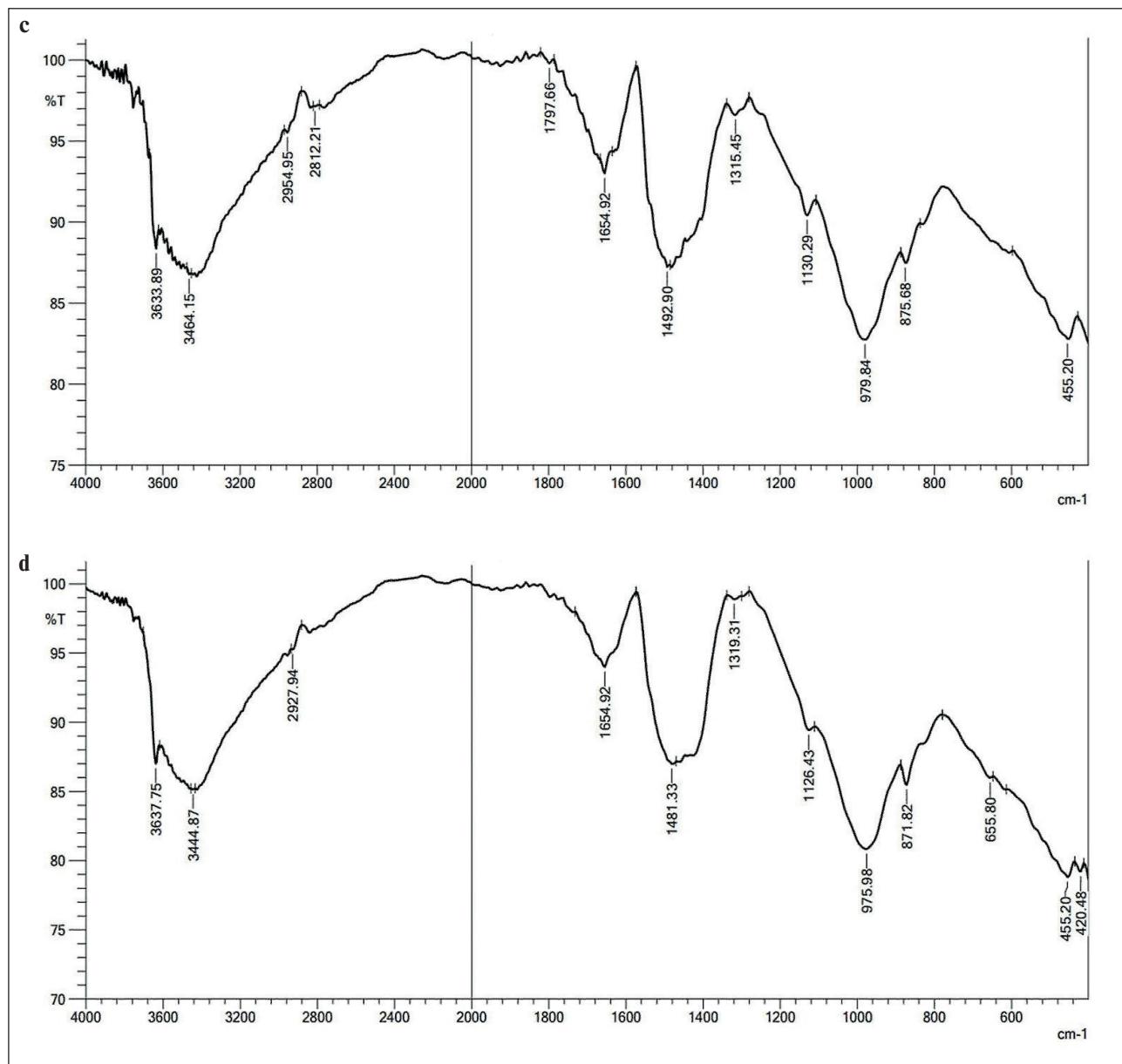


Fig. 3. IR spectrum of cement mixtures with nano-zeolite: a – Net cement, b – Cement with 0.5% nano-zeolite; c – Cement with 1% nano-zeolite; d – Cement with 1.5% nano-zeolite

sult suggests that the hydration phase at this particular location was more effective for cement without any additives [8, 9].

The observed peaks at 2835.36–2927.94 cm⁻¹ can be attributed to the stretching vibrations of the OH and CH molecular groups. These peaks indicate a decrease in the presence of unbound water molecules [10]. The bond between cement and nano-zeolite (Z 1%) became asymmetrical with respect to other samples with a wave number of 2954.95 cm⁻¹ due to the appearance of the wave number later than that of the other samples, but the trends are the same for all. The spectral band observed in the wavenumber range from 1654.92 to 1658.78 cm⁻¹ may

be associated with the bending vibration of the H–O–H fragment within the molecular structure of H₂O [11]. The observed wavelength range of 1419.61 cm⁻¹ is attributed to the presence of CO₃²⁻ in pure cement and nano-zeolite (Z 0.5%). The appearance of calcium carbonate (CaCO₃) may be due to the absorption of carbon dioxide (CO₂) from the environment during sample hydration. The absorption peak of calcium carbonate (CaCO₃) is observed at 1480 cm⁻¹, which can be explained by the consumption of hydroxyl groups (CH) and calcium silicate compounds (C–S–H) in this spectral region [12, 13]. At a wavelength of 1319.31 cm⁻¹ for nano zeolite (Z 1.5%), sulfur (S) exhibits vibrational bands corresponding to (S–O) bond

Table 1
The influence of nano-zeolite on the IR spectroscopy of cement stone

Net Cement	Z 0.5%	Z 1%	Z 1.5%	Approximate description
3641.60	3641.60	3633.89	3637.75	Overlapping stretching vibrations of structural OH groups of Ca(OH) ₂
3417.86	3429.43	3464.15	3444.87	OH stretching of water molecules bound to the cement matrix
2835.36	2850.79	2954.95	2927.94	Stretch vibrations of molecular groups O–H and C–H
1658.78	1662.64	2819.21	1654.92	H–O–H bending vibration
1481.33	1485.19	1797.66	1481.33	CO ₃ ⁻²
1419.61	1419.61	1657.92	1319.3	CO ₃ ⁻² and (S–O) relationship
1118.71	1118.71	1492.90	1126.43	Si–O bonds C ₂ S and C ₃ S
968.27	979.84	1315.45	975.98	Si–O bonds
871.82	871.82	1130.29	871.82	CO ₃ ⁻²
829.39	829.39	979.84	655.80	Bending CO ₃ ⁻² and Si–O–Si, or Al–O–Al
667.37	640.37	875.68	455.20	The deformation of SiO ₄ occurs in the shape of a tetrahedron and becomes clearer
470.63	509.21	455.20	420.48	
424.34	474.49			
	439.77			
	416.62			

[14]. The bands observed at 1118.71–1126.43 cm⁻¹, with the exception of the nano zeolite additive bond (Z 1%), are attributed to the bending in-plane vibrations of Si–O bonds in C₃S and C₃A. This means the formation of Ettringite, which in experiments occurred at 8 hours of age [15, 16].

The fundamental difference between hydrated and non-hydrated cement samples is the shift in the Si–O stretching mode from the absorption peak of 968.27 cm⁻¹ in non-hydrated cement to 979.84 cm⁻¹ in hydrated cement [7]. Bands in the frequency range of 871.82 cm⁻¹ for (pure cement, cement with nano zeolite 0.5% and cement with nano zeolite 1.5%) and connection at 829.39 cm⁻¹ for (pure cement and cement with nano zeolite 0.5%) are attributed to the CO₃⁻² ion, and the out-of-plane bends of CO₃ correspond to vibrations of C–O bonds in CH and CaCO₃ resulting from the interaction of Ca(OH)₂ and CO₂ present in the atmosphere [8,13]. The band at 655.80 cm⁻¹ for cement containing (1.5%) nano-zeolite is due to asymmetric and symmetric stretching of Si–O–Si or Al–O–Al deformation vibrations [11,17]. The presence of a band in the range of 400–500 cm⁻¹ in all samples can be explained by the deformation of the SiO₄ tetrahedron, which becomes more distinct. The crystal structure of Alite (C₃S) or Belite (C₂S) suggests the arrangement of SiO₄ groups in a tetrahedral ring. The infrared spectra of all silicates show two prominent peaks at 1000 and

500 cm⁻¹, which are thought to correspond to the two active frequencies of the tetrahedral point group [11, 18].

X-ray diffraction analysis

The XRD method allows the identification of the main phases of crystalline hydration. X-ray profiles were used to analyze the mineral composition of pure cement stone and hardened cement with (0.5%, 1% and 1.5%) nano-zeolite after curing for 8 hours in a bath at 60°C. The results are presented in Fig. 4.

From the X-ray diffraction patterns of the samples, it is clear that calcium hydroxide Ca(OH)₂ marked CH, characteristic peaks of 2-Theta (29.561, 32.330, 34.231, 47.244, 50.918 and 54.473), Tricalcium silicate (Ca₃SiO₅, abbreviated to C₃S), characteristic peaks of 2-Theta (29.244 and 62.740), Dicalcium Silicate Hydrate (Ca₂SiO₄•H₂O, abbreviated C₂S), characteristic peak 2-Theta (46.989), Aluminate (CaO•Al₂O₃, abbreviated C₃A), characteristic peak 2-Theta (32.730) and Ferrite (CaO•Al₂O₃•Fe₂O₃, marked C₄AF), characteristic 2-Theta peak (33.958) [19, 20].

The highest peak intensity at 2-Theta (34.231 and 47.244) is due to calcium hydroxide CH, which decreases with the addition of nano-zeolite. This phenomenon elucidates the pozzolanic behavior of nano zeolite, which reacts with precipitated calcium hydroxide upon hydration

to form C—S—H, reduces the calcium hydroxide content of the layered structure and increases C—S—H. As a result, the addition of nano-zeolite to Portland cement affects the early hydration process of the cement stone and improves its early strength. In addition, the possibility of calcium carbonate CaCO_3 may occur due to partial carbonation of portlandite.

Since the mixtures were prepared simultaneously for all cement samples, random carbonation due to the reaction of calcium hydroxide with atmospheric carbon dioxide occurred to the same extent for all samples. This observation was also confirmed by IR spectrum analysis. Due to the presence of only a limited number of broad and weak diffraction peaks in C—S—H X-ray diffraction

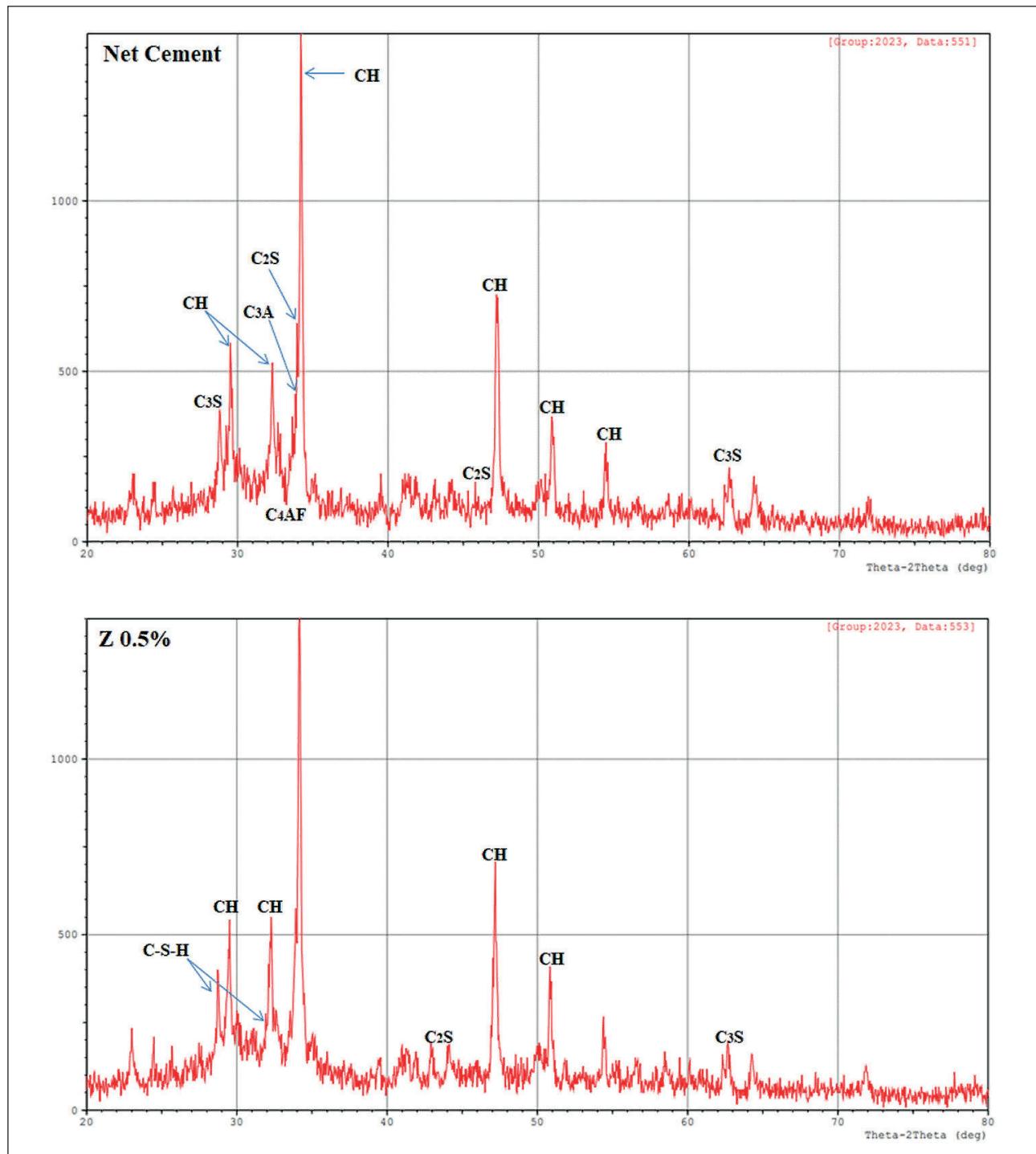


Fig. 4. X-ray patterns of four samples of cement stone with and without nano zeolite

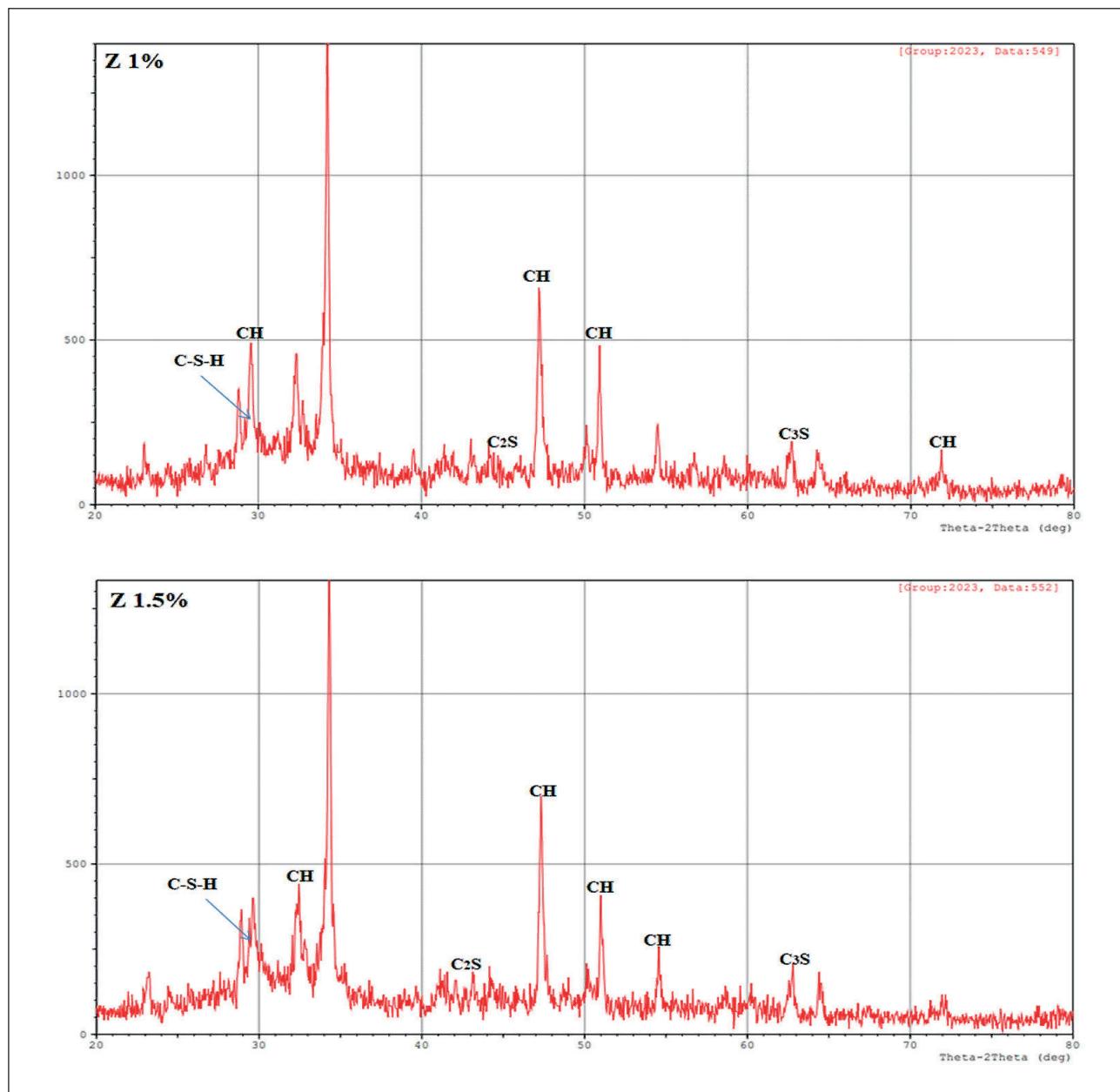


Fig. 4. X-ray patterns of four samples of cement stone with and without nano zeolite

patterns, this phase is often called X-ray amorphous. This term suggests that the C–S–H crystal structure does not exhibit any organized arrangement over long distances [21]. However, according to published data, X-ray diffraction patterns (XRD) of C–S–H consistently show peaks at certain angles in 2-Theta (7.4, 16.7, 29.1, 32, 49.8, 55, 66.8), which are mainly asymmetrical [22, 23]. According to this and from the XRD data table (main data processing), 4 C–S–H patterns were recorded for the samples, 2 patterns in nano-zeolite 0.5%, and the remaining 2 patterns appeared in nano-zeolite 1% and 1.5% with integrated intensity. The formation of calcium silicate hydrate occurs due to the interaction of C_3S or

C_2S with water. The result material (C–S–H) is often called a gel rather than a crystalline substance due to the lack of a regular structure that can be seen using X-ray diffraction. Its composition can vary, but it usually contains about twice as much CaO as SiO_2 , as well as a small amount of water [24].

AFM analysis of the surface of nanostructures

Atomic force microscopy was used to study the topography and surface morphology of the samples under study at the nanoscale. A 3D image of the surface roughness of the samples is shown in Fig. 5.

Nanoparticles affect the cement structures in the samples, causing the formation of multifaceted agglomerates. AFM topography spectra of the samples show the presence of mud cracks above a uniformly smooth and flat surface layer, which is covered by nano volume structures including nano zeolite particles. Upon closer inspection, these images show that the nanoparticles propagate along these cracks and appear to increase the surface layer's resistance to deformation and stress relaxation in cement-based materials. In addition, they promote viscoelastic C–S–H behavior as evidenced by topography.

Figure 5 show that the surface roughness has the appearance of a complex structure with many peaks and valleys of different sizes and distances from each other. According to ISO 25178 and from the AFM surface roughness table data, the height parameters describing the surface morphology are; (Sq) RMS height; (Ssk) Surface asymmetry of limited scale; (Sku) Surface kurtosis of limited scale; (Sp) Maximum peak height of a limited scale surface; (Sv) Maximum height of a surface failure of a limited scale; (Sz) maximum height of a limited scale surface; And; (Sa) arithmetic mean of the surface height of a limited scale. Table 2 show the parameter values.

The distance between different texture components can be described using the parameters Sa and Sq, which are optimized to describe the peaks and valleys of the surface [25]. Similarly, the value of Ssk reflects the de-

gree of displacement of the roughness shape. The Sku value of a roughness profile shows how sharp it is. Sp, Sv and Sz are parameters obtained by analyzing the absolute largest and smallest points found on the surface under study [25, 26]. From the table 2 it follows that with increasing values of Sa and Sq for the surface, the size of the cement grains will be high. This can be seen when using Z 1% nano zeolite by the surface peaks and valleys in Fig. 5 and height values in table 2. In addition, low values of Sa and Sq can help reduce matrix porosity and increase its strength. This manifestation in a matrix with 1.5% nano zeolite is clearly visible both in the figure and in the lowest values of Sa and Sq in the table [25, 27]. The symmetry of peaks and valleys is described by Ssk. If Ssk = 0, then the peaks and valleys are evenly distributed around the mean plane. If Ssk < 0, then valleys predominate on the surface (Ssk in Z0.5% nano zeolite is less than 0). On the contrary, if Ssk > 0, then the surface is dominated by peaks. Sku is a metric that quantitatively characterizes the degree of surface sharpness. In general, when Sku = 3, this indicates that the surface has a balanced distribution of both smooth and jagged peaks and valleys. If the Sku value is less than 3, then the surface consists mainly of flattened peaks and valleys with relatively significant curvature at the edges. This may indicate a lower probability of crack initiation under stress compared to surfaces with sharp peaks and

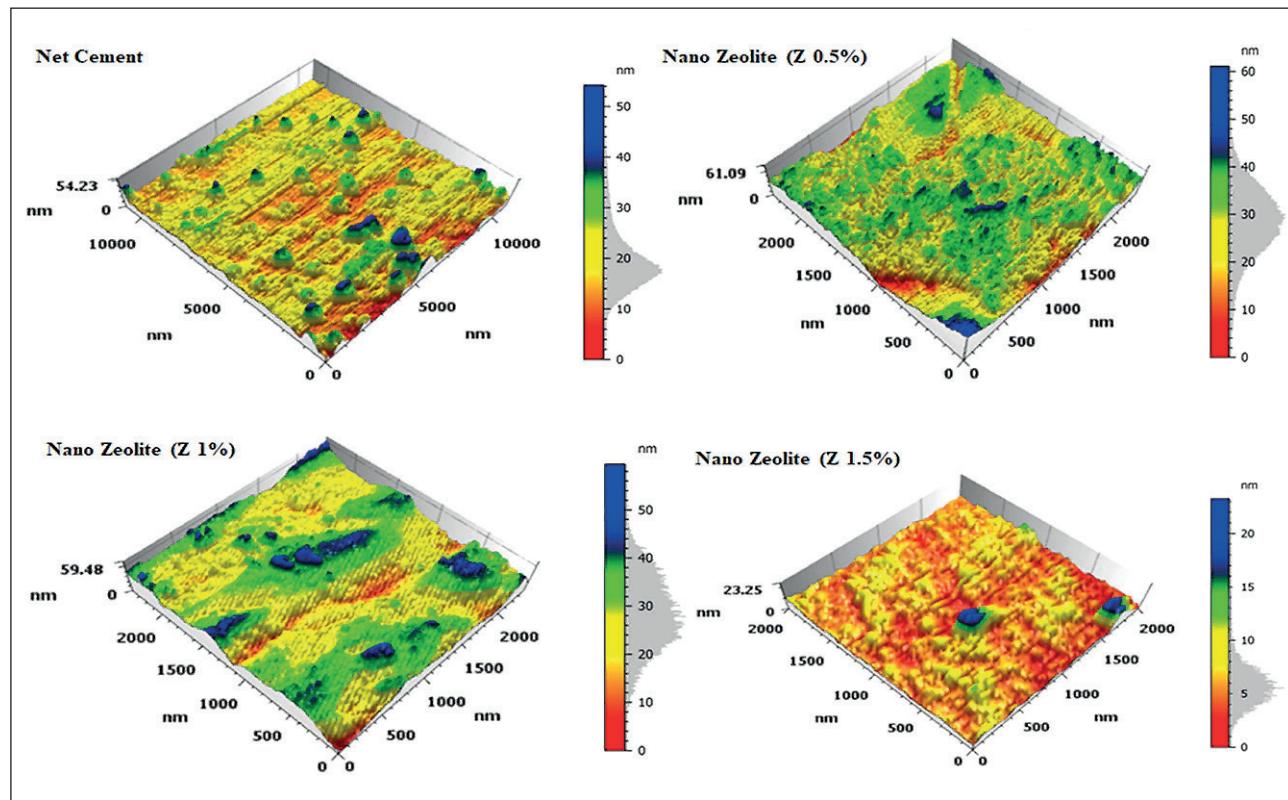


Fig. 5. AFM images of cement samples without nano zeolite (pure cement) and with nano zeolite (0.5%, 1%, 1.5%)

Table 2
Surface roughness parameters for cement and additives

The parameters	Net cement	Z 0.5%	Z 1%	Z 1.5%
Sq (nm)	5.847	7.137	7.655	2.332
Ssk	1.225	- 0.2093	0.03682	2.501
Sku	5.876	3.554	2.787	15.24
Sp (nm)	35.00	32.55	30.72	17.36
Sv (nm)	19.24	28.53	28.76	5.899
Sz (nm)	54.23	61.09	59.48	23.25
Sa (nm)	4.243	5.581	6.216	1.549

valleys. Conversely, if Sku is greater than 3, then the surface has clearly defined peaks and valleys with very little curvature at the edges [27, 28].

CONCLUSION

The results showed that when nano zeolite is added, the content of calcium hydroxide CH decreases. This phenomenon explains the pozzolanic behavior of nano

zeolite, which reacts with precipitated calcium hydroxide upon hydration to form C–S–H, reduces the layered structure of calcium hydroxide and increases C–S–H. Thus, the addition of nano zeolite to Portland cement affects the process of early hydration of cement stone and increases its early strength. AFM analysis showed that when 1.5% nano zeolite is introduced into cement, many irregular peaks and valleys of low porosity filler are formed, which increases the strength of the cement.

REFERENCES

1. A. Peled, J. Castro, W.J. Weiss. Atomic force and lateral force microscopy (AFM and LFM) examinations of cement and cement hydration products. *Elsevier, Cement and Concrete Composites*. 2013; 36: 48–55. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.021>
2. G. Bell, J. Bensted, F. P. Glasser. Characterization of hydrothermally treated calcium silicate and oilwell cement hydration products. *Advances in Cement Research*. 1989; 2(6): 61–72.
3. E. Koohsaryan, Mansoor A. Nanosized and hierarchical zeolites: A short review. *Chinese Journal of Catalysis*. 2016; 37: 447–467. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(15\)61038-5](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(15)61038-5)
4. Luke et al., Zeolite-containing cement composition. Patent, US 2004/0112600 A1.
5. API specification 10A, *Cements and Materials for Well Cementing*. 25th edition, 2019.
6. Jemimah C. Milton, Prince A. Gnanaraj *Compressive Strength of Concrete with Nano Cement*. IntechOpen; 2021.
7. Suman L. Shrestha. Characterization of Some Cement Samples of Nepal Using FTIR Spectroscopy. *IJARCS*. 2018; 5(7): 19–23. DOI: <http://dx.doi.org/10.20431/2349-0403.0507004>
8. H. Biricika, N. Sarierb. Comparative Study of the Characteristics of Nano Silica – Silica Fume – and Fly Ash – Incorporated Cement Mortars. *Materials Research*. 2014; 17(3). <https://doi.org/10.1590/S1516-14392014005000054>
9. Victor H. J. M. dos Santos, D. Pontin, Gabriela G. D. Ponzi, A. Sofia de Guimaraes e Stepanha, R. B. Martel, Marta K. Schütz, Sandra Mara O. Einloft, F. D. Vecchia. Application of Fourier Transform infrared spectroscopy (FTIR) coupled with multivariate regression for calcium carbonate (CaCO₃) quantification in cement. *Construction and Building Materials*. 2021; 3(13): 125413. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125413>
10. Y. R. Zhang, X. M. Kong, Z. B. Lu, Zi C. Lu, S. S. Hou. Effects of the charge characteristics of polycarboxylate superplasticizers on the adsorption and the retardation in cement pastes. *Cement and Concrete Research*. 2015; 67: 184–196. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.10.004>
11. Ping Yu, R. J. Kirkpatrick, B. Poe, Paul F. McMillan, X. Cong. Structure of Calcium Silicate Hydrate (C-S-H): Near-, Mid-, and Far-Infrared Spectroscopy. *Journal of the American Ceramic Society*. 1999; 82(3): 742–748.
12. Omotayo O., Himanshu M., Ramadan A., Subhash S., Samuel O., Shokrollah H., G. DeBruijn, Winton C., Dave S. Degradation of well cement in HPHT acidic environment: Effects of CO₂ concentration and pressure. *Cement and Concrete Composites*. 2016; 74: 54–70. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.09.006>

13. D. Vaiciukyniene, G. Skipkiunas, M. Dauksys, V. Sasnauskas. Cement hydration with zeolite-based additive. *chemija.* 2013; 24(4): 271-278. <https://www.researchgate.net/publication/259580412>
14. M.J. Varas, M. Alvarez de Buergo, R. Fort. Natural cement as the precursor of Portland cement: Methodology for its identification. *Cement and Concrete Research.* 2005; 35: 2055-2065.
15. A. Mohammeda, S. Rafiq, W. Mahmood, R. Noaman, H. AL-Darkazali, K. Ghafor, W. Qadir. Microstructure characterizations, thermal properties, yield stress, plastic viscosity and compression strength of cement paste modified with nanosilica. *Journal of Materials Research and Technology.* 2020; 9(5): 10941-10956. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.083>
16. Z. Ou, B. Ma, Sh. Jian. Comparison of FT-IR, Thermal Analysis and XRD for Determination of Products of Cement Hydration. *Advanced Materials Research.* 2011; (168-170): 518-522. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.168-170.518>
17. R. Ma, L. Guo, W. Sun, Zh. Rong. Well-Dispersed Silica Fume by Surface Modification and the Control of Cement Hydration. Hindawi. 2018: Article ID 6184105. <https://doi.org/10.1155/2018/6184105>
18. L. Fernández-Carrasco, D. Torrens-Martín, L. M. Morales, S. Martínez-Ramírez. Infrared Spectroscopy in the Analysis of Building and Construction Materials. Infrared Spectroscopy – Materials Science, Engineering and Technology. <https://www.intechopen.com/>
19. ASTM C 1365 - 98, Standard Test Method for Determination of the Proportion of Phases in Portland cement and Portland-Cement Clinker Using X-Ray Powder Diffraction Analysis, 1998.
20. Taylor H.F.W. *Cement chemistry.* Thomas Telford, 2nd edition; 1997.
21. S. Grangeon, F. Claret, Y. Linard, Ch. Chiaberge. X-ray diffraction: a powerful tool to probe and understand the structure of nanocrystalline calcium silicate hydrates. *Acta Cryst.* 2013; B69: 465-473.
22. K. Garbev, G. Beuchle, M. Bornfeld, L. Black, P. Stemmermann. Cell Dimensions and Composition of Nanocrystalline Calcium Silicate Hydrate Solid Solutions. Part 1: Synchrotron-Based X-Ray Diffraction. *Journal of the American Ceramic Society.* 2008; 91(9): 3005- 3014.
23. K. Garbev, M. Bornfeld, G. Beuchle, P. Stemmermann. Cell Dimensions and Composition of Nanocrystalline Calcium Silicate Hydrate Solid Solutions. Part 2: X-Ray and Thermogravimetry Study. *Journal of the American Ceramic Society.* 2008; 91(9): 3015-3023.
24. Peter C. Hewlett, Martin Liska, Lea's *Chemistry of Cement and Concrete.* Elsevier, 5th Edition; 2019.
25. L. Sadowski, S. Czarnecki, J. Hoła. Evaluation of the height 3D roughness parameters of concrete substrate and the adhesion to epoxy resin. *International Journal of Adhesion and Adhesives.* 2016; 67: 3-13. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadhad.2015.12.019>
26. Keyence Corporation of America, Introduction to Surface Roughness Measurement; 2012. <https://www.keyence.com/>
27. Z. Zhu, Sh. Lou, C. Majewski. Characterisation and correlation of areal surface texture with processing parameters and porosity of High Speed Sintered parts. *Additive Manufacturing.* 2020; 36: 101402. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101402>
28. Richard Leach. *Characterisation of Areal Surface Texture.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2013.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ali I.M. Mohammedameen – Postgraduate student, Department «Oil and Gas Well Drilling», Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, alimestudent@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-0760-599X>

Farit A. Agzamov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Oil and Gas Well Drilling, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, faritag@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5850-5261>

Rustem. A. Ismakov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Department of Oil and Gas Well Drilling, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, ismakovrustem@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7544-922X>

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Ali I.M. Mohammedameen – Samples preparation, experiment carrying out, results analysis, writing the article.

Farit A. Agzamov – Scientific leadership, academic advising, development of methodology and research methods, scientific editing of the article, and writing the article.

Rustem A. Ismakov – Scientific supervision, scientific editing of the article, writing the article.

The authors declare no conflict of interest.

The article was submitted 22.12.2023; approved after reviewing 18.01.2024; accepted for publication 23.01.2024.

Научная статья

УДК 622.245

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-1-12-21>

CC BY 4.0

Исследование влияния наночастиц цеолита на некоторые свойства тампонажного портландцемента

Али Ибрахим Мохаммедамин Мохаммедамин* , Фарит Акрамович Агзамов , Рустэм Адипович Исмаков 

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: alimestudent@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. Визуализация микроструктуры цемента является новой областью неразрушающего исследования материала. Некоторые данные могут быть доступны с помощью одного метода, но недоступны с помощью другого, потому что существует несколько физических и химических механизмов, которые могут вызвать распад цемента. Для количественной и качественной оценки цементного камня необходимо исследовать его как сложный многофазный композиционный материал, идентифицировать его кристаллические фазы и оценить точный размер его наночастиц. **Материалы и методы.** Данная работа посвящена результатам исследования под микроскопом влияния наноцеолитов (размер частиц ≤ 100 нм) на цементы для крепления скважин. Для изучения свойств поверхности (химических связей между молекулами, анализа минерального состава и поверхностной топографии и морфологии) цементного камня класса G использовались три типа микроскопов (ИК-спектр, дифракция рентгеновских (XRD), атомно-силовая микроскопия (ACM). Добавки наночастиц цеолита составляли (0,5%, 1%, 1,5% по массе цемента) после 8 часов отверждения в водяной бане при атмосферном давлении и температуре нагрева 60°C (140°F). **Результаты и обсуждение.** С помощью ИК спектра были изучены свойства поверхности с точки зрения химических связей между молекулами. С добавлением наноцеолита значения полос уменьшались, что означает уменьшение количества свободной воды и увеличение прочности системы. Метод XRD позволяет идентифицировать основные фазы кристаллогидратации. Наибольшая интенсивность пика приходится на гидроксид кальция CH, которая снижается при добавлении наноцеолита. Это явление объясняет пуццолановое поведение наноцеолита, который при гидратации реагирует с осажденным гидроксидом кальция с образованием C-S-H, снижает содержание гидроксида кальция в слоистой структуре и увеличивает C-S-H. Топографию и морфологию поверхности образцов изучали на наноуровне с помощью атомно-силовой микроскопии (ACM). Изображения показывают, что наночастицы распространяются вдоль трещин и, по-видимому, повышают устойчивость поверхностного слоя к деформации и релаксации напряжений в материалах на основе цемента. Кроме того, они способствуют вязкоупругим свойствам C-S-H. **Заключение.** Добавление наноцеолита в портландцемент влияет на процесс ранней гидратации цементного камня и повышает его раннюю прочность. ACM-анализ показал, что при введении в цемент 1,5% наноцеолита образуется множество неровных пиков и впадин низкопористого наполнителя, что увеличивает прочность цемента.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: наноцеолит, ИК-спектроскопия, силикат-гидрат-кальция (C-S-H), гидроксид кальция (CH), рентгеновская дифракция (XRD), атомно-силовая микроскопия (ACM).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Мохаммедамин А.И.М., Агзамов Ф.А., Исмаков Р.А. Исследование влияния наночастиц цеолита на некоторые свойства тампонажного портландцемента // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т. 16, № 1. С. 12–21. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-1-12-21>. – EDN: RYBNW.

ВВЕДЕНИЕ

В состав цементного камня после отверждения смеси входят различные кристаллические и аморфные фазы, а также вода и поры различного размера. В процессе гидратации образуется гидрат-

силиката-кальция (C-S-H), который составляет до 60% объема гидратированного цемента, и около 25% объема раствора составляют кристаллы гидроксида кальция (CH). Для изучения подобных систем инфракрасная спектроскопия в сочетании с рентгеновским анализом и микроскопией является полез-

© Мохаммедамин А.И.М., Агзамов Ф.А., Исмаков Р.А., 2024

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НАНОМАТЕРИАЛОВ

ным инструментом для определения характеристик фаз [1, 2].

Наноцеолит – это разновидность наноматериала, которому уделялось недостаточно внимания в качестве добавки при цементировании скважин. Возможно, это связано с широкой доступностью многих наноматериалов с использованием наноцеолита в ряде других промышленных применений.

В целом, наноцеолиты представляют собой кристаллические алюмосиликаты с четко выраженной пористой структурой и размерами пор молекулярных размеров в диапазоне 0,3–2 нм (в рамках открытой трехмерной структуры из тетраэдрического кремнезема SiO_4 и оксида алюминия AlO_4). Наноразмерный цеолит был обнаружен как в вулканических, так и в осадочных породах. В промышленности цеолит зарекомендовал себя как ионообменник, катализатор и адсорбент, который используется в нефтепереработке, нефтехимии, сельском хозяйстве, управлении почвами, очистке воды и сточных вод [3]. Следовательно, формула для кристаллографической элементарной ячейки может быть использована для описания всех цеолитов: $\text{M}/\text{n}[(\text{AlO}_2)_a(\text{SiO}_2)_b]\cdot\text{XH}_2\text{O}$, где M обозначает катионы, n – валентность катиона, соотношение $b:a >= 1$ и 5, а X – количество молей воды, захваченных внутри структуры цеолита [4].

Данное исследование направлено на оценку эффективности использования наноцеолита в качестве добавки при цементировании нефтяных скважин. Исследование было сосредоточено на анализе морфологии поверхности и структуре всех образцов с использованием методов рентгеновской дифракции, ИК-спектров и АСМ. Результаты этого исследования могут помочь в определении потенциала наноцеолитов в качестве альтернативного компонента при приготовлении цементного раствора для поддержания долговременной целостности скважины.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для экспериментов использовался цемент для нефтяных скважин (класс G) и порошок наночастиц цеолита с размером частиц менее 100 нм, получивший название (Sapo-11 nano zeolite powder 4A) в виде белого порошка (рис. 1) с объемом пор ($\geq 0,16 \text{ cm}^3/\text{г}$), удельной поверхностью ($\text{SSA} \geq 180 \text{ m}^2/\text{г}$) и химическим составом ($\text{SiO}_2 \sim 6\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 48\%$, и $\text{Na}_2\text{O} \leq 0,2\%$).

Для подготовки проб использовалась деиницированная вода с соотношением вода/цемент $\text{B/C} = 0,44$. Испытываемый цементный раствор помешали в подготовленные формы ($50 \times 50 \times 50 \text{ mm}$) при различных дозировках 0,5%, 1% и 1,5% наноцеолита. Образцы отверждали герметично, храня сусpenзию внутри медных форм с плотно прикрепленными крышками и сразу же погружая их в ванну



Рис. 1. Особенности внешнего вида наноцеолита



Рис. 2. Ванна для выдержки образцов цемента в воде при атмосферном давлении и температуре нагрева 60°C (140°F)

отверждения (рис. 2), при атмосферном давлении и температуре нагрева 60°C (140°F) в течение 8 часов. Весь процесс подготовки цементных смесей проводился при комнатной температуре. Процедура была выполнена в соответствии со спецификацией API Spec. 10A, 2019 г. [5].

По истечении заданного времени (8 часов) все образцы извлекали из ванны для отверждения, кубики извлекали из форм. Образцы сушили при комнатной температуре в течение 24 часов. Образцы цемента измельчались и просеивались. Исследования морфологии и микроструктуры и фазовый состав образовавшихся гидратов проводились с ис-

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НАНОМАТЕРИАЛОВ

пользованием рентгеновской дифракции (XRD-6000 Shimadzu с углом падения 0,154 нм с использованием Cu-К α -излучения), инфракрасных спектров Фурье-преобразования (ИК спектра) (Sigmadzu модель 1800, Япония) и атомно-силовой микроскопии (NaioAFM 2022, Nanosurf, Швейцария).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ цементного порошка по инфракрасным спектрам

Анализ спектроскопии твердения четырех смесей (чистый цемент и с добавками наноцеолита Z 0,5%, Z 1% и Z 1,5%) представлен ниже. Четыре образца измельчили в порошок и протестировали для изучения свойств поверхности с точки зрения химических связей между молекулами. В анализе инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье горизонтальная ось инфракрасного (ИК) спектра обозначается как волновое число (1/см) и охватывает диапазон от 400 см $^{-1}$ в крайнем правом углу до 4000 см $^{-1}$ в крайнем левом с изменением масштаба в 2 раза при 2000 см $^{-1}$. Вертикальная ось, обозначенная как коэффициент пропускания (% T) в процентах, варьируется от 0 в начале оси ординат до 100 в верхней части. Была проведена идентификация характерных пиков в инфракрасном спектре [6]. Некоторые химические элементы в цементе обладают разными функциональными группами; в том числе H₂O, Al \times O, Si \times O, SO₄ $^{2-}$, CO₃ $^{2-}$ и OH $^-$, активны в инфракрасном диапазоне [7]. Спектры пропускания чистого цементного раствора и цемента с различным количеством наноцеолита показаны на рис. 3 (соответственно а, б, в и г).

Из рис. 3 видно, что величина полосы 3641,60 см $^{-1}$ уменьшается до 424,34 см $^{-1}$, что предполагает образование геля C \times S \times H. Из рис. 3б, 3в и 3г с добавками наноцеолита величина полосы между 3641,60 см $^{-1}$ и 3637,75 см $^{-1}$ уменьшается до 416,62 см $^{-1}$ при 0,5% наноцеолита и 420,48 см $^{-1}$ при 1,5% наноцеолита. Видно, что наименьшее значение полосы наблюдается при добавке наноцеолита 0,5%, а уменьшение значения полосы означает уменьшение свободной воды и увеличение прочности системы. Все пиковые значения приведены в табл. 1.

Спектральный анализ всех образцов камня выявил наличие широких полос в диапазоне от 3641,60 до 3637,75 см $^{-1}$. Эти полосы можно отнести к перекрывающимся валентным колебаниям структурных OH-групп портландита Ca(OH)₂, возникающим в результате процесса гидратации с участием C₃S и C₂S. Полоса, связанная с наноцеолитом (Z 1,5%), уменьшалась по мере развития процесса гидратации, что

указывает на уменьшение присутствия несвязанной воды и образование связей C—S—H [7, 8].

Полоса волн в диапазоне 3417,86–3444,87 см $^{-1}$ часто связана с OH-растяжением молекул воды, связанных с цементной матрицей. Диапазон волн цементного раствора без наноцеолита имел уменьшенный размер по сравнению с цементом, содержащим наноцеолит. Данный результат предполагает, что фаза гидратации в этом конкретном месте была более эффективной для цемента без каких-либо добавок [8, 9].

Наблюдаемые пики при 2835,36–2927,94 см $^{-1}$ можно отнести к колебаниям растяжения молекулярных групп OH и CH. Эти пики свидетельствуют об уменьшении присутствия несвязанных молекул воды [10]. Связь цемента с наноцеолитом (Z 1%) стала асимметричной по отношению к другим образцам с волновым числом 2954,95 см $^{-1}$ из-за появления числа волн позже, чем у остальных образцов, однако тенденции одинаковы для всех. Спектральная полоса, наблюдавшаяся в диапазоне волновых чисел от 1654,92 до 1658,78 см $^{-1}$, может быть связана с деформационным колебанием фрагмента H—O—H внутри молекулярной структуры H₂O [11]. Наблюдавшийся диапазон волн 1419,61 см $^{-1}$ объясняется наличием CO₃ $^{2-}$ в чистом цементе и наноцеолите (Z 0,5%). Появление карбоната кальция (CaCO₃) может быть связано с поглощением углекислого газа (CO₂) из окружающей среды в процессе подготовки проб к испытаниям. Пик поглощения карбоната кальция (CaCO₃) наблюдается при 1480 см $^{-1}$, что можно объяснить расходом гидроксильных групп (CH) и соединений силиката кальция (C—S—H) в этой спектральной области [12, 13]. При диапазоне волн 1319,31 см $^{-1}$ для наноцеолита (Z 1,5%) сера (S) демонстрирует колебательные полосы, соответствующие связи (S—O) [14]. Полосы, наблюдавшиеся при 1118,71–1126,43 см $^{-1}$, за исключением связи добавки наноцеолита (Z1%), относятся к деформационным плоскостным колебаниям связей Si—O в C₃S и C₃A. Это означает образование этtringита, которое в экспериментах произошло в 8-часовом возрасте [15, 16].

Принципиальное различие между образцами цемента заключается в смещении режима растяжения Si—O с пика поглощения 968,27 см $^{-1}$ в негидратированном цементе до 979,84 см $^{-1}$ в гидратированном цементе [7]. Полосы в диапазоне частот 871,82 см $^{-1}$ для чистого цемента, цемента с наноцеолитом 0,5% и цемента с наноцеолитом 1,5% и связи при 829,39 см $^{-1}$ для чистого цемента и цемента с наноцеолитом 0,5% приписываются иону CO₃ $^{2-}$, а внеплоскостные изгибы CO₃ соответствуют колебаниям связей C—O в CH и CaCO₃, возникающим в результате взаимодействия Ca(OH)₂ и CO₂, присутствующих в атмосфере [8, 13]. Полоса при 655,80 см $^{-1}$ для цемента, содержащего

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НАНОМАТЕРИАЛОВ

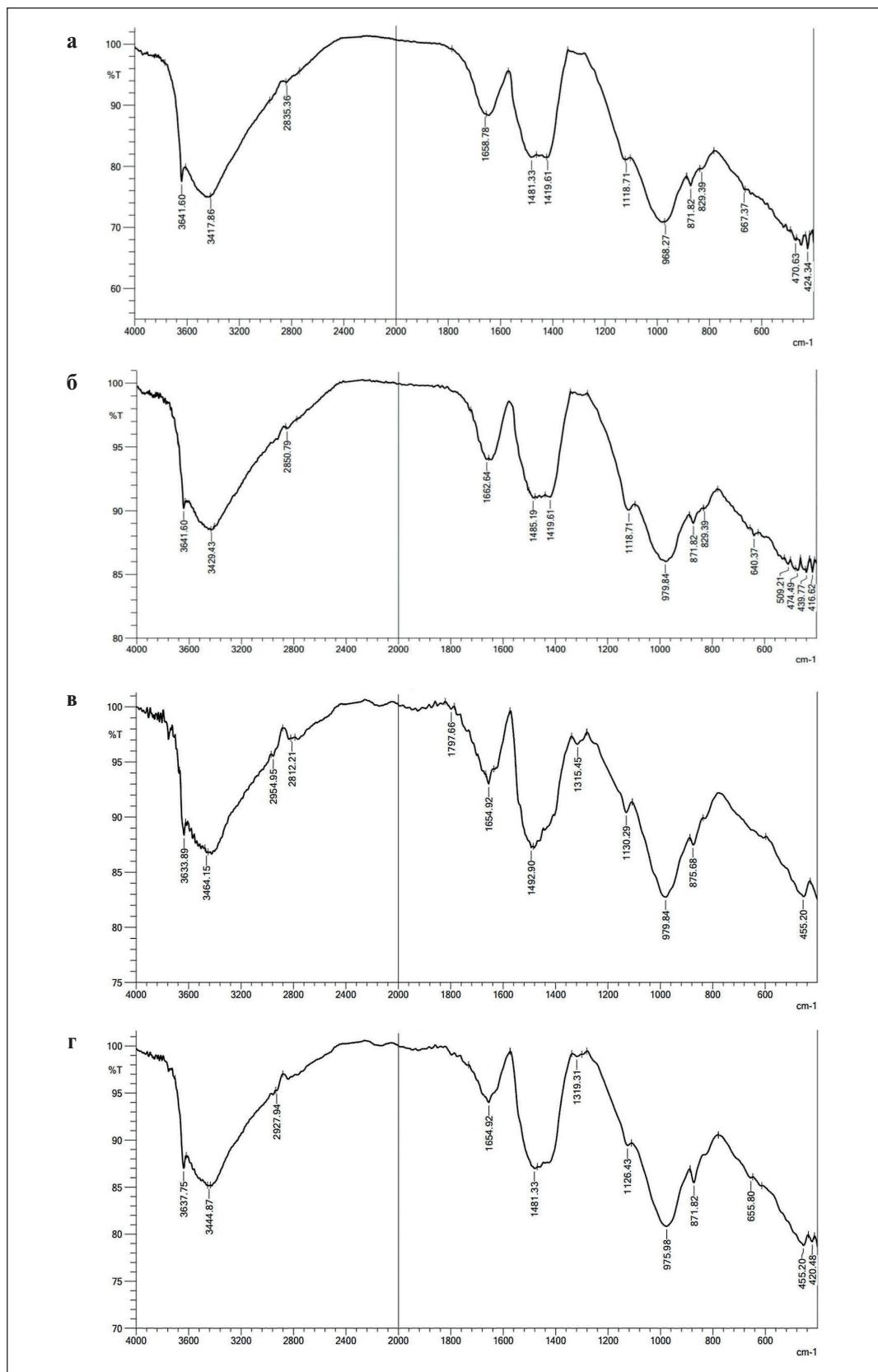


Рис. 3. ИК-спектр цементных смесей сnanoцеолитом: а – чистый цемент, б – цемент с 0,5% наноцеолита; в – цемент с 1% наноцеолита; г – цемент с 1,5% наноцеолита

Таблица 1

Влияние наноцеолита на показатели ИК-спектроскопии цементного камня

Чистый цемент	Z 0.5%	Z 1%	Z 1.5%	Примерное описание
3641,60	3641,60	3633,89	3637,75	Перекрывающиеся валентные колебания структурных OH – групп Ca(OH) ₂
3417,86	3429,43	3464,15	3444,87	OH – растяжение молекул воды, связанных с цементной матрицей
2835,36	2850,79	2954,95	2927,94	Растягивающие колебания молекулярных групп O–H и C–H
1658,78	1662,64	2819,21	1654,92	Вибрация изгиба H–O–H
1481,33	1485,19	1797,66	1481,33	CO ₃ ⁻²
1419,61	1419,61	1657,92	1319,3	Связь CO ₃ ⁻² и (S–O)
1118,71	1118,71	1492,90	1126,43	Связи Si–O C ₂ S и C ₃ S
968,27	979,84	1315,45	975,98	Связи Si–O
871,82	871,82	1130,29	871,82	CO ₃ ⁻²
829,39	829,39	979,84	655,80	Изгиб CO ₃ ⁻² и Si–O–Si, либо Al–O–Al
667,37	640,37	875,68	455,20	Деформация SiO ₄ происходит в форме тетраэдра и становится более четкой
470,63	509,21	455,20	420,48	
424,34	474,49			
	439,77			
	416,62			

1,5% наноцеолита, обусловлена асимметричным и симметричным растяжением деформационных колебаний Si–O–Si или Al–O–Al [11,17]. Наличие полосы в пределах 400–500 см⁻¹ во всех образцах можно объяснить деформацией тетраэдра SiO₄, которая становится более отчетливой. Кристаллическая структура Алита (C₃S) или Белита (C₂S) предполагает расположение групп SiO₄ в тетраэдрическом кольце. Инфракрасные спектры всех силикатов демонстрируют два заметных пика при 1000 и 500 см⁻¹, которые, как считается, соответствуют двум активным частотам тетраэдрической точечной группы [11, 18].

Рентгеноструктурный анализ

Метод XRD позволяет идентифицировать основные фазы кристаллической гидратации. Рентгеновские профили использовались для анализа минерального состава чистого цементного камня и затвердевшего цемента с 0,5%, 1% и 1,5% наноцеолита после их отверждения в течение 8 часов в ванне при температуре 60°C. Результаты представлены на рис. 4.

Из рентгенограмм образцов видно: гидроксид кальция Ca(OH)₂, отмеченный CH, характери-

стические пики 2-θ (29,561, 32,330, 34,231, 47,244, 50,918 и 54,473), силикат трикальция (Ca₃SiO₅, сокращенно до C₃S), характеристические пики 2-θ (29,244 и 62,740), гидрат силиката дикальция (Ca₂SiO₄•H₂O, сокращение C₂S), характеристический пик 2-θ (46,989), алюминат (CaO•Al₂O₃, сокращено C₃A), характеристический пик 2-θ (32,730) и феррит (CaO•Al₂O₃•Fe₂O₃, отмечен C₄AF), характерный пик 2-θ (33,958) [19, 20].

Наибольшая интенсивность пика при 2-θ (34,231 и 47,244) связана с гидроксидом кальция CH, который снижается при добавлении наноцеолита. Это явление проясняет пузцолановое поведение наноцеолита, который взаимодействует с осажденным гидроксидом кальция при гидратации с образованием C–S–H, снижает содержание гидроксида кальция в слоистой структуре и повышает C–S–H. В результате добавления наноцеолита в портландцемент отмечено влияние на ранний процесс гидратации цементного камня и улучшение его прочности на раннем этапе. Кроме того, возможность появления карбоната кальция CaCO₃ может иметь место из-за частичной карбонизации портландита. Поскольку смеси готовились одновременно для всех образцов цемента, случайная карбонизация за счет

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НАНОМАТЕРИАЛОВ

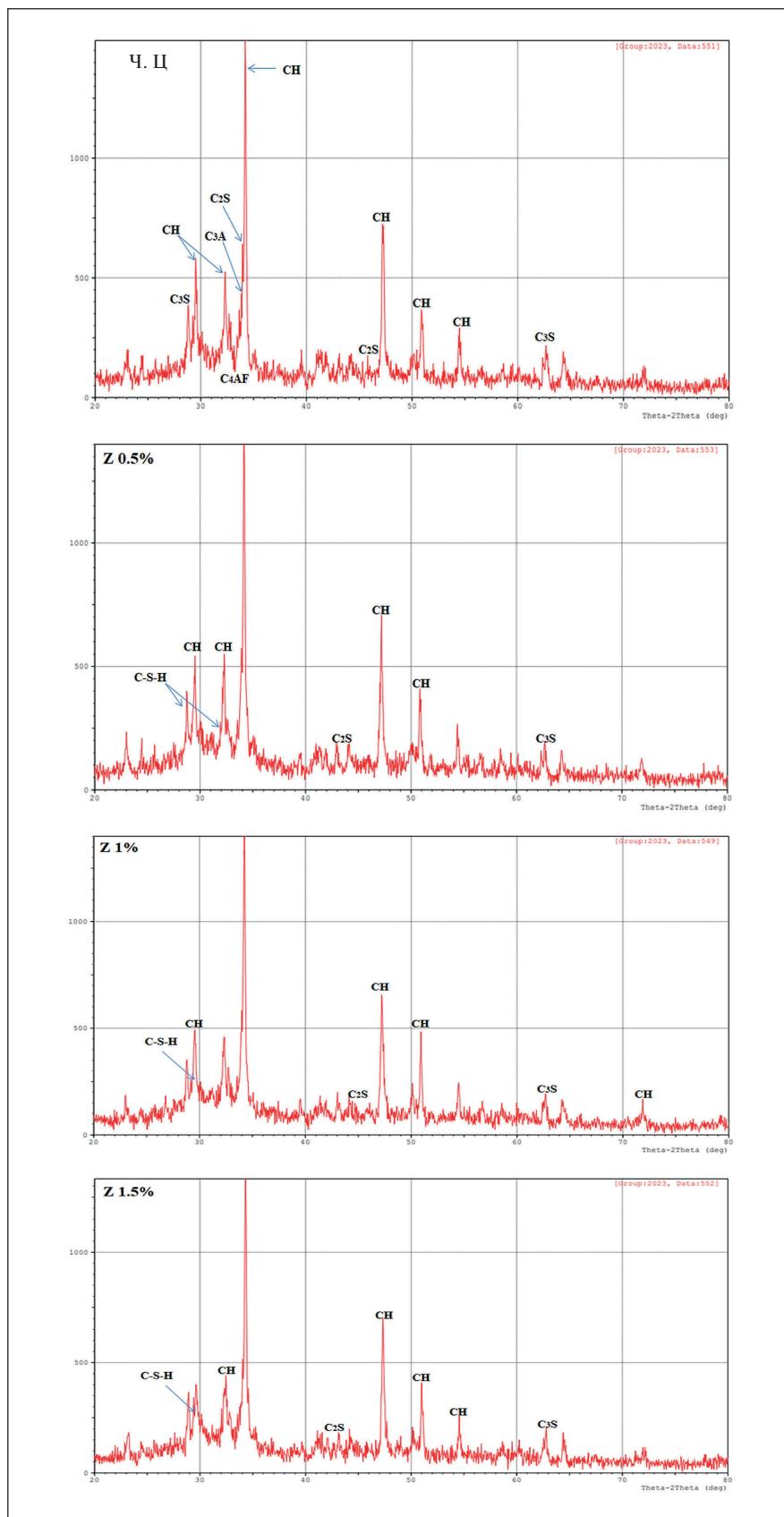


Рис. 4. Рентгенограммы четырех образцов цементного камня с наноцеолитом и без него

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НАНОМАТЕРИАЛОВ

реакции гидроксида кальция с углекислым газом атмосферы происходила в одинаковой степени для всех образцов. Это наблюдение было также подтверждено анализом ИК-спектра.

Из-за наличия лишь ограниченного числа широких и слабых дифракционных максимумов на рентгенограммах C–S–H эту фазу часто называют рентгеноаморфной. Этот термин предполагает, что кристаллическая структура C–S–H не обладает каким-либо организованным расположением на больших расстояниях [21]. Однако, согласно опубликованным данным, рентгенограммы (XRD) C–S–H постоянно демонстрируют пики под определенными углами в 2-θ (7,4, 16,7, 29,1, 32, 49,8, 55, 66,8), которые в основном асимметричны [22, 23]. В соответствии с этим из таблицы данных XRD (обработка основных данных) для образцов были записаны 4 картины C–S–H, 2 картины в наноцеолите 0,5%, и остальные 2 картины появились в наноцеолите 1% и 1,5% с интегрированной интенсивностью. Материал часто называют гелем, а не кристаллическим веществом из-за отсутствия регулярной структуры, которую можно увидеть с помощью рентгеновской дифракции. Его состав может варьироваться, но обычно он содержит

примерно в два раза больше CaO, чем SiO₂, а также небольшое количество воды [24].

АСМ-анализ поверхности наноструктур

Для исследования топографии и морфологии поверхности в наномасштабе исследуемых образцов использовалась атомно-силовая микроскопия. 3D-изображение шероховатости поверхности образцов представлено на рис. 5.

Наночастицы воздействуют на структуры цемента в образцах, вызывая образование многогранных агломератов. Спектры АСМ-топографии образцов показывают наличие грязевых трещин над равномерно гладким и плоским поверхностным слоем, который покрывает нанообъемные структуры, включающие частицы наноцеолита. При ближайшем рассмотрении на этих изображениях видно, что наночастицы распространяются по этим трещинам и, по-видимому, повышают устойчивость поверхностного слоя к деформации и релаксации напряжений в материалах на основе цемента. Кроме того, они способствуют вязкоупругому поведению C–S–H, о чем свидетельствует топография.

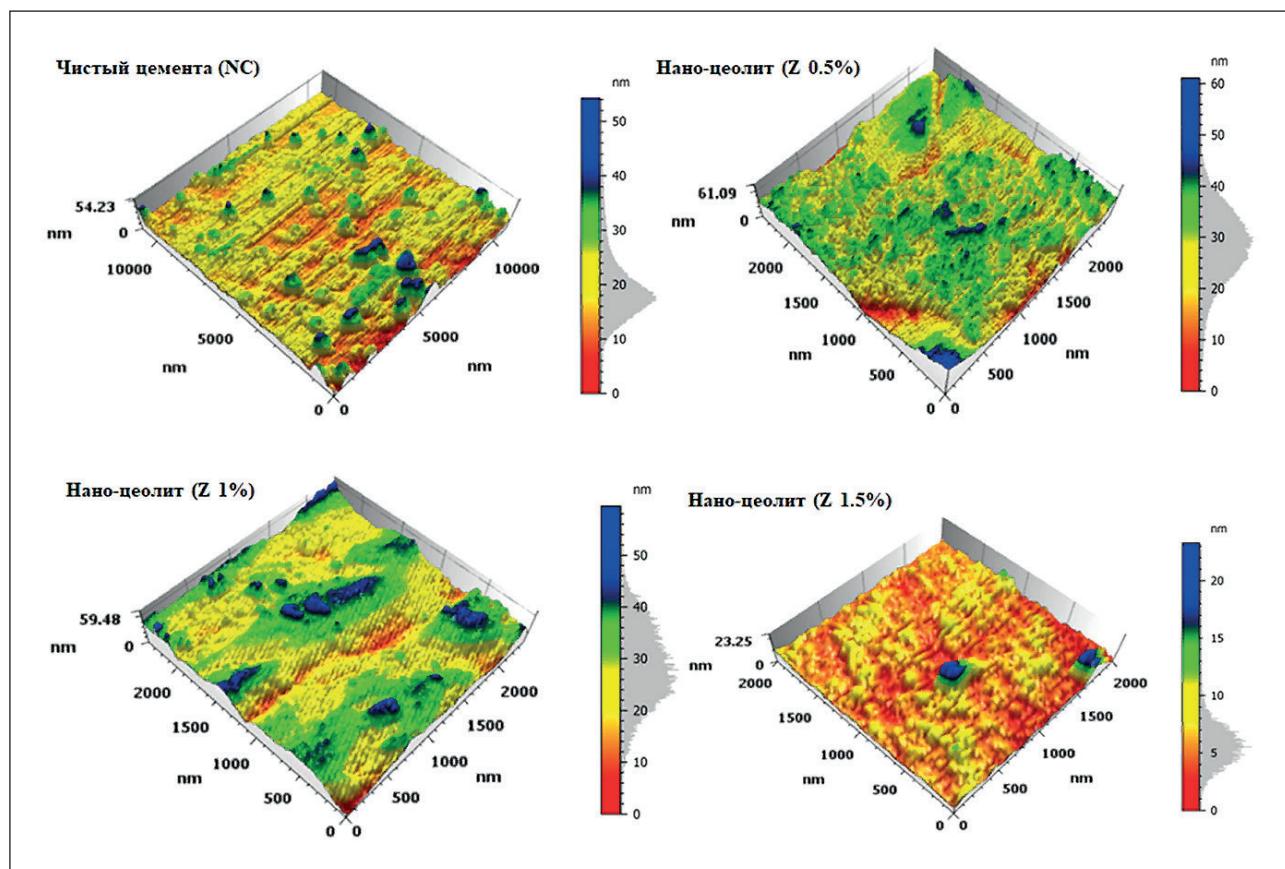


Рис. 5. АСМ-изображения образцов цемента без наноцеолита (чистый цемент) и с наноцеолитом (0,5%, 1%, 1,5%)

Таблица 2
Параметры шероховатости поверхности для цемента и добавок

Параметры	Чистый цемент	Z 0.5%	Z 1%	Z 1.5%
Sq (nm)	5,847	7,137	7,655	2,332
Ssk	1,225	-0,2093	0,03682	2,501
Sku	5,876	3,554	2,787	15,24
Sp (nm)	35,00	32,55	30,72	17,36
Sv (nm)	19,24	28,53	28,76	5,899
Sz (nm)	54,23	61,09	59,48	23,25
Sa (nm)	4,243	5,581	6,216	1,549

На рис. 5 видно, что шероховатость поверхности имеет вид сложной структуры с множеством пиков и долин разного размера и расстояния друг от друга. В соответствии с ISO 25178 по шероховатости поверхности, высотными параметрами, описывающими морфологию поверхности, являются: (Sq) среднеквадратичное значение высоты, (Ssk) асимметрия поверхности ограниченного масштаба, (Sku) эксцесс поверхности ограниченного масштаба, (Sp) максимальная высота пика поверхности ограниченного масштаба, (Sv) максимальная высота провала поверхности ограниченного масштаба, (Sz) максимальная высота поверхности ограниченного масштаба, (Sa) арифметическое среднее значение высоты поверхности ограниченного масштаба. В табл. 2 приведены значения параметров.

Расстояние между различными компонентами текстуры может быть описано с помощью параметров Sa и Sq, которые оптимизированы для описания пиков и долин поверхности [25]. Аналогично значение Ssk отражает степень смещения формы шероховатости. Значение Sku профиля шероховатости показывает, насколько он острокончен. Sp, Sv и Sz – параметры, получаемые путем анализа абсолютных наибольших и наименьших точек, обнаруженных на исследуемой поверхности [25, 26]. Из табл. 2 следует, что при увеличении значений Sa и Sq для поверхности размер зерен цемента будет высоким. Это можно заметить при использовании наноцеолита Z 1% по поверхностным пикам и долинам на рис. 5 и значениям высоты в табл. 2. Кроме того, низкие значения Sa и Sq могут способствовать уменьшению пористости матрицы и повышению ее прочности. Такое проявление в матрице с наноцеолитом 1,5% хорошо видно как на рис., так и по наименьшим значениям Sa и Sq в табл. [25, 27]. Симметрия пиков и до-

лин описывается Ssk. Если Ssk = 0, то пики и долины равномерно распределены вокруг средней плоскости. Если Ssk < 0, то на поверхности преобладают долины (Ssk в наноцеолите Z 0,5% меньше 0). Напротив, если Ssk > 0, то на поверхности преобладают пики Sku, а это метрика, количественно характеризующая степень остроты поверхности. В общем случае, когда Sku = 3, это свидетельствует о том, что поверхность имеет сбалансированное распределение как гладких, так и зазубренных пиков и долин. Если значение Sku меньше 3, то поверхность состоит в основном из уплощенных вершин и долин с относительно значительной кривизной по краям. Это может свидетельствовать о меньшей вероятности зарождения трещин под действием напряжений по сравнению с поверхностями, имеющими острые пики и долины. И наоборот, если Sku больше 3, то поверхность имеет четко выраженные пики и долины с очень малой кривизной по краям [27, 28].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты показали, что при добавлении наноцеолита происходит снижение содержания гидроксида кальция СН. Это явление объясняет пущлановое поведение наноцеолита, который взаимодействует с осажденным гидроксидом кальция при гидратации с образованием С–С–Н, уменьшает слоистую структуру гидроксида кальция и повышает количество С–С–Н. Таким образом, добавление наноцеолита в портландцемент влияет на процесс ранней гидратации цементного камня и повышает его раннюю прочность. ACM-анализ показал, что при введении 1,5% наноцеолита в цемент образуется множество нерегулярных пиков и долин наполнителя с низкой пористостью, что повышает прочность цемента.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. A. Peled, J. Castro, W.J. Weiss. Atomic force and lateral force microscopy (AFM and LFM) examinations of cement and cement hydration products. *Elsevier, Cement and Concrete Composites.* 2013; 36: 48-55. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.021>
2. G. Bell, J. Bensted, F. P. Glasser. Characterization of hydrothermally treated calcium silicate and oilwell cement hydration products. *Advances in Cement Research.* 1989; 2(6): 61-72.
3. E. Koohsaryan, Mansoor A. Nanosized and hierarchical zeolites: A short review. *Chinese Journal of Catalysis.* 2016; 37: 447-467. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(15\)61038-5](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(15)61038-5)
4. Luke et al., Zeolite-containing cement composition. Patent, US 2004/0112600 A1.
5. API specification 10A, *Cements and Materials for Well Cementing.* 25th edition, 2019.
6. Jemimah C. Milton, Prince A. Gnanaraj *Compressive Strength of Concrete with Nano Cement.* IntechOpen; 2021.
7. Suman L. Shrestha. Characterization of Some Cement Samples of Nepal Using FTIR Spectroscopy. *IJARCS.* 2018; 5(7): 19-23. DOI: <http://dx.doi.org/10.20431/2349-0403.0507004>
8. H. Biricika, N. Sarierb. Comparative Study of the Characteristics of Nano Silica – Silica Fume – and Fly Ash – Incorporated Cement Mortars. *Materials Research.* 2014; 17(3). <https://doi.org/10.1590/S1516-14392014005000054>
9. Victor H. J. M. dos Santos, D. Pontin, Gabriela G. D. Ponzi, A. Sofia de Guimaraes e Stepanha, R. B. Martel, Marta K. Schütz, Sandra Mara O. Einloft, F. D. Vecchia. Application of Fourier Transform infrared spectroscopy (FTIR) coupled with multivariate regression for calcium carbonate (CaCO₃) quantification in cement. *Construction and Building Materials.* 2021; 3(13): 125413. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125413>
10. Y. R. Zhang, X. M. Kong, Z. B. Lu, Zi C. Lu, S. S. Hou. Effects of the charge characteristics of polycarboxylate superplasticizers on the adsorption and the retardation in cement pastes. *Cement and Concrete Research.* 2015; 67: 184-196. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.10.004>
11. Ping Yu, R. J. Kirkpatrick, B. Poe, Paul F. McMillan, X. Cong. Structure of Calcium Silicate Hydrate (C-S-H): Near-, Mid-, and Far-Infrared Spectroscopy. *Journal of the American Ceramic Society.* 1999; 82(3): 742-748.
12. Omotayo O., Himanshu M., Ramadan A., Subhash S., Samuel O., Shokrollah H., G. DeBruijn, Winton C., Dave S. Degradation of well cement in HPHT acidic environment: Effects of CO₂ concentration and pressure. *Cement and Concrete Composites.* 2016; 74: 54-70. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.09.006>
13. D. Vaiciukyniene, G. Skipkiunas, M. Dauksys, V. Sasnauskas. Cement hydration with zeolite-based additive. *chemija.* 2013; 24(4): 271-278. <https://www.researchgate.net/publication/259580412>
14. M.J. Varas, M. Alvarez de Buergo, R. Fort. Natural cement as the precursor of Portland cement: Methodology for its identification. *Cement and Concrete Research.* 2005; 35: 2055-2065.
15. A. Mohammeda, S. Rafiq, W. Mahmood, R. Noaman, H. AL-Darkazali, K. Ghafor, W. Qadir. Microstructure characterizations, thermal properties, yield stress, plastic viscosity and compression strength of cement paste modified with nanosilica. *Journal of Materials Research and Technology.* 2020; 9(5): 10941-10956. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.083>
16. Z. Ou, B. Ma, Sh. Jian. Comparison of FT-IR, Thermal Analysis and XRD for Determination of Products of Cement Hydration. *Advanced Materials Research.* 2011; (168-170): 518-522. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.168-170.518>
17. R. Ma, L. Guo, W. Sun, Zh. Rong. Well-Dispersed Silica Fume by Surface Modification and the Control of Cement Hydration. *Hindawi.* 2018: Article ID 6184105. <https://doi.org/10.1155/2018/6184105>
18. L. Fernández-Carrasco, D. Torrens-Martín, L. M. Morales, S. Martínez-Ramírez. Infrared Spectroscopy in the Analysis of Building and Construction Materials. *Infrared Spectroscopy – Materials Science, Engineering and Technology.* <https://www.intechopen.com/>
19. ASTM C 1365 - 98, Standard Test Method for Determination of the Proportion of Phases in Portland cement and Portland-Cement Clinker Using X-Ray Powder Diffraction Analysis, 1998.
20. Taylor H.F.W. *Cement chemistry.* Thomas Telford, 2nd edition; 1997.
21. S. Grangeon, F. Claret, Y. Linard, Ch. Chiaberge. X-ray diffraction: a powerful tool to probe and understand the structure of nanocrystalline calcium silicate hydrates. *Acta Cryst.* 2013; B69: 465-473.
22. K. Garbev, G. Beuchle, M. Bornefeld, L. Black, P. Stemmermann. Cell Dimensions and Composition of Nanocrystalline Calcium Silicate Hydrate Solid Solutions. Part 1: Synchrotron-Based X-Ray Diffraction. *Journal of the American Ceramic Society.* 2008; 91(9): 3005- 3014.
23. K. Garbev, M. Bornefeld, G. Beuchle, P. Stemmermann. Cell Dimensions and Composition of Nanocrystalline Calcium Silicate Hydrate Solid Solutions. Part 2: X-Ray and Thermogravimetry Study. *Journal of the American Ceramic Society.* 2008; 91(9): 3015-3023.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НАНОМАТЕРИАЛОВ

24. Peter C. Hewlett, Martin Liska, Lea's *Chemistry of Cement and Concrete*. Elsevier, 5th Edition; 2019.
25. L. Sadowski, S. Czarnecki, J. Hoła. Evaluation of the height 3D roughness parameters of concrete substrate and the adhesion to epoxy resin. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2016; 67: 3-13. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.12.019>
26. Keyence Corporation of America, Introduction to Surface Roughness Measurement; 2012. <https://www.keyence.com/>
27. Z. Zhu, Sh. Lou, C. Majewski. Characterisation and correlation of areal surface texture with processing parameters and porosity of High Speed Sintered parts. *Additive Manufacturing*. 2020; 36: 101402. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101402>
28. Richard Leach. *Characterisation of Areal Surface Texture*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2013.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мохаммедамин Али Ибрахим Мохаммедамин – аспирант кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, alimestudent@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-0760-599X>

Агзамов Фарит Акрамович – доктор технических наук, профессор кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, faritag@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5850-5261>

Исмаков Рустэм Адипович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Бурение нефтяных и газовых скважин» Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, ismakovrustem@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7544-922X>

ВКЛАД АВТОРОВ

Мохаммедамин Али Ибрахим Мохаммедамин – подготовка образцов, проведение эксперимента, анализ результатов, написание статьи.

Агзамов Фарит Акрамович – научное руководство, разработка методологии и методов исследования, научное редактирование и написание статьи.

Исмаков Рустэм Адипович – научное руководство, научное редактирование статьи, написание статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 22.12.2023; одобрена после рецензирования 18.01.2024; принята к публикации 23.01.2024.

Original article

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-1-22-31>

CC BY 4.0

Construction heat and sound insulating composite materials with high tensile strength

Olga V. Kozhevnikova¹ , Elena S. Bokova¹ , Alexander V. Dedov^{2*} , Viktor G. Nazarov² , Leonid A. Ivanov³ 

¹ Russian State University named after A.N. Kosygin, Moscow, Russia

² Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

³ Russian Academy of Engineering, Moscow, Russia

* Corresponding author: e-mail: dedovs55@rambler.ru

ABSTRACT

Introduction. The objective of this study is to examine the impact of the impregnation (with the aliphatic polyurethane water dispersion) degree on the deformation properties of the polyacetal, polyethylene terephthalate and polypropylene fibers based nonwoven needle-punched composite fabrics. **Materials and methods.** We investigated the deformation properties of the nonwoven fabrics manufactured from the 0.33 tex linear density fibers of: polyethyleneterephthalate (diameter 20–25 microns, according to TU 6-13-0204077-95-91), polypropylene (diameter 27–30 microns, according to TU 2272-007-5766624-93) and the original polyacetal ones (diameter 18–22 microns). The nonwoven fabrics were obtained by the mechanical formation technique. The needlepunching surface density was 180 cm⁻². The water dispersion of anionic stabilized aliphatic polyethyleneterephthalate (IMPRANIL DL 1380 (China)) with a dry residue of 40% was used for the impregnation. The experimental samples' linear dimensions were determined in accordance with the requirements of GOST 15902.2-2003. The sample's thickness was determined by a thickness gauge with a pressure of 10 kPa and an instrumental error ~ 0.01 mm according to GOST 11358-70. The samples' mechanical properties were determined in accordance with the requirements of GOST 15902.3-79. **Results and discussion.** The fiber filler composition influence on the obtained (by the impregnation of polyethyleneterephthalate, polypropylene and polyacetal fibers based non-woven needle-punched fabrics with polyurethane aqueous dispersion) composite materials tensile resistance has been established. We found the impregnation degree (depending on the chemical nature of the fibers and on the direction of nonwoven fabrics formation) at which the tensile resistance of the composite materials reaches the maximum value. It is demonstrated that, in the construction of buildings and structures, it is advisable to utilize materials based on composite polyacetal fibers. These materials exhibit higher tensile resistance compared to those based on polypropylene and polyethylene terephthalate at equivalent impregnation levels. **Conclusion.** The obtained optimal impregnation degree (at which the maximum tensile resistance of polyacetal fiber based composite materials was achieved) depends on the direction of the non-woven fabric formation. The maximum tensile resistance was observed: in the transverse direction – at 0.44 and in the longitudinal direction – at 0.35 impregnation degree values.

KEYWORDS: non-woven needle-punched fabrics, polyurethane aqueous dispersion, impregnation, composite material, stretching.

FOR CITATION

Kozhevnikova O.V., Bokova E.S., Dedov A.V., Nazarov V.G., Ivanov L.A. Construction heat and sound insulating composite materials with high tensile strength. *Nanotechnologies in Construction*. 2024; 16(1): 22–31. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-1-22-31>. – EDN: RJUMB.

INTRODUCTION

The synthetic fibers based nonwoven fabrics [1–9] are highly voidness materials with a porosity coefficient of more than 0.8. Such materials are often used for heat- [10–12] and sound- insulation [13–15] of buildings and constructions. Their main disadvantage is the low tensile resistance [16–22]. The fabrics stretching during

the transportation, installation and operation leads to an increase in porosity and a decrease in the specified exploitation characteristics. When impregnating the nonwoven fabrics with the polymer solutions and dispersions, the voidness composite materials with the increased tensile resistance were obtained [23, 24].

The mechanical properties set of the composite materials is mainly determined by the interaction at the

interface “fiber–polymer binder” [25–30]. The highly voidness materials with the sufficiently useable tensile resistance were obtained by wetting with the polymer solutions and dispersions as the result of nanoscale polymer bridges between the fibers formation that limited their mobility in the mechanical force field.

The synthetic fibers are well wetted with the polymer solutions in different organic solvents. High wetting of polyethyleneterephthalate fibers with a binder is achieved by the nonwoven fabrics impregnating with the polyurethane in dimethylphoramide solution [31, 32]. In addition, when using polymer solutions in organic solvents, a predominant sorption of the binder occurs on the surface of the fibers while preserving the porous structure of the impregnated fabric. A significant volume and the toxicity of containing various organic solvents liquid effluents limit the industrial use of impregnated nonwoven fabrics.

The negative environmental impact is significantly reduced when using polymers’ aqueous dispersions for the nonwoven fabrics impregnating [25–30, 32–34]. But their wetting of the synthetic fibers is less than polymer solutions in organic solvents ones [32–34]. The interaction in the “fiber–polymer dispersion” system is, as a rule, regulated by changing the chemical nature of the polymer or by introducing the surfactants and other ingredients into the material composition [25–30]. The approach associated with varying the chemical nature of the reinforcing fabric fiber filler is practically not used [32–34]. When obtaining the composite materials, the polyethyleneterephthalate fibers based nonwoven needle-punched fabrics (and, less often, polypropylene ones) are mainly used as a fibrous reinforcing element.

The primary objective of this study is to investigate the influence of the impregnation degree on polyacetal, polyethyleneterephthalate and polypropylene fibers with aliphatic polyurethane water dispersion onto the deformation properties of the composite materials under consideration.

Table 1

The characteristics of the initial nonwoven fabrics used for the composite material creation with the polyurethane water dispersion impregnation technique

Fiber	p_f , kg/m ³	F , kg/m ²	$d \times 10^3$, m	p , kg/m ³	δ , rel.un.
polyacetal	1410	0,28	2,1	130	0,91
polyethyleneterephthalate	1370	0,26	3,0	120	0,91
polypropylene	920	0,33	2,1	110	0,89

Here: p_f – the density of the fiber-forming polymer; d – the thickness, F – the surface density (the mass of the sample with an area of 1 m²) and p – the (bulk) density of the initial nonwoven fabric; δ – the porosity coefficient of the initial material.

MATERIALS AND METHODS

The subjects of examination were needle-punched nonwoven fabrics composed of fibers with a linear density of 0.33 tex: polyethyleneterephthalate (with a diameter of 20–25 μm, TU 6-13-0204077-95-91), polypropylene (with a diameter of 27–30 μm, TU 2272-007-5766624-93) and experimental polyacetal fibers with a diameter of 18–22 μm. The nonwoven fabrics were manufactured with the mechanical molding technique. The surface density of the main needle punching was 180 cm⁻².

The linear dimensions of the experimental samples (Table 1) were determined in accordance with the requirements of GOST 15902.2-2003. The nonwoven fabric’s thickness was determined using a thickness gauge with an instrumental error ~0.01 mm under the 10 kPa pressure according to GOST 11358-70. The relative measurement error of the sample’s sizes was ~2%. The mechanical properties of the nonwoven fabrics were established in accordance with the requirements of GOST 15902.3-79 (the relative error ~12%).

The anionic stabilized aliphatic polyethirurethane (IMPRANIL DL 1380, China) water dispersion was used for the impregnation of the nonwoven fabrics. The concentration of the polyurethane in water was ~42%. A 50 by 200 mm sample was immersed in a 500 ml container filled with the dispersion and was flattened with a roller for 3–5 minutes at a room temperature. Removed from the container sample was kept until the dispersion completely drained and was flattened between the rolls with a gap equal to half of the nonwoven fabric thickness. The laboratory technique of sample’s impregnation simulated the industrial one.

The heat treatment of the impregnated nonwoven fabric was carried out at a temperature of 70°C. The impregnation degree of the sample was varied by diluting the polyurethane aqueous dispersion with the distilled water.

The impregnation degree (C_M , rel. units) was calculated from the equation:

$$C_M = \frac{m_1 - m}{m}, \quad (1)$$

where m_1 and m are the mass (kg) of the samples after and before feeding respectively.

The porosity coefficients of the initial (Table 1) and the impregnated nonwoven fabrics were calculated from equations 2 and 3:

$$\delta = 1 - \frac{p}{p_f}, \quad (2)$$

$$\delta = 1 - \frac{m_n/p_f + m_{PY}/p_{PY}}{V}, \quad (3)$$

where δ is the porosity coefficient, rel. units; p , p_f and p_{PY} are the densities of the fabric, fiber and polyurethane, kg/m^3 ; m_n and m_{PY} are the mass of the fabric and polyurethane in the composite material sample after heat treatment, kg.

RESULTS AND DISCUSSION

The specification of the parameter determining the tensile resistance of chemically different fibers based composite materials

The parameter determining the tensile resistance of the nonwoven fabrics and corresponding composite materials was established from the analysis of the dependences of the conditional mechanical stress (σ , MPa) on the relative elongation (ε , %). The dependences of σ on ε in the longitudinal and transverse directions of the samples made of various chemical nature fibers are shown in Fig. 1.

The stretching in the longitudinal and in the transverse directions of the samples occurs in two stages each of which is described by almost linear sections of σ on ε dependencies. These sections' slope angles analysis shows that the stretching at the second stage occurs at a higher conditional stress (Fig. 1).

The stretching of the non-woven needle-punched fabrics

The two-stage stretching of the nonwoven needle-punched fabrics is a consequence of the specific polymer materials' bulk structure with an uneven distribution of fiber packing density (Fig. 2).

When punching, the fibers are captured by needle notches with the formation of bundles oriented perpendicular to the surface of the fabric (Fig. 2a). The mechanical stress during the stretching direction is distributed to the bundle's fibers at various stages of the process uniformly. The fiber packing density and the fiber contact area in the bundle are significantly higher than similar characteristics in the interbundle space [17–23].

The nonwoven fabrics stretching at the first stage of the process is a consequence of straightening and changing the configuration of the fibers between the the bundles. After the straightening and reorientation of the fibers between the bundles in the direction of the mechanical stress (Fig. 2b), the latter is redistributed to the fibers in the bundles (Fig. 2b) which packing density and significant cross-fiber contact area leads to an increase in the probability of relative movement of the fibers. In the extreme case, the rupture of such fibers or their slipping out of the bundles leads to the destruction of the needle-punched nonwoven fabrics [19, 20].

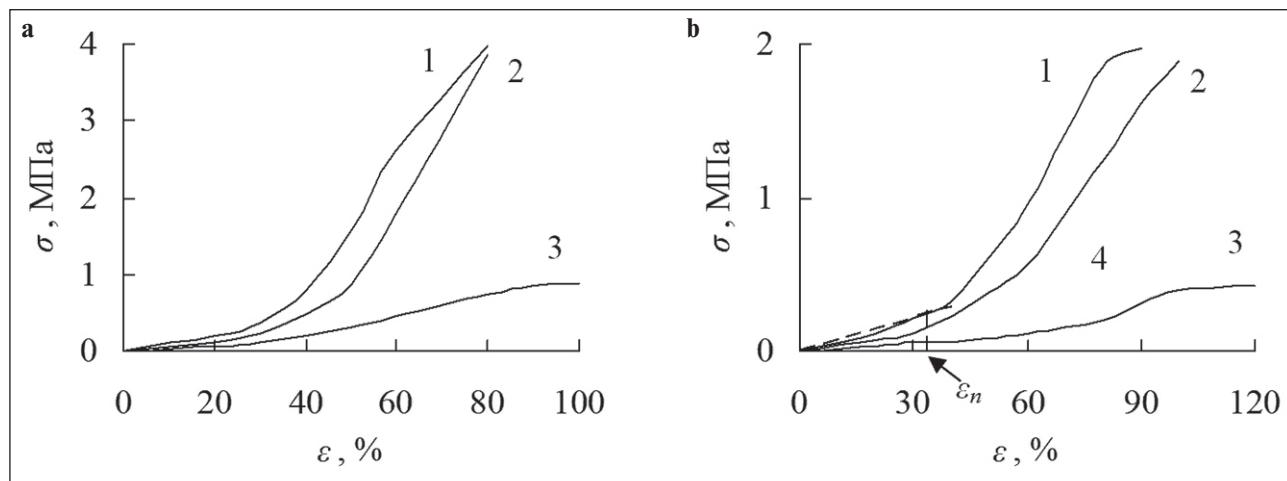


Fig. 1. The dependences of the conditional stress on the elongation during stretching of the nonwoven fabrics made of polyacetal (1), polyethyleneterephthalate (2) and polypropylene (3) fibers in the transverse (a) and longitudinal (b) directions (dotted line 4 is a segment of the dependence σ on ε , showing the stretching at first stage of the process; the arrow shows the relative elongation at which the transition from the first to the second stage of stretching occurs)

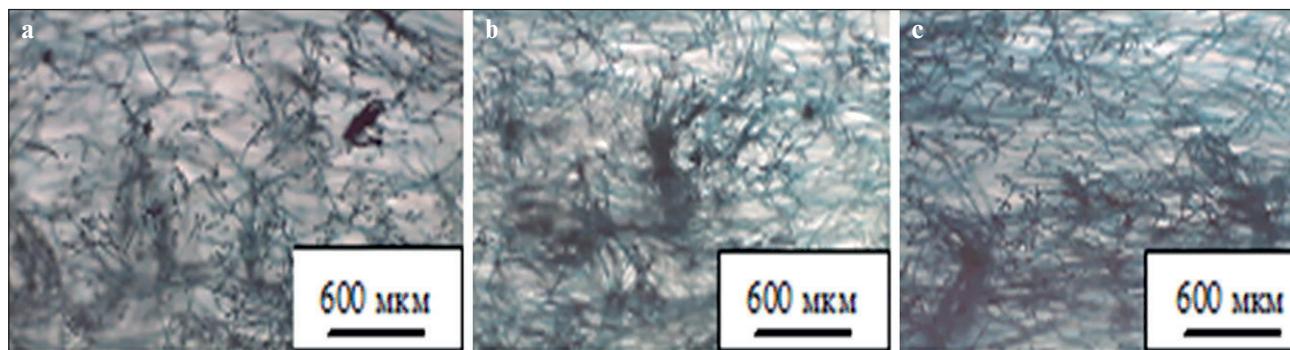


Fig.2. The micrographs of the cuts of the initial (a), 10 (b) and 80 (c) % elongated polyethyleneterephthalate fibers based nonwoven fabrics

The nonwoven fabrics of various compositions are deformed in the longitudinal direction less than in the transverse one (Fig. 1) under the equal mechanical impact. The various degrees of stretching are the consequence of the predominant orientation of the fibers in the transverse direction that is achieved by using a mechanical technique of the nonwoven fabric forming. A high degree of orientation of the fibers in the transverse direction leads to the connection of the bundles with a large number of fibers during the punching process. The bundles are connected by a smaller number of the fibers in the longitudinal direction which leads to a redistribution of the mechanical load on individual fibers and the mutual movement of the fibers even with the relatively small efforts [19, 20].

The dependences of σ on ε of the polyacetal or polyethyleneterephthalate fibers based nonwoven fabrics practically coincide with each other (Fig. 1, curve 1 and 2). It indicates the equal resistance of the samples to the

stretching at first and second stages of the process. As it follows from σ on ε dependences (Fig. 1, curve 3) the polypropylene fibers based nonwoven fabrics stretching at first and second stages occurs at a lower conditional stress determined by the less friction coefficient of the polypropylene fibers [35, 36]. The lower ability of the polypropylene fibers to be held in the needle notches limits the formation of the bundles [19, 20]. As a result, the mechanical stress is distributed to a smaller number of polypropylene fibers connecting the bundles.

The stretching of the non-woven needle-punched composite materials reinforced with a polyacetal fibers

The σ on ε dependences of the polyacetal fibers based composite materials are shown in Fig. 3. Their types correspond to similar dependences for polyethyleneterephthalate and polypropylene fibers based nonwoven fabrics.

The stretching of these composite materials occurs in two stages too. However, the conditional stress required

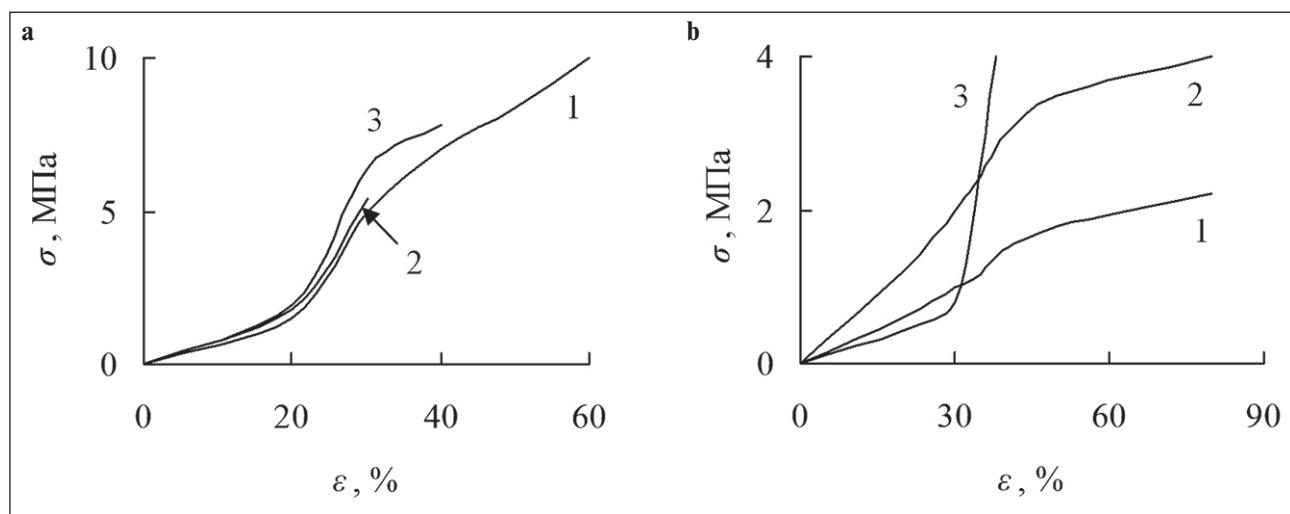


Fig. 3. The dependences of the conditional stress on the relative elongation of polyacetal fibers based composite materials with a degree of impregnation of 0.1 (1), 0.24 (2) and 0.52 (3) MPa in the transverse (a) and longitudinal (b) directions

for stretching at the first and second stages increases. It is most pronounced in the longitudinal direction of the materials (Fig. 3b). An increase of the impregnation degree from 0 to 0.52 slightly affects the stretching of the composite materials in the transverse direction at first stage of the process. In addition, there is a decrease in the conditional stress required for deformation at first stage of the longitudinal stretching for the material with 0.52 impregnation degree (Fig. 3b, curve 3).

The parametric describing of the tensile resistance for various chemical nature fibers made composite materials reinforced with the fillers

It is of practical interest to determine the tensile resistance of the materials at first stage of stretching due to it leads to the significant increase in porosity and the decrease in the specified functional properties of the nonwoven composite materials with various compositions. The linear section of σ on ε dependencies of the nonwoven composite materials are described by general equation:

$$\sigma = E_0 \frac{\varepsilon}{100}, \varepsilon < \varepsilon_n, \quad (4)$$

where E_0 – is the effective tensile modulus, MPa; ε_n – is the relative elongation that shows the transition from first to second stages of stretching.

The effective modulus corresponds to the Young's ones (designed to assess the elastic/reversible deformation of solids under tension) according to the determination technique. However, the nonwoven' deformation is not elastic at first stage of stretching. For composite materials, the irreversible movement of fibers is a con-

sequence of intermolecular interaction between polyurethane particles, the elongation of the gap between them is significantly less than the tensile elongation at the first stage of the process of stretching composite materials of varying degrees of impregnation. It is due to the consequence of the friction bond between the fibers which rupture leads to the irreversible movement of the fibers in the inter-bundle space. In addition, the Young's modulus describes the processes occurring with a reversible change in the distance between the molecules or atoms that significantly differs from the macroscopic fibers movement. Therefore, the "effective module" parameter has been introduced to assess the tensile resistance of the nonwoven fabrics and the corresponding impregnated materials.

The E_0 and ε_n parameters are used to determine the effect of the impregnation degree on the tensile strength of the composite materials based on fibrous fillers of various chemical compositions. The technique of ε_n value specification is shown in Fig. 1b with the dotted line.

The impregnation degree influence on the tensile resistance of chemically different fibers based composite materials

The E_0 on C_M dependences in the longitudinal and transverse deformation directions for the discussed nonwoven composite materials are shown in Fig.4.

The E_0 on C_M dependences in the transverse and longitudinal deformation directions for the composite materials with different chemical structure have an extreme appearance. The impregnation degree at which the effective tensile modules have the maximum values depends on the nonwoven fabric composition. The maximum

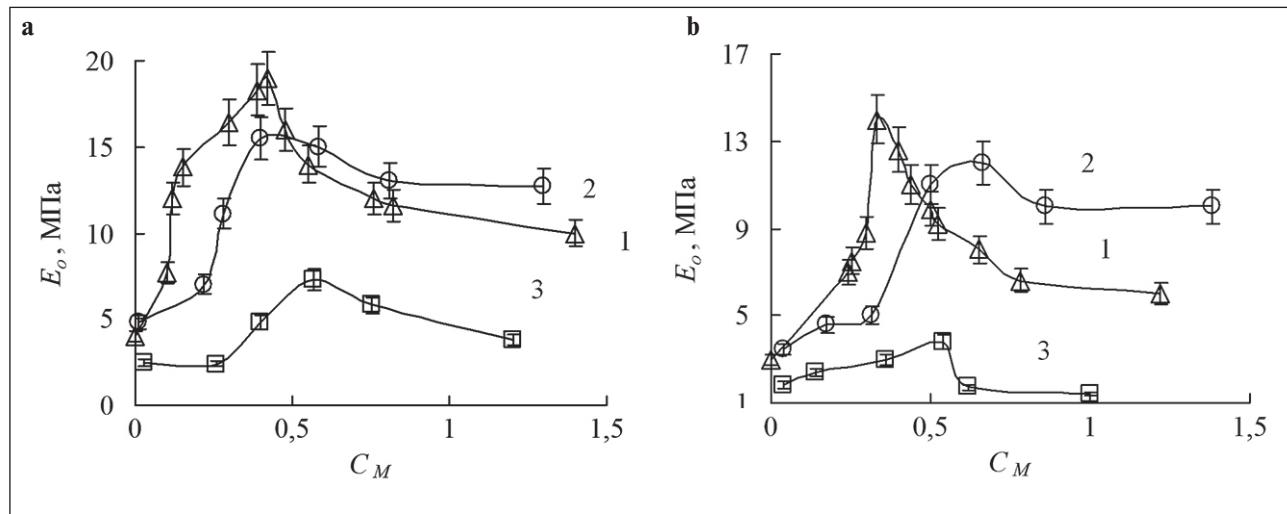


Fig. 4. The effective tensile modulus (E_0 , MPa) (in the transverse (a) and longitudinal (b) directions) on the impregnation degree dependences for the polyacetal (1), polyethyleneterephthalate (2) and polypropylene (3) fibers composite materials

values of the effective modulus of the polyacetal fiber based composite material is respectively 25% and three times higher than ones of the polyethylene terephthalate and polypropylene fibers based composite materials. The effective tensile modulus of different chemical structure composite materials suddenly decreases (Fig. 4a, b) when the impregnation degree is greater than the optimal.

The maximum value of the effective tensile modulus for the polyacetal fibers based composite materials in the transverse deformation direction is achieved at an impregnation degree of about 0.45 and in the longitudinal direction – about 0.35 (Fig. 4b, curve 1). When using the polyethylene terephthalate and the polypropylene fibers based nonwoven fabrics, the maximum values of the effective tensile modulus in the transverse and longitudinal directions are observed at an impregnation degree of approximately 0.5–0.6 (Fig. 4b, curves 2 and 3).

In addition, it follows from the E_0 on C_M dependences that the effective longitudinal and transverse tensile modulus begins to increase with a degree of impregnation greater than 0.25 (Fig. 4a, b, curves 2 and 3) (for the polyethylene terephthalate and polypropylene fibers based materials). The monotonic increase in the effective tensile modulus is observed with an increase of the impregnation degree from 0 to 0.4 in the longitudinal direction and from 0 to 0.5 in the transverse direction (Fig. 4a, b, curve 1) of the experimental samples deformation.

The maximum values of the effective tensile modulus for the polyacetal fibers based composite material with an optimal impregnation degree, as well as an increase in the effective tensile modulus with a change in the impregnation degree from 0 to the optimal value can be explained by the specific wettability of the polyacetal (compared to polyethylene terephthalate and polypropylene) fibers with the polyurethane water dispersion. This concept is confirmed by the studies of the distilled water wetting edge angles for the polyethylene terephthalate, polypropylene and polyacetal films (the relative analogues of fibers' surfaces). The wetting angle for the polyethylene terephthalate films was 68°, for the polypropylene films – 87°, and for the polyacetal films – 62° [37–39].

The influence of the impregnation degree on the porosity of chemically different fibers based composite materials

It is necessary to explain the decrease in the effective tensile modulus of the composite materials when the degree of impregnation is greater than the optimal value (Fig. 3a, b). We've studied the dependence of the porosity coefficient on the impregnation degree for the composite materials based on various chemical compositions fibers (Fig. 5).

At the maximum impregnation degree of 1.22, the porosity coefficient of the considered composite materials

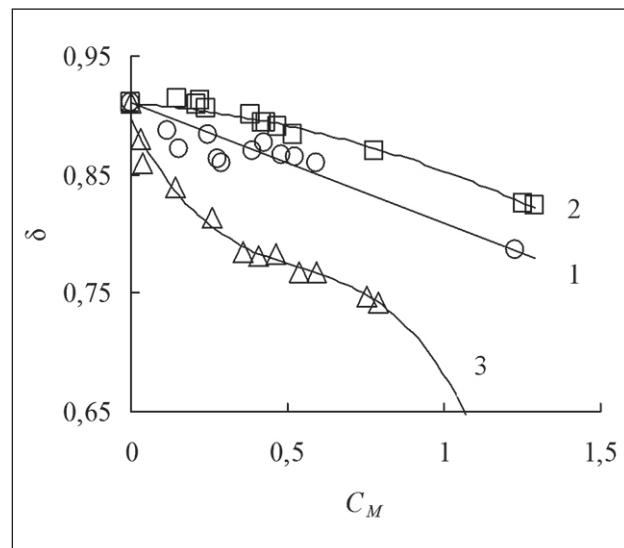


Fig. 5. Dependences of the porosity coefficient on the impregnation degree for the composite materials based on polyacetal (1), polyethylene terephthalate (2) and polypropylene (3) fibers (at $C_M = 0$ – the average porosity coefficient of various compositions fabrics, assumed to be 0.9)

was 0.84 and 0.80, respectively (Fig. 5, curves 1 and 2). We've found the porosity coefficient of the polypropylene fibers based composite material equal to 0.6 (at the impregnation degree of 1.22) by the curve 3 (Fig. 4) extrapolation. The lower value of the porosity coefficient for the composite materials based on the polypropylene fibers is a consequence of the worse (compared to polyethylene terephthalate and polyacetal fibers) wettability with the polyurethane water dispersion [37–39] and with the concentration of binder particles in the space between the fibers leading to a decrease in pore volume. When impregnating the nonwoven fabrics made of polyethylene-terephthalate and polyacetal fibers, the binder particles are deposited directly onto the fibers' surface, which leads to an insignificant change in porosity with a relatively high degree of the impregnation.

The chemically different fiber based composite materials with a degree of impregnation greater than 0.35–0.50 (or greater than the optimal value at which the maximum effective tensile modulus is achieved (Fig. 3)) have the relatively high values of the porosity coefficient, which indicate that the pores of the materials are not filled with particles of binder.

The structure of polyacetal fibers based composite materials when the impregnation degree varying

We studied the cross sections micrographs of the polyacetal fiber based composite materials with the impregnation degrees of 0.17, 0.44 and 0.81 (Fig. 6). With

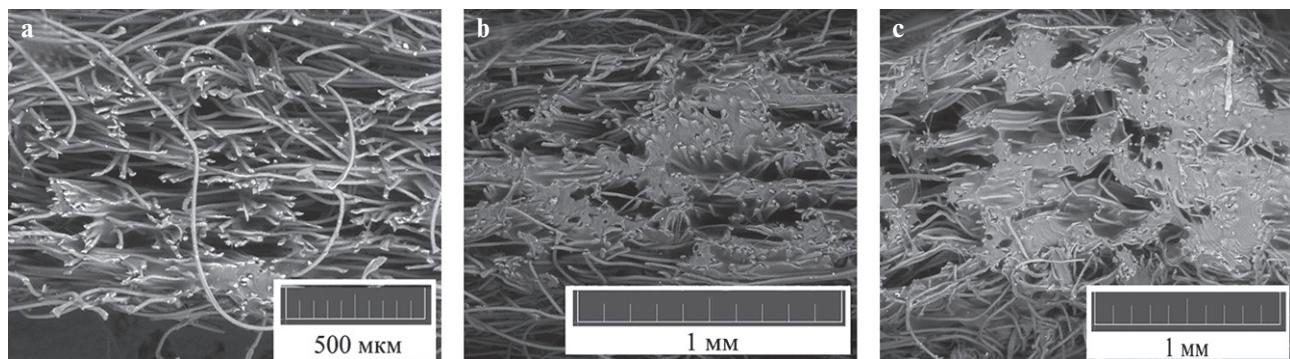


Fig. 6. Micrographs of cross sections of the composite materials reinforced with a polyacetal fibers cloth, with the impregnation degrees of 0.17 (a), 0.44 (b) and 0.81 (c)

a degree of impregnation of 0.44, the effective tensile modulus in the transverse direction has the maximum value (Fig. 3).

The polyacetal fibers based composite materials microphotographs analysis shows that the distribution of the binder in the volume of the fibrous filler is local and depends on the impregnation degree. At the minimum impregnation degree ($C_M = 0.17$), the binder is concentrated in separate areas along the thickness of the sample (Fig. 5a). Increasing the impregnation degree to 0.44 leads to an increase in the area of the fabric sections filled with the binder (Fig. 5c). At the impregnation degree of 0.81, a relatively uniform distribution throughout the thickness of the composite material is observed (Fig. 5b).

The formation of bonds between the polyacetal fibers at different impregnation degrees is shown in Fig. 7.

Figure 7a shows that at the impregnation degree of 0.17, binder particles are deposited at the points of contact between polyacetal fibers, and the surface of the fibers remains free. As the impregnation degree increases to 0.44, at which the polyacetal fibers based composite material has a maximum effective modulus in the trans-

verse direction, nanoscale “bridges” of binder particles are formed between the fibers. The bridges are located at a considerable distance from each other and connect several fibers together.

At the impregnation degree of 0.17, local deposition of binder particles on the fibers’ surface is observed. Bridges are formed between two adjacent fibers located at a short distance less than the diameter of the fibers. The space between the fibers (pores) is not filled with binder particles (Fig. 7b).

The bridges between the fibers of the composite material with the impregnation degree of 0.17 and 0.44 fit tightly to the surface of the fibers, which indicates the significant strength of the bonds between the fibers at the fiber-binder interface. The limitation of the fibers’ mobility in a force field is reflected by an increase in the effective tensile modulus (Fig. 3).

A micrograph of a composite material based on a polyacetal fibers with an impregnation degree of 0.81 is shown in Fig. 8.

The peeling of the binder shell from polyacetal fibers (Fig. 8) is a consequence of polyurethane shrinkage during heat treatment [33, 34]. During heat treatment of the

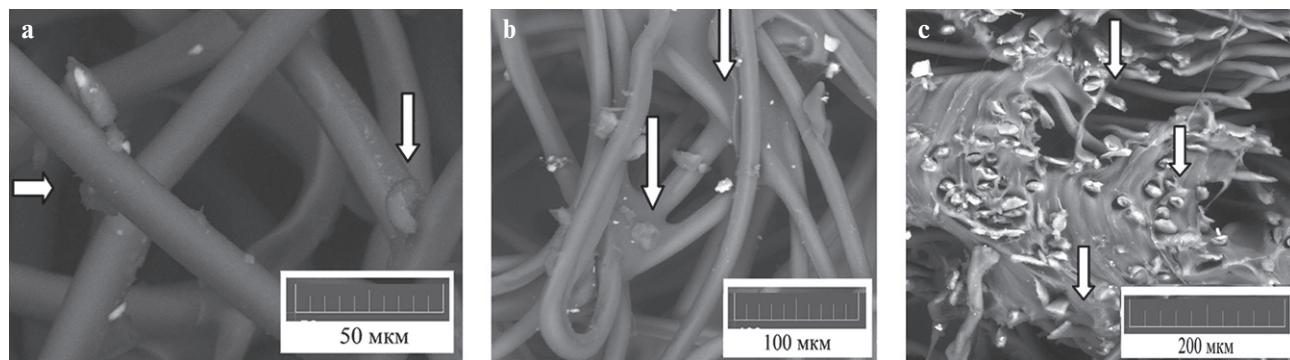


Fig. 7. Micrographs of fiber-to-fiber contacts in a composite material based on a polyacetal fibers with the impregnation degrees of 0.17 (a), 0.44 (b) and 0.81 (c) (in Fig. 7a, the arrows point to the contacts between fibers connected by binder particles; in Fig. 7b, the arrows mark the places where nanoscale “bridges” are located between the fibers; in Fig. 7c, the arrows mark the interface between the fibers and binder)

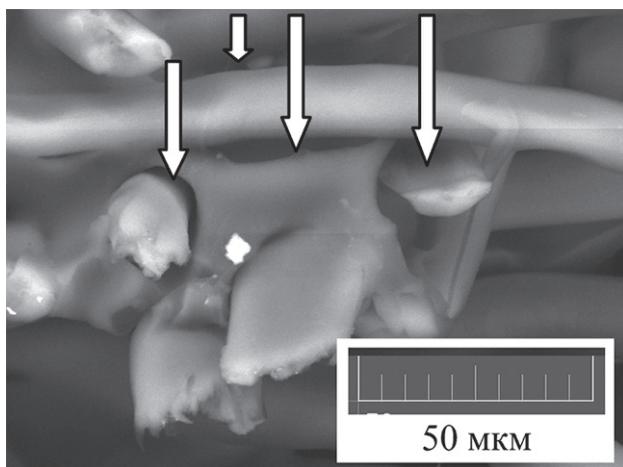


Fig. 8. Micrograph of the contact between polyacetal fibers of a composite material with an impregnation degree of 0.81 (the arrows point to the separation of the binder shell from the fibers)

impregnated fabric, as a result of [volatilization (evaporation)] evaporation of water, the volume of dispersion in the space between the fibers decreases, which leads to the convergence of polyurethane particles and an increase in intermolecular interaction. The relationship between the physical interaction at the polyurethane-polyacetal fiber interface and the intermolecular interaction between polyurethane macromolecules in the volume of the particles depends on the thickness of the adsorption shell of the binder on the surface of the fibers. At a certain thickness of the shell, the intermolecular interaction in the volume of polyurethane particles begins to prevail over the interaction at the interface of the polyurethane-fiber phases,

which leads to the delamination of the shell from the fiber surface (Fig. 8).

In addition, the peeling of the polyurethane shell from the polyacetal fiber surface may be the result of the parallel adsorption of both binder particles and water molecules (which is a dispersed medium) on the fibers' surface. The relatively high content of oxygen atoms in polyacetal macromolecules determines the increased adsorption of water molecules compared to the polyurethane particles. The formation of water molecules shell on the fibers' surface reduces the bond strength between the binder particles and the fiber surface. This leads to the polymer shell peeling during the heat treatment contributes.

CONCLUSION

- when impregnating the nonwoven fabrics from the polyacetal fibers, the composite materials with a large effective modulus (and tensile strength resistance) were obtained (in comparison with the fabrics made of polyethylene terephthalate and polypropylene fibers);
- the maximum values of the effective tensile modulus for the polyacetal fibers based composite materials are observed in the transverse direction at the impregnation degree of 0.44 and in the longitudinal direction at the impregnation degree of 0.35;
- when the effective tensile modulus maximum is achieved with the optimal value of the impregnation degree, the binder particles are concentrated on the polyethyleneterephthalate and polyacetal fibers surfaces, which makes it possible to produce the composite materials for the construction purposes with the porosity of near nonwoven fabrics used.

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation (State Task No. FZRR-2023-0003)

REFERENCES

1. Diabat A., Kannan D., Mathiyazhagan K. Analysis of enablers for implementation of sustainable supply chain management – a textile case. *J. Cleaner Production*. 2014; 83(4):391–403.
2. Datta M. Geotechnology for Environmental Control at Waste Disposal Sites. *Indian Geotechnical J.* 2012; 42(1): 1–36.
3. Neznakomova M., Boteva S., Tzankov L., Elhag M. Non-woven Textile Materials from Waste Fibers for Cleanup of Waters Polluted with Petroleum and Oil Products. *Earth Systems and Environment*. 2018; 2(3): 413–420.
4. Baley C., Gomina M., Breard J., Bourmaud A. Specific features of flax fibres used to manufacture composite materials. *Inter. J. Material Forming* 2019; 12(6): 1023–1059.
5. Yakovleva O. I., Sashina E. S., Osipov M. I., Smirnov G. P. Non-Woven Needle Punched Material with Silver Nanoparticles from Natural Silk Fiber Waste. *Fiber Chem.* 2020; 52(2): 263–268.
6. Easwaran P., Lehmann M.J., Wirjadi O. Fiber thickness measurement in scanning electron microscopy images validated using synthetic data. *Chem. Eng. Technol.* 2016; 39(3): 395–402.
7. Shirvan A.R., Hemmatinejad N., Bashari A. PET-Cell Fibers: Synthetic with Natural Effects, Surface Modification of PET Fibers with Luffa Nanowhiskers. *J. Polym. Environment*. 2017; 25(8): 453–464.

8. Azimian M., Kühnle C., Wiegmann A. Design and optimization of fibrous filter media using lifetime multipass simulations. *Chem. Eng. Technol.* 2018; 41(5): 928–935.
9. Pan Z., Liang Y., Tang , M., Sun Z., Hu J., Wang J. Simulation of performance of fibrous filter media composed of cellulose and synthetic fibers. *Cellulose.* 2019; 26(5): 7051–7065.
10. Shabaridharan G., Das A. Study on heat and moisture vapour transmission characteristics through multilayered fabric ensembles. *Fibers Polym.* 2012; 13(4): 522–528.
11. Venkataraman M., Mishra R., Subramaniam V., Gnanamani A., Kotresh T. M., Militky J. Dynamic heat flux measurement for advanced insulation materials. *Fibers Polym.* 2016; 17(6): 925–931.
12. Zimina E. L., Skobova N. V., Sokolov L. E., Grishanova S. S. Technologies for Processing Chemical Fiber Waste of Carpet Production. *Fibre Chem.* 2019; 51(2): 23–25.
13. Gao B., Zoo L., Zuo B. Sound absorption properties of spiral vane electrospun PVA/nano particle nanofiber membrane and non-woven composite material. *Fibers Polym.* 2016; 17(7): 1090–1096.
14. Kalauni K., Pawar S. J. A review on the taxonomy, factors associated with sound absorption and theoretical modeling of porous sound absorbing materials. *J. Porous Materials.* 2019; 26(3): 1795–1819.
15. Thirumurugan V., Kumar M. Design of an Instrument to Determine the Acoustic Characteristics of Non Wovens Made from Recycled Polyester, Jute and Flax. *Fibers Polym.* 2020; 21(12): 3009–3015.
16. Dedov, A.V., Babushkin, S.V., Platonov, A.V., Nazarov, V.G. Heterocapillarity of non-woven canvases at various stages of their production. *Fibre Chem.* 2001; 33(1): 33–36.
17. Bokova, E.S., Dedov, A.V. Mechanical characteristical of needlepunch materials theated with heated air. *Fibre Chem.* 2012; 44(1): 32–34.
18. Dedov A.V., Nazarov V. G. Mechanical Properties of Composite Materials Based on Latex-Impregnated Needle-Punched Nonwoven Fabrics from Fibers of Different Nature. *Inorganic Materials: Appl. Research.* 2018; 9(1):47–51
19. Dedov A. V., Roev B. A., Bobrov V. I., Kulikov G. B., Nazarov V. G. Mechanism of Stretching and Breaking of Needle-Punched Nonwovens. *Fibre Chem.* 2018; 49(5): 334–337.
20. Nazarov V.G., Doronin F.A., Evdokimov A.G., Dedov A.V. Regulation of the wettability of nonwoven cloth by oxyfluorination to improve its impregnation by latex. *Fibre Chem.* 2020; 52(2): 109–111.
21. Dedov A.V., Babushkin S.V., Platonov A.V., Kondratov A.P., Nazarov V.G. Sorptive properties of nonwoven materials. *Fibre Chem.* 2001; 33(5): 56–58.
22. Dedov A.V., Nazarov V.G. Processed Nonwoven Needlepunched Materials with Increased Strength. *Fibre Chem.* 2015; 47(2): 121–125.
23. Dedov A.V., Nazarov V. G. Mechanical Properties of Composite Materials Based on Latex-Impregnated Needle-Punched Nonwoven Fabrics from Fibers of Different Nature. *Inorganic Materials: Appl. Resear.* 2018; 9(1): 47–51.
24. Dedov A. V., Nazarov V. G., Kondratov A. P., Kuznetsov V. A. Abrasion of Impregnated Nonwoven Needle-Punched Fabrics. *Fibre Chem.* 2020; 51(6): 444–448.
25. Wang L., Xu F., Li H., Liu Y., Liu Y. Preparation and stability of aqueous acrylic polyol dispersions for two-component waterborne polyurethane. *J. Coatings Technol. Res.* 2017; 14(1): 215–223.
26. Arshad N., Zia K. M., Hussain M. T., Zuber M., Arshad M.M. Synthesis of novel curcumin-based aqueous polyurethane dispersions for medical textile diligences with potential of antibacterial activities. *Polym. Bulletin.* 2022; 79(10): 7711–7727.
27. Moiz A., Vijayan A., Padhye R., Wang X. Chemical and Water Protective Surface on Cotton Fabric by Pad-Knife-Pad Coating of WPU-PDMS-TMS. *Cellulose.* 2016; 23(5): 3377–3388.
28. Moiz A., Padhye R., Wang X. Coating of TPU-PDMS-TMS on Polycotton Fabrics for Versatile Protection. *Polym.* 2017; 9(12): 660–668.
29. Sikdar P., Islam S., Dhar A., Bhat G., Hinchliffe D., Condon B. Barrier and mechanical properties of water-based polyurethane-coated hydroentangled cotton nonwovens. *J. Coatings Technol. Res.* 2022; 19(9): 1255–1267.
30. Amid H., Mazé B., Flickinger M. C., Pourdeyhimi B. Hybrid adsorbent nonwoven structures: a review of current technologies. *J. Mater. Sci.* 2016; 51(9): 4173–4200.
31. Liu R., Chen Y., Fan H. Design, characterization, dyeing properties, and application of acid-dyeable polyurethane in the manufacture of microfiber synthetic leather. *Fibers Polym.* 2015; 16(9): 1970–1980.
32. Nazarov V.G., Doronin F.A., Evdokimov A.G., Dedov A.V. Regulation of the wettability of nonwoven cloth by oxyfluorination to improve its impregnation by latex. *Fibre Chem.* 2020; 52(2): 109–111.
33. Ahmad N., Khan M B., Ma X., Ul-Haq N. The Influence of Cross- Linking/Chain Extension Structures on Mechanical Properties of HTPB-Based Polyurethane Elastomers. *Arab. J. Sci. Eng.* 2014; 39(1): 43–51.
34. Szołyga M., Dutkiewicz M., Marciniec B. Polyurethane composites based on silsesquioxane derivatives of different structures. *J. Thermal Analysis Calorimetry.* 2018; 132(9): 1693–1706.

35. Hao S, Wenquan F, Lei Z, Fuquan M, Yulong H, Chunpeng H. Experimental study on the mechanical properties of different types of fiber reinforced soil. *J. Chin Foreign Highw.* 2017; 37(3): 237–241.
36. Lu Y., Liu X., Lu K., Li Y., Liu F., Liu P. Properties and Fracture Surface Features of Plaster Mold Reinforced with Short Polypropylene Fibers for Investment Casting. *Inter. J. Metalcasting.* 2021; 15(4): 700–709.
37. Nazarov, V.G., Stolyarov, V.P., Gagarin, M.V. Simulation of chemical modification of polymer surface. *J. Fluorine Chem.* 2014; 161: 120–127.
38. Nazarov, V.G., Stolyarov, V.P. Modified polymer substrates for the formation of submicron particle ensembles from colloidal solution. *Colloid J.* 2016; 78(1): 75–82.
39. Nazarov, V.G., Doronin, F.A., Evdokimov, A.G., Rytikov, G.O., Stolyarov, V.P. Oxyfluorination-Controlled Variations in the Wettability of Polymer Film Surfaces. *Colloid J.* 2019; 81(2): 146–157.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Olga V. Kozhevnikova – Engineer, Department of Chemistry and Technology of Polymer Materials and Nanocomposites, Russian State University named after A.N. Kosygin, Moscow, Russia, efgenenikum@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-6175-4603>

Elena S. Bokova – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Chemistry and Technology of Polymer Materials and Nanocomposites, Russian State University named after A.N. Kosygin, Moscow, Russia, esbokova@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7769-9639>

Alexander V. Dedov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Innovative Materials of Print Media Industry, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia, dedovs55@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9636-9467>

Viktor G. Nazarov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Innovative Materials of Print Media Industry, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia, 110505n@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7243-9739>

Leonid A. Ivanov – Cand. Sci. (Eng.), Vice President, Russian Academy of Engineering, Member of the International Journalist Federation; Moscow, Russia, L.a.ivanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9513-8712>

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Olga V. Kozhevnikova – conducting experimental work, processing experimental results.

Elena S. Bokova – participation in the development of a scientific research program, revision of the text, conclusions of the article.

Alexander V. Dedov – conducting experimental work, processing the results of the experiment, writing the source text.

Viktor G. Nazarov – scientific guidance, research concept, drawing up a plan of experimental work, conclusions of the article.

Leonid A. Ivanov – participation in the development of the scientific concept of the work, correction of the text of the article.

The authors declare no conflict of interest.

The article was submitted 09.01.2024; approved after reviewing 30.01.2024; accepted for publication 01.02.2024.

Научная статья

УДК 677.529

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-1-22-31>

CC BY 4.0

Строительные тепло- и звукоизоляционные композиционные материалы с высоким сопротивлением к растяжению

Ольга Вячеславовна Кожевникова¹ , Елена Сергеевна Бокова¹ , Александр Васильевич Дедов^{2*} ,
Виктор Геннадьевич Назаров² , Леонид Алексеевич Иванов³ 

¹ Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина, Москва, Россия

² Московский политехнический университет, Москва, Россия

³ Российская инженерная академия, Москва, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: dedovs55@rambler.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Цель работы – исследование влияния степени пропитки нетканых полотен на сопротивление растяжению волокнисто-пористых композиционных материалов строительного назначения. **Материалы и методы исследования.** В качестве объектов исследования использовали полотна, изготовленные из полиэтилентерефталатных (ПЭТ) волокон линейной плотности 0,33 текс (диаметром 20–25 мкм), полипропиленовых (ПП) волокон линейной плотности 0,33 текс (диаметром 27–30 мкм) и экспериментальных поликацетальных (ПАЦ) волокон линейной плотности 0,33 текс (диаметром 18–22 мкм). Волокнистые материалы получали механическим способом формирования холста с последующим иглопрокалыванием. Плотность основного прокалывания составляла 180 см⁻². Для пропитки использовали водную дисперсию анионного стабилизированного алифатического полиэфиуретана марки IMPRANIL DL 1380 (КНР) с сухим остатком 40%. Линейные размеры образцов нетканых полотен и композиционных материалов определяли в соответствии с требованиями ISO 9073-2:1995. Толщину полотен и композиционных материалов измеряли толщиномером с ценой деления 0,01 мм при давлении на материал 10 кПа. Показатели механических свойств полотен и композиционных материалов определяли в соответствии с требованиями ИСО 9073.3-1989. **Результаты и их обсуждение.** Установлено влияние состава волокнистого наполнителя на сопротивление растяжению композиционных материалов, полученного пропиткой нетканых иглопробивных полотен из полиэтилентерефталатных, полипропиленовых и экспериментальных поликацетальных волокон водной дисперсией полиуретана. Максимальное сопротивление растяжению композиционных материалов, армированных различными волокнистыми наполнителями, установлено при определенной степени пропитки, величина которой зависит от химической природы волокон наполнителей и направления формирования полотен. В строительстве зданий и сооружений целесообразным является применение композиционных материалов, армированных полотнами из поликацетальных волокон, которые при равной степени пропитки по сравнению с композиционными материалами, армированными полотнами из полипропиленовых и полиэтилентерефталатных волокон, имеют повышенное сопротивление растяжению. **Заключение.** Оптимальная степень пропитки, при которой достигается максимальное сопротивление растяжению композиционных материалов на нетканой основе из поликацетальных волокон, зависит от направления формирования полотна. Для образцов, вырезанных в поперечном направлении формирования волокнистого холста, максимальное значение сопротивления растяжению достигается при степени пропитки 0,44, для образцов продольного направления – 0,35.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: нетканое иглопробивное полотно, водная дисперсия полиуретана, пропитка, композиционный материал, растяжение.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

Кожевникова О.В., Бокова Е.С., Дедов А.В., Назаров В.Г., Иванов Л.А. Строительные тепло- и звукоизоляционные композиционные материалы с высоким сопротивлением к растяжению // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т. 16, № 1. С. 22–31. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-1-22-31>. – EDN: RJUMBJ.

ВВЕДЕНИЕ

Нетканые полотна из синтетических волокон [1–9] представляют собой высокопористые материалы с коэффициентом пористости более 0,8. Несмотря на широкое применение таких полотен для тепло- [10–12] и звукоизоляции [13–15] строительных конструкций и сооружений, они имеют существенный недостаток – низкое сопротивление растяжению [16–22], которое при вытяжке полотен в процессе их транспортировки, установки и эксплуатации приводит к увеличению пористости и снижению заданных характеристик. Одним из возможных вариантов получения композиционных материалов с увеличенным сопротивлением растяжению при сохранении требуемого уровня пористости является пропитка нетканых полотен растворами и дисперсиями полимеров [23, 24].

Комплекс физико-механических свойств композиционных материалов, в основном, определяется взаимодействием на границе раздела волокно – полимерное связующее [25–30]. Пористые материалы с необходимым для практического применения сопротивлением растяжению могут быть получены при условии хорошей смачиваемости волокон полимерным составом с формированием между волокнами наноразмерных полимерных мостиков, с одной стороны, ограничивающих подвижность волокнистых структур в силовом поле, а с другой, сохраняющих их рыхлость.

Синтетические волокна хорошо смачиваются растворами полимеров в органических растворителях, например, для ПЭТ волокон таким связующим является раствор полиуретана в диметилформамиде [31, 32], при использовании которого происходит преимущественная сорбция связующего на поверхности волокон с сохранением пористой структуры полотна, использованного для пропитки. Однако значительный объем токсичных жидких стоков, содержащих диметилформамид и различные органические вещества, ограничивает практическое применение пропитки полотен раствором полиуретана.

Воздействие на окружающую среду можно нивелировать при использовании для пропитки нетканых

полотен водных дисперсий [25–30, 32–34], которые более экологичны, но, по сравнению с растворами полимеров в органических растворителях, в меньшей степени смачивают синтетические волокна [32–34]. Одним из часто применяемых вариантов увеличения адгезии полимерного связующего к волокну является его модификация поверхностно-активными веществами и другими ингредиентами [25–30]. При этом для получения композиционных материалов в качестве нетканых основ используют, в основном, полотна из ПЭТ и реже из ПП волокон [32–34].

В настоящей работе помимо традиционных волокнистых смесок для пропитки полимерным связующим использовали нетканые полотна из полиациetalных волокон, имеющих большее сродство к воде.

Целью работы являлось исследование влияния степени пропитки нетканых полотен на сопротивление растяжению волокнисто-пористых композиционных материалов строительного назначения.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования использовали полотна, изготовленные из ПЭТ волокон линейной плотности 0,33 текс (диаметром 20–25 мкм); ПП волокон линейной плотности 0,33 текс (диаметром 27–30 мкм); ПАЦ волокон линейной плотности 0,33 текс (диаметром 18–22 мкм). Волокнистые холсты получали механическим способом формирования холста с последующим иглопрокалыванием при плотности 180 см⁻².

Линейные размеры образцов полотен (табл. 1) и композиционных материалов определяли в соответствии с требованиями ISO 9073-2:1995. Толщину образцов полотен и композиционных материалов измеряли толщиномером с ценой деления 0,01 мм при давлении 10 кПа. Относительная ошибка измерений составляла ±2%. Показатели предела прочности при растяжении и относительного удлинения полотен и композиционных материалов определяли в соответствии с требованиями ИСО 9073.3-1989. Относительная ошибка составляла ±12%.

Для пропитки полотен использовали водную дисперсию анионного стабилизированного алифатиче-

Таблица 1

Характеристики нетканых полотен на основе волокон разного химического состава

Волокно	p_f , кг/м ³	F , кг/м ²	$d \times 10^3$, м	p , кг/м ³	δ , отн. ед.
ПАЦ	1410	0,28	2,1	130	0,91
ПЭТ	1370	0,26	3,0	120	0,91
ПП	920	0,33	2,1	110	0,89

Здесь p_f – плотность волокнообразующего полимера; F – поверхностная плотность полотна (масса образца площадью 1 м²); d – толщина полотна; p – плотность нетканого полотна; δ – коэффициент пористости полотна.

ского полиэфируретана марки IMPRANIL DL 1380 (КНР). Концентрация полиуретана в водной дисперсии составила 42%. Образец полотна размером 50 на 200 мм погружали в емкость объемом 500 мл, заполненную дисперсией, и прокатывали валиком в течение 3–5 мин при комнатной температуре. Образец извлекали из емкости, выдерживали до полного стекания дисперсии и отжимали между валами с зазором, равным половине толщины полотна.

Степень пропитки полотна варьировали разбавлением дисперсии полиуретана дистиллированной водой. Термообработку пропитанного полотна осуществляли при температуре 70°C. Степень пропитки (C_M , отн. ед.) рассчитывали по формуле:

$$C_M = \frac{m_1 - m}{m}, \quad (1)$$

где m_1 и m – масса образцов полотен различного состава после и до пропитки соответственно, кг.

Коэффициент пористости полотен (табл. 1) определяли из уравнения 2, композиционных материалов – из уравнения 3:

$$\delta = 1 - \frac{p}{p_f}, \quad (2)$$

$$\delta = 1 - \frac{m_n/p_f + m_{PY}/p_{PY}}{V}, \quad (3)$$

где δ – коэффициент пористости, отн. ед.; p – плотность полотна, кг/м³; p_f – плотность волокна, кг/м³; m_n и m_{PY} – масса полотна и полиуретана в образце композиционного материала после термообработки, кг; p_{PY} – плотность полиуретана, кг/м³.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сопротивление растяжению нетканых материалов на основе волокон различной химической природы

На рис. 1 приведены зависимости условного напряжения (σ , МПа) от относительного удлинения (ε , %) для образцов нетканых материалов из волокон различной химической природы, вырезанных в продольном и поперечном направлениях формирования полотна на механическом холстоукладчике.

Растяжение всех образцов, препарированных в продольном и поперечном направлениях формирования нетканых материалов, происходит в две стадии, каждая из которых описывается линейной зависимостью σ от ε . Из углов наклона кривых следует, что растяжение полотен на второй стадии процесса происходит при большем условном напряжении по сравнению с их растяжением на первой стадии процесса.

Двустадийное растяжение нетканых иглопробивных материалов является следствием формирования при их иглопрокалывании волокнисто-пористой структуры с неравномерным распределением как отдельных волокон, так и их пучков в объеме полотна (рис. 2).

В силу специфических особенностей иглопробивного способа упрочнения холстов, при прокалывании волокна захватываются зазубринами игл с образованием пучков из волокон, ориентированных, преимущественно, перпендикулярно поверхности полотна, при этом волокна входят одновременно в состав нескольких пучков (рис. 2а). Плотность упаковки волокон и площадь их контакта в пучках

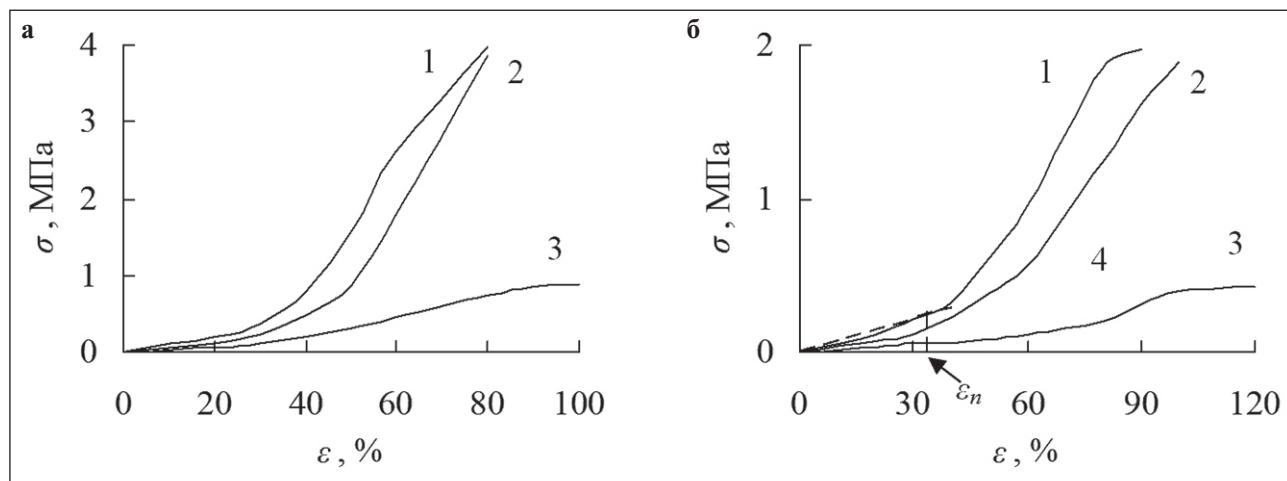


Рис. 1. Зависимости условного напряжения от относительного удлинения при растяжении полотен из ПАЗ (1), ПЭТ (2) и ПП (3) волокон для образцов, вырезанных: (а) – в поперечном; (б) – в продольном направлениях (4 – отрезок зависимости σ от ε , обозначенный пунктиром, характеризует первую стадию растяжения, стрелкой показано относительное удлинение, при котором происходит переход от первой стадии растяжения ко второй)

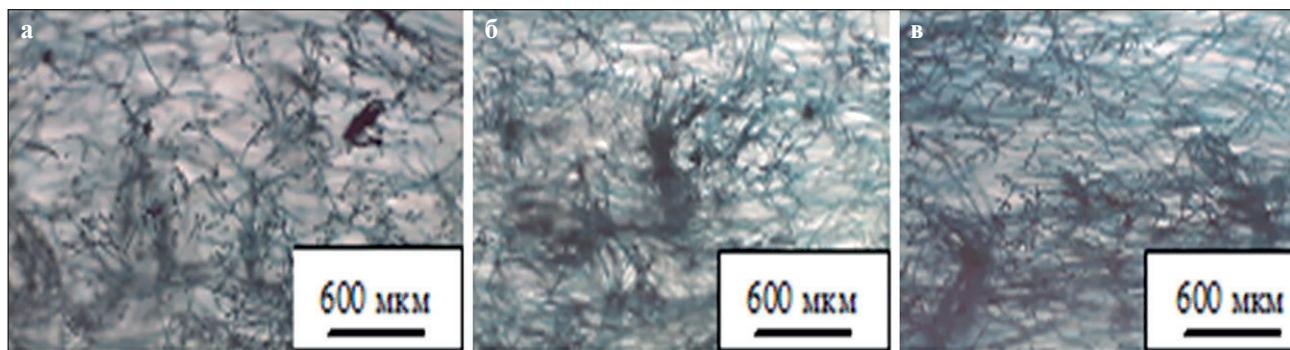


Рис.2. Микрофотографии среза полотен из ПЭТ волокон: (а) – исходное полотно; (б) – полотно при 10% и (в) – при 80% относительном удлинении

существенно превышают аналогичные характеристики для волокон, расположенных в межпучковом пространстве [17–23], на которые приходится основная механическая нагрузка при растяжении полотен.

Растяжение полотен на первой стадии является следствием выпрямления и изменения конфигурации волокон между пучками. После выпрямления и переориентации волокон в направлении действия механической нагрузки (рис. 2б), она перераспределяется на волокна в пучках (рис. 2в), большая плотность упаковки которых и значительная площадь контакта приводит к возрастанию условного напряжения, необходимого для перемещения волокон и выхода их из зацепления. Разрыв этих волокон или их выскользывание из пучков приводит к разрушению полотен [19, 20].

Из рис. 1 следует, что при равном условном напряжении образцы поперечного направления полотна деформируются в меньшей степени по сравнению с образцами, вырезанными в продольном направлении. Такие различия являются следствием преимущественной ориентации волокон перпендикулярно плоскости формирования волокнистого холста, приводящей к образованию пучков, соединенных между собой большим числом волокон, по сравнению с пучками, сформированными в продольном направлении. Это объясняет действие механической нагрузки при относительно небольшом условном напряжении на отдельные волокна и их перемещение [19, 20].

Из зависимостей σ от ε следует, что, по сравнению с полотнами из ПАЦ и ПЭТ волокон, растяжение полотна из ПП на первой и второй стадиях происходит при меньшем условном напряжении (рис. 1, зависимость 3), что, по-видимому, связано с меньшим трением полипропиленовых волокон [35, 36] и их низкой способностью удерживаться в зазубринах игл. Совокупность этих факторов ограничивает формирование пучков [19, 20], и механическая нагрузка, в основном, приходится на полипропиленовые волокна, соединяющие пучки.

Сопротивление растяжению композиционных материалов на основе полиациetalных волокон

Характер кривых σ от ε для композиционных материалов на основе полотна из ПАЦ волокон, пропитанных полиуретановым связующим (рис. 3), аналогичен кривым для необработанных нетканых полотен.

Их растяжение происходит в две стадии. При этом, по сравнению с полотнами без пропитки, условное напряжение, необходимое для растяжения композиционного материала на первой и второй стадиях, возрастает, что наиболее очевидно для образцов продольного направления (рис. 3б).

При увеличении степени пропитки от 0 до 0,52 для образцов, вырезанных в поперечном направлении формирования холста, сопротивление растяжению на первой стадии процесса увеличивается незначительно. Кроме того, для образцов продольного направления при степени пропитки 0,52 имеет место снижение условного напряжения, необходимого для растяжения материалов на первой стадии процесса, по сравнению с материалами с меньшей степенью пропитки (рис. 3б, зависимость 3).

Параметр, характеризующий сопротивление растяжению композиционных материалов

Линейные участки зависимостей σ от ε полотен различного состава и композиционных материалов на их основе описываются уравнениями общего вида:

$$\sigma = E_0 \frac{\varepsilon}{100} \quad \text{при } \varepsilon < \varepsilon_n, \quad (4)$$

где E_0 – эффективный модуль растяжения первой стадии, МПа; ε_n – относительное удлинение, которое показывает переход от первой ко второй стадии растяжения (определение параметра ε_n представлено на рис. 1б (пунктирная линия)).

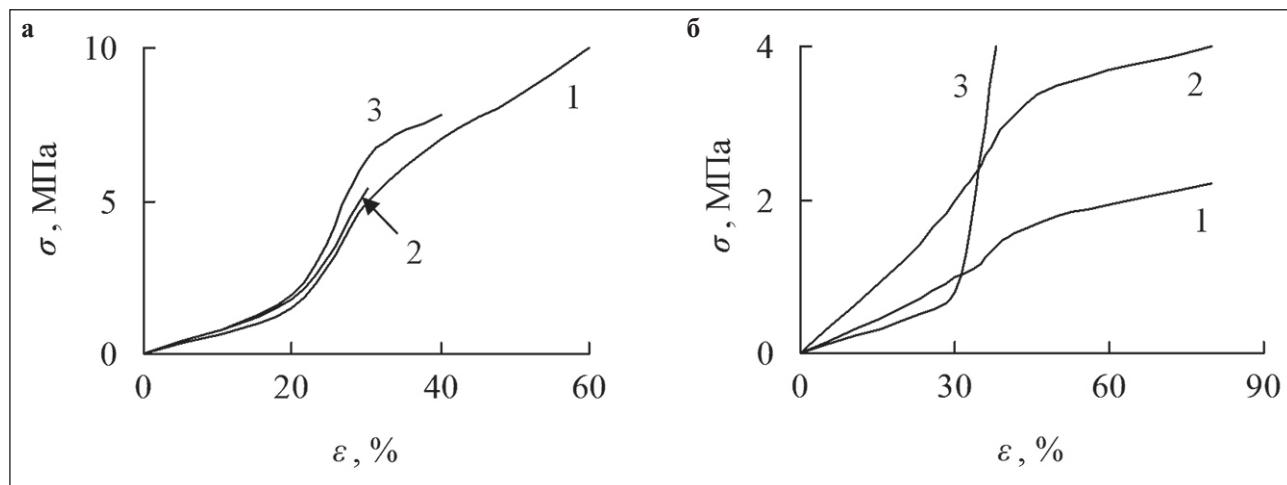


Рис. 3. Зависимости условного напряжения от относительного удлинения композиционных материалов на основе полотна из полиациетальных волокон со степенью пропитки 0,1 (1), 0,24 (2) и 0,52 (3): (а) – в поперечном; (б) – в продольном направлениях формирования нетканых основ

Согласно приведенному уравнению, эффективный модуль аналогичен модулю Юнга для оценки упругой (обратимой) деформации твердых тел при растяжении. Однако деформация на первой стадии растяжения нетканого полотна не является упругой, поскольку определяется фрикционными связями между волокнами, разрыв которых приводит к выходу волокон из когезионного зацепления и их необратимому перемещению в межпучковом пространстве. Для композиционных материалов вследствие осаждения полимера на волокне и в местах пересечения волокон имеет место переход от когезионных контактов между волокнами к адгезионным через полимерное связующее, и характер растяжения на первой стадии зависит от числа и распределения этих контактов в объеме полотна.

Таким образом, в работе для оценки сопротивления растяжению нетканых полотен и пропитанных материалов введен новый параметр – эффективный модуль растяжения E_0 .

Влияние степени пропитки на сопротивление растяжению композиционных материалов различного состава

Зависимости E_0 от степени пропитки C_M для образцов, препарированных в продольном и поперечном направлениях формирования нетканых основ, представлены на рис. 4.

Зависимости E_0 от C_M для образцов, вырезанных в поперечном и продольном направлениях формирования нетканых основ, имеют экстремальный вид. При этом степень пропитки, при которой эффективный модуль растяжения имеет максимальные значения, зависит от состава волокнистого полотна.

Максимальное значение эффективного модуля растяжения, превышающее на 25% и в три раза аналогичный показатель для композиционных материалов на основе ПЭТ и ПП волокон, имеет композиционный материал на нетканой основе из ПАЦ волокон.

Для всех исследуемых материалов при степени пропитки больше оптимальной величины (точка экстремума) их эффективный модуль растяжения снижается (рис. 4а, б).

Для композиционных материалов, содержащих ПАЦ волокна, максимальное значение эффективного модуля растяжения характерно для образцов, вырезанных в поперечном направлении при степени пропитки 0,45, в продольном 0,35 (рис. 4б, зависимости 1). При использовании полотен из ПЭТ и ПП волокон максимальные значения эффективного модуля в поперечном и продольном направлениях композиционных материалов достигаются при степени пропитки 0,5–0,6 (рис. 4б, зависимости 2 и 3).

Кроме того, из зависимостей E_0 от C_M следует, что эффективный модуль образцов композиционных материалов из ПЭТ и ПП волокон продольного и поперечного направлений начинает возрастать при степени пропитки больше 0,25 (рис. 4а, б, зависимости 2 и 3). Для материалов на основе полотна из ПАЦ волокон монотонный рост эффективного модуля растяжения для образцов продольного направления происходит при увеличении степени пропитки от 0 до 0,4, для образцов поперечного направления от 0 до 0,5 (рис. 4а, б, зависимости 1).

Максимальные значения эффективного модуля растяжения композиционного материала на основе полотна из ПАЦ волокон при оптимальной степени пропитки, а также его возрастание при изменении степени пропитки от 0 до оптимальной величины

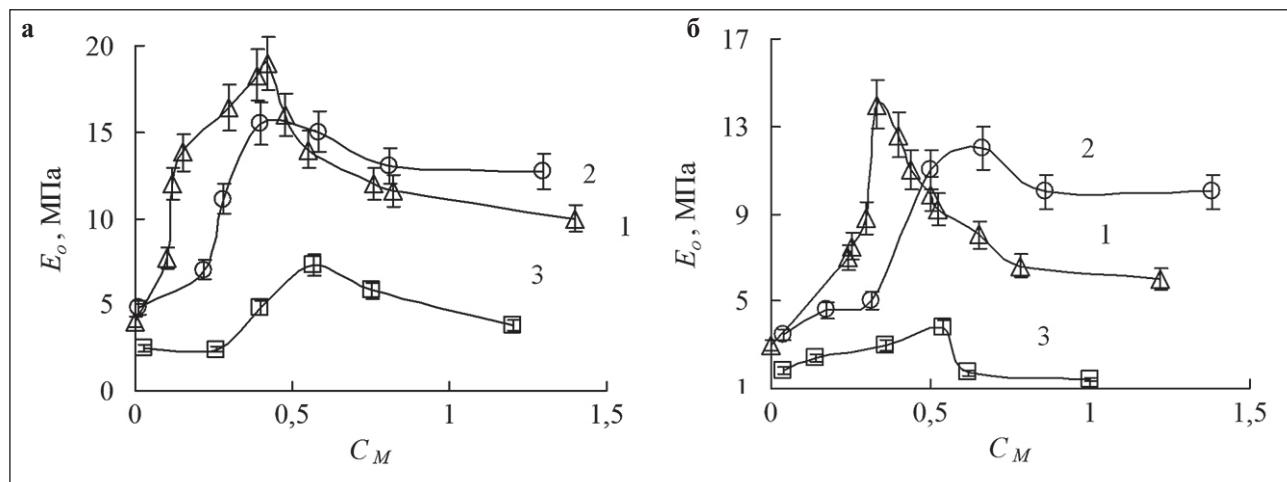


Рис. 4. Зависимости эффективного модуля растяжения композиционных материалов на основе полотен из ПАЦ (1), ПЭТ (2) и ПП (3) волокон от степени пропитки: (а) – в поперечном; (б) – в продольном направлениях формирования нетканых холстов

можно объяснить повышенной, по сравнению с ПЭТ и ПП волокнами, смачиваемостью полиакетала водной дисперсией полиуретана. Известно, что для ПЭТ пленок краевой угол смачивания составляет 68° , для ПП – 87° , а для ПАЦ – 62° [37–39].

Влияние степени пропитки на пористость композиционных материалов различного состава

Для получения композиционных материалов с достаточным для практического применения сопротивлением растяжению необходимо определить причины снижения эффективного модуля при степени пропитки больше оптимальной величины (рис. 3а и б). С этой целью на рис. 5 представлены зависимости коэффициента пористости композиционных материалов от степени пропитки полотен различного состава (рис. 5).

При максимальной степени пропитки, равной 1,22, значение коэффициента пористости композиционных материалов на основе полотен из ПЭТ и ПАЦ волокон составляет 0,84 и 0,80 соответственно (рис. 5, зависимости 1 и 2). Экстраполяцией зависимости 3 на рис. 4 получили, что при степени пропитки 1,22 коэффициент пористости композиционного материала на основе полотна из ПП волокон составляет 0,6. Меньшее значение коэффициента пористости композиционных материалов, содержащих ПП волокна, является следствием более низкой по сравнению с ПАЦ и ПЭТ волокнами смачиваемостью [37–39] водной дисперсией полиуретана и коагуляцией частиц связующего в пространстве между волокнами, приводящей к снижению объема пор. При пропитке более гидрофильных полотен частицы полиуретановой дисперсии осаждаются на поверхности волокон, что вызывает незначительное

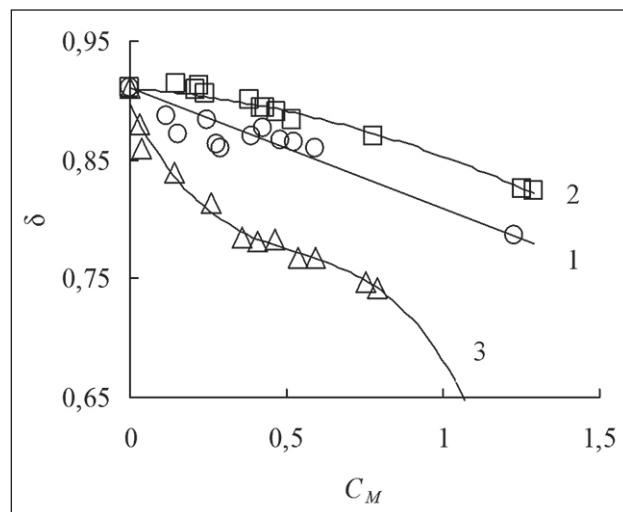


Рис. 5. Зависимости коэффициента пористости от степени пропитки композиционных материалов на основе ПАЦ (1), ПЭТ(2) и ПП (3) волокон (при $C_M = 0$ – средний коэффициент пористости полотен различного состава принят равным 0,9)

изменение пористости композиционных материалов при относительно большой степени пропитки, по сравнению с исходными непропитанными неткаными основами.

Структура композиционных материалов на основе нетканых полотен из ПА волокон в зависимости от степени пропитки

На рис. 6 приведены микрофотографии поперечного среза композиционных материалов на основе нетканых полотен из ПАЦ волокон, со степенями

ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

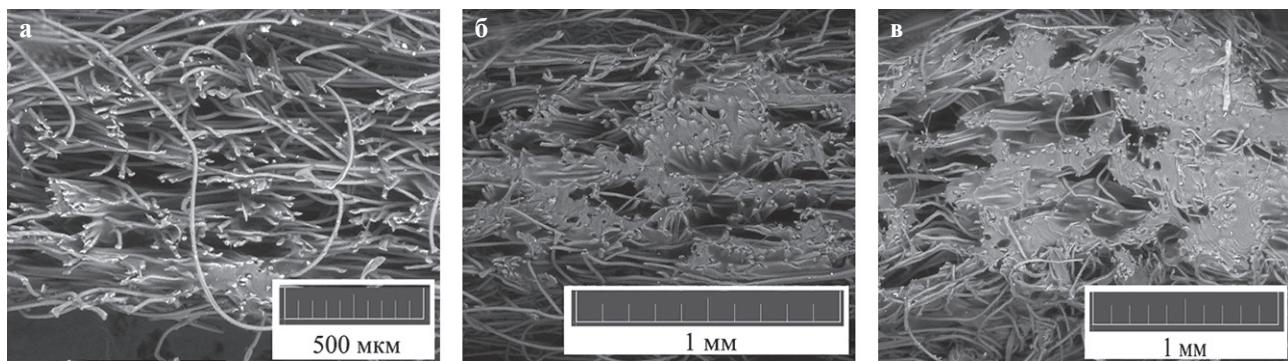


Рис. 6. Микрофотографии поперечного среза композиционных материалов, армированных полотном из полиацетальных волокон, со степенями пропитки 0,17 (а), 0,44 (б) и 0,81 (в)

пропитки водной дисперсией полиуретана 0,17, 0,44 и 0,81.

Из анализа микрофотографий следует, что имеет место локальное распределение связующего в объеме волокнистого холста, которое зависит от степени пропитки. При минимальной степени пропитки ($C_M = 0,17$) связующее концентрируется на отдельных участках по толщине полотна (рис. 5а). Увеличение степени пропитки до 0,44 приводит к возрастанию содержания связующего, его агломератному распределению на волокне и между пучками волокон (рис. 5б). При степени пропитки 0,81 агломераты связующего становятся более крупными и более равномерно распределенными по толщине композиционного материала (рис. 5в).

На рис. 7 показано формирование связей между полиацетальными волокнами при различной степени пропитки.

Из рис. 7а следует, что при степени пропитки 0,17 частицы полиуретана осаждаются в местах контакта между ПАц волокнами, а поверхность волокон остается свободной. При возрастании степени

пропитки до 0,44, при которой композиционный материал, содержащий ПАц волокна, имеет максимальный эффективный модуль растяжения образцов в поперечном направлении, между волокнами образуются наноразмерные «мостики» полимера. Мостики расположены на значительном расстоянии друг от друга и соединяют между собой несколько волокон (рис. 7а).

При степени пропитки 0,17 наблюдается локальное осаждение частиц связующего на поверхности волокон. Мостики образуются между двумя соседними волокнами, расположенными на небольшом расстоянии друг от друга, которое меньше диаметра волокон. Все частицы входят в состав мостиков. Поровое пространство между волокнами не заполнено частицами полимера (рис. 7б).

Мостики между волокнами композиционного материала со степенью пропитки 0,17 и 0,44 плотно прилегают к поверхности волокон, что свидетельствует о значительной прочности связей между волокнами на границе раздела волокно-связующее. Ограничение подвижности волокон в силовом поле

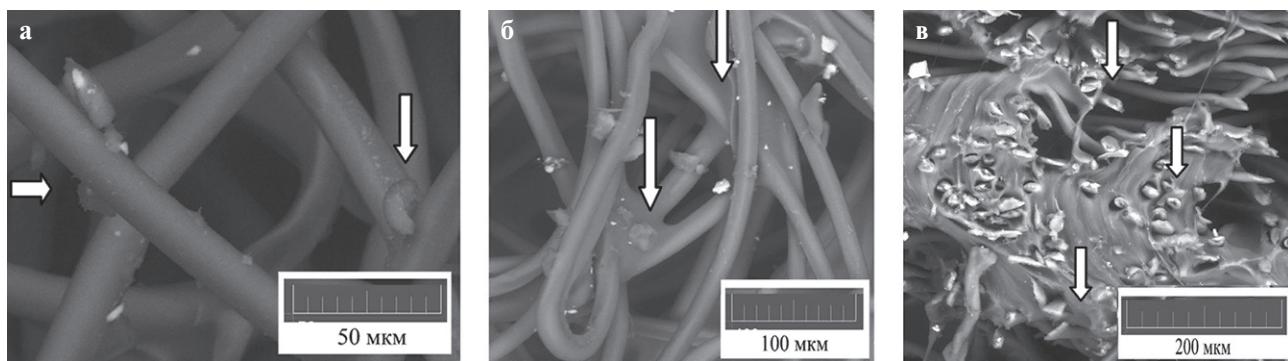


Рис. 7. Микрофотографии контакта волокон между собой в композиционных материалах на основе полотна из ПАц волокон со степенью пропитки 0,17 (а), 0,44 (б) и 0,81 (в) (на рис. 7а стрелками показаны места контакта между волокнами, соединенными частицами связующего; на рис. 7б стрелками отмечены места, в которых между волокнами расположены наноразмерные «мостики» из частиц связующего; на рис. 7в стрелками показана граница раздела между волокнами и связующим)

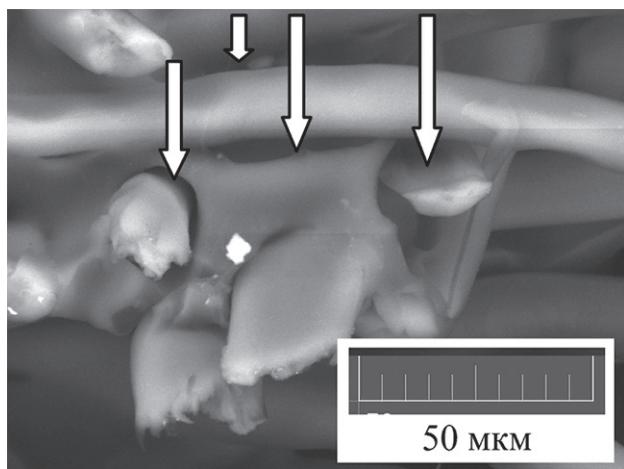


Рис. 8. Микрофотография контакта между полиацетальными волокнами композиционного материала со степенью пропитки 0,81 (стрелками показано отслоение слоя связующего от волокон)

характеризуется возрастанием эффективного модуля растяжения композиционных материалов (рис. 3).

Микрофотография композиционного материала на основе полотна из ПАЦ волокон при степени пропитки 0,81 представлена на рис. 8.

Отслаивание связующего от ПАЦ волокон (рис. 8) является следствием усадки полиуретана при термообработке [33, 34], когда в результате испарения воды происходит уменьшение объема частиц полиуретана из-за процесса капиллярной контракции.

Соотношение между физическим взаимодействием на границе раздела полиуретан-полиацетальное волокно и межмолекулярным взаимодействием между макромолекулами полиуретана зависит от толщины адсорбционного слоя связующего на поверхности волокон. При определенной толщине межмолекулярное взаимодействие между макромолекулами полиуретана начинает преобладать над взаимодействием на границе раздела фаз полиуретан-волокно, что приводит к отслаиванию полимера от поверхности волокон (рис. 8).

Кроме того, отслаивание полиуретана от поверхности полиацетального волокна может быть следствием параллельной адсорбции на поверхности волокон как частиц связующего, так и молекул воды, которая является дисперсной средой. Относительно высокое содержание в макромолекулах полиацетала атомов кислорода определяет повышенную, по сравнению с частицами полиуретана, адсорбцию молекул воды, что уменьшает прочность связи между частицами связующего и поверхностью волокон и также способствует отслаиванию полимера в процессе термообработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- в работе проведено исследование влияния состава нетканых материалов и технологических особенностей их производства на показатель растяжения под действием механической нагрузки, определяющий эффективность применения волокнистопористых композитов в качестве строительных тепло и звукоизоляционных материалов;
- установлен характер изменения показателя растяжения нетканых полотен, включающий в себя две стадии развития деформаций в зависимости от механической нагрузки на материал и структурных признаков нетканых холстов, сформированных механическим способом;
- показано, что образцы, препарированные в поперечном направлении формирования нетканых материалов механическим способом, имеют более высокие значения сопротивления растяжению вследствие преимущественно перпендикулярной ориентации волокон относительно поверхности нетканого полотна и их более плотной упаковки во взаимосвязанные пучки;
- исследовано влияние состава волокнистой матрицы на сопротивление растяжению композиционных материалов, полученных пропиткой нетканых иглопробивных полотен из ПЭТ, ПП и экспериментальных ПАЦ волокон водной дисперсией полиуретана;
- установлено, что композиционные материалы на нетканых основах из ПАЦ волокон, пропитанные водной дисперсией полиуретана, имеют более высокие значения эффективного модуля, характеризующего сопротивление материалов растяжению, по сравнению с полотнами из ПЭТ и ПП волокон;
- показано, что максимальные значения эффективного модуля композиционных материалов, содержащих полиацетальные волокна, характерны для образцов, препарированных в поперечном направлении формирования нетканых полотен, при степени их пропитки 0,44, для образцов продольного направления — при степени пропитки 0,35;
- выявлено, что при строительстве зданий и сооружений целесообразно применение композиционных материалов на основе нетканых полотен из ПАЦ волокон, которые при равной степени пропитки, по сравнению с материалами, армированными неткаными матрицами из ПП и ПЭТ волокон, имеют более высокое сопротивление растяжению.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание № FZRR-2023-0003)

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Diabat A., Kannan D., Mathiyazhagan K. Analysis of enablers for implementation of sustainable supply chain management – a textile case. *J. Cleaner Production.* 2014; 83(4):391–403.
2. Datta M. Geotechnology for Environmental Control at Waste Disposal Sites. *Indian Geotechnical J.* 2012; 42(1): 1–36.
3. Neznakomova M., Boteva S., Tzankov L., Elhag M. Non-woven Textile Materials from Waste Fibers for Cleanup of Waters Polluted with Petroleum and Oil Products. *Earth Systems and Environment.* 2018; 2(3): 413–420.
4. Baley C., Gomina M., Breard J., Bourmaud A. Specific features of flax fibres used to manufacture composite materialsr. *Inter. J. Material Forming* 2019; 12(6): 1023–1059.
5. Yakovleva O. I., Sashina E. S., Osipov M. I., Smirnov G. P. Non-Woven Needle Punched Material with Silver Nanoparticles from Natural Silk Fiber Waste. *Fiber Chem.* 2020; 52(2): 263–268.
6. Easwaran P., Lehmann M.J., Wirjadi O. Fiber thickness measurement in scanning electron microscopy images validated using synthetic data. *Chem. Eng. Technol.* 2016; 39(3): 395–402.
7. Shirvan A.R., Hemmatinejad N., Bashari A. PET-Cell Fibers: Synthetic with Natural Effects, Surface Modification of PET Fibers with Luffa Nanowhiskers. *J. Polym. Environment.* 2017; 25(8): 453–464.
8. Azimian M., Kühnle C., Wiegmann A. Design and optimization of fibrous filter media using lifetime multipass simulations. *Chem. Eng. Technol.* 2018; 41(5): 928–935.
9. Pan Z., Liang Y., Tang , M., Sun Z., Hu J., Wang J. Simulation of performance of fibrous filter media composed of cellulose and synthetic fibers. *Cellulose.* 2019; 26(5): 7051–7065.
10. Shabaridharan G., Das A. Study on heat and moisture vapour transmission characteristics through multilayered fabric ensembles. *Fibers Polym.* 2012; 13(4): 522–528.
11. Venkataraman M., Mishra R., Subramaniam V., Gnanamani A., Kotresh T. M., Militky J. Dynamic heat flux measurement for advanced insulation materials. *Fibers Polym.* 2016; 17(6): 925–931.
12. Zimina E. L., Skobova N. V., Sokolov L. E., Grishanova S. S. Technologies for Processing Chemical Fiber Waste of Carpet Production. *Fibre Chem.* 2019; 51(2): 23–25.
13. Gao B., Zoo L., Zuo B. Sound absorption properties of spiral vane electrospun PVA/nano particle nanofiber membrane and non-woven composite material. *Fibers Polym.* 2016; 17(7): 1090–1096.
14. Kalauni K., Pawar S. J. A review on the taxonomy, factors associated with sound absorption and theoretical modeling of porous sound absorbing materials. *J. Porous Materials.* 2019; 26(3): 1795–1819.
15. Thirumurugan V., Kumar M. Design of an Instrument to Determine the Acoustic Characteristics of Non Wovens Made from Recycled Polyester, Jute and Flax. *Fibers Polym.* 2020; 21(12): 3009–3015.
16. Dedov, A.V., Babushkin, S.V., Platonov, A.V., Nazarov, V.G. Heterocapillarity of non-woven canvases at various stages of their production. *Fibre Chem.* 2001; 33(1): 33–36.
17. Bokova, E.S., Dedov, A.V. Mechanical characteristical of needlepunch materials theated with heated air. *Fibre Chem.* 2012; 44(1): 32–34.
18. Dedov A.V., Nazarov V. G. Mechanical Properties of Composite Materials Based on Latex-Impregnated Needle-Punched Nonwoven Fabrics from Fibers of Different Nature. *Inorganic Materials: Appl. Research.* 2018; 9(1):47–51
19. Dedov A. V., Roev B. A., Bobrov V. I., Kulikov G. B., Nazarov V. G. Mechanism of Stretching and Breaking of Needle-Punched Nonwovens. *Fibre Chem.* 2018; 49(5): 334–337.
20. Nazarov V.G., Doronin F.A., Evdokimov A.G., Dedov A.V. Regulation of the wettability of nonwoven cloth by oxyfluorination to improve its impregnation by latex. *Fibre Chem.* 2020; 52(2): 109-111.
21. Dedov A.V., Babushkin S.V., Platonov A.V., Kondratov A.P., Nazarov V.G. Sorptive properties of nonwoven materials. *Fibre Chem.* 2001; 33(5): 56–58.
22. Dedov A.V., Nazarov V.G. Processed Nonwoven Needlepunched Materials with Increased Strength. *Fibre Chem.* 2015; 47(2): 121–125.
23. Dedov A.V., Nazarov V. G. Mechanical Properties of Composite Materials Based on Latex-Impregnated Needle-Punched Nonwoven Fabrics from Fibers of Different Nature. *Inorganic Materials: Appl. Resear.* 2018; 9(1): 47–51.
24. Dedov A. V., Nazarov V. G., Kondratov A. P., Kuznetsov V. A. Abrasion of Impregnated Nonwoven Needle-Punched Fabrics. *Fibre Chem.* 2020; 51(6): 444–448.
25. Wang L., Xu F., Li H., Liu Y., Liu Y. Preparation and stability of aqueous acrylic polyol dispersions for two-component waterborne polyurethane. *J. Coatings Technol. Res.* 2017; 14(1): 215–223.
26. Arshad N., Zia K. M., Hussain M. T., Zuber M., Arshad M.M. Synthesis of novel curcumin-based aqueous polyurethane dispersions for medical textile diligences with potential of antibacterial activities. *Polym. Bulletin.* 2022; 79(10): 7711–7727.

27. Moiz A., Vijayan A., Padhye R., Wang X. Chemical and Water Protective Surface on Cotton Fabric by Pad-Knife-Pad Coating of WPU-PDMS-TMS. *Cellulose*. 2016; 23(5): 3377–3388.
28. Moiz A., Padhye R., Wang X. Coating of TPU-PDMS-TMS on Polycotton Fabrics for Versatile Protection. *Polym.* 2017; 9(12): 660–668.
29. Sikdar P., Islam S., Dhar A., Bhat G., Hinchliffe D., Condon B. Barrier and mechanical properties of water-based polyurethane-coated hydroentangled cotton nonwovens. *J. Coatings Technol. Res.* 2022; 19(9): 1255–1267.
30. Amid H., Mazé B., Flickinger M. C., Pourdeyhimi B. Hybrid adsorbent nonwoven structures: a review of current technologies. *J. Mater. Sci.* 2016; 51(9): 4173–4200.
31. Liu R., Chen Y., Fan H. Design, characterization, dyeing properties, and application of acid-dyeable polyurethane in the manufacture of microfiber synthetic leather. *Fibers Polym.* 2015; 16(9): 1970–1980.
32. Nazarov V.G., Doronin F.A., Evdokimov A.G., Dedov A.V. Regulation of the wettability of nonwoven cloth by oxyfluorination to improve its impregnation by latex. *Fibre Chem.* 2020; 52(2): 109–111.
33. Ahmad N., Khan M B., Ma X., Ul-Haq N. The Influence of Cross-Linking/Chain Extension Structures on Mechanical Properties of HTPB-Based Polyurethane Elastomers. *Arab. J. Sci. Eng.* 2014; 39(1): 43–51.
34. Szołyska M., Dutkiewicz M., Marciniec B. Polyurethane composites based on silsesquioxane derivatives of different structures. *J. Thermal Analysis Calorimetry*. 2018; 132(9): 1693–1706.
35. Hao S., Wenquan F., Lei Z., Fuquan M., Yulong H., Chunpeng H. Experimental study on the mechanical properties of different types of fiber reinforced soil. *J. Chin Foreign Highw.* 2017; 37(3): 237–241.
36. Lu Y., Liu X., Lu K., Li Y., Liu F., Liu P. Properties and Fracture Surface Features of Plaster Mold Reinforced with Short Polypropylene Fibers for Investment Casting. *Inter. J. Metalcasting*. 2021; 15(4): 700–709.
37. Nazarov, V.G., Stolyarov, V.P., Gagarin, M.V. Simulation of chemical modification of polymer surface. *J. Fluorine Chem.* 2014; 161: 120–127.
38. Nazarov, V.G., Stolyarov, V.P. Modified polymer substrates for the formation of submicron particle ensembles from colloidal solution. *Colloid J.* 2016; 78(1): 75–82.
39. Nazarov, V.G., Doronin, F.A., Evdokimov, A.G., Rytikov, G.O., Stolyarov, V.P. Oxyfluorination-Controlled Variations in the Wettability of Polymer Film Surfaces. *Colloid J.* 2019; 81(2): 146–157.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кожевникова Ольга Вячеславовна – инженер кафедры химии и технологии полимерных материалов и нанокомпозитов, Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина, Москва, Россия, efgeneikum@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-6175-4603>

Бокова Елена Сергеевна – доктор технических наук, профессор кафедры химии и технологии полимерных материалов и нанокомпозитов, Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина, Москва, Россия, esbokova@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7769-9639>

Дедов Александр Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Инновационные материалы промтрециаиндустрии», Московский политехнический университет, Москва, Россия, dedovs55@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9636-9467>

Назаров Виктор Геннадьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Инновационные материалы промтрециаиндустрии», Московский политехнический университет, Москва, Россия, 110505n@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7243-9739>

Иванов Леонид Алексеевич – кандидат технических наук, вице-президент Российской инженерной академии, член Международной федерации журналистов, Москва, Россия, L.a.ivanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9513-8712>

ВКЛАД АВТОРОВ

Кожевникова О.В. – проведение экспериментальных работ, обработка результатов эксперимента.

Бокова Е.С. в участие в разработке научной программы исследований, доработка текста статьи.

Дедов А. В. – проведение экспериментальных работ, обработка результатов эксперимента, написание исходного текста.

Назаров В. Г. – научное руководство, концепция исследований, составление плана экспериментальных работ, выводы статьи.

Иванов Л.А. – участие в разработке научной концепции работы, корректировка текста статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 09.01.2024; одобрена после рецензирования 30.01.2024; принята к публикации 01.02.2024.

Review article

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-1-32-43>

CC BY 4.0

Modern strategies for the creation of polymer coatings. Part I

Irina N. Vikhareva* , Vyacheslav E. Antipin 

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

* Corresponding author: e-mail: vikharevain@susu.ru

ABSTRACT

Introduction. Coatings on hard materials are widely used in many industries. Coating technologies help prevent or reduce corrosion, contamination and biofouling, chemical and structural degradation, and wear and tear of external surfaces due to exposure to the elements and natural environments. The range of materials used for functional coatings is quite wide: from organic polymers to hybrid composites and inorganic nanoparticles, depending on the desired properties and functionality of the final product. Despite the excellent anti-corrosion characteristics of non-polymer coatings, their usage causes environmental damage. Organic coatings are among the most widely used. Such compositions are applied in liquid form; organic solvents are one of the main components. Environmental concerns have encouraged the development of alternative technologies. The main areas for development are availability of raw materials and the cost of environmentally friendly coatings. **Results and discussion.** The review substantiates the relevance of research on the development of multifunctional polymer-based coatings. The market for polymer coatings is presented. Methods of surface protection, types of coatings formed, their main components, features of the formation of coatings, the influence of various factors on the formation of polymer coatings, including methods of preparation and pre-treatment of the protected surface are presented. Methods for preventing corrosion are discussed in detail, as well as the main directions in the development of anti-corrosion coatings based on various protective mechanisms. The characteristics of the main components of protective coatings are given. The issue of destruction of polymer coatings depending on the operating environment is considered in detail. The types of media, their influence and mechanisms of action on protected objects are considered. Factors and mechanisms of destruction of polymer coatings, methods for preventing degradation of coatings are listed. The latest technologies for the formation of protective polymer coatings are highlighted. **Conclusion.** Currently, coatings provide a wide range of quality indicators. An important characteristic of modern coatings is minimal negative impact on the environment, which requires an integrated approach to the design and production of coatings.

KEY WORDS: adhesion, protection, corrosion, coating, polymer, solvent, thermosetting resin.

FOR CITATION:

Vikhareva I.N., Antipin V.E. Modern strategies for the creation of polymer coatings. Part I. *Nanotechnologies in Construction*. 2024; 16(1): 32–43. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-1-32-43>. – EDN: RHAZRH.

INTRODUCTION

In many areas of everyday life, the use of coatings plays an important role. In response to global warming and climate change, green technologies have been identified as a key goal, leading to more efficient consumption of energy and water resources, reduction of waste, pollution and carbon footprint, and protection of the environment and human health [1–3]. Functional coatings are also integral components of “green” technologies. The simplest form of coating is paint, which not only serves aesthetic purposes, but also has additional functions: solar reflec-

tivity, antimicrobial properties and other characteristics. Likewise, other functional coatings, especially those used on exterior building facades such as walls, roofs and windows, can perform important functions: self-cleaning, sunlight filtration, light and heat regulation.

Functional coating formulations are based on various materials and range from organic polymers to hybrid composites and inorganic nanoparticles depending on the desired properties and functionality of these materials [4]. In particular, the rapid development of nanotechnology in recent years has led to a significant increase in innovation in coatings using nanostructured materials (0.1–100 nm).

For example, inorganic nanoparticles, quantum dots, fullerenes, carbon nanotubes. Compared to bulk materials, nanomaterials have a higher surface area to volume ratio, higher surface energy, and less imperfection, resulting in completely different properties and performance of the resulting materials. The introduction of nanotechnology can introduce new properties and functionality and improve the performance of coating materials compared to conventional fillers. As a result, the development of coating technology has contributed to the emergence of new developments in the field of functional coatings, such as anti-fouling, anti-reflective and fire retardant coatings [5–7]. Thus, the development of functional coatings and application technologies is driven by high demand and economic feasibility of their use.

1. POLYMER COATINGS

Polymer coatings on solid materials play an important role in many industries. Universal coatings are coatings that modify a wide range of material surfaces and are stable under certain conditions. Ideally, the coating is independent of the chemical composition and physical characteristics (e.g., topology and stiffness) of the substrates. To develop coatings, it is important to design the interactions between the polymer and the substrate. Existing irradiation technologies are capable of activating many types of surfaces, but the efficiency and density of active sites on some surfaces is relatively low. To obtain dense surface coatings, it is important to strengthen the interactions by compensatory methods, for example, polymerization. On the other hand, interactions of non-covalent nature, such as electrostatic interaction, hydrogen bonding, hydrophobic and van der Waals interactions, are used at almost all types of interfaces. Multiple non-covalent interactions can be considered the driving forces for the formation of polymer coatings on various types of surfaces. But in general, noncovalent interactions between interfaces are not strong enough to produce polymer coatings. Therefore, to increase the stability of the coating, additional intralayer interactions are used: physical and chemical cross-linking.

Crosslinking can be initiated in situ during coating application or in stages after the formation of each layer of the precast coating. In situ coating application is easy and quick. But spontaneous cross-linking can lead to aggregation of polymer modifiers and the process of forming surface morphology is less controlled. Therefore, when obtaining a layer-by-layer coating, additional cross-linking procedures are required, such as heating or irradiation.

Secondary functionalization of universal coatings is typically required to achieve specific surface characteristics. But in this case, a sufficient number of active groups must remain in the coating formula for further modification.

1.1. Classification of coatings

A wide range of coatings are now developed to meet a variety of needs, from food and pharmaceuticals to devices and consumer products, industrial and equipment, automotive and construction products. Accordingly, the functionality of coatings also varies widely: coatings are applied as an outer layer of film to protect, enhance, and/or impart additional functionality, surface properties of an object, or impart characteristics to bulk materials. Coating technologies help prevent or reduce corrosion, fouling and biofouling, chemical and structural degradation, and wear of external surfaces due to various factors, including environmental conditions such as weather, humidity, UV radiation, etc. Coating provides stability, durability, increases the service life of objects or surfaces, and also gives surfaces additional properties and functions: antimicrobial properties, superhydrophobicity and superhydrophilicity, self-cleaning. Functional coatings are used in food and medicine for taste and odor masking, protection and stabilization in the physiological environment, targeted release in the body, etc.

Coatings are classified according to the following basic principles: by purpose, by physical or chemical characteristics, by the nature of the elements included in the composition, by the nature of the phases in the surface layer.

The protective function is performed by reflective, heat-resistant, wear-resistant, corrosion-resistant, electrical insulating, heat-protective coatings.

Structural coatings and films are used for structural elements in products in the production of products in various fields: instrument making, radio electronics, integrated circuits, turbojet engines.

To simplify technological processes, technological coatings are used. For example, applying solders during soldering; production of semi-finished products in the process of high-temperature deformation.

Decorative coatings are important in the production of household products, jewelry, prosthetics in medicine, and improving the aesthetics of industrial installations and devices.

Restorative coatings are used to reduce costs: when restoring worn surfaces of products, such as propeller shafts; crankshaft journals of internal combustion engines; blades in turbine engines; various cutting and pressing tools.

Reflectivity is reduced by surface geometry in optical coatings.

1.2. Substrate surface preparation methods

The characteristics of coatings are significantly influenced by the initial state of the substrate surface. A typical coating on a well-prepared surface performs a better protective function than a high-quality coating applied to a substrate with a poorly prepared surface [8]. The du-

rability of the coating and adhesive strength completely depend on the preparation of the surface of the product material. That is, surface preparation is an important technological operation in the production and application of coatings. For this, it is important to carry out high-quality preparatory stages: removing contaminants from the surface, including adsorbed substances, and activating the surface.

In the technological process, preparatory operations can be carried out jointly or separately. More often they resort to separate preparation in two or three stages. The surface is activated at the last stage. Surface preparation methods include: washing with water; degreasing; etching;

mechanical processing; thermal and chemical-thermal treatment; electrophysical processing; processing with light fluxes; drying [9–10]. Sandblasting is the most effective way to prepare the surface of a metal substrate before coating. However, in situations where sandblasting is not possible due to safety or environmental concerns, the use of a rust remover is recommended [11].

1.3. Coating Methods

Depending on the purpose of the coating, various methods for their preparation are used [12–14]. Coating methods are described in detail in the table 1.

Table 1
Coating formation methods

Method formation	Advantages of the method	Disadvantages of the method
Vapor condensation spraying (PVD)	– variability of work with various solid elements and materials; – application of coatings of any thickness (5–260 microns); – variations of the method are possible.	– processing exclusively the exposed part of the substrate; – low spray quality; – expensive equipment.
Chemical vapor deposition (CVD)	– surface treatment with chemically active elements and compounds that are chemically active in the vapor state; – good spray quality; – thickness 5–260 microns.	– the heating source is important; – higher temperatures than in the PVD method; – difficulty in regulating substrate heating; – probability of unclaimed direct deposition.
Diffusion deposition from solid phase	– good homogeneity; – possibility of processing small sizes; – high economic efficiency; – increased coating hardness; – thickness 5–80 microns.	– limited substrate sizes; – suitable only for heat-stable materials; – excessively thin coatings; – increased brittleness of coatings.
Sputtering	– the ability to vary spraying conditions and the quality of the applied material during the process; – the possibility of obtaining thick, uniform coatings; – thickness 75–400 microns.	– quality depends on the operator's skills; – resistance of the substrate to heat and impact; – porous coatings with a rough surface and possible inclusions.
Cladding	– possibility of applying thick coatings; – processing of large areas; – thickness 5–10% of the substrate thickness.	– warping of the substrate is possible; – for hard substrates.
Electrodeposition (including chemical and electrophoresis)	– cost-effective in case of electrolyte solutions; – the possibility of applying precious metals and refractory coatings from molten salts; – the possibility of industrial production of cermets; – thickness 0.25 – 250 microns.	– special equipment for good dispersive power; – strict control of moisture and oxidation exclusion; – harmful vapors above the melt; – porous coatings and in a stressed state; – special areas of high temperatures – applicable only for some elements and types of substrates.
Hot dipping	– possibility of applying thick coatings; – coating application speed – thickness 25–130 microns.	– limited to application of Al for high temperature coatings; – porosity and discontinuity

In addition to the considered methods for producing nanocoatings, layer-by-layer assembly and self-assembly of coatings are currently used [15–17]. The decisive factors in the formation of nanocoatings are: synthesis method, substrate material, structure of nanoparticles, grain size, thickness, microstructure.

2. ANTI-CORROSION COATINGS

Currently, both organic and inorganic coatings are widely used to protect metals from corrosion, and significant progress has been made in coating technologies. For example, the development of new “corrosion-resistant” alloys makes it possible to operate critical process equipment in highly corrosive environments under an increasingly wide range of conditions. However, despite significant advances in coating technologies, there are still some challenges in long-term protection of metals from aggressive environments. The diversity and complexity of the coating-substrate system, as well as some factors that determine the performance and durability of the coating, limit the number of highly effective and reliable anti-corrosion coating systems. The performance

characteristics and service life of coatings are determined by the main components of the formulation, substrate material, preparation of the substrate surface, curing mechanism, film thickness, adhesion processes in the coating-substrate system, and environmental parameters [18–22]. To effectively protect an anti-corrosion coating, internal strength, adhesion to the substrate, and sufficient flexibility are required.

2.1. Corrosion Prevention Methods

Methods for preventing corrosion are quite varied and are discussed in detail in the Figure 1.

2.2. Anti-corrosion coatings market

The global market for protective coatings in 2018 was estimated at 26.5 billion euros, the market volume in 2023 is 9.4 million tons (Fig. 2) [23–24]. Demand is largely driven by spending in the infrastructure, power, automotive, transportation and oil and gas sectors.

The cost of paint and varnish materials for major repairs ranges from 5 to 21% of the total costs, surface preparation

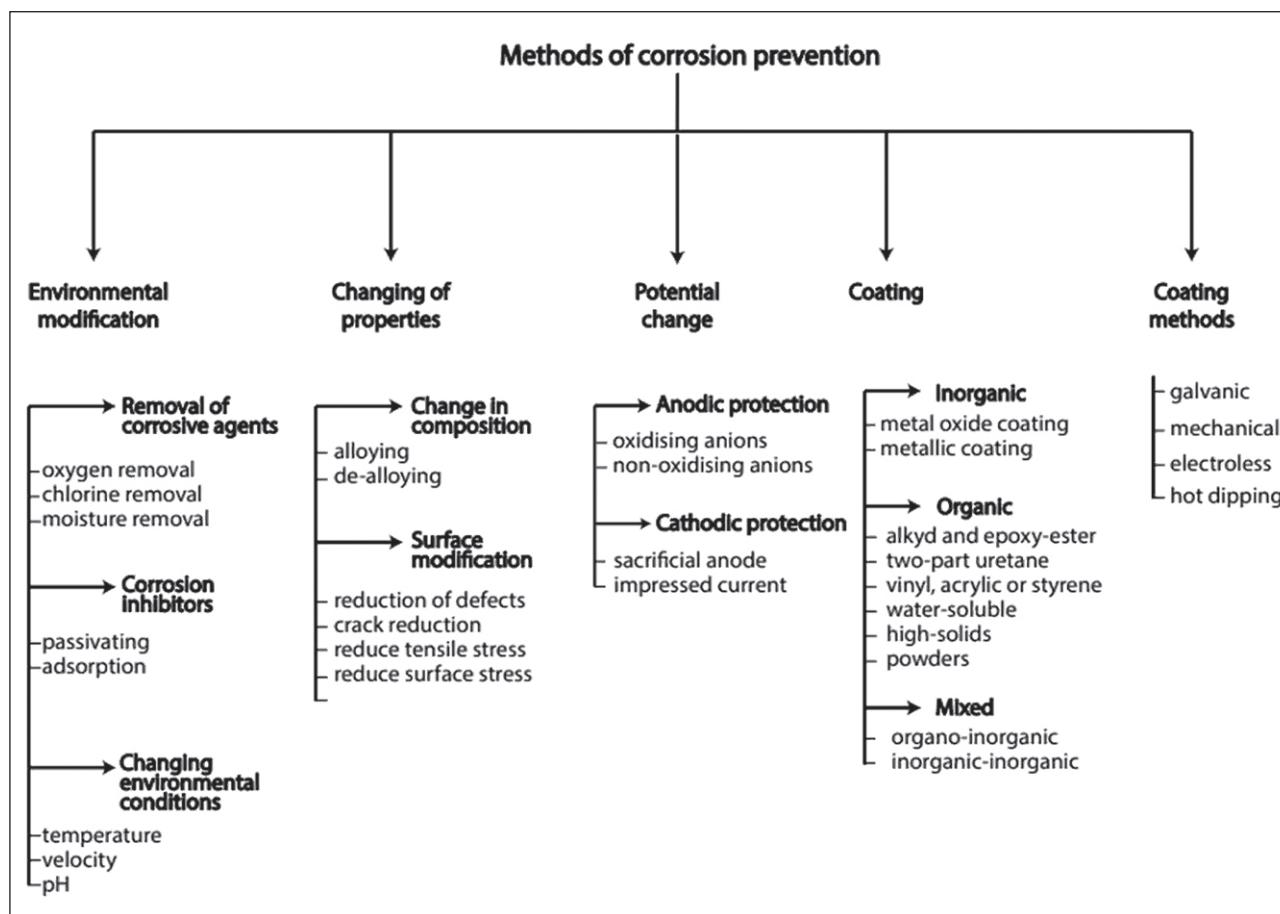


Fig. 1. Corrosion prevention methods

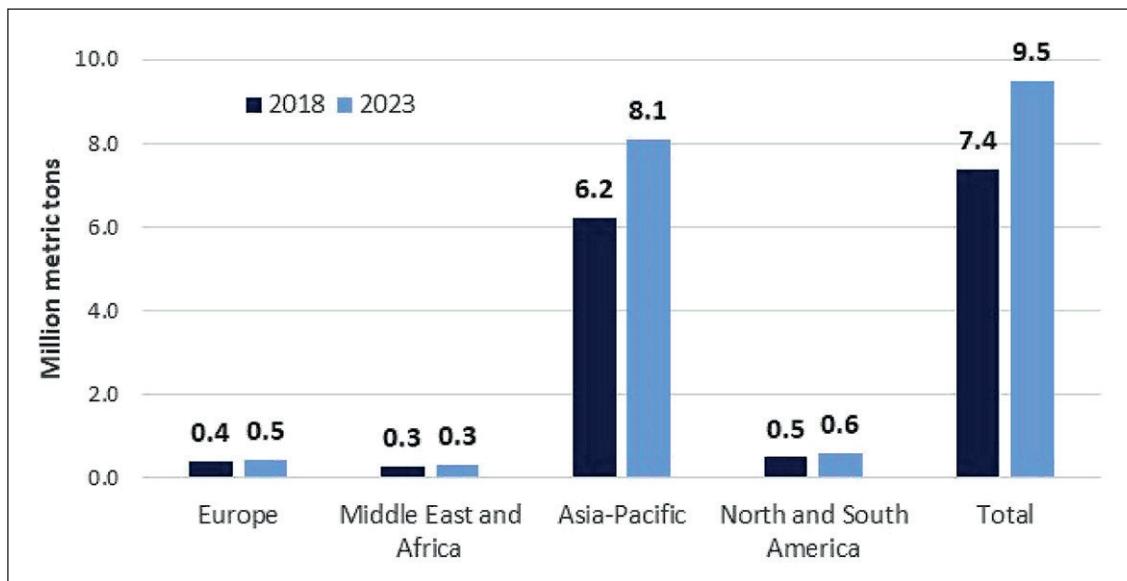


Fig. 2. Market volume of anti-corrosion materials

accounts for about 45% of the total amount. Although expensive, high-performance anti-corrosion coating systems such as epoxy, polyamide, urethane or zinc can provide savings of almost 40% over a 10-year service life [25].

For anti-corrosion protection of metal materials, polymer coatings are most widely used, especially in the transport and infrastructure sectors (pipelines, bridges, buildings) [26]. However, non-polymer solutions based on phosphates [27], chromates [28], and silicates [29] still remain relevant in industry for anti-corrosion protection; as well as metal coatings obtained by anodizing, galvanizing, plating, galvanic coatings, thermal spraying [30–32]. They exhibit excellent anti-corrosion properties, but they need to be replaced by more environmentally friendly technologies without the formation of sediment and the use of toxic substances. For example, the elimination of hexavalent chromium and heavy metals (lead, mercury) from coating formulations and coating processes remains an important topic for the anti-corrosion coatings sector and especially for the aerospace industry [33]. In this regard, industry and scientific organizations are developing inorganic coatings using sol-gel technologies and with pre-treatment with hybrid organic-inorganic compounds, for example, coatings such as nanoceramics using more environmentally friendly alternatives: titanium [34], zirconium [35], rare earth metals [36], silicate and molybdates [37]. However, such formulations are prepared in very dilute aqueous solutions. Large volumes of wastewater must be treated to the standards established by environmental quality standards before discharge [38].

Depending on the type of binder, organic coatings are produced based on epoxy resin, polyurethane, acrylic, alkyd or polyester formulation. When applied, polymer coatings are mainly used in the form of solutions in organic

solvents. Therefore, limiting emissions of volatile organic compounds promotes the development of new formulations with low organic solvent content [39]. Several potential avenues have been identified to address this challenge: high solids coatings [40], waterborne [41], and ultraviolet (UV) light-curing coatings [42]. In order to reduce the negative impact of toxic substances in the production of polyurethane, the search and implementation of alternative substitutes remains relevant [43–46]. The authors of the article are working to reduce the negative impact of the resulting polymers in the direction of developing non-isocyanate polyurethanes. Using carbon dioxide under catalysis with tetrabutylammonium bromide, the main components for the synthesis of non-isocyanate polyurethanes were obtained – cyclocarbonates of epoxidized soybean oil and ED-20 and ED-16 resins [43]. The chosen synthesis method makes it possible to successfully obtain valuable chemical products of organic synthesis, but also to attract carbon dioxide and, thus, help reduce the carbon footprint of the resulting polymers. In addition, the implementation of the REACH (Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals) regulation promotes the development of greener and more sustainable solutions in the field of anti-corrosion coatings using bio-based raw materials: binder [47], solvent [48], additives [49].

2.3. Main directions of development of anti-corrosion coatings

The scope of application of anti-corrosion coatings includes:

- 1) anti-fouling paints, used in conjunction with anti-corrosion protective coatings as fuel-saving coatings for ships and mesh cages in aquaculture [50];

2) coatings immersed in water, used in river installations for fresh water (hydroelectric power plants); in port facilities to protect metal structures (locks, sluice gates, berths); in maritime areas;

3) buried in the soil, such as buried tanks, steel piles and pipes.

The best options for anti-corrosion coatings are produced for almost any purpose. Currently, among environmentally friendly anti-corrosion marine coating technologies, particularly important areas of development are:

1) solvent-free, high solids and low VOC coatings,

2) UV-curable coatings [51],

3) waterborne coatings,

4) based on polymer resins from plant raw materials [52] and natural compounds [53–54];

5) based on non-toxic compounds, such as non-isocyanates [55], polyurethane ureas [56], graphene [57], magnesium salts [58–60];

6) biodegradable coatings [61].

A range of low VOC anti-corrosion coatings are widely available on the market, particularly for shipbuilding and offshore applications. Epoxy resin coatings with solids contents in the range of 70–100% are more often used for primers and intermediate coats in shipbuilding [62], wind energy structures [63], and oil and gas pipelines [64]. High solids polyurethane coatings have excellent UV resistance and are preferred as weathering finishes. Subsea finishes are used to prevent biofouling, especially on ship hulls, and can minimize drag and fuel consumption [62]. Biofouling is associated with microbial-dependent corrosion [65], which is a serious problem in pipelines and submersible tanks [66]. Attachment of marine organisms also affects the performance of anti-corrosion coatings [67–69].

Solvent-free powder coating is showing rapid growth in the protective coatings market. The resulting coating is usually harder and more durable than liquid paints. Epoxy powder coatings provide excellent barrier protection, wear resistance and are characterized by high adhesion to metal surfaces, and mainly provide protection for immersed pipelines [70]. The author of the review also carried out work to reduce the hazard class of epoxy binders [71–73]. However, such high-solids, solvent-free technologies have a higher cost than traditional solvent-based technologies. Therefore, the main objective is to increase the durability of the coating system during operation, which will increase the durability of structures and reduce operating and maintenance costs.

Water-soluble paints are used to protect low-aggressive environments [74–75]. For highly aggressive environments, innovative thin-film [76], acrylic [77], zinc-containing [78] and silane [79] primers are commercially available; finishing epoxy, urethane, acrylic coatings [80]. Areas of their application: industrial (containers), transport [81], construction [82] and heavy-duty coat-

ings (bridges, offshore and marine) [83], in places where long-term protection with a reduced impact on the environment is required.

2.4. Protective mechanism of anti-corrosion coatings

In accordance with the mechanisms of the protective action of metal products against corrosion, coatings are classified as shown in Figure 3 (Table 2).

Typically, the protective coating is not limited to one layer: a primer is applied to the metal, followed by intermediate layers, the final coating is exposed to the external environment [84].

Adhesion of the coating to the substrate is important for anti-corrosion coatings. Adhesion is an interfacial phenomenon that occurs at the interface under the influence of physical and chemical forces. Low adhesion contributes to the destruction of the coating and exposes the metal to an aggressive environment. When developing an organic coating formulation for a metal surface, adhesion processes are considered using the theory of wetting [85] and acid-base interactions [86].

Mechanical adhesion is considered in studies of large surface areas interacting with a large number of contact points. The sealant penetrates into existing surface pits and provides mechanical adhesion to the substrate. Mechanical adhesion is observed and taken into account when working with primed and porous metal surfaces.

Chemical adhesion. Interactions at the interface are provided by three types of chemical bonds: covalent or ionic bonds with energies from 40 to 400 kJ/mol; dispersion forces, or dipole interactions or van der Waals forces with energy from 4 to 8 kJ/mol; hydrogen bonds with binding energies from 8 to 35 kJ/mol.

It is generally accepted that the adhesion of polymer coatings to metal surfaces is explained by the formation of hydrogen bonds (Fig. 4).

The top layer of metal surfaces is usually a thin oxide layer [87]. The adhesion of the polymer coating and the metal occurs due to the formation of hydrogen bonds. Therefore, binders with polar groups exhibit excellent adhesive properties. The adhesion of epoxy resins to steel directly depends on the number of OH groups, but this type of adhesion is not the main one and is common for binders such as zinc silicates and epoxy resins [88]. The proposed adhesion mechanism is not able to fully explain the different bond strengths between resins and different metals, and the abnormal adhesion of epoxy resins in comparison with other polymers with an equal number of hydroxyl groups. In the course of research, it was discovered that epoxy compounds dissociate through the bond between phenoxy oxygen and aliphatic carbon (Fig. 5) [89].

Previously, according to the proposed mechanism, it was believed that adhesive interactions are carried out

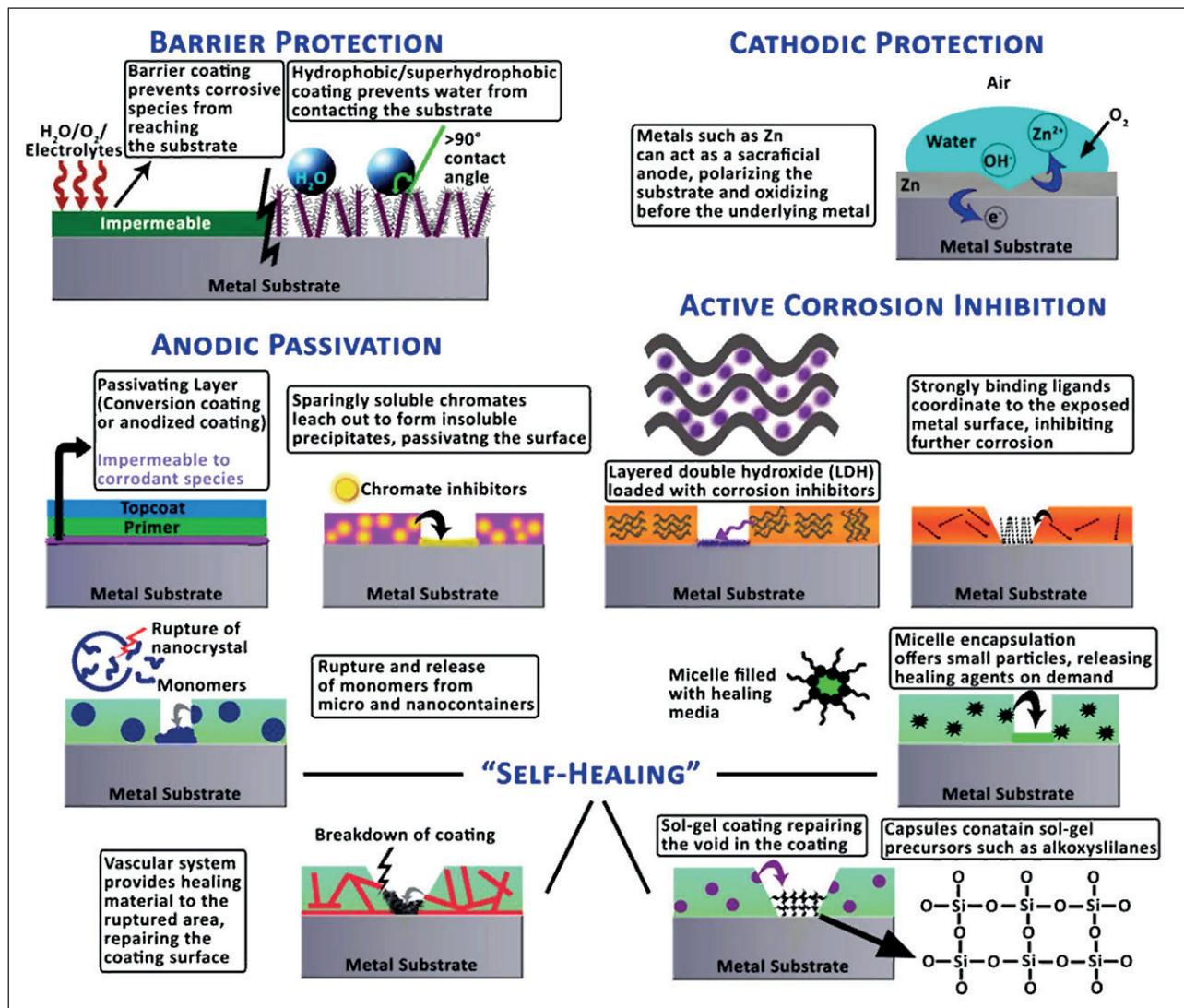


Fig. 3. Corrosion protection methods

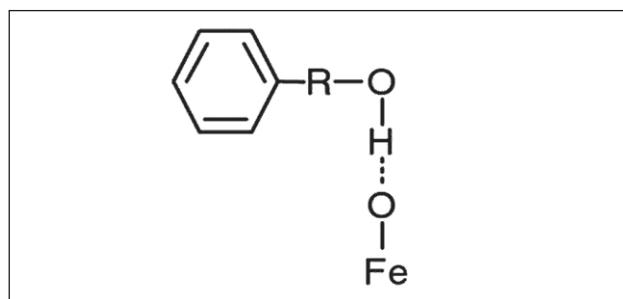


Fig. 4. Formation of hydrogen bonds between the iron oxide layer on steel and epoxy resin

through the oxygen atoms of the phenoxy and OH groups, while the epoxy resin molecule is oriented on the water surface in a certain way: the hydrophobic part of the epoxy resin molecule is directed in the direction opposite to the interface [90].

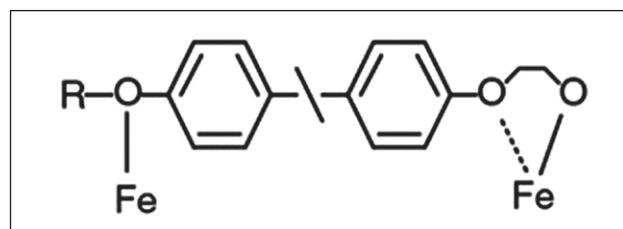


Fig. 5. Adhesion between epoxy and steel

However, regardless of the mechanism of adhesion of the polymer coating to the metal, stronger adhesion can be achieved by pre-treatment using chromatization or phosphating methods. The conversion layer on the metal surface passivates the surface and acts as a barrier to aggressive substances [91]. Contaminants on metal surfaces (dust, grease, oxides, salts and remnants of old coatings) negatively affect the adhesion of coatings. This reduces

Table 2
Comparative characteristics of protective coatings

Coverage type	Areas of use	Advantages of coatings	Disadvantages of coatings
Barrier	Dive, marine, industry	<ul style="list-style-type: none"> – reduced permeability to liquids, ions, gases, – strength and abrasion resistance, – UV resistance, – used together with cathodic current protection or sacrificial anodes, – applied as a primer, intermediate or topcoat 	<ul style="list-style-type: none"> – the possibility of incomplete removal of the solvent, – aluminum pigment reacts in acidic environments to release hydrogen, – in environments with high humidity, the likelihood of galvanic corrosion of coatings with aluminum-containing pigments applied to a zinc-containing primer, – in splash areas and atmospheric environments, defective coatings are not reliable enough, – the likelihood of rapid migration of aggressive particles to the substrate in case of incorrect orientation of lamellar pigments
Sacrificial organic	Splash zone, marine, industry	High anti-corrosion protective effect due to cathodic protection of the metal substrate	<ul style="list-style-type: none"> – high costs, – low adhesion and cohesion due to high metal content, – high zinc content coatings are not recommended for dipping or application in conjunction with impression current cathodic protection
Sacrificial inorganic	Splash zone, marine, industry	Zinc silicates are resistant to heat and immersion in water with chemical solutions	<ul style="list-style-type: none"> – zinc silicates require special conditions for curing and are characterized by low compatibility with other types of coatings, – for proper protection the need for electrical contact between metal particles
Inhibitory	industry	<ul style="list-style-type: none"> – the formation of a water-insoluble passivation layer that persists or remains insoluble in most environments, – lower costs compared to zinc pigmented coatings 	<ul style="list-style-type: none"> – not applicable for submersible structures, – coatings must be semi-permeable to water to effectively inhibit the substrate, – risk of increased corrosion rate when adding insufficient anodic inhibitor

the mechanical and chemical adhesion of the coating to the base, and also increases the risk of destruction of the coating. Most water-soluble contaminants must be removed by treating with a detergent solution [92]. Next, abrasive blasting is used to prepare the surface and more thoroughly remove rust, mill scale and remnants of the previous coating before applying protective painting. In this case, the surface area of the base increases in order to improve adhesion [93]. The need to remove water-soluble contaminants is obvious, since they can dissolve when moisture penetrates into the coating and form swelling, delamination and accelerate surface corrosion processes [94–97].

Improving adhesion between a polymer coating and a metal surface can be achieved by using adhesion promoters – binding agents that form covalent bonds, providing stronger interfacial interaction between the substrate and the coating. Their role in enhancing the adhesion of

coatings to metal surfaces has been thoroughly studied [97]. Adhesion promoters are basically short-chain organic molecules with different end groups: on the one hand, an organic functional group compatible with the coating material, on the other, an inorganic group compatible with the substrate. A kind of chemical bridge is formed between the base and the coating. Modified silanes are the most common commercial adhesion promoter between polymeric and inorganic materials [98]. They are introduced into the coating composition or applied directly to the substrate. Adhesion promoters are thought to migrate to the interface region and attach to the substrate or pigments before extensive curing occurs. Adhesion promoting molecules are known to be oriented perpendicular to the surface to which they are attached. Thus, the rough surface prevents the formation of an ordered adjacent layer. However, continuous thin layers are still capable of forming strong and durable adhesive joints [99].

REFERENCES

1. Bui V.P., Liu H.Z., Low Y.Y., Tang. Evaluation of building glass performance metrics for the tropical climate. *Energy Build.* 2017; 157:195 – 203.
2. Sobolev K., Ferrada Gutiérrez M. How Nanotechnology Can Change the Concrete World. *Progress in Nanotechnology.* 2009; 113 – 116.
3. Shah K.W., Ong P.J., Chua M.H., Toh S.H.G., Lee J.J.C. Application of phase change materials in building components and the use of nanotechnology for its improvement. *Energy Build.* 2022; 262: 112018.
4. Gao N., Zhang Z., Deng J., Guo X., Cheng B., Hou H. Acoustic metamaterials for noise reduction: a review. *Adv. Mater. Technol.* 2022; 7 (6): 2100698.
5. Huang H., Huang M., Zhang W., Pospisil S., Wu T. Experimental investigation on rehabilitation of corroded RC columns with BSP and HPFL under combined loadings. *J. Struct. Eng.* 2020; 146 (8): 04020157.
6. Lu, Tingting, et al. Singlet oxygen-promoted one-pot synthesis of highly ordered mesoporous silica materials via the radical route. *Green Chemistry.* 2022;24(12): 4778-4782.
7. Wu Y., Zhao Y., Han X., Jiang G., Shi J., Liu P. Ultra-fast growth of cuprate superconducting films: dual-phase liquid assisted epitaxy and strong flux pinning. *Mater. Today Phys.* 2021; 18: 100400.
8. Frakes J. The 411 on SurfacePrep: An important component of the coatings process. CoatingsPro Magazine – SurfacePrep Supplement, no. March. 2014; 4 – 9.
9. Nazari M.H., Bergner D., Shi X., Fay L. Manual of Best Practices for the Prevention of Corrosion on Vehicles and Equipment used by Transportation Agencies for Snow and Ice Control Minnesota Department of Transportation. Research Services & Library, St. Paul, Minnesota. 2018; URL: http://clearroads.org/wp-content/uploads/dlm_uploads/Revised_Task-2_Corrosion-Manual.pdf
10. Sastri V.S., Ghali E., Elboujdaini M. Corrosion Prevention and Protection: Practical Solutions. Wiley, Chichester, England; Hoboken, NJ. 2007; 30.
11. Sharman S. Evaluation & Performance of Chemical Surface Treatments for Maintenance. 2009; 1: 125 – 142.
12. Aliofkhazraei M. Nanocoatings: Size Effect in Nanostructured Films. Springer Science & Business Media: Amsterdam, The Netherlands. 2011; 251.
13. Aliofkhazraei M. Synthesis, Processing and Application of Nanostructured Coatings Nanocoatings. Springer: Amsterdam, The Netherlands. 2011; 28.
14. Gu Y., Xia K., Wu D., Mou J., Zheng S. Technical Characteristics and Wear-Resistant Mechanism of Nano Coatings: A Review. *Coatings.* 2020; 10: 233.
15. Deyab M.A. Effect of carbon nano-tubes on the corrosion resistance of alkydcoating immersed in sodium chloride solution. *Progress in Organic Coatings.* 2015; 85: 146 – 150.
16. Wang C., Wang Y., Wang L., Hao G., Sun X., Shan F., Zou Z. Nanocomposite Lanthanum Zirconate Thermal Barrier Coating Deposited by Suspension Plasma Spray Process. *J. Therm. Spray Technol.* 2014; 23: 1030 – 1036.
17. Sharma A., Singh A.K. Electroless Ni-P-PTFE-Al₂O₃ dispersion nanocomposite coating for corrosion and wear resistance. *J. Mater. Eng. Perform.* 2014; 23: 142 – 151.
18. Almeida E. Surface Treatments and Coatings for Metals. A General Overview. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2001; 40: 3. DOI:10.1021/ie0002091
19. Dabral M., Francis L.F., Scriven L.E. Drying Process Paths of Ternary Polymer Solution Coating. *AIChE J.* 2002; 48: P. 25.
20. Santagata D.M., Sere P.R., Elsner C.I., Di Sarli A.R. Evaluation of the Surface Treatment Effect on the Corrosion Performance of Paint Coated Carbon Steel. *Prog. Org. Coat.* 1998; 33: P. 44.
21. Elsner C.I., Cavalcanti E., Ferraz O., Di Sarli A.R. Evaluation of the Surface Treatment Effect on the Anticorrosive Performance of Paint Systems on Steel. *Prog. Org. Coat.* 2003; 48: 50.
22. Narayanan T.N.S. Surface Pretreatment by Phosphate Conversion Coatings – A Review. *Rev. Adv. Mater. Sci.* 2005; 9: 130.
23. Gagro D. Protective Coatings. *European Coatings Journal.* 2020; 10 – 11.
24. Sud A. Anticorrosive Coating. *European Coatings Journal.* 2015. 8 – 9.
25. Roberge P.R. Corrosion Engineering: Principles and Practice. McGraw Hill Professional: New York, NY, USA. 2008. ISBN 978-0-07-164087-9.
26. Lyon S., Bingham R., Mills D. Advances in corrosion protection by organic coatings: What we know and what we would like to know. *Prog. Org. Coat.* 2017; 102: 2 – 7.
27. Tsn S.N. Surface Pretreatment by Phosphate Conversion Coatings – A Review. *Rev. Adv. Mater. Sci.* 2005; 9: 130 – 177.

28. Osborne J.H. Observations on chromate conversion coatings from a sol–gel perspective. *Prog. Org. Coat.* 2001; 41: 280 – 286.
29. Parashar G., Bajpayee M., Kaman P. Water-borne non-toxic high-performance inorganic silicate coatings. *Surf. Coat. Int. Part B Coat. Trans.* 2003; 86: 209 – 216.
30. Ping Z., He Y., Gu C., Zhang T.Y. Mechanically assisted electroplating of Ni–P coatings on carbon steel. *Surf. Coat. Technol.* 2008; 202: 6023 – 6028.
31. Verma A., Van Ooij W. High-temperature batch hot-dip galvanizing. Part 2. Comparison of coatings formed in the temperature range 520–555 °C. *Surf. Coat. Technol.* 1997; 89: 143 – 150.
32. Jakobson S., Crotty D., Griffin R., Phipps D., Rubin E. Zinc anodizing. *Met. Finish.* 1998; 96: 114 – 118.
33. Gharbi O., Thomas S., Smith C., Birbilis N. Chromate replacement: What does the future hold. *NPJ Mater. Degrad.* 2018; 2: 12.
34. Milošev I., Frankel G.S. Review – Conversion Coatings Based on Zirconium and/or Titanium. *J. Electrochem. Soc.* 2018; 165: 127 – 144.
35. Adhikari S., Unoci K., Zhai Y., Frankel G., Zimmerma J., Fristad W. Hexafluorozirconic acid-based surface pretreatments: Characterization and performance assessment. *Electrochimica Acta.* 2011; 56: 1912 – 1924.
36. Rudd A.L., Breslin C.B., Mansfeld F. The corrosion protection afforded by rare earth conversion coatings applied to magnesium. *Corros. Sci.* 2000; 42: 275 – 288.
37. Walker D.E., Wilcox G.D. Molybdate based conversion coatings for zinc and zinc alloy surfaces: A review. *Trans. IMF.* 2008; 86: 251 – 259.
38. Hodge J., Mirabile D. Pearson Most appropriate treatments to control the environmental impact of effluents in the iron and steel industry. URL: <http://op.europa.eu/es/publication-detail/-/publication/bc305c8d-1a4d-462c-8f4e-483da0aa4b74>
39. Cunningham M.F., Campbell J.D., Fu Z., Bohling J., Leroux J.G., Mabee W., Robert T. Future green chemistry and sustainability needs in polymeric coatings. *Green Chem.* 2019; 21: 4919 – 4926.
40. Salata R.R., Pellegrine B., Soucek M.D. Synthesis and properties of a high solids triethoxysilane-modified alkyd coatings. *Prog. Org. Coat.* 2019; 133: 340 – 349.
41. Bera S., Rout T., Udayabhanu G., Narayan R. Water-based & eco-friendly epoxy-silane hybrid coating for enhanced corrosion protection & adhesion on galvanized steel. *Prog. Org. Coat.* 2016; 101: 24 – 44.
42. Zareanshahraki F., Asemani H., Skuza J., Mannari V. Synthesis of non-isocyanate polyurethanes and their application in radiation-curable aerospace coatings. *Prog. Org. Coat.* 2020; 138: 105394.
43. Vikhareva I.N., Antipin V.E., Enikeeva D.V., Kruchinina P.A. Carbonization of epoxides. Collection of articles of the All-Russian scientific-practical conference “Modern materials and methods of solving ecological problems of post-industrial agglomeration”. Chelyabinsk: SUSU Publishing Center. 2023; 139.
44. Ramlan S.N.A., Basirun W.J., Phang S.W., Ang D.T.C. Electrically conductive palm oil-based coating with UV curing ability. *Prog. Org. Coat.* 2017; 112: 9 – 17.
45. Antipin V.E., Vikhareva I.N., Enikeeva D.V., Kruchinina P.A. Application of machine learning to predict the activity of amine catalysts in the reaction of CO₂ addition to epoxides. Collection of articles of the All-Russian Scientific and Practical Conference “Modern materials and methods of solving environmental problems of post-industrial agglomeration”. Chelyabinsk: SUSU Publishing Center. 2023; 144.
46. Figovskiy O.L., Bolshakov O.I., Vikhareva I.N. Nonisocyanate polyurethanes: ecological solutions: monograph. Chelyabinsk: SUSU Publishing Center. 2023; 46.
47. Derksen J.T., Cuperus F., Kolster P. Paints and coatings from renewable resources. *Ind. Crop. Prod.* 1995; 3: 225 – 236.
48. Sherwood J., De Bruyn M., Constantinou A., Moity L., McElroy C.R., Farmer T.J., Duncan T., Raverty W., Hunt A.J., Clark J.H. Dihydrolevoglucosenone (Cyrene) as a bio-based alternative for dipolar aprotic solvents. *Chem. Commun.* 2014; 50: 9650 – 9652.
49. Marzorati S., Verotta L., Trasatti S.P. Green Corrosion Inhibitors from Natural Sources and Biomass Wastes. *Molecules.* 2018; 24: 48.
50. Fitridge I., Dempster T., Guenther J., De Nys R. The impact and control of biofouling in marine aquaculture: A review. *Biofouling.* 2012; 28: 649 – 669.
51. Li T., Zhang Z.P., Rong M.Z., Zhang M.Q. Self-healable and thiolene UV-curable waterborne polyurethane for anticorrosion coating. *J. Appl. Polym. Sci.* 2019; 136: 47700.
52. Liang Y., Zhang D., Zhou M., Xia Y., Chen X., Oliver S., Shi S., Lei L. Bio-based omniphobic polyurethane coating providing anti-smudge and anti-corrosion protection. *Prog. Org. Coat.* 2020; 148: 105844.

53. VCI In Singapore. Preservemets. URL: <https://www.preservemets.com/environment-friendly-anti-corrosion-solution>
54. Rani B.E.A., Basu B.B.J. Green Inhibitors for Corrosion Protection of Metals and Alloys: An Overview. *Int. J. Corros.* 2012; 1 – 15.
55. Bizet B., Grau E., Cramail H., Asua J.M. Water-based non-isocyanate polyurethane-ureas (NIPUUs). *Polym. Chem.* 2020; 11: 3786 – 3799.
56. SYLOMASK Anti-Corrosion Pigment. Fuji Silyria Chemical. URL: <https://www.fujisilyria.com/products/sylomask/>
57. Cui G., Bi Z., Zhang R., Liu J., Yu X., Li Z. A comprehensive review on graphene-based anti-corrosive coatings. *Chem. Eng. J.* 2019; 373: 104 – 121.
58. El-Hamid D., Blustein G., Deyá M., Del Amo B., Romagnoli R. The anticorrosive performance of zinc-free non-toxic pigment for paints. *Mater. Chem. Phys.* 2011; 127: 353 – 357.
59. Langer E., Zubielewicz M., Kuczyńska H., Królikowska A., Komorowski L. Anticorrosive effectiveness of coatings with reduced content of Zn pigments in comparison with zinc-rich primers. *Corros. Eng. Sci. Technol.* 2019; 546: 627 – 635.
60. Pigmentan. Environmentally Friendly Anti Corrosive Protection. URL: <https://www.pigmentan.com/>
61. Alam M., Akram D., Sharmin E., Zafar F., Ahmad S. Vegetable oil based eco-friendly coating materials: A review article. *Arab. J. Chem.* 2014; 7: 469 – 479.
62. Almeida E., Diamantino T.C., De Sousa O. Marine paints: The particular case of antifouling paints. *Prog. Org. Coat.* 2007; 59: 2 – 20.
63. Momber A.W., Marquardt T. Protective coatings for offshore wind energy devices (OWEAs): A review. *J. Coat. Technol. Res.* 2017; 15: 13 – 40.
64. Olajire A.A. Recent advances on organic coating system technologies for corrosion protection of offshore metallic structures. *J. Mol. Liq.* 2018; 269: 572 – 606.
65. Li Y., Ning C. Latest research progress of marine microbiological corrosion and bio-fouling, and new approaches of marine anti-corrosion and anti-fouling. *Bioact. Mater.* 2019; 4: 189 – 195.
66. Bhandari J., Khan F., Abbassi R., Garaniya V., Ojeda R. Modelling of pitting corrosion in marine and offshore steel structures. A technical review. *J. Loss Prev. Process. Ind.* 2015; 37: 39 – 62.
67. Buskens P., Wouters M., Rentrop C., Vroon Z. A brief review of environmentally benign antifouling and foul-release coatings for marine applications. *J. Coat. Technol. Res.* 2012; 10: 29 – 36.
68. Callow J.A., Callow M.E. Trends in the development of environmentally friendly fouling-resistant marine coatings. *Nat. Commun.* 2011; 2: 244.
69. Ciriminna R., Bright F.V., Pagliaro M. Ecofriendly Antifouling Marine Coatings. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2015; 3: 559 – 565.
70. Knudsen O.Ø., Forsgren A. Corrosion Control Through Organic Coatings. CRC Press: Boca Raton, FL, USA. 2017.
71. Shaydurova G.I., Gatina E.R., Vasiliev I.L., Antipin V.E., Shevyakov Ya.S. Reduction of the hazard class of low-viscosity epoxy binders. *Bulletin of Science and Practice.* 2018; 4: 234-240.
72. Fedoseev M.S., Derzhavinskaya L.F., Borisova I.A., Oshchepkova T.E., Antipin V.E., Tsvetkov R.V. Heat-resistant polymers and composites based on epoxyisocyanate binders. *Adhesives. Sealants. Technologies.* 2018; 7: 7-14.
73. Fedoseev M.S., Shatrov V.B., Shaidurova G.I., Derzhavinskaya L.F., Antipin V.E. Synthesis and properties of epoxyanhydride binders and polymers obtained under the action of curing catalysts of different chemical nature. *Perspective materials.* 2017; 1: 39-48.
74. Anticorrosion Coating Industry Transitioning to Sustainable Development. URL: <https://www.pcimag.com/articles/103192-anticorrosion-coating-industry-transitioning-to-sustainable-development>
75. Almeida E., Santos D., Fragata F., Rincon O., Morcillo M. Alternative Environmentally Friendly Coatings for Mild Steel and Electrogalvanized Steel to Be Exposed to Atmospheres. *Mater. Corros.* 2001; 52: 904 – 919.
76. NanoPrime Water Based Primer, No VOCs. Nanorustrx. URL: <https://www.nanorustx.com/>
77. Hemucryl. Hempel. URL: <https://www.hempel.com/products/brand/hemucryl/explore>
78. Eco-Friendly Corrosion Protection Systems. Evonik Industries. URL: <https://corporate.evonik.com/en/eco-friendly-corrosion-protection-systems-109077.html>
79. No Chance for Corrosion. Dynasylan the Brand for Functional Silanes. URL: <https://www.dynasylan.com/product/dynasylan/en/pages/article.aspx?articleId=26025>
80. Eco-Friendly Coatings for Transportation by Eco Smart. CoatingsTM. EcoOnyxTM. SmartArmRTM. AmortizeTM Rubberized. URL: https://ecosmartcoatings.com/transportation_coatings.html

81. Making the Switch to Eco-Friendly Coatings. URL: <https://www.solvay.com/en/article/eco-friendly-water-borne-solutions>
82. Steel Bridges. URL: <http://legacy.jotun.com/us/en/b2b/paintsandcoatings/bridges/Steel-Bridges.aspx?q=Solutions>
83. Anti-Corrosive Pigments for Water-Based Coatings. URL: <https://www.heubachcolor.com/news/anti-corrosive-pigments-for-water-based-coatings/>
84. Jones D.A. Principles and Prevention of Corrosion, 2nd ed. Macmillan: Upper Saddle River, NJ, USA. 1996.
85. Sell P.J., Neumann A.W. Surface Tension of Solids. *Angew. Chem.* 1966; 78: 321.
86. Bolger J.C. Adhesion Aspects of Polymer Coatings. Plenum Press, New York. 1983.
87. Fahlman M., Jasty S., Epstein A.J. Corrosion Protection of Iron/Steel by Emeraldine Base Polyaniline: An X-Ray Photoelectron Spectroscopy Study. *Synth. Met.* 1997; 85: 1323.
88. Glazer J. Monolayer Studies of Some Ethoxylin Resin Adhesives and Related Compounds. *J. Polym. Sci.* 1954; 13: 355.
89. Nakazawa M., Somorjai G.A. Adsorption of Substituted Benzenes on Polycrystalline Gold and on Zinc and Iron Oxide Overlays. *Appl. Surf. Sci.* 1993; 68: 517.
90. Nakazawa M., Somorjai G. A Study of the Adsorption of Selected Organic Molecules to Model the Adhesion of Epoxy Resins: Thermal Desorption of Glycidyl and Phenoxy Compounds from Gold, Iron Oxide and Zinc Oxide. *Appl. Surf. Sci.* 1993; 68: 539.
91. Nakazawa M., Somorjai G. Coadsorption of Water and Selected Aromatic Molecules to Model the Adhesion of Epoxy Resins on Hydrated Surfaces of Zinc and Iron Oxide. *Appl. Surf. Sci.* 1994; 84: 309.
92. Nakazawa M. Mechanism of Adhesion of Epoxy Resin to Steel Surface. Nippon Steel Technical Report 63. 1994; 16.
93. Hare C. Good Painting Practice Steel Structures Painting Manual. Steel Structures Painting Council. Pittsburgh. 1995.
94. Momber A.W., Koller S., Dittmers H.J. Effects of Surface Preparation Methods on Adhesion of Organic Coatings to Steel Substrates. *J. Protect. Coat. Linings.* 2004; 44.
95. Momber A.W., Koller S. How Surface Preparation Methods Affect Delamination in Ballast Tanks. *J. Protect. Coat. Linings.* 2008; 25: 43.
96. Momber A.W., Greverath W.D. Surface Preparation Standards for Steel Substrates – A Critical Review. *J. Protect. Coat. Linings.* 2004; 48.
97. Sathyaranayna M.N., Yaseen M. Role of Promoters in Improving Adhesion of Organic Coatings to a Substrate. *Prog. Org. Coat.* 1995; 26: 275.
98. Schrieber H.P., Qin R.Y., Sengupta A. The Effectiveness of Silane Adhesion Promoters in the Performance of Polyurethane Adhesives. *J. Adhes.* 1998; 68: 31.
99. Petrie E.M. Handbook of Adhesives and Sealants. McGraw-Hill. 2000.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Irina N. Vkhareva – Cand. Sci. (Chem.), Deputy Director of the Research Center “Nanotechnologies”, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, vikharevain@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5681-2767>

Vyacheslav E. Antipin – Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director of the Research Center “Nanotechnologies”, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, antipinve@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4337-1760>

AUTHORS CONTRIBUTION

Irina N. Vkhareva – research concept; development of methodology; writing the preliminary text.

Vyacheslav E. Antipin – conclusions.

The authors declare no conflict of interest.

The article was submitted 11.01.2024; approved after reviewing 02.02.2024; accepted for publication 06.02.2024.

Обзорная статья

УДК 547.057

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-1-32-43>

CC BY 4.0

Современные стратегии формирования полимерных покрытий. Часть 1

Ирина Николаевна Вихарева* , Вячеслав Евгеньевич Антипин 

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: vikharevain@susu.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Покрытия на твердых материалах широко используются во многих отраслях промышленности. Технологии нанесения покрытий способствуют предотвращению или уменьшению коррозии, загрязнения и биообрастания, химической и структурной деградации, износа внешних поверхностей из-за воздействия элементов и природных условий. Спектр используемых материалов для функциональных покрытий достаточно широкий: от органических полимеров до гибридных композитов и неорганических наночастиц в зависимости от желаемых свойств и функциональности конечного продукта. Несмотря на отличные антикоррозионные характеристики неполимерных покрытий, их использование наносит экологический ущерб. Наиболее широкое применение получили органические покрытия. Такие составы наносят в жидкой форме, органические растворители в них являются одним из основных компонентов. Экологические требования способствовали разработке альтернативных технологий. Доступность сырья и стоимость экологически чистого покрытия являются основными направлениями разработок. **Основная часть.** В обзоре обоснована актуальность исследований по разработке многофункциональных покрытий на основе полимеров. Представлен рынок полимерных покрытий. Приведены методы защиты поверхности, типы формируемых покрытий, их основные компоненты, особенности формирования покрытий, влияние различных факторов на формирование полимерных покрытий, включая методы подготовки и предварительной обработки защищаемой поверхности. Подробно рассмотрены методы предотвращения коррозии, а также основные направления в разработке антикоррозийных покрытий, основанные на различных защитных механизмах. Приведены характеристики основных компонентов защитных покрытий. Подробно рассмотрен вопрос разрушения полимерных покрытий в зависимости от среды эксплуатации. Рассмотрены типы сред, их влияние и механизмы действия на защищаемые объекты. Перечислены факторы и механизмы разрушения полимерных покрытий, методы предотвращения деградации покрытий. Выделены новейшие технологии формирования защитных полимерных покрытий. **Заключение.** В настоящее время покрытия обеспечивают широкий спектр качественных показателей. Важной характеристикой современных покрытий является минимальное негативное воздействие на окружающую среду, что требует комплексный подход к проектированию и производству покрытий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: адгезия, защита, коррозия, покрытие, полимер, растворитель, термореактивная смола.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Вихарева И.Н., Антипин В.Е. Современные стратегии формирования полимерных покрытий. Часть 1 // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т. 16, № 1. С. 32–43. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-1-32-43>. – EDN: RHAZRH.

ВВЕДЕНИЕ

Во многих сферах повседневной жизни использование покрытий играет важную роль. В связи с глобальным потеплением и изменением климата в качестве ключевой цели определены «зеленые» технологии, что привело к более эффективному потреблению энергии и водных ресурсов, сокращению отходов, загрязнения и углеродного следа, к защите окружающей среды и здоровья человека [1–3].

В качестве неотъемлемых компонентов «зеленых» технологий выступают и функциональные покрытия. Простейшей формой покрытия является краска, которая уже не только выполняет эстетические цели, но и обладает дополнительными функциями: отражательной способностью от солнца, антимикробными свойствами и другими характеристиками. Аналогично другие функциональные покрытия, особенно применяемые на наружных фасадах зданий, таких как стены, крыши и окна, могут выполнять важные

© Вихарева И.Н., Антипин В.Е., 2024

функции: самоочищение, фильтрацию солнечного света, световую и тепловую регуляцию.

Рецептуры функциональных покрытий основаны на различных материалах и варьируются от органических полимеров до гибридных композитов и ненеорганических наночастиц в зависимости от желаемых свойств и функциональности этих материалов [4]. В частности, быстрое развитие нанотехнологий в последние годы привело к значительному росту инноваций в области покрытий с использованием наноструктурированных материалов (0,1–100 нм). Например, неорганические наночастицы, квантовые точки, фуллерены, углеродные нанотрубки. По сравнению с объемными материалами наноматериалы имеют большее отношение площади поверхности к объему, большую поверхностную энергию и меньшее несовершенство, что приводит к совершенно другим свойствам и характеристикам получаемых материалов. Внедрение нанотехнологий может привнести новые свойства и функциональность и улучшить характеристики материалов покрытий по сравнению с обычными наполнителями. В итоге развитие технологии нанесения покрытий способствовало появлению новых разработок в области функциональных покрытий, таких как противообрастающие, антибликовые и огнезащитные покрытия [5–7]. Таким образом, разработка функциональных покрытий и технологий нанесения обусловлены высоким спросом и экономической целесообразностью их применения.

1. ПОЛИМЕРНЫЕ ПОКРЫТИЯ

Полимерные покрытия на твердых материалах играют важную роль во многих отраслях промышленности. Универсальные покрытия – это покрытия, которые модифицируют широкий спектр поверхностей материалов и стабильны в определенных условиях. В идеале покрытие не зависит от химического состава и физических характеристик (например, топологии и жесткости) подложек. Для разработки покрытий важно спроектировать взаимодействия между полимером и подложкой. Существующие технологии облучения способны активировать многие виды поверхностей, однако эффективность и плотность активных центров на некоторых поверхностях относительно низкие. Для получения плотных поверхностных покрытий важно усилить взаимодействия компенсаторными методами, например, полимеризацией. С другой стороны, взаимодействия нековалентной природы, такие как электростатическое взаимодействие, водородная связь, гидрофобное и ван-дер-ваальсовое взаимодействие, используют почти на всех типах интерфейсов. Множественные нековалентные взаимодействия можно считать дви-

жущими силами для формирования полимерных покрытий на различных типах поверхностей. Но в основном нековалентные взаимодействия между границами раздела недостаточно сильны для получения полимерных покрытий. Поэтому для повышения стабильности покрытия используют дополнительные внутрислойные взаимодействия: физическое и химическое сшивание.

Сшивание может быть инициировано на месте во время нанесения покрытия или поэтапно после формирования каждого слоя сборного покрытия. В случае *in situ* нанесение покрытия выполняется легко и быстро. Но спонтанное сшивание может привести к агрегации полимерных модификаторов, и процесс формирования морфологии поверхности менее контролируемый. Поэтому при послойном получении покрытия требуются дополнительные процедуры для сшивания, такие как нагрев или облучение.

Вторичная функционализация универсальных покрытий, как правило, требуется для достижения определенных характеристик поверхности. Но в таком случае в формуле покрытия должно оставаться достаточное количество активных групп для дальнейшей модификации.

1.1. Классификация покрытий

В настоящее время разработан широкий ассортимент покрытий для обеспечения различных потребностей: от продуктов питания и лекарств до устройств и потребительских товаров для промышленности и оборудования, автомобилей и строительных товаров. Соответственно, функциональность покрытий также широко варьируется: покрытия наносятся в виде внешнего слоя пленки для защиты, улучшения и/или придания дополнительных функций, свойств поверхности объекта или придания характеристик сыпучим материалам. Технологии нанесения покрытий способствуют предотвращению или уменьшению коррозии, загрязнения и биообрастания, химической и структурной деградации, износа внешних поверхностей из-за воздействия различных факторов, включая природные условия, такие как погода, влажность, УФ-излучение и т.д. Нанесение покрытия обеспечивает стабильность, долговечность, увеличивает срок службы объектов или поверхностей, а также придает поверхностям дополнительные свойства и функции: антимикробные свойства, супергидрофобность и супергидрофильность, самоочищение. Функциональные покрытия используют в пищевых продуктах и медицине для маскировки вкуса и запаха, защиты и стабилизации в физиологической среде, целенаправленного вы свобождения в организме и т.д.

Покрытия классифицируют по следующим основным принципам: по назначению, по физическим или химическим характеристикам, по природе входящих в состав элементов, по природе фаз в поверхностном слое.

Защитную функцию выполняют отражающие, жаростойкие, износостойкие, коррозионностойкие, электроизоляционные, теплозащитные покрытия.

Конструкционные покрытия и пленки используют для конструктивных элементов в изделиях при производстве изделий в различных сферах: приборостроение, радиоэлектроника, интегральные схемы, турбогенераторные двигатели.

Для упрощения технологических процессов используют технологические покрытия. Например, нанесение припоев при пайке; производство полуфабрикатов в процессе высокотемпературного деформирования.

Декоративные покрытия важны при производстве бытовых изделий, украшений, протезировании в медицине, повышении эстетичности промышленных установок и приборов.

Восстановительные покрытия используют для снижения затрат: при восстановлении изношенных поверхностей изделий, как-то: гребные вальные, шейки коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания, лопатки в турбинных двигателях, различные режущие и прессовые инструменты.

Отражательная способность снижается благодаря геометрии поверхности в оптических покрытиях.

1.2. Методы подготовки поверхности подложки

На характеристики покрытий оказывает значительное влияние исходное состояние поверхности подложки. Типичное покрытие на хорошо подготовленной поверхности лучше выполняет защитные функции, чем высококачественное покрытие, нанесенное на подложку с плохо подготовленной поверхностью [8]. Долговечность покрытия, адгезионная прочность полностью зависят от подготовки поверхности материала изделия. То есть подготовка поверхности – важная технологическая операция в производстве и нанесении покрытий. Для этого важно качественное проведение подготовительных этапов: удаление загрязнений с поверхности, в том числе адсорбированных веществ, и активирование поверхности.

В технологическом процессе подготовительные операции возможно провести совместно и раздельно. Чаще прибегают к раздельной подготовке в два или три этапа. Активируют поверхность на последней стадии. Методы подготовки поверхности включают мойку водой, обезжикивание, травление, механическую обработку, термическую и химико-термиче-

скую обработку, электрофизическую обработку, обработку световыми потоками, сушку [9–10]. Пескоструйная обработка является наиболее эффективным способом подготовки поверхности металлической подложки перед нанесением покрытия. Однако в ситуациях, когда пескоструйная обработка невозможна из-за проблем с безопасностью или окружающей средой, рекомендуется использовать средство для удаления ржавчины [11].

1.3 Методы нанесения покрытий

В зависимости от назначения покрытия используют различные методы их получения [12–14]. Методы нанесения покрытий подробно описаны в табл. 1.

Помимо рассмотренных методов получения нанопокрытий, в настоящее время применяют послойную сборку и самосборку покрытий [15–17]. Решающее значение при формировании нанопокрытий оказывают способ синтеза, материал подложки, структура наночастиц, размер зерна, толщина, микроструктура.

2. АНТИКОРРОЗИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ

В настоящее время для защиты металлов от коррозии широко применяются как органические, так и неорганические покрытия, и в технологиях покрытий достигнут значительный прогресс. Например, разработка новых «коррозионностойких» сплавов позволяет эксплуатировать ответственное технологическое оборудование в высококоррозионных средах во все более широком диапазоне условий. Тем не менее, несмотря на значительный прогресс в технологиях получения покрытий в долгосрочной защите металлов от агрессивных сред, существуют некоторые проблемы. Многообразие и комплексность системы покрытие–подложка, а также некоторые факторы, определяющие эксплуатационные качества и долговечность покрытия ограничивают число высокоэффективных и надежных систем антикоррозионных покрытий. Эксплуатационные характеристики и срок службы покрытий определяются основными компонентами рецептуры, материалом подложки, подготовкой поверхности подложки, механизмом отверждения, толщиной пленки, адгезионными процессами в системе покрытие–подложка, параметрами окружающей среды [18–22]. Для эффективной защиты антикоррозионного покрытия необходима внутренняя прочность, адгезия к подложке, достаточная гибкость.

2.1. Методы предотвращения коррозии

Методы предотвращения коррозии достаточно разнообразны и подробно рассмотрены на рис. 1.

Таблица 1
Методы формирования покрытий

Метод формирования	Достоинства метода	Недостатки метода
Напыление конденсацией из паровой фазы (PVD)	– вариативность работы с различными твердыми элементами и материалами; – нанесение покрытий любой толщины (5–260 мкм); – возможны вариации метода	– обработка исключительно открытой части подложки; – низкое распыляющее качество; – дорогое оборудование
Химическое осаждение из газовой фазы (CVD)	– обработка поверхности химически активными элементами и соединениями химически активных в парообразном состоянии; – хорошее распыляющее качество; – толщина 5–260 мкм	– важен источник нагрева; – более высокие температуры, чем в методе PVD; – сложность регулирования нагрева подложки; – вероятность невостребованного прямого осаждения
Диффузионное осаждение из твердой фазы	– хорошая гомогенность; – возможность обработки малых размеров; – высокая экономическая эффективность; – повышенная твердость покрытия; – толщина 5–80 мкм	– лимитированные размеры подложки; – пригодно только для термостабильных материалов; – излишне тонкие покрытия; – повышенное хрупчивание покрытий
Напыление	– возможность варьирования условий напыления и качества наносимого материала в ходе процесса; – возможность получения толстых однородных покрытий; – толщина 75–400 мкм.	– качество зависит от навыков оператора; – стойкость подложки к нагреву и ударному воздействию; – пористые покрытия с грубой поверхностью и возможными включениями
Плакирование	– возможность нанесения толстых покрытий; – обработка больших площадей; – толщина 5–10% от толщины подложки.	– не исключено коробление подложки; – для жестких подложек
Электроосаждение (в т.ч. химическое и электрофорез)	– экономически эффективно в случае растворов электролитов; – возможность нанесения драгоценных металлов и тугоплавких покрытий из расплавов солей; – возможность промышленного получения керметов; – толщина 0,25–250 мкм.	– спецоборудование для хорошей рассеивающей способности; – жесткий контроль исключения влаги и окисления; – вредные пары над расплавом; – пористые покрытия и в напряженном состоянии; – особые области высоких температур; – применимы лишь для некоторых элементов и типов подложек
Горячее окуривание	– возможность нанесения толстых покрытий; – скорость нанесения покрытий; – толщина 25–130 мкм.	– ограничен нанесением A1 для получения высокотемпературных покрытий; – пористость и несплошность

2.2. Рынок антикоррозионных покрытий

Мировой рынок защитных покрытий в 2018 году оценивался в 26,5 млрд евро, объем рынка в 2023 году 9,4 млн тонн (рис. 2) [23–24]. Спрос в значительной степени связан с расходами на инфраструктуру, электроэнергетику, а также на автомобильный, транспортный и нефтегазовый секторы.

Стоимость лакокрасочных материалов для капитального ремонта составляет от 5 до 21% от общих затрат, подготовка поверхности составляет около 45% от общей суммы. Несмотря на то, что затраты на высокоэффективные системы антикоррозионных покрытий, такие как эпоксидные, полиамидные, уретановые или цинковые, дорогостоящие, они

могут обеспечить экономию почти 40% при сроке службы более 10 лет [25].

Для антикоррозионной защиты металлических материалов наиболее широко используют полимерные покрытия, особенно в сфере транспорта и в инфраструктурном секторе (трубопроводы, мосты, здания) [26]. Однако по-прежнему для антикоррозионной защиты не теряют актуальности в промышленности неполимерные растворы на основе фосфатов [27], хроматов [28], силикатов [29]; а также металлические покрытия, полученные методом анодирования, цинкования, плакировкой, гальванические покрытия, термическое напыление [30–32]. Они проявляют отличные антикоррозийные свойства, но их необходимо заменить более экологичными технологиями

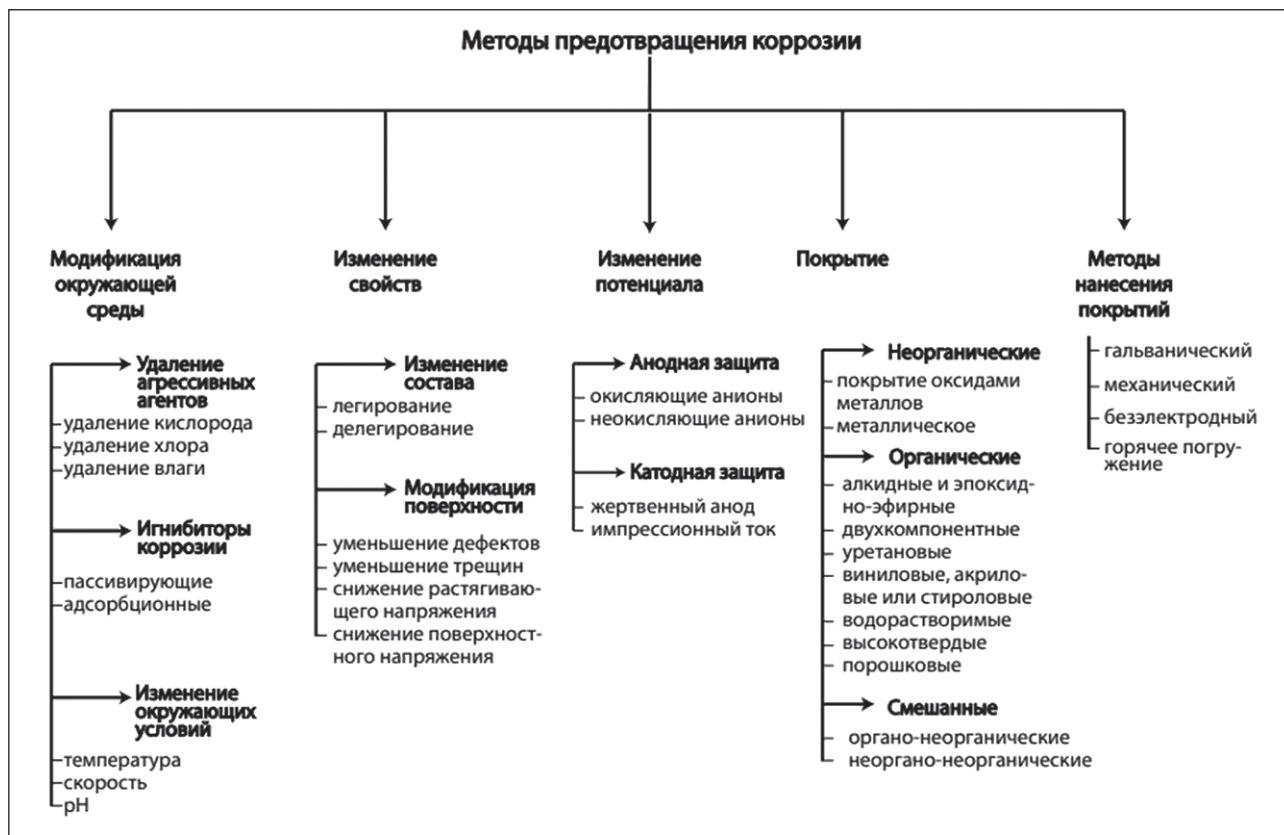


Рис. 1. Методы предотвращения коррозии

без образования осадка и использования токсичных веществ. Например, по-прежнему важной темой для сектора антикоррозионных покрытий и особенно для аэрокосмической промышленности является исключение шестивалентного хрома и тяжелых металлов (свинца, ртути) из рецептур покрытий и процессов нанесения покрытий [33]. В связи с этим промышленность и научные организации разрабатывают неорганические покрытия с использованием золь-гель технологий и с предварительной обработкой гибридными органо-неорганическими соединениями, например, покрытия типа нанокерамики с применением более экологичных альтернатив: титана [34], циркония [35], редкоземельных металлов [36], силиката и молибдатов [37]. Однако подобные рецептуры готовят в очень разбавленных водных растворах. Большие объемы сточных вод перед сбросом необходимо очищать до нормативов, установленных стандартами качества окружающей среды [38].

По типу связующего органические покрытия производят на основе эпоксидной смолы, полиуретановой, акриловой, алкидной или полиэфирной рецептуры. В основном полимерные покрытия при нанесении используют в виде растворов в органических растворителях. Поэтому ограничение выбросов летучих органических соединений способствует

разработке новых рецептур с низким содержанием органического растворителя [39]. Для решения этой задачи было определено несколько потенциальных направлений: покрытия с высоким твердым остатком [40], водоразбавляемые [41] и ультрафиолетовые (УФ) светоотверждаемые покрытия [42]. С целью снижения негативного воздействия токсичных веществ в производстве полиуретана актуальным остается поиск и внедрение альтернативных заменителей [43–46]. Авторы статьи проводят работы по снижению негативного воздействия получаемых полимеров в направлении разработки неизоцианатных полиуретанов. С привлечением углекислого газа в условиях катализа бромидом тетрабутиламмония были получены основные компоненты для синтеза неизоцианатных полиуретанов – циклокарбонаты эпоксидированного соевого масла и смол ЭД-20 и ЭД-16 [43]. Выбранный метод синтеза позволяет успешно получать ценные химические продукты органического синтеза, а также привлекать углекислый газ и, таким образом, способствовать снижению углеродного следа получаемых полимеров. Кроме того, внедрение регламента REACH (регистрация, оценка, авторизация и ограничение химических веществ) способствует разработке зеленых и более устойчивых решений в области антикоррозионных покрытий с использованием сырья на био-

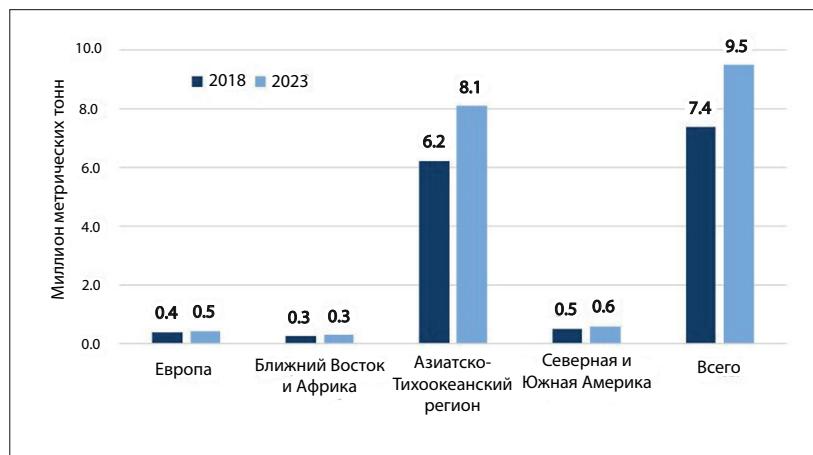


Рис. 2. Объем рынка антикоррозионных материалов

логической основе: связующее [47], растворитель [48], добавки [49].

2.3. Основные направления разработок антикоррозионных покрытий

Сфера применения антикоррозионных покрытий включает:

1) противообрастающие краски, используются совместно с антикоррозионными защитными покрытиями в качестве топливосберегающих покрытий для судов и сетчатых клеток в аквакультуре [50];

2) погружающие в воду покрытия, используют на речных установках для пресной воды (гидроэлектростанции); в портовых сооружениях для защиты металлических конструкций (шлюзы, шлюзовые ворота, причалы); в морских зонах;

3) погружающие в почву, например, заглубленные резервуары, стальные сваи и трубы.

Оптимальные варианты антикоррозионных покрытий производят практически для любого назначения. В настоящее время среди экологичных антикоррозионных технологий морских покрытий особенно важными направлениями разработок являются:

1) покрытия без растворителя с высоким содержанием твердых частиц и низким содержанием летучих органических соединений,

2) УФ отверждаемые покрытия [51],

3) водоразбавляемые покрытия,

4) на основе полимерных смол из растительного сырья [52] и природных соединений [53–54];

5) на основе нетоксичных соединений, таких как неизоцианаты [55], полиуретановые мочевины [56], графен [57] соли магния [58–60];

6) биоразлагаемые покрытия [61].

Ассортимент антикоррозионных покрытий с низким содержанием летучих органических соединений широко представлен на рынке, в частности, для судостроения и на шельфе. Покрытия на основе эпоксид-

ных смол с содержанием твердых веществ в интервале 70–100% чаще применяют для грунтовок и промежуточных слоев в судостроении [62], ветроэнергетических сооружениях [63], нефте- и газопроводах [64]. Полиуретановые покрытия с высоким сухим остатком отличаются превосходной устойчивостью к ультрафиолетовому излучению и предпочтительны в качестве финишных покрытий для атмосферных воздействий. Финишные покрытия для подводных зон применяются для предотвращения биообрастаия, особенно на корпусах судов, и способны свести к минимуму лобовое сопротивление и расход топлива [62]. Биообрастане связано с микробнозависимой коррозией [65], которая является серьезной проблемой для трубопроводов и погруженных резервуаров [66]. Прикрепление морских организмов также влияет на эксплуатационные характеристики антикоррозионных покрытий [67–69].

Стремительный рост на рынке защитных покрытий показывает порошковая покраска без растворителей. Получаемое покрытие обычно тверже и более прочное в сравнении с жидкими красками. Эпоксидные порошковые покрытия обеспечивают отличную барьерную защиту, износостойкость, характеризуются высокой адгезией к металлической поверхности и в основном обеспечивают защиту погруженных трубопроводов [70]. Также автором обзора проведены работы по снижению класса опасности эпоксидных связующих [71–73]. Однако подобные технологии с высоким содержанием твердых частиц и без растворителей имеют более высокую стоимость, чем традиционные технологии на основе растворителей. Поэтому основной задачей является повышение стойкости системы покрытий в процессе эксплуатации, что увеличит долговечность конструкций и позволит уменьшить затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание.

Водорастворимые краски применяют для защиты низкоагрессивных в средах [74–75]. Для сред высокой агрессивности в продаже представлены инно-

ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

вационные тонкопленочные [76], акриловые [77], цинкосодержащие [78] и силиановые [79] грунтовки; финишные эпоксидные, уретановые, акриловые покрытия [80]. Сфера их применения: промышленные (контейнеры), транспортные [81], строительные [82] и сверхпрочные покрытия (мосты, шельфовые и морские) [83] в местах, где требуется долговременная защита с пониженным влиянием на окружающую среду.

2.4. Защитный механизм антикоррозионных покрытий

В соответствии с механизмами защитного действия металлических изделий от коррозии покрытия классифицируют, как представлено на рис. 3 в табл. 2.

Обычно защитное покрытие не ограничивается одним слоем: грунтовку наносят на металл, затем следуют промежуточные слои, финишное покрытие подвергается воздействию внешней среды [84].

Адгезия покрытия к основанию имеет важное значение для антикоррозионных покрытий. Адгезия — межфазное явление, которое возникает на границе раздела под действием физических и химических сил. Низкая адгезия способствует разрушению покрытия и подвергает металл воздействию агрессивной среды. При разработке рецептуры органического покрытия для металлической поверхности адгезионные процессы рассматривают с использованием теории смачивания [85] и кислотно-щелочных взаимодействий [86].

Механическую адгезию рассматривают при исследованиях больших площадей поверхности, взаимодействующих с большим количеством контактирующих точек. Защитный состав проникает в существующие поверхностные ямки и обеспечивает механическое сцепление в основании. Механическая адгезия наблюдается и учитывается при работе с за-грунтованными и пористыми металлическими поверхностями.

Химическую адгезию. Взаимодействия на границе раздела обеспечивают три типа химической связи: ковалентные или ионные связи с энергией от 40 до 400 кДж/моль; дисперсионные силы, или ди-

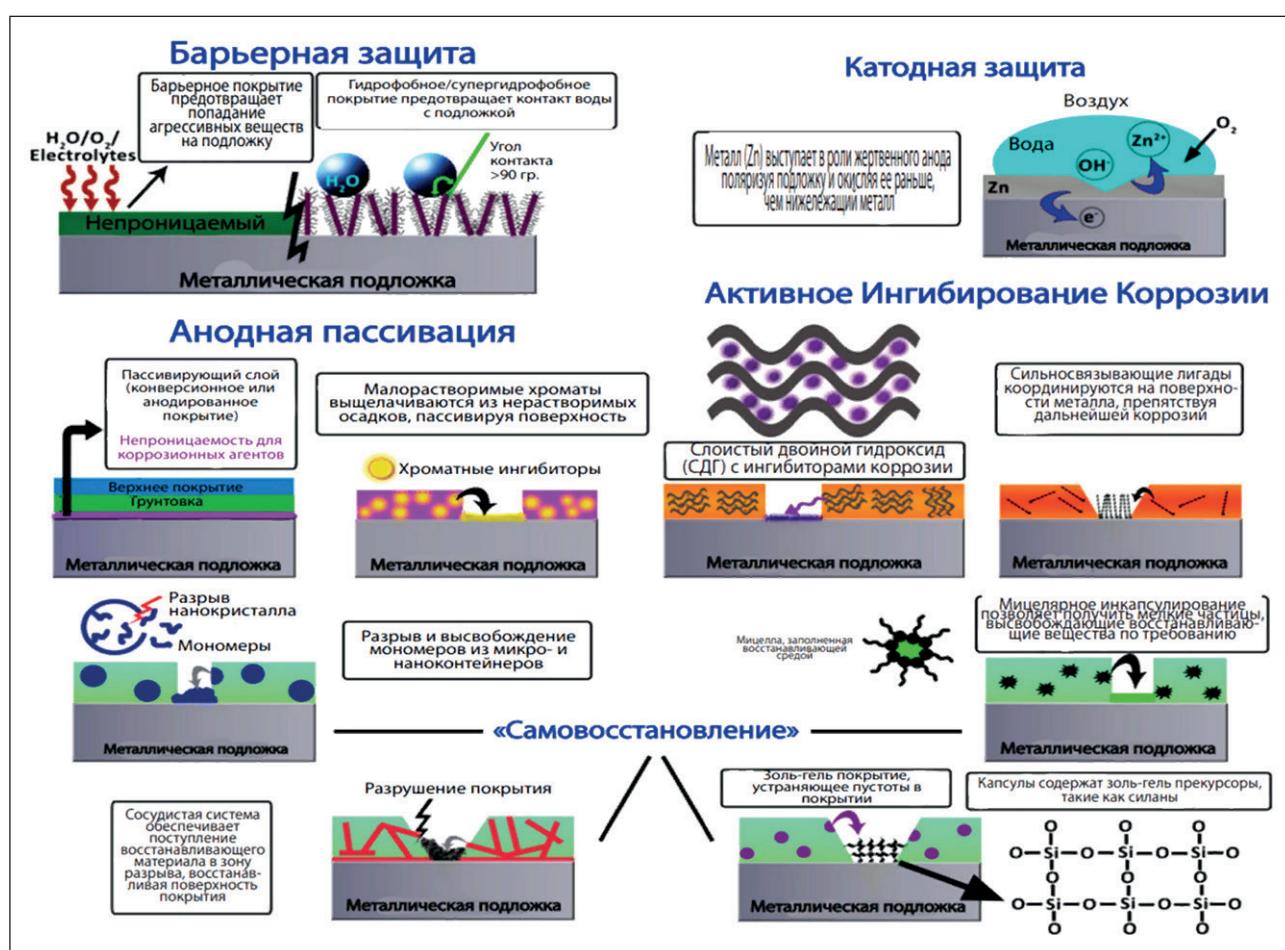


Рис. 3. Методы защиты от коррозии

Таблица 2
Сравнительная характеристика защитных покрытий

Тип покрытия	Области применения	Преимущества покрытий	Недостатки покрытий
Барьерное	Погружение, морское, промышленность	– пониженная проницаемость для жидкостей, ионов, газов, – прочность и стойкость к истиранию, – УФ-стойкость, – может применяться вместе с катодной токовой защитой или протекторными анодами, – может наноситься в качестве грунтовки, промежуточного или финишного покрытия	– вероятность неполного удаления растворителя, – алюминиевый пигмент в кислых средах реагирует с выделением водорода, – в средах с высокой влажностью вероятность гальванической коррозии покрытий с алюминийсодержащими пигментами, нанесенных на цинкосодержащую грунтовку, – в зонах брызг и атмосферных средах дефектные покрытия недостаточно надежны, – вероятность стремительной миграции агрессивных частиц к подложке в случае неправильной ориентации пластинчатых пигментов
Жертвенное органическое	Зона брызг, морское, промышленность	Высокое антикоррозионное защитное действие благодаря катодной защите металлической подложки	– высокие затраты, – низкая адгезия и сцепление из-за высокого содержанию металла, – покрытия с высоким содержанием цинка не рекомендуются для погружения или нанесения вместе с катодной защитой с импрессионным током
Жертвенное неорганическое	Зоны брызг, морское, промышленность	Силикаты цинка устойчивы к нагреванию и погружению в воду с растворами химических веществ	– силикаты цинка требуют особых условий для отверждения, характеризуются низкой совместимостью с другими типами покрытий, – для надлежащей защиты необходимость электрического контакта между металлическими частицами
Ингибиторное	промышленная	– образование нерастворимого в воде пассивирующего слоя, который сохраняется или остается нерастворимым в большинстве сред, – более низкие затраты по сравнению с цинковыми пигментированными покрытиями	– не применимо для погружных конструкций, – покрытия должны быть полупроницаемыми для воды для эффективного ингибирования подложки, – риск увеличения скорости коррозии при добавлении недостаточного количества анодного ингибитора

польные взаимодействия, или силы Ван-дер-Ваальса с энергией от 4 до 8 кДж/моль; водородные связи с энергией связи от 8 до 35 кДж/моль.

Принято считать, что адгезия полимерных покрытий к металлическим поверхностям объясняется образованием водородных связей (рис. 4).

Верхний слой металлических поверхностей обычно представляет собой тонкий оксидный слой [87]. Сцепление полимерного покрытия и металла происходит за счет образующихся водородных связей. Поэтому связующие вещества с полярными группами проявляют отличные адгезионные характеристики. Сцепление эпоксидных смол со сталью напрямую зависит от количества ОН-групп, но такой тип адгезии не является основным и общим для связующих, таких как силикаты цинка и эпоксидные смолы [88]. Выдвинутый механизм адгезии не способен исчер-

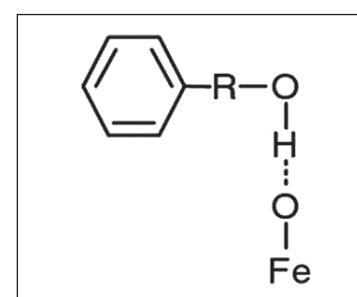


Рис. 4. Образование водородных связей между слоем оксида железа на стали и эпоксидной смолой

пывающие объяснить различную прочность связи между смолами и разными металлами и аномальную адгезию эпоксидных смол в сравнении с другими полимерами с равным количеством гидроксильных групп. В ходе исследований обнаружено, что эпокси-соединения диссоциируют по связи между фенокси-кислородом и алифатическим углеродом (рис. 5) [89].

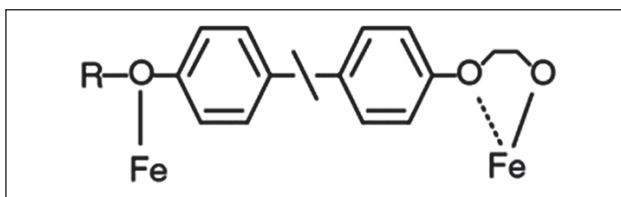


Рис. 5. Сцепление между эпоксидным связующим и сталью

Ранее по предложенному механизму считалось, что адгезионные взаимодействия осуществляются посредством атомов кислорода фенокси- и OH-группы, при этом молекула эпоксидной смолы ориентирована на поверхности воды определенным образом: гидрофобная часть молекулы эпоксисмолы направлена в противоположную от границы раздела сторону [90].

Тем не менее, вне зависимости от механизма адгезии полимерного покрытия к металлу, более прочное сцепление можно обеспечить предварительной обработкой методами хроматизации или фосфатирования. Конверсионный слой на металлической поверхности пассивирует поверхность и действует как барьер для агрессивных веществ [91]. Загрязнения на металлических поверхностях (пыль, жир, оксиды, соли и остатки старых покрытий) отрицательно влияют на адгезию покрытий. При этом снижается механическая и химическая адгезия покрытия к основанию, а также повышается риск разрушения покрытия. Большинство водорастворимых загрязнений необходимо удалить обработкой раствором моющего средства [92]. Далее для подготовки поверхности и более тщательного удаления ржавчины, прокатной окалины и остатков предыдущего покрытия перед нанесением защитной покраски применяют абразивоструйную обработку. При этом происходит уве-

личение площади поверхности основания с целью улучшения адгезии [93]. Необходимость удаления водорастворимых загрязнений очевидна, поскольку они могут растворяться при проникновении влаги в покрытие и образовывать вздутие, расслоение и ускорять коррозионные процессы поверхности [94–97].

Улучшение адгезии между полимерным покрытием и металлической поверхностью возможно осуществить использованием промоторов адгезии – связующих агентов, которые образуют ковалентные связи, обеспечивая более прочное межфазное взаимодействие между подложкой и покрытием. Их роль в усилении адгезии покрытий к металлическим поверхностям тщательно изучена [97]. Усилители адгезии в основном представляют собой короткоцепочечные органические молекулы с различными концевыми группами: с одной стороны – органическая функциональная группа, совместимая с материалом покрытия, с другой – неорганическая группа, совместимая с подложкой. Образуется своего рода химический мостик между основанием и покрытием. Модифицированные силаны являются наиболее распространенным коммерческим усилителем адгезии между полимерными и неорганическими материалами [98]. Их вводят в состав покрытия или наносят непосредственно на подложку. Считается, что промоторы адгезии мигрируют в области границы раздела и прикрепляются к подложке или пигментам до того, как произойдет обширное отверждение. Известно, что молекулы, способствующие адгезии, ориентируются перпендикулярно поверхности, к которой они прикреплены. Таким образом, шероховатая поверхность препятствует образованию упорядоченного прилежащего слоя. Однако непрерывные тонкие слои все же способны к образованию прочных и долговечных kleевых соединений [99].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Bui V.P., Liu H.Z., Low Y.Y., Tang. Evaluation of building glass performance metrics for the tropical climate. *Energy Build.* 2017; 157:195 – 203.
2. Sobolev K., Ferrada Gutiérrez M. How Nanotechnology Can Change the Concrete World. *Progress in Nanotechnology.* 2009; 113 – 116.
3. Shah K.W., Ong P.J., Chua M.H., Toh S.H.G., Lee J.J.C. Application of phase change materials in building components and the use of nanotechnology for its improvement. *Energy Build.* 2022; 262: 112018.
4. Gao N., Zhang Z., Deng J., Guo X., Cheng B., Hou H. Acoustic metamaterials for noise reduction: a review. *Adv. Mater. Technol.* 2022; 7 (6): 2100698.
5. Huang H., Huang M., Zhang W., Pospisil S., Wu T. Experimental investigation on rehabilitation of corroded RC columns with BSP and HPFL under combined loadings. *J. Struct. Eng.* 2020; 146 (8): 04020157.
6. Lu, Tingting, et al. Singlet oxygen-promoted one-pot synthesis of highly ordered mesoporous silica materials via the radical route. *Green Chemistry.* 2022;24(12): 4778-4782.
7. Wu Y., Zhao Y., Han X., Jiang G., Shi J., Liu P. Ultra-fast growth of cuprate superconducting films: dual-phase liquid assisted epitaxy and strong flux pinning. *Mater. Today Phys.* 2021; 18: 100400.

ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

8. Frakes J. The 411 on SurfacePrep: An important component of the coatings process. *CoatingsPro Magazine – SurfacePrep Supplement*, no. March. 2014; 4 – 9.
9. Nazari M.H., Bergner D., Shi X., Fay L. Manual of Best Practices for the Prevention of Corrosion on Vehicles and Equipment used by Transportation Agencies for Snow and Ice Control Minnesota Department of Transportation. Research Services & Library, St. Paul, Minnesota. 2018; URL: http://clearroads.org/wp-content/uploads/dlm_uploads/Revised_Task-2_Corrosion-Manual.pdf
10. Sastri V.S., Ghali E., Elboujdaini M. Corrosion Prevention and Protection: Practical Solutions. Wiley, Chichester, England; Hoboken, NJ. 2007; 30.
11. Sharman S. Evaluation & Performance of Chemical Surface Treatments for Maintenance. 2009; 1: 125 – 142.
12. Aliofkhazraei M. Nanocoatings: Size Effect in Nanostructured Films. Springer Science & Business Media: Amsterdam, The Netherlands. 2011; 251.
13. Aliofkhazraei M. Synthesis, Processing and Application of Nanostructured Coatings Nanocoatings. Springer: Amsterdam, The Netherlands. 2011; 28.
14. Gu Y., Xia K., Wu D., Mou J., Zheng S. Technical Characteristics and Wear-Resistant Mechanism of Nano Coatings: A Review. *Coatings*. 2020; 10: 233.
15. Deyab M.A. Effect of carbon nano-tubes on the corrosion resistance of alkydcoating immersed in sodium chloride solution. *Progress in Organic Coatings*. 2015; 85: 146 – 150.
16. Wang C., Wang Y., Wang L., Hao G., Sun X., Shan F., Zou Z. Nanocomposite Lanthanum Zirconate Thermal Barrier Coating Deposited by Suspension Plasma Spray Process. *J. Therm. Spray Technol.* 2014; 23: 1030 – 1036.
17. Sharma A., Singh A.K. Electroless Ni-P-PTFE-Al₂O₃ dispersion nanocomposite coating for corrosion and wear resistance. *J. Mater. Eng. Perform.* 2014; 23: 142 – 151.
18. Almeida E. Surface Treatments and Coatings for Metals. A General Overview. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2001; 40: 3. DOI:10.1021/ie0002091
19. Dabral M., Francis L.F., Scriven L.E. Drying Process Paths of Ternary Polymer Solution Coating. *AIChE J.* 2002; 48: P. 25.
20. Santagata D.M., Sere P.R., Elsner C.I., Di Sarli A.R. Evaluation of the Surface Treatment Effect on the Corrosion Performance of Paint Coated Carbon Steel. *Prog. Org. Coat.* 1998; 33: P. 44.
21. Elsner C.I., Cavalcanti E., Ferraz O., Di Sarli A.R. Evaluation of the Surface Treatment Effect on the Anticorrosive Performance of Paint Systems on Steel. *Prog. Org. Coat.* 2003; 48: 50.
22. Narayanan T.N.S. Surface Pretreatment by Phosphate Conversion Coatings – A Review. *Rev. Adv. Mater. Sci.* 2005; 9: 130.
23. Gagro D. Protective Coatings. *European Coatings Journal*. 2020; 10 – 11.
24. Sud A. Anticorrosive Coating. *European Coatings Journal*. 2015. 8 – 9.
25. Roberge P.R. Corrosion Engineering: Principles and Practice. McGraw Hill Professional: New York, NY, USA. 2008. ISBN 978-0-07-164087-9.
26. Lyon S., Bingham R., Mills D. Advances in corrosion protection by organic coatings: What we know and what we would like to know. *Prog. Org. Coat.* 2017; 102: 2 – 7.
27. Tsu S.N. Surface Pretreatment by Phosphate Conversion Coatings – A Review. *Rev. Adv. Mater. Sci.* 2005; 9: 130 – 177.
28. Osborne J.H. Observations on chromate conversion coatings from a sol–gel perspective. *Prog. Org. Coat.* 2001; 41: 280 – 286.
29. Parashar G., Bajpayee M., Kaman P. Water-borne non-toxic high-performance inorganic silicate coatings. *Surf. Coat. Int. Part B Coat. Trans.* 2003; 86: 209 – 216.
30. Ping Z., He Y., Gu C., Zhang T.Y. Mechanically assisted electroplating of Ni–P coatings on carbon steel. *Surf. Coat. Technol.* 2008; 202: 6023 – 6028.
31. Verma A., Van Ooij W. High-temperature batch hot-dip galvanizing. Part 2. Comparison of coatings formed in the temperature range 520–555 °C. *Surf. Coat. Technol.* 1997; 89: 143 – 150.
32. Jakobson S., Crotty D., Griffin R., Phipps D., Rubin E. Zinc anodizing. *Met. Finish.* 1998; 96: 114 – 118.
33. Gharbi O., Thomas S., Smith C., Birbilis N. Chromate replacement: What does the future hold. *NPJ Mater. Degrad.* 2018; 2: 12.
34. Milošev I., Frankel G.S. Review – Conversion Coatings Based on Zirconium and/or Titanium. *J. Electrochem. Soc.* 2018; 165: 127 – 144.
35. Adhikari S., Unoci K., Zhai Y., Frankel G., Zimmerma J., Fristad W. Hexafluorozirconic acid-based surface pretreatments: Characterization and performance assessment. *Electrochimica Acta*. 2011; 56: 1912 – 1924.
36. Rudd A.L., Breslin C.B., Mansfeld F. The corrosion protection afforded by rare earth conversion coatings applied to magnesium. *Corros. Sci.* 2000; 42: 275 – 288.
37. Walker D.E., Wilcox G.D. Molybdate based conversion coatings for zinc and zinc alloy surfaces: A review. *Trans. IMF.* 2008; 86: 251 – 259.
38. Hodge J., Mirabile D. Pearson Most appropriate treatments to control the environmental impact of effluents in the iron and steel industry. URL: <http://op.europa.eu/es/publication-detail/-/publication/bc305c8d-1a4d-462c-8f4e-483da0aa4b74>
39. Cunningham M.F., Campbell J.D., Fu Z., Bohling J., Leroux J.G., Mabee W., Robert T. Future green chemistry and sustainability needs in polymeric coatings. *Green Chem.* 2019; 21: 4919 – 4926.
40. Salata R.R., Pellegrine B., Soucek M.D. Synthesis and properties of a high solids triethoxysilane-modified alkyd coatings. *Prog. Org. Coat.* 2019; 133: 340 – 349.
41. Bera S., Rout T., Udayabhanu G., Narayan R. Water-based & eco-friendly epoxy-silane hybrid coating for enhanced corrosion protection & adhesion on galvanized steel. *Prog. Org. Coat.* 2016; 101: 24 – 44.
42. Zareanshahraki F., Asemani H., Skuza J., Mannari V. Synthesis of non-isocyanate polyurethanes and their application in radiation-curable aerospace coatings. *Prog. Org. Coat.* 2020; 138: 105394.

ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

43. Вихарева И.Н., Антипин В.Е., Еникеева Д.В., Кручинина П.А. Карбонизация эпоксидов // Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции «Современные материалы и методы решения экологических проблем постиндустриальной агломерации». Челябинск. 12–14 декабря 2023. 156 с.
44. Ramlan S.N.A., Basirun W.J., Phang S.W., Ang D.T.C. Electrically conductive palm oil-based coating with UV curing ability. *Prog. Org. Coat.* 2017; 112: 9 – 17.
45. Антипин В.Е., Вихарева И.Н., Еникеева Д.В., Кручинина П.А. Применение машинного обучения для прогнозирования активности аминных катализаторов в реакции присоединения CO₂ к эпоксидам // Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции «Современные материалы и методы решения экологических проблем постиндустриальной агломерации». Челябинск. 12–14 декабря 2023. 161 с.
46. Фиговский О.Л., Больщаков О.И., Вихарева И.Н. Неизоцианатные полиуретаны: экологичные решения: монография // Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2023. 46 с.
47. Derkens J.T., Cuperus F., Kolster P. Paints and coatings from renewable resources. *Ind. Crop. Prod.* 1995; 3: 225 – 236.
48. Sherwood J., De Bruyn M., Constantinou A., Moity L., McElroy C.R., Farmer T.J., Duncan T., Raverty W., Hunt A.J., Clark J.H. Dihydrolevoglucosenone (Cyrene) as a bio-based alternative for dipolar aprotic solvents. *Chem. Commun.* 2014; 50: 9650 – 9652.
49. Marzorati S., Verotta L., Trasatti S.P. Green Corrosion Inhibitors from Natural Sources and Biomass Wastes. *Molecules*. 2018; 24: 48.
50. Fitridge I., Dempster T., Guenther J., De Nys R. The impact and control of biofouling in marine aquaculture: A review. *Biofouling*. 2012; 28: 649 – 669.
51. Li T., Zhang Z.P., Rong M.Z., Zhang M.Q. Self-healable and thiylene UV-curable waterborne polyurethane for anticorrosion coating. *J. Appl. Polym. Sci.* 2019; 136: 47700.
52. Liang Y., Zhang D., Zhou M., Xia Y., Chen X., Oliver S., Shi S., Lei L. Bio-based omniphobic polyurethane coating providing anti-smudge and anti-corrosion protection. *Prog. Org. Coat.* 2020; 148: 105844.
53. VCI In Singapore. Preservemets. URL: <https://www.preservemets.com/environment-friendly-anti-corrosion-solution>
54. Rani B.E.A., Basu B.B.J. Green Inhibitors for Corrosion Protection of Metals and Alloys: An Overview. *Int. J. Corros.* 2012; 1 – 15.
55. Bizet B., Grau E., Cramail H., Asua J.M. Water-based non-isocyanate polyurethane-ureas (NIPUUs). *Polym. Chem.* 2020; 11: 3786 – 3799.
56. SYLOMASK Anti-Corrosion Pigment. Fuji Silysia Chemical. URL: <https://www.fujisilysia.com/products/sylomask/>
57. Cui G., Bi Z., Zhang R., Liu J., Yu X., Li Z. A comprehensive review on graphene-based anti-corrosive coatings. *Chem. Eng. J.* 2019; 373: 104 – 121.
58. El-Hamid D., Blustein G., Deyá M., Del Amo B., Romagnoli R. The anticorrosive performance of zinc-free non-toxic pigment for paints. *Mater. Chem. Phys.* 2011; 127: 353 – 357.
59. Langer E., Zubielewicz M., Kuczyńska H., Królikowska A., Komorowski L. Anticorrosive effectiveness of coatings with reduced content of Zn pigments in comparison with zinc-rich primers. *Corros. Eng. Sci. Technol.* 2019; 546: 627 – 635.
60. Pigmentan. Environmentally Friendly Anti Corrosive Protection. URL: <https://www.pigmentan.com/>
61. Alam M., Akram D., Sharmin E., Zafar F., Ahmad S. Vegetable oil based eco-friendly coating materials: A review article. *Arab. J. Chem.* 2014; 7: 469 – 479.
62. Almeida E., Diamantino T.C., De Sousa O. Marine paints: The particular case of antifouling paints. *Prog. Org. Coat.* 2007; 59: 2 – 20.
63. Momber A.W., Marquardt T. Protective coatings for offshore wind energy devices (OWEAs): A review. *J. Coat. Technol. Res.* 2017; 15: 13 – 40.
64. Olajire A.A. Recent advances on organic coating system technologies for corrosion protection of offshore metallic structures. *J. Mol. Liq.* 2018; 269: 572 – 606.
65. Li Y., Ning C. Latest research progress of marine microbiological corrosion and bio-fouling, and new approaches of marine anti-corrosion and anti-fouling. *Bioact. Mater.* 2019; 4: 189 – 195.
66. Bhandari J., Khan F., Abbassi R., Garaniya V., Ojeda R. Modelling of pitting corrosion in marine and offshore steel structures. A technical review. *J. Loss Prev. Process. Ind.* 2015; 37: 39 – 62.
67. Buskens P., Wouters M., Rentrop C., Vroon Z. A brief review of environmentally benign antifouling and foul-release coatings for marine applications. *J. Coat. Technol. Res.* 2012; 10: 29 – 36.
68. Callow J.A., Callow M.E. Trends in the development of environmentally friendly fouling-resistant marine coatings. *Nat. Commun.* 2011; 2: 244.
69. Ciriminna R., Bright F.V., Pagliaro M. Ecofriendly Antifouling Marine Coatings. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2015; 3: 559 – 565.
70. Knudsen O.Ø., Forsgren A. Corrosion Control Through Organic Coatings. CRC Press: Boca Raton, FL, USA. 2017.
71. Shaydurova G.I., Gatina E.R., Vasiliev I.L., Antipin V.E., Shevyakov Ya.S. Reduction of the hazard class of low-viscosity epoxy binders. *Bulletin of Science and Practice*. 2018; 4: 234-240.
72. Fedoseev M.S., Derzhavinskaya L.F., Borisova I.A., Oshchepkova T.E., Antipin V.E., Tsvetkov R.V. Heat-resistant polymers and composites based on epoxyisocyanate binders. *Adhesives. Sealants. Technologies*. 2018; 7: 7-14.
73. Федосеев М.С., Шатров В.Б., Шайдурова Г.И., Державинская Л.Ф., Антипин В.Е. Синтез и свойства эпокси-ангидридных связующих и полимеров, полученных под действием катализаторов отверждения различной химической природы // Перспективные материалы. 2017. № 1. С. 39-48.
74. Anticorrosion Coating Industry Transitioning to Sustainable Development. URL: <https://www.pcimag.com/articles/103192-anticorrosion-coating-industry-transitioning-to-sustainable-development>

ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

75. Almeida E., Santos D., Fragata F., Rincon O., Morcillo M. Alternative Environmentally Friendly Coatings for Mild Steel and Electrogalvanized Steel to Be Exposed to Atmospheres. *Mater. Corros.* 2001; 52: 904 – 919.
76. NanoPrime Water Based Primer, No VOCs. Nanorustx. URL: <https://www.nanorustx.com/>
77. Hemucryl. Hempel. URL: <https://www.hempel.com/products/brand/hemucryl/explore>
78. Eco-Friendly Corrosion Protection Systems. Evonik Industries. URL: <https://corporate.evonik.com/en/eco-friendly-corrosion-protection-systems-109077.html>
79. No Chance for Corrosion. Dynasylan the Brand for Functional Silanes. URL: <https://www.dynasylan.com/product/dynasylan/en/pages/article.aspx?articleId=26025>
80. Eco-Friendly Coatings for Transportation by Eco Smart. CoatingsTM. EcoOnyxTM. SmartArmRTM. AmortizeTM Rubberized. URL: https://ecosmartcoatings.com/transportation_coatings.html
81. Making the Switch to Eco-Friendly Coatings. URL: <https://www.solvay.com/en/article/eco-friendly-waterborne-solutions>
82. Steel Bridges. URL: <http://legacy.jotun.com/us/en/b2b/paintsandcoatings/bridges/Steel-Bridges.aspx?q=Solutions>
83. Anti-Corrosive Pigments for Water-Based Coatings. URL: <https://www.heubachcolor.com/news/anti-corrosive-pigments-for-water-based-coatings/>
84. Jones D.A. Principles and Prevention of Corrosion, 2nd ed. Macmillan: Upper Saddle River, NJ, USA. 1996.
85. Sell P.J., Neumann A.W. Surface Tension of Solids. *Angew. Chem.* 1966; 78: 321.
86. Bolger J.C. Adhesion Aspects of Polymer Coatings. Plenum Press, New York. 1983.
87. Fahlman M., Jasty S., Epstein A.J. Corrosion Protection of Iron/Steel by Emeraldine Base Polyaniline: An X-Ray Photoelectron Spectroscopy Study. *Synth. Met.* 1997; 85: 1323.
88. Glazer J. Monolayer Studies of Some Ethoxylin Resin Adhesives and Related Compounds. *J. Polym. Sci.* 1954; 13: 355.
89. Nakazawa M., Somorjai G.A. Adsorption of Substituted Benzenes on Polycrystalline Gold and on Zinc and Iron Oxide Overlays. *Appl. Surf. Sci.* 1993; 68: 517.
90. Nakazawa M., Somorjai G. A Study of the Adsorption of Selected Organic Molecules to Model the Adhesion of Epoxy Resins: Thermal Desorption of Glycidyl and Phenoxy Compounds from Gold, Iron Oxide and Zinc Oxide. *Appl. Surf. Sci.* 1993; 68: 539.
91. Nakazawa M., Somorjai G. Coadsorption of Water and Selected Aromatic Molecules to Model the Adhesion of Epoxy Resins on Hydrated Surfaces of Zinc and Iron Oxide. *Appl. Surf. Sci.* 1994; 84: 309.
92. Nakazawa M. Mechanism of Adhesion of Epoxy Resin to Steel Surface. Nippon Steel Technical Report 63. 1994; 16.
93. Hare C. Good Painting Practice Steel Structures Painting Manual. Steel Structures Painting Council. Pittsburg. 1995.
94. Momber A.W., Koller S., Dittmers H.J. Effects of Surface Preparation Methods on Adhesion of Organic Coatings to Steel Substrates. *J. Protect. Coat. Linings.* 2004; 44.
95. Momber A.W., Koller S. How Surface Preparation Methods Affect Delamination in Ballast Tanks. *J. Protect. Coat. Linings.* 2008; 25: 43.
96. Momber A.W., Greverath W.D. Surface Preparation Standards for Steel Substrates – A Critical Review. *J. Protect. Coat. Linings.* 2004; 48.
97. Sathyaranayana M.N., Yaseen M. Role of Promoters in Improving Adhesion of Organic Coatings to a Substrate. *Prog. Org. Coat.* 1995; 26: 275.
98. Schrieber H.P., Qin R.Y., Sengupta A. The Effectiveness of Silane Adhesion Promoters in the Performance of Polyurethane Adhesives. *J. Adhes.* 1998; 68: 31.
99. Petrie E.M. Handbook of Adhesives and Sealants. McGraw-Hill. 2000.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вихарева Ирина Николаевна – кандидат химических наук, заместитель директора НОЦ «Нанотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, vikharevain@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5681-2767>

Антипин Вячеслав Евгеньевич – кандидат технических наук, заместитель директора НОЦ «Нанотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, antipinve@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4337-1760>

ВКЛАД АВТОРОВ

Вихарева И.Н. – концепция исследования; развитие методологии; написание исходного текста.

Антипин В.Е. – итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 11.01.2024; одобрена после рецензирования 02.02.2024; принята к публикации 06.02.2024.



WUHAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Wuhan University of Technology (WUT), is a state key university directly affiliated to the Ministry of Education of the People's Republic of China. WUT is among the first batch of universities which have entered the national "211 Project" and China's "Double-First Class" Initiative. WUT is jointly developed by the Ministry of Education and the Ministry of Transport. As the university directly affiliated to the Ministry of Education which cultivates the largest number of talents in three major industrial sectors, namely, building and construction materials, transportation, and automobile industries, WUT becomes an important base for the cultivation of high-level scientific talents and technological innovation for the three industrial sectors.

WUT has three campuses, including Mafangshan campus, Yujiatou campus and the South Lake campus,

with a total land area of 2.67 million square meters and a total gross floor area of 1.95 million square meters. Currently, WUT has over 50,000 faculty and students, 24 academic schools, 4 National Technology Innovation Bases and 4 modern libraries with a collection of 3.61 million books. Since 2000, WUT has been awarded over 20 national science and technology prizes, ranking in the forefront of all Chinese colleges and universities. In 2019, WUT was listed in Times Higher Education World University Rankings, U.S. News Best Global Universities Rankings, Shanghai Jiao Tong University's Academic Ranking of World Universities and QS Asia University Rankings.

Since the founding of New China, WUT has cultivated more than 600,000 senior professionals. In the past decade, the first-time employment rate of graduates has

remained above 95%, and about 55% of total employment join world's top 500 enterprises and fields of strategic emerging industries.

Over the years, WUT has formed educational ideology system with distinctive characteristics, with the lofty ideal of "Building an excellent university to win worldwide recognition and admiration", the spirit of "Sound in morality, broad in learning and pursuing excellence", the principle of "Taking students' cultivation as our essence, and taking academic development as our priority", and the educational concept of "Implementing excellent education, nurturing excellent talents and creating an excellent life". Guided by the WUT Charter approved by the Ministry of Education, WUT is committed to the modernization of the governance system and capability, aiming to rank among the world-class universities with distinctive features.

MSE Discipline of Wuhan University of Technology

Founded in 1958, the Materials Science & Engineering (MSE) discipline of Wuhan University of Technology (WUT) was supported in priority through the "State 211 Project for Higher Education Universities" from 1995 to 2015, and has been supported via the "World-Class University & World-Class Discipline" development plan of China since 2016. WUT's MSE ranks A+ among 172 leading universities in China (No.1 alongside MSEs of Tsinghua University and Beihang University) in the 4th round national discipline evaluation organized by the Ministry of Education in 2017, and is world top 1% in Clarivate Analytics' Essential Science Indicators.

WUT's MSE owns 1 member of Chinese Academy of Sciences, 3 members of Chinese Academy of Engineering, 3 members of Academia Europaea, 1 member of the Royal Academy of Belgium, 1 member of the World Academy of Ceramics, 1 fellow of the Australian Academy of Technology and Engineering, 10 fellows of the Royal Society of Chemistry, American Physics Society and American Ceramic Society. It also owns 23 national high-level talents including recipients of the National Natural Science Foundation of China for Distinguished Young Scholars (equal of NSF Career Awards), and 22 national high-level young talents.

WUT's MSE has established 2 state key laboratories, the State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing and the State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures. The State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing was evaluated "Excellence" among 21 state key laboratories in MSE in 2018. It also has built 2 state international joint-research laboratories, and 4 bases of foreign outstanding expertise-introduction for discipline innovation (also known as "111 Project").

International School of Materials Science and Engineering

The International School of Materials Science and Engineering (ISMSE) was selected into the list of "Network of International Centers for Education" supported by the State Administration of Foreign Experts





Affairs and Ministry of Education of P. R. C. in June 2015 as one of the 16 international schools all over the country.

Driven by the “National innovation driven development strategy” and the great demand for national higher education reformation, ISMSE is devoted to building a world-leading MSE discipline through optimizing a high-level research and teaching team, constructing an innovative training pilot zone and establishing an innovative talents training system. Guided by the idea of “enterprise cooperation, international cooperation and research cooperation”, ISMSE organized 21 mentor teams lead by academicians or distinguished professors and 4 interdisciplinary innovation and entrepreneurship training teams.

Aiming at leading the world’s building materials and new materials in the 21st century, ISMSE values the innovative ability as one of the core capabilities and reform the innovative talent training system of the bachelor program, master and PhD program and international program. ISMSE provides students with a comprehensive curriculum, which covers materials science, life science, energy science, environmental science, information science and advanced manufacturing science. To expose all students to international experiences, joint training programs were created in cooperation with world-leading universities. Furthermore, ISMSE built a variety of platforms for students’ all-round development, such as Distinguished Scholars Forum, International Vision Forum, Quality Education Seminar and Material Advantage WUT Chapter. The Material Advantage WUT Chapter was awarded Chapter of Excellence Award in the past 5 years from 2018 to 2022.

State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing (Wuhan University of Technology)

The State Key Laboratory of Advanced Technology for Material Synthesis and Processing was approved by the State Development Planning Commission in 1987. After state inspection, it was opened for the public in March 1990. The laboratory is under the direct administration of the Ministry of Science and Technology. Currently, Professor Gu Binglin, an academician of the Chinese Academy of Sciences, is the Chair of the laboratory’s academic committee, and Professor Fu ZhengYi, an academician of the Chinese Academy of Engineering, is the Director of the laboratory. The laboratory is located in the Wuhan University of Technology, and it is a state key laboratory that specializes in the field of new materials. The Department of Materials Science and Engineering at the Wuhan University of Technology has been classified as a first-class State Key Discipline, included in the national “985” project of “Build a world-class discipline program,” and is ranked as A+ in the fourth round of national discipline evaluation. Aiming at the global frontier research of materials science and addressing the primary national needs, this laboratory provides a world-class platform for materials compounding and preparation technology, for developing advanced composite materials for national major projects and pillar industries, and for providing support at the national strategic level. Original and systematic research results, with international impact in transformative technologies, frontier new materials, and interdisciplinary fields, have been reported in this

laboratory, and therefore, it leads the international development in several strategic frontier new materials. The laboratory fosters the development of global first-class research talent through advanced scientific research in the field of materials science and technology. In addition, the laboratory has created a culture of international collaborative innovation and has carried out “Win-Win” international cooperative research, thereby enhancing the international influence, attractiveness, and cohesion of the laboratory. The laboratory has achieved a historic breakthrough in the evaluation of the State Key laboratories in the field of materials science.

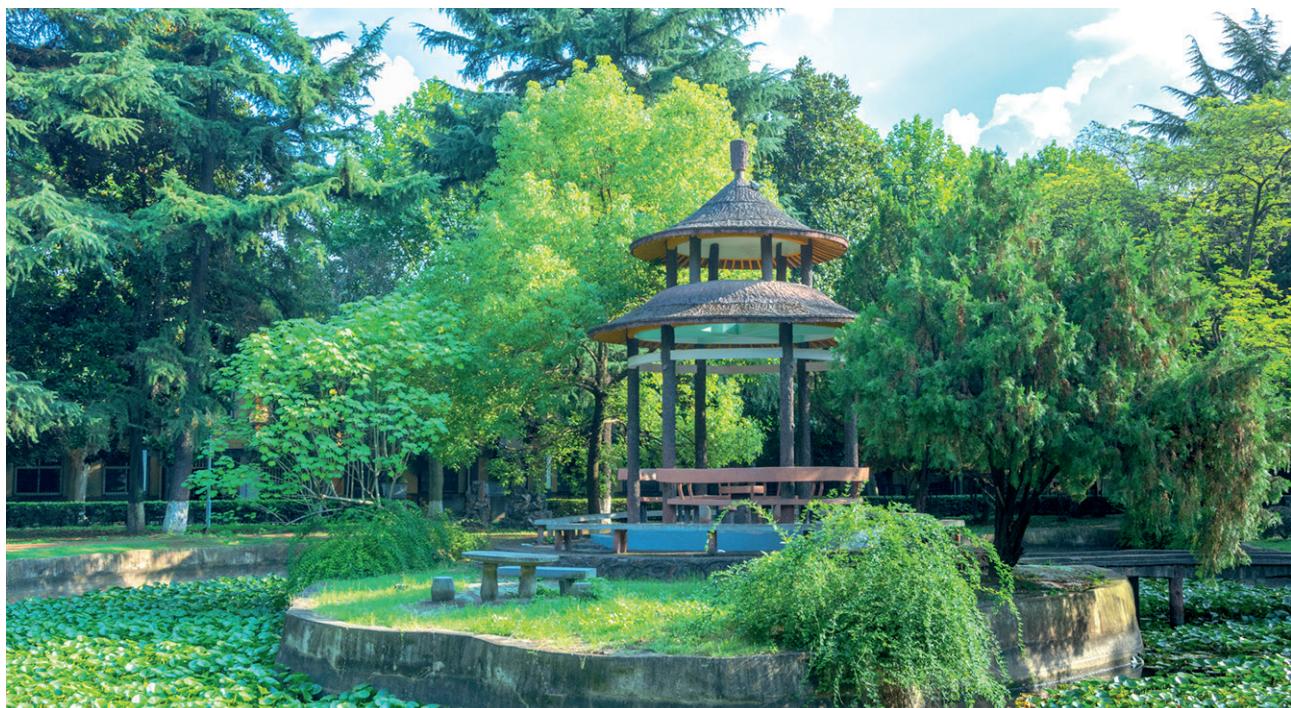
Centering on the overall vision and objectives, the laboratory focuses on the establishment and development of multi-component, multi-scale, and multi-level composite principles and material design theories that are built on core research platforms comprising material gradient composite technology, in-situ composite technology, nanocomposite technology, and their integrated innovations. Currently, research on five key materials, including advanced composite materials for national major projects and pillar industries, efficient energy conversion and storage materials for new energy technologies, nanocomposite biomaterials for life sciences, information functional materials for information technology, and frontier new materials for transformative technologies, is being carried out in this laboratory. Therefore, the laboratory has established the following five distinctive research directions: gradient composite technology and new materials, in-situ composite technology and new materials, nanocomposite technology and new materials, transformative technology and frontier

new materials, and material composite principles and material design.

The laboratory has an active and innovative research team that mainly comprise young and middle-aged researchers. There are hundred permanent staff members, including one academician of the Chinese Academy of Sciences, two academicians of the Chinese Academy of Engineering, one academician of the Royal Academies for Science and the Arts of Belgium, two academicians of the European Academy of Sciences and Arts, one academician of the Australian Academy of Technology and Engineering, one academician of the World Academy of Ceramics, twelve national level researchers, one chief scientist of the National “973” program, five recipients of the national “Outstanding Youth Science Fund,” and thirty recipients of the “national talent Support Plan”. etc. This laboratory has been actively supporting outstanding scholars to visit and conduct collaborative research worldwide in world-class universities and research institutions. In recent years, the laboratory has sent several outstanding young scholars to world-class international universities for more than one year to conduct visits and collaborative research.

The laboratory emphasizes global academic exchange and collaboration. In the last five years, we have hired twenty-five international scholars as honorary and visiting professors in the main research areas, with an aim to create cordial working conditions for world-renowned scientists to conduct collaborative research in the laboratory.

The laboratory has carried out substantial “Win-Win” collaborations with the University of Michigan; Japan





Aerospace Exploration Agency (JAXA); the Institute for Materials Research, Tohoku University (Japan); the Materials Research Center, University of Oxford (UK); Composites Research Center, the University of California (US); and the National Institute of Fuel Cells (Canada), among other internationally renowned research institutions. The Ministry of Science and Technology has established the “International Joint Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing,” which is one of the first thirty-three international joint laboratories in China. Additionally, the State Administration of Foreign Experts Affairs and the Ministry of Education have jointly formed three discipline bases supported by the Program of Innovation and Talent Introduction, namely “New Material Composite Technology and Advanced Functional Materials,” “Advanced Preparation Technology and Application Engineering of New Functional Thin Film Materials,” and “Innovation and Talent Introduction Base of Life Composites.” Relying on these important international collaboration platforms, the laboratory has undertaken several state key projects with international collaborations and achieved fruitful results in international collaboration and exchanges.

Currently, the laboratory has a floor area of 25,350 square meters, with several advanced materials synthesis and processing instruments, as well as state-of-the-art instruments specializing in materials structure

analysis, characterization, and performance testing. The total estimated value of the instrumentation asset is approximately 430 million RMB.

Introduction to the State Key Laboratory of Silicate Materials for Architecture

The State Key Laboratory of Silicate Materials for Architecture was authorized by the Ministry of Science and Technology of China (MoST) in October 2011, and passed the expert acceptance of MoST in July 2013. The laboratory aims to solve the major fundamental theories and common key technology issues during the preparation and service process of silicate materials for architectures, develop low environmental load preparation methods and energy efficiency enhancement theories, research and develop high performance and multifunctional building materials to support major engineering construction and the development of green, energy-saving and intelligent building systems, and provide new theories, new methods and common key technologies for achieving long-term stability and recycling of building materials and structures.

The main research directions of the laboratory comprise the low environment load preparation, the functional design and regulation, the service behavior and life extension principles as well as the recycling design of silicate materials for architecture.

2023 交叉学科材料国际高端研讨会 2023 International Seminar on Interdisciplinary Materials

中国·武汉 2023.7.19-7.21



The Laboratory shares a construction area of 12 500 m² and lots of professional research equipment worth more than 100 million RMB, forming a research platform including eight professional secondary laboratories and one public experiment center. The research platform is able to support the research of the science and technology in the field of thermal equipment, cement and cementitious materials, concrete, glass, ceramics, film and coating, wall and road materials.

The Laboratory is open to both domestic and international applications, and values domestic and international academic exchanges and cooperation. Relying on the laboratory, the “International Science and Technology Cooperation Base for Environmental Friendly Building Materials” was established and was identified as a model of international science and technology cooperation base by MoST in 2013.

The innovation achievements of scientific research of the laboratory contribute a lot to the national economy and social development, including providing key technical support for the construction of national major infrastructures, boosting the structural transformation and technological upgrading of traditional building materials industry, and promoting the implementation of energy saving and emission reduction strategies.

Introduction to Interdisciplinary Materials

The scientific journal *Interdisciplinary Materials* (ISSN: 2767-441X) was launched by Wuhan University of Technology and John Wiley & Sons, Inc in Dec, 2021.

Interdisciplinary Materials is an open-access, peer-reviewed, and rapid-publication journal focusing on the interdisciplinary researches between materials science and other disciplines, such as physics, chemistry, mathematics, mechanics, biology, energy, environment, information, engineering, etc. The journal aims at reporting cutting-edge developments across science and technology around the world.

Interdisciplinary Materials is expected to take an interdisciplinary, frontier, and integrated approach to all areas of materials research while cultivating the exchange of ideas between scientists involved in the different disciplines. Readership includes physicists, chemists, mathematicians, mechanics, biologists, and energy, environment, materials scientists, engineers from academia and industry as well as policymakers.

The first issue was published in Jan, 2022. It has been included in the Emerging Sources Citations Index (ESCI), Ei Compendex and Directory of Open Access Journals (DOAJ) databases.

Contact information

Address: 122 Luoshi Road, Hongshan District, Wuhan, Hubei, P. R. China
Postal Code: 430070
Supporting Institution: Wuhan University of Technology
Tel: 86-27-87884448; Fax: 86-27-87879466
E-mail: sklwt@whut.edu.cn
Contacts: Zhao Xiang, Zhou Lihua

R



УХАНЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Уханьский технологический университет (УТУ) – национальный стратегический университет под прямым управлением Министерства образования. Является одним из первых университетов, вошедших в государственные программы «211 Project» и «Double-First Class» для содействия развитию университетов и научных направлений мирового уровня. УТУ был образован Министерством образования совместно с Министерством транспорта. Так как университет подчиняется напрямую Министерству образования, которое растит и развивает талантливые кадры в области строительства и строительных материалов, транспорта и автомобилестроения, УТУ стал важным центром по подготовке научных кадров и технологических инновационных разработок для этих трех крупнейших промышленных секторов.

Университет включает 3 кампуса: Мафангшан, Юдзитау и СауфЛейк, в общей сложности занимающих площадь 267 гектаров общей площадью зданий 1,95 млн м². В настоящее время в УТУ работают более 50 тыс. человек персонала и студентов, 24 академические школы, 4 Национальных технологических инновационных центра и 4 современные библиотеки с фондом в 3,61 млн изданий. С 2000 года УТУ удостоился 20 государственных национальных научных и технических премий, занимая первые позиции в рейтинге всех китайских университетов и колледжей. В 2019 году УТУ был включен в рейтинги Times Higher Education World University Rankings, U.S. News Best Global Universities Rankings, Shanghai Jiao Tong University's Academic Ranking of World Universities and QS Asia University Rankings.

МЕЖДУНАРОДНОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

С момента образования Нового Китая УТУ подготовил более 600 тыс. высокопрофессиональных специалистов. В течение последних десяти лет процент впервые трудоустроенных выпускников остается свыше 95% и составляет около 55% от всех трудоустроенных выпускников в международном рейтинге «Top 500 компаний и новых отраслей».

На протяжении многих лет УТУ сформировал отличительную идеологию системы образования с высокими идеалами «Построения отличного университета для завоевания всемирного признания и восхищения», следуя девизу «Быть нравственно непоколебимым, разносторонним в учении, стремящимся к совершенству», а также принципу «Сделать воспитание студентов нашей сущностью, а академическое развитие – приоритетом». Университет воплощает образовательную концепцию «внедрение отличного образования, воспитание первоклассных кадров и создание прекрасной жизни». Руководствуясь Хартией УТУ, утвержденной Министерством образования, УТУ вовлечен в модернизацию системы государственного регулирования с целью занять свое место среди университетов мирового уровня с отличительными признаками.

Здание корпуса научного направления «Материаловедение и инженерное дело» (МИД) Уханьского технологического университета

Основанное в 1958 году в УТУ научное направление «Материаловедение и инженерное дело» (МИД) приоритетно поддерживалось государственной про-

граммой «211 проектов для университетов» («State 211 Project for Higher Education Universities») в период с 1995 по 2015 годы, а с 2016 года поддержка стала осуществляться через план развития КНР «Университеты мирового уровня и научные направления мирового уровня» («World-Class University & World-Class Discipline»). Рейтинг этого направления составляет A+ среди 172 ведущих университетов в Китае (№ 1 наравне с этим направлением в университетах Тчинхуа и Бейхан) в 4-ом раунде оценки, организованном Министерством образования в 2017 году, а также входит в топ 1% в международной системе Clarivate Analytics' Essential Science Indicators.

В развитие МИД вовлечены: 1 член Китайской академии наук, 3 члена Китайской инженерной академии, 3 члена Европейской академии, 1 член Бельгийской королевской академии, 1 член Международной академии керамики, 1 стипендиант Австралийской академии технологий и инженерии, 10 стипендиатов Королевского химического общества, Американского общества физики и Американского общества керамики. Также в МИД работают 23 китайских высокопрофессиональных сотрудника, некоторые из которых являются стипендиатами Национального фонда National Natural Science Foundation of China for Distinguished Young Scholars (аналогичен премии NSF Career Awards), и 22 китайских молодых специалиста.

Для содействия развитию научного направления МИД были основаны 2 государственных ключевых лабораторий: Государственная ключевая лаборатория передовых технологий синтеза и обработки





материалов и Государственная ключевая лаборатория силикатных материалов для архитектуры. Первая лаборатория получила оценку «превосходно» среди 21 государственной ключевой лаборатории по МИД в 2018 году. Помимо этого, были построены 2 государственных международных лаборатории для совместных исследований и 4 базы внедрения зарубежных компетенций как инновационного составляющего научной области (известный как «111 Project»).

Международная школа материаловедения и инженерии

Международная школа материаловедения и инженерного дела (МШМИД) была включена в список «Сети международных образовательных центров» при поддержке Государственной администрации КНР по делам иностранных экспертов и Министерства образования КНР в июне 2015 года как одна из 16 международных школ по всей стране.

Руководствуясь «Национальной стратегией развития, ориентированной на инновации» и большую потребность в реформировании национальной системы высшего образования, МШМИД стремится создать ведущее в мире направление МИД путем привлечения исследовательского и преподавательского состава высокого уровня, создания инновационной пилотной зоны обучения и формирования инновационной системы подготовки талантов. Руководствуясь идеями «сотрудничества предпринимательства, международной кооперации и сотрудничества в области исследований», МШМИД организовала 21 группу наставников под руководством ученых или видных профессоров, а также 4 междисциплинарные группы по обучению инновациям и предпринимательству.

Стремясь стать ведущим мировым разработчиком строительных материалов и новых материалов в 21 веке, МШМИД оценивает инновационные способности как одну из ключевых возможностей и проводит реформирование инновационной системы подготовки кадров в рамках программы бакалавриата, магистратуры и докторантуры, а также международной программы обучения. МШМИД предлагает студентам всеобъемлющую учебную программу, которая охватывает материаловедение, естественные науки, отраслевые энергетические науки, науки об окружающей среде, информатику и изучение передовых производственных технологий. Чтобы познакомить всех студентов с международным опытом, реализуются совместные программы обучения в сотрудничестве с ведущими мировыми университетами. Кроме того, при МШМИД создано несколько платформ для всестороннего развития студентов, таких как Форум выдающихся исследователей, Международный форум по видению будущего развития, Семинар оценки качества образования, Студенческое научное общество (СНО) материаловедения Уханьского технологического университета. СНО материаловедения пять лет подряд с 2018 по 2022 год удостаивается награды Chapter of Excellence Award.

Государственная стратегическая лаборатория перспективных технологий синтеза и обработки материалов (Уханьский технологический университет)

Государственная ключевая лаборатория перспективных технологий синтеза и обработки материалов была утверждена Государственной комиссией планирования развития в 1987 году. После государственной инспекции она была открыта для общественности в марте 1990 года. Лаборатория находится в непосредственном ведении Министерства науки и технологии. В настоящее время профессор Гу Бинлинь, академик Китайской академии наук, является председателем академического Комитета лаборатории, а профессор Фу Чжэн И, академик Китайской инженерной академии, является директором лаборатории. Лаборатория расположена в Уханском технологическом университете и является ключевой государственной лабораторией, специализирующейся в области новых материалов. Факультет материаловедения и инженерного дела Уханского технологического университета был классифицирован как первоклассное государственное ключевое научное направление, включенное в национальный проект «985», «Создание учебной программы мирового уровня» и получил оценку А+ в четвертом раунде национальной оценки научных направлений. Стремясь к глобальным передовым исследованиям в области материаловедения и удовлетворяя основные национальные потребности, эта лаборатория представляет собой платформу мирового класса для технологии компаундинга и подготовки материалов, для разработки передовых композитных материалов для крупных национальных проектов и отраслей промышленности, а также для оказания поддержки на национальном стратегическом уровне. Лаборатория сообщила об оригинальных и систематических результатах исследований с международным участием в области трансформационных технологий, передовых новых материалов и междисциплинарных областей, и поэтому она возглавляет разработку нескольких стратегических передовых новых материалов на международном уровне. Лаборатория способствует развитию первоклассных исследовательских талантов во всем мире посредством передовых научных исследований в области материаловедения и технологий. Кроме того, лаборатория создала культуру международных совместных инноваций и провела международные совместные исследования по принципу «win-win», тем самым укрепив международное влияние, привлекательность и сплоченность лаборатории. Лаборатория добилась исторического прорыва по оценке ключевых государственных лабораторий в области материаловедения.



Сосредоточившись на общем видении и целях, лаборатория фокусируется на создании и разработке многокомпонентных, разномасштабных и многослойных композитных материалов и теории проектирования материалов, изучение которых строится на основных исследовательских платформах, включающих технологию градиентных композитных материалов, технологию изготовления композитных материалов «в момент образования», нанокомпозитную технологию и интегрированные инновации. В настоящее время проводятся исследования пяти ключевых материалов, в том числе передовых композитных материалов для крупных национальных проектов и опорных отраслей, материалов для эффективного преобразования и хранения энергии для новых энергетических технологий, нанокомпозитных биоматериалов для естественных наук, информационных функциональных материалов для информационных технологий и передовых новых материалов для трансформационных технологий. Таким образом, лаборатория установила следующие пять отличительных направлений исследований: градиентная композитная технология и новые материалы, технология изготовления композитных материалов «в момент образования» и новые материалы, нанокомпозитная технология и новые материалы, преобразующая технология и передовые новые материалы, а также принципы композитных материалов и дизайн материалов.

В лаборатории работает активная и инновационная исследовательская группа, состоящая в основном из молодых исследователей и исследователей среднего возраста. 100 постоянных сотрудников, в том числе 1 академик Китайской академии наук, 2 академика Китайской инженерной академии, 1 академик Королевской академии наук и искусств Бельгии, 2 академика Европейской академии наук и искусств, 1 академик Австралийской инженерно-технологической академии, 1 академик Всемирной академии керамики, 12 исследователей национального уровня, 1 главный научный сотрудник Национальной программы «973», 5 стипендиатов национального фонда



«Outstanding Youth Science Fund» и 30 стипендиатов «Национального плана поддержки талантов» и т.д. Лаборатория активно поддерживает выдающихся ученых, которые приезжают и проводят совместные исследования по всему миру в университетах и исследовательских институтах мирового уровня. В последние годы лаборатория направила несколько выдающихся молодых ученых в международные университеты мирового уровня более чем на один год для проведения совместных исследований.

Лаборатория делает упор на глобальный академический обмен и сотрудничество. За последние пять лет мы приняли на работу 25 зарубежных ученых в качестве почетных и приглашенных профессоров в основных областях исследований с целью создания благоприятных условий работы для всемирно известных ученых и проведения совместных исследований в лаборатории. Лаборатория наладила взаимовыгодное сотрудничество с Мичиганским университетом; Японским агентством аэрокосмических исследований (JAXA); Институтом материаловедения Университета Тохоку (Япония); Центром исследования материалов Оксфордского университета (Великобритания); Центром исследования композитов Калифорнийского университета (США) и Национальным институтом топливных элементов (Канада), а также с другими всемирно известными научно-исследовательскими учреждениями. Министерство науки и технологий создало «Международную совместную лабораторию передовых технологий синтеза и обработки материалов», которая является одной из первых 33 международных совместных лабораторий в Китае. Кроме того, Государственная администрация КНР по делам иностранных экспертов и Министерство образования совместно сформировали три научные базы, поддерживаемые Программой инноваций и развития талантов, а именно «Новые композитные материалы и передовые функциональные материалы», «Передовые технологии подготовки и прикладного проек-

тирования новых функциональных тонкопленочных материалов» и «Инновации и таланты для увеличения срока службы композитов». Опираясь на эти важные платформы международного сотрудничества, лаборатория осуществила несколько ключевых государственных проектов с международным сотрудничеством и добилась плодотворных результатов.

В настоящее время площадь лаборатории составляет 25 тыс. 350 м², с оснащением современным оборудованием для синтеза и обработки материалов, а также самыми современными приборами для анализа структуры материалов, характеристики и тестирования производительности. Общая оценочная стоимость оснащения лаборатории составляет приблизительно 430 млн юаней.

Знакомство с Государственной ключевой лабораторией силикатных материалов для архитектуры

Государственная ключевая лаборатория силикатных материалов для архитектуры получила одобрение для открытия Министерством науки и техники Китая (МНТК) в октябре 2011 года, а в июле 2013 года прошла экспертизу МНТК. Лаборатория развивает основные фундаментальные теории и общие ключевые технологические вопросы в процессе разработки и во время срока службы силикатных материалов для архитектуры, разрабатывает методы производства с низкой нагрузкой на окружающую среду и теории повышения энергоэффективности, исследует и разрабатывает высокоэффективные и многофункциональные строительные материалы для поддержки основных инженерных конструкций, разрабатывает экологически чистые, энергосберегающие и интеллектуальные строительные системы, а также предлагает новые теории, новые методы и основные ключевые технологии для достижения долгосрочной стабильности и переработки строительных материалов и конструкций.

Основными направлениями работы лаборатории являются исследования для снижения нагрузки на окружающую среду, функциональное проектирование и регулирование, исследования «поведения» материалов во время срока службы и принципы продления срока службы, а также переработка силикатных материалов для строительства.

Лаборатория занимает площадь 12 500 м² и оснащена профессиональным исследовательским оборудованием стоимостью более 100 миллионов юаней, образуя исследовательскую платформу, включающую восемь профессиональных вторичных лабораторий и один общественный экспериментальный центр. Исследовательская платформа имеет мощности для проведения исследований в области науки и техники теплового оборудования, цемента и вяжу-

2023 交叉学科材料国际高端研讨会
2023 International Seminar on Interdisciplinary Materials

中国·武汉 2023.7.19-7.21



ящих материалов, бетона, стекла, керамики, пленок и покрытий, стеновых и дорожных материалов.

Лаборатория доступна как для китайских, так и для международных заявок и нацелена на внутренние и международные академические обмены и сотрудничество. На базе лаборатории была создана «Международная база научно-технического сотрудничества в области экологически чистых строительных материалов», которая в 2013 году была определена МНТК в качестве модели международной базы научно-технического сотрудничества.

Инновационные достижения научных исследований лаборатории вносят большой вклад в национальную экономику и социальное развитие, включая предоставление ключевой технической поддержки для строительства основной национальной инфраструктуры страны, стимулирование структурных преобразований и технологической модернизации традиционной промышленности строительных материалов, а также содействие внедрению стратегий энергосбережения и сокращению выбросов.

Знакомство с журналом *Interdisciplinary Materials*

Научный журнал *Interdisciplinary Materials* (ISSN: 2767-441X) был запущен Уханьским технологиче-

ским университетом совместно с John Wiley & Sons, Inc в декабре 2021 года.

Interdisciplinary Materials – это рецензируемый журнал открытого доступа с быстрой публикацией статей, фокусирующийся на междисциплинарных исследованиях между материаловедением и другими дисциплинами, такими как физика, химия, математика, механика, биология, энергетика, окружающая среда, информация, инженерия и т. д. Журнал стремится представлять информацию о передовых разработках в области науки и техники по всему миру.

Ожидается, что *Interdisciplinary Materials* будет использовать междисциплинарный, особый передовой и комплексный подход ко всем областям материаловедения, одновременно способствуя обмену идеями между учеными, занимающимися различными направлениями исследований. Аудитория журнала будет включать ученых-физиков, химиков, математиков, механиков, биологов, специалистов в области энергетики, окружающей среды, материаловедения, инженеров-теоретиков и практиков, а также политических деятелей.

Первый выпуск журнала вышел в свет в январе 2022 года. Журнал включен в базы данных Emerging Sources Citations Index (ESCI), Ei Compendex и Directory of Open Access Journals (DOAJ).

Контактная информация

Уханьский технологический университет
430070, Китай, провинция Хубэй, г. Ухань,
район Хунгшан, 122 Луоши Роуд,
Тел: 86-27-87884448; Факс: 86-27-87879466
E-mail: sklwut@whut.edu.cn
Контактные лица: Джо Сянг, Джоу Лихуа

R

Circular economy in recycling concrete and reinforced concrete waste

Anna V. Graneva^{1*} , Kirill I. Lushin² , Ivan S. Pulyaev² , Victoria D. Kudryavtseva³ 

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

² Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

³ Russian University of Transport, Moscow, Russia

* Corresponding author: e-mail: a121269@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. In the process of demolition and dismantling of emergency buildings, as well as during construction and reconstruction, more than 70 million tons of construction waste are generated annually in Russia. The circular economy is based on the principle of resource renewal, recycling of secondary raw materials, technological measures to return waste to the repeated economic turnover. Nowadays the problem of saving natural resources and reducing construction waste is especially urgent. About 80% of construction waste is heavy and light reinforced concrete, from which can be produced secondary crushed stone, increasing the use of which is one of the tasks in the transition of linear economy to a circular economy. **Materials and methods.** The study of the implementation of a set of organizational, economic and technological solutions aimed at the reuse of construction waste was carried out. The analysis was carried out on the example of using secondary aggregates obtained from concrete scrap. **Results and discussions.** In the course of the research the necessity of concrete scrap involvement into repeated economic turnover was proved, as its use in construction fully meets the requirements of the set tasks in the field of energy and resource saving and environmental safety. **Conclusion.** Recycled crushed stone is a valuable resource that contributes to the sustainable development of the economy as a whole and reduces the harmful impact of the construction industry on the environment.

KEYWORDS: recycling, circular economy, recycling concrete and reinforced concrete scrap, secondary crushed stone, construction production waste.

FOR CITATION:

Graneva A.V., Lushin K.I., Pulyaev I.S., Kudryavtseva V.D. Circular economy in recycling concrete and reinforced concrete waste. *Nanotechnologies in construction*. 2024; 16 (1): 50–58. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-1-50-58>. – EDN: RJSBT.

INTRODUCTION

With the development of industrial production, increasing rates and volumes of construction of buildings and structures, the level of natural resources decreases from year to year, and the process of their extraction becomes more complicated. With the increase in the level of consumption of the population, there is a growing need to erect residential buildings that meet environmental, thermophysical, aesthetic norms and citizens' requirements for modern housing. To renew the housing stock, housing renovation programs are developed and implemented, which leads necessarily to the demolition of emergency as well as obsolete housing stock. The issue of using reinforced con-

crete scrap is also relevant in connection with the demolition of destroyed buildings as a result of military operations. Not only in the process of demolition and dismantling of buildings, but also during construction, reconstruction, landscaping every year in Russia more than 70 million tons of construction waste is generated, of which less than 25% of the volume is sent for recycling. Since most construction elements are manufactured in ways that do not allow dismantling them at the end of their service life, they are mostly disposed of in landfills or incinerated [1]. In the best case, the remaining waste is sent to landfills, which negatively affects the ecological condition of the natural environment and leads to unsustainable waste of raw material stocks. Due to the low level of control over the formation,

transportation and disposal of construction waste, negligent organizations allow spontaneous dumping of garbage in forests, near roads, on the territories of specially protected natural objects. In addition, the construction of buildings and structures leads to significant greenhouse gas emissions both directly on construction sites and during the production of construction materials such as cement and concrete. Thus, the construction industry is perceived as one of the largest industries in the world with a significant impact on the global environment, economy and society in terms of sustainable development [2]. In order to reduce the environmental impact, various methods are used: improving the energy efficiency of buildings, minimizing waste on construction sites, creating construction materials that require less energy in production and with the possibility of recycling or safe disposal after use, and improving waste management systems on construction sites.

THE NEED TO DEVELOP A CIRCULAR ECONOMY IN CONSTRUCTION

The linear economy in construction involves the use of natural resources for the production of materials,

products and structures, followed by waste disposal after demolition or dismantling of buildings. Concrete, being the main construction material nowadays, consumes a large amount of non-renewable natural resources. It has been found that 2.5 tons of concrete per person, which corresponds to 17.5 billion tons per year for the entire world population, requiring 2.62 billion tons of cement, 1.75 billion tons of water, and 13.12 billion tons of aggregate [3]. Circular economy (or recycling) is an economy based on the principle of renewal of natural resources through recycling, utilization of renewable energy sources, reuse of waste through recovery and recycling, unlike linear economy [4].

From the scientific point of view, “recycling” is a system of organizational, economic and technological measures for the return of production and consumption waste into repeated economic turnover [5].

The Government of the Russian Federation Order No. 868-r dated May 10, 2016 approved the Strategy for the development of the construction materials industry for the period up to 2020 and further perspective up to 2030, which involves stimulating the development of the market of secondary material resources of anthropogenic ori-

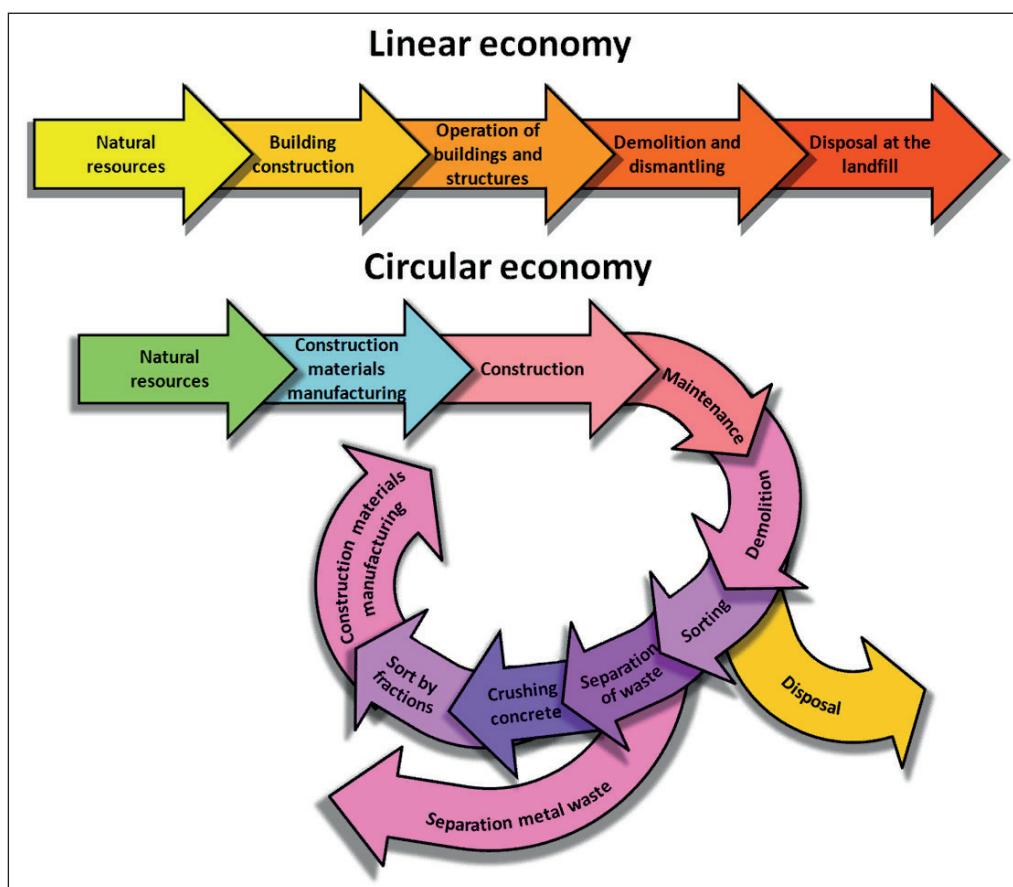


Fig. 1. Difference between linear economy and circular economy on the example of recycling scrap concrete and reinforced concrete

gin and activation of the process of creating by-products at enterprises to process waste into finished products. The action plan approved by the Order of the Government of the Russian Federation No. 630-r dated April 6, 2017 in the development of the above strategy, in terms of the use of secondary resources is supposed to analyze the technologies of production of construction materials and products [4].

More and more regions of the Russian Federation are launching new rules for construction waste disposal. For example, in the Moscow region, a system has been created that reflects all information about companies transporting construction waste, which allows to exclude unauthorized waste disposal [6].

On the initiative of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation, Federal Law No. 268-FZ dated 14.07.2022 "On Amendments to the Federal Law "On Production and Consumption Waste" and Certain Legislative Acts of the Russian Federation" was issued, which will regulate the involvement of wastes, including those from construction production, in secondary turnover. In 2024, it is planned to develop a register of materials and products in the production of which secondary resources will be used, and in the future, after 2030, the burial of secondary resources will be prohibited.

APPLICATION OF CIRCULAR ECONOMY IN CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE PROCESSING

All conducted and planned activities on the use of closed cycle in construction waste utilization lead to the development of appropriate technologies.

The generated construction waste consists of scrap concrete, reinforced concrete, bricks, polymeric materi-

als, bitumen, asphalt, and wood waste. About 80% of the waste is heavy and light reinforced concrete (approximately 4:1 ratio). Large scrap concrete and reinforced concrete is pre-destroyed, debris is removed, washed, sorted into fractions: 5–20, 20–40, 40–70.

The choice of the method of processing concrete debris is determined by a number of conditions, such as the possibility of access to the waste processing area, organization of the place for storage of equipment and materials, etc. There are three basic schemes for organizing the production of concrete and reinforced concrete products processing:

1 scheme – installation of technological equipment at the site of dismantling (demolition) of buildings and structures and obtaining aggregate with its subsequent transportation to the concrete plant or facility;

2 scheme – organization of production for processing of concrete scrap into crushed stone, production of concrete mix at the site of demolition of capital construction objects;

3 scheme – transportation of concrete debris to the enterprise for crushed stone production [7].

The so-called secondary crushed stone is used for flooring in non-residential buildings, roads with low traffic intensity, parking lots as drainage, as part of railway embankments, for backfilling of paths, construction of small architectural forms, as a means of ice control (sift, concrete or brick scrap of the smallest fraction (up to 10 mm) [8, 9].

Secondary crushed stone according to the main indicators meets the requirements of GOST 8267-93 "Crushed stone and gravel from dense rocks for construction works. Technical conditions (with Amendments N 1-4)" [10] Fig. 2.

The demolition of a four-unit residential building of the demolished series results in about 5.5 thousand

Table 1
Comparison of characteristics of secondary and granite crushed stone fraction 5-20

Item No.	Characteristics	Test results	
		Secondary crushed stone	Granite crushed stone
1	The content of clay and pulverulent particles, %	0.11	0.65
2	Content of grains of lamellar and needle-shaped, %	6.7	7.5
3	Strength (crushability), %	18.9% (grade 600)	4.1% (grade 1400)
4	Freeze-thaw resistance	F25–F50	> F150
5	Presence of harmful organic impurities	Not found	Not found
6	True specific gravity, kg/m ³	2685	2718
7	Porosities and voidness, %	51.1	47.5
8	Average bulk density, kg/m ³ ¹⁰	1219	1344
9	Water absorption	6.22	0.57

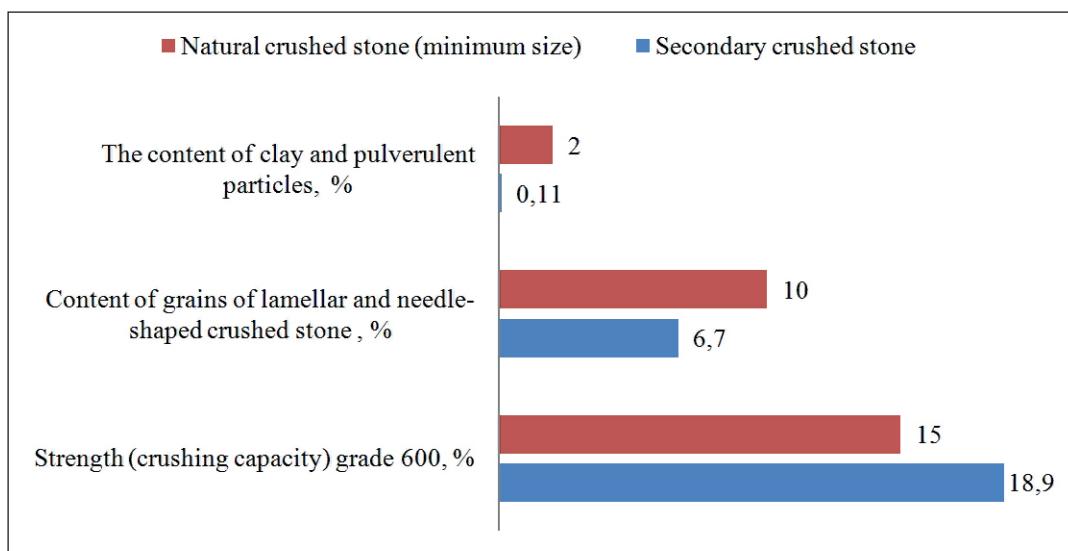


Fig. 2. Compliance of secondary crushed stone characteristics with the requirements of GOST 8267-93

cubic meters of concrete slabs or blocks. During the renovation program at least 30 million cubic meters of construction waste will have to be generated additionally [11]. In 2022–2023 alone, 300 houses will be demolished. To produce 1 m³ of concrete of class B25 using recycled crushed stone, 960–1010 kg of recycled crushed stone of 5–20 mm fraction is required [12].

The advantages of using recycled crushed stone include the following factors:

- Recycling construction waste into crushed stone helps reduce the amount of waste sent to landfills;
- The use of recycled materials reduces the need to extract new natural raw materials;
- The economic benefit of using recycled crushed stone at the point of production plays an important role in the current economic situation;
- Reducing carbon emissions reduces the burden on the environment.

EXPERIMENTAL STUDIES OF PROPERTIES OF CONCRETE ON SECONDARY AGGREGATE

When performing experimental studies of the basic properties of concrete with recycled aggregate, raw materials were used: cement, sand for construction works, recycled aggregate, ash, chemical additives.

Cement of CEM I 42.5H GOST 30515-2013 was used as a binder. The main characteristics of cement are given in Table 2.

All indicators meet the requirements of GOST 31108 – 2016, GOST 30515 – 2013.

Natural quartz sand was used as fine aggregate (Table 3).

All indicators meet the requirements of GOST 8736-93

During the processing of concrete scrap at the crushing and screening complex “Satori” in Moscow city, the screenings of 5–10 mm fraction were obtained, which was used as coarse aggregate. Chemical mineralogical compositions of concrete scrap are given in Tables 4 and 5.

In order to study the physical and mechanical characteristics reflecting structural properties, the specimens were molded by casting method. Curing of concrete specimens was carried out at normal temperature and humidity. Compressive strength, average density, water absorption were determined according to standard methods as the average of six specimens of test results.

In compositions 1 and 2 granite crushed stone was used as coarse aggregate, in compositions 3 and 4 natural aggregate was replaced by secondary aggregate from concrete scrap.

The concrete specimens were tested in compression at the age of 28 days. The specimens on secondary aggregate showed a strength of 38.25 and 39.2 MPa, which corresponds to concrete class B30 (Fig. 3).

Despite the fact that the properties of recycled crushed stone differ from those of natural crushed stone, the production of concrete and reinforced concrete products from recycled concrete scrap fully meets the requirements of the set tasks in the field of energy and resource saving, environmental safety of capital construction projects.

INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION WASTE RECYCLING

Current research in the field of construction waste recycling focuses on the development of innovative technologies aimed at improving the efficiency and environmental friendliness of the processes.

Table 2
Main parameters of cement CEM I 42.5H [13]

Name of indicators	Unit of measurement	Actual figures
Particle size distribution		
Maximum particle size d (0.9)	micrometer	84.423
Minimum particle size d (0.1)	micrometer	6.572
Average particle size d (0.5)	micrometer	31.984
Arithmetic mean diameter: D (1.0)	micrometer	0.67
Mean volumetric diameter: D (4.3)	micrometer	39.74
Average surface diameter: D (3.2)	micrometer	11.22
Physical indicators		
Normal density of cement dough	%	30
Beginning of setting	h/min	2 h 30 min.
End of setting	h/min	4.5 ч
Cone blur (at B/C = 0.4)	mm	110
Fineness according to the residue on the sieve (No. 008)	%	88
Tensile strength		
In compression (28 days)	MPa	55.6
At bending (28 days)	MPa	8.5

Table 3
Main indicators of sand from Krasnogorsk sand quarry [13]

Name of indicators	Unit of measurement	Actual figures
Grain composition	Total balances, %	
2.5		1.4
1.25		2.8
0.63		16.8
0.315		65.8
0.14		94.2
< 0.14		100
Coarseness modulus		1.7
Clay content in lumps	%	no
bulk density	g/m ³	1578
True density	g/m ³	2632
Dusty and clayey particles	%	1.1
hollowness	%	44

Table 4
Mineralogical composition of concrete scrap

Content, %							
SiO ₂	CaCO ₃	Ca(OH) ₂	CaCO ₃ • MgCO ₃	KAlSi ₃ O ₈	NaAlSi ₃ O ₈	C ₃ S	Ca ₆ Al ₂ (SO ₄) ₃ (OH) ₁₂ • 26H ₂ O
Silica	Calcite	Portlandite	Dolomite	Microcline	Albit	Tricalcium silicate	Ettringite
61	16	0.9	3	6.0	10.8	1.9	0.4

Table 5
Chemical composition of concrete scrap

Oxide	Content, %
SiO ₂	53.29
CaO	31.17
Al ₂ O ₃	6.02
Fe ₂ O ₃	3.01
MgO	2.23
K ₂ O	1.42
SO ₃	1.12
Na ₂ O	0.907
P ₂ O ₅	0.295
TiO ₂	0.268
Cl	0.143
MnO	0.0849
CuO	0.012
Cr ₂ O ₃	0.0118
ZnO	0.0113
Co ₃ O ₄	0,007

One of the promising directions is the use of nanotechnology to improve the properties of building materials. Various types of nanoparticles can be used as additives, including nanosilicates, nanoclay, carbonate nanotubes and metal nanooxides. Each of these types contributes to improving certain properties of concrete. For example, the introduction of nanosilica into concrete mixes can produce concretes with a denser structure and improved mechanical properties [14, 15], which can compensate for some deterioration in strength performance due to the use of secondary aggregate.

Another direction can be considered the development of methods for deep purification of waste from pollutants, which allows to improve the quality of the obtained secondary raw materials. This is especially relevant for waste containing heavy metals and other toxic substances. The application of advanced filtration and purification methods helps to eliminate these impurities, making materials safer for reuse.

Another direction may be the possibility of using artificial intelligence to optimize the sorting and recycling of construction waste. These technologies make it possible to identify different types of materials more efficiently and determine the most appropriate methods of their recycling [16].

Life cycle studies of secondary construction materials are also an important part of the research. This includes the analysis of environmental impact at all stages – from waste collection and processing to production and use

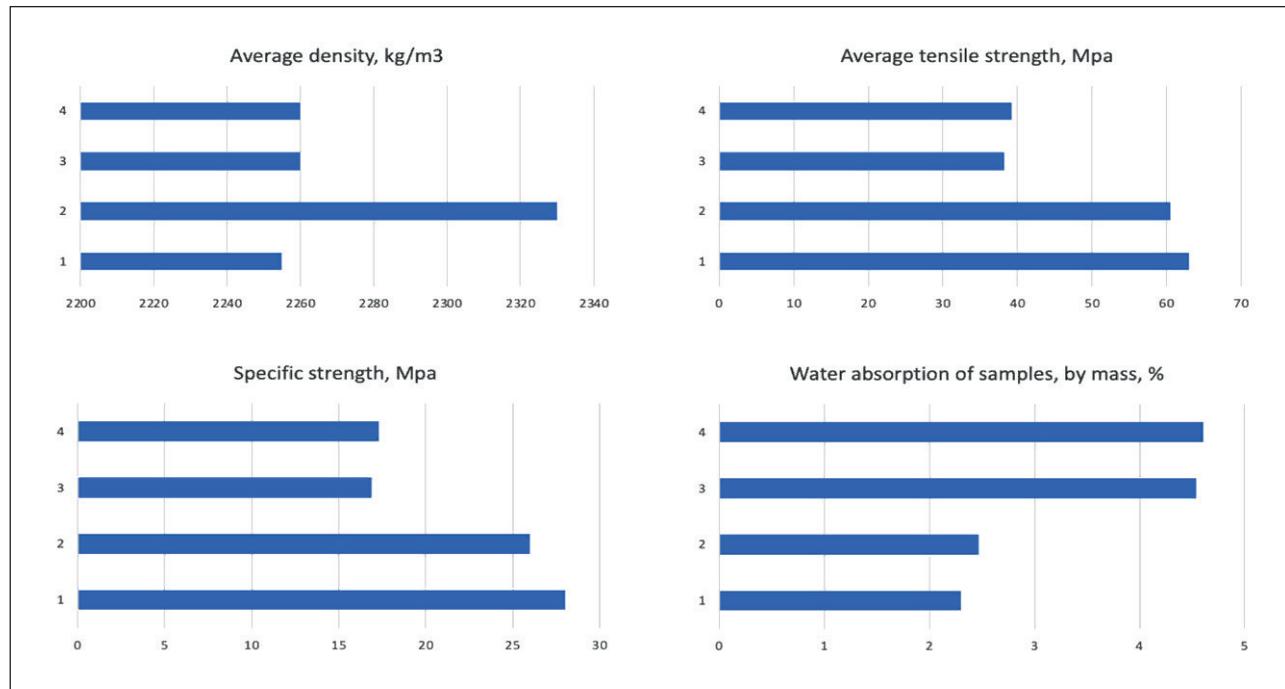


Fig. 3. Comparison of the main characteristics of concrete samples on natural aggregate (1, 2) and secondary aggregate (3, 4)

Table 6
Granulometric composition of crushed stone from concrete scrap

Names of balances	Residues on sieves. % by weight						
	12.5	10	7.5	5	2.5	1.25	Bottom
Private	0.1	1	58.0	28.0	11.6	0.9	0.4
Complete	0.1	1.1	59.1	87.1	98.7	99.6	100

Table 7
Physical and mechanical characteristics of crushed stone

Main features	Units of measurement	Test results
True density ρ_{net}	kg/m ³	2590
Bulk density ρ_{bac}	kg/m ³	1205
Water demand W _p	%	4.8
Grain content of lamellar (flaky) grains	%	18.7
Dust content	%	1.2
Crushed stone crushability grade	—	600
Loss of weight when determining the crushability grade	%	10.0
Content of weak grains with strength less than 20 MPa	%	3

of final products. This approach allows us to assess the environmental feasibility and efficiency of recycling materials, which requires the formation of information systems for collecting engineering and environmental characteristics of the environment in places of production, use and utilization of construction materials, both in the form of information in environmental declarations and in an independent form [17, 18].

The above research and development areas offer great opportunities to improve environmental sustainability in

the construction sector, as well as to reduce the consumption of primary resources and construction waste.

The widespread implementation of the closed cycle economy through the introduction of rational processing schemes, application of new generations of equipment, technologies and innovative research will lead to improved quality and availability of secondary crushed stone, lowering its cost, which will ensure its competitiveness with natural aggregates [19, 20].

CONCLUSION

In fulfillment of the modern legislation, taking into account the positive properties and in connection with the currently significant and ever-increasing over time volume of demolished emergency, obsolete and conflict-damaged buildings, the issue of expanding the nomenclature of products from secondary concrete rubble is relevant. This can be not only a wider use of it as an aggregate for the production of new building materials and products, but also in the following cases:

- use as a permeable pavement for pedestrian walkways, driveways, in order to filter sediments and reduce the amount of wastewater to be discharged by the storm sewer system;
- as a base for rails on railroad tracks due to its resistance to dynamic loads;
- filling of wire gabions, which can serve not only for decorative purposes, but also as retaining walls, reinforcing the shorelines of water bodies, etc.;
- as a lining layer for new landfills to prevent harmful substances from entering the ground;
- as an aggregate for decorative plasters;

Table 8
Concrete mix compositions

No. of concrete mix composition	Cement	Coarse aggregate				Fine aggregate Quartz sand		Water
		Natural		Secondary				
		%	kg	%	kg	%	kg	kg/m ³
1	487	1094	100	—	—	625	100	180
2	487	1094	100	—	—	437.5	70	180
3	487	—	—	972	100	625	100	180
4	487	—	—	972	100	437.5	70	180

- as a component of composite binder from mechanically milled powders from waste concrete fractions with low residual strength characteristics and grindability [21].

The latest research and development contribute not only to improving environmental safety and efficiency of construction waste recycling, but also opens up ways to create new, more sustainable building materials and technologies, including those based on recycled crushed stone.

In general, recycled crushed stone is a valuable resource that contributes to the development of the economy as a whole and reduces the environmental impact of the construction industry, although its properties may differ from natural crushed stone. It is important to consider these differences when selecting a material for specific construction applications.

The addition of nanoparticles to secondary concrete is one of the promising directions in the field of construction materials, as it allows to significantly improve the properties of concrete and expand its application area. Nanoparticles can significantly increase the strength and resistance

[22] of secondary concrete to various external influences. This is achieved due to the fact that nanoparticles fill the micropores in concrete, improving its density and homogeneity. The introduction of nanotechnology into the concrete production process opens up new opportunities to improve its performance and extend its service life. The use of nanoparticles, such as nanosilicates, enhances the protective properties of concrete, preventing early aging and deterioration. This is particularly relevant for environments where concrete is exposed to corrosive environments such as salts or acids. Nanoparticles can significantly increase the chemical resistance of the material by preventing penetration and degradation by corrosive agents, making concrete more durable and reliable in service. The field of adding nanoparticles to concrete is being actively researched, and new data on the effect of various nanomaterials on concrete properties are regularly emerging. Nanotechnology in construction opens up new opportunities for improving the quality and durability of construction materials, including concrete obtained from secondary sources.

REFERENCES

1. Yeheyis M. et al. An overview of construction and demolition waste management in Canada: A lifecycle analysis approach to sustainability. *Clean Technologies and Environmental Policy*; 15 (81–91): 2013.
2. Dewagoda K.G. et al. Driving systematic circular economy implementation in the construction industry: A construction value chain perspective. *Journal of Cleaner Production*; 381: 2022.
3. Saimanova O.S. et al. Methods of organizing work on construction and demolition waste recycling. *BIO Web of Conferences*; 43 (8): 2022.
4. Sysoeva E.A., Economy and ecology. *Problems of Modern Economics*; 2 (70): 2019. Available at: <http://www.m-economy.ru/art.php?nArtId=6642>
5. Bannikova A.S., Chepeleva K.V., Pukhova V.V. Recycling in construction: problems and prospects for development in the territory of Eastern Siberia. *Modern High Technologies*; 10 (14-21): 2018.
6. Vasileva A., Mertsalova A., Voronov A. Against the demolition there are techniques. *Newspaper Kommersant*; 24: 2022. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/5206904>
7. Oleinik P.P., Oleinik S.P. Organization of the construction waste recycling system. *Moscow State University of Civil Engineering*; 250: 2009.
8. Recommendations on the use of recycling products of substandard concrete and reinforced concrete products. *Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete*; 9: 1984.
9. Vaisberg L.A., Kameneva E.E. Study of the composition and physical-mechanical properties of secondary crushed stone from crushed concrete. *Construction Materials*; 6 (41-45): 2014.
10. Beppaev Z.U. et al. Study of the dependence of grain composition and grade of recycling crushed stone on the crushability from the strength of the original utilized concrete. *Bulletin of the Scientific Center of Construction*; 3 (5-16): 2021. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-3\(30\)-5-16](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-3(30)-5-16)
11. Anfimova A.Y. Problems of construction waste disposal during renovation. *Bulletin*; 1 (2): 2019. Available at: <https://vestnik.mi.university/journal/article.php?id=2152>
12. Kalgin A.A., Fakhratov M.A., Sokhryakov V.I. Experience in using waste crushed concrete in the production of concrete and reinforced concrete products. *Construction Materials*; 6 (32–33): 2010.
13. Petropavlovskaya V.B. et al. Basalt dust removal product in the composition of the organomineral complex for the production of concrete mixes. *Chemistry, Physics and Mechanics of Materials*; 3 (26) (60-72): 2020.

14. Flores-Vivian I. et al. Effect of SiO₂ nanoparticles on the properties of cement materials. Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; 11 (6-16): 2018.
15. Aleksandrova O.V. et al. The Effect of Mineral Admixtures and Fine Aggregates on the Characteristics of High-Strength Fiber-Reinforced Concrete. Materials; 15 (8851): 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15248851>
16. Gorodnova N.V., The use of artificial intelligence in ‘SMART-ECOLOGY’ projects. Discussion; 105 (34-48): 2021.
17. Zhuk P.M., Lavrusevich A.A. Geoecological aspects of the life cycle analysis of construction materials. Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Applied Ecology. Urban Studies; 3 (99-111): 2020. <https://doi.org/10.15593/2409-5125/2020.03.09>
18. Vigovskaya A., Aleksandrova O., Bulgakov B. Life cycle assessment (LCA) in building materials industry. XXI International Scientific Conference on Advanced in Civil Engineering Construction – The Formation of Living Environment (FORM 2018), Conference Series-Materials Science and Engineering; 106: 2017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/5/052021>
19. Budzinsky P.A., Dyachkova O.N. Concrete disposal at the construction site during the renovation of urbanized territories. Potapov Readings: Proceedings of the All-Russian Scientific Conference dedicated to the memory of Doctor of Technical Sciences; 23-29: 2021. <https://doi.org/10.22227/978-5-7264-2875-8.2021.23-29>
20. Larsen O., Naruts V., Aleksandrova O. Self-compacting concrete with recycled aggregates. Materials Today: Proceedings, International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment. ICMTMTE; 2023–2026: 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.065>
21. Aizenstadt A.M. et al. Integral indicators of quality of used concrete for secondary use. Nanotechnologies in Construction; 13 (5) (276–281): 2021. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-5-276-281>
22. Artamonova O.V. Synthesis of nanomodifying additives for the technology of construction composites: monograph. Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Voronezh; 100: 2016.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anna V. Graneva – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, a121269@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1599-6018>

Kirill I. Lushin – Cand. Sci. (Eng.), Dean of the Faculty of Urbanism and Municipal Economy, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia, kirilllushin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3214-6480>

Ivan S. Pulyaev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of “Industrial and Civil Engineering”, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia, ivanes50@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7785-2784>

Victoria D. Kudryavtseva – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of “Construction Materials and Technologies”, Russian University of Transport, Moscow, Russia, ruslavik@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5090-4839>

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Anna V. Graneva – research concept; writing a source text.

Kirill I. Lushin – scientific supervision.

Ivan S. Pulyaev – final conclusions.

Victoria D. Kudryavtseva – writing the original text.

The authors declare no conflicts of interest.

The article was submitted 12.01.2024; approved after reviewing 05.02.2024; accepted for publication 09.02.2024.

Экономика замкнутого цикла при переработке отходов из бетона и железобетона

Анна Викторовна Гранева^{1*} , Кирилл Игоревич Лушин² , Иван Сергеевич Пуляев² 
Виктория Давидтбеговна Кудрявцева³ 

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

² Московский политехнический университет, Москва, Россия

³ Российский университет транспорта, Москва, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: a121269@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В процессе сноса и демонтажа аварийных зданий, а также при строительстве и реконструкции ежегодно в России образуется более 70 млн. тонн строительных отходов. В основе экономики замкнутого цикла лежит принцип возобновления ресурсов, переработки вторичного сырья, технологических мероприятий по возвращению отходов в повторный хозяйствственный оборот. В настоящее время проблема экономии природных ресурсов, уменьшения отходов строительного производства особенно актуальны. Около 80% строительных отходов составляет тяжелый и легкий железобетон, из которого может производиться вторичный щебень, увеличение объемов использования которого является одной из задач при переходе линейной экономики на экономику замкнутого цикла. **Материалы и методы.** Проведено изучение вопроса реализации комплекса организационных, экономических и технологических решений, целью которых является повторное использование отходов строительства. Анализ проводился на примере использования вторичных заполнителей, полученных из бетонного лома. **Результаты и обсуждения.** В ходе исследований доказана необходимость вовлечения бетонного лома в повторный хозяйствственный оборот, так как использование его в строительстве в полной мере отвечает требованиям поставленных задач в области энерго- и ресурсосбережения и экологической безопасности. **Выводы.** Вторичный щебень представляет собой ценный ресурс, способствующий устойчивому развитию экономики в целом и сокращению вредного воздействия строительной индустрии на экологию.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: рециклинг, экономика замкнутого цикла, переработка лома из бетона и железобетона, вторичный щебень, отходы строительного производства.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Гранева А.В., Лушин К.И., Пуляев И.С., Кудрявцева В.Д. Экономика замкнутого цикла при переработке отходов из бетона и железобетона // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т. 16, № 1. С. 50–58. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-1-50-58>. – EDN: RJESBT.

ВВЕДЕНИЕ

С развитием промышленного производства, увеличением темпов и объемов возведения зданий и сооружений из года в год уменьшается уровень природных ресурсов, усложняется процесс их добычи. При увеличении уровня потребления населения растет необходимость в возведении жилых зданий, удовлетворяющих экологическим, теплофизическим, эстетическим нормам и требованиям граждан к современному жилью. Для обновления жилищного

фонда разрабатываются и реализуются программы реновации жилья, что ведет непременно к сносу аварийного, а также морально устаревшего жилищного фонда. Вопрос использования железобетонного лома также актуален и в связи со сносом разрушенных зданий в результате военных действий. Не только в процессе сноса и демонтажа зданий, но и при строительстве, реконструкции, благоустройстве ежегодно в России образуется более 70 млн тонн строительных отходов, из которых на переработку отправляется менее 25% объема. Поскольку большинство строи-

ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

тельных элементов изготавливаются способами, не позволяющими демонтировать их в конце срока службы, они в основном утилизируются на свалках или сжигаются [1]. В лучшем случае оставшиеся отходы отправляются на свалки, что негативно влияет на экологическое состояние природной среды и приводит к нерациональной трате сырьевых запасов. Из-за низкого уровня контроля за образованием, транспортировкой и размещением строительного мусора нерадивые организации допускают стихийные навалы мусора в лесах, возле дорог, на территориях в особо охраняемых природных объектах. Кроме того, строительство зданий и сооружений приводит к значительным выбросам парниковых газов как непосредственно на стройплощадках, так и во время производства строительных материалов, таких как цемент и бетон. Таким образом, строительная индустрия воспринимается как одна из крупнейших отраслей в мире, оказывая значительное влияние на глобальную окружающую среду, экономику и общество с точки зрения устойчивого развития [2]. Чтобы уменьшить вредное влияние на окружающую среду, применяются различные методы: повышение энергоэффективности зданий, минимизация отходов на стройплощадках, создание строительных материалов, требующих меньше энергозатрат в производстве и с возможностью переработки или безопасной утилизации после использования, а также совершенствование систем управления отходами на строительных площадках.

НЕОБХОДИМОСТЬ РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИКИ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Линейная экономика в строительстве предполагает использование природных ресурсов для производства материалов, изделий и конструкций с последующим захоронением отходов после сноса или демонтажа зданий. Бетон, являясь в настоящее время основным строительным материалом, потребляет большое количество невозобновляемых природных ресурсов. Было выявлено, что на одного человека приходится 2,5 тонны бетона, что соответствует 17,5 миллиардов тонн в год на все население планеты, для производства которого требуется 2,62 миллиарда тонн цемента, 1,75 миллиарда тонн воды и 13,12 миллиарда тонн заполнителя [3]. Экономика замкнутого цикла (или рециклиинг) – это экономика, в основе которой, в отличие от линейной, лежит принцип возобновления природных ресурсов путем переработки вторсырья, использования возобновляемых источников энергии, повторного применения отходов путем восстановления и переработки [4].

С научной точки зрения «рециклиинг» – это система организационно-экономических и технологических мероприятий по возвращению отходов производства и потребления в повторный хозяйственный оборот [5].

Распоряжением Правительства Российской Федерации от 10 мая 2016 года № 868-р утверждена Стратегия развития промышленности строитель-



Рис. 1. Отличие линейной экономики и экономики замкнутого цикла на примере переработки лома бетона и железобетона

ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

ных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года, которая предполагает стимулирование развития рынка вторичных материальных ресурсов техногенного происхождения и активизации процесса создания на предприятиях попутных производств по переработке отходов в готовую продукцию. Планом мероприятий, утвержденным распоряжением Правительства Российской Федерации от 6 апреля 2017 года № 630-р в развитие указанной стратегии, в части использования вторичных ресурсов, предполагается проведение анализа технологий производства строительных материалов и изделий [4].

Все больше регионов Российской Федерации запускают новые правила утилизации строительных отходов. Например, в Московском регионе создана система, в которой отражается вся информация о компаниях, перевозящих строительные отходы, что позволяет исключать несанкционированный вывоз отходов [6].

По инициативе Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации издан Федеральный закон от 14.07.2022 № 268-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» и отдельные законодательные акты Российской Федерации», в рамках которого будет регулироваться вовлечение отходов, в том числе и от строительного производства, во вторичный оборот. В 2024 году запланирована разработка реестра материалов и изделий, в производстве которых должны будут использованы вторичные ресурсы, в перспективе после 2030 года захоронение вторичных ресурсов будет под запретом.

Таблица 1
Сравнение характеристик вторичного и гранитного щебня фракции 5-20

№ п.п.	Наименование характеристик	Результаты испытаний	
		Вторичный щебень	Гранитный щебень
1	Доля пылевидных и глинистых включений	0,11	0,65
2	Доля зерен пластинчатой и игловатой форм	6,7	7,5
3	Прочность (дробимость)	18,9% (марка 600)	4,1% (марка 1400)
4	Морозостойкость	F25–F50	> F150
5	Органические примеси	—	—
6	Истинная плотность щебня, кг/м ³	2685	2718
7	Пористость, %	51,1	47,5
8	Средняя насыпная плотность, кг/м ³	1219	1344
9	Водопоглощение, %	6,22	0,57

ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ



Рис. 2. Соответствие характеристик вторичного щебня требованиям ГОСТ 8267-93

Так называемый вторичный щебень используется как для устройства полов в нежилых зданиях, дорог с небольшой интенсивностью движения, автостоянок в качестве дренажа, в составе железнодорожных насыпей, так и для подсыпки дорожек, сооружения малых архитектурных форм, как средство борьбы с гололедом (отсев, бетонный или кирпичный лом самой мелкой фракции (до 10 мм) [8, 9].

Вторичный щебень по основным показателям соответствует требованиям ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия (с Изменениями N 1-4)» [10] (рис. 2).

При сносе четырехподъездного жилого дома сносимой серии получается около 5,5 тыс. кубометров обломков бетонных плит или блоков. В ходе программы реновации должно будет образоваться дополнительно не менее 30 млн. кубометров строительных отходов [11]. Только в 2022–2023 годах снесено 300 домов. Для изготовления 1 м³ бетона класса В25 с применением вторичного щебня требуется 960–1010 кг вторичного щебня фракции 5–20 мм [12].

К преимуществам использования вторичного щебня можно отнести следующие факторы:

- переработка строительных отходов в щебень помогает уменьшить объем отходов, отправляемых на свалки;
- использование переработанных материалов сокращает необходимость в добыче нового природного сырья;
- экономическая выгода при применении вторичного щебня в местах его производства играет важную роль в настоящей экономической ситуации;
- уменьшение выбросов углерода позволяет снизить нагрузку на окружающую среду.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ БЕТОНА НА ВТОРИЧНОМ ЗАПОЛНИТЕЛЕ

При выполнении экспериментальных исследований основных свойств бетона с вторичным заполнителем были использованы сырьевые материалы: цемент, песок для строительных работ, рециклинговый заполнитель, зола, химические добавки.

В качестве вяжущего использовался цемент класса ЦЕМ I 42,5Н ГОСТ 30515-2013. Основные характеристики цемента приведены в табл. 2.

Все показатели соответствуют требованиям ГОСТ 31108 – 2016, ГОСТ 30515 – 2013.

В качестве мелкого заполнителя применялся природный кварцевый песок (табл. 3).

Все показатели соответствуют требованиям ГОСТ 8736-93.

При переработке бетонного лома на дробильно-сортировочном комплексе «Сатори» в городе Москве был получен отсев фракцией 5–10 мм, который использовался в качестве крупного заполнителя. Химический минералогический составы бетонного лома приведены в табл. 4 и 5.

С целью изучения физико-механических характеристик, отражающих структурные свойства, формировали образцы литьевым способом. Твердение бетонных образцов осуществлялось при нормальной температуре и влажности. Предел прочности при сжатии, среднюю плотность, водопоглощение определяли по стандартным методикам как среднее из шести образцов результатов испытания.

В составах 1 и 2 в качестве крупного заполнителя применялся гранитный щебень, в составах 3 и 4 природный заполнитель был заменен на вторичный из бетонного лома.

Таблица 2
Основные показатели цемента ЦЕМ I 42,5Н [13]

Наименование показателей	Ед. измерения	Фактические показатели
Гранулометрический состав		
Максимальный размер частиц d (0,9)	мкм	84,423
Минимальный размер частиц d (0,1)	мкм	6,572
Средний размер частиц d (0,5)	мкм	31,984
Средний арифметический диаметр: D (1,0)	мкм	0,67
Средний объемный диаметр: D (4,3)	мкм	39,74
Средний поверхностный диаметр: D (3,2)	мкм	11,22
Физические показатели		
Нормальная густота цементного теста	%	30
Начало схватывания	ч/мин	2 ч 30 мин
Конец схватывания	ч/мин	4,5 ч
Расплыв конуса (при В/Ц = 0,4)	мм	110
Тонкость помола по остатку на сите (№ 008)	%	88
Предел прочности		
При сжатии (28 суток)	МПа	55,6
При изгибе (28 суток)	МПа	8,5

Таблица 3
Основные показатели песка Красногорского песчаного карьера [13]

Наименование показателей	Ед. измерения	Фактические показатели
Зерновой состав	Полные остатки, %	
2,5		1,4
1,25		2,8
0,63		16,8
0,315		65,8
0,14		94,2
< 0,14		100
Модуль крупности		1,7
Содержание глины в комках	%	нет
Насыпная плотность	г/м ³	1578
Истинная плотность	г/м ³	2632
Пылевидные и глинистые частицы	%	1,1
Пустотность	%	44

Образцы бетона испытывались на сжатие в возрасте 28 суток. Образцы на вторичном заполнителе показали прочность 38,25 и 39,2 МПа, что соответствует классу бетона В30 (рис. 3).

Несмотря на то что свойства вторичного щебня отличаются от свойств природного щебня, производство бетонных и железобетонных изделий из рециклированного бетонного лома в полной мере отвечает требованиям поставленных задач в области энерго- и ресурсосбережения, экологической безопасности объектов капитального строительства.

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПЕРЕРАБОТКЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Современные исследования в области переработки строительных отходов фокусируются на разработке инновационных технологий, направленных на повышение эффективности и экологичности процессов.

Одним из перспективных направлений является использование нанотехнологий для улучшения свойств строительных материалов. В качестве добавок могут использоваться различные типы наночастиц, включая наносиликаты, наноглины, карбонатные нанотрубки и нанооксиды металлов. Каждый из этих типов вносит свой вклад в улучшение определенных свойств бетона. Например, введение нанокремнезема в бетонную смесь позволяет получить бетоны с более плотной структурой и повышенными механическими свойствами [14, 15], что может скомпенсировать некоторое ухудшение прочностных показателей из-за применения вторичного заполнителя.

Другим направлением можно считать разработку методов глубокой очистки отходов от загрязнителей,

Таблица 4
Минералогический состав бетонного лома

Содержание, %							
SiO_2	CaCO_3	Ca(OH)_2	$\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$	KAlSi_3O_8	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	C_3S	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$
Кремнезем	Кальцит	Портландит	Доломит	Микроклин	Альбит	Трехкальциевый силикат	Этtringит
61	16	0,9	3	6,0	10,8	1,9	0,4

Таблица 5
Химический состав бетонного лома

Оксид	Содержание, %
SiO_2	53,29
CaO	31,17
Al_2O_3	6,02
Fe_2O_3	3,01
MgO	2,23
K_2O	1,42
SO_3	1,12
Na_2O	0,907
P_2O_5	0,295
TiO_2	0,268
Cl	0,143
MnO	0,0849
CuO	0,012
Cr_2O_3	0,0118
ZnO	0,0113
Co_3O_4	0,007

что позволяет повысить качество получаемого вторичного сырья. Это особенно актуально для отходов, содержащих тяжелые металлы и другие токсичные вещества. Применение передовых методов фильтрации и очистки способствует устранению этих примесей, делая материалы более безопасными для повторного использования.

Таблица 6
Гранулометрический состав щебня из бетонного лома

Наименования остатков	Остатки на ситах, % по массе						
	12,5	10	7,5	5	2,5	1,25	Дно
Частные	0,1	1	58,0	28,0	11,6	0,9	0,4
Полные	0,1	1,1	59,1	87,1	98,7	99,6	100

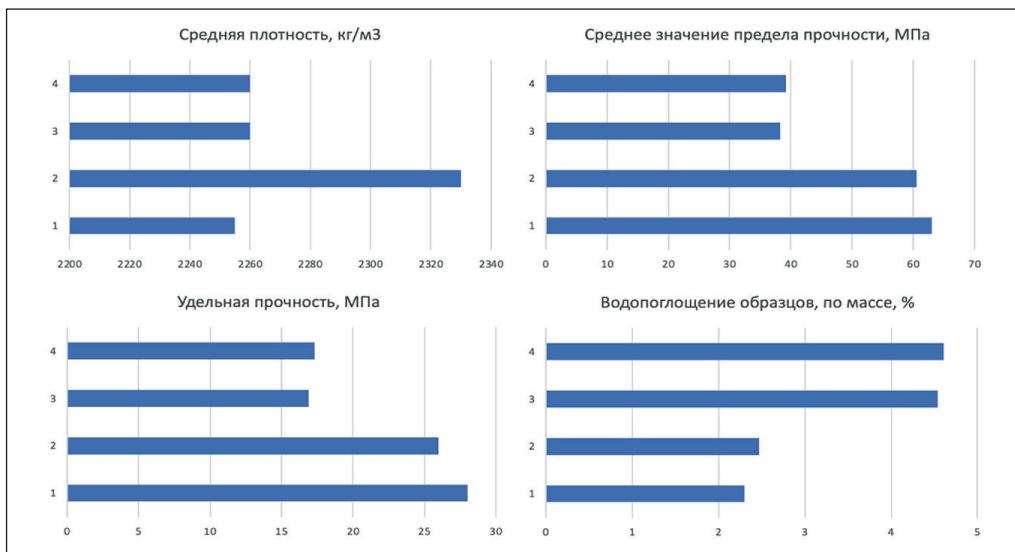


Рис. 3. Сравнение основных характеристик образцов бетона на природном заполнителе (1, 2) и вторичном заполнителе (3, 4)

Таблица 7
Физико-механические характеристики щебня

Основные характеристики	Ед. изм.	Результаты испытаний
Истинная плотность, $\rho_{\text{ист}}$	кг/м ³	2590
Насыпная плотность, $\rho_{\text{нас}}$	кг/м ³	1205
Водопотребность, Вп	%	4,8
Содержание зерен пластинчатой (лещадной)	%	18,7
Содержание пылевидных	%	1,2
Марка по дробимости щебня	—	600
Потеря массы при определении марки по дробимости	%	10,0
Содержание слабых зерен прочностью менее 20 МПа	%	3

ВЫВОДЫ

Во исполнение современного законодательства, учитывая положительные свойства и в связи со значительным в настоящее время и все возрастающим с течением времени объемом сносимых аварийных, морально устаревших и разрушенных в ходе конфликтов зданий, вопрос расширения номенклатуры изделий из вторичного бетонного щебня является актуальным. Это может быть не только более широкое использование его в качестве заполнителя для производства новых строительных материалов и изделий, но и в следующих случаях:

- применение в качестве водопроницаемого покрытия пешеходных дорожек, подъездных путей, с целью фильтрации осадков и уменьшения количества сточных вод, которые должны отводиться ливневой канализацией;
- как основание под рельсы на железнодорожных путях благодаря своей устойчивости к динамическим нагрузкам;

Таблица 8
Составы бетонной смеси

№ состава бетонной смеси	Цемент	Крупный заполнитель				Мелкий заполнитель Кварцевый песок	Вода		
		Природный		Вторичный					
		%	кг	%	кг				
1	487	1094	100	—	—	625	100	180	
2	487	1094	100	—	—	437,5	70	180	
3	487	—	—	972	100	625	100	180	
4	487	—	—	972	100	437,5	70	180	

ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

- наполнение проволочных габионов, которые могут служить не только в декоративных целях, но и в качестве подпорных стен, укрепления береговых линий водоемов и т.п.;
- в качестве выстилающего слоя при оборудовании новых полигонов ТБО для исключения попадания вредных веществ в грунт;
- в качестве заполнителя для декоративных штукатурок;
- в качестве компонента композиционного вяжущего из порошков механического помола из фракции отработанного бетона с низкими остаточными прочностными характеристиками и размолоспособностью [21].

Новейшие исследования и разработки не только способствуют улучшению экологической безопасности и эффективности переработки строительных отходов, но и открывают пути для создания новых, более устойчивых строительных материалов и технологий, в том числе и на основе вторичного щебня.

В целом, вторичный щебень представляет собой ценный ресурс, способствующий развитию экономики в целом и сокращению вредного воздействия строительной индустрии на экологию, хотя его свойства могут отличаться от природного щебня. Важно учитывать эти различия при выборе материала для конкретных строительных задач.

Добавление наночастиц во вторичный бетон является одним из перспективных направлений

в области строительных материалов, поскольку это позволяет значительно улучшить свойства бетона и расширить область его применения. Наночастицы могут значительно увеличивать прочность и устойчивость [22] вторичного бетона к различным внешним воздействиям. Это достигается за счет того, что наночастицы заполняют микропоры в бетоне, улучшая его плотность и однородность. Внедрение нанотехнологий в процесс производства бетона открывает новые возможности для улучшения его характеристик и продления эксплуатационного периода. Использование наночастиц, таких как наносиликаты, способствует усилению защитных свойств бетона, предотвращая его раннее старение и износ. Это особенно актуально для условий, где бетон подвергается воздействию коррозийно-активных сред, таких как соли или кислоты. Наночастицы могут значительно увеличить химическую стойкость материала, препятствуя проникновению агрессивных агентов и разрушению ими, что делает бетон более долговечным и надежным в эксплуатации. Сфера добавления наночастиц в бетон активно исследуется, регулярно появляются новые данные о влиянии различных наноматериалов на свойства бетона. Нанотехнологии в строительстве открывают новые возможности для повышения качества и долговечности строительных материалов, в том числе бетона, полученного из вторичных источников.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Yeheyis M. et al. An overview of construction and demolition waste management in Canada: A lifecycle analysis approach to sustainability. *Clean Technologies and Environmental Policy*; 15 (81–91): 2013.
2. Dewagoda K.G. et al. Driving systematic circular economy implementation in the construction industry: A construction value chain perspective. *Journal of Cleaner Production*; 381: 2022.
3. Saimanova O.S. et al. Methods of organizing work on construction and demolition waste recycling. *BIO Web of Conferences*; 43 (8): 2022.
4. Сысоева Е.А. Экономика и экология // Проблемы современной экономики. 2019. № 2 (70). <http://www.m-economy.ru/art.php?nArtId=6642>
5. Банникова А.С., Чепелева К.В., Пухова В.В. Рециклинг в строительстве: проблемы и перспективы развития на территории Восточной Сибири.// Современные наукоемкие технологии. 2018. № 10. С. 14–21.
6. Васильева А., Мерцалова А., Воронов А. Против слома есть приемы // Газета «Коммерсантъ» № 24 от 10.02.2022. <https://www.kommersant.ru/doc/5206904>
7. Олейник П.П., Олейник С.П. Организация системы переработки строительных отходов. М.: МГСУ, 2009. 250 с.
8. Рекомендации по применению продуктов переработки некондиционных бетонных и железобетонных изделий. НИИЖБ: М., 1984. 9 с.
9. Вайсберг Л.А., Каменева Е.Е. Исследование состава и физико-механических свойств вторичного щебня из дробленого бетона // Строительные материалы. 2014. № 6. С. 41–45.
10. Беппаев З.У., Аствацатурова Л.Х., Колодяжный С.А., Вернигора С.А., Лопатинский В. В. Исследование зависимости зернового состава и марки рециклингового щебня по дробимости от прочности исходного

ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

утилизируемого бетона // Вестник НИЦ Строительство. 2021. № 3. С.5–16. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-3\(30\)-5-16](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-3(30)-5-16)

11. Анфимова А. Ю. Проблемы утилизации строительного мусора в процессе реновации // Вестник. 2019. №1 (2), URL: <https://vestnik.mi.university/journal/article.php?id=2152>

12. Кальгин А.А., Фахратов М.А., Сохряков В.И. Опыт использования отходов дроблённого бетона в производстве бетонных и железобетонных изделий// Строительные материалы. 2010. № 6. С. 32–33.

13. Петропавловская В.Б., Новиженкова Т.Б., Петропавловский К.С., Завадько М.Ю. Базальтовый продукт пылеудаления в составе органоминерального комплекса для производства бетонных смесей. Химия, физика и механика материалов. 2020. № 3 (26). С. 60–72.

14. Флорес-Вивиан И., Прадото Р., Моини М., Кожухова М.И., Потапов В.В., Соболев К.Г. Влияние SiO_2 -наночастиц на свойства цементных материалов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 11. С. 6–16.

15. Aleksandrova O.V. et al. The Effect of Mineral Admixtures and Fine Aggregates on the Characteristics of High-Strength Fiber-Reinforced Concrete. Materials; 15 (8851):2022. <https://doi.org/10.3390/ma15248851>

16. Городнова Н.В. Применение искусственного интеллекта в проектах «SMART-ЭКОЛОГИЯ» // Дискуссия 2021. Вып.105. С. 34–48.

17. Жук П.М., Лаврусович А.А. Геоэкологические аспекты анализа жизненного цикла строительных материалов // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. 2020. № 3. С. 99–111. <https://doi.org/10.15593/2409-5125/2020.03.09>

18. Vigovskaya A., Aleksandrova O., Bulgakov B. Life cycle assessment (LCA) in building materials industry. XXI International Scientific Conference on Advanced in Civil Engineering Construction – The Formation of Living Environment (FORM 2018), Conference Series-Materials Science and Engineering; 106: 2017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/5/052021>

19. Будзинский П.А., Дьячкова О.Н. Утилизация бетона на строительной площадке при реновации урбанизированных территорий НИУ МГСУ Потаповские чтения : сборник материалов Всероссийской научной конференции посвященной памяти доктора технических наук, профессора Александра Дмитриевича Потапова 2021. С. 23–29. <https://doi.org/10.22227/978-5-7264-2875-8.2021.23-29>

20. Larsen O., Naruts V., Aleksandrova O. Self-compacting concrete with recycled aggregates. Materials Today: Proceedings, International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment. ICMTMTE; 2023-2026: 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.065>

21. Айзенштадт А.М., Данилов В.Е., Дроздюк Т.А., Фролова М.А., Гарамов Г.А. Интегральные показатели качества отработанного бетона для вторичного использования // Нанотехнологии в строительстве. 2021. Т. 13, № 5. С. 276–281. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-5-276-281>

22. Артамонова О.В. Синтез наномодифицирующих добавок для технологии строительных композитов: монография // Воронежский ГАСУ. Воронеж. 2016. 100 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гранева Анна Викторовна – кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия, a121269@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1599-6018>

Лушин Кирилл Игоревич – кандидат технических наук, декан факультета урбанистики и городского хозяйства, Московский политехнический университет, Москва, Россия, kirilllushin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3214-6480>

Пуляев Иван Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, Московский политехнический университет, заведующий кафедрой «Промышленное и гражданское строительство», Москва, Россия, ivanes50@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7785-2784>

Кудрявцева Виктория Давидбеговна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные материалы и технологии», Российский университет транспорта, Москва, Россия, ruslavik@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5090-4839>

ВКЛАД АВТОРОВ

Гранева А.В. – концепция исследования; написание исходного текста.

Лушин К.И. – научное руководство.

Пуляев И.С. – итоговые выводы.

Кудрявцева В.Д. – написание исходного текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 12.01.2024; одобрена после рецензирования 05.02.2024; принятая к публикации 09.02.2024.



HOW TO PROPERLY TEST AND APPLY BETOPRESS® LYOPHOBIC SOLS AND SOL-BASED MODIFIERS IN CEMENT CONCRETE

This article provides information in the accessible form about a completely different approach to the testing and application of lyophobic sols and sol modifiers in cement concrete, in contrast to any other chemical additives that are classified as true solutions in liquid form. The criteria outlined in clause 6.11 of GOST 27006-2019 for the selection of compositions produced in laboratory conditions cannot be extended to sols and sol modifiers, which are stabilized colloidal solutions. This specifically pertains to the preparation of concrete mixtures for subsequent testing. GOST 27006-86 was released during a period when all chemical additives used in concrete were solely available in the form of true solutions, comprising fully dissolved molecules and ions resulting from the complete dissolution of all components in water.

Much later, on January 1, 2020, a new GOST 27006-2019 was put into effect, which was not much different from the previous one. Everything would have been fine, if it were not for the introduction in the CIS of a whole series of innovative chemical modifiers for concrete in the form of colloidal mortars from April 2012, to which the rules for the selection of concrete compositions according to GOST 27006-2019 clause 6.11. In the laboratory were impossible to apply. A colloidal mortar refers to a mortar in which at least one of its ingredients exists in a colloidal state, as a result of which both the sols and sol-containing modifiers for cement concrete fall under this definition.

Chemical products of the «БЕТОПРЕСС»® series from the Russian company ООО «НПО БЕТОХИМИКС»® (Simferopol) are stabilized lyophobic sols and ash-containing modifiers, the purpose of which is to directly affect forming a special crystalline structure of cement stone in the nanorange in the process of hydration of cement grains for promoting concrete enhanced characteristics that are almost impossible to obtain when using chemical additives in the form of true solutions. For instance, consider the enhanced waterproofing capabilities of cast concrete, water resistance to cast concrete up to W16, which exhibits water absorption of less than 1%. Alternatively, instead of using traditional steaming methods for low-slump concrete products, we can opt for chemical activation of the hydration and hardening processes of cement. This approach accelerates the rate at which the concrete gains compressive strength, reaching

the design level within just 5–7 days, as opposed to the conventional 28-day period. In this latter case, a maximum sol consumption of 0.05% (dry weight) relative to the weight of cement would be sufficient.

This method also imparts the property of hydrophobicity to the manufactured products, which remains effective without expiration.

The author's long-lasting search on the Russian market for comparative tests of similar products in practice form has been unsuccessful, since all of them exist only in the information realm, or rather, in all kinds of scientific papers, articles, reports, dissertations, technical specifications and even patents. For example, one of the dissertations discusses the use of sols and highlights the effectiveness of two sol-containing additives: "Hardness-M" TU 5745-006-51556791-2002 and «ДЭЯ-3С» TU 3743-005-46969976-2003. In 2004, these additives demonstrated remarkable performance when incorporated into industrial batches of cement concrete. Additionally, the dissertation states that the findings have led to the publication of 16 research articles and reports in international and industry journals. Furthermore, three technical specifications and three technological regulations have been developed based on the dissertation's materials. Moreover, four patent applications have been filed as a result of the research. Subsequently, the purchase of the above-mentioned products on the construction market is simply not possible due to the complete absence of them. Perhaps this is the reason why there is no de-

Строительная лаборатория ООО «БЭТТА»
СИСТЕМА ДОБРОВОЛЬНОЙ СЕРТИФИКАЦИЯ СДС «СИЛ-МТ»

Орган по сертификации ООО «Волгоградский ЦОСМ»

Сертификат соответствия выполняемых работ (услуг),

по измерениям и испытаниям продукции

№ 00329 с «13» августа 2021г.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЯ № 32 В

БЕТОНА НА ВОДОНЕПРОНИЦАЕМОСТЬ, ВОДОПОГЛОЩЕНИЕ.

1. Наименование продукции, ее характеристика, обозначение:

Кубы -образцы 100*100 мм из смеси бетонной БСТ В40 П3 W 16

2. Место отбора образцов: завод изготовитель ООО «ВолгКлинСервис».

3. Цель испытаний: определение водонепроницаемости, водопоглощения

4. Нормативная документация, используемая при испытании:

ГОСТ 12730.5 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости

5. Применяемые СИ и ИО: ВВ-2 № б/н.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Маркировка образцов	Дата изготовления	Проектная марка бетона на водонепроницаемость	Дата испытания	Возраст образцов, суток	Диапазон t _i . сек
32B/1	17.03.2023	W 16	14.04.2023	29	580
32B /2	17.03.2023	W 16	14.04.2023	29	588
32 B/3	17.03.2023	W 16	14.04.2023	29	592
32B/4	17.03.2023	W 16	14.04.2023	29	598
32B/5	17.03.2023	W 16	14.04.2023	29	600
32B/6	17.03.2023	W 16	14.04.2023	29	604

Испытания проведены на основе экспресс-метода оценки его водонепроницаемости по ГОСТ127730. Экспресс-метод определения водонепроницаемости бетона основан на наличии установленной статистической зависимости между водонепроницаемостью поверхностных слоев бетона и его водонепроницаемостью, определенной по методу «мокрое пятно».

В качестве параметра, характеризующего водонепроницаемость, используется значение времени (t_i), за которое давление в камере устройства падает на определенную величину.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: t_{cp}= (592+598):2=595 с, что соответствует марке бетона по водонепроницаемости W 16

Результаты испытаний на водопоглощение.

Маркировка образцов	Дата изготовления	Дата начала испытания	Масса высушенног о образца	Масса высушенног о образца, средняя	Дата окончания испытаний	Масса сухого образца	Масса сухого образца, средняя	Водопоглощени е по массе, W _m , %mass.
32B/1	17.03.2023	14.04.2023	2270		17.04.2023	2290		W 0,87
32B /2	17.03.2023	14.04.2023	2280	2275	17.04.2023	2300	2295	W 0,87
32 B/3	17.03.2023	14.04.2023	2275		17.04.2023	2295		W 0,87

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: W_m = 2295-2275 *100 = 0,87 - водопоглощение бетона по массе.

2295

Начальник строительной лаборатории ООО «Бэтта»

Дмитрачкова В.П.



Fig. 1. Concrete waterproof and water absorption test report. The sol additive used was ПК Полипласт (S) 0.85%, and «Флюкс-1ГФ» at 0.025% of the weight of cement



Fig. 2. Vibropressed block made of low-slump concrete on lyophobic sol «ВИБРОФИНИШ СМ-17-ГФ», consumption 0.05% to the weight of cement after 10 days of hardening

tailed information about colloidal solutions, their nature, and handling procedures in any of the GOST standards. However, it is worth noting the recently published GOST ISO/TS 80004-1-2017 “Nanotechnology. Basic Terms and Definitions”. While there are established GOSTs and terminology, and the absence of products in this area. Consequently, it could imply a limited presence of potential manufacturers in this particular field!

There is no point in mentioning patents on this topic: the patents are available, but for some reason no industrial nanomaterials in the form of lyophobic sols for cement concrete are still offered on our construction market. Unless, of course, attention is directed towards colloidal solutions from the «БЕТОПРЕСС»® series, which have been without significant attention for the past 12 years! It seems that this fact has gone unnoticed or perhaps deliberately overlooked. However, it is important to acknowledge that these products not only exist but are also manufactured in substantial quantities by the innovative and unique company, «НПО БЕТОХИМИКС»®, the sole innovator of its kind in Russia.

The above mentioned colloidal solutions are produced with an advanced method of chemical dispersing, using rather complex aggregate of various high-molecular peptizers as stabilizing substances, also developed by the company. All of our lyophobic hydrosols and sol-containing modifiers, along with their corresponding technologies, were not patented as it was unnecessary. However, these products were introduced to the Ukrainian market for unrestricted sale by the developer in early 2012, and they have been available in Russia since 2014, fully authorized

with permits, including the Trademarks of Ukraine and Russia. It turns out that there is a patent, but there is no product, and, conversely, there is no patent, but the product exists, and quite abundant in our case!

Now back to the topic. GOST 27006-2019 clause 6.11 provides recommendations for preparing a concrete mixture for the composition selection in a standard laboratory mixer of gravity or forced action or in manual mode with a volume of no more than 15 liters output of the ready mixture in a container pre-moistened with water and with mixing time for at least 5 minutes. The recommendations provided are not appropriate for the hydrosols or sol-containing additives offered by «НПО БЕТОХИМИКС». These products are specifically designed for industrial applications and are considered professional-grade. Consequently, the conditions for concrete preparation prior to testing should adhere strictly to the production requirements rather than the artisanal guidelines outlined in the above-mentioned GOST.

The fact is that the sols for cast concrete of the «БЕТОПРЕСС»® series are dosed no more than 0.005% (dry weight) relative to the weight of cement and therefore require only intensive mechanical mixing for quick and uniform distribution of all colloidal nanoparticles over the volume of the concrete mixture, and the larger the volume of the mixer and its power, the better the process. The minimum output of the ready-mixed concrete mixture is preferably at least 0.5 m³, which fully corresponds to the manufacturing environment. This applies to both sol modifiers and sol-containing additives. Hence, we highly advise conducting the concrete preparation process for testing our chemical products directly under industrial conditions, using the existing compositions. Otherwise, the effectiveness of our chemical additives may not be evident, as if they are not present at all.

The only alternative to determine the sols effectiveness in comparison with a similar control sample is to directly prepare one or two liters of the mixture in a 5-liter planetary laboratory mixer at a fairly high speed (at least 3rd speed) while stirring for three minutes. Both cement dough and cement-sand mortar can be used here, with sand pre-screened from coarse particles and with the determination of mobility, for comparison, using a laboratory cone of spreadability (KR-1). Then the cement dough should be immediately placed in metal molds with cells of 20×20×20 mm, 12×25×75 mm, and in the case of cement-sand mortar – in molds 70×70×70 mm. After the complete completion of the hardening process, these samples should be tested according to GOST 30459-2008. However, the testing option is suitable only for determining the effectiveness of the colloidal mortar in comparison with the control sample, and it is not the case for selection of the composition for heavy concrete with crushed stone. Yet at the same time it is possible to check the sols for their compatibility with cements from different manufacturers.

The fact is that colloidal particles, being in the mixing water, with a sharp increase in pH in the process of cement hydration are transforming from the sol state into a gel, and for their rapid distribution throughout the entire volume of the concrete mixture in the form of vast amount scattered nanoparticles until the reaction itself (called the sol-gel method in colloidal chemistry) a sufficiently powerful and fast concrete mixer is needed. We have established a successful collaboration with manufacturers who test our products under industrial conditions right on their factory premises. In these controlled environments, where the concrete mixture is thoroughly blended within seconds, we supply them with sol and sol modifiers without encountering any issues. Remarkably, even our long-standing partners, with whom we have maintained a fruitful relationship for 12 years, have not only refrained from reverting to their previous additives in the form of true solutions but also expressed no intention to do so. This can be attributed to the fact that no one wishes to incur additional expenses on cement, let alone compromise the improved quality of their products!

In addition to the developed sol-containing modifiers in the form of superplasticizers of the SP group, we manufacture five sols for high-slump concrete (cast) and two low-slump concrete (semi-dry) used in tamping, hyper- and vibrocompression technologies. The difference between high-slump and low-slump concrete is that sols for cast concrete are mainly recommended to be applied as nanoadditives to domestic liquefiers based on PC, NFS and LST¹, while sols for low-slump concrete are fully finished products for industrial applications. What unites these products is their crystal-forming nature, although each possesses unique properties, levels of effectiveness, and specific applications. For more detailed information about our products, including comprehensive test reports, we encourage you to visit our company's official website, where you can find informative articles providing in-depth insights.

In this article, in more detail we present two of our branded products based on a stabilized iron hydroxide solution for intensive molding of low-slump (granular) concrete – «ВИБРО СМ-16» and «ВИБРОФИНИШ СМ-17-ГФ» (ТУ 2601-001-00823210-2015). The latter product underwent its most recent modification in November-December 2023, resulting in its ability to impart genuine hydrophobicity to the products. Both of these products distinguish themselves from other lyophobic sols, which are typically used in microdoses as additives to chemical admixtures. This distinction arises from the fact that our sols, designed specifically for low-slump concrete mixtures in a particulate state, do not necessitate the use of diluents. This characteristic aligns with their classification as “semi-dry”. Not only do these sols refrain

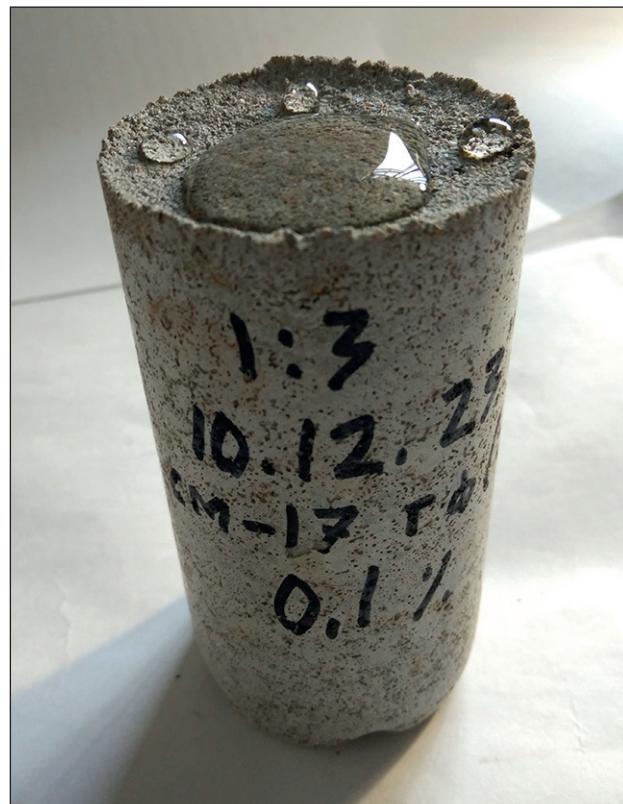


Fig. 3. The cylinder made of cement-sand mixture produced with semi-dry tamping method on lyophobic sol «ВИБРОФИНИШ СМ-17-ГФ», consumption 0.1%

from liquefying mixtures, but they also enable an increase in water consumption while maintaining the particulate state of the mixture. This, in turn, enhances the compaction of the products during pressing and eliminates the risk of mixture adhesion to metal equipment.

As a result, it is the increase in water consumption that leads to increased compaction of products with an intensive physical and mechanical impact on the mixture. When making direct comparison with the composition on any other modifier: by 2–4% or even 6%, but to the control one, in which there is no “chemistry” at all. Due to the increase in the compaction coefficient, in the first variant we get an increase in the compressive strength of products by +20–40%, and in the second by almost +60 (record set +67%) with equal consumption of the binder, since the strength of low-slump concrete does not depend at all on the ratio Water/Cement and the amount of cement, but on its density (volume-weight). In addition, sols allow us to stamp products of the same quality with an ideal surface without sticking to inert materials of different wetness, without the need to constantly “catch” the amount of water in each batch, while reducing the vibration time itself by almost half.

¹ Lignosulphonate.

 ООО «ИНСТИТУТ «КРЫМГИННИЦ» 295022, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Гагарин, 68. тел.: +7(3652)55-04-00, факс: +7(3652)69-24-39 E-mail: info@krigintz.ru www.krigintz.ru ОГРН 1159102054253 ИНН/КПП 9102169394 / 910201000 Член СРО АФОР «Проектчики Крыма» регистрационный № 66 от 14.01.2015 г. Член СРО Ассоциации «ОГН» регистрационный № 116 от 29.06.2018 г. Строительная лаборатория. Подразделение обследования зданий и сооружений, испытаний строительных материалов и изделий. 295022, РК, г. Симферополь, ул. Гагарин, 68, лит. «Б», тел. +7(3652)55-04-12, эл. почта: solovcov@yandex.ru Свидетельство о состоянии измерений и подтверждении Объектов измерений и сооружений, испытания строительных материалов и изделий № 66/0001, от 28.07.2014 г.																	
Протокол испытаний № СТ 0341-0343 от 25 июня 2020 г.																	
Договор	№5.122-20 от 09 июня 2020г.																
Наименование заказчика	ООО «НПО БЕТОХИМИК»																
Адрес заказчика	295017, РФ, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Бекховена, д. 16/2.																
Информация об объекте испытания Наименование объекта Тротуарная плитка ООО «ФЛЮИСТОУН» Наименование проб Бетонные тротуарные плитки 100x200x60 Дата отбора пробы 08.05.2020 г. Дата получения пробы в лабораторию 09.06.2020 г. Информация об отборе пробы Проба получена в акту от 09.06.2020 г. В отборе и транспортировке проб Строительная лаборатория участия не принимала. Ответственность за правильность отбора проб, консервацию, хранения и транспортирования несет «Заказчик».																	
Цель испытаний Определение физико-механических характеристик бетонных образцов-коринов из тротуарной плитки																	
Средства измерений, используемые при проведении испытаний <table border="1"> <tr> <td>№ п/п</td> <td>Наименование и тип СИ</td> <td>Зав. №</td> <td>Сведения о поверке</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>Пресс гидравлический ПММ-125</td> <td>385</td> <td>Свидетельство 02.62.0222.19 действительно до 09.09.2020 г.</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Штангенциркуль торговой марки «SHAN» с цифровым отсчетным устройством</td> <td>F36892</td> <td>Свидетельство о поверке № 03.37.0157.20 действительно до 08.04.2021 г.</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Весы лабораторные ВМ-5101, рег. №6468-07.</td> <td>642615</td> <td>Свидетельство о поверке №02.62.0295.19 действительно до 06.08.2019 г.</td> </tr> </table>		№ п/п	Наименование и тип СИ	Зав. №	Сведения о поверке	1	Пресс гидравлический ПММ-125	385	Свидетельство 02.62.0222.19 действительно до 09.09.2020 г.	2	Штангенциркуль торговой марки «SHAN» с цифровым отсчетным устройством	F36892	Свидетельство о поверке № 03.37.0157.20 действительно до 08.04.2021 г.	3	Весы лабораторные ВМ-5101, рег. №6468-07.	642615	Свидетельство о поверке №02.62.0295.19 действительно до 06.08.2019 г.
№ п/п	Наименование и тип СИ	Зав. №	Сведения о поверке														
1	Пресс гидравлический ПММ-125	385	Свидетельство 02.62.0222.19 действительно до 09.09.2020 г.														
2	Штангенциркуль торговой марки «SHAN» с цифровым отсчетным устройством	F36892	Свидетельство о поверке № 03.37.0157.20 действительно до 08.04.2021 г.														
3	Весы лабораторные ВМ-5101, рег. №6468-07.	642615	Свидетельство о поверке №02.62.0295.19 действительно до 06.08.2019 г.														
Испытательное оборудование, используемое при проведении испытаний <table border="1"> <tr> <td>№ п/п</td> <td>Наименование и тип ИО</td> <td>Зав. №</td> <td>Сведения об аттестации</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>Камера нормального твердения и аллюминиевого хранилища КНТ-72</td> <td>150909</td> <td>Аттестат 01.01002-20 от 17.01.2020 г. действительность до 16.01.2021 г.</td> </tr> </table>		№ п/п	Наименование и тип ИО	Зав. №	Сведения об аттестации	1	Камера нормального твердения и аллюминиевого хранилища КНТ-72	150909	Аттестат 01.01002-20 от 17.01.2020 г. действительность до 16.01.2021 г.								
№ п/п	Наименование и тип ИО	Зав. №	Сведения об аттестации														
1	Камера нормального твердения и аллюминиевого хранилища КНТ-72	150909	Аттестат 01.01002-20 от 17.01.2020 г. действительность до 16.01.2021 г.														
Технические условия и методики испытаний Методики испытаний: 17608-2017 «Плиты бетонные тротуарные. Технические условия», ГОСТ 28570-90 «бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобранным из конструкций», ГОСТ 12736-78 «Бетоны. Методы определения плотности, влажности, водоупорности», ГОСТ 18105-2010 «Правила контроля и сдачи прочности» (продолжение протокола на странице 2)																	

Стр. 2 из 2

Протокол испытаний № СТ 0341-0343 от 25.06.2020 г. (продолжение)

Результаты лабораторных испытаний

Дата начала испытаний: 09.06.2020 г. Дата окончания испытаний: 17.06.2020 г.

Значение влияющих факторов:

Температура, °C:	22,3	Влажность, %:	76,0	Температура, кПа:	98,2
------------------	------	---------------	------	-------------------	------

Физико-механические характеристики бетонных образцов-коринов

№ п/п	№ лаб.	Наименование конструкции	Возраст бетона, (сутки)	Дата		Средняя плотность, кг/м³	Предел прочности при сжатии МПа	Фактический класс бетона ГОСТ 15105-2010 п.7
				Бетонир- зации	Испыта- ния			
1	341	О Мурасан БВА 19,0%	Более 28суток	08.05.2020	17.06.2020	2027	24,0	ВФ-22,5МПа В 22,5
2	342	I ВиброФиниш СМ-17 0,1%	Более 28суток	08.05.2020	17.06.2020	2033	31,4	ВФ-26,9МПа В 25
3	343	II ВиброФиниш СМ-17 0,2%	Более 28суток	08.05.2020	17.06.2020	2070	29,1	ВФ-31,1МПа В 30
1	341	I ВиброФиниш СМ-17 0,1%	Более 28суток	08.05.2020	17.06.2020	2093	33,2	
2	342	II ВиброФиниш СМ-17 0,2%	Более 28суток	08.05.2020	17.06.2020	2098	34,6	33,73
3	343			08.05.2020	17.06.2020	2130	33,4	
1	341	I ВиброФиниш СМ-17 0,1%	Более 28суток	08.05.2020	17.06.2020	2134	35,3	
2	342	II ВиброФиниш СМ-17 0,2%	Более 28суток	08.05.2020	17.06.2020	2123	41,0	38,93
3	343			08.05.2020	17.06.2020	2189	40,5	

Масса до испытания, г

Масса после испытания, г

Величина изменения, %

Среднее значение

1	341	О Мурасан БВА 19,0%	Более 28суток	522,24	551,20	5,54
2	342	I ВиброФиниш СМ-17 0,1%	Более 28суток	532,52	559,90	5,14
3	343	II ВиброФиниш СМ-17 0,2%	Более 28суток	547,96	577,50	5,39
1	341	I ВиброФиниш СМ-17 0,1%	Более 28суток	565,05	595,50	5,38
2	342	II ВиброФиниш СМ-17 0,2%	Более 28суток	572,41	599,40	4,71
3	343			564,92	588,30	4,13
1	341	I ВиброФиниш СМ-17 0,1%	Более 28суток	547,49	571,90	4,45
2	342	II ВиброФиниш СМ-17 0,2%	Более 28суток	557,61	582,20	4,41
3	343			573,86	597,10	4,05

Конец протокола

Результаты испытаний относятся только к данным пробам, прошедшим испытания.

Протокол испытаний не может быть частично воспроизведен без письменного разрешения Строительной лаборатории ООО «Институт «КРЫМГИННИЦ», за исключением воспроизведения в полном объеме.

Заведующий подразделением ОЭиС ИСИИ
Ответственный испытатель:
Инженер лаборатории

А.М.Соловьев
Ю.В.Гвардиева

Fig. 4. Report of comparative tests of the chemical additive «Мурасан БВА19» (manufacturer «Эм Си Баухеми») with the lyophobic sol «ВИБРОФИНИШ СМ-17» (manufacturer ООО «НПО БЕТОХИМИК») in core-samples drilled from paving slabs produced by vibrocompression method of low-slump concrete with the same composition and consumption of cement

That's easily screenable tangible cost savings in the form of an “excessive” amount of cement, which appeared as a result of equalizing compressive strength between all samples, both with and without other additives, up to the requirement of GOST 17608-2017. In order to increase the compressive strength of concrete, we advise not to use extra cement, but use effective sol modifiers, which gives not only benefits due to their little to nothing consumption, but also the highest quality of the ready-for-sale condition for vibropressed products, the durability and frost resistance of which does not depend on the strength itself, but depends on the density of the crystal structure of the cement stone, including the total capillary porosity of the concrete. The latter always increases in direct proportion to the increase in the consumption of the binder.

But even here, some craftsmen try to hand-to-hand prepare a semi-dry mixture with our hydrosols in artisanal laboratory conditions according to GOST 27006-2019, which allows you to mix up mixtures manually in small volumes, which they do, and then form samples for strength tests by vibrating in metal molds with a nozzle underweight. Such cases occur more often at large enterprises, where technologists, considering themselves high-class professionals (and who will check this!?), for

some reason, are very afraid to use our nanosols immediately in production. Another rather important mistake of technologists is the incorrect granulometric selection of inert materials, if the composition itself is intermittent, then in this case nothing will help the manufacturer at all: neither our nanosols, nor the power of the vibropress, nor the increase in cement consumption, the latter will simply get lost in the resulting voids and without any benefit.

At the same time, our air-entrained colloidal mortars for intensive molding of low-slump concrete mixtures, in addition to a significant increase in compressive strength due to an increase in the compaction coefficient (C_c), also have a rather unique property of nanostructuring cement stone, in which, firstly, our air-entrained colloidal mortars show the ability to interrupt capillary porosity with microbubbles of air with an internal hydrophobic surface and reaching the design level within just 7 days, as opposed to the conventional 28-day period, four times reduce. The latter property gives the manufacturer possibility to ship the products directly from the workshop on the second day, bypassing the warehouse, as it has fully reached the required 70% of the design strength. Along with this, forced heating is not required, it is replaced by the sols themselves.

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ И АРХИТЕКТУРЕ
ГУП «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и производственный
институт строительного и градостроительного комплекса Республики Башкортостан» (ГУП институт «БашНИИстрой»)
Испытательный центр «Башстройиспытания». Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.22СЛ37, действителен до 14.07.2019г.
450027, г. Уфа, ул. Уфимское шоссе, 3. Тел./факс (347) 243-35-35

УТВЕРЖДАЮ
 Главный инженер
 ГУП институт «БашНИИстрой»
 Д.А. Синицын
 6 июля 2017г.

Протокол № 2017/893-01 испытаний образцов брускатки вибропрессованной

Заказчик: ООО «Производственная компания АВЕГА»
Основание для проведения работ: письмо исх. № б/н от 01.06.2017г., вх. № 893 от 06.07.2017г.
Наименование НД на материал: ГОСТ 17608-81
Наименование НД на методы испытаний: ГОСТ 12730.3-78, ГОСТ 10180-2012, ГОСТ 18105-2010 (схема Г)
Наименование оборудования: Гидравлический пресс П-50 (зав. № 1592, поверка до 12.07.2017г.), штангенциркуль ШЦ-II (зав. № Р177244, поверка до 08.11.2017г.), линейка стальная (зав. № 231, поверка до 08.11.2017г.), весы электронные МК-15.2-А21 (зав. № 123961, поверка до 09.11.2017г.).
Наименование объекта, место изготовления образцов: ООО «Производственная компания АВЕГА» (г. Стерлитамак). Образцы брускатки вибропрессованной «Старый город» 120×120×60 мм изготовлены с применением добавок ООО «НПО БЕТОХИМИКС», доставлены Заказчиком.
Дата изготовления образцов: 30.05.2017г.

Результаты испытаний на 2 сут. норм. твердения.				Результаты испытаний на 7 сут. норм. твердения.				Результаты испытаний на 28 сут. норм. твердения.					
Дата испытания образцов: 01.06.2017г.				Дата испытания образцов: 06.06.2017г.				Дата испытания образцов: 27.06.2017г.					
Плотность изделий, кг/м ³	Водопоглощение, % по массе	Прочность на сжатие, кгс/см ²	Фактический класс бетона по прочности на сжатие	Плотность изделий, кг/м ³	Водопоглощение, % по массе	Прочность на сжатие, кгс/см ²	Фактический класс бетона по прочности на сжатие	Плотность изделий, кг/м ³	Прочность на сжатие, кгс/см ²	Фактический класс бетона по прочности на сжатие			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			
2251	2,8	397	B30	2221	3,7	B35	2220	2252	478	B35			
2285	2,1	388		2251	2,9		522	2240	466		B35		
2236	3,3	ср. 393		2244	4,3		478	2220	466			B35	
2216	ср. 2,7	ср. 2,7		2230	ср. 3,6		ср. 500	2225	ср. 472				B35
ср. 2247				ср. 2237				2215					
							ср. 2229						

Примечание. Требуемую прочность бетона для проектного класса рассчитывают по формуле 9 ГОСТ 18105-2010:
 $R_T = K_T \cdot B_{\text{ном}}$, где $B_{\text{ном}}$ – проектный класс прочности бетона, МПа; K_T – коэффициент требуемой прочности (при этом $K_T = 1,28$ – все виды бетона, кроме плотного силикатного и ячеистого).

Зав. лабораторией ИСМИ
Испытатель

И.Я. Тевс
Г.Ф. Ишбулдина

Результаты испытаний относятся только к испытанным образцам. Без разрешения руководителя ИЦ «Башстройиспытания» перепечатка протокола запрещена.

Fig. 5. Test report of vibropressed paving slabs made of low-slump concrete with lyophobic sol «ВИБРОФИНИШ CM-17» by the rate of compressive strength gaining no heating up to 80% on the second day and up to 100% on the seventh. Further, the strength does not increase.

In 2024, all “concrete pavement slabs” produced in Russia are subject to mandatory certification according to GOST 17608-2017. This will lead to an increased demand for chemical modifiers, particularly stabilized sols, which can be used in both vibropressed and vibrocast paving slabs. The frost resistance and durability of paving slabs do not depend on their compressive strength. The quality of the crystal structure of the cement stone, first of all, on the correctly located the capillary system within the stone, as well as the diameter and shape of the pores play a significant role. Ideally, the pores should have hydrophobic properties.

All of the above qualities of cement stone are directly affected by chemical modifiers for cement concrete and nothing else. In comparative tests for chemical additives in the form of true solutions with colloidal ones, in the form of lyophobic sols, the latter will always take advantage under industrial conditions, since they have the unique property of forming future crystallization centers in cement stone from artificially introduced nanoscale

colloidal particles for the growth of a three-dimensional spatial grid in the form of a matrix that directly affects its entire structure in the nanorange. Due to the specifics of the product, «БЕТОПРЕСС»® sols for low-slump concrete mixtures, in contrast to sols for cast concrete, have a higher dry matter consumption in the range from 15 to 50 grams per 100 kg of cement, which corresponds to a minimum of 0.05%, and a maximum of 0.2% of the ready-to-sell product in liquid form to the weight of the binder.

«НПО БЕТОХИМИКС»® company will not ignore manufacturers of vibrocasting products, such as concrete paving slabs, curbs, flashings, park architecture, etc. We can offer the lyophobic silica sol «Флюкс-1ГФ», which is allowed to be added in the amount of 0.025% of the commercial product to the mass of cement directly into the cast concrete mixture in the very process of its preparation with the mixing water and without other chemical additives. Within 28 days of hardening, the finished vibratory cast products acquire a pronounced property of

 <p>ООО «ИНСТИТУТ «КРЫМГИНИТИЗ» 295022, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Глинки, 68. тел.: +7(3652)55-04-00, факс: +7(3652)69-24-39 Е-mail: info@krgiintiz.ru www.krgiintiz.ru ОГРН 1159102054253 ИНН/КПП 9102169394 / 910201001 Член СРО Ассоциация «ОГПО» регистрационный № 116 от 27.09.2018 г.</p>	<p>Строительная лаборатория. Подразделение обследования зданий и сооружений, испытаний стройматериалов и изделий. 295022, РК, г. Симферополь, ул. Глинки, 68, лит. «В», тел. +7(3652)55-04-12, эл. почта: solovey@krgiintiz.ru Аттестат акредитации испытательной лаборатории № RUMCС АЛ.991 с сроком действия с 21 января 2020 г. по 21 января 2024 г.</p>																
 <p>Утверждено Заведующий подразделением ОЗС ИСИИ А.М.Соловей</p>																	
<p>Протокол испытаний № СТ 0140-0143 от 29 марта 2023 г.</p>																	
<table border="1"> <tr> <td>Договор</td> <td>№5.78-23 от 27 марта 2023 г.</td> </tr> <tr> <td>Наименование заказчика</td> <td>ООО «НПО БЕТОХИМИК»</td> </tr> <tr> <td>Адрес заказчика</td> <td>295017, РФ, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Бетховена, д. 16/2.</td> </tr> </table>		Договор	№5.78-23 от 27 марта 2023 г.	Наименование заказчика	ООО «НПО БЕТОХИМИК»	Адрес заказчика	295017, РФ, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Бетховена, д. 16/2.										
Договор	№5.78-23 от 27 марта 2023 г.																
Наименование заказчика	ООО «НПО БЕТОХИМИК»																
Адрес заказчика	295017, РФ, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Бетховена, д. 16/2.																
<p>Информация об объекте испытания</p> <table border="1"> <tr> <td>Наименование объекта</td> <td>Кубики литье.</td> </tr> <tr> <td>Наименование проб</td> <td>Бетонные кубы размером 100x100x100мм.</td> </tr> <tr> <td>Лабораторный №</td> <td>Лабораторный № 140-143</td> </tr> </table>		Наименование объекта	Кубики литье.	Наименование проб	Бетонные кубы размером 100x100x100мм.	Лабораторный №	Лабораторный № 140-143										
Наименование объекта	Кубики литье.																
Наименование проб	Бетонные кубы размером 100x100x100мм.																
Лабораторный №	Лабораторный № 140-143																
<table border="1"> <tr> <td>Дата изготовления пробы</td> <td>27.02.2023</td> <td>Дата поступления пробы в лабораторию</td> <td>27.03.2023 г.</td> </tr> <tr> <td>Информация об отборе пробы</td> <td colspan="3">Пробы получены по акту от 27.02.2023 г. Образцы отобраны на стройплощадке. В отборе и транспортировке проб Строительная лаборатория участия не принимала. Ответственность за правильность отбора проб, консервации, хранения и транспортирования несет заказчик.</td> </tr> </table>		Дата изготовления пробы	27.02.2023	Дата поступления пробы в лабораторию	27.03.2023 г.	Информация об отборе пробы	Пробы получены по акту от 27.02.2023 г. Образцы отобраны на стройплощадке. В отборе и транспортировке проб Строительная лаборатория участия не принимала. Ответственность за правильность отбора проб, консервации, хранения и транспортирования несет заказчик.										
Дата изготовления пробы	27.02.2023	Дата поступления пробы в лабораторию	27.03.2023 г.														
Информация об отборе пробы	Пробы получены по акту от 27.02.2023 г. Образцы отобраны на стройплощадке. В отборе и транспортировке проб Строительная лаборатория участия не принимала. Ответственность за правильность отбора проб, консервации, хранения и транспортирования несет заказчик.																
<p>Цель испытаний</p> <p>Определение физико-механических характеристик бетонных образцов.</p> <p>Средства измерений, используемые при проведении испытаний</p> <table border="1"> <tr> <td>№ п/п</td> <td>Наименование и тип СИ</td> <td>Зав. №</td> <td>Сведения о поверке</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>Пресс гидравлический ПММ-125</td> <td>385</td> <td>Свидетельство о поверке №С-КК/06-12-2022/208982695 действительно до 05.12.2023 г.</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Штангенциркуль ШЦ-1-125-0.1-2</td> <td>F36892</td> <td>Свидетельство о поверке №С-КК/17-01-2023/216365704 действительно до 16.01.2024 г.</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Весы лабораторные ВМ-5101, рег. №36468-07</td> <td>642615</td> <td>Свидетельство о поверке №С-КК/02-06-2022/161992917 действительно до 01.06.2023 г.</td> </tr> </table>		№ п/п	Наименование и тип СИ	Зав. №	Сведения о поверке	1	Пресс гидравлический ПММ-125	385	Свидетельство о поверке №С-КК/06-12-2022/208982695 действительно до 05.12.2023 г.	2	Штангенциркуль ШЦ-1-125-0.1-2	F36892	Свидетельство о поверке №С-КК/17-01-2023/216365704 действительно до 16.01.2024 г.	3	Весы лабораторные ВМ-5101, рег. №36468-07	642615	Свидетельство о поверке №С-КК/02-06-2022/161992917 действительно до 01.06.2023 г.
№ п/п	Наименование и тип СИ	Зав. №	Сведения о поверке														
1	Пресс гидравлический ПММ-125	385	Свидетельство о поверке №С-КК/06-12-2022/208982695 действительно до 05.12.2023 г.														
2	Штангенциркуль ШЦ-1-125-0.1-2	F36892	Свидетельство о поверке №С-КК/17-01-2023/216365704 действительно до 16.01.2024 г.														
3	Весы лабораторные ВМ-5101, рег. №36468-07	642615	Свидетельство о поверке №С-КК/02-06-2022/161992917 действительно до 01.06.2023 г.														
<p>Испытательное оборудование, используемое при проведении испытаний</p> <table border="1"> <tr> <td>№ п/п</td> <td>Наименование и тип ИО</td> <td>Зав. №</td> <td>Сведения об аттестации</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>Камера нормального твердения и вакуумного хранения образцов КНТ-72</td> <td>150909</td> <td>Аттестат 01.00004-23 от 13.01.2023 г. действительно до 12.01.2024 г.</td> </tr> </table>		№ п/п	Наименование и тип ИО	Зав. №	Сведения об аттестации	1	Камера нормального твердения и вакуумного хранения образцов КНТ-72	150909	Аттестат 01.00004-23 от 13.01.2023 г. действительно до 12.01.2024 г.								
№ п/п	Наименование и тип ИО	Зав. №	Сведения об аттестации														
1	Камера нормального твердения и вакуумного хранения образцов КНТ-72	150909	Аттестат 01.00004-23 от 13.01.2023 г. действительно до 12.01.2024 г.														
<p>Технические условия и методики испытаний</p> <table border="1"> <tr> <td>Методики испытаний: (шифры НД, наименование методик)</td> <td>ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». ГОСТ 12730-2020 «Бетоны. Методы определения плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости». ГОСТ 26633-2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия» ГОСТ 18105-2018 «Правила контроля и оценки прочности»</td> </tr> </table> <p>(продолжение протокола на странице 2)</p>		Методики испытаний: (шифры НД, наименование методик)	ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». ГОСТ 12730-2020 «Бетоны. Методы определения плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости». ГОСТ 26633-2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия» ГОСТ 18105-2018 «Правила контроля и оценки прочности»														
Методики испытаний: (шифры НД, наименование методик)	ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». ГОСТ 12730-2020 «Бетоны. Методы определения плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости». ГОСТ 26633-2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия» ГОСТ 18105-2018 «Правила контроля и оценки прочности»																

Стр. 2 из 2

Протокол испытаний № СТ 0140-0143 от 29 марта 2023 г. (продолжение)

Результаты лабораторных испытаний

Дата начала испытаний: 29.03.2023 г. Дата окончания испытаний: 29.03.2023 г.

Значения влияющих факторов:

Температура, °С:	24,0	Влажность, %:	83,0	Давление, кПа:	97,9
------------------	------	---------------	------	----------------	------

Физико-механические характеристики бетонных образцов

Лабораторный №	Дата изготовления (изготовивший Заказчик)	Дата испытания	Применение добавки	Размеры, см (ГОСТ Р 58939-2020)			Средняя плотность, г/см ³ (ГОСТ 12730-2020)	Массовый коэффициент	Прочность при скатке с учетом пастообразного коагулята, МПа	Среднее значение прочности на сжатие, МПа	Фактический класс бетона по прочности по ГОСТ 13.03.2010 (класс I)
				a	b	h					
140	27.02.2023	29.03.2023	контрольные	10,08	10,00	10,06	2090		19,00	18,76	VФ=15,01
				10,08	10,00	10,06	2109		18,52		
141	27.02.2023	29.03.2023	Кремнезем-Флюкс-1ГФ 0,005%	10,10	10,00	10,10	2098		22,16	23,42	VФ=18,74
				10,07	10,00	10,10	2099		24,68		
142	27.02.2023	29.03.2023	Кремнезем-Флюкс-1ГФ 0,005% + ПК МЕГА 50 0,2%	10,07	10,00	10,10	2097		29,69	31,43	VФ=25,14
				10,11	10,00	10,08	2099		33,17		
143	27.02.2023	29.03.2023	Лиофобный золь-гидрат-ротор 0,005% + ПК МЕГА 50 0,2%	10,08	10,00	10,08	2107		28,85	29,43	VФ=23,54
				10,07	10,00	10,07	2119		30,01		

Конец протокола

Результаты испытаний относятся только к данным пробам, прошедшим испытания.

Протокол испытаний не может быть частично воспроизведен без письменного разрешения Строительной лаборатории ООО «Институт «КРЫМГИНИТИЗ», за исключением воспроизведения в полном объеме.

Ответственные исполнители:
 Инженер лаборатории
 Лаборант


 Ю.В. Гаврикова

 Ю.И. Шушпанников

Fig. 6. Test report of hydrophobic concrete with silica sol «Флюкс-1ГФ» at its dry matter consumption of 0.005% to cement (5 g per 100 kg) to the control sample without adding chemicals. The test result is an increase in strength by +25% with equal W/C ratio, the same amount of binder and density of the cast concrete. Only nanomodifiers can function this way

a hydrophobic surface due to the joint reaction of the sol based on organosilicon with cement hydration products, primarily lime with the direct influent of carbon dioxide from the air. The compressive strength of the concrete itself, in turn, increases by +25% compared to the control sample without adding chemicals.

Lyophobic silica sol also is nanostructuring the cement stone, and therefore, increasing its water and frost resistance and in parallel is accelerating the hardening of the products themselves, starting from the first day. This will subsequently allow products to continue gaining their strength in a temperature regime, starting from -8 degrees below zero and above. Please do not confuse hydrophobization with waterproofing. Hydrophobic paving slabs, both vibropressed and vibrocast, have almost the same water absorption when they are immersed in water for several days as non-hydrophobic ones. The difference is that on the road, precipitation water will roll down from the hydrophobic surface directly into the underlying layer. As for the unprotected slabs, they will absorb water with all surface, which can subsequently lead to the appearance of rather unsightly fades on the products in the form of lime outcrops, and to peeling due to frost.

In case both manufacturer and consumer are interested in cast concrete products with water resistance of W16 and even more with water absorption of less than 1%, lets compare water absorption with natural granite, which is within the range of 0.2% to 0.5%. In this case we will have to use the same lyophobic silica sol «Флюкс-1ГФ», but as a hydroinsulating and crystallizing nano-additive to any available polycarboxylate hyperplasticizers in the amount of 25 grams of sol per 100 kg of cement or to polycarboxylate ether as a raw material purchased directly from its manufacturer. In the latter case, an anti-foaming agent should be added. «Флюкс-1ГФ» could be recommended for the construction of basements, underground parking lots, pools and foundations of heavy waterproof concrete by the so-called «white bath» water proofing technology. When utilizing such technology, concrete should not only be of quality, but also with a W/C not higher than 0.38!

We offer lyophobic silica sol «Флюкс-2ГФ» for the production of roads and airfield slabs, which have more stringent requirements for counteracting salt aggression than conventional concrete pavement slabs. This sol is entered into the heavy concrete in the polycarboxylate hyperplasticizer and with the same dosage. The silica sol in-

creases the tensile strength of concrete in bending, which is crucial for heavy dynamic and static loads, especially on the road surfaces and on take-off runways. Mind that «Флюкс-2ГФ» is not to be frozen, unlike «Флюкс-1ГФ». «Флюкс-2ГФ» does not work as a low-temperature accelerator: its lower limit is +5°C. At the same time, it will be indispensable in the construction of pavements and runways, because it clearly increases the resistance of salt corrosion and dusting of the concrete surface with almost zero water absorption.

The lyophobic sols of the «БЕТОПРЕСС»® series stabilized in the manufacturing process by special chemicals and high-molecular Surface-active agents with every domestic chemical additive with «БЕТОПРЕСС»® are or will be custom-designed colloidal solutions with unique formula. Further such products can be stored for years and without loss of newly acquired properties, the most important of which is crystallization inside the cement stone structure, in pores and capillaries, or in the surface, depending on the nature of the sol, in accordance with recommendations and conditions. Now we can clearly divide all existing concrete chemical additives in the CIS market in two main groups, where the first group includes more than two dozen complex colloidal solutions in the form of lyophobic sols under the Trademark «БЕТОПРЕСС», and the second group is to all others. It makes little difference whether the manufacturer, but only as true solutions, which in Russia today are about five hundred, and all of them in comparison at almost the same level in their properties and efficiency.

All developments by «НПО БЕТОХИМИКС»® are of significant strategic value for Russia, presenting a unique opportunity to transition the entire construction industry of the country from conventional concrete production to nanostructured concrete within a short span of time. For companies manufacturing chemical additives for concrete, this marks a chance to manufacture their products directly as innovative sol-containing modifiers falling under the industrial nanomaterials category, for



Fig. 7. Paving slabs made of vibrocast concrete with the only silica sol «Флюкс-1ГФ» – only 25 grams of end product per 100 kg of cement

both domestic and international markets. This shift will empower all regions to produce heavy weight concrete and products with special properties for residential and industrial structures, bridges, canals, concrete roads and airfields, tunnels and subways, ports and docks, nuclear power facilities, waste storage, and more. Our team not only envisions Russia's swift to technological sovereignty in the esteemed industry of nanotechnology, but also remains committed to advancing this goal tirelessly. The outcome of our efforts is a range of innovative nano-products derived from domestic resources that have no analogues even in the Western markets, along with the cutting-edge technologies employed in their production.

P.S. Due to the fact that the colloidal solutions of the «БЕТОПРЕСС» are not eligible to any existing GOSTs, please apply to the company «НПО БЕТОХИМИКС»® as the only company in Russia that has more than a decade of experience in cement concrete and mortar sol-modification technologies.

General Director
ООО «НПО БЕТОХИМИКС» and ООО «БЕТОХИМИКС ГРУПП»

V.E. Khovansky

+7 978-917-27-97, + 7 978-284-74-55
sale@betohimiks.ru
<https://betopress.ru>

R

This article continues the article “Lyophobic sols «БЕТОПРЕСС»® as additives to chemical admixtures into concrete”, published in the e-edition of “Nanotechnologies in Construction: Scientific Internet Journal.” 2023; 6:538 – 542. https://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild-6-2023/538-542.pdf



КАК ПРАВИЛЬНО ИСПЫТАТЬ И ПРИМЕНЯТЬ ЛИОФОБНЫЕ ЗОЛИ «БЕТОПРЕСС»® И ЗОЛЬ-МОДИФИКАТОРЫ НА ИХ ОСНОВЕ В ЦЕМЕНТНОМ БЕТОНЕ

В данной статье в самой доступной форме предоставлена информация о совершенно ином подходе к испытанию и применению в цементном бетоне лиофобных золей и золь-модификаторов в отличие от любых других химических добавок, которые в жидкой форме классифицируются как истинные растворы. Правила подбора составов, произведённых в лабораторных условиях по ГОСТ 27006-2019 п. 6.11, не могут быть также применены и для золей, и для золь-модификаторов, представляющих собой стабилизированные коллоидные растворы. Речь идёт о приготовлении бетонных смесей для их дальнейших испытаний.

ГОСТ 27006-86 был издан тогда, когда все химические добавки в бетон существовали лишь только в виде истинных растворов из молекул и ионов, полученных в результате полного растворения всех ингредиентов в воде. Намного позже взамен ему с 1 января 2020 года был введен в действие новый ГОСТ 27006-2019, который мало чем отличается от предыдущего. Все было бы ничего, если бы не появление на территории СНГ с апреля 2012 года целой серии инновационных химических модификаторов для бетона в виде коллоидных растворов, к которым применение правил подбора составов бетона по ГОСТ 27006-2019 п. 6.11. в лабораторных условиях стало просто невозможным. Коллоидным раствором признается тот раствор, в котором хотя бы один ингредиент из всех будет находиться в коллоидном состоянии, вследствие чего под это определение подпадают как сами золи, так и зольсодержащие модификаторы для цементного бетона.

Все химические продукты серии «БЕТОПРЕСС» от российской компании ООО «НПО БЕТОХИМИКС»® (г. Симферополь) представляют собой стабилизированные лиофобные золи и зольсодержащие модификаторы, назначение которых - прямое воздействие на построение в нанодиапазоне особой кристаллической структуры цементного камня в процессе гидратации цементных зерен с целью придания бетону таких свойств, каких практически невозможно получить в случае применения обыч-

ных химических добавок в виде истинных растворов. Например, водонепроницаемости литому бетону до W16 при водопоглощении менее 1-го % или же замена пропарки изделий из жесткого бетона химической активацией процессов гидратации и твердения цемента с ускорением набора прочности на сжатие до проектной всего лишь за 5–7 суток вместо 28-ми классических.

В последнем случае будет вполне достаточно максимального расхода золя в 0,05% по товарному продукту к массе цемента, чтобы выбропрессованные изделия впоследствии еще и приобрели свойство гидрофобности, не имеющейся срока своего действия.

Многолетний поиск автором на российском рынке для проведения сравнительных испытаний аналогичных продуктов в материальном виде не увенчался успехом, так как все они существуют лишь только в информационном поле, а точнее в текстах всевозможных научных работ, статей, докладов, диссертаций, ТУ и даже патентов. Например, нам сообщается в тексте одной из таких диссертаций на тему золей о том, что две зольсодержащие добавки «Hardness-M» ТУ 5745-006-51556791-2002 и «ДЭЯ-ЗС» ТУ 3743-005-46969976-2003 в 2004 году показали очень высокие результаты при применении в промышленных партиях цементного бетона. Там же дословно говорится: «По материалам данной диссертации опубликовано 16 научных работ и докладов в международных и отраслевых изданиях.

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Разработано 3 технических условия, 3 технологических регламента и подано 4 заявки на изобретение». Впоследствии приобретение на строительном рынке вышеупомянутых продуктов просто не представляется возможным из-за полного отсутствия такиховых. Может, именно поэтому ни в одном ГОСТе нет ни единого пояснительного слова о коллоидных растворах, что это за продукты и как с ними обращаться, и в то же время есть свежий ГОСТ ISO/TS 80004-1-2017 «Нанотехнологии. Основные термины и определения». ГОСТ есть, термины есть, а самих продуктов нет, следовательно, и их потенциальных производителей тоже!

Трогать патенты на эту тему вообще нет никакого смысла: сами патенты в наличии, но только произведенных по ним промышленных наноматериалов в виде лиофобных золей для цементных бетонов на нашем строительном рынке почему-то никто до сих пор не предлагает. Если, конечно, не обращать своего внимания на коллоидные растворы из серии «БЕТОПРЕСС»®, а ведь именно так все и поступают вот уже на протяжении 12-ти лет! Просто не замечают! Или делают вид? Но только сами продукты реально существуют и производятся в промышленных объемах единственной в своем роде на всей территории России инновационной компанией ООО «НПО БЕТОХИМИКС»®. Данные коллоидные растворы производятся новейшим методом химической диспергации, с применением в качестве стабилизирующих веществ достаточно сложных комплексов различных высокомолекулярных пептизаторов, также разработанных компанией. Абсолютно на все наши лиофобные гидрозоли и зольсодержащие модификаторы, включая сами технологии, за ненадобностью патенты не были взяты! В то же время данные продукты на украинском рынке в свободной продаже были представлены разработчиком уже в начале 2012 года, а на российском они существуют с 2014-го, имея на то все разрешительные документы, включая Торговую марку Украины и Товарный знак России. Получается так, что патент есть, а продукта нет, и, наоборот, патента нет, но сам продукт есть, и в нашем случае не один, а достаточно много!

Теперь по теме. ГОСТ 27006-2019 п. 6.11 рекомендует готовить бетонную смесь для подбора составов в обычном лабораторном смесителе гравитационного или принудительного действия или же в ручном режиме объемом не более 15-ти литров выхода готового раствора в предварительно увлажненной водой емкости и при перемешивании в течение не менее 5-ти минут. Данные рекомендации совсем не подходят ни для гидрозолей, ни для зольсодержащих добавок от компании «НПО БЕТОХИМИКС», которые как по-настоящему профессиональные продукты

Строительная лаборатория ООО «БЭТТА»
СИСТЕМА ДОБРОВОЛЬНОЙ СЕРТИФИКАЦИЯ СДС «СИЛ-МТ»
Орган по сертификации ООО «Волгоградский ЦОСМ»
Сертификат соответствия выполняемых работ (услуг),
по измерениям и испытаниям продукции
№ 00329 с «13» августа 2021г.
ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЯ № 32 В
БЕТОНА НА ВОДОНЕПРОНИЦАЕМОСТЬ, ВОДОПОГЛОЩЕНИЕ.

1. Наименование продукции, ее характеристика, обозначение:
Кубы - образцы 100×100 мм из смеси бетонной БСТ В40 П3 W 16

2. Место отбора образцов: завод изготовитель ООО «ВолгоКлинСервис».

3. Цель испытаний: определение водонепроницаемости, водопоглощения

4. Нормативная документация, используемая при испытании:
ГОСТ 12730.5 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости

5. Применимые СИ и ИО: ВВ-2 № 6/н.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Маркировка образцов	Дата изготовления	Проектная марка бетона на водонепроницаемость	Дата испытания	Возраст образцов, суток	Диапазон т. сек
32B/1	17.03.2023	W 16	14.04.2023	29	580
32B/2	17.03.2023	W 16	14.04.2023	29	588
32B/3	17.03.2023	W 16	14.04.2023	29	592
32B/4	17.03.2023	W 16	14.04.2023	29	598
32B/5	17.03.2023	W 16	14.04.2023	29	600
32B/6	17.03.2023	W 16	14.04.2023	29	604

Испытания проведены на основе экспресс-метода оценки его водонепроницаемости по ГОСТ127730. Экспресс-метод определения водонепроницаемости бетона основан на наличии установленной статистической зависимости между водонепроницаемостью поверхностных слоев бетона и его водонепроницаемостью, определенной по методу «мокрое пятно». В качестве параметра, характеризующего водонепроницаемость, используется значение времени (t₀), за которое давление в камере устройства падает на определенную величину. ЗАКЛЮЧЕНИЕ: t₀ = (592+598):2=595 с, что соответствует марке бетона по водонепроницаемости W 16

Результаты испытаний на водопоглощение.

Маркировка образцов	Дата изготовления	Дата начала испытания	Масса высушенного образца, г, средняя	Масса высыпанного образца, средняя	Дата окончания испытаний	Масса сухого образца	Масса сухого образца, средняя	Водопоглощение по массе, W _в , %масс.
32B/1	17.03.2023	14.04.2023	2270	2295	17.04.2023	2290		W 0,87
32B/2	17.03.2023	14.04.2023	2280	2275	17.04.2023	2300	2295	W 0,87
32B/3	17.03.2023	14.04.2023	2275	2295	17.04.2023	2295		W 0,87

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: W_в = 2295-2275 *100 = 0,87 - водопоглощение бетона по массе.

2295

Начальник строительной лаборатории ООО «Бэтта»

Дмитричкова В.П.

Рис. 1. Протокол испытания бетона на водонепроницаемость и водопоглощение. Примененный золь-модификатор состоял из ПК Полипласт (S) 0,85% и «Флюкс-1ГФ» 0,025% к массе цемента

пригодны только лишь для промышленного применения. Поэтому все условия для приготовления бетона перед его испытанием должны полностью соответствовать производственным, а не тем, уж явно кустарным требованиям, которые нам предлагают в выше обозначенном ГОСТе.

Дело в том, что золи для литого бетона серии «БЕТОПРЕСС»® дозируются не более чем 0,005% по сухому веществу к массе цемента и поэтому требуют для быстрого и равномерного распределения всех коллоидных наночастиц по объему бетонной смеси только интенсивное механическое перемешивание, и чем больше объем смесителя и его мощность, тем качественнее все это будет происходить. Минимальный объем выхода готовой бетонной смеси желательно не менее 0,5 м³, что полностью соответствует производственным условиям, это относится и к золь-модификаторам, и к зольсодержащим добавкам. Поэтому настоятельно рекомендуем готовить бетон



Рис. 2. Вибропрессованный кубик из жёсткого бетона на лиофобном золе «ВИБРОФИНИШ СМ-17-ГФ» с расходом 0,05% в возрасте 10 суток

для тестирования всех наших химических продуктов непосредственно на самом производстве бетонных смесей или бетонных изделий и на тех составах, которые уже есть, а иначе золи себя ничем не проявят, как будто их там и нет вовсе.

Единственная альтернатива для определения их эффективности в сравнении с подобным контрольным образцом – это непосредственно приготовление одного-двух литров смеси в планетарном лабораторном смесителе на 5 литров на довольно высоких оборотах (не менее 3-ей скорости) при перемешивании в продолжение трех минут. Здесь можно использовать как цементное тесто, так и цементно-песчаный раствор с предварительно отсеянным от крупных частиц песком и с определением подвижности, для сравнения, при помощи лабораторного конуса текаемости (КР-1). Затем цементное тесто требуется сразу поместить в металлические формы с ячейками $20 \times 20 \times 20$ мм, $12 \times 25 \times 75$ мм, а в случае с цементно-песчаным раствором – в формы $70 \times 70 \times 70$ мм, и после полного окончания процесса твердения данные образцы следует испытать по ГОСТ 30459-2008. Правда, этот вариант тестирования подходит лишь только для определения эффективности коллоидного раствора в сравнении с контрольным образцом, а подобрать состав тяжелого бетона с щебнем, в этом случае, не получится, но в то же время получится проверить сами золи на их совместимость с цементами от разных производителей.

Дело в том, что коллоидные частицы, находясь в воде затворения, при резком росте pH в процессе гидратации цемента из состояния золя начинают

переходить в гель, а для быстрого их распределения по всему объему бетонной смеси в виде множества рассеянных наночастиц до наступления самой реакции, называемой в коллоидной химии золь-гель методом, нужен достаточно мощный и быстрый смеситель бетона. С производствами, которые тестируют наши продукты в промышленных условиях прямо на заводских составах, где бетонная смесь полностью перемешивается буквально за считанные секунды, мы успешно сотрудничаем без всяких проблем, поставляя им золи и золь-модификаторы. И еще никто из них, а есть и такие, с которыми мы уже 12 лет вместе, несмотря ни на что, не вернулся и не собирается возвращаться к прежним добавкам в виде истинных растворов. Потому что никто не хочет ни дополнительных затрат на цемент, ни тем более возврата к прошлому качеству своей продукции!

Кроме разработанных зольсодержащих модификаторов в виде суперпластификаторов группы СП мы производим пять золей для подвижного (литого) и к ним два для жесткого бетона (полусухого), применяемого в технологиях трамбования, гипер- и вибропрессования. Разница между ними в том, что золи для литых бетонов, в основном, рекомендуется присаживать в качестве наноприсадок к отечественным добавкам-разжижителям на основе ПК, НФС и ЛСТ, в то время как золи для жесткого бетона представляют собой полностью законченные продукты для промышленного применения. Общее, что их объединяет, это то, что все они до единого являются кристаллообразующими золями, но с довольно эксклюзивными свойствами, степенью действия и предназначением. Больше сведений о наших продуктах, включая протоколы испытаний, можно получить на официальном сайте компании в информационных статьях.

В данной статье мы более подробно расскажем о двух наших брендовых продуктах на основе стабилизированного раствора гидроксида железа для интенсивного формования жесткого (сыпучего) бетона – «ВИБРО СМ-16» и «ВИБРОФИНИШ СМ-17-ГФ» (ТУ 2601-001-00823210-2015). Последний в ноябре-декабре 2023 года прошел очередную модификацию, и теперь он способен придавать изделиям реальное свойство гидрофобности. Оба продукта отличаются от иных лиофобных золей, применяемых в микродозах в качестве присадок к химическим добавкам тем, что им не требуются разжижители в связи с их предназначением: жесткие бетонные смеси находятся в сыпучем состоянии, чем полностью подтверждают свой термин «полусухие». Данные золи не только не разжижают смеси, но даже, наоборот, позволяют повысить расход воды, при этом оставляя их в том же самом сыпучем состоянии, чем одновременно повышают плотность изделий при прес-

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

совании и исключают налипание раствора на металл оборудования.

В результате именно повышение расхода воды приводит к увеличенному уплотнению изделий при интенсивном физико-механическом воздействии на смесь, в прямом сравнении с составом на любом ином модификаторе на 2–4% или даже на 6%, но уже к контрольному, в котором совсем нет химии. За счет повышения коэффициента уплотнения мы получаем в первом варианте увеличение прочности изделий на сжатие на +20–40%, а во втором на все +60 (рекорд +67%) и при равных расходах вяжущего вещества, так как прочность жесткого бетона зависит совсем не от В/Ц и количества цемента, а от его плотности (объемного веса). Также золы позволяют штамповывать изделия одного качества с идеальной поверхностью без залипания на инертных материалах различной влажности, не требуя постоянно «ловить» количество воды в каждом замесе, сократив при этом само время вибрирования практически вдвое.

За всем этим легко просматривается ощутимая экономия средств в виде «лишнего» здесь количества цемента, появившегося в результате выравнивания прочностей на сжатие между всеми образцами как с иными добавками, так и без них, до требования ГОСТ 17608-2017. Советуем для повышения прочности бетона на сжатие не пользоваться добавлением цемента, а пользоваться применением эффективных золь-модификаторов, что дает не только выгоду, благодаря их мизерному расходу, но и наиболее высокое качество товарному виду вибропрессованных изделий, долговечность и морозостойкость которых не зависит от самой прочности, а зависит от плотности кристаллической структуры цементного камня, включая общую капиллярную пористость бетона, последняя всегда увеличивается прямо пропорционально повышению расхода вяжущего вещества.

Но даже здесь некоторые умельцы пытаются вручную приготовить полусухую смесь с нашими гидрозолями в кустарных лабораторных условиях по ГОСТ 27006-2019, который допускает замешивать составы в небольших объемах в ручном режиме, что они и делают, а затем формуют образцы для испытаний на прочность с помощью вибрирования в металлических формах с насадкой под пригрузом. Такие случаи чаще происходят на крупных предприятиях, где технологи, считая себя профессионалами высокого класса (а кто это проверит!?), почему-то очень даже боятся применять наши нанозоли сразу же на производстве. Другая довольно немаловажная ошибка технологов – это неправильный гранулометрический подбор инертных материалов, если сам состав будет прерывистый, то в таком случае производителю вообще ничего не поможет: ни наши нанозоли, ни мощность вибропресса, ни увеличение

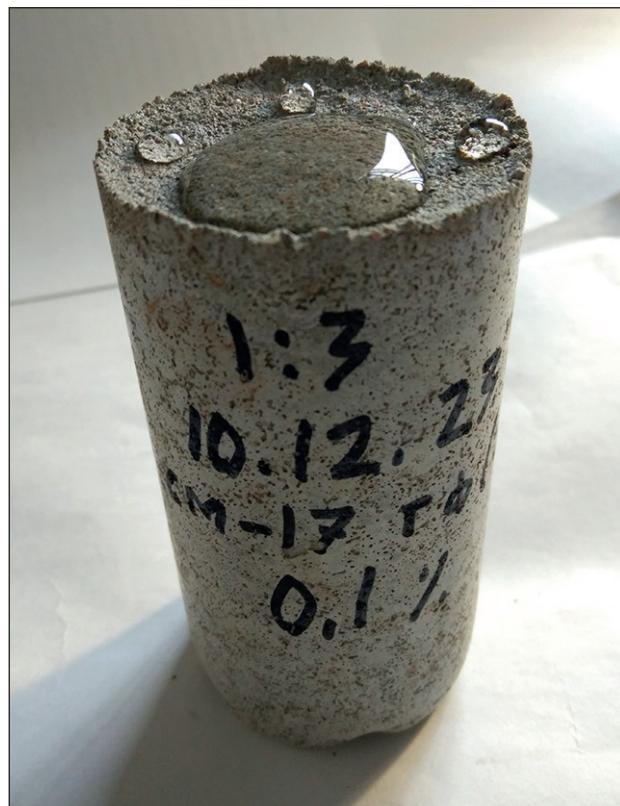


Рис. 3. Цилиндр из цементно-песчаной смеси изготовлен методом полусухого трамбования на лиофобном золе «ВИБРОФИНИШ СМ-17-ГФ» с расходом 0,1%

расхода цемента, последний просто затеряется в образовавшихся пустотах и без всякой пользы.

В то же время наши воздуховлекающие коллоидные растворы для интенсивного формования жестких бетонных смесей, кроме существенного повышения прочности на сжатие, за счет увеличения коэффициента уплотнения (K_u) также обладают довольно уникальным свойством наноструктурирования цементного камня, в котором, в первую очередь, все они способны прерывать капиллярную пористость микропузьрями воздуха с внутренней гидрофобной поверхностью и сокращать набор проектной прочности изделий из жесткого бетона ровно в четыре раза – всего 7 суток против 28-ми классических. Последнее свойство дает законное право производителю отгружать свою продукцию прямо из цеха уже на вторые сутки, минуя склад, как вполне достигнувшую требуемых для этого действия 70% от проектной прочности. При этом принудительного прогрева не требуется, его заменяют сами золы.

В 2024 году в России вся продукция, подпадающая под определение «плиты бетонные тротуарные», подлежит обязательной сертификации согласно ГОСТ 17608-2017. В такой ситуации, которая скла-

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

ООО «ИНСТИТУТ «КРЫМГИНИТИЗ» 295022, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Гагарин, 68, тез. +7(3652)55-04-00, факс: +7(3652)59-24-39 E-mail: info@krghitniz.ru ОГРН 1159102054253 ИНН 9102169394 / 910201000 Член СРО АФОР «ПроектстроиКрыма» регистрационный № 66 от 14.01.2015 г. Член СРО Ассоциации «ПГС» регистрационный № 116 от 29.06.2018 г. Строительная лаборатория. Подразделение обследования зданий и сооружений, испытаний строительных материалов и изделий. 295022, РК, г. Симферополь, ул. Гагарин, 68, лит. «Б», тез. +7(3652)55-04-12, эл. почта: krginliz.ru Свидетельство о составлении измерений в подразделении Обследование зданий и сооружений, испытания строительных материалов и изделий № 6.0001.16 от 28.01.2014 г.																	
<p align="center"></p> <p align="center">Ученый совет Межведомственная Специализированная лаборатория и А.П. Кедрова</p> <p align="center">Протокол испытаний № СТ 0341-0343 от 25 июня 2020 г.</p>																	
Договор №5.122-29 от 09 июня 2020г.	Наименование заказчика																
ООО «НПО БЕТОХИМИК»	Адрес заказчика																
295017, РФ, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Бетховена, д. 16/2.																	
Информация об объекте испытания Наименование объекта Тротуарная плитка ООО «ФЛЮСТОУН» Наименование проб Бетонная тротуарная плитка 100x200x60 Лаборатория № 341-343 Дата отбора пробы 08.01.2020 г. / Дата поступления пробы в лабораторию 09.06.2020 г. Информация об отборе пробы Пробы получены по акту от 09.06.2020 г. В отборе и транспортировке проб Строительная лаборатория участия не принимала. Ответственность за правильность отбора проб, консервации, хранения и транспортирования несет «Заказчик».																	
Цель испытаний Определение физико-механических характеристик бетонных образцов-кернов выбуренных из тротуарной плитки																	
Средства измерений, используемые при проведении испытаний <table border="1"> <thead> <tr> <th>№ п/п</th> <th>Наименование и тип СИ</th> <th>Зав. №</th> <th>Сведения о поверке</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Пресс гидравлический ПГМ-125</td> <td>385</td> <td>Свидетельство о поверке № 02.62.0322.19 действительно до 09.09.2020 г.</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Штангенциркуль торговой марки «SHAN» с цифровым отсчетным устройством</td> <td>F36892</td> <td>Свидетельство о поверке № 03.37.0157.20 действительно до 08.04.2021 г.</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Весы лабораторные BM-5101, рег. №36468-07.</td> <td>642615</td> <td>Свидетельство о поверке № 02.62.0295.19 действительно до 06.08.2020 г.</td> </tr> </tbody> </table>		№ п/п	Наименование и тип СИ	Зав. №	Сведения о поверке	1	Пресс гидравлический ПГМ-125	385	Свидетельство о поверке № 02.62.0322.19 действительно до 09.09.2020 г.	2	Штангенциркуль торговой марки «SHAN» с цифровым отсчетным устройством	F36892	Свидетельство о поверке № 03.37.0157.20 действительно до 08.04.2021 г.	3	Весы лабораторные BM-5101, рег. №36468-07.	642615	Свидетельство о поверке № 02.62.0295.19 действительно до 06.08.2020 г.
№ п/п	Наименование и тип СИ	Зав. №	Сведения о поверке														
1	Пресс гидравлический ПГМ-125	385	Свидетельство о поверке № 02.62.0322.19 действительно до 09.09.2020 г.														
2	Штангенциркуль торговой марки «SHAN» с цифровым отсчетным устройством	F36892	Свидетельство о поверке № 03.37.0157.20 действительно до 08.04.2021 г.														
3	Весы лабораторные BM-5101, рег. №36468-07.	642615	Свидетельство о поверке № 02.62.0295.19 действительно до 06.08.2020 г.														
Испытательное оборудование, используемое при проведении испытаний <table border="1"> <thead> <tr> <th>№ п/п</th> <th>Наименование и тип ИО</th> <th>Зав. №</th> <th>Сведения об аттестации</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Камера нормального твердения и алюминиевого хранилища образцов КНТ-72</td> <td>150909</td> <td>Аттестат 01.00092.20 от 17.01.2020 г. действительно до 16.01.2021 г.</td> </tr> </tbody> </table>		№ п/п	Наименование и тип ИО	Зав. №	Сведения об аттестации	1	Камера нормального твердения и алюминиевого хранилища образцов КНТ-72	150909	Аттестат 01.00092.20 от 17.01.2020 г. действительно до 16.01.2021 г.								
№ п/п	Наименование и тип ИО	Зав. №	Сведения об аттестации														
1	Камера нормального твердения и алюминиевого хранилища образцов КНТ-72	150909	Аттестат 01.00092.20 от 17.01.2020 г. действительно до 16.01.2021 г.														
Технические условия и методики испытаний Методики испытаний: 17608-2017 «Плиты бетонные тротуарные. Технические условия», ГОСТ 28570-90 «Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобранным из конструкций», ГОСТ 12739-78 «Бетоны. Методы определения плотности, влажности, водопоглощаемости», ГОСТ 3165-2010 «Правила контроля и сдачи прочности (продолжение протокола на странице 2)»																	

Стр. 2 из 2
Протокол испытаний № СТ 0341-0343 от 25.06.2020 г. (продолжение)

Результаты лабораторных испытаний		Дата окончания испытаний:						
Дата начала испытаний:	09.06.2020 г.	Дата окончания испытаний:	17.06.2020 г.					
Значение влияющих факторов:								
Температура, °C:	22,3	Влажность, %:	76,0					
		Тяжесть, кН:	98,2					
Физико-механические характеристики бетонных образцов-кернов								
# № п/п	# № лаб.	Наименование конструкции	Возраст бетона, (сутки)	Дата		Сред- няя плот- ность, кг/м ³	Предел прочности при сжатии МПа	Физический класс бетона ГОСТ 15105-2010 г. ВФ-0,8МПа В 22,5
				Бетониро- вания	Испыта- ния			
1	341	0 Мурасан БВА 19,0%	Более 28суток	08.05.2020	17.06.2020	2027	24,0	
2	341	0 Мурасан БВА 19,0%	28суток	08.05.2020	17.06.2020	2033	31,4	28,16
3				08.05.2020	17.06.2020	2079	29,1	
1	342	I Виброфиниш СМ-17 0,1%	Более 28суток	08.05.2020	17.06.2020	2093	33,2	
2	342	I Виброфиниш СМ-17 0,1%	28суток	08.05.2020	17.06.2020	2098	34,6	33,73
3				08.05.2020	17.06.2020	2130	33,4	
1	343	II Виброфиниш СМ-17 0,2%	Более 28суток	08.05.2020	17.06.2020	2134	35,3	
2	343	II Виброфиниш СМ-17 0,2%	28суток	08.05.2020	17.06.2020	2123	41,0	38,93
3				08.05.2020	17.06.2020	2189	40,5	
				Масса до испытания, г	Масса после испытания, г			Возденогашение, %
1	341	0 Мурасан БВА 19,0%	Более 28суток	522,24	551,20	5,54		
2	341	0 Мурасан БВА 19,0%	28суток	532,52	559,90	5,14	5,35	
3				547,96	577,50	5,39		
1	342	I Виброфиниш СМ-17 0,1%	Более 28суток	565,05	595,30	5,38		
2	342	I Виброфиниш СМ-17 0,1%	28суток	522,41	599,40	4,71	4,74	
3				564,92	588,30	4,13		
1	343	II Виброфиниш СМ-17 0,2%	Более 28суток	547,49	571,90	4,45		
2	343	II Виброфиниш СМ-17 0,2%	28суток	557,61	582,20	4,41	4,30	
3				573,86	597,10	4,05		

Заключение: В результате испытаний выявлено преимущество добавки Виброфиниш СМ-17 перед добавкой Мурасан БВА 19 по прочности на 20-35% в зависимости от диапазона.

Конец протокола

Результаты испытаний относятся только к данным пробам, прошедшим испытания.
Протокол испытаний не может быть частично воспроизведен без письменного разрешения Строительной лаборатории ООО «Институт «КРЫМГИНИТИЗ», за исключением воспроизведения в полном объеме.

Заведующий подразделением ОЗиС ИСиИ
Ответственный исполнитель:
Инженер лаборатории

A.M. Соловьев
Ю.В. Гаринова

Рис. 4. Протокол сравнительных испытаний химической добавки «Мурасан БВА19» от компании «Эм Си Бахеми» с лиофобным золем «ВИБРОФИНИШ СМ-17» от ООО «НПО БЕТОХИМИКС» в кернах, выбушенных из тротуарных плит, произведенных методом вибропрессования жесткого бетона при одинаковом составе и расходе цемента

дается, наибольшим спросом у производителей должны будут пользоваться наиболее эффективные химические модификаторы, предпочтительно стабилизированные золи как для вибропрессованной, так и для любой вибролитой плитки тротуарной. Морозостойкость и долговечность последней также не зависит от прочности на сжатие, а зависит только от качества кристаллической структуры цементного камня и, в первую очередь, от правильно расположенной в нем капиллярной системы, а также от диаметра и формы самих пор и, желательно, с гидрофобным свойством.

На все вышеперечисленные качества цементного камня напрямую влияют именно химические модификаторы для цементного бетона и ничто другое. В сравнительных испытаниях химических добавок в виде истинных растворов с коллоидными, в виде лиофобных золей, в промышленных условиях всегда будут побеждать последние, так как все они обладают уникальным свойством образовывать в цементном камне из искусственно привнесенных в него наноразмерных коллоидных частиц будущие центры кристаллизации для роста трехмерной пространственной сетки в виде матрицы, непосредственно влияющей

на всю его структуру в нанодиапазоне. Золы серии «БЕТОПРЕСС»® для жестких смесей в отличие от зол для литьего бетона из-за специфики продукции имеют более высокий расход по сухому веществу в границах от 15-ти до 50-ти граммов на 100 килограммов цемента, что соответствует по минимуму 0,05%, а по максимуму – 0,2% товарного продукта в жидкой форме к массе вяжущего вещества.

Компания «НПО БЕТОХИМИКС»® не оставит без внимания и производителей вибролитой продукции, такой как плитка бетонная тротуарная, бордюры, отливы, парковая архитектура и так далее. Всем им можем предложить лиофобный кремнезоль «Флюкс-1ГФ», который допускается вводить в количестве 0,025% по товарному продукту к массе цемента прямо в литую бетонную смесь в самом процессе ее приготовления вместе с водой затворения и без применения иных химических добавок. Готовые вибролитые изделия по истечении 28-ми суток твердения приобретут ярко выраженное свойство гидрофобной поверхности вследствие совместной реакции золя на основе кремнийорганики с продуктами гидратации цемента, в первую очередь, с известью и при непосредственном участии углекислого

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ И АРХИТЕКТУРЕ

ГУП «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и производственный

институт строительного и градостроительного комплекса Республики Башкортостан» (ГУП институт «БашНИИстрой»)
Испытательный центр «Башстройиспытания». Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.22СЛ37, действителен до 14.07.2019г.
450027, г. Уфа, ул. Уфимское шоссе, 3. Тел./факс (347) 243-35-35

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер

ГУП институт «БашНИИстрой»

Д.А. Синицын

6 июля 2017 г.



Протокол № 2017/893-01 испытаний образцов брускатки вибропрессованной

Заказчик: ООО «Производственная компания АВЕГА»

Основание для проведения работ: письмо исх. № 6/н от 01.06.2017г., вх. № 893 от 06.07.2017г.

Наименование НД на материал: ГОСТ 17608-81

Наименование НД на методы испытаний: ГОСТ 12730.3-78, ГОСТ 10180-2012, ГОСТ 18105-2010 (схема Г)

Наименование оборудования: Гидравлический пресс П-50 (зав. № 1592, поверка до 12.07.2017г.), штангенциркуль ШЦ-II (зав. № Р177244, поверка до 08.11.2017г.), линейка стальная (зав. № 231, поверка до 08.11.2017г.), весы электронные МК-15.2-А21 (зав. № 123961, поверка до 09.11.2017г.).

Наименование объекта, место изготовления образцов: ООО «Производственная компания АВЕГА» (г. Стерлитамак). Образцы брускатки вибропрессованной «Старый город» 120×120×60 мм изготовлены с применением добавок ООО «НПО БЕТОХИМИК», доставлены Заказчиком.

Дата изготовления образцов: 30.05.2017г.

Результаты испытаний на 2 сут. норм. твердения.				Результаты испытаний на 7 сут. норм. твердения.				Результаты испытаний на 28 сут. норм. твердения.			
Дата испытания образцов: 01.06.2017г.				Дата испытания образцов: 06.06.2017г.				Дата испытания образцов: 27.06.2017г.			
Плотность изделий, кг/м ³	Водопоглощение, % по массе	Прочность на сжатие, кгс/см ²	Фактический класс бетона по прочности на сжатие	Плотность изделий, кг/м ³	Водопоглощение, % по массе	Прочность на сжатие, кгс/см ²	Фактический класс бетона по прочности на сжатие	Плотность изделий, кг/м ³	Прочность на сжатие, кгс/см ²	Фактический класс бетона по прочности на сжатие	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
2251	2,8	397	B30	2221	3,7	522	B35	2220	478		
2285	2,1	388		2251	2,9	478		2252			
2236	3,3	cp. 393		2244	4,3	cp. 500		2240			
2216	cp. 2,7			2230	cp. 3,6			2220			
ср. 2247				ср. 2237				2225			
								2215			
								ср. 2229			

Примечание. Требуемую прочность бетона для проектного класса рассчитывают по формуле 9 ГОСТ 18105-2010:
 $R_T = K_T \cdot B_{\text{ном}}$, где $B_{\text{ном}}$ – проектный класс прочности бетона, МПа; K_T – коэффициент требуемой прочности (при этом $K_T = 1,28$ – все виды бетона, кроме плотного силикатного и ячеистого).

Зав. лабораторией ИСМИ

И.Я. Тевс

Испытатель

Г.Ф. Ишбулдина

Результаты испытаний относятся только к испытанным образцам. Без разрешения руководителя ИЦ «Башстройиспытания» перепечатка протокола запрещена.

Рис. 5. Протокол испытаний вибропрессованной плитки тротуарной из жесткого бетона на лиофобном золе «ВИБРОФИНИШ СМ-17» по скорости набора прочности на сжатие без прогрева до 80% на вторые сутки и до 100% на седьмые. Далее прочность не растет

газа из воздуха. При этом прочность самого бетона на сжатие повысится на +25% к контрольному образцу без химии.

Также лиофобный кремнезоль, наноструктурируя цементный камень, повысит его водо- и морозостойкость и параллельно ускорит твердение самих изделий, начиная с первых суток, что впоследствии позволит им и дальше набирать свою прочность в температурном режиме, начиная от -8 градусов мороза и выше. Просьба только не путать гидрофобизацию с гидроизоляцией. Гидрофобная плитка тротуарная как вибропрессованная, так и вибролитая имеет практически такое же водопоглощение при ее погружении на несколько суток в воду, как и не гидрофобная. Разница между ними в том, что в условиях их эксплуатации вся вода от атмосферных осадков будет скатываться с водоотталкивающей поверхности прямо в подстилающий слой. В то время как все стороны обычной плитки каждый раз будут ее впитывать, что впоследствии может привести как

к появлению на изделиях довольно непрятливых выцветов в виде выходов извести, так и к шелушению после мороза.

Если производителя или самого потребителя интересует продукция из литого бетона, обладающего водонепроницаемостью W16 и даже более с водопоглощением менее 1-го %, сразу же для сравнения возьмем поглощение воды природным гранитом, и оно находится в границах от 0,2 до 0,5%, то в этом случае придется применить тот же самый лиофобный кремнезоль «Флюкс-1ГФ», но уже как гидроизолирующую и кристаллообразующую наноприсадку к любым имеющимся поликарбоксилатным гиперпластификаторам в количестве из расчета 25 грамм золя на 100 кг цемента или же к поликарбоксилатному эфиру как к сырью, приобретенному напрямую у его производителя. В последнем варианте потребуется добавить пеногаситель. Данный продукт также рекомендуем при устройстве подвалов, подземных паркингов, бассейнов и фундаментов из тяжелого

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

 ООО «ИНСТИТУТ «КРЫМГИНТИЗ» 295022, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Глинки, 68. тел. +7(3652)55-04-00, факс: +7(3652)69-24-12, эл. почта: info@krgintiz.ru ОГРН 1159102054253 ИНН/КПП 9102169394 / 910201001 Член СРО Ассоциация «ОГПО» регистрационный № 116 от 27.09.2018 г.																			
Строительная лаборатория. Подразделение обследования зданий и сооружений, испытаний стройматериалов и изделий. 295022, РК, г. Симферополь, ул. Глинки, 68, лит. «В», тел. +7(3652)55-04-12, эл. почта: solovey@krgintiz.ru Аттестат акредитации испытательной лаборатории № RUE/MC/C/AL.99/1 срок действия с 21 января 2020 г. по 21 января 2024 г.																			
 Утверждено Заведующий подразделением ОЗС ИСИИ А.М.Соловей																			
Протокол испытаний № СТ 0140-0143 от 29 марта 2023 г.																			
Договор №5.78-23 от 27 марта 2023 г. Наименование ООО «НПО БЕТОХИМИКС» заказчика Адрес 295017, РФ, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Бетховена, д. 16/2.																			
Информация об объекте испытания Наименование объекта Кубики литье. Наименование проб Бетонные кубы размером 100x100x100мм. Лабораторный № 140-143																			
Дата изготовления пробы	27.02.2023	Дата поступления пробы в лабораторию	27.03.2023 г.																
Информация об отборе пробы	Пробы получены по акту от 27.02.2023. Образцы отобраны на стройплощадке. В отборе и транспортировке проб Строящаяся лаборатория участия не принимала. Ответственность за правильность отбора проб, консервации, хранения и транспортирования несет заказчик.																		
Цель испытаний Определение физико-механических характеристик бетонных образцов.																			
Средства измерений, используемые при проведении испытаний <table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th>№ п/п</th> <th>Наименование и тип СИ</th> <th>Зав. №</th> <th>Сведения о поверке</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Пресс гидравлический ПММ-125</td> <td>385</td> <td>Свидетельство о поверке №С-КК/06-12-2022/08982695 действительно до 05.12.2023 г.</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Штангенциркуль ШЦ-1-125-0,1-2</td> <td>F36892</td> <td>Свидетельство о поверке №С-КК/17-01-2023/216365704 действительно до 16.01.2024 г.</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Весы лабораторные ВМ-5101, рег. №36468-07,</td> <td>642615</td> <td>Свидетельство о поверке №С-КК/02-06-2022/161992917 действительно до 01.06.2023 г.</td> </tr> </tbody> </table>				№ п/п	Наименование и тип СИ	Зав. №	Сведения о поверке	1	Пресс гидравлический ПММ-125	385	Свидетельство о поверке №С-КК/06-12-2022/08982695 действительно до 05.12.2023 г.	2	Штангенциркуль ШЦ-1-125-0,1-2	F36892	Свидетельство о поверке №С-КК/17-01-2023/216365704 действительно до 16.01.2024 г.	3	Весы лабораторные ВМ-5101, рег. №36468-07,	642615	Свидетельство о поверке №С-КК/02-06-2022/161992917 действительно до 01.06.2023 г.
№ п/п	Наименование и тип СИ	Зав. №	Сведения о поверке																
1	Пресс гидравлический ПММ-125	385	Свидетельство о поверке №С-КК/06-12-2022/08982695 действительно до 05.12.2023 г.																
2	Штангенциркуль ШЦ-1-125-0,1-2	F36892	Свидетельство о поверке №С-КК/17-01-2023/216365704 действительно до 16.01.2024 г.																
3	Весы лабораторные ВМ-5101, рег. №36468-07,	642615	Свидетельство о поверке №С-КК/02-06-2022/161992917 действительно до 01.06.2023 г.																
Испытательное оборудование, используемое при проведении испытаний <table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th>№ п/п</th> <th>Наименование и тип ИО</th> <th>Зав. №</th> <th>Сведения об аттестации</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Камера нормального твердения и влажного хранения образцов КНТ-72</td> <td>150909</td> <td>Аттестат 01.00004.23 от 13.01.2023 г. действительно до 12.01.2024 г.</td> </tr> </tbody> </table>				№ п/п	Наименование и тип ИО	Зав. №	Сведения об аттестации	1	Камера нормального твердения и влажного хранения образцов КНТ-72	150909	Аттестат 01.00004.23 от 13.01.2023 г. действительно до 12.01.2024 г.								
№ п/п	Наименование и тип ИО	Зав. №	Сведения об аттестации																
1	Камера нормального твердения и влажного хранения образцов КНТ-72	150909	Аттестат 01.00004.23 от 13.01.2023 г. действительно до 12.01.2024 г.																
Технические условия и методики испытаний Методики испытаний: (шифры НД, наименование методик) ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». ГОСТ 12730-2020 «Бетоны. Методы определения плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости». ГОСТ 26633-2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия» ГОСТ 18105-2018 «Правила контроля и оценки прочности» (продолжение протокола на странице 2)																			

Стр. 2 из 2

Протокол испытаний № СТ 0140-0143 от 29 марта 2023 г. (продолжение)

Результаты лабораторных испытаний

Дата начала испытаний: 29.03.2023 г. Дата окончания испытаний: 29.03.2023 г.

Значения влияющих факторов:

Температура, °С:	24,0	Влажность, %:	83,0	Давление, кПа:	97,9
------------------	------	---------------	------	----------------	------

Физико-механические характеристики бетонных образцов

Лабораторный №	Дата изготовления (изготовивший Заказчик)	Дата испытания	Применение добавки:	Размеры, см (ГОСТ Р 58939-2020)			Средняя плотность, г/см ³ (ГОСТ 2730-04-2020)	Масштабный коэффициент	Конечные значения с учетом масштабного коэффициента, МПа			Среднее значение прочности на сжатие с учетом масштабного коэффициента, МПа	Фактический класс бетона по прочности из ГОСТ 13105-2010 (состав I)
				a	b	h			19,00	18,76	Vf=15,01		
140	27.02.2023	29.03.2023	контрольные	10,08	10,00	10,06	2090		18,52				
				10,08	10,00	10,06	2109						
141	27.02.2023	29.03.2023	Кремнезол «Флюкс-1ГФ	10,10	10,00	10,10	2098		22,16	23,42	Vf=18,74		
				10,07	10,00	10,10	2099		24,68				
142	27.02.2023	29.03.2023	Кремнезол «Флюкс-1ГФ	10,07	10,00	10,10	2097		29,69	31,43	Vf=25,14		
				10,11	10,00	10,08	2099		33,17				
143	27.02.2023	29.03.2023	Лиофобный зольный экструдат «Флюкс-1ГФ	10,08	10,00	10,08	2107		28,85	29,43	Vf=23,54		
				10,07	10,00	10,07	2119		30,01				

Результаты испытаний относятся только к данным пробам, прошедшим испытания.

Протокол испытаний не может быть частично воспроизведен без письменного разрешения Строительной лаборатории ООО «Институт «КРЫМГИНТИЗ», за исключением воспроизведения в полном объеме.

Ответственные исполнители:
 Инженер лаборатории
 Лаборант



 Ю.В. Гаврикова
 Ю.И. Шушпанников

Рис. 6. Протокол испытаний гидрофобного бетона на кремнезоле «Флюкс-1ГФ» при его расходе по сухому веществу 0,005% к цементу (5 г на 100 кг) к контрольному без химии. Результат испытаний – повышение прочности на +25% при равном в/ц, количестве вяжущего вещества и плотности литього бетона. Так могут работать лишь только одни наномодификаторы

водонепроницаемого бетона по так называемой технологии «белая ванна». При такой технологии бетон должен быть не только качественный, но и иметь В/Ц не выше 0,38!

Для производства дорожных и аэродромных плит, к которым предъявляются более жесткие требования по противостоянию солевой агрессии, чем к обычным плитам бетонным тротуарным, предлагаем лиофобный кремнезол «Флюкс-2ГФ», который при замесе вводится в тяжелый бетон также в поликарбоксилатном гиперпластификаторе и в той же самой дозировке. Данный кремнезол повышает прочность бетона на растяжение при изгибе, что очень важно как при сильных динамических нагрузках, так и при статических, особенно на дорожных покрытиях и на взлетных полосах аэродромов. Только «Флюкс-2ГФ» нельзя замораживать, в отличие от «Флюкс-1ГФ», и он не может работать как противоморозная добавка: нижний его предел +5°C. В то же время при устройстве дорожных покрытий и взлетных полос он будет незаменим, так как явно повышает сопротивляемость солевой коррозии к истиранию бетонной поверхности при практически нулевом ее водопоглощении.

Стабилизированные в процессе производства специальными химическими веществами и высокомолекулярными ПАВ лиофобные золи серии «БЕТОПРЕСС»® и все отечественные химические добавки с их добавлением представляют или же будут представлять собой индивидуальные коллоидные растворы, где каждый по отдельности должен иметь свою неповторимую формулу. Впоследствии данные продукты смогут храниться практически годами и без потери новоприобретенных свойств, наиболее важное из которых кристаллообразование в структуре цементного камня, в порах и капиллярах, либо в поверхности, в зависимости от природы золя при соблюдении всех рекомендаций и условий. Вот теперь можно четко разделить все существующие химические добавки в бетон на территории СНГ на две основные группы, где в первую группу войдут более двух десятков сложных коллоидных растворов в виде лиофобных золей под Товарным Знаком «БЕТОПРЕСС», а во вторую все остальные. И совсем неважно, от каких именно производителей, но только лишь как истинные растворы, которых в России на сегодня порядка пятисот названий, и все они

в сравнении практически на одном уровне по своим свойствам и эффективности.

Все разработки от компании «НПО БЕТОХИМИКС»® представляют для России особую ценность в стратегическом плане как уникальная возможность перевести всю строительную индустрию страны буквально за пару лет с производства рядового цементного бетона на производство наноструктурированного. А для предприятий, выпускающих химические добавки в бетон, это шанс начать выпускать свои продукты непосредственно в форме инновационных зольсодержащих модификаторов категории промышленных наноматериалов как для внутреннего потребления, так и на экспорт. Что, в свою очередь, позволит всем регионам на местах производить тяжелые цементные бетоны и изделия со специально заданными свойствами для жилых и промышленных зданий, для мостов и каналов, для бетонных дорог и аэродромов, для тоннелей и метрополитенов, для портов и причалов, для АЭС и хранилищ отходов и так далее. Коллектив нашей компании не только думает о быстром достижении Россией технологического суверенитета в престижной области нанотехнологий, но и не перестает на это работать! И как результат работы – наличие группы инновационных нанопродуктов на базе отечественного сырья, просто не имеющих себе аналогов даже на западе, как, впрочем, и самих технологий для их производства.



Рис. 7. Плитка тротуарная из вибролитого бетона только на кремнезоле «Флюкс-1ГФ» – всего 25 г товарного продукта на 100 килограмм цемента

P.S. В связи с тем, что на коллоидные растворы серии «БЕТОПРЕСС» не существует ГОСТов, просьба за рекомендациями по их тестированию и применению обращаться в компанию «НПО БЕТОХИМИКС»® как единственную в России компанию, обладающую более чем десятилетним опытом в технологиях золь-модификации цементных бетонов и строительных растворов.

Генеральный директор
ООО «НПО БЕТОХИМИКС» и ООО «БЕТОХИМИКС ГРУПП»

В.Е. Хованский

+7 978-917-27-97, + 7 978-284-74-55
sale@betohimiks.ru
<https://betopress.ru>

R

Данная статья является продолжением статьи «ЛИОФОБНЫЕ ЗОЛИ «БЕТОПРЕСС»® В КАЧЕСТВЕ ПРИСАДОК К ХИМИЧЕСКИМ ДОБАВКАМ В БЕТОН», опубликованной в электронном издании «Нанотехнологии в строительстве: научный Интернет-журнал» № 6, 2023 (стр. 538–542). https://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild-6-2023/538-542.pdf

Original article

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-1-67-76>

CC BY 4.0

Creation of a composite material based on plant-based components

Natalia I. Cherkashina* , Zoya V. Pavlenko , Semen N. Domarev , Artem Yu. Ruchiy , Vladimir V. Solgalov 

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

* Corresponding author: e-mail: natalip13@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The study is aimed at analyzing the possibility of creating a building composite material based on amylose and amylopectin with the introduction of crushed walnut shells as a filler. **Materials and methods of research.** To obtain the composite, the following components were used: distilled water, potato starch (NevaReaktiv, St. Petersburg, Russia), acetic acid 70% (NevaReaktiv, St. Petersburg, Russia), highly dispersed walnut shell powder. For this research, we used walnut shells of the Chandler variety (engrafted) collected from the Belgorod region. The composite was produced in several stages. At the first stage, a mixture of starch and walnut shells was added to distilled water, followed by a pre-prepared 9% acetic acid solution. The resulting mixture was thoroughly mixed, after which it was transferred to a stainless-steel bowl and subjected to heat treatment. The resulting mixture was then pressed with solid-phase compaction method at a pressure of 72 MPa. We studied the physical and mechanical characteristic of the resulting composite, its thermal properties, as well as the hydrophobic-hydrophilic balance of the surface. **Results and discussion.** The resulting composite has good strength characteristics. Flexural strength at break is $\sigma_f = 25.85 \pm 2.51$ MPa and $\sigma_f = 28.44 \pm 5.71$ MPa for filling 50% weight and 75% weight. Accordingly, they put it on a par with similar composites made from more conventional thermo- and thermoset polymers. The temperature limit for the composite material exploitation has been established, the upper of which can be considered the temperature at which the polymer matrix begins to soften – 103.1 °C. **Conclusion.** The results obtained are crucial for understanding the mechanisms involved in creating composite materials made entirely from plant components, utilizing, among other factors, agro-industrial waste.

KEYWORDS: botanical raw materials, highly dispersed walnut shell powder, composite material, starch, contact angle of wetting, thermal properties, flexural strength.

ACKNOWLEDGMENTS: The study was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of Russia No. FZWN-2024-0001 using equipment based on the Center for High Technologies of BSTU named after V.G. Shukhov.

FOR CITATION:

Cherkashina N.I., Pavlenko Z.V., Domarev S.N., Ruchiy A.Yu., Solgalov V.V. Creation of a composite material based on plant-based components. *Nanotechnologies in construction*. 2024; 16(1): 67–76. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-1-67-76>. – EDN: QNOAYS.

INTRODUCTION

Several years ago, the development of high-tech industries began to be marked by the active integration of composite materials and exploration into their potential applications. Through the identification of necessary compositions, it became possible to create materials with specific technological specifications. Certain metals have lost competitiveness under extreme operating conditions due to the exceptional properties of composite materials, including corrosion resistance, high strength, and heat resistance. Another benefit of composite ma-

terials is their ease of production without the need for additional processing, thereby lowering the economic costs associated with prolonged, multi-step material pre-production [1–3]. This aspect makes them particularly attractive especially + particularly for autonomous application in the construction industry, the industry of creating advanced spacecraft [4], as well as for strengthening building structures through high-strength connections [5, 6]. Operational parameters are defined during the material creation process, considering = taking into account the thermal, chemical, mechanical properties, and anisotropic behavior of the final product [7].

With the development of the composite materials sector, they have become high-demand resources for high-tech industries. Scientists began to study the possibility of introducing various reinforcing substances into the polymer matrix to improve physical and mechanical characteristics. Unreinforced polymers can be used for cladding buildings and as finishing materials [8]. Fiber-reinforced polymers are high-strength, lightweight, corrosion-resistant materials that can be used to create all-composite structures, to strengthen bridges and buildings, and the provision of thermal and sound insulation for buildings [9, 10]. During the creation of these materials, the matrix substance encases and anchors the reinforcing fibers in specific + certain positions, fostering a robust material interaction at the intercellular level [8].

In the process of widening the scope of application of composite materials, the operational requirements for the final products have been changing, which generated the search for new solutions – modification with chemicals. Due to the introduction of new components, the properties and characteristics of the substance with additives have changed. Modifiers in some cases+ In certain instances facilitate the process of processing products, and also enhance resistance to various forms of degradation, as well as increasing resistance to combustion. Fillers can be organic or inorganic in nature [11, 12].

In turn, they are divided into three groups upon their physical state: dispersed (powdery), fibrous and leafy. The activity of fillers is determined by the following factors: the energy of adhesion of the polymer to the filler, particle dispersion, and the ratio of filler to polymer. For better interaction, the surface of the filler can be further modified. Accordingly, any filler can be made active if necessary [13]. The resource-saving technologies research has become popular in the further development of science. Composite materials are now created with fillers from various waste materials: wood waste [14], metallurgical industry waste [15], waste from the production of cement bonded particle boards [16] and produced with environmentally friendly agricultural wastes fillers [17–20].

Each filler contributed to the improvement of certain strength, decorative, heat-resistant, and corrosion-resistant characteristics of the material. Utilized resource-saving technologies has effectively solved the problem of reusing raw materials and reclamation of unrecyclable wastes. The production of composites from natural fibers will reduce the use of non-degradable materials.

Modified organic fillers in the matrix of thermoplastic polymers will significantly reduce the cost of the product. Filler modification can generally improve the physical and mechanical properties of the finished material [21, 22]. Polymer composites modified with organic fillers are a competitive alternative to conventional wooden construction materials.

Lignified parts of agricultural wastes are of particular interest: husks, shells, stems and shells of various plants. They are not commonly used in other fields and are a waste of resources. Therefore, it is an inexpensive raw material that can be re-used and effectively applied. [23]. Walnut shells contain a large amount of lignocellulose. Its introduction into the polymer matrix as filler improves the properties of the material, giving it a lower density, physical and mechanical stability due to the creation of strong bonds. To replace the synthetic component in the polymer matrix, a mixture based on amylose and amylpectin will be used. The main benefits of replacing synthetic, inorganic fillers include their natural origin, their high physical and mechanical strength, and their good thermal insulating properties.

The final product will be environmentally friendly and durable, with resistance to external influences. As the components interact, the beneficial qualities of each individual component will have a positive impact on the properties of the final material. Safety for organisms and the environment will be the main criterion for this material [24]. The high physical and mechanical properties of composite materials, including their reliability, resistance to external influences, and durability during operation, ensure their use in a variety of industries, not just in the construction sector. These materials are suitable for use in all high-tech sector that require a durable and reliable product.

The purpose of this research is to study the unique properties of the composite material based on amylose and amylpectin with the introduction of crushed walnut shells as a filler.

MATERIALS AND METHODS OF THE RESEARCH

To obtain the polymer composite, the following components were used: distilled water, potato starch (NevaReaktiv, St. Petersburg, Russia), acetic acid 70% (NevaReaktiv, St. Petersburg, Russia), walnut shell powder (size no more than 160 microns). For the research, we used walnut shells of the Chandler variety (grafted) collected in the Belgorod region. To use the shells as fillers for polymer composites, they were ground into a powder form. Before grinding, the shells were thoroughly washed in running water and dried at 110 °C for 3 hours in order to completely remove any remaining water.

Grinding was performed in two stages. At the first stage, large shell fragments were crushed in a vibration mill. After that, the material was ground to a particle size less than 160 micron in a laboratory batch planetary mill, Tencan XQM-1a (manufactured by Tencan, China). The grinding was done in steel cups made from ShKh-1 steel, steel balls with a diameter of 8 to 10 mm were used as the grinding media. The obtained walnut shell powder

from the Chandler variety (grafted) was studied by scanning electron microscopy (SEM) on a TESCAN MIRA 3LMU device with the recording of energy-dispersive X-ray spectra (EDS) at several points (microregions) with a built-in spectrometer X-MAX 50 Oxford Instruments (manufactured by TESCAN ORSAY HOLDING, Czech Republic).

The granulometric composition of the resulting walnut shell powder was studied on the Analysette 22 NanoTec plus laser diffraction particle size analyzer with the laser diffraction method in suspension. For this purpose, a small amount of the powder was diluted with 96% isopropyl alcohol. This is done to avoid excessive swelling of the particles and to obtain more accurate results.

The preparation of the polymeric composite was carried out in several stages. At the first stage, a mixture of starch and walnut shells was added to distilled water, then a pre-prepared 9% solution of acetic acid was added. The formulation for the polymeric matrix is based on a modified version of the composition presented in the study [1], the modification consists of a twofold reduction in the water-solid ratio. The resulting mixture was thoroughly mixed and then transferred to a stainless-steel bowl.

The mixture was heated in the bowl on a laboratory electric heating plate. With continuous stirring, the mixture was brought to the boiling point and kept hot for the next 15 minutes. After that, it was allowed to cool to a temperature between 25–30 °C within half an hour. Unlike the initial suspension of starch particles and walnut shells, the resulting mixture has obtained increased viscosity, which indirectly indicates an increase in polymerization degree for the main components of starch.

To obtain a composite press material, the above mixture was dried. For drying, a NuWav-Pro laboratory microwave unit (manufacturer Nutech Analytical, Kolkata, India) was used. Drying schedule: power – 800 W, magnetron frequency – 2450 MHz. Drying the material in a microwave oven has a number of benefits over drying in a convection oven: among them are reduced drying time (~ 5 minutes), heating the liquid throughout the entire volume simultaneously, and a softer mode of heating. Drying was carried out until the moisture completely evaporated.

The formation of material samples was conducted on a tensile testing machine, REM-100 (manufacturer "Metrotest", Russia), in compression pressing mode. After the resulting press composition had been loaded into a preheated mold at 120 °C, it was manually compacted using a punch and placed in a preheated 120 °C convection oven for 30 minutes. Heating the material is a necessary step in molding the polymer composition, as the polymer matrix in the final press products has thermoplastic qualities. The optimal mode for pressing

the samples was selected based on the change in sample density depending on the pressing pressure and is 72 MPa with holding under pressure for 1 min.

The density study of the resulting composition and powder materials was conducted by direct measurements of the parameters of a tableted sample with a diameter of 30 mm. The density of the composite was calculated as the ratio of the volume of the resulting sample to its mass.

For studying the tensile strength on the three-point static bending, samples were produced in the form of beams 80 mm long, 10 mm width and 4 mm thick. The test conducted at a constant speed of traverse movement of 2 mm/min, support span was 64 mm. The absolute values of sample deformation and applied force obtained as a result of testing were reduced to the relative value of displacement and flexural strain, respectively. To convert the absolute value of the sample deformation (s , mm) into units of relative deformation (ε_f , %) the following formula was used:

$$\varepsilon_f = \frac{600sh}{L^2},$$

where s is the deflection of the sample, mm; h – sample height, mm; L – support span, mm. To convert the absolute bending strain (F , N) into units of flexural stress (σ_f , MPa), the following formula was used:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2},$$

where F – bending strain, N; L – support span, mm; b – sample width, mm; h – sample height, mm.

The study of wettability, as well as the free energy of the surface, was conducted by the "sessile drop" method, with the measurement of the contact angle of wetting (WCA) using the tangential method. The "sessile drop" method involves applying drops of a liquid with a volume of 10 microliters (μl) to the surface of a sample using a glass pipette. To calculate the surface free energy of the composite material using the OWRK method (Owens, Wendt, Rabel, and Kaelble), we studied the wettability of its surface using two liquids with known dispersive and polar surface tension components. The surface free energy was calculated using the OWRK model:

$$\frac{\sigma_l \cdot (\cos\theta + 1)}{2 \cdot \sqrt{\sigma_l^D}} = \sqrt{\sigma_{sol}^P} \cdot \frac{\sqrt{\sigma_l^P}}{\sqrt{\sigma_l^D}} + \sqrt{\sigma_{sol}^D},$$

where σ_l – the surface tension of the liquid, mJ/m^2 ; θ – contact angle of wetting; σ_l^D – dispersion component of the surface tension, mJ/m^2 ; σ_l^P – polar component of the surface tension, mJ/m^2 ; σ_{sol}^P – polar component of the free surface energy, mJ/m^2 ; σ_{sol}^D – dispersion component of the free surface energy, mJ/m^2 .

RESULTS AND DISCUSSION

Study of highly dispersed walnut shell powder

The study used a previously sifted walnut shell powder, which had been passed through a C12/38 sieve with a mesh size of 160 μm to remove larger particles. The results of the granulometric analysis are shown in Figure 1.

Based on the granulometric analysis data, it can be noted that the granulometric composition is typical for systems obtained by dispersing the initial product in planetary ball mills. The resulting system can be well described by a unimodal distribution with a peak at 49 μm , with most particles falling within the range of 1 to 49 μm .

The resulting particle size is well suited for obtaining maximum strength of the resulting composition with minimal energy consumption, since as the particle size decreases, their specific surface area increases, in the case of the system presented above, a component of the order of $\sim 8500 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$, and the homogeneity of the resulting mixture increases. The density of the resulting powder is within the range of $1.07 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$.

Figure 2 shows images of walnut shell powder obtained using a fourth generation scanning electron microscope (SEM) with a TESCAN MIRA 3 Schottky cathode. The data presented in Figure 2 indicate a complex surface morphology of the powder. Walnut shell powder particles have an irregular shape in the form of plates. The cross-sectional (largest) particle size varies from 1 to 20 μm .

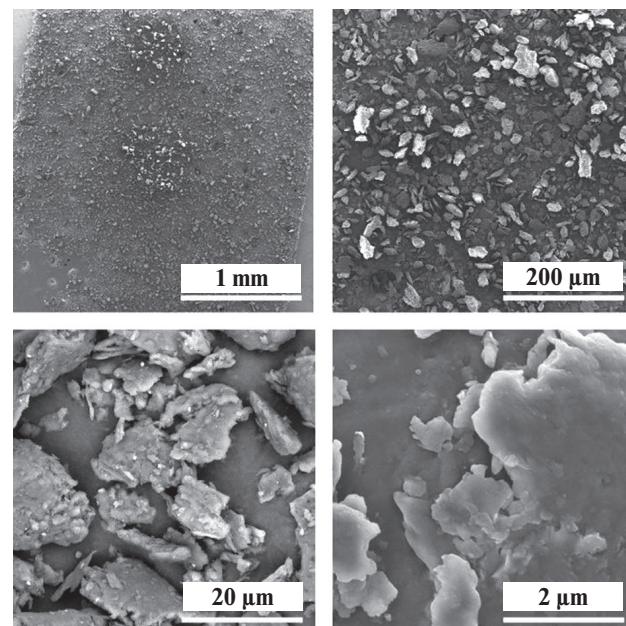


Fig. 2. SEM images of the resulting walnut shell powder

The curves of the combined TG–DSC analysis of walnut powder (Fig. 3) show the presence of several regions associated with various thermal effects.

The thermogravimetric curve contains several sections of mass loss, which occurs due to a number of processes. Thus, in the temperature range from 23.0 to 131.0 $^\circ\text{C}$, a decrease in the mass of the sample to 95.44% is being

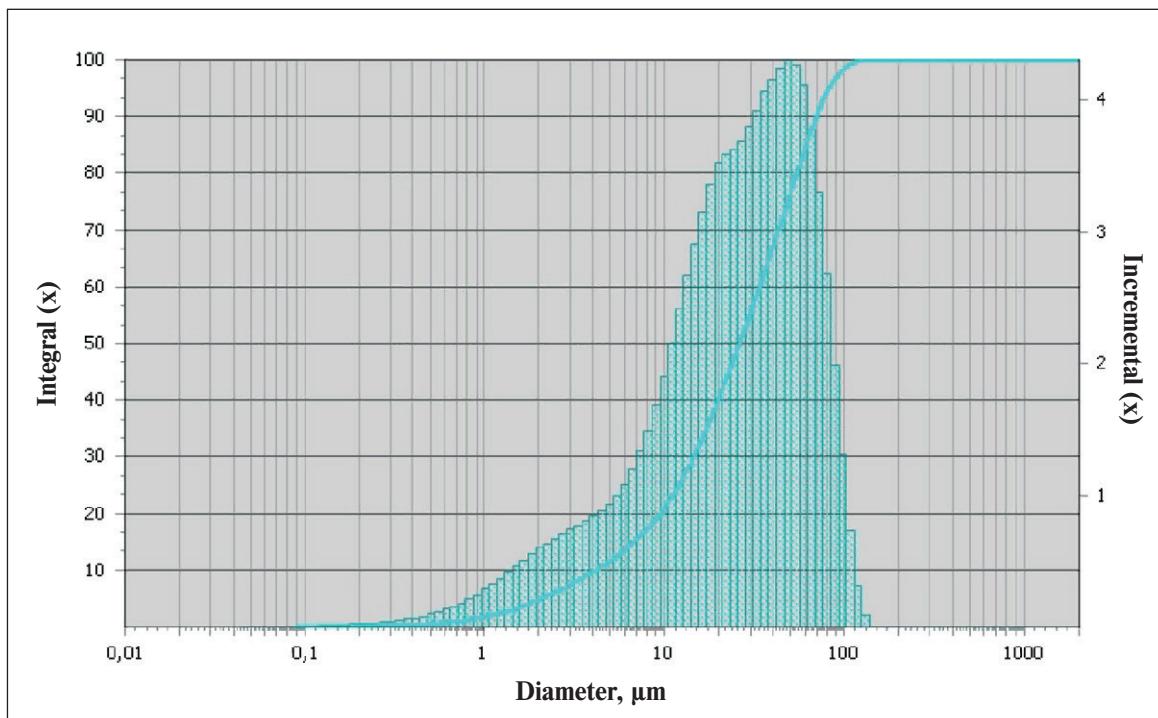


Fig. 1. Particle size distribution of grinding walnut shell powder

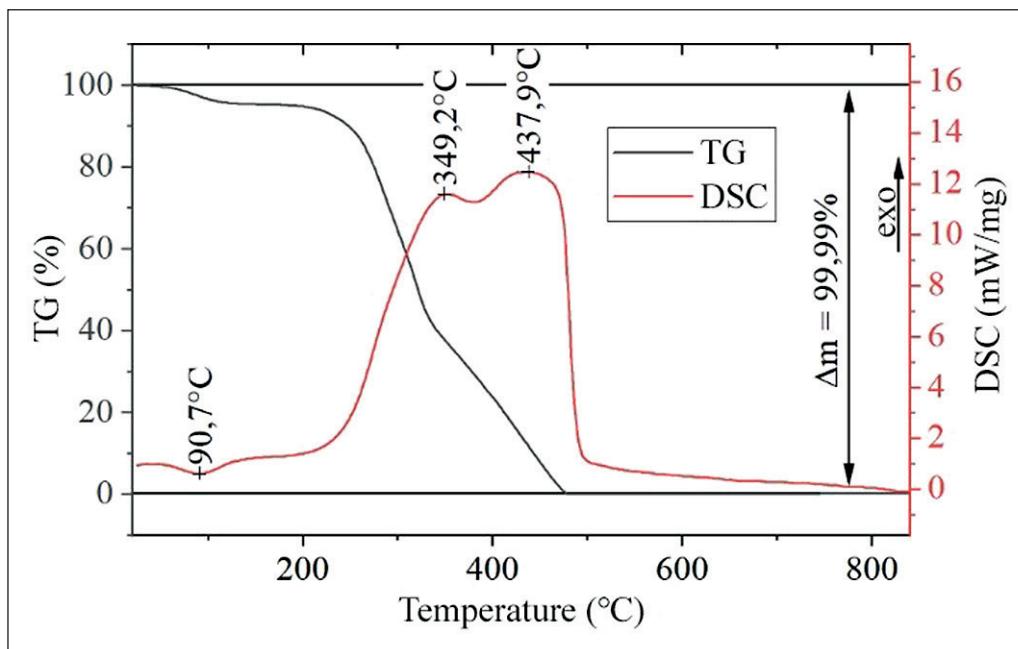


Fig. 3. TG–DSC curves of walnut shells

recorded. In this case, the DSC curve for this temperature range shows one endothermic peak with a minimum at 90.7 °C. The nature of this peak indicates that the process under this temperature range has been involving energy consumption, and the presence of a subsequent plateau on the TG curve indicates stability of the resulting residue in the temperature range from 131.0 to 207.2 °C. Due to the significant specific surface area of the shell powder ($8500 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$) and its hydrophilicity, the considered mass loss and the associated endothermic peak are most likely associated with the removal of adsorbed water.

In the next section of the TG curve, in the range from 131.0 to 207.2 °C, there is a plateau, where device does not detect significant mass loss. There are also no thermal effects within the interval; the DSC curve is being within the zero mark.

In the temperature range from 207.2 to 323.7 °C, the device records a significant (about 50%) weight loss of the sample on the TG curve, with an associated exo-

thermic peak at 349.2 °C. Total mass loss occurs between 349.2 and 476.8 °C, with an associated exothermic peak at 437.9 °C. For organic mixtures, in general, pyrolytic processes occur predominantly in this temperature range. Thus, the peak at 349.2 °C belongs to the pyrolytic decomposition of lignin, noted by the authors in the article [25]. In turn, the peak at 437.9 °C predominantly belongs to the exothermic effect that occurs during the pyrolytic decomposition of cellulose [26].

Study of physical and mechanical parameters of the resulting composition

The polymer press compositions considered in this study are presented in Table 1. The result presented in the table was calculated as the arithmetic mean of three parallel measurements.

The density of the resulting composite largely depends on the amount of filler, which is explained by the lower

Table 1
Studied formulations of the composite

Serial number of the composition	Composite formulation			Auxiliary components	
	Starch, wt.%	Walnut shell powder, wt.%	Composition density, g/cm ³	Water, ml/100 g composite	9% acetic acid solution, ml/100 g composite
Compound 1	75	25	1.42±0.01	625	5
Compound 2	50	50	1.43±0.01		
Compound 3	25	75	1.34±0.01		

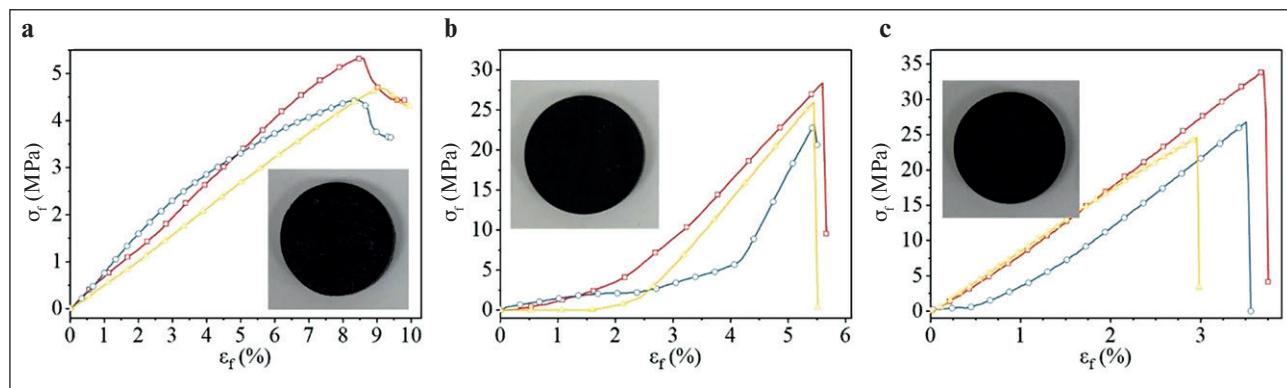


Fig. 4. The “Flexural stress/relative deformation” curves for samples (the insets show the outer appearance of the composition being tested): a – filling 25 wt.%. ($\sigma_f = 4.81 \pm 0.52$ MPa); b – filling 50% wt. ($\sigma_f = 25.85 \pm 2.51$ MPa); a – filling 75% wt. ($\sigma_f = 28.44 \pm 5.71$ MPa)

density of walnut shell powder (1.07 ± 0.01 g/cm³) compared to the polymer matrix (1.40 ± 0.01 g/cm³).

The core strength indicator studied for the resulting polymer composite is the flexural strength at break. Figure 4 shows “the flexural stress/relative deformation” curves obtained as a result of the conducted tests.

Based on the data from the curves presented in Figure 4, the flexural strength at break for compositions with a filling of 25, 50 and 75% wt. are equal to 4.81 ± 0.52 MPa, 25.85 ± 2.51 MPa and 28.44 ± 5.71 MPa, respectively. In this case, the values of the relative deformation index at the flexural strength at break of the samples are in the range of $8.70 \pm 0.47\%$ for a composite with a filling of 25 wt.%, $5.51 \pm 0.10\%$ for a composite with a filling of 50 wt.%, and $3.39 \pm 0.32\%$ for a composite with a filling of 75% wt.

The introduction of a significant amount of walnut powder (over 50% by weight) into the polymer composition provides a beneficial effect on the flexural strength at break of the resulting composite. In the case of this particular composition, there is a nearly five-fold increase in the hardness of the highly filled composite. It is worth noting the change in the shape of the graph “Flexural stress/relative deformation”, in which there is no tensile yield for a highly filled polymer; the test curve in this

case is well described by a linear polynomial. In turn, for a composite with a filling of 25% wt. the presence of flow behavior is noted after reaching the flexural strength at break, which is associated with the properties of the polymer matrix.

Wettability study of the resulting composition

The wettability study of the polymer composite was conducted using two solvents – water ($\sigma_{l_1}^D = 22.6$ mJ/m²; $\sigma_{l_1}^P = 50.2$ mJ/m²) and isopropyl alcohol ($\sigma_{l_1}^D = 3.5$ mJ/m²; $\sigma_{l_1}^P = 19.5$ mJ/m²). Statistically processed data of contact angle of wetting are presented in Table 2.

When measuring the contact angle of wetting for the surface with isopropyl alcohol, no significant deviations in the WCA value were recorded, however, for water, its significant decrease had been determined with an increase in the filler content in the composite from 25 wt.% up to 50% wt., followed by a growth with increasing filler content from 50% wt. up to 75% wt. Pictures of the “sessile drops” and the corresponding WCA values are presented in Figure 5.

It is worth noting that the contact angle of wetting for the polymer matrix with water is also in the range of 60–70°. The untreated walnut shell is completely wetted.

Table 2

The obtained values of the contact angle of wetting for the composite with the solvents

Composite filling, wt.%	Contact angle of wetting		Surface free energy		
	Water	Isopropanol	$\sigma_{l_1}^D$, mJ/m ²	$\sigma_{l_1}^P$, mJ/m ²	General, mJ/m ²
25%	$76,74 \pm 5,75$	$15,21 \pm 4,18$	$11,53 \pm 0,01$	$16,27 \pm 0,57$	$27,8 \pm 0,58$
50%	$62,19 \pm 4,31$	$17,01 \pm 3,04$	$7,25 \pm 0,01$	$32,1 \pm 0,16$	$39,35 \pm 0,17$
75%	$98,13 \pm 2,05$	$14,23 \pm 2,18$	$20,73 \pm 0,01$	$1,84 \pm 0,08$	$22,57 \pm 0,09$

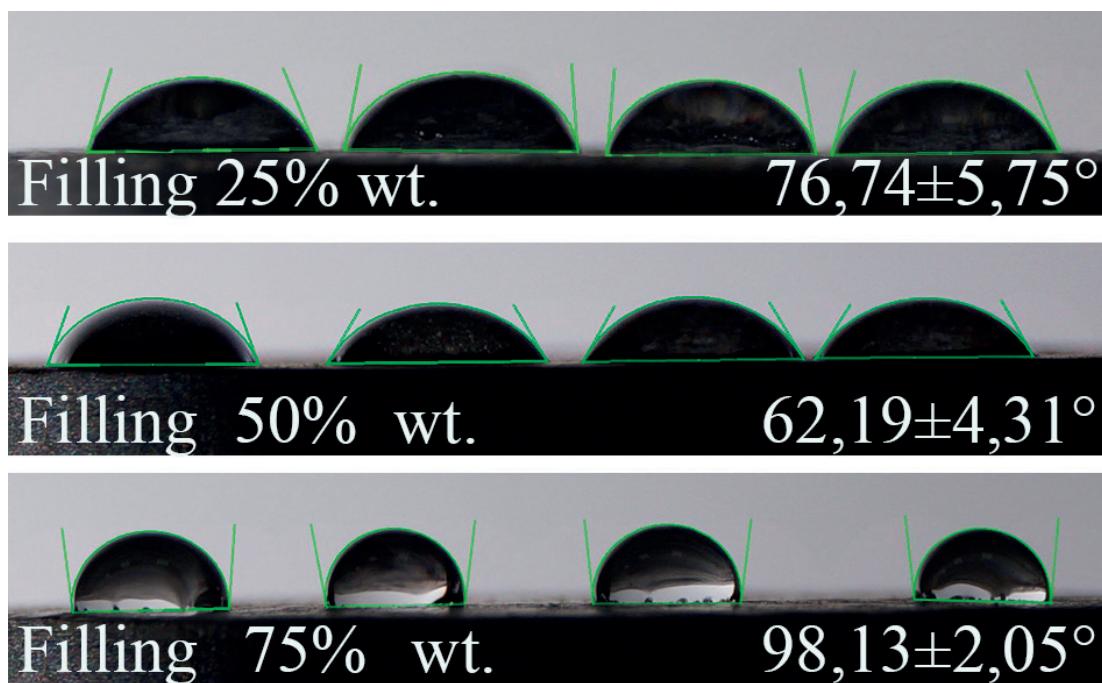


Fig. 5. Representative pictures of “sessile water” drops on a polymer composite

Thermogravimetric and DSC analysis of the resulting composition

For thermogravimetric analysis of the resulting composition with the combined thermogravimetry method (TG) and differential scanning calorimetry (DSC) of the resulting composition, a sample with 50 wt.-%. filler content (walnut shell) was selected.

The sample’s thermogram (Fig. 6) is represented by a complex multi-stage decomposition curve, consisting of 3 main sections. In the first section, in the temperature range from 20.0 to 122.1 °C, a decrease in the mass of the sample to 95.11% is noted. On the DSC curve, one endothermic peak is associated with this region, the center of which is at 86.1 °C. Due to the fact that there is no mass loss recorded by the device in the subsequent sec-

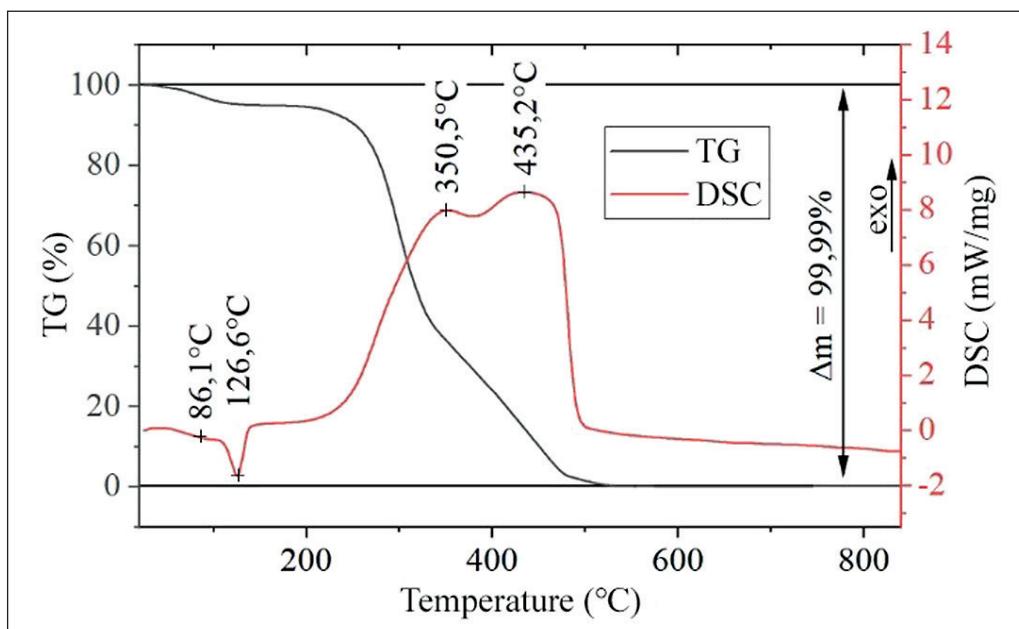


Fig. 6. TG–DSC curves of the composite with filling of 50% wt. walnut shells

tion of the curve, and also based on the endothermic nature of the associated peak, it is most likely that the mass loss that occurred in the temperature range from 20.0 to 122.1 °C is associated with the removal of the water adsorbed by polymer composite.

As noted earlier, in the second section of the thermogravimetric curve in the range from 122.1 to 130.5 °C, the device has not detected significant mass loss, however, the DSC curve shows the presence of an endothermic peak with a minimum at 126.6 °C. Based on the available academic literature data [22, 27] the above peak refers to the softening of the starch thermoplastic polymer. Thus, it can be judged that the optimal temperature regime for molding the resulting composition is in the range from 122.0 to 130.5 °C (overall width peak at half maximum). The temperature of the composite is softening within 103.1 ± 0.1 °C.

The thermogravimetric curve of the third section of the thermogram is characterized by a multi-step decomposition curve without the formation of intermediate fixed constituent. The range from 250.4 to 329.2 °C accounts for about 50% of the total mass loss of the material. In this temperature range, thermal destruction of cellulose occurs, primarily expressed in dehydration, due to the large-scale representation of thermolabile hydroxyl groups in the structure of cellulose. In the temperature range from 329.2 to 480.6 °C (section 4), almost complete combustion of the organic components of the filler and polymer matrix occurs, after which the thermogravimetric curve passes to section 5.

It is worth noting that sections 3–5 exhibit their own rates of mass loss (which is reflected by the slope of the

curve in the thermogram). The DSC curve shows two exothermic peaks associated with these areas at 350.5 °C and 435.2 °C, most likely belonging to the pyrolytic decomposition of lignin and cellulose, respectively [25, 26].

CONCLUSION

Discussed in the article the resulting polymer composition based on a thermoplastic starch polymer has a number of remarkable properties. Compared to untreated walnut shell powder and polymer matrix, the composite has obtained hydrophobic properties, which significantly expands the possibilities of its application.

The resulting composition has showed good strength characteristics. Flexural strength at break is $\sigma_f = 25.85 \pm 2.51$ MPa and $\sigma_f = 28.44 \pm 5.71$ MPa for filling 50% of wt. and 75% wt. accordingly. We can put it on a par with similar composites made from more conventional thermo- and thermoset polymers. The thermograms study of the resulting composition provides more accurate establishment of the operating temperature limits for the polymer composite, the upper of which can be considered the temperature at which the polymer matrix begins to soften – 103.1 °C, as well as to determine the optimal modes for molding products from a thermoplastic composite.

The resulting polymer composite, particularly compositions with a filling of 50% wt. and 75 wt.%, due to their properties, can rightfully be considered promising materials for several products and consumer goods manufacturing, for which the most appropriate is the use of completely biodegradable material.

REFERENCES

1. Kablov E.N. Composites: Today and Tomorrow. *Metals of Eurasia*. 2015; 1: 36–39. (in Russian)
2. Lesovik V.S. Stroitel'nye materialy [Construction materials]. Present and future. *Vestnik MGSU*. 2017; 1: 9–16. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.1.9-16>. (in Russian)
3. Klyuev A.V., Kashapov N.F., Klyuev S.V., Zolotareva S.V., Shchekina N.A., Shorstova E.S., Lesovik R.V., Ayubov N.A. Experimental studies of the processes of structure formation of composite mixtures with technogenic mechano-activated silica component. *Construction Materials and Products*. 2023; 6 (2): 5 – 18. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-2-5-18>
4. Cherkashina N.I., Pavlenko V.I., Noskov A.V., Shkaplerov A.N., Kuritsyn A.A., Popova E.V., Zaitsev S.V., Kuprieva O.V., Kashibadze N.V. Synthesis of PI/POSS nanocomposite films based on track nuclear membranes and assessment of their resistance to oxygen plasma flow. *Polymer*. 2021; 212: 123192. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.123192>
5. Kuzina E., Cherkas A., Rimshin V. Technical aspects of using composite materials for strengthening constructions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365: 032053. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/3/032053>
6. Volodchenko A.A. Efficient Silicate Composites of Dense Structure using hollow microspheres and Unconventional Aluminosilicate Raw Materials. *Construction Materials and Products*. 2023. 6 (2): 19 – 34. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-2-19-34>

7. Shishakina O.A., Palamarchuk A.A. Polymer composite materials in construction. *International Journal of Applied and Basic Research*. 2019; 12-2:234–238. (in Russian)
8. Buzaeva M.V., Ageeva O.V., Antipova I.A. Polymeric basalt fiber composites in construction. *Vestnik Moskovskogo informatsionno-tehnologicheskogo universiteta – Moskovskogo arkhitektono-stroitel'nogo instituta* [Bulletin of the Moscow Information and Technological University – Moscow Institute of Architecture]. 2022; 4: 49–54. (in Russian)
9. Osnos S.P., Rozhkov A.I., Fedotov A.A. Basalt Continuous Fibers: Characteristics and Advantages. Raw materials, technologies and equipment. Creation of factories and materials. *Composite world*. 2022; 2:1 8–27. (in Russian)
10. Abdul Khalil H.P.S., Chong E.W.N., Owolabi F.A.T., Asniza M., Tye Y.Y., Rizal S., Nurul Fazita M.R., Mohamad Haafiz M.K., Nurmiati Z., Paridah M.T. Enhancement of basic properties of polysaccharide-based composites with organic and inorganic fillers: A review. *Journal of Applied Polymer Science*. 2019; 136, 12: 47251. <https://doi.org/10.1002/app.47251>
11. Hayajneh M.T., AL-Oqla F.M., Al-Shrida M.M. Hybrid green organic/inorganic filler polypropylene composites: Morphological study and mechanical performance investigations. *e-Polymers*. 2021; 1, 1: 710-721. <https://doi.org/10.1515/epoly-2021-0074>
12. Cherkashina N. I., Pavlenko V. I., Sidelnikov R. V., Besedin P. Study of the Resistance of a Polymer Composite with Crystalline Silicon Dioxide to the Effect of the Flow of Oxygen Plasma. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2018; 10: 110-118. (in Russian) https://doi.org/10.12737/article_5bd95a78957a23.58646223
13. Kolosova A.S., Sokolskaya M.K., Vitkalova I.A. Fillers for modification of modern polymer composite materials. *Basic research*. 2017; 10-3: 459–465. (in Russian)
14. Paskar V.S., Rubleva O.A. Directions of application of eco-friendly products from wood-composite materials based on woodworking waste. *Advanced science*. 2019; 2(13): 67-71. (in Russian)
15. 44-48. Klimenko N.N., Kolokolchikov I.Yu., Mikhailenko N.Yu., Orlova L.A., Sigaev V.N. New building materials with increased strength based on metallurgy waste. *Glass and ceramics*. 2018; 5: 44-48. (in Russian)
16. Kuznetsova N.V., Barinova O.S. Physical and Mechanical Properties of Cement Composite Building Materials with the Use of CBPB Production Waste. *Building materials*. 2017; 6: 7-9. (in Russian)
17. Treshalin Y.M. Design of technological modes for the production of innovative nonwoven composite materials using flax and hemp processing waste. *Young Scientists for the Development of the National Technology Initiative (POISK)*. 2021; 1: 399-400. (in Russian)
18. Cherkashina N.I., Pavlenko Z.V., Matveenko D.S., Domarev S.N., Pushkarskaya D.V., Ryzhikh D.A. Synthesis and Characteristics of Composite Material with a Plant-Based Filler. *ChemEngineering*. 2023; 7 (2): 38. <https://doi.org/10.3390/chemengineering7020038>
19. Zolotarev A.S. Development of modern eco-friendly ones. Heat-insulating materials based on the processing of crop waste. *Scientific Journal of Young Scientists*. 2022; 5(30): 45–50. (in Russian)
20. Paskar V.S., Rubleva O.A. Experimental Justification of Technological Possibilities of the Method of Manufacturing Eco-Friendly Decorative Products from Crushed Wood. *Polzunovskiy Almanac*. 2020; 1: 59-64. (in Russian)
21. Barczewski M., Sałasińska K., Szulc J. Application of sunflower husk, hazelnut shell and walnut shell as waste agricultural fillers for epoxy-based composites: A study into mechanical behavior related to structural and rheological properties. *Polymer Testing*. 2019; 75: 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.01.017>
22. Zuo Y., He X., Li P., Li W., Wu Y. Preparation and Characterization of Hydrophobically Grafted Starches by In Situ Solid Phase Polymerization. *Polymers*. 2019; 11 (1): 72. <https://doi.org/10.3390/polym11010072>
23. Salasinska K., Barczewski M., Górný R., Kloziński A. Evaluation of highly filled epoxy composites modified with walnut shell waste filler. *Polymer Bulletin*. 2018; 75 (6): 2511-2528. <https://doi.org/10.1007/s00289-017-2163-3>
24. Jiang T., Duan Q., Zhu J., Liu H., Yu L. Starch-based biodegradable materials: Challenges and opportunities. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2020; 3(1): 8-18. <https://doi.org/10.1016/j.aiexpr.2019.11.003>
25. Li J., Bai X., Fang Y., Chen Y., Wang X., Chen H., Yang H. Comprehensive mechanism of initial stage for lignin pyrolysis. *Combustion and Flame*. 2020; 215: P. 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.01.016>
26. Wang Q., Song H., Pan S., Dong N., Wang X., Sun S. Initial pyrolysis mechanism and product formation of cellulose: An Experimental and Density functional theory(DFT) study. *Scientific Reports*, 2020; 10 (1): 3626. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60095-2>
27. Sherif M. A. S. Keshk, Abdullah G. Al-Sehemi, New Composite Based on Starch and Mercerized Cellulose. *American Journal of Polymer Science*. 2013; 3(3): 46-51. <https://doi.org/10.5923/j.ajps.20130303.02>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Natalya I. Cherkashina – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading Researcher-Head of the Research Laboratory "Development of Scientific and Technical Fundamentals for Creating Polymer Systems from Renewable Plant Raw Materials", Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, natalipv13@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0161-3266>

Zoya V. Pavlenko – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Senior Researcher, Research Laboratory of the Department of Theoretical and Applied Chemistry, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, pavlenko.zoe@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1009-2431>

Semyon N. Domarev – Research engineer, Research Laboratory, Department of Theoretical and Applied Chemistry, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, domarev542@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7653-4418>

Artyom Yu. Ruchiy – Laboratory research assistant, Research Laboratory, Department of Theoretical and Applied Chemistry, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova, Belgorod, Russia, artiem.ruchii.99@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-2617-5624>

Vladimir V. Solgalov – postgraduate student, Department of Theoretical and Applied Chemistry, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, solg.vladimir@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1349-388X>

AUTHORS CONTRIBUTION

Natalya I. Cherkashina – scientific advice; setting goals and objectives of the study; analysis of research results; revision of the article's text.

Zoya V. Pavlenko – development of research methodology; analysis of research results; conclusions of the article.

Semyon N. Domarev – conducting the experimental part of the study; analysis of research results; writing the original text of the article.

Artyom Yu. Ruchiy – conducting the experimental part of the study; graphical and tabular presentation of results.

Vladimir V. Solgalov – literature review; carrying out the experimental part of the study.

The authors declare no conflict of interest.

The article was submitted 17.01.2024; approved after reviewing 05.02.2024; accepted for publication 09.02.2024.

Научная статья

УДК 691.175.2

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-1-67-76>

CC BY 4.0

Создание композиционного материала на основе растительных компонентов

Наталья Игоревна Черкашина* , Зоя Владимировна Павленко , Семен Николаевич Домарев ,
Артём Юрьевич Ручий , Владимир Викторович Солгалов 

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: natalipv13@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследование направлено на изучение возможности создания строительного композиционного материала на основе амилозы и амилопектина с введением измельченной грецкой скорлупы в качестве наполнителя. **Материалы и методы исследования.** Для получения композита применялись следующие компоненты: вода дистиллированная, крахмал картофельный (НеваРеактив, Санкт-Петербург, Россия), кислота уксусная 70% (НеваРеактив, Санкт-Петербург, Россия), высокодисперсный порошок скорлупы грецкого ореха. Для исследований использовали скорлупу грецкого ореха сорта Чандлер (привитой), собранного на территории Белгородской области. Получение композита производилось в несколько стадий. На первой стадии смесь крахмала и скорлупы грецкого ореха добавлялся в дистиллированную воду, после чего добавлялся предварительно приготовленный 9% раствор уксусной кислоты. Полученная смесь тщательно перемешивалась, после чего перемещалась в чашу из нержавеющей стали и подверглась термообработке. Полученную смесь затем прессовали методом твердофазного компактирования при давлении 72 МПа. Были изучены физико-механические показатели полученного композита, его термические свойства, а также гидрофобно-гидрофильный баланс поверхности. **Результаты и обсуждение.** Полученный композит обладает хорошими прочностными характеристиками. Пределы прочности на изгиб $\sigma_f = 25,85 \pm 2,51$ МПа и $\sigma_f = 28,44 \pm 5,71$ МПа для наполнения 50% масс. и 75% масс. соответственно ставят его в один ряд с аналогичными композитами из более традиционных термо- и реактопластичных полимеров. Установлен температурный предел эксплуатации композиционного материала, верхним из которых можно считать температуру начала размягчения полимерной матрицы – 103,1 °C. **Заключение.** Полученные результаты исследования представляют важное значение для понимания механизмов создания композиционных материалов, состоящих полностью на основе растительных компонентов с использованием, в том числе, отходов агропромышленного производства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: растительное сырье, высокодисперсный порошок скорлупы грецкого ореха, композиционный материал, крахмал, краевой угол смачивания, термические свойства, прочность при изгибе.

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России № FZWN-2024-0001 с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Черкашина Н.И., Павленко З.В., Домарев С.Н., Ручий А.Ю., Солгалов В.В. Создание композиционного материала на основе растительных компонентов // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т.16, № 1. С. 67–76. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-1-67-76>. – EDN: QNOAYS.

ВВЕДЕНИЕ

Несколько лет назад развитие высокотехнологичных отраслей начало характеризоваться активным внедрением композиционных материалов и исследованиями о возможностях их применения. В процессе идентификации необходимого состава можно было получать материал с заранее определенными

технологическими требованиями. Некоторые металлы стали неконкурентоспособными в экстремальных условиях эксплуатации за счет уникальных свойств композиционных материалов, таких как коррозийная стойкость, высокий показатель прочности, термостойкость. Еще одним преимуществом композиционных материалов является простота изготовления без дополнительной обработки, что снижает экономиче-

ские затраты на предэксплуатационную длительную, многозадачную подготовку материала [1–3]. Данный аспект делает их особенно привлекательными для самостоятельного применения в строительной отрасли, отрасли создания современных космических аппаратов [4], а также для упрочнения строительных конструкций за счет высокопрочных соединений [5, 6]. Эксплуатационные параметры устанавливаются в процессе создания материала с учетом термических, химических, механических свойств и анизотропного поведения конечного материала [7]. В процессе развития индустрии композиционных материалов они стали одними из самых востребованных ресурсов для высокотехнологичных отраслей. Ученые начали изучать возможность введения в полимерную матрицу различных армирующих веществ для улучшения физико-механических характеристик. Для облицовки зданий и в качестве отделочных материалов могут использоваться неармированные полимеры [8]. Армированные волокном полимеры являются высокопрочными, легкими, коррозионностойкими материалами, которые могут применяться для создания цельнокомпозитных конструкций, для укрепления мостов и зданий и для оснащения зданий теплоизоляцией и звукоизоляцией [9, 10]. В процессе создания таких материалов вещество матрицы обволакивает и закрепляет в определенном положении армирующие волокна, создавая прочное взаимодействие материалов на межклеточном уровне [8].

В процессе развития сферы применения композиционных материалов изменились эксплуатационные требования к конечным продуктам, что стимулировало поиск новых решений – модификация химическими веществами. За счет ввода новых компонентов изменялись свойства и характеристики вещества с добавками. Модификаторы в некоторых случаях облегчают процесс переработки изделий, а также повышают устойчивость к различным формам деструкции, повышают стойкость к горению. Наполнители по природе могут быть органическими и неорганическими [11, 12]. В свою очередь они разделяются на три группы по физическому состоянию: на дисперсные (порошкообразные), волокнистые и листовые. Активность наполнителей определяется такими факторами, как: энергия адгезии полимера к наполнителю, дисперсность частиц, соотношение наполнителя и полимера. Для наилучшего взаимодействия поверхность наполнителя может быть модифицирована дополнительно. Соответственно, любой наполнитель можно сделать активным при необходимости [13].

В дальнейшем развитии науки стало популярно направление ресурсосберегающих технологий. Композиционные материалы стали создавать с наполнителями из различных отработанных материалов:

древесных отходов [14], отходов металлургической промышленности [15], отходов производства цементно-стружечных плит [16], а также стали создавать материалы с экологичными наполнителями, представляющими собой сельскохозяйственные отходы [17–20]. Каждый наполнитель способствовал улучшению определенных прочностных, декоративных, термостойких, коррозионностойких показателей материала в конечном итоге. А также такой способ эффективно решал проблему повторного использования сырья и утилизацию неперерабатываемых отходов. Производство композитов из натуральных волокон позволит сократить использование неразлагаемых материалов. Использование модифицированных органических наполнителей в матрице термопластичных полимеров существенно снижает стоимость продукта. Модификация наполнителя может в целом улучшить физико-механические свойства готового материала [21, 22]. Полимерные композиты, модифицированные органическим наполнителем, являются конкурентоспособной альтернативой традиционным строительным материалам из древесины. Особое внимание представляют собой лигнифицированные частицы сельскохозяйственных отходов, представляющих собой лузгу, скорлупу, стебли и оболочки различных растений. Они мало применяются в других областях и являются отходами. Следовательно, это дешевый сырьевой материал, который можно повторно и эффективно применять [23]. Скорлупа грецкого ореха содержит большое количество лигноцеллюлозы, ее введение в полимерную матрицу в качестве наполнителя улучшает свойства материала, придавая ему более низкую плотность, физико-механическую устойчивость за счет создания прочных связей. Для замены в матрице синтетической составляющей полимера будет использована смесь на основе амилозы и аминопектина. Основными преимуществами замены синтетических неорганических наполнителей являются природное происхождение, высокие физико-механические показатели и хорошая теплоизоляция. Конечный продукт будет экологически чистым и прочным, устойчивым к внешним воздействиям. При взаимодействии компонентов преимущественные качества каждого из компонентов по отдельности будут направленно воздействовать на улучшение свойств готового материала. Главным критерием такого материала будет безопасность для организмов и окружающей среды [24]. Высокие физико-механические показатели композиционных материалов, их надежность, устойчивость к внешним воздействиям и долговечность в эксплуатации обеспечивают применение не только в строительных областях, но и во всех развивающихся высокотехнологичных отраслях.

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Целью исследования данной работы является изучение уникальных свойств композиционного материала на основе амилозы и амилопектина с введением измельченной грецкой скорлупы в качестве наполнителя.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для получения полимерного композита применялись следующие компоненты: вода дистиллированная, крахмал картофельный (НеваРеактив, Санкт-Петербург, Россия), кислота уксусная 70% (НеваРеактив, Санкт-Петербург, Россия), порошок скорлупы грецкого ореха (крупность не более 160 мкм).

Для исследований использовали скорлупу грецкого ореха сорта Чандлер (привитой), собранного на территории Белгородской области. Для использования скорлупы в качестве наполнителей для полимерных композитов проводили измельчение скорлупы до порошкообразного состояния. Перед измельчением скорлупу хорошо промывали в проточной воде и высушивали при 110 °C в течение 3 часов для полного удаления воды.

Измельчение проводили в два этапа, на первом этапе крупные фрагменты скорлупы измельчались в вибрационной мельнице, после чего материал измельчали до крупности менее 160 мкм в лабораторной планетарной мельнице периодического действия Tencan XQM-1a (Tencan, Китай). Растирание производили в стальных стаканах из стали ШХ-1, в качестве мелющих тел использовали шары диаметром 8–10 мм из стали той же марки.

Полученный порошок скорлупы грецкого ореха сорта Чандлер (привитой) исследовался методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе TESCAN MIRA 3LMU со снятием энергодисперсионных рентгеновских спектров (ЭДС) в нескольких точках (микрообластях) встроенным спектрометром X-MAX 50 Oxford Instruments (TESCAN ORSAY HOLDING, Чехия).

Гранулометрический состав полученного порошка скорлупы грецкого ореха исследовался на лазерном дифракционном анализаторе размера частиц Analysette 22 NanoTec plus методом лазерной дифракции в суспензии. Для этого небольшое количество порошка разводилось в 96% изопропиловом спирте, так как он позволяет избежать излишнего набухания частиц, которое приводит к искажению результатов.

Получение полимерного композита производилось в несколько стадий. На первой стадии смесь крахмала и скорлупы грецкого ореха добавлялась в дистиллированную воду, после чего добавлялся предварительно приготовленный 9% раствор уксусной кислоты. Рецептура для полимерной матрицы

основывается на модифицированном варианте состава, представленного в исследовании [1], модификация заключается в двукратном сокращении водотвердого соотношения. Полученная смесь тщательно перемешивалась, после чего перемещалась в чашу из нержавеющей стали.

Нагрев смеси в чаше производился на лабораторной нагревательной электроплитке. При постоянном помешивании смесь доводилась до кипения и прогревалась в течение последующих 15 мин, после чего в течение получаса охлаждалась до температуры порядка 25–30 °C. В отличие от исходной суспензии частиц крахмала и скорлупы грецкого ореха, полученная смесь обладает повышенной вязкостью, что косвенно указывает на повышение степени полимеризации основных составляющих крахмала.

Для получения композитного пресс материала производилась сушка вышеуказанной полученной смеси. Для сушки применялась лабораторная СВЧ установка NuWav-Pro (Nutech Analytical, Колката, Индия), режим сушки: мощность – 800 Вт, частота магнетрона – 2450 МГц. Просушивание материала в СВЧ печи имеет ряд преимуществ перед сушкой в конвекционном сушильном шкафу, к таковым относятся уменьшенное время просушивания (~ 5 минут), прогрев жидкости сразу по всему объему, более мягкий режим температурного прогрева материала. Сушка производилась до полного испарения влаги.

Формование образцов материала производилось на испытательной разрывной машине РЭМ-100 (Метротест, Россия) в режиме компрессионного прессования. Полученная пресс-композиция загружалась в предварительно прогретую при 120 °C пресс-форму, после чего вручную компактировалась пуансоном и на 30 мин. размещалась в камере конвекционной печи, прогретой до 120 °C. Прогрев материала является необходимой стадией формования полимерной композиции, так как полимерная матрица в получаемом прессе материала обладает термопластичными свойствами. Оптимальный режим прессования образцов был подобран по изменению плотности образца в зависимости от давления прессования и составляет 72 МПа с выдержкой под давлением в течение 1 мин.

Исследование плотности регулирующей композиции и порошковых материалов проводилось методом прямых измерений параметров таблетированного образца диаметром 30 мм. Плотность композита вычислялась как отношение объема полученного образца к его массе.

Для исследования предела прочности на трехточечный статический изгиб изготавливались образцы в форме балочек длиной 80 мм, шириной 10 мм и толщиной 4 мм. Испытание проводилось при постоянной скорости перемещения траверсы

2 мм/мин, расстояние между опорами составляет 64 мм. Полученные в результате испытаний величины абсолютного значения деформации образца и прилагаемого усилия приводились к относительному значению перемещения и изгибающего напряжения соответственно. Для пересчета абсолютного значения деформации образца (s , мм) в единицы относительной деформации (ε_f , %) использовалась следующая формула:

$$\varepsilon_f = \frac{600sh}{L^2},$$

где s – прогиб образца, мм; h – высота образца, мм; L – расстояние между опорами, мм. Для пересчета абсолютного изгибающего усилия (F , Н) в единицы изгибающего напряжения (σ_f , МПа) применялась следующая формула:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2},$$

где F – изгибающее усилие, Н; L – расстояние между опорами, мм; b – ширина образца, мм; h – высота образца, мм.

Исследование смачиваемости, а также свободной энергии поверхности проводилось методом «сидячей капли» с измерением значения краевого угла смачивания (КУС) тангенциальным методом. Реализация метода «сидячей капли» заключается в нанесении с помощью стеклянной пипетки на поверхность образца капель жидкости объемом 10 мкл. Для вычисления свободной энергии поверхности методом OWRK (Owens, Wendt, Rabel and Kaelble) исследование смачиваемости поверхности композита проводилось с применением двух жидкостей с известными дисперсной и полярной составляю-

щими поверхностного натяжения. Расчет свободной энергии поверхности проводился по модели OWRK:

$$\frac{\sigma_l \cdot (\cos\theta + 1)}{2 \cdot \sqrt{\sigma_{sol}^D}} = \sqrt{\sigma_{sol}^P} \cdot \frac{\sqrt{\sigma_l^P}}{\sqrt{\sigma_l^D}} + \sqrt{\sigma_{sol}^D},$$

где σ_{*} – поверхностное натяжение жидкости, мДж/м²; θ – краевой угол смачивания; σ_{*}^D – дисперсионная составляющая поверхностного натяжения жидкости, мДж/м²; σ_{*}^P – полярная составляющая поверхностного натяжения жидкости, мДж/м²; σ_{tb}^P – полярная составляющая СЭП, мДж/м²; σ_{tb}^D – дисперсная составляющая СЭП, мДж/м².

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование высокодисперсного порошка скорлупы грецкого ореха

Применяемый в исследовании в роли наполнителя порошок скорлупы грецкого ореха предварительно просеивался через сито С12/38 (размер ячейки 160 мкм) для удаления крупных частиц. Результаты гранулометрического анализа представлены на рис. 1.

Исходя из данных гранулометрического анализа, можно отметить, что гранулометрический состав является типичным для систем, получаемых диспергацией исходного продукта в планетарных шаровых мельницах. Полученная система хорошо описывается мономодальным распределением с модой при 49 мкм, при этом большая часть частиц приходится на диапазон 1 до 49 мкм.

Полученный размер частиц хорошо подходит для получения максимальной прочности результирую-

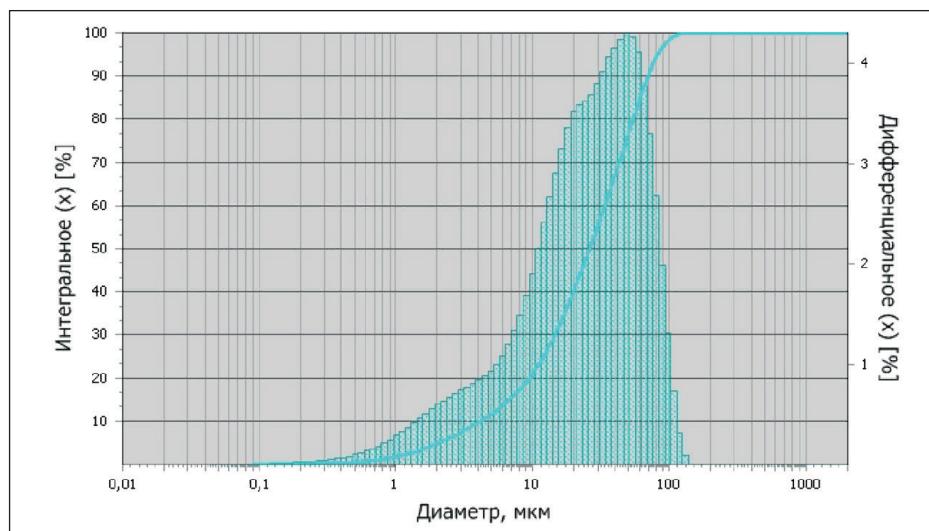


Рис. 1. Распределение размеров частиц порошка скорлупы грецкого ореха после помола

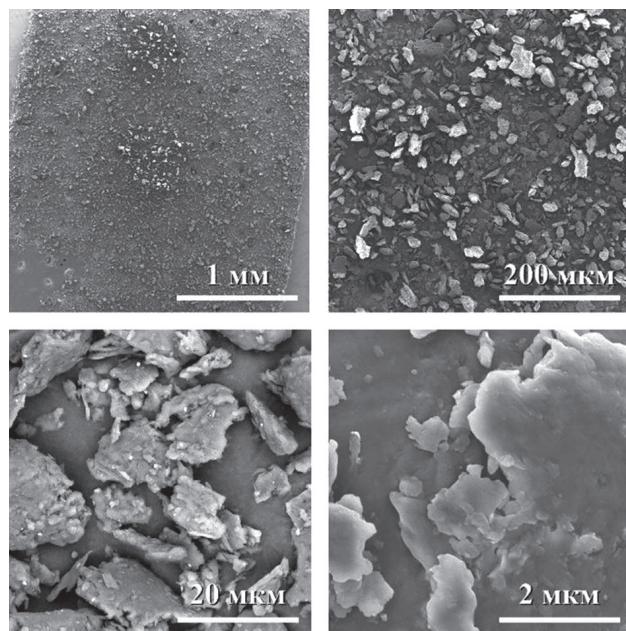


Рис. 2. СЭМ-изображения полученного порошка скорлупы грецкого ореха

щей композиции при минимальных энергозатратах, так как с уменьшением размера частиц возрастает их удельная поверхность, в случае представленной выше системы составляющая порядка $\sim 8500 \text{ см}^2/\text{см}^3$, и повышается гомогенность получаемой смеси. Плотность полученного порошка находится в пределах $1,07 \pm 0,01 \text{ г}/\text{см}^3$.

На рис. 2 представлены изображения порошка скорлупы грецкого ореха, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) четвертого поколения с катодом Шоттки TESCAN

MIRA 3. Данные, представленные на рис. 2, указывают на сложную поверхностную морфологию порошка. Частицы порошка скорлупы грецкого ореха имеют неправильную форму в виде пластин. Размер частиц в поперечном размере (наибольшем) варьируется от 1 до 20 мкм.

На кривых совместного ТГ–ДСК анализа порошка грецкого ореха (рис. 3) отмечается наличие нескольких участков, связанных с различными термическими эффектами.

На термогравиметрической кривой присутствует несколько участков потери массы, возникновение которых происходит ввиду ряда процессов. Так, в интервале температур от 23,0 до 131,0 °C фиксируется снижение массы образца до 95,44%. При этом на кривой ДСК на данный интервал температур приходится один эндотермический пик с минимумом при 90,7 °C. Характер данного пика указывает на то, что происходивший в этом интервале температур процесс протекал с потреблением энергии, а наличие последующего плато на кривой ТГ свидетельствует о том, что полученный остаток стабилен в интервале температур от 131,0 до 207,2 °C. Ввиду значительной удельной поверхности порошка скорлупы ($8500 \text{ см}^2/\text{см}^3$) и ее гидрофильности рассматриваемую потерю массы и ассоциированный с ней эндотермический пик наиболее вероятно связан с удалением адсорбированной воды.

На следующем участке кривой ТГ на диапазон от 131,0 до 207,2 °C приходится плато, на протяжении которого прибором не фиксируется значительной потери массы. В данном промежутке также отсутствуют термические эффекты, кривая ДСК преимущественно проходит в пределах нулевой отметки.

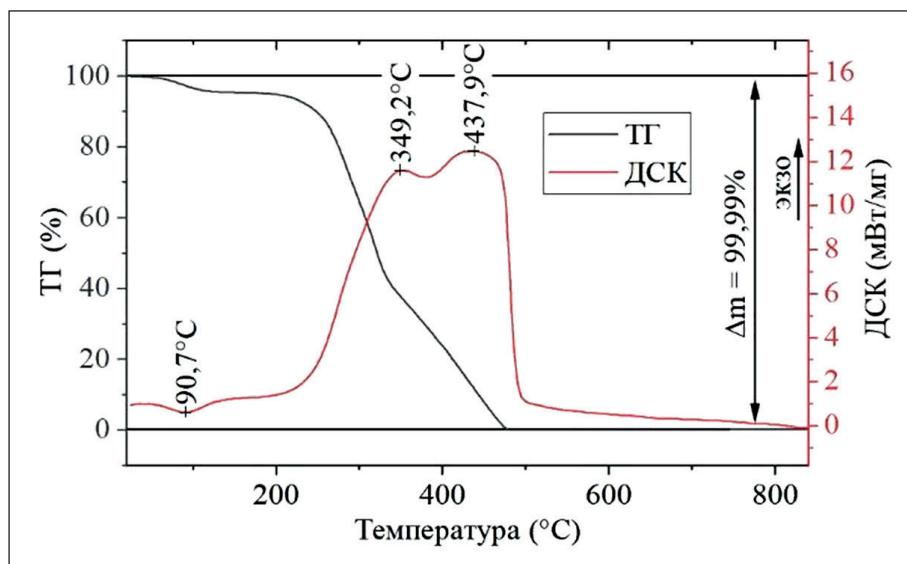


Рис. 3. ТГ–ДСК кривые скорлупы грецкого ореха

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В диапазоне температур от 207,2 до 323,7 °C на криовой ТГ прибором фиксируется значительная (порядка 50%) потеря массы образца, с ассоциированным экзотермическим пиком при 349,2 °C. Полная потеря массы приходится на интервал от 349,2 до 476,8 °C, с ассоциированным экзотермическим пиком при 437,9 °C. Для органических смесей в общем случае на данный температурный диапазон приходятся преимущественно пиролитические процессы. Так, пик при 349,2 °C принадлежит пиролитическому разложению лигнина, отмечаемому авторами в статье [25]. В свою очередь пик 437,9 °C преимущественно принадлежит экзотермическому эффекту, возникающему при пиролитическом разложении целлюлозы [26].

Изучение физико-механических показателей результирующей композиции

Рассматриваемые в данном исследовании полимерные пресс-композиции представлены в табл. 1, представленный в таблице результат вычислялся как среднее арифметическое трех параллельных измерений.

Плотность результирующего композита в значительной степени зависит от количества наполнителя, что объясняется меньшей плотностью порошка скор-

лупы грецкого ореха ($1,07 \pm 0,01 \text{ г}/\text{см}^3$) в сравнении с полимерной матрицей ($1,40 \pm 0,01 \text{ г}/\text{см}^3$).

Основным изучаемым прочностным показателем для получаемого полимерного композита является предел прочности на изгиб. Полученные в результате испытаний кривые «изгибающее напряжение / относительная деформация» представлены на рис. 4.

Согласно данным кривых, представленных на рис. 4, пределы прочности для композиций с наполнением 25, 50 и 75% масс. равны $4,81 \pm 0,52 \text{ МПа}$, $25,85 \pm 2,51 \text{ МПа}$ и $28,44 \pm 5,71 \text{ МПа}$ соответственно. При этом значения показателя относительной деформации на пределе прочности образцов находятся в диапазоне $8,70 \pm 0,47\%$ для композита с наполнением 25% масс., $5,51 \pm 0,10\%$ для композита с наполнением 50% масс. и $3,39 \pm 0,32\%$ для композита с наполнением 75% масс.

Введение значительного количества порошка грецкого ореха (свыше 50% масс.) в полимерную композицию благоприятно оказывается на пределе прочности результирующего композита. В случае рассматриваемой композиции отмечается практически пятикратное упрочнение высоконаполненного композита. Стоит отметить и изменение общего вида кривой «изгибающее напряжение/относительная деформация», на которой для высоконаполненно-

Таблица 1
Исследуемые составы композитов

Порядковый номер состава	Состав композита			Вспомогательные компоненты	
	Крахмал, % масс.	Порошок скорлупы грецкого ореха, % масс.	Плотность композиции, $\text{г}/\text{см}^3$	Вода, мл/100 г композита	9% раствор уксусной кислоты, мл/100 г композита
Состав 1	75	25	$1,42 \pm 0,01$	625	5
Состав 2	50	50	$1,43 \pm 0,01$		
Состав 3	25	75	$1,34 \pm 0,01$		

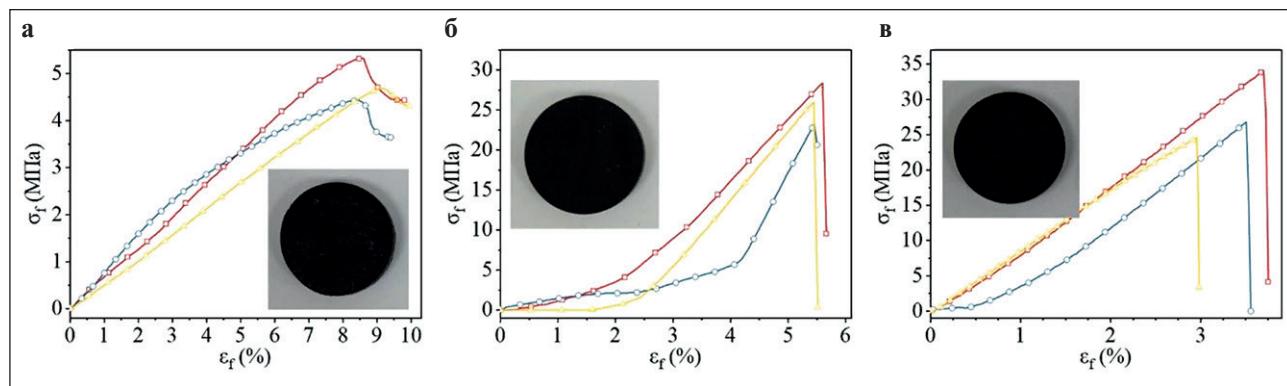


Рис. 4. Кривые «изгибающее напряжение/относительная деформация» для образцов (на вставках представлен внешний состав, подвергаемого испытаниям): а – наполнение 25% масс. ($\sigma_f = 4,81 \pm 0,52 \text{ МПа}$); б – наполнение 50% масс. ($\sigma_f = 25,85 \pm 2,51 \text{ МПа}$); в – наполнение 75% масс. ($\sigma_f = 28,44 \pm 5,71 \text{ МПа}$)

го полимера отсутствует предел текучести, кривая испытания в данном случае хорошо описывается полиномом первой степени. В свою очередь, у композита с наполнением 25% масс. отмечается наличие текучести после достижения предела прочности, что связано со свойствами полимерной матрицы.

Исследование смачиваемости результирующей композиции

Исследование смачиваемости полимерного композита проводилось с использованием двух растворителей: воды ($\sigma_{\text{ж}}^D = 22,6 \text{ мДж}/\text{м}^2$; $\sigma_{\text{ж}}^P = 50,2 \text{ мДж}/\text{м}^2$) и изопропилового спирта ($\sigma_{\text{ж}}^D = 3,5 \text{ мДж}/\text{м}^2$; $\sigma_{\text{ж}}^P = 19,5 \text{ мДж}/\text{м}^2$). Статистически обработанные данные измерения краевого угла смачивания представлены в табл. 2.

При измерении КУС поверхности изопропиловым спиртом значительных отклонений в значении КУС зафиксировано не было, однако для воды было отмечено его значительное уменьшение при увеличении содержания наполнителя в композите от 25% масс. до 50% масс., с последующим возрастанием при увеличении содержания наполнителя от 50% масс. до 75% масс. Изображения «сидячих» капель и соответствующие им значения КУС представлены на рис. 5.

Стоит отметить, что краевой угол смачивания полимерной матрицы водой также находится в пределах 60–70°. Необработанная скорлупа грецкого ореха смачивается полностью.

Термогравиметрический и ДСК анализ результирующей композиции

Для термогравиметрического анализа результирующей композиции методом совмещенной термогравиметрии (ТГ) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) результирующей композиции был отобран образец с 50% масс. содержанием наполнителя (скорлупы грецкого ореха).

Термограмма образца (рис. 6) представлена сложной кривой многошаговой декомпозиции, состоящей из 3 основных участков. На первом участке, лежащем в диапазоне температур от 20,0 °C до 122,1 °C, отмечается снижение массы образца до 95,11%. На кривой ДСК с данным участком ассоциирован один эндотермический пик, центр которого приходится на 86,1 °C. Ввиду того, что на последующем участке отсутствует фиксируемая прибором потеря массы, а также исходя из эндотермического характера ассоциированного с ней пика, наиболее вероятно, что происходившая в диапазоне температур от 20,0 до 122,1 °C потеря массы связана с удалением адсорбированной полимерным композитом воды.

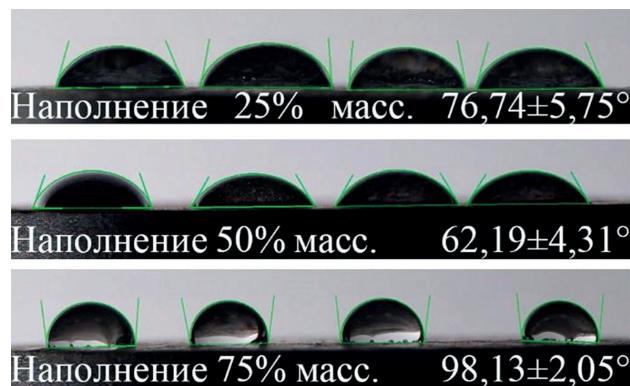


Рис. 5. Характерные изображения «сидячих» капель воды на полимерном композите

На втором участке термогравиметрической кривой в диапазоне от 122,1 до 130,5 °C прибором не фиксируется значительной потери массы, однако на кривой ДСК отмечается наличие эндотермического пика с минимумом при 126,6 °C. Исходя из имеющихся литературных данных [22, 27], вышеуказанный пик относится к размягчению крахмального термопластичного полимера. Таким образом, можно судить, что оптимальный температурный режим для формования получаемой композиции приходится на диапазон от 122,0 до 130,5 °C (точки полной ширины пика на половине высоты). Температура размягчения композита находится в пределах 103,1±0,1 °C.

Термогравиметрическая кривая третьего участка термограммы характеризуется кривой многошагово-

Таблица 2
Полученные значения краевого угла смачивания композита растворителями

Наполнение композита, % масс.	Краевой угол смачивания		Свободная энергия поверхности		
	Вода	Изопропанол	$\sigma_{\text{ж}}^D, \text{ мДж}/\text{м}^2$	$\sigma_{\text{ж}}^P, \text{ мДж}/\text{м}^2$	Общая, $\text{мДж}/\text{м}^2$
25%	76,74±5,75	15,21±4,18	11,53±0,01	16,27±0,57	27,8±0,58
50%	62,19±4,31	17,01±3,04	7,25±0,01	32,1±0,16	39,35±0,17
75%	98,13±2,05	14,23±2,18	20,73±0,01	1,84±0,08	22,57±0,09

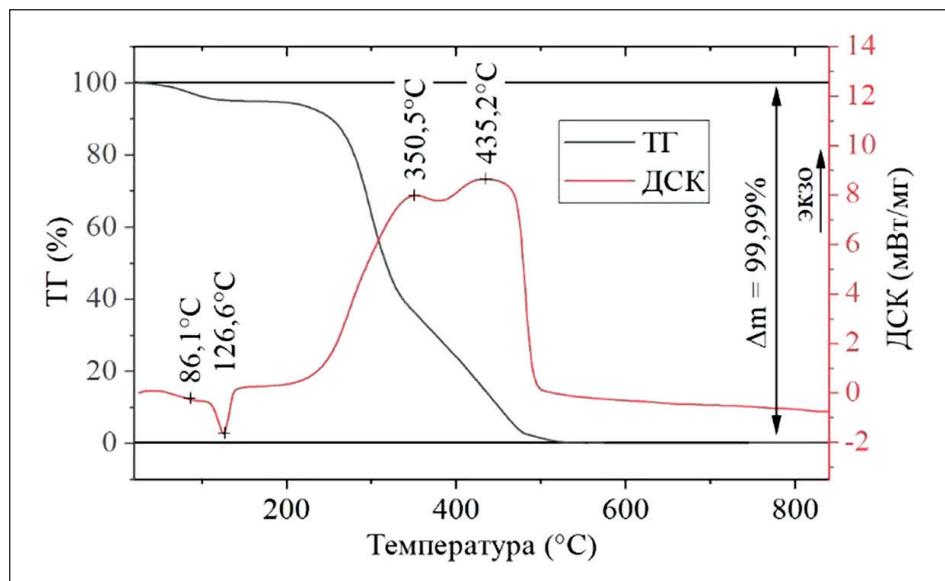


Рис. 6. ТГ–ДСК кривые композита с наполнением 50% масс. скорлупы грецкого ореха

вой декомпозиции без образования промежуточных устойчивых компонентов. На интервал от 250,4 до 329,2 °C приходится порядка 50% от общей потери массы материала. В данном интервале температур происходит термодеструкция целлюлозы, в первую очередь, выражаясь в дегидратации ввиду широкой представленности в структуре целлюлозы термолабильных гидроксильных групп. В интервале температур от 329,2 до 480,6 °C (4 участок) происходит практически полное сгорание органических составляющих наполнителя и полимерной матрицы, после чего термогравиметрическая кривая переходит на 5 участок.

Примечателен тот факт, что для участков 3–5 характерны свои скорости потери массы (на термограмме это отражается на наклоне кривой). На кривой ДСК отмечаются два ассоциированных с данными участками экзотермических пика при 350,5 и 435,2 °C, наиболее вероятно принадлежащих пиrolитическому разложению лигнина и целлюлозы соответственно [25, 26].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная в статье результирующая полимерная композиция на основе термопластичного крахмального полимера обладает рядом примеча-

тельных свойств. В сравнении с необработанным порошком скорлупы грецкого ореха и полимерной матрицей композит обладает гидрофобными свойствами, что значительно расширяет возможности его эксплуатации.

Результирующая композиция показала хорошие прочностные характеристики. Пределы прочности на изгиб $\sigma_f = 25,85 \pm 2,51$ МПа и $\sigma_f = 28,44 \pm 5,71$ МПа для наполнения 50% масс. и 75% масс. соответственно ставят его в один ряд с аналогичными композитами из более традиционных термо- и реактопластичных полимеров.

Изучение термограмм результирующей композиции позволило более точно установить температурные пределы эксплуатации полимерного композита, верхним из которых можно считать температуру начала размягчения полимерной матрицы – 103,1 °C, а также установить оптимальные режимы формования изделий из термопластичного композита.

Полученный полимерный композит, особенно составы с наполнением 50% масс. и 75% масс., благодаря своим свойствам по праву можно считать перспективными материалами для изготовления целого ряда изделий и товаров народного потребления, для которых наиболее целесообразным является применение полностью биоразлагаемого материала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // *Металлы Евразии*. 2015. № 1. С. 36–39.
2. Лесовик В.С. Строительные материалы. Настоящее и будущее // *Вестник МГСУ*. 2017. № 1. С. 9–16. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.1.9-16>
3. Klyuev A.V., Kashapov N.F., Klyuev S.V., Zolotareva S.V., Shchekina N.A., Shorstova E.S., Lesovik R.V., Ayubov N.A. Experimental studies of the processes of structure formation of composite mixtures with technogenic mechano-activated silica component. *Construction Materials and Products*. 2023; 6 (2): 5 – 18. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-2-5-18>
4. Cherkashina N.I., Pavlenko V.I., Noskov A.V., Shkaplerov A.N., Kuritsyn A.A., Popova E.V., Zaitsev S.V., Kuprieva O.V., Kashibadze N.V. Synthesis of PI/POSS nanocomposite films based on track nuclear membranes and assessment of their resistance to oxygen plasma flow. *Polymer*. 2021; 212: 123192. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.123192>
5. Kuzina E., Cherkas A., Rimshin V. Technical aspects of using composite materials for strengthening constructions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365: 032053. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/3/032053>
6. Volodchenko A.A. Efficient Silicate Composites of Dense Structure using hollow microspheres and Unconventional Aluminosilicate Raw Materials. *Construction Materials and Products*. 2023. 6 (2): 19–34. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-2-19-34>
7. Шишакина О.А., Паламарчук А.А. Полимерные композиционные материалы в строительстве // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2019. Т. 12, № 2. С. 234–238.
8. Бузаева М.В., Агеева О.В., Антипова И.А. Полимерные базальтоволокнистые композиты в строительстве // *Вестник Московского информационно-технологического университета – Московского архитектурно-строительного института*. 2022. № 4. С. 49–54.
9. Оснос С.П., Рожков А.И., Федотов А.А. Базальтовые непрерывные волокна: характеристики и преимущества. Сырье, технологии и оборудование. Создание фабрик и материалы // *Составной мир*. 2022. Т. 2, № 1. С. 8–27.
10. Abdul Khalil H.P.S., Chong E.W.N., Owolabi F.A.T., Asniza M., Tye Y.Y., Rizal S., Nurul Fazita M.R., Mohamad Haafiz M.K., Nurmiati Z., Paridah M.T. Enhancement of basic properties of polysaccharide-based composites with organic and inorganic fillers: A review. *Journal of Applied Polymer Science*. 2019; 136, 12: 47251. <https://doi.org/10.1002/app.47251>
11. Hayajneh M.T., AL-Oqla F.M., Al-Shrida M.M. Hybrid green organic/inorganic filler polypropylene composites: Morphological study and mechanical performance investigations. *e-Polymers*. 2021; 1, 1: 710-721. <https://doi.org/10.1515/epoly-2021-0074>
12. Черкашина Н. И., Павленко В. И., Сидельников Р. В., Беседин П. Исследование стойкости полимерного композита с кристаллическим диоксидом кремния к воздействию потока кислородной плазмы // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2018. № 10. С. 110–118. https://doi.org/10.12737/article_5bd95a78957a23.58646223
13. Колосова А.С., Сокольская М.К., Виткарова И.А. Наполнители для модификации современных полимерных композиционных материалов // *Фундаментальные исследования*. 2017. Т. 10, № 3. С. 459–465.
14. Паскарь В.С., Рублева О.А. Направления применения экологичных изделий из древесно-композиционных материалов на основе отходов деревообработки. *Advanced science*. 2019. № 2(13). С. 67–71.
15. Клименко Н.Н., Колокольчиков И.Ю., Михайленко Н.Ю., Орлова Л.А., Сигаев В.Н. Новые строительные материалы с повышенной прочностью на основе отходов металлургии // *Стекло и керамика*. 2018. № 5. С. 44–48.
16. Кузнецова Н.В., Баринова О.С. Физико-механические свойства цементных композиционных строительных материалов с применением отходов производства ЦСП // *Строительные материалы*. 2017. № 6. С. 7–9.
17. Трешалин Ю.М. Проектирование технологических режимов производства инновационных нетканых композиционных материалов с использованием отходов переработки льна и конопли // *Молодые ученые-развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК)*. 2021. № 1. С. 399–400.
18. Cherkashina N.I., Pavlenko Z.V., Matveenko D.S., Domarev S.N., Pushkarskaya D.V., Ryzhikh D.A. Synthesis and Characteristics of Composite Material with a Plant-Based Filler. *ChemEngineering*. 2023; 7 (2): 38. <https://doi.org/10.3390/chemengineering7020038>
19. Золотарев А.С. Разработка современных экологичных теплоизоляционных материалов на основе переработки отходов растениеводства // *Научный журнал молодых ученых*. 2022. № 5(30). С. 45–50.

20. Паскарь В.С., Рублева О.А. Экспериментальное обоснование технологических возможностей способа изготовления экологичных декоративных изделий из измельченной древесины // Ползуновский альманах. 2020. № 1. С. 59–64.
21. Barczewski M., Sałasińska K., Szulc J. Application of sunflower husk, hazelnut shell and walnut shell as waste agricultural fillers for epoxy-based composites: A study into mechanical behavior related to structural and rheological properties. *Polymer Testing*. 2019; 75: 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.01.017>
22. Zuo Y., He X., Li P., Li W., Wu Y. Preparation and Characterization of Hydrophobically Grafted Starches by In Situ Solid Phase Polymerization. *Polymers*. 2019; 11 (1): 72. <https://doi.org/10.3390/polym11010072>
23. Salasinska K., Barczewski M., Górný R., Kloziński A. Evaluation of highly filled epoxy composites modified with walnut shell waste filler. *Polymer Bulletin*. 2018; 75 (6): 2511–2528. <https://doi.org/10.1007/s00289-017-2163-3>
24. Jiang T., Duan Q., Zhu J., Liu H., Yu L. Starch-based biodegradable materials: Challenges and opportunities. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2020; 3(1): 8-18. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2019.11.003>
25. Li J., Bai X., Fang Y., Chen Y., Wang X., Chen H., Yang H. Comprehensive mechanism of initial stage for lignin pyrolysis. *Combustion and Flame*. 2020; 215: P. 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.01.016>
26. Wang Q., Song H., Pan S., Dong N., Wang X., Sun S. Initial pyrolysis mechanism and product formation of cellulose: An Experimental and Density functional theory(DFT) study. *Scientific Reports*, 2020; 10 (1): 3626. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60095-2>
27. Sherif M. A. S. Keshk, Abdullah G. Al-Sehemi, New Composite Based on Starch and Mercerized Cellulose. *American Journal of Polymer Science*. 2013; 3(3): 46–51. <https://doi.org/10.5923/j.ajps.20130303.02>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Черкашина Наталья Игоревна – доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник-руководитель научно-исследовательской лаборатории «Разработка научно-технических основ создания полимерных систем из возобновляемого растительного сырья», Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, natalipv13@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0161-3266>

Павленко Зоя Владимировна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник НИЛ кафедры теоретической и прикладной химии, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, pavlenko.zoe@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1009-2431>

Домарев Семен Николаевич – инженер-исследователь НИЛ кафедры теоретической и прикладной химии, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, domarev542@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7653-4418>

Ручий Артем Юрьевич – лаборант-исследователь НИЛ кафедры теоретической и прикладной химии, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, artiem.ruchii.99@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-2617-5624>

Солгалов Владимир Викторович – аспирант кафедры теоретической и прикладной химии, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, solg.vladimir@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1349-388X>

ВКЛАД АВТОРОВ

Черкашина Н.И. – научное руководство; постановка целей и задач исследования; анализ результатов исследования; доработка текста статьи.

Павленко З.В. – разработка методологии исследования; анализ результатов исследования; выводы статьи.

Домарев С.Н. – проведение экспериментальной части исследования; анализ результатов исследований; написание первоначального текста статьи.

Ручий А.Ю. – проведение экспериментальной части исследования; графическое и табличное представление результатов.

Солгалов В.В. – проведение литературного обзора; проведение экспериментальной части исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 17.01.2024; одобрена после рецензирования 05.02.2024; принята к публикации 09.02.2024.

PUBLICATION ETHICS AND PREVENTION OF MALPRACTICE PUBLICATION

Compliance requirements of publication ethics in the preparation and publication of the journal Science Editor and Publisher apply to all members of the publishing process, i.e., authors, editors, reviewers, and the publisher of the journal. The editorial board monitors compliance with the ethics requirements based on the manuals prepared by international specialized organizations, associations and publishers, as well as the Association of Science Editors and Publishers. The main standards relied on by the journal «Nanotechnologies in construction» are those developed by the Committee on Publication Ethics ([Committee on Publication Ethics](#)) in the United Kingdom, by the [publisher Elsevier](#) (Netherlands), and other non-Russian editorial associations and information systems, as well as the [declaration of «Ethical Principles of Scientific Publications»](#), adopted by the Association of Science Editors and Publishers (Russia).

The responsibility of the authors of material for the journal «Nanotechnologies in construction»

1. The author submits materials for review, which have not been previously published. If the article is based on previously published material which are not academic articles or based on materials presented on the Internet, the author should notify the editorial staff of the journal.
2. The author does not submit the same article to different journals for review.
3. All co-authors consent to the submission of their articles to the journal.
4. The author should inform the editorial staff about a potential conflict of interest. In the case of the absence of any competing interests the author should claim that by writing «Author declare the absence of any competing interests» in the paper.
5. The author takes the necessary steps to ensure the correctness of citations in the submitted article.
6. The list of authors included only individuals who have made significant contributions to the research.
7. The author correctly cites his or her previous work as to avoid self-plagiarism in the manuscript and the artificial increase of volume of publications (salami-slicing).
8. The author, who is acting as the contact with journal, informs all other co-authors of all changes and suggestions from the editorial staff, and does not make decisions regarding the article alone without the written consent of all co-authors.
9. The author properly corresponds with the reviewer through contact with the editor and responds to comments and observations if they arise.
10. If necessary, the authors either adjust the data presented in the article, or refute them.

Responsibility of the editors of the journal «Nanotechnologies in construction»

1. The editors are personally and independently responsible for the content of the materials published and recognize that responsibility. The reliability of the work in question and its scientific significance should always be the basis in the decision to publish.
2. The editors of the journal can check the materials with anti-plagiarism system «Antiplagiat» detecting borrowed fragments to provide copyright protection.
3. The editors make fair and objective decisions, regardless of any commercial considerations and provide a fair and efficient process for the independent review.
4. The editors evaluate manuscripts' intellectual content without regard to race, gender, sexual orientation, religion, origin, nationality, and/or the political preferences of the authors.
5. The editors do not work with articles for which they have a conflict of interest.
6. The editors resolve conflict situations arising during the editorial process, as well as use all available means to resolve these situations.
7. The editors of the journal publish information concerning corrections, rebuttals, and review articles in case the need arises.
8. The editors of the journal do not publish the final version of the article without the consent of the authors.

The responsibility of the reviewers of the journal «Nanotechnologies in construction»

1. The reviewer evaluates his or her own availability before the examination of the manuscript and accepts materials for review only if the reviewer is able to allow for sufficient time as to ensure the quality his or her work.
 2. The reviewer must use the form created by the editors and delivered with paper. The reviewer may give extended review.
 3. The reviewer notifies the editorial staff of any conflict of interest (if one exists) before the start of the review of the paper.
- In the case of the absence of any competing interests the reviewer should claim that by writing «The reviewer declares the absence of any competing interests» in the review.
4. The reviewer does not send information about the article and or any of the data contained within the article to any third party.
 5. The reviewer does not use the information obtained from the article for any personal and or commercial purposes.
 6. The reviewer does not make conclusions about the quality of the article on the basis of subjective data, e.g. the personal relationship to the author, gender, age, religion, etc.
 7. The reviewer uses only proper and appropriate language and explanations in respect to the articles, avoiding any personal remarks.

The responsibility of the publisher of the journal «Nanotechnologies in construction»

1. The publisher not only supports scientific communication and invests in the process, but is also responsible for complying with all current guidelines and standards for publishing scientific work.
2. The publisher does not affect the editorial policy of the journal.
3. The publisher provides legal support to the journal if necessary.
4. The publisher provides for the timely release of future issues of the journal.
5. The publisher publishes changes, explanations, and recalls articles that have been identified to contain scientific misconduct and or critical errors.

The responsibility of the editor-in-chief of the journal «Nanotechnologies in construction»

1. The editor-in-chief is responsible for making a decision which of submitted papers are to be published in the journal. This decision always must be based on the examination of paper reliability and its importance for scientists and readers. The editor-in-chief may be guided by methodical recommendation elaborated by the editorial board of the journal. He also may take into account legal requirements, such as exclusion of libel, infringement of copyright and plagiarism. When making decision on the publication, the editor-in-chief may consult with the members of editorial board, reviewers.
2. The editor-in-chief evaluates submitted papers by the intellectual content, regardless of the race, sex, sexual preference, religion, ethnic origins, citizenship and political views of the author.
3. The editor-in-chief, editorial staff, members of the editorial board must not disclose information on the submitted manuscript to the third person except for the author, reviewers, potential reviewers, and the publisher.
4. The information contained in the submitted paper cannot be used in the paper of the editor-in-chief, members of the editorial board without author's written permission. Confidential information or ideas obtained during review must be kept in secret and must not be used for self-profit.
5. The editor-in-chief should not review the paper if there is a conflict of the interests evolving from competition, co-operation or other relations with someone from the authors, companies and organizations which are related to the paper.
6. The editor-in-chief should ask all authors to present information on the certain competitive interests and publish corrections if the conflict of the interests has been revealed after the publication. If necessary another appropriate action such as publication of disproof or expression of a concern can be performed.
7. The editor-in-chief should take reasoned and prompt measures if he gets complaints of ethnic character in respect to the submitted manuscript or issued paper, contacting with the editors and publisher.

Complaints and appeals handling

In the case of incoming complaints and appeals a commission is formed. The commission can consist of the publisher, the editor-in-chief, deputy editor-in-chief, members of editorial council, authors and specialists which are competent in the considering subjects.

An investigation is held and the results of it are reported to all interested parties. According to laws, if it is necessary, the materials are delivered to competent state bodies.

Policy of disclosure and conflicts of interest /competing interests

Unpublished data from manuscripts submitted for consideration can not be used for personal research without the expressed written consent of the author.

Information or ideas obtained through peer review and related actives, which potentially can be beneficial to any party other than the author, must be kept confidential and not be used for personal gain.

The editors and reviewers should not participate in the examination of manuscripts in the event of a conflict of interest that is a result of any competitive, cooperative, and or other interactions and relationships with any of the authors, companies, and or other organizations involved in the creation or presentation of the works.

The politics of the journal concerning data exchange and reproducibility

The journal papers (metadata of papers) are available for free access at the journal's website and at the websites of different citation systems (data bases).

The authors of the materials published in the journal permit using their content according to the license Creative Commons CC-BY «Attribution». This kind of license allows other people to distribute, edit, correct and base on the work of the authors, even with commercial purpose, while the authors mention them as co-authors. The license is recommended to distribute widely and use licensed materials.

The politics of the journal concerning data exchange and reproducibility are aimed at providing «transparent» science and transparency is a guarantee of high-quality research and innovations.

Ethical oversight of the published materials

The publisher and the editor-in-chief should deal with protection of reputation of the published materials by studying and evaluating claimed or potential delinquency (research, publications, reviews and editorial activities) jointly with scientific community.

That means interaction with the author of the manuscript and detailed consideration of the complaints or declared reclamations. To detect such delinquencies as plagiarism, the editor must use proper license software or systems.

If the editor-in-chief obtains proved evidence of delinquency, he must inform the publisher and the members of editorial council about this, as well as immediately notify the author about necessity to correct the paper or paper retraction (in dependence on the situation).

Derivation and plagiarism

During the consideration of an article, the editorial staff of the journal «Nanotechnologies in construction» may conduct a verification of the submitted materials with the help the Anti-plagiarism system. In the case of the discovery of multiple incidents of content matching, the editorial staff acts in accordance with the rules of COPE.

Intellectual property

The editors should carefully deal with the issues concerning intellectual property and interact with the publisher when settling the cases of probable delinquencies and agreements on intellectual property protection.

The editors aside from using plagiarism detecting tools can also:

- support the authors whose copyright was infringed or those who suffered from plagiarism;
- cooperate with the publisher to protect copyright and to pursue infringer (for example, by applying for paper retraction or removing materials from websites).

Discussion of the papers published in the journal. Corrections made after publication

The editors must be open for the researches that oppose the papers published earlier in the journal; to encourage and to be ready to consider valid criticism of the papers published in the journal.

The authors of the criticized works should have an opportunity to respond the criticism. The papers describing only negative results can also be published.

Preprint and postprint policy

During the submission process, the author must confirm that the article has not been published and or accepted for publication in any other journal. When citing articles published in the journal «Nanotechnologies in construction», the publisher requests the authors to provide a link (the full URL of the material) to the official website of the journal.

Articles, which have been previously posted by the author on personal and or public websites that have no relationship to any other publishers, are allowed to be submitted to the journal.

On the procedure in case of abusive practice (infringement)

Publisher, editor-in-chief, each member of editorial staff member of editorial board, author, reviewer or reader must comply journal's Publication Ethics and are obliged to report any known facts concerning committed or potential infringement.

The journal's editors immediately launch investigation on all messages that state abusive practice (infringements). If the information is confirmed, the measures to eliminate claimed abusive practice (infringements) will be taken. According to legislation, all materials, if it is necessary, are referred to proper state bodies.

In response to all author's claims the editors give full and substantiated replies and make great efforts to resolve any conflicts.

ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ НЕДОБРОСОВЕСТНОЙ ПРАКТИКИ ПУБЛИКАЦИЙ

Требования соблюдения публикационной этики при подготовке и издании журнала «Нанотехнологии в строительстве» касаются всех участников редакционно-издательского процесса – авторов, редакторов, рецензентов и издателя, создающих этот журнал. Редакция журнала следит за выполнением требований этики, опираясь на руководства, подготовленные зарубежными профильными организациями, ассоциациями и издательствами, а также Ассоциацией научных редакторов и издателей. Основными документами, на которые опирается редакция журнала «Нанотехнологии в строительстве», являются разработки Комитета по публикационной этике ([Committee on Publication Ethics](#)), Великобритания, [издательства Elsevier](#) (Нидерланды) и других зарубежных редакторских ассоциаций и информационных систем, а также [Декларация «Этические принципы научных публикаций»](#), принятая Ассоциацией научных редакторов и издателей (Россия).

Ответственность авторов журнала «Нанотехнологии в строительстве»

1. Автор отправляет на рассмотрение статью, материалы которой ранее не были опубликованы. Если статья основана на ранее опубликованных материалах не статейного характера или материалы представлены в Интернете, следует уведомить об этом редакцию журнала.
2. Автор не отправляет на рассмотрение одну статью в разные журналы.
3. Все соавторы согласны на представление статьи в журнал.
4. Автор уведомляет редакцию о потенциальном конфликте интересов. Об отсутствии конфликта интересов автор указывает в статье – «Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов».
5. Автор предпринимает необходимые меры, чтобы убедиться в корректности представленных в статье цитирований.
6. В список авторов включаются только лица, внесшие значительный вклад в проведение исследования.
7. Автор корректно цитирует свои предыдущие работы и избегает самоплагиата в рукописи и искусственно увеличения объема публикаций (*salami-slicing*).
8. Контактный автор уведомляет своих соавторов обо всех изменениях и предложениях со стороны редакции журнала и не принимает решений относительно статьи единолично, без письменного согласия всех соавторов.
9. Автор корректно ведет переписку с рецензентом через редактора и отвечает на комментарии и замечания, если они возникают.
10. При необходимости авторы корректируют представленные в статье данные или опровергают их.

Ответственность редакторов журнала «Нанотехнологии в строительстве»

1. Редакторы журнала самолично и независимо несут ответственность за содержание публикуемых материалов и признают эту ответственность. Достоверность рассматриваемой работы и ее научная значимость всегда должны лежать в основе решения о публикации.
2. Редакторы журнала могут проверить полученные материалы в системе [Антиплагиат](#) по обнаружению заимствований, способствуя защите авторского права.
3. Редакторы принимают честные и объективные решения независимо от коммерческих соображений и обеспечивают честный и эффективный процесс независимого рецензирования.
4. Редакторы оценивают интеллектуальное содержание рукописей вне зависимости от расы, пола, сексуальной ориентации, религиозных взглядов, происхождения, гражданства или политических предпочтений Авторов.
5. Редакторы не работают со статьями, в отношении которых у них есть конфликт интересов.
6. Редакторы журнала разрешают конфликтные ситуации, возникающие в процессе работы, и используют для их разрешения все доступные средства.
7. Редакторы журнала публикуют информацию об исправлениях, опровержениях и отзывах статей в случае возникновения такой необходимости.
8. Редакторы журнала не публикуют конечный вариант статьи без его согласования с авторами.

Ответственность рецензентов журнала «Нанотехнологии в строительстве»

1. Рецензент оценивает свою занятость перед согласием на экспертизу рукописи и соглашается на рецензирование только при наличии достаточного времени на качественную работу.

2. Рецензент использует разработанную редакцией журнала форму, которую он получает вместе со статьей. Рецензент вправе дать более расширенную рецензию.

3. Рецензент предупреждает редакцию о наличии конфликта интересов (если он возник) до начала работы со статьей.

Об отсутствии конфликта интересов рецензент указывает в рецензии – «Рецензент заявляет об отсутствии конфликта интересов».

4. Рецензент не передает сведения о статье и данные, которые в ней содержатся, третьим лицам.

5. Рецензент не использует информацию, полученную из статьи, в личных и коммерческих целях.

6. Рецензент не делает выводов о качестве статьи на основе субъективных данных: личного отношения к автору, его пола, возраста, вероисповедания.

7. Рецензент использует только корректные выражения и объяснения в отношении статьи, не переходит на личности.

Ответственность издателя журнала «Нанотехнологии в строительстве»

1. Издатель не только поддерживает научные коммуникации и инвестирует в данный процесс, но также несет ответственность за соблюдение всех современных рекомендаций в публикуемой работе.

2. Издатель не влияет на редакционную политику журнала.

3. Издатель оказывает юридическую поддержку редакции журнала при необходимости.

4. Издатель обеспечивает своевременность выхода очередных выпусков журнала.

5. Издатель публикует правки, пояснения и отзывает статьи, в которых были выявлены нарушения научной этики или критические ошибки.

Ответственность главного редактора журнала «Нанотехнологии в строительстве»

1. Главный редактор отвечает за принятие решения о том, какие из представленных в редакцию журнала работ следует опубликовать. Это решение всегда должно приниматься на основе проверки достоверности работы и ее важности для исследователей и читателей. Главный редактор может руководствоваться методическими рекомендациями, разработанными редколлегией журнала, и такими юридическими требованиями как недопущение клеветы, нарушения авторского права и плагиата. Также при принятии решения по публикации главный редактор может советоваться с членами редсовета, редколлегии, рецензентами.

2. Главный редактор оценивает представленные работы по их интеллектуальному содержанию, невзирая на расу, пол, сексуальную ориентацию, религию, этническое происхождение, гражданство или политические взгляды автора.

3. Главный редактор, сотрудники редакции, члены редколлегии не должны раскрывать информацию о представленной рукописи кому-либо другому, за исключением автора, рецензентов, потенциальных рецензентов, а также издателя.

4. Сведения, содержащиеся в представленной статье, не должны использоваться в какой-либо собственной работе главного редактора и членов редсовета и редколлегии без письменного разрешения автора. Конфиденциальная информация или идеи, полученные при рецензировании, должны храниться в секрете и не использоваться для получения личной выгоды.

5. Главному редактору следует отказаться от своего участия в рецензировании в случае, если присутствует конфликт интересов, проистекающий из конкуренции, сотрудничества или других отношений с кем-либо из авторов, компаний или учреждений, имеющих отношение к статье.

6. Главному редактору следует требовать от всех авторов журнала предоставлять сведения о соответствующих конкурирующих интересах и публиковать исправления, если конфликт интересов был разоблачен после публикации. В случае необходимости, может выполняться другое подходящее случаю действие, такое как публикация опровержения или выражения озабоченности.

7. Главному редактору следует принимать разумно быстрые меры при поступлении жалоб этического характера в отношении представленной рукописи или опубликованной статьи, имея контакт с редакцией, издателем.

Обработка жалоб и апелляций

В случае поступления жалоб и апелляций назначается комиссия, в состав которой могут входить: издатель, главный редактор, заместитель главного редактора, члены редакционной коллегии, авторы и специалисты, компетентные в рассматриваемых вопросах. Проводится расследование, результаты которого доводятся всем заинтересованным лицам. При необходимости и в соответствии с законодательством материалы передаются в соответствующие государственные органы.

Политика раскрытия и конфликты интересов/конкурирующих интересов

Неопубликованные данные, полученные из представленных к рассмотрению рукописей, нельзя использовать в личных исследованиях без письменного согласия Автора.

Информация или идеи, полученные в ходе рецензирования и связанные с возможными преимуществами, должны сохраняться конфиденциальными и не использоваться с целью получения личной выгоды.

Редакторы и рецензенты не должны участвовать в рассмотрении рукописей в случае наличия конфликтов интересов вследствие конкурентных, совместных и других взаимодействий и отношений с любым из авторов, компаниями или другими организациями, связанными с представленной работой.

Политики журнала в отношении обмена данными и воспроизведимости

Статьи из журнала (метаданные статей) размещаются в открытом доступе на сайте журнала и на сайтах различных систем цитирования (баз данных). Авторы публикуемых в журнале материалов допускают использование контента в соответствии с лицензией Creative Commons CC-BY «Attribution» («Атрибуция»). Эта лицензия позволяет другим распространять, редактировать, поправлять и брать за основу произведение авторов, даже коммерчески, до тех пор, пока они указывают ваше авторство. Лицензия рекомендована для максимального распространения и использования лицензированных материалов.

Политика журнала в отношении обмена данными и воспроизведимости в конечном итоге способствует более «открытой» науке, а открытость научной информации есть гарант исследований и инноваций высокого качества.

Этический надзор за опубликованными материалами

Издатель и главный редактор должны работать над защитой репутации опубликованных материалов путем изучения и оценки заявленных или предполагаемых нарушений (исследований, публикаций, рецензий и редакторской деятельности) совместно с научным сообществом.

Это включает в себя взаимодействие с автором рукописи или тщательное рассмотрение соответствующей жалобы или высказанных претензий. Для выявления таких нарушений, как плагиат, редактор должен пользоваться соответствующими лицензионными системами.

Главный редактор, получивший убедительное свидетельство нарушения, должен сообщить об этом издателю, членам редакколлегии, организуя немедленное уведомление автора о необходимости внесения поправок или отзыва публикации, в зависимости от ситуации.

Замещивания и плагиат

Редакция журнала «Нанотехнологии в строительстве» при рассмотрении статьи может произвести проверку материала с помощью системы [Антиплагиат](#). В случае обнаружения многочисленных замещений редакция действует в соответствии с правилами [COPE](#).

Интеллектуальная собственность

Редакторы должны внимательно относиться к вопросам, касающимся интеллектуальной собственности, и взаимодействовать с издателем при урегулировании случаев возможных нарушений законов и соглашений об охране интеллектуальной собственности.

Редакторы, кроме применения инструментов обнаружения плагиата, могут также:

- поддерживать авторов, чье авторское право было нарушено, или тех, кто стал жертвой плагиата;
- быть готовыми к совместной работе с издателем по защите авторских прав и к преследованию нарушителей (например, путем подачи запросов для отзыва статей или удаления материалов с веб-сайтов).

Обсуждение работ, опубликованных в журнале. Исправления после публикаций

Редакторы должны быть открытыми для исследований, которые оспаривают предыдущие работы, опубликованные в журнале; поощрять и с готовностью рассматривать обоснованную критику работ, публикуемых в их журнале.

Авторы критикуемых материалов должны иметь возможность ответить на критику. Работы, сообщающие только об отрицательных результатах, также могут публиковаться.

Политика размещения препринтов и постпринтов

В процессе подачи статьи автору необходимо подтвердить, что статья не была опубликована или не была принята к публикации в другом научном журнале. При ссылке на опубликованную в журнале «Нанотехнологии в строительстве» статью издательство просит размещать ссылку (полный URL материала) на официальный сайт журнала.

К рассмотрению допускаются статьи, размещенные ранее авторами на личных или публичных сайтах, не относящихся к другим издательствам.

О процедурах в случае злоупотреблений (нарушений)

Издатель, главный редактор, каждый сотрудник редакции, член редакционной коллегии, автор, рецензент и читатель обязаны соблюдать этику научных публикаций в журнале действующих законов, правил или положений и обязуются сообщать о любых известных случаях уже совершенного или потенциального злоупотребления (нарушения).

Редакцией журнала незамедлительно проводится расследование по всем сообщениям о злоупотреблениях (нарушениях) и, если информация подтверждается, принимаются меры по устраниению злоупотреблений (нарушений). Если это требуется в соответствии с законодательством, материалы передаются в соответствующие государственные органы.

На все претензии авторов редакция предоставляет развернутые и обоснованные ответы, прилагая все усилия для разрешения конфликтных ситуаций.

AUTHOR GUIDELINES

Admission of articles

The authors submit to the editors:

- electronic manuscript by e-mail: info@nanobuild.ru;
- accompanying letter (the editors send the sample of the letter to the authors on demand).

The authors of the materials published in the journal permit using their content according to the license Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0); agree to publish full texts (parts or metadata) of the paper in free access in Internet at the official website of the edition (www.nanobuild.ru), citation systems (data bases). All that authors indicate in the cover letter. More details about the license Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0) are available here <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

When submitting articles to the journal, it is presumed that:

- the work has not been previously published in any other journal;
- the article is not under consideration in any other journal;
- all co-authors consent to the publication of the article;
- there is implicit or explicit consent of the organization in which the study was conducted.

Information about the conflict of interest

The article should exclude any actual or potential conflict of interest. If there is no conflict of interest, you should write that «the author declares no conflict of interest.»

When submitting a manuscript to the journal, authors should ensure that the content of the paper corresponds the topic of the journal; the structure and the format of the paper meet the editorial requirements; all citations are properly formatted and the source of tables and figures are shown (unless otherwise indicated, it is assumed that the tables and figures created by the author).

Basic the sections of the journal:

- construction material science;
- the study of the properties of nanomaterials;
- the results of the specialists' and scientists' researches;
- manufacturing technology for building materials and products;
- international scientific and technical cooperation;
- overview of inventions in the field of nanotechnology;
- development of new materials;
- rational use of natural sources;
- efficient use of recycled resources;
- the application of nanotechnology and nanomaterials in construction;
- system solutions for technological problems;
- in related sectors;
- forums, exhibitions, conferences and events in the area of construction and nanoindustry.

These are the topics of the papers published in the journal: creation of new functional materials; nanostructured systems strength and penetrability formation theory development; the problems of nanomaterials and nanotechnologies implementation in construction and building materials; cement and other binders with mineral and organic additives; diagnostics of building systems nanostructures and nanomaterials; modification of building materials with nanofibers; disperse composite materials with nanocoating; formation of nanostructure coatings by means of laser sputtering; technologies aimed at studying nanomaterial properties; the systems of teaching the fundamentals of nanotechnologies; technological principles of nanostructures creation (liquid melts, sol and gel synthesis). The topics may be different, directly or indirectly related to the areas mentioned above.

The journal can also publish: original article, review article, editorial, discussion paper, individual bibliography, editorial notes, book reviews, article reviews, etc.

The structure of the paper

IN ENGLISH

NAME OF THE SECTION (In English)

Original article (review article, editorial, discussion paper, individual bibliography, editorial notes, book reviews, article reviews, etc.) (In English)

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-202X-x-x-x-x>

Title (In English)

Authors' first name and last name (In English)

place of employment of each author, city, country (In English)

(name of institution (organization) at which the author works or studies is given without legal form: Ltd, SOE, etc.)

*Corresponding author: e-mail: xxxxxxxxxxxx

ORCID author:

first name and last name – <https://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx>

Abstract: the source of information, which is independent on the paper and which allows Russian and foreign specialists to make conclusion about the quality of the content of the paper (extended abstracts must be informative, original, novelty, contain main results of research, structured according to IMRAD (Introduction, Methods and Materials, Results and Discussion), compact – 200–250 words) (In English):

Abstract: Introduction... Methods and Materials... Results... Discussion... Conclusion...

Keywords: (In English)

Acknowledgments: (if available) (In English)

For citation: (In English)

Example.

For citation: Sinitzin D.A., Shayakhmetov U.Sh., Rakhimova O.N., Khalikov R.M., Nedoseko I.V. Nanostructured foam ceramics for building purposes: production technology and applications. *Nanotechnologies in Construction*. 2021; 13(4): 213–221. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-4-213-221>.

© authors, 2021

Text of the paper: (In English, number of words 3000–6000)

- INTRODUCTION
- METHODS AND MATERIALS
- RESULTS
- DISCUSSION
- CONCLUSIONS

References (In English) (Vancouver Style)

Information about the author (authors) (In English)

- first name, last name (full);
- academic degree;
- name of institution (organization) and its department at which the author works or studies is given without legal form: Ltd, SOE, etc.;
- address of the institution (organization), its department at which the author works or studies (city and country);
- authors' e-mail address;
- Open Researcher and Contributor ID (ORCID) (if available).

E-mail address is given without word "e-mail" and is not followed by dot. ORCID is given as an electronic address in Internet and is not followed by dot. Name of institution (organization), its address, e-mail address and ORCID of the author are separated with a comma.

The editors can give additional information about the author: position, honorary title, membership in organizations, etc.

Example.

Zhanna V. Pisarenko – Dr. Sci. (Econ.), Assistant Professor, Saint-Petersburg State University, Economic Faculty, Department of Risk Management and Insurance, Saint-Petersburg, Russia,
z.pisarenko@spbu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9082-2897>

Contribution of the authors (In English):

author's last name and initials; author's personal contribution in article writing is briefly described (concept, collection of materials, analytical work, article writing, scientific editing of the text, all authors made equal contribution to preparation of the article, etc.).

Example.

Marina S. Morozova – scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

Elena V. Bokova – participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text; final conclusions.

The authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted XX.XX.202X; approved after reviewing XX.XX.202X; accepted for publication XX.XX.202X.

IN RUSSIAN

NAME OF THE SECTION (In Russian)

Original article (review article, editorial, discussion paper, individual bibliography, editorial notes, book reviews, article reviews, etc.) (In Russian)

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-202X-x-x-x-x>

Title (In Russian)

Authors' first name and last name (In Russian)

place of employment of each author, city, country (In Russian)

(name of institution (organization) at which the author works or studies is given without legal form: Ltd, SOE, etc.)

* Corresponding author: e-mail:xxxxxxxxxx

ORCID author:

first name and last name (In Russian) - <https://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx>

Abstract: the source of information, which is independent on the paper and which allows

Russian and foreign specialists to make conclusion about the quality of the content of the paper (extended abstracts must be informative, original, novelty, contain main results of research, structured according to IMRAD (Introduction, Methods and Materials, Results and Discussion), compact – 200–250 words) (In Russian):

Abstract: Introduction... Methods and Materials... Results... Discussion... Conclusion...

Keywords: (In Russian)

Acknowledgments: (if available) (In Russian)

For citation: (In Russian)

Example.

Для цитирования: Синицин Д.А., Шаяхметов У.Ш., Рахимова О.Н., Халиков Р.М., Недосеко И.В. Наноструктурированная пенокерамика строительного назначения: технология производства и применения // Нанотехнологии в строительстве. 2021. Т. 13, № 4. С. 213–221. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-4-213-221>.

© authors, 2021

Text of the paper: (In Russian, number of words 3000–6000)

- INTRODUCTION
- METHODS AND MATERIALS
- RESULTS
- DISCUSSION
- CONCLUSIONS

References (In Russian) (Vancouver Style)

Information about the author (authors) (In Russian)

- first name, last name (full);
- academic degree;
- name of institution (organization) and its department at which the author works or studies is given without legal form: Ltd, SOE, etc.;
- address of the institution (organization), its department at which the author works or studies (city and country);
- authors' e-mail address;
- Open Researcher and Contributor ID (ORCID) (if available).

E-mail address is given without word "e-mail" and is not followed by dot. ORCID is given as an electronic address in Internet and is not followed by dot. Name of institution (organization), its address, e-mail address and ORCID of the author are separated with a comma.

The editors can give additional information about the author: position, honorary title, membership in organizations, etc.

Example.

Писаренко Жанна Викторовна – д-р экон. наук, доцент кафедры управления рисками и страхования экономического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Россия, z.pisarenko@spbu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9082-2897>

Contribution of the authors (In Russian):

author's last name and initials; author's personal contribution in article writing is briefly described (concept, collection of materials, analytical work, article writing, scientific editing of the text, all authors made equal contribution to preparation of the article, etc.).

Пример.

Морозова М.С. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы.

Бокова Е.В. – участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

The authors declare no conflicts of interests. (In Russian)

The article was submitted XX.XX.202X; approved after reviewing XX.XX.202X; accepted for publication XX.XX.202X.
(In Russian)

Manuscript text

File format

The editors accept texts saved using Microsoft Word in .rtf format.

Text layout

- Use the font Times New Roman, font size – 14 pt., and 1.5 line spacing;
- Do not use an underscore in the text (for subtitles – use bold, to highlight text – use italics);
- Non-Russian languages titles (journals, organizations, etc.) should be left in the original, enclosed in quotes.

Abbreviations

All abbreviations should be defined when first used. If the article contains a large number of abbreviations, a list deciphering each of them can be included before the text of the article

Tables and Figures

All tables and figures must be numbered and identified, they should be a reference in the text. The tables should not contain empty columns. Figures should be of good quality, suitable for printing. Figures should be submitted together with the article, with each figure submitted as an individual file.

One way to check the quality of the image, is to increase its size using any image manipulation software. A high quality image is not blurred or distorted when enlarged.

Footnotes

If necessary, use footnotes with continuous numbering (Arabic numerals) throughout the document. Footnotes can be quotes from the works mentioned in the text, for more information.

Citations and bibliography

The journal requires the use of the Vancouver citation style (a reference in the text in square brackets, full bibliographic description of the source in the bibliography in the order mentioned in the text of the article).

References

The list of references includes sources used in the text.

References accepted for publication but not yet published articles must be labeled with the words "in press"; authors should obtain written permission to refer to these documents and evidence that they are accepted for publication. Information from unpublished sources must be marked with the words "unpublished data / documents," the authors must also receive written confirmation of the use of such materials. The journal adopted the Vancouver style of reference design and citation.

Copyright Notice

Authors who publish in journal agree to the following:

1. Authors retain copyright of the work and provide the journal right of first publication of the work.
2. The authors retain the right to enter into certain contractual agreements relating to the non-exclusive distribution in the published version of the work here form (eg, post it to an institutional repository, the publication of the book), with reference to its original publication in this journal.
3. The authors have the right to post their work on the Internet (eg in the institute store or personal website) prior to and during the review process of its data log, as this may lead to a productive discussion and a large number of references to this work.

Privacy Statement

Specified when registering the names and addresses will be used solely for technical purposes of a contact with the Author or reviewers (editors) when preparing the article for publication. Private data will not be shared with other individuals and organizations.



ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Прием статей

Авторы представляют в редакцию:

- рукописи в электронном виде по e-mail: info@nanobuild.ru;
- сопроводительное письмо (редакция высыпает авторам образец по их предварительному запросу).

Авторы публикуемых в журнале материалов допускают использование контента в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0); согласны с размещением в открытом доступе полных текстов статей (их составных частей или метаданных) в Интернете на сайте издания (www.nanobuild.ru), в системах цитирования (базах данных). Об этом авторы указывают в сопроводительном письме. Подробно о лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0) сммотрите здесь <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>.

Представление статьи в журнал подразумевает, что:

- работа не была опубликована ранее в другом журнале;
- не находится на рассмотрении в другом журнале;
- все соавторы согласны с публикацией статьи;
- получено согласие – неявное или явное – организации, в которой исследование было проведено.

Информация о конфликте интересов

В статье следует указать на реальный или потенциальный конфликт интересов. Если конфликта интересов нет, то следует написать, что «автор заявляет об отсутствии конфликта интересов».

При представлении рукописи в журнал авторы должны убедиться, что содержание статьи соответствует тематике журнала; структура статьи и оформление соответствуют требованиям редакции; все цитирования оформлены корректно, указаны источники для таблиц и рисунков (если не указано иное, предполагается, что таблицы и рисунки созданы автором).

Основные разделы журнала:

- строительное материаловедение;
- исследование свойств наноматериалов;
- результаты исследований ученых и специалистов;
- технологии производства строительных материалов и изделий;
- международное научно-техническое сотрудничество;
- обзор изобретений в области наноиндустрии
- разработка новых материалов;
- рациональное использование природных ресурсов;
- эффективное использование вторичного сырья;
- применение нанотехнологий и наноматериалов в строительстве;
- системные решения технологических проблем;
- в смежных отраслях;
- форумы, выставки, конференции, мероприятия строительной отрасли и наноиндустрии.

В журнале публикуются работы по следующим темам: создание новых функциональных материалов; разработка теории формирования прочности и непроницаемости наноструктурированных систем; проблемы применения наноматериалов и нанотехнологий в строительстве и строительных материалах; цементные и другие вяжущие с минеральными и органическими добавками; диагностика наноструктур и наноматериалов строительных систем; технологии исследования свойств наноматериалов; модифицирование строительных материалов нановолокнами; дисперсные композиционные материалы с нанопокрытием; формирование наноструктурных покрытий лазерным напылением; системы преподавания основ нанотехнологий; технологические принципы создания наноструктур (расплавы, золь-гелевый синтез и др.). Тематика статей может быть иной, прямо или косвенно связанной с перечисленными направлениями.

Журнал принимает к публикации: научные статьи, обзорные статьи, редакционные статьи, дискуссионные статьи, редакторские заметки, рецензии на книгу, рецензии на статью и т. п.

Структура статьи (в соответствии с ГОСТ Р 7.0.7-2021)

НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

НАЗВАНИЕ РУБРИКИ ИЛИ РАЗДЕЛА ЖУРНАЛА (In English)

Original article (review article, editorial, discussion paper, individual bibliography, editorial notes, book reviews, paper reviews, etc.) (In English)

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-202X-x-x-x-x>

Заглавие статьи (In English)

Имя Отчество (при наличии) **Фамилия автора** (-ов) (In English)

обязательное указание места работы каждого автора, город, страна (In English)

(наименование организации (учреждения), где работает или учится автор указывается без обозначения организационно-правовой формы юридического лица: ФГБУН, ФГБОУ ВО, ПАО, АО и т.п.)

* Corresponding author: e-mail:xxxxxxxxxx

ORCID автора (-ов):

Фамилия и инициалы – <https://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx>

Abstract: независимый от статьи источник информации, который позволяет ученым и специалистам сделать вывод о качестве и содержании статьи (резюме должны быть информационными, оригинальными, содержать новизну, основные результаты исследований, структурированными по IMRAD (**Introduction, Methods and Materials, Results, Discussion, Conclusion**), компактными – укладываться в 200–250 слов) (на английском языке):

Abstract: Introduction... Methods and Materials... Results... Discussion...Conclusion...

Keywords: (In English)

Acknowledgments: (при наличии) (In English)

For citation: (In English)

Пример.

For citation: Sinitsin D.A., Shayakhmetov U.Sh., Rakhimova O.N., Khalikov R.M., Nedoseko I.V. Nanostructured foam ceramics for building purposes. *Nanotechnologies in Construction*. 2021;13(4):213–221. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-4-213-221>.

© authors, 2021

Статья ((In English) объем – 3–6 тыс. слов):

- **INTRODUCTION**
- **METHODS AND MATERIALS**
- **RESULTS**
- **DISCUSSION**
- **CONCLUSION**

References (In English) (согласно Vancouver Style)

Information about the author (authors) (In English)

- имя, отчество, фамилия автора (полностью);
- ученое звание;
- ученая степень;
- наименование организации (учреждения), ее подразделения, где работает или учится автор (без обозначения организационно-правовой формы юридического лица: ФГБУН, ФГБОУ ВО, ПАО, АО и т. п.);
- адрес организации (учреждения), ее подразделения, где работает или учится автор (город и страна);

– электронный адрес автора (e-mail);
– открытый идентификатор ученого (Open Researcher and Contributor ID – ORCID) (при наличии).
Электронный адрес автора приводят без слова “e-mail”, после электронного адреса точку не ставят. ORCID приводят в форме электронного адреса в сети «Интернет». В конце ORCID точку не ставят. Наименование организации (учреждения), ее адрес, электронный адрес и ORCID автора отделяют друг от друга запятыми.
Редакция издания может расширить дополнительные сведения об авторе: указать его должность, почетные звания, членство в организациях и т. п.

Пример.

Zhanna V. Pisarenko – Dr. Sci. (Econ.), Assistant Professor, Saint-Petersburg State University, Economic Faculty, Department of Risk Management and Insurance, Saint-Petersburg, Russia,
z.pisarenko@spbu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9082-2897>

Contribution of the authors (In English):

имя, первая буква отчества и фамилия автора; в краткой форме описывается личный вклад автора в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста, все авторы сделали эквивалентный вклад (равный вклад) в подготовку публикации и т. д.).

Пример.

Marina S. Morozova – scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.
Elena V. Bokova – participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text; final conclusions.

The authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted XX.XX.202X; approved after reviewing XX.XX.202X; accepted for publication XX.XX.202X.

НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

НАЗВАНИЕ РУБРИКИ ИЛИ РАЗДЕЛА ЖУРНАЛА (на русском языке)

Научная статья (обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью и т. п.) (на русском языке)

УДК XXX

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-202X-x-x-x-x>

Заглавие статьи (на русском языке)

Имя Отчество (при наличии) **Фамилия автора** (-ов) (на русском языке)

обязательное указание места работы каждого автора, город, страна (на русском языке)

(наименование организации (учреждения), где работает или учится автор указывается без обозначения организационно-правовой формы юридического лица: ФГБУН, ФГБОУ ВО, ПАО, АО и т. п.)

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: xxxxxxxxxxxx

ORCID автора (-ов):

Фамилия и инициалы – <https://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx>

Аннотация (или Резюме): независимый от статьи источник информации, который позволяет ученым и специалистам сделать вывод о качестве и содержании статьи (резюме должны быть информационными, оригинальными, содержать новизну, основные результаты исследований, структурированными по IMRAD (введение, методы и материалы, результаты, обсуждение, заключение (выводы)), компактными – укладываются в 200–250 слов) (на русском языке):

Аннотация (или Резюме): Введение... Методы и материалы... Результаты... Обсуждение... Заключение (выводы)...

Ключевые слова: (на русском языке)

Благодарности: (при наличии) (на русском языке)

Для цитирования: (на русском языке)

Пример.

Для цитирования: Синицин Д.А., Шаяхметов У.Ш., Рахимова О.Н., Халиков Р.М., Недосеко И.В. Наноструктурированная пенокерамика строительного назначения // Нанотехнологии в строительстве. 2021. Т. 13, № 4. С. 213–221. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-4-213-221>.

© авторы, 2021

Статья (на русском языке, объем – 3–6 тыс. слов):

- **Введение**
- **Методы и материалы**
- **Результаты**
- **Обсуждение**
- **Заключение (выводы)**

Список источников (на языке оригинала статьи – русском или английском)

Информация об авторе (-ах) (на русском языке)

- фамилия имя отчество автора (полностью);
- ученое звание;
- ученая степень;
- наименование организации (учреждения), ее подразделения, где работает или учится автор (без обозначения организационно-правовой формы юридического лица: ФГБУН, ФГБОУ ВО, ПАО, АО и т. п.);
- адрес организации (учреждения), ее подразделения, где работает или учится автор (город и страна);
- электронный адрес автора (e-mail); – открытый идентификатор ученого (Open Researcher and Contributor ID – ORCID) (при наличии).

Электронный адрес автора приводят без слова “e-mail”, после электронного адреса точку не ставят. ORCID приводят в форме электронного адреса в сети «Интернет». В конце ORCID точку не ставят. Наименование организации (учреждения), ее адрес, электронный адрес и ORCID автора отделяют друг от друга запятыми.

Редакция издания может расширить дополнительные сведения об авторе: указать его должность, почетные звания, членство в организациях и т. п.

Пример.

Писаренко Жанна Викторовна – д-р экон. наук, доцент кафедры управления рисками и страхования экономического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, г. Санкт-Петербург, Россия, z.pisarenko@spbu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9082-2897>

Вклад авторов (на русском языке):

- фамилия инициалы автора;
- в краткой форме описывается личный вклад автора в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста, все авторы сделали эквивалентный вклад (равный вклад) в подготовку публикации и т. д.).

Пример.

Морозова М.С. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы.

Бокова Е.В. – участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию XX.XX.202X; одобрена после рецензирования XX.XX.202X; принятая к публикации XX.XX.202X.

Оформление текста рукописи

Формат

Редакция принимает тексты, сохраненные в программе Microsoft Word в формате .rtf.

Оформление

- используйте шрифт 14 Times New Roman и интервал 1,5 строки;
- не используйте подчеркивание внутри текста (для подзаголовков используйте полужирное начертание, для выделения в тексте – курсив);
- иностранные названия (журналов, организаций и т.д.) следует оставлять в оригинале, заключать в кавычки.

Аббревиатуры

Все аббревиатуры должны быть расшифрованы при первом употреблении. Если аббревиатур много, можно сделать список с расшифровкой каждой из них перед текстом статьи.

Таблицы и рисунки

Все таблицы и рисунки должны быть пронумерованы и названы, на них должна быть ссылка в тексте статьи. В таблицах не должно быть пустых граф. Рисунки должны быть хорошего качества, пригодные для печати. Прикладываются к статье отдельными файлами.

Чтобы проверить качество изображения, можно увеличить его. Хорошее изображение не размывается при увеличении.

Сноски

При необходимости используются сноски со сквозной нумерацией (арабские цифры) по всему документу. В сносках могут быть цитаты из работ, которые упоминаются в тексте, дополнительная информация.

Оформление цитат и списка литературы

В журнале принят Ванкуверский стиль цитирования (ссылка в тексте в квадратных скобках, полное библиографическое описание источника в списке литературы в порядке упоминания в тексте статьи).

Список источников

В список литературы включаются источники, используемые в тексте статьи. Ссылки на принятые к публикации, но еще не опубликованные статьи, должны быть помечены словами «в печати»; авторы должны получить письменное разрешение для ссылки на такие документы и подтверждение того, что они приняты к печати. Информация из неопубликованных источников должна быть отмечена словами «неопубликованные данные/документы», авторы также должны получить письменное подтверждение на использование таких материалов.

Оформление ссылок на источники, библиографических ссылок осуществляется в соответствии с ГОСТ Р 7.0.7–2021.

Авторские права

Авторы, публикующиеся в журнале, соглашаются со следующим:

1. Авторы сохраняют за собой авторские права на работу и предоставляют журналу право первой публикации работы.

2. Авторы сохраняют право заключать отдельные контрактные договоренности, касающиеся неэксклюзивного распространения версии работы в опубликованном виде (например, размещение ее в институтском хранилище, публикацию в книге), со ссылкой на ее оригинальную публикацию в этом журнале.

3. Авторы имеют право размещать их работу в сети Интернет (например, в институтском хранилище или на персональном сайте) до и во время процесса рассмотрения ее данным журналом, так как это может привести к продуктивному обсуждению и большему количеству ссылок на данную работу.

Приватность

Имена и адреса электронной почты, введенные на сайте этого журнала, будут использованы исключительно для целей, обозначенных этим журналом, и не будут использованы для каких-либо других целей или представлены другим лицам и организациям.