

Научно-теоретический журнал

Вестник

Белгородского государственного технологического
университета им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

11

2019

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. В.Г. ШУХОВА

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ВЕСТНИК
БГТУ им. В.Г. ШУХОВА

№ 11, 2019 год

Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова

научно-теоретический журнал

К рассмотрению и публикации в НТЖ «Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова» принимаются научные статьи и обзоры по фундаментальным и прикладным вопросам в области строительства, архитектуры, производства строительных материалов и композитов специального назначения, химических технологий, машиностроения и машиноведения, освещающие актуальные проблемы отраслей знания, имеющие теоретическую или практическую значимость, а также направленные на внедрение результатов научных исследований в образовательную деятельность.

Журнал включен в утвержденный ВАК Минобрнауки России Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, по научным специальностям и соответствующим им отраслям науки:

- 05.23.01** – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)
- 05.23.03** – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки)
- 05.23.05** – Строительные материалы и изделия (технические науки)
- 05.23.20** – Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия (архитектура)
- 05.23.21** – Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (архитектура)
- 05.23.22** – Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки)
- 05.23.22** – Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (архитектура)
- 05.17.06** – Технология и переработка полимеров и композитов (технические науки)
- 05.17.11** – Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов (технические науки)
- 05.02.05** – Роботы, мехатроника и робототехнические системы (технические науки)
- 05.02.07** – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)
- 05.02.08** – Технология машиностроения (технические науки)
- 05.02.13** – Машины, агрегаты и процессы (по отраслям) (технические науки)

Все поступающие материалы проходят научное рецензирование (двойное слепое). Рецензирование статей осуществляется членами редакционной коллегии, ведущими учеными БГТУ им. В.Г. Шухова, а также приглашенными рецензентами – признанными специалистами в соответствующей отрасли знания. Копии рецензий или мотивированный отказ в публикации предоставляются авторам и в Минобрнауки России (по запросу). Рецензии хранятся в редакции в течение 5 лет.

Редакционная политика журнала базируется на основных положениях действующего российского законодательства в отношении авторского права, плагиата и клеветы, и этических принципах, поддерживаемых международным сообществом ведущих издателей научной периодики и изложенных в рекомендациях Комитета по этике научных публикаций (COPE).

Официальный сайт журнала: <https://bulletinbstu.editorum.ru>

Тел: +7 (4722) 30-99-77. E-mail: VESTNIK@intbel.ru.

Подписной индекс в объединенном каталоге «Пресса России» – 44446.

Online подписка: <http://www.akc.ru/itm/2558104627/>

Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov

scientific and theoretical journal

Scientific articles and reviews on fundamental and applied questions in the field of construction, architecture, productions of construction materials and composites of a special purpose, chemical technologies, machine building and engineering science covering the current problems of branches of knowledge having the theoretical or practical importance and also directed to introduction of research results in educational activity are accepted to be considered and published in the journal.

The journal is included in the list for peer-reviewed scientific publications approved by the Higher Attestation Commission under the Ministry of Science and Education of the Russian Federation, which should publish the main scientific results of dissertations for the degree of candidate of Sciences, for the degree of Doctor of Sciences, for scientific specialties and relevant branches of science:

- 05.23.01** – Building structures, constructions and facilities (technical sciences)
- 05.23.03** – Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting (technical sciences)
- 05.23.05** – Building materials and products (technical sciences)
- 05.23.20** – Theory and history of architecture, restoration and reconstruction of historical and architectural heritage (architecture)
- 05.23.21** – Architecture of buildings and structures. Creative concepts of architectural activity (architecture)
- 05.23.22** – Urban planning, rural settlement planning (technical sciences)

- 05.23.22** – Urban planning, rural settlement planning (architecture)
- 05.17.06** – Technology and processing of polymers and composites (technical sciences)
- 05.17.11** – Technology of silicate and refractory nonmetallic materials (technical sciences)
- 05.02.05** – Robots, mechatronics and robotic systems (technical sciences)
- 05.02.07** – Technology and equipment of mechanical and physical-technical processing (technical sciences)
- 05.02.08** – Engineering technology (technical sciences)
- 05.02.13** – Machines, units and processes (branch-wise) (technical sciences)

All arriving materials undergo scientific reviewing (double blind). Reviewing of articles is carried out by the members of editorial board, the leading scientists of BSTU named after V.G. Shukhov and by invited reviewers – recognized experts in the relevant branch of knowledge. Copies of reviews or motivated refusal in the publication are provided to the authors and to the Ministry of Science and Education of the Russian Federation (on request). Reviews are stored in the editorial office for 5 years.

The editorial policy of the journal is based on the general provisions of the existing Russian legislation concerning copyright, plagiarism and slander, and the ethical principles maintained by the international community of the leading publishers of the scientific periodical press and stated in the recommendations of the Committee on Publication Ethics (COPE).

Official website of the journal: <https://bulletinbstu.editorum.ru>
Tel.: +7 (4722) 30-99-77. E-mail: VESTNIK@intbel.ru
Subscription index in the united catalogue of "Press of Russia" – 44446.
Online subscription: <http://www.akc.ru/itm/2558104627/>

Главный редактор

Евтушенко Евгений Иванович, д-р техн. наук, проф., первый проректор, заведующий кафедрой технологии стекла и керамики Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Заместитель главного редактора

Уваров Валерий Анатольевич, д-р техн. наук, проф., директор инженерно-строительного института, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Члены редакционной коллегии

Айзенштадт Аркадий Михайлович, д-р хим. наук, проф., заведующий кафедрой композиционных материалов и строительной экологии Высшей инженерной школы, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (РФ, г. Архангельск).
Ахмедова Елена Александровна, член-корр. РААСН, д-р арх., проф., заведующий кафедрой градостроительства Самарского государственного технического университета, Архитектурно-строительной академии (РФ, г. Самара).

Баженов Юрий Михайлович, академик РААСН наук, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии вяжущих веществ и бетона НИУ Московского государственного строительного университета (РФ, г. Москва).

Благоевич Деян, PhD, проф. Высшей технической школы по профессиональному образованию в Нише (Республика Сербия, г. Ниш).
Богданов Василий Степанович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой механического оборудования Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Борисов Иван Николаевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии цемента и композиционных материалов Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Братан Сергей Михайлович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии машиностроения Севастопольского государственного университета (РФ, г. Севастополь).

Везенцев Александр Иванович, д-р техн. наук, проф., зав. каф. общей химии Белгородского государственного национального исследовательского университета (РФ, г. Белгород).

Глаголев Сергей Николаевич, д-р экон. наук, ректор Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Грабовый Петр Григорьевич, д-р экон. наук, проф., заведующий кафедрой организации строительства и управления недвижимостью, НИУ Московского государственного строительного университета (РФ, г. Москва).

Гридчин Анатолий Митрофанович, д-р техн. наук, проф., Президент Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Давидюк Алексей Николаевич, д-р техн. наук, директор НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство» (РФ, г. Москва).

Дуюн Татьяна Александровна, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии машиностроения Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Ерофеев Владимир Трофимович, академик РААСН, д-р техн. наук, проф., декан архитектурно-строительного факультета, заведующий кафедрой строительных материалов и технологий, директор НИИ «Материаловедение» Национального исследовательского Мордовского государственного университета имени Н.П. Огарёва (РФ, Республика Мордовия, г. Саранск).

Зайцев Олег Николаевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции Академии строительства и архитектуры – структурное подразделение Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского (РФ, г. Симферополь).

Ильвицкая Светлана Валерьевна, д-р арх., проф., заведующий кафедрой архитектуры Государственного университета по землеустройству (РФ, г. Москва).

Козлов Александр Михайлович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии машиностроения Липецкого государственного технического университета (РФ, г. Липецк).

Леонович Сергей Николаевич, иностранный член академик РААСН, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии строительного производства Белорусского национального технического университета (Республика Беларусь, г. Минск).

Лесовик Валерий Станиславович, чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой строительного материаловедения изделий и конструкций Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Логачев Константин Иванович, д-р техн. наук, проф. кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Мещерин Виктор Сергеевич, PhD, проф., директор института строительных материалов и заведующий кафедрой строительных материалов Дрезденского Технического Университета (Германия, г. Дрезден).

Меркулов Сергей Иванович, чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой промышленного и гражданского строительства Курского государственного университета (РФ, г. Курск).

Павленко Вячеслав Иванович, д-р техн. наук, проф., директор института химических технологий, заведующий кафедрой теоретической и прикладной химии Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Павлович Ненад, PhD, проректор по научной работе и издательской деятельности, проф. Машиностроительного факультета Государственного Нишского университета (Республика Сербия, г. Ниш).

Пивинский Юрий Ефимович, д-р техн. наук, проф., научный руководитель ООО «Научно-внедренческая фирма «КЕРАМБЕТ-ОГ-НЕУПОР» (РФ, г. Санкт-Петербург).

Потапов Евгений Эдуардович, д-р хим. наук, проф. МИРЭА – Российского технологического университета (РФ, г. Москва).

Рыбак Лариса Александровна, д-р техн. наук, проф. кафедры технологии машиностроения Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Савин Леонид Алексеевич, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой мехатроники, механики и робототехники Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева (РФ, г. Орел).

Семенов Сергей Владимирович, д-р арх., проф., заведующий кафедрой архитектурного и градостроительного наследия Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (РФ, г. Санкт-Петербург).

Сиваченко Леонид Александрович, д-р техн. наук, проф., кафедры транспортных и технологических машин Белорусского-Российского университета (Республика Беларусь, г. Могилев).

Соболев Константин Геннадьевич, PhD, проф. Университета Висконсин-Милуоки (штат Висконсин, Милуоки, США).

Смоляго Геннадий Алексеевич, д-р техн. наук, проф. кафедры строительства и городского хозяйства Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Строкова Валерия Валерьевна, проф. РАН, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой материаловедения и технологии материалов Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Фишер Ханс-Бертрам, Dr.-Ing., Ваймар (Германия, г. Веймар).

Ханин Сергей Иванович, д-р техн. наук, проф. кафедры механического оборудования Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Шаповалов Николай Афанасьевич, д-р техн. наук, проф. Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Шубенков Михаил Валерьевич, академик РААСН, д-р арх., проф., заведующий кафедрой градостроительства, проректор по образованию в области градостроительства и урбанистики Московского архитектурного института (государственная академия) (РФ, г. Москва).

Юрьев Александр Гаврилович, д-р техн. наук, проф., кафедры теоретической механики и сопротивления материалов Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Яцун Сергей Федорович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой механики, мехатроники и робототехники Юго-Западного государственного университета (РФ, г. Курск).

CHIEF EDITOR

Evgeniy I. Evtushenko, Doctor of Technical Sciences, Professor; First Vice-Rector, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

DEPUTY OF CHIEF EDITOR

Valery A. Uvarov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

MEMBER OF EDITORIAL BOARD

Arkadiy M. Ayzenshtadt, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (Russian Federation, Arkhangelsk).

Elena A. Akhmedova, Corresponding member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Architecture, Professor, Samara State Technical University, Academy of Construction and Architecture (Russian Federation, Samara).

Yuriy M. Bazhenov, Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (Russian Federation, Moscow).

Deyan Blagoevich, PhD, Professor, Higher Technical School of Professional Education in Nish (Republic of Serbia, Nish).

Aleksandr I. Vezentsev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod National Research University (Russian Federation, Belgorod).

Vasiliy S. Bogdanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Ivan N. Borisov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Sergey M. Bratan, Doctor of Technical Sciences, Professor, Sevastopol State University (Russian Federation, Sevastopol).

Sergey N. Glagolev, Doctor of Economic Sciences, Professor, Rector, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Petr G. Graboviy, Doctor of Economic Sciences, Professor, Moscow State University of Civil Engineering (National research University) (Russian Federation, Moscow).

Anatoliy M. Gridchin, Doctor of Technical Sciences, Professor, President, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Aleksey N. Davidyuk, Doctor of Technical Science, Director NII ZHB named after A.A. Gvozdeva AO «NIC «Stroitel'stvo» (Russian Federation, Moscow).

Tatyana A. Duyun, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Vladimir T. Erofeev, Academician of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute "Materials Science", National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev (Russian Federation, Republic of Mordovia, Saransk).

Oleg N. Zaytsev, Doctor of Technical Sciences, Professor, V.I. Vernadsky Crimean Federal University (Russian Federation, Simferopol).

Svetlana V. Il'vitskaya, Doctor of Architecture, Professor, State University of Land Use Planning (Russian Federation, Moscow).

Aleksandr M. Kozlov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Lipetsk State Technical University (Russian Federation, Lipetsk).

Valery S. Lesovik, Corresponding member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Sergey N. Leonovich, Foreign member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belarusian National Technical University (Republic of Belarus, Minsk).

Konstantin I. Logachev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Victor S. Meshcherin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Technical University of Dresden (TU Dresden), Director of the Institute of Building Materials and head of the department of building materials (Germany, Dresden).

Sergei I. Merkulov, Corresponding member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kursk State University (Russian Federation, Kursk).

Vyacheslav I. Pavlenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Nenad Pavlovich, PhD, Vice-rector for Scientific Work and Publishing Activities, Professor, Mechanical Engineering Faculty State University of Nish (Republic of Serbia, Nish).

Yuriy E. Pivinski, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the "Research and development company" KERAM-BET-OGNEUPOR" (Russian Federation, Saint Petersburg).

Evgeniy E. Potapov, Doctor of Chemical Sciences, Professor, MIREA - Russian Technological University (Russian Federation, Moscow).

Larisa A. Rybak, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Leonid A. Savin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Orel State University named after I.S. Turgenev (Russian Federation, Orel).

Sergey V. Sementsov, Doctor of Architecture, Professor, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (Russian Federation, Saint Petersburg).

Leonid A. Sivachenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belarusian-Russian University (Republic of Belarus, Mogilev).

Konstantin G. Sobolev, PhD, Professor, University of Wisconsin-Milwaukee (USA).

Gennadiy A. Smolyago, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Valeriya V. Strokov, Professor of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Hans Bertram Fischer, Dr.-Ing., Deputy Head of the Construction Materials Department, Bauhaus-University of Weimar (Bauhaus-Universität Weimar) (Germany, Weimar).

Sergey I. Khanin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Nikolai A. Shapovalov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Mikhail V. Spubenkov, Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction, Doctor of Architecture, Professor, Moscow Institute of Architecture (State Academy) (Russian Federation, Moscow).

Aleksandr G. Yur'yev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Sergey F. Yatsun, Doctor of Technical Sciences, Professor, Southwest State University (Russian Federation, Kursk).

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Шахова Л.Д., Черноситова Е.С., Щелокова Л.С., Денисова Ю.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ТЕКУЧЕСТЬ ЦЕМЕНТОВ	8
Ву Ким Зиен, Танг Ван Лам, Баженова С.И., Нгуен Зуен Фонг ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДОМЕННЫХ ШЛАКОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ БЕТОНОВ И РАСТВОРОВ ВО ВЬЕТНАМЕ	17
Володченко А.А. СТЕНОВЫЕ СИЛИКАТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ КРЕМНЕЗЕМИСТОГО СЫРЬЯ И АЛЮМОСИЛИКАТНОГО ВЯЖУЩЕГО НА ОСНОВЕ НЕТРАДИЦИОННЫХ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД	25
Смоляго Г.А., Дрокин С.В., Дронов А.В., Белоусов А.П., Пушкин С.А., Смоляго Е.Г. ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СБОРНЫХ БАЛОЧНЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ КЕРАМЗИТОБЕТОННЫХ МНОГОПУСТОТНЫХ ПЛИТ	35
Николюкин А.Н., Ярцев В.П., Мамонтов С.А., Коломникова И.И., Аль Вард А.М. АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БЕТОНА И АРМАТУРЫ В ОБЛАСТИ ИХ ЗАЦЕПЛЕНИЯ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS	43
Блажнов А.А. ПОЛИКАРБОНАТНЫЕ ТЕПЛИЦЫ С ТРАНСФОРМИРУЕМОЙ КРОВЛЕЙ	53
Иванова О.Н., Горожанкин В.К. СУБСТАНЦИИ КОМПОЗИТНОЙ ФОРМЫ	59
Кочеткова Т.В., Алейникова Н.В. КОМФОРТНОСТЬ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ	66
Соина Н.С. ИСТОРИОГРАФИЯ ГЕНУЭЗСКИХ СРЕДНЕВЕКОВЫХ ОБОРОНИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКОГО БАССЕЙНА	73

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Бондаренко Н.И., Бондаренко Д.О., Бондаренко М.А., Дороганов Е.А. ОБЛИЦОВОЧНЫЕ И ДЕКОРАТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СТЕКЛЯННЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ	79
Трубицын М.А., Хоанг Вьет Хунг, Фурда Л.В., Ле Ван Тхуан СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОРАЗМЕРНОГО ГИДРОКСИАПАТИТА, ДОПИРОВАННОГО КАРБОНАТ- И СИЛИКАТ-АНИОНАМИ	86
Бородулин А.С., Калинин А.Н., Терешков А.Г., Музыка С.С. ПОЛИЭФИРИМИДЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТЕПЛОСТОЙКИХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ВЫСОКИМИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ	94
Кочергин Ю.С., Золотарева В.В. СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СМЕСЕЙ ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ И ОЛИГОСУЛЬФОНОВ. ЧАСТЬ 3. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА	101

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Никитина И.П., Поляков А.Н. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУСТОРОННЕГО ТОРЦЕШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА	112
Кхалифа М., Дуюн Т.А. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОГО ПАКЕТА ANSYSWorkbench	121
Данилов А.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЯ МЕТОДА «КОНЕЧНОГО ПОВОРОТА И СМЕЩЕНИЯ» НА ПРОХОЖДЕНИЕ МАНИПУЛЯЦИОННЫМ РОБОТОМ EUROPEAN ROBOTIC ARM СИНГУЛЯРНЫХ ТОЧЕК	128

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Shakhova L.D., Chernositova E.S., Schelokova L.S., Denisova J.V. A STUDY OF FACTORS AFFECTING THE FLUIDITY OF CEMENT	8
Vu Kim Dien, Tang Van Lam, Bazhenova S.II., Nguyen Duyen Phong POSSIBILITY OF USING BLAST FURNACE SLAG IN CONCRETE AND MORTAR PRODUCTION IN VIETNAM	17
Volodchenko A.A. WALL SILICATE MATERIALS OF NON-AUTOCCLAVE HARDENING WITH THE USE OF SILICA RAW MATERIALS AND ALUMINOSILICATE BINDING BASED ON NON-CONVENTIONAL CLAY ROCKS	25
Smolyago G.A., Drokin S.V., Dronov A.V., Belousov A.P., Pushkin S.A., Smolyago E.G. TECHNICAL CONDITION OF PRECAST BEAMS WITH THE USE OF EXPANDED LIGHTWEIGHT CONCRETE HOLLOW-CORE SLABS	35
Nikolyukin A.N., Yartsev V.P., Mamontov S.A., Kolomnikova I.I., Al Ward A.M. ANALYSIS OF THE STRESS - STRAIN CONDITION OF CONCRETE AND REINFORCEMENT IN THE AREA OF THEIR ENGAGEMENT IN THE ANSYS SOFTWARE PACKAGE	43
Blazhnov A.A. POLYCARBONATE GREENHOUSES WITH CONVERTIBLE ROOF	53
Ivanova O.N., Gorozhankin V.K. SUBSTANTIES OF COMPOSITE FORM	59
Kochetkova T.V., Aleinikova N.V. COMFORT OF THE URBAN ENVIRONMENT	66
Soina N.S. HISTORIOGRAPHY OF GENOESE MEDIEVAL FORTIFICATIONS OF THE AZOV-BLACK SEA BASIN	73

CHEMICAL TECHNOLOGY

Bondarenko N.I., Bondarenko D.O., Bondarenko M.A., Doroganov E.A. FACING AND DECORATIVE MATERIALS BASED ON GLASS DOMESTIC WASTE	79
Troubitsin M.A., Hoang Viet Hung, Furda L.V., Le Van Thuan SYNTHESIS AND INVESTIGATION THE PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF NANOSIZED HYDROXYAPATITE DOPED BY CARBONATE- AND SILICATE-ANIONS	86
Borodulin A.S., Kalinnikov A.N., Tereshko A.G., Music S.S. POLYETHERIMIDE FOR CREATION OF HEAT-RESISTANT POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS WITH HIGH PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES	94
Kochergin Y.S., Zolotareva V.V. PROPERTIES OF COMPOSITIONAL MATERIALS BASED ON THE MIXTURES OF EPOXY POLYMERS AND OLIGOSULFONES. PART 3. PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES	101

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Nikitina I.P., Polyakov A.N. EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE TEMPERATURE AND ACCURACY CHARACTERISTICS OF DOUBLE-SIDED FACE GRINDING MACHINE	112
Khalifa M., Dujun T.A. FINITE ELEMENT MODELING OF THE CUTTING PROCESS DURING MACHINING OF STRUCTURAL STEEL USING ANSYS WORKBENCH	121
Danilov A.V. TEST SIMULATION OF «FINITE ROTATION AND DISPLACEMENT» METHOD BY THE EUROPEAN ROBOTIC ARM PASSING THROUGH THE SINGULAR POINTS	128

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-8-16

¹Шахова Л.Д., ^{2,*}Черноситова Е.С., ²Щелокова Л.С., ²Денисова Ю.В.¹ООО «Полипласт Новомосковск»

Россия, 301661, Тульская обл., г. Новомосковск, Комсомольское шоссе, 72

²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46

*E-mail: ES-Helen@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ТЕКУЧЕСТЬ ЦЕМЕНТОВ

Аннотация. Текучесть цементного порошка оказывает существенное влияние на продолжительность и трудозатраты в процессе транспортирования и отгрузки цемента. Это обуславливает актуальность задачи поиска механизмов управления этим параметром.

В процессе производства текучесть цементного порошка формируется в зависимости от свойств исходной цементной шихты, требований по тонкости помола к готовой продукции, аппаратного дизайна и условий проведения процесса. В свою очередь, текучесть цемента оказывает влияние на процесс измельчения, и, следовательно, на производительность мельницы. Реологические характеристики цементного вяжущего со временем изменяются в зависимости от физических свойств материала, условий окружающей среды и оборудования, используемого для его хранения. Причины ухудшения текучести цементного порошка до сих пор полностью не изучены.

Статья посвящена исследованию основных факторов, влияющих на текучесть цемента. Приведены результаты статистического анализа текучести цемента в зависимости от тонкости помола цемента (по остатку на сите №008 и удельной поверхности по Блейну), влажности, насыпного веса и веса в максимально уплотненном состоянии, а также рассмотрена детально взаимосвязь производственных факторов и текучести цемента. Корреляционно-регрессионным методом анализа установлено, что на текучесть влияет переменный фактор, который пока не оценивается количественно.

Ключевые слова: цемент, текучесть цементного порошка, подвижность, слеживаемость, корреляционно-регрессионный анализ.

Введение. Снижение текучести (подвижности) цемента при массовых отгрузках большими объемами автомобильным, железнодорожным транспортом «навалом» или в тарированном виде создают большие проблемы, увеличивая время и трудозатраты при погрузочно-разгрузочных работах. Эти задержки могут быть достаточно существенными.

Текучесть порошков является сочетанием физических свойств материала, условий окружающей среды и оборудования, используемого для переработки и хранения этих материалов [1]. Поведение потока порошкообразного материала носит многомерный характер и зависит от многих физических характеристик [2–5].

Причины ухудшения текучести цементного порошка до сих пор полностью не поняты. Основной причиной, к которой склоняются многие исследования, является сложные отношения между поверхностной энергией отдельных зерен цемента и потоком тех же частиц [6, 7]. Поверхностная энергия зависит от многих факторов в процессе производства цемента: тонкость помола, тип помольного оборудования, тип вращающихся печей и способ производства (мокрый или сухой), температуры обжига и охлаждения, скорости охлаждения и т.д. [8–10].

Перечисленные факторы играют важную роль при формировании других свойств цемента, таких как насыпная плотность, угол естественного откоса, слеживаемость при хранении в силосах, время погрузочно-разгрузочных работ из емкостей хранения и транспортирования. Даже небольшое изменение количественных значений указанных факторов может привести к значительным изменениям подвижности порошков: снижение размера частиц ведет к снижению текучести данного порошка [11–13]. Для эффективного управления и возможности прогнозирования текучести важно понимать ее роль в технологических процессах получения и хранения цемента, а также механизмы управления этим параметром.

Основываясь на наших многолетних результатах практики применения технологических добавок, была выдвинута гипотеза о влиянии текучести цементного порошка на процессы измельчения и транспортирования. Взаимосвязь факторов, определяющих производительность мельницы и эффективность работы сепарирующих аппаратов, а также изменение характеристик готовой продукции показана на рис. 1.



Рис. 1. Взаимосвязь производственных факторов и текучести цемента

Из приведенной схемы следует, что текучесть цемента зависит от свойств исходной цементной шихты, требований по тонкости помола к готовой продукции, аппаратного дизайна и условий проведения процесса. Кроме этого, имеется обратная связь – влияние текучести цемента на процесс измельчения, таким образом, на производительность мельницы.

Существует несколько эмпирических закономерностей: гидрофобные порошки текут лучше, чем гидрофильные; монодисперсные порошки текут лучше полидисперсных [14, 15]. Согласно этим эмпирическим закономерностям, цементы, изготовленные на мельницах замкнутого цикла с сепараторами при равной удельной поверхности, должны иметь выше текучесть, чем цементы, изготовленные по открытому циклу [16]. Как показывает практика, цемент, произведенный по открытому циклу, начинает агрегироваться раньше. Это связано с тем, что мелкие частицы не выводятся из зоны воздействия мелющих тел, частицы начинают налипать на мелющие тела и бронефутеровку, тем самым снижая эффективность удара. Подводящая энергия расходуется не только на измельчение, но и на разрушение образующихся агрегатов. По этой причине в мельнице открытого цикла невозможно получить цементы с удельной поверхностью выше $400 \text{ м}^2/\text{кг}$ [17].

Трудности оценки влияния множества факторов на текучесть цемента заключается в невозможности количественного определения текучести в конкретных технологических условиях [18]. Поэтому в данных экспериментах текучесть готового продукта определялась в лаборатории

цементного предприятия с учетом параметров, которые могли быть оценены количество.

Методы, оборудование, материалы. При проведении эксперимента были отобраны 92 пробы цемента ЦЕМ II/A-III 32.5Б при отгрузке партий из силосов. Цементы были получены помолом в мельнице $3.2 \times 14 \text{ м}$ открытого цикла. В качестве исследуемых факторов рассматривались: тонкость помола цемента (по остатку на сите №008 и удельной поверхности по Блейну), влажность порошка, насыпной вес и вес в максимально уплотненном состоянии.

Насыпной вес определялся взвешиванием разрыхленного порошка в мерной емкости. Затем емкость с цементом устанавливалась на встряхивающий стол Хагерманна и производилось встряхивание 50 раз. В емкость добавлялся цемент, верхний излишек порошка удалялся и емкость опять встряхивалась 50 раз. Так продолжается до тех пор, пока порошок максимально не уплотнится. Степень слеживаемости определялся как отношение веса в рыхлом состоянии к весу в уплотненном состоянии. Степень слеживаемости косвенно отражает склонность порошка к уплотнению при механических воздействиях.

Влажность порошка, удельная поверхность по Блейну определялись по ГОСТ 30744.

Статистическая обработка результатов испытаний проводилась по классическим методам, рекомендуемым ГОСТ Р ИСО/ТО 10017 для использования в системах менеджмента качества по ИСО 9001, в пакете анализа данных STATISTICA [19].

Результаты испытаний, использованные для статистической обработки, проверялись на наличие грубой погрешности по критерию Райта с использованием программного продукта [20].

На начальном этапе статистического исследования методами описательной статистики и проверки гипотез были оценены параметры и вид

распределения исходных данных с целью их дальнейшего использования для корреляционно-регрессионного анализа.

Статистические показатели выходного параметра – текучести цемента и влияющих факторов, рассчитанные по экспериментальным данным, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Описательная статистика исходных данных

Значения	Выходной параметр Y1 – текучесть цемента, %	Факторные признаки						
		x1 – остаток на сите №008, мас. %;	x2 – удельная поверхность цемента по Блейну, см ² /г	x3 – влажность цемента, %;	x4 – массовая доля шлака, %;	x5 – насыпной вес в рыхлом состоянии, г/л;	x6 – насыпной вес в максимально уплотненном состоянии, г/л;	x7 – отношение насыпного веса и в уплотненном состоянии (степень слеживаемости)
Среднее	25,70	8,420	292,080	0,028	10,658	1133,773	1591,955	0,714
Минимальное	19	5,5	267	0,01	2,1	1046	1327	0,63
Максимальное	31	13,3	324	0,05	19,7	1237	1788	0,85
Стандартное отклонение	2,55	1,647	13,165	0,008	3,554	49,503	91,776	0,038
Коэффициент вариации, %	9,94	19,56	4,51	28,54	33,34	4,37	5,77	5,28
Значение коэффициента парной корреляции между x_i и y		-0,097	-0,184	0,007	-0,084	-0,114	-0,008	-0,110

Коэффициент вариации значений массовой доли шлака превышает 33 %, что свидетельствует о неоднородности данных и распределении исследуемого параметра, отличным от нормального. Однако гистограмма распределения, представленная на рисунке 2, и результаты расчета **D**-статистики Колмогорова-Смирнова, вы-

полненные в программе STATISTICA, позволяют принять гипотезу о нормальности распределения. Следовательно, все факторные признаки могут быть использованы для проведения регрессионного анализа с целью изучения взаимосвязей текучести цемента от множества факторов, приведенных в табл. 1.

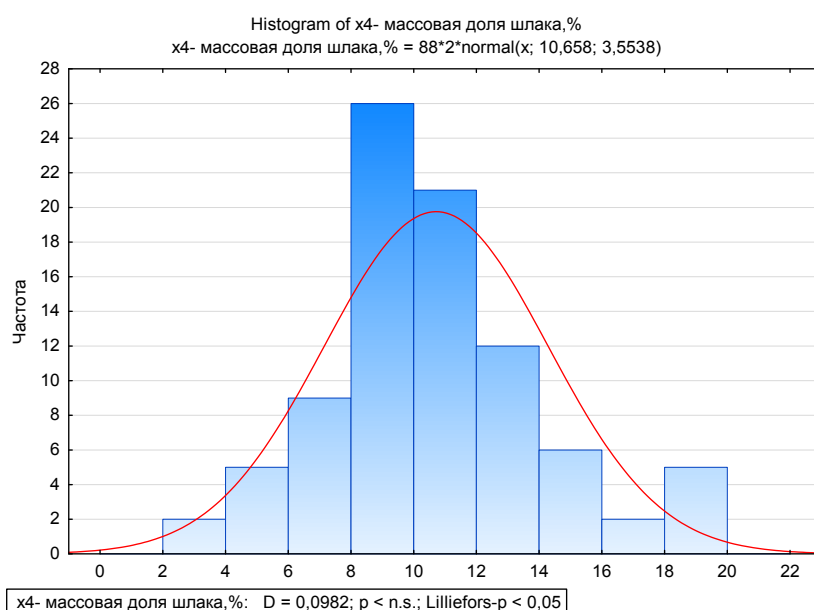


Рис. 2. Гистограмма распределения массовой доли шлака

Корреляционно-регрессионный анализ позволяет исследовать взаимосвязи показателей, когда зависимость между ними не является строго функциональной и искажена влиянием посторонних, случайных факторов. Для его реализации использовался модуль Descriptive statistics программы STATISTICA [19].

Программой рассчитываются коэффициенты уравнения регрессии в кодированном и натуральном виде b^* и b соответственно, ошибки определения этих коэффициентов и значения критерия Стьюдента (t).

Уровень надежности (доверительная вероятность) задавался $\alpha=95\%$. Значимость коэффициентов множественной корреляции R в уравнении проверялась по F -критерию Фишера путем расчета его фактического значения и сравнения с табличными данными.

Для оценки добротности выполненного регрессионного анализа использовали величины:

- стандартной ошибки S_y , которая дает представление о приблизительной величине ошибки прогнозирования;

- коэффициентом детерминации R^2 , указывающим, какой процент вариации функции y объясняется воздействием факторов x_k .

Значимость коэффициентов уравнения регрессии оценивается с помощью табличных значений критерия Стьюдента.

Результаты и обсуждение. Рассчитанные в программе STATISTICA коэффициенты уравнения регрессии, полученные на основе экспериментальных данных, представлены на рис. 3.

Regression Summary for Dependent Variable: Y -текучесть (Spreadsheet1)						
R= ,40291284 R²= ,16233875 Adjusted R²= ,08904340 F(7,80)=2,2149 p<,04143 Std. Error of estimate: 2,4382						
N=88	b*	Std. Err. of b*	b	Std. Err. of b	t(80)	p-value
Intercept			216,664	62,92862	3,44302	0,000918
x1 - остаток на сите №008, мас. %	-0,09858	0,125793	-0,153	0,19515	-0,78365	0,435558
x2 - удельная поверхность цемента по Блейну, см²/г	-0,27963	0,108833	-0,054	0,02112	-2,56938	0,012045
x3 - влажность цемента, %	0,13037	0,114861	42,278	37,24830	1,13503	0,259753
x4- массовая доля шлака, %	-0,14502	0,120292	-0,104	0,08647	-1,20559	0,231528
x5 - насыпной вес в рыхлом состоянии, г/л	2,78708	1,098535	0,144	0,05669	2,53709	0,013121
x6 - насыпной вес в максимально уплотненном состоянии, г/л	-3,86397	1,459642	-0,108	0,04063	-2,64720	0,009772
x7 - степень слеживаемости	-3,42825	1,267774	-232,229	85,87883	-2,70415	0,008363

Рис. 3. Результаты регрессионного анализа в программе Statistica

Статистически значимые коэффициенты уравнения регрессии (выделены красным): удельная поверхность и показатели, характеризующие плотность цемента в разных состояниях. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,16$, что свидетельствует о том, что достаточно небольшая доля вариации зависимой переменной обусловлена вариацией рассмотренных факторных признаков.

Для дальнейшего анализа были приняты факторы X2 – показатель качества готового цемента, насыпной вес X5 и степень слеживаемости, характеризующая степень уплотнения материала в процессе хранения, X7.

Графически зависимость текучести цемента от выявленных значимых факторов X2-X7, X2-X5, полученная с помощью метода наименьших квадратов (МНК), представлена на рисунке 4. Очевидно, что поверхности, полученные в качестве прогнозируемой поверхности отклика, и реальные данные, полученные в результате испытаний, существенно отличаются.

Коэффициент детерминации R^2 для выбранной в программе модели составляет всего 0,071, что можно проиллюстрировать графически в виде зависимости между наблюдаемыми и прогнозируемыми значениями параметра (рис. 5).

Для автоматизации процесса выбора модели регрессии, наиболее информативной с точки зрения объясненной дисперсии, была применена опция «Пошаговая или гребневая регрессия». Результаты ее использования приведены ниже.

Выбранная с его помощью модель регрессии как наиболее информативная с точки зрения доли объясненной дисперсии включает всего один факторный признак – X2 (удельная поверхность цементного порошка:

$$Y = 47,69 - 0,045X_2$$

Прогнозируемые с использованием этой модели значения текучести цемента в зависимости от его удельной поверхности приведены на рис 6.

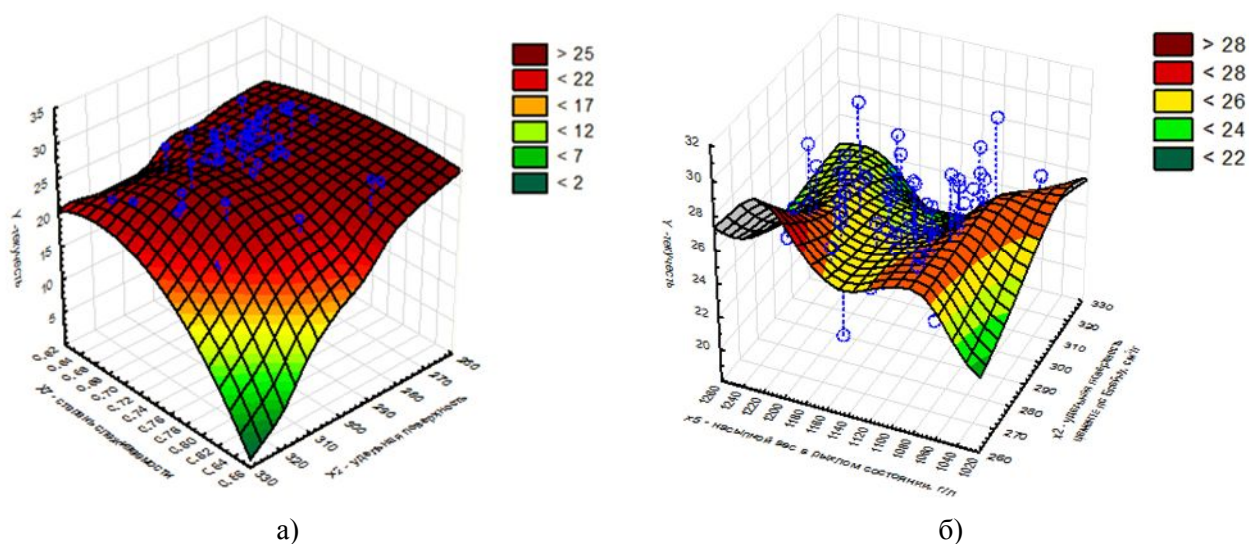


Рис. 3. Результаты построения поверхностей отклика в программе STATISTICA: а) зависимость текучести цемента от удельной поверхности и степени слеживаемости; б) зависимость текучести цемента от удельной поверхности и насыпного веса

		Regression Summary for Dependent Variable: Y -текучесть R= 0,26682461 R2= 0,07119537 Adjusted R2= ,03802378 F(3,84)=2,1463 p<,10048 Std.Error of estimate: 2,5056					
N=88		b*	Std.Err. of b*	b	Std.Err. of b	t(84)	p-value
	Intercept			47,69116	9,210279	5,17804	0,000002
	x2 - удельная поверхность цемента по Блейну, см²/г	-0,231968	0,109541	-0,04501	0,021256	-2,11764	0,037162
	x1 - остаток на сите №008, мас. %	-0,156852	0,109564	-0,24333	0,169969	-1,43159	0,155970
	x5 - насыпной вес в рыхлом состоянии, г/л	-0,116155	0,105269	-0,00599	0,005432	-1,10342	0,272997

Рис. 4. Результаты выбора регрессионной модели с помощью пошаговой или гребневой регрессии в программе STATISTICA

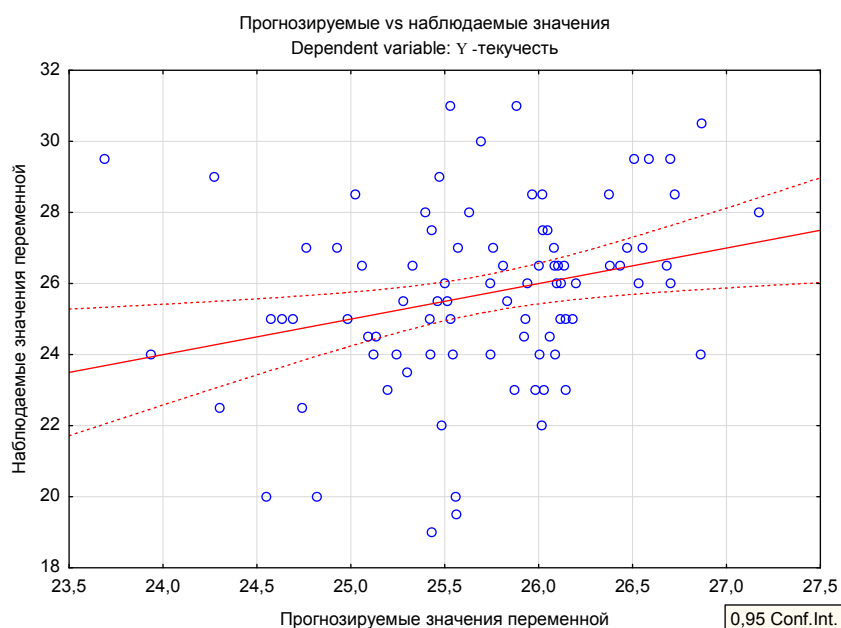


Рис. 5. Соотношение прогнозируемых по регрессионной модели и наблюдаемых значений текучести

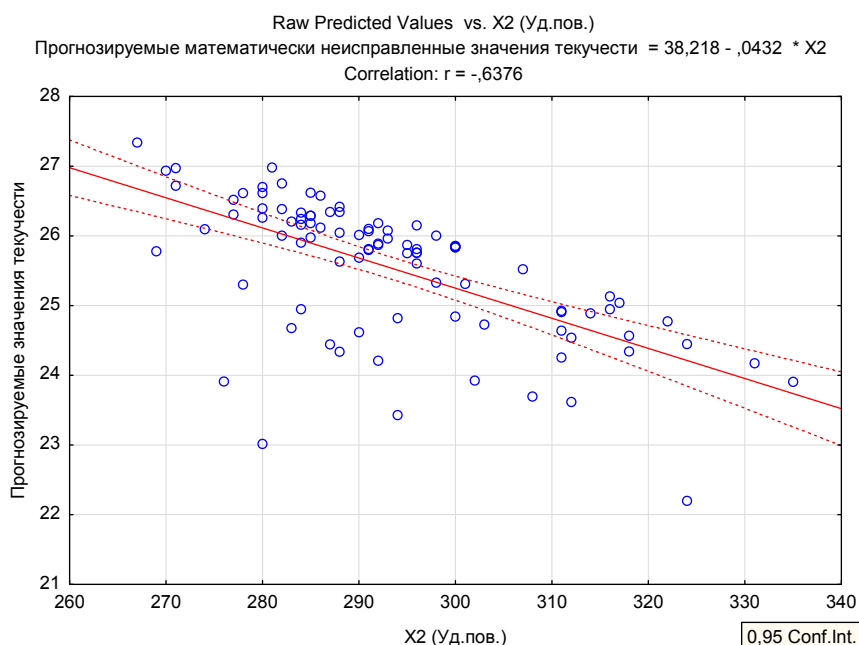


Рис. 6. Прогнозируемые математически неисправленные значения текучести

Выводы. Полученная при реализации метода регрессионного анализа оценка коэффициента детерминации R^2 (0,071), свидетельствует о том, что изменение текучести цементного порошка полностью обусловлено воздействием показанных в модели факторов и требует проведения дальнейших исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Prescott J.K., Barnum R.A. On Powder Flowability // Pharm. Technol. 2000. Pp. 60–84.
2. Shahova L.D., Chernositova E.S., Denisova J.V. Flowability and durability of cement containing technological additives during grinding process // 2017 AIME. AER-Advances in Engineering Research. 2017. Vol. 133. Pp. 162–167.
3. Shahova L.D., Chernositova E.S., Denisova J.V. Flowability of cement powder // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327. 032049.
4. Шахова Л.Д., Черноситова Е.С., Денисова Ю.В. Исследование влияния технологических добавок на реологические свойства цементного порошка // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №10. С. 123–128.
5. Флейшер А.Ю. Оценка эффективности активаторов помола на физико-механические характеристики цемента // Сб. тр. Междунар. конф. CemEnergy. 2013. С. 61–65.
6. Fitzpatrick J.J., Barringer S.A., Iqbal T.J. Flow property measurement of food powders and sensitivity of Jenike's hopper design methodology to the measured values // Food Engineering. 2004. Vol. 61(3). Pp. 399–405.
7. Fitzpatrick J.J., Ahrne L. Food powder handling and processing Industry problems, knowledge barriers and research opportunities // Chem. Engineering Proc. 2005. Vol. 44(2). Pp. 209–214.
8. Шахова Л.Д., Черноситова Е.С., Березина Н.М., Данилин А.А. Композиционные разжижители сырьевых шламов цементного производства // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2016. №10. С. 191–196.
9. Poluektova V.A., Shapovalov N.A. Fundamental patterns of influence of the structure and composition of the oxyphenol oligomers on the plastification of cement mixtures // International Journal of Pharmacy & Technology. 2016. Vol. 8. Issue 4. Pp. 22716–22725.
10. Marinelli J., Carson J.W. Solve solids flow problems in bins, hoppers and feeders // Chem. Engineering Proc. 1992. Vol. 88(5). Pp. 22–28.
11. Sprung C. Effect of storage conditions on the properties of cement // ZKG INTERNATIONAL. 1978. Vol. 6. Pp. 305–309.
12. Dubina E., Wadsö L., Plank J. A sorption balance study of water vapour sorption on anhydrous cement minerals and cement constituents // Cement and Concrete Research. 2011. Vol. 41. Issue 11. Pp. 1196–1204.
13. Kamath S., Puri V., Manbeck H., Hogg R. Flow properties of powders using four testers-measurement, comparison and assessemen // PowderTechnol. 1993. Vol. 76. Pp. 277–289.
14. Черноситова Е.С., Куприянов А.Н. К вопросу о снижении потерь и повышении производительности при изготовлении блоков из ячеистого бетона автоклавного твердения // Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем: 7-я

Международная научно-техническая конф. / Юго-Западный государственный университет (Курск, 30-31 мая 2019 г.), Курск. Том 1, Изд-во Юго-Западный государственный университет, 2019. С. 411–414.

15. Lebedev M.S., Chulkova I.L. Study of structure formation in bitumen-mineral compositions based on fly ash under water saturation // *Advances in Engineering Research* (Actual Issues of Mechanical Engineering AIME 2017). 2017. Vol. 133. Pp. 403–408.

16. Bulanov P.E., Vdovin E.A., Mavliev L.F., Kuznetsov D.A. Development of road soil cement compositions modified with complex additive based on polycarboxylic ether // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol.327. 032014.

17. Poluektova V.A., Shapovalov N.A.,

Evtushenko E.I. Nano-modified polymer solution for additive technologies // *International Journal of Pharmacy & Technology*. 2016. Vol. 8. Issue 4. Pp. 24930–24937.

18. Schwedes J. Flow Properties of Bulk Solids // *Granular Matter Review on Testers for Measuring*. 2003. Vol. 5. Pp 1–43.

19. Боровиков В.П. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере. Санкт-Петербург: Питер, 2003. 688 с.

20. Программа отбраковки результатов эксперимента, содержащих грубую погрешность: Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ / Денисова Ю.В., Черноситова Е.С., Куприянов А.Н. №2018616041: дата регистрации 21.05.2018 г.

Информация об авторах

Шахова Любовь Дмитриевна, доктор технических наук, профессор, директор научно-технического центра небетонного направления. E-mail: shahova_ld@polyplast-nm.ru. ООО «Полипласт Новомосковск». Россия, 301661, Тульская обл., г. Новомосковск, Комсомольское шоссе, 72.

Черноситова Елена Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры стандартизации и управления качеством. E-mail: ES-Helen@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Щелокова Лариса Станиславовна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: shelkova-larisa@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Денисова Юлия Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры архитектурных конструкций. E-mail: jdenisowa@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в сентябре 2019 г.

© Шахова Л.Д., Черноситова Е.С., Щелокова Л.С., Денисова Ю.В., 2019

¹*Shakhova L.D.*, ^{2,*}*Chernositova E.S.*, ²*Schelokova L.S.*, ²*Denisova J.V.*

¹*LLC «Polyplast Novomoskovsk»*

Russia, 301661, Tulskaia obl., Novomoskovsk, Komsomolskaya highway 72.

²*Belgorod State Technological University named after V.G. Shuhova*

Russia, 308012, Belgorod, Kostyukov, 46

**E-mail: ES-Helen@yandex.ru*

A STUDY OF FACTORS AFFECTING THE FLUIDITY OF CEMENT

Abstract. *The fluidity of cement powder has a significant impact on the duration and labor costs in the process of transportation and shipment of cement. This determines the relevance of the task of finding mechanisms to control this parameter.*

During the production process, the fluidity of the cement powder is formed depending on the properties of the initial cement charge, the requirements for the thinness of the grinding to the finished product, the hardware design and the conditions of the process. In turn, the fluidity of cement affects the grinding process and the productivity of the mill. The rheological characteristics of the cement binder change over time depending on the physical properties of the material, environmental conditions and the equipment used for its storage. The reasons for the deterioration of the flow of cement powder is still not fully studied.

The article is devoted to the study of the main factors affecting the fluidity of cement. The results of the statistical analysis of cement fluidity depending on the thinness of cement grinding (on the residue on the sieve №008 and the specific surface area by Blaine method) humidity, bulk weight and weight in the most compacted

state. In addition, the relationship of production factors and cement fluidity is considered. Correlation and regression analysis shows that the fluidity is affected by a variable factor, which is not yet quantified.

Keywords: cement, cement powder fluidity, mobility, caking, correlation and regression analysis.

REFERENCES

1. Prescott J.K., Barnum R.A. On Powder Flowability. Pharm. Technology. 2000. Pp. 60–84.
2. Shahova L.D., Chernositova E.S., Denisova J.V. Flowability and durability of cement containing technological additives during grinding process. 2017 AIME. AER-Advances in Engineering Research. 2017. Vol. 133. Pp. 162–167.
3. Shahova L.D., Chernositova E.S., Denisova J.V. Flowability of cement powder. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327. 032049.
4. Shakhova L.D., Chernositova E.S., Denisova J.V. Research of influence of technological additives on the rheological properties of cement powder [Issledovanie vliyaniya tekhnologicheskikh dobavok na reologicheskie svoystva cementnogo poroshka]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 10. Pp. 123–128. (rus)
5. Fleischer A.J. Evaluation of the effectiveness of activators of grinding on physico-mechanical characteristics of cement [Ocenka effektivnosti aktivatorov pomola na fiziko-mekhanicheskie harakteristiki cementa]. Proceedings of the international conference CemEnergy. 2013. Pp. 61–65. (rus)
6. Fitzpatrick J.J., Barringer S.A., Iqbal T.J. Flow property measurement of food powders and sensitivity of Jenike's hopper design methodology to the measured values. Food Engineering. 2004. Vol. 61(3). Pp. 399–405.
7. Fitzpatrick J.J., Ahrne L. Food powder handling and processing Industry problems, knowledge barriers and research opportunities. Chem. Engineering Proc. 2005. Vol. 44(2). Pp. 209–214.
8. Shahova L.D., Chernositova E.S., Berezin N.M., Danilin A.A. Composite thinners raw sludge in cement production [Kompozicionnye razzhizhiteli syr'evykh shlamov cementnogo proizvodstva]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2016. No.10. Pp. 191-196. (rus)
9. Poluektova V.A., Shapovalov N.A. Fundamental patterns of influence of the structure and composition of the oxyphenol oligomers on the plastification of cement mixtures. International Journal of Pharmacy & Technology. 2016. Vol. 8. Issue No. 4. Pp. 22716–22725.
10. Marinelli J., Carson J.W. Solve solids flow problems in bins, hoppers and feeders. Chem. Engineering Proc. 1992. Vol. 88(5). Pp 22–28.
11. Sprung C. Effect of storage conditions on the properties of cement. ZKG INTERNATIONAL. 1978. Vol. 6. Pp 305–309.
12. Dubina E., Wadsö L., Plank J. A sorption balance study of water vapour sorption on anhydrous cement minerals and cement constituents. Cement and Concrete Research. 2011. Vol. 41. Issue No. 11. Pp. 1196–1204.
13. Kamath S., Puri V., Manbeck H., Hogg R. Flow properties of powders using four testers-measurement, comparison and assesmen. PowderTechnol. 1993. Vol. 76. Pp. 277–289.
14. Chernositova E.S., Kupriyanov A.N. The issue of reducing losses and increasing productivity in the manufacture of cellular concrete blocks of autoclaved hardening [K voprosu o snizhenii poter' i povyshenii proizvoditel'nosti pri izgotovlenii blokov iz yacheistogo betona avtoklavnogo tverdeniya]. Upravlenie kachestvom na etapah zhiznennogo cikla tekhnicheskikh i tekhnologicheskikh sistem: 7-ya Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konf. Sbornik dokladov v 2-h tomah. Yugo-Zapadnyj gosudarstvennyj universitet (Kursk, 30-31 may, 2019). 2019. Vol. 1. Pp. 411–414. (rus)
15. Lebedev M.S., Chulkova I.L. Study of structure formation in bitumen-mineral compositions based on fly ash under water saturation. Advances in Engineering Reeseach (Actual Issues of Mechanical Engineering AIME 2017). 2017. Vol. 133. Pp. 403–408.
16. Bulanov P.E., Vdovin E.A., Mavliev L.F., Kuznetsov D.A. Development of road soil cement compositions modified with complex additive based on polycarboxylic ether. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327. 032014.
17. Poluektova V.A., Shapovalov N.A., Evtushenko E.I. Nano-modified polymer solution for additive technologies. International Journal of Pharmacy & Technology. 2016. Vol. 8. Issue 4. Pp. 24930–24937.
18. Schwedes J. Flow Properties of Bulk Solids. Granular Matter Review on Testers for Measuring. 2003. Vol. 5. Pp 1–43.
19. Borovikov V.P. STATISTICA. The art of data analysis on the computer [STATISTICA. Iskustvo analiza dannyh na komp'yutere]. Saint-Petersburg: Peter, 2003. 688 p. (rus)
20. The program rejection of the results of the experiment, containing a gross error [Programma otrakovki rezul'tatov eksperimenta, soderzhashchih grubuyu pogreshnost']: The certificate of state registration of program for computer / Denisova, J.V., Chernositov E.S., Kupriyanov A.N. – №2018616041: date of registration 21.05.2018. (rus)

Information about the authors

Shakhova, Lyubov D. DSc, Professor. E-mail: shahova_ld@polyplast-nm.ru. Director of the scientific-technical center of not a concrete direction. LLC «Polyplast Novomoskovsk», Russia, 301609, Tula region, Novomoskovsk, Komso-molskoye Rte., 72.

Chernositova, Elena S. PhD, Assistant professor. E-mail: ES-Helen@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Schelokova, Larisa S. PhD, Assistant professor. E-mail: shelokova-larisa@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Denisova, Julia V. PhD, Assistant professor. E-mail: jdenisowa@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in September 2019

Для цитирования:

Шахова Л.Д., Черноситова Е.С., Щелокова Л.С., Денисова Ю.В. Исследование факторов, влияющих на текучесть цементов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 11. С. 8–16. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-8-16

For citation:

Shakhova L.D., Chernositova E.S., Schelokova L.S., Denisova J.V. A study of factors affecting the fluidity of cement. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 11. Pp. 8–16. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-8-16

DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-17-24

¹Ву Ким Зиен, ¹Танг Ван Лам, ^{1,*}Баженова С.И., ²Нгуен Зуен Фонг¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

²Ханойский горно-геологический университет

Дык Тхань Уорд, Северо-Ты Лиен района, Ханой, Вьетнам.

*E-mail: sofia.bazhenova@gmail.com

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДОМЕННЫХ ШЛАКОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ БЕТОНОВ И РАСТВОРОВ ВО ВЬЕТНАМЕ

Аннотация. Доменные шлаки – отходы металлургической промышленности, которые при определенной подготовке можно использовать в технологии производства строительных растворов и бетонов. Целесообразное использование доменного шлака, как компонента для новых строительных материалов позволит улучшить экологическую обстановку и увеличит экономическую эффективность их производства.

Была рассмотрена технология переработки доменного шлака завода «Хоа Фат» (Вьетнам) и «Тхаи Нгуен» (Вьетнам) в тонкомолотую активную минеральную добавку. В результате проведенных исследований были получены химико-минералогический состав шлаков, рассмотрены и определены их физико-механические характеристики: удельная поверхность, плотность, водопотребность и другие.

Рассмотрена возможность применения данных гранулированных доменных шлаков в качестве активной минеральной добавки для замещения части вяжущего, для этого рассчитан индекс активности шлака согласно нормативным документам Вьетнама и России. Выявлены зависимости влияния прочности цементно-песчаного раствора на комплексном вяжущем от его плотности, (где Вяжущее вещество = Портландцемент + Гранулированный доменный шлак). Построена диаграмма сравнения Индекса активности IR (%) гранулированного доменного шлака по прочности на сжатия.

В работе использован Вьетнамский стандарт TCVN 11586:2016 для анализа возможности использования доменного шлака (Вьетнам) в технологии бетона и раствора в строительстве.

Ключевые слова: Гранулированный доменный шлак, цемент, отходы промышленности, комплексное вяжущее, активная минеральная добавка, индекс активности шлака.

Введение. Промышленные отходы, в том числе топливные, являются очень серьезной причиной возникновения проблем экологического характера, вызывающих загрязнение почвы, воды и воздуха во всех провинциях Вьетнама [1]. При этом, уровень повторного использования техногенных отходов весьма ограничен и составляет всего 2...5 % от общего количества вырабатываемых промышленных отходов [2, 3]. Согласно [4], на вторичном сырье при соблюдении определенных условий можно получить бетоны с высокими эксплуатационными характеристиками.

В технологии современных бетонов Вьетнама многие отходы промышленности (золы, шлаки и т.д.) используются как добавки в бетонные смеси для уменьшения расхода вяжущего и решения экологических проблем [2].

Во Вьетнаме по данным [5] каждый год, производство шлака от металлургической промышленности составляет 45÷55 миллионов тонн в год. Доменный шлак (ДШ) после определенной переработки используют для изготовления черепицы, кирпича, в качестве наполнителя для бетонной смеси, и как активную минеральную добавку, в том числе и для вяжущих – цементов.

Каждый год, мировое производство цемента около 3 млрд. т/год [6], в то время, как во Вьетнаме эта цифра составляет 99 млн. т/год [7]. Изготовление цемента – процесс не только дорогостоящий, но и энергоемкий, что влечет к климатическим изменениям на территории Вьетнама – способствует возникновению парникового эффекта. При соблюдении всех нормативных требований к вяжущему веществу в технологии производства бетона часть цемента можно заменить подходящим по составу специально переработанным шлаком. Та как рассматриваемые нами шлаки по своему химико-минералогическому составу (соотношением SiO_2 , Al_2O_3 и CaO) имеют реакционную способность, то замена ими части клинкера, позволит снизить стоимость вяжущего, уменьшить потребление электроэнергии и выделяемого тепла при производстве композиционного вяжущего вещества.

По данным исследования [8, 9] использование промышленных отходов в производстве бетонов может решить следующие актуальные вопросы:

1. Уменьшить стоимость готовой строительной продукции из вторичного сырья на композиционном вяжущем.

2. Расширить материально-сырьевую базу для производства строительных материалов.
3. Уменьшить потребность в первичных сырьевых ресурсах.
4. Снизить капитальные затраты на организацию хранения отходов.
5. Создать высокотехнологичные производства и обеспечить местное население новыми рабочими местами.
6. Утилизировать существующие свалки промышленных отходов.
7. Улучшить экологическую обстановку в промышленных зонах, где складировались отходы.
8. Улучшить условия жизни населения и животных.

На данный момент во Вьетнаме доменные шлаки применяют как добавку для бетонов и строительных растворов, однако исследований по доменным шлакам «Хоа Фат» и «Тхаи Нгуен» немного [1, 10].

По данным исследования [11] доменным шлаком можно заменить 5...30 % от части цемента. В данной работе авторами предложено возможность использования доменных шлаков в качестве активной минеральной добавки в количестве 10... 30 % от массы портландцемента.

Материалы:

– портландцемент (Ц) ЦЕМ I 42,5 Н производства завода «Там Диеп» (Вьетнам), истинной плотностью $3,14 \text{ г/см}^3$, химико-минералогический состав приведен в табл. 1, соответствовал требованиям ГОСТ 30515-2013 и TCVN 2682:2009;

– кварцевый песок (П) реки Ло (Вьетнам) с модулем крупности $M_k = 3,0$ истинной плотностью $2,66 \text{ г/см}^3$ и средней насыпной плотностью (в уплотненном состоянии) 1650 кг/м^3 . Песок I класса в соответствии с ГОСТ 8736-2014 и TCVN 7570:2006;

– Гранулированный доменный шлак (ГДШ) «Хоа Фат» и ГДШ «Тхаи Нгуен» представлены в табл. 2 и 3, соответствуют требованиям ГОСТ 3476-74;

– вода (В) затворения соответствующая требованиям ГОСТ 23732-2011 и TCVN 4506:2012.

Методология. Возможность использования шлака оценивалась по требованиям стандарта TCVN 11586:2016 «Доменный шлак мелкий для бетона и раствора»;

– индекс активности шлака в растворных смесях определяли в соответствии с требованиями стандарта TCVN 11586:2016;

– прочность бетонов на сжатие определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-2012 и TCVN 10303:2014;

– определение влажности доменного шлака проводили по ГОСТ 13586.5-2015 и TCVN 7572-7:2006;

Основная часть. Исследовались свойства доменного шлака (ДШ) полученного при выплавке чугуна, так как в исходной железной руде содержатся глинистые примеси, а в коксе – зола. В рамках проведенного исследования, для удаления примесей из исходного сырья, в доменную шихту вводили флюсы - карбонаты кальция и магния.



Рис. 1. Технологическая схема получения ГДШ

Использованный в работе ДШ был получен с завода, технологическая схема производства приведена на рис. 1. ДШ сушили в лабораторной печи при $T = 100 \pm 10^\circ \text{C}$ в течение 4 ч., после в вибрационной мельнице (Модель SM500x500, Китай) в течение 2 ч. материал мололи для получения гранулированного доменного шлака (ГДШ) в виде тонкого порошка (рис. 1 и табл. 2).

Химическо-минералогический состав и физико-механические характеристики портландцемента и полученного ГДШ приведены в табл. 1 и 2.

Согласно TCVN 11586:2016 «Требования технические гранулированного доменного шлаков для бетона и раствора», приведены в табл. 3.

Таблица 1

Химический состав портландцемента «Там Диеп» и ГДШ «Хоа Фат» и «Тхаи Нгуен»

Вид материала	Средний химический состав, % масс.											
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	Cl ⁻	S ²⁻	п.п.п.*
Портландцемент «Там Диеп»	19,5	58,73	4,76	5,27	2,34	3,62	0,51	1,53	—	—	—	3,74
ГДШ «Хоа Фат»	36,12	37,65	12,74	2,36	8,769	0,26	0,92	0,16	0,3	0,001	0,72	—
ГДШ «Тхаи Нгуен»	31,54	44,95	10,95	0,72	8,819	0,14	0,67	0,28	0,32	0,001	0,62	0,99

Таблица 2

Физические характеристики портландцемента «Там Диеп» и ГДШ «Хоа Фат» и «Тхаи Нгуен»

Свойства	Единицы измерения	Портландцемент «Там Диеп»	ГДШ «Хоа Фат»	ГДШ «Тхаи Нгуен»
Истинная плотность	г/см ³	3,15	2,558	2,297
Удельная поверхность	см ² /г	3660	5710	4565
Влажность	%	0	0,001	0,001

Таблица 3

Технические требования ГДШ для бетонов и растворов по TCVN 11586:2016 и по ТУ 0799-001-99126491-2013

п/п	Свойства	Единица	По ТУ 0799-001-99126491-2013	По TCVN 11586:2016			
				C60	C75	C95	C105
1	Истинная плотность (не более)	г/см ³	—	2,8			
2	Удельная поверхность (не менее)	см ² /г	4500	2750	3500	5000	7000
3	Индекса активности прочности (не менее) в возрастах: + 7 суток. + 28 суток. + 91 суток.	%	— — —	— 60 80	55 75 95	75 95 —	95 105 —
4	Влажность (не более)	%	0,3	1,0			
5	Содержание MgO (не более)	%	15	10			
6	Содержание SO ₃ (не более)	%	—	4,0			
7	Содержание Cl ⁻ (не более)	%	—	0,02			
8	Потери при прокаливании (не более)	%	0,95–1,10	3,0			

Примечание: C60, C75, C95, C105 - индекса активности шлака (I_R, %) в возрасте 28 суток.

Из приведённых в табл. 1–3 экспериментальных результатов следует, что по химическому составу и физико-механическим свойствам ГДШ «Хоа Фат» и ГДШ «Тхаи Нгуен» удовлетворяют требованиям стандарта TCVN 11586:2016 и ТУ 0799-001-99126491-2013.

Индекс активности гранулированного доменного шлака (I_R, %) представляет собой отношение прочности на сжатие образца из цементно-песчаного раствора, где часть вяжущего, цемента, заменена ГДШ (R₂), к прочности на сжатие контрольного, без добавочного цементно-песчаного раствора (R₁). Индекс активности доменного шлака рассчитывали по формуле (1), приведённой в стандарте TCVN 11586:2016.

$$I_R = \frac{R_2}{R_1} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где I_R – индекс активности доменного шлака, %; R₁ – прочность на сжатие контрольных образцов

выполненных на бесдобавочном цементно-песчаном составе в возрасте 28 суток, МПа; R₂ – прочность на сжатие образцов из цементно-песчаных растворов, где часть вяжущего заменена на ГДШ, в возрасте 28 суток, МПа.

Экспериментальные образцы изготавливали на цементно-шлаково-песчаных растворах при соотношениях Вяж : П = 1:3 (где Вяж – вяжущее вещество, Вяж = Ц + ГДШ (процентное соотношение цемента к доменному шлаку в вяжущем приведены в таб. 4). Контрольный состав – цементно-песчаный раствор, без каких-либо добавок и примесей. В соответствии с требованиями стандарта ГОСТ 30744-2001 и TCVN 2682:2009 и исследований [1, 9, 11] принимали ГДШ/Ц = 1/10 ÷ 3/10. На каждом составе формовали по 3 балочки 40×40×160 мм, которые после твердения в нормальных условиях, испытывали на прочность на сжатие (рис. 2 и 3).

Результаты проведенных прочностных испытаний сведены в табл. 5, где отражено как количество

вводимых доменных шлаков влияет на прочность двух типов, плотность смеси и индекс активности полученного состава бетона.

Полученные результаты испытаний использовали для расчёта индексов активности I_R , % (табл. 5 и рис. 4 и 5).



Рис. 2. Определение прочности образцов на сжатие



Рис. 3. Экспериментальные образцы из цементно-шлаково-песчаных растворов

Таблица 4

Рецептура

Состав	ГДШ/Ц	Расход сырьевых компонентов для 1 м ³ бетона, кг/м ³				
		Ц	П	ГДШ«Хоа Фат»	ГДШ«Тхаи Нгуен»	В
№-1	0 (Контрольный)	514	1541	0	0	257
№-2	1/10	465	1533	–	46	256
№-3	2/10	424	1526	–	85	254
№-4	3/10	390	1520	–	117	253
№-5	1/10	466	1536	47	–	256
№-6	2/10	426	1532	85	–	255
№-7	3/10	392	1528	118	–	255

Таблица 5

Прочность на сжатие, прочность на растяжение при изгибе и индекс активности ГДШ «Хоа Фат» и «Тхаи Нгуен» в возрасте 28 суток

Состав	ГДШ/Ц	Прочность на растяжение при изгибе, МПа		Прочность на сжатие, МПа		Индекс активности по прочности на сжатие, %		Плотность, кг/м ³	
		Хоа Фат	Тхаи Нгуен	Хоа Фат	Тхаи Нгуен	Хоа Фат	Тхаи Нгуен	Хоа Фат	Тхаи Нгуен
№-1	0 (Контрольный)	8,2		42,61		100		2202	
№-2	1/10	7,63	–	40,69	–	95,49	–	2193	–
№-3	2/10	7,46	–	39,19	–	91,97	–	2184	–
№-4	3/10	6,72	–	35,71	–	83,8	–	2175	–
№-5	1/10	–	7,21	–	37,46	–	87,92	–	2188
№-6	2/10	–	6,85	–	35,59	–	83,53	–	2174
№-7	3/10	–	6,34	–	32,94	–	77,31	–	2161

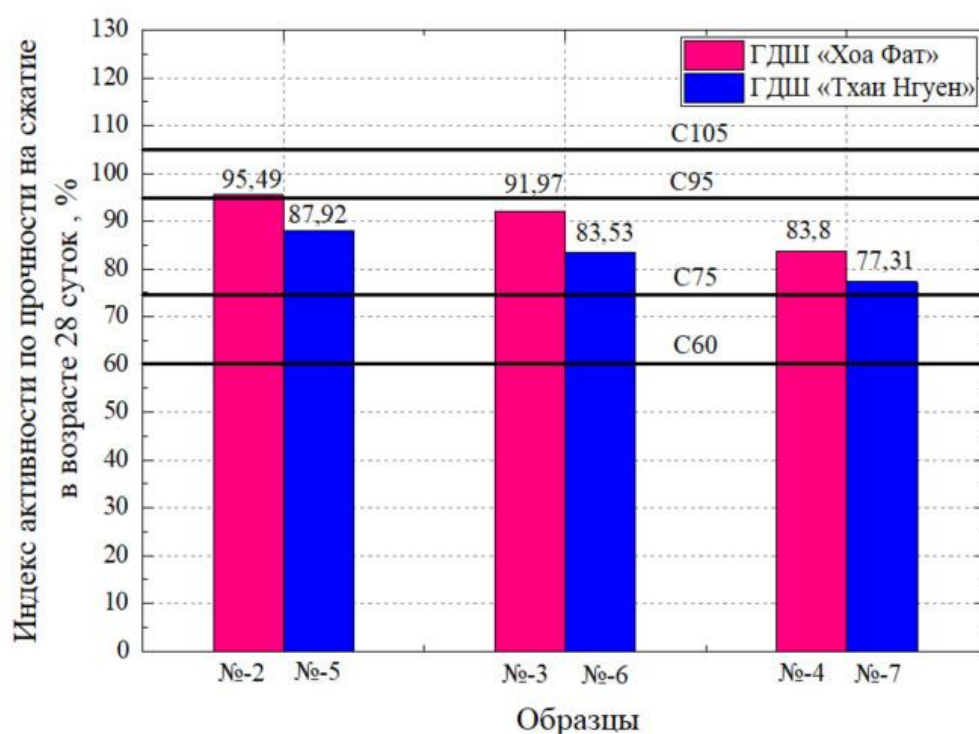
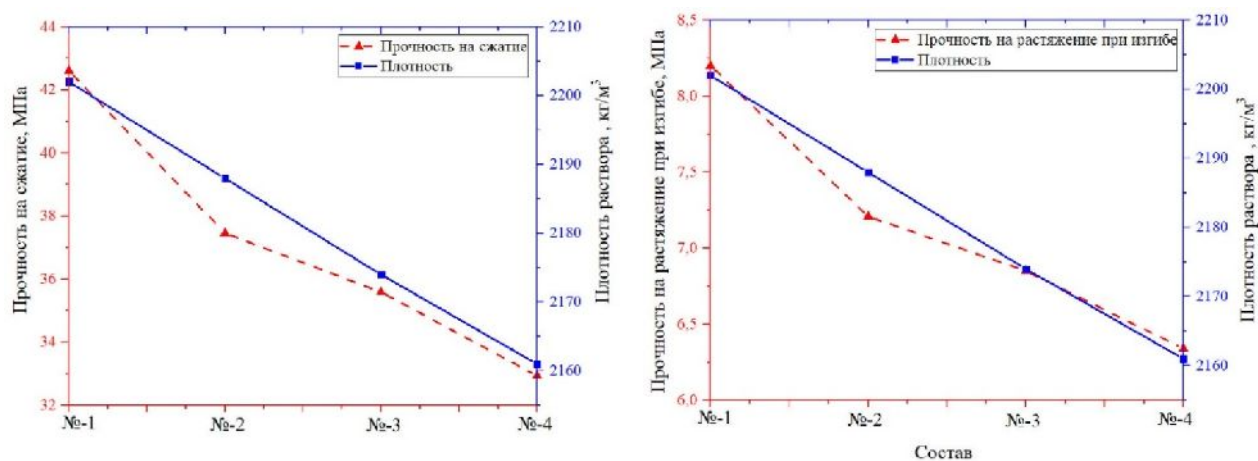
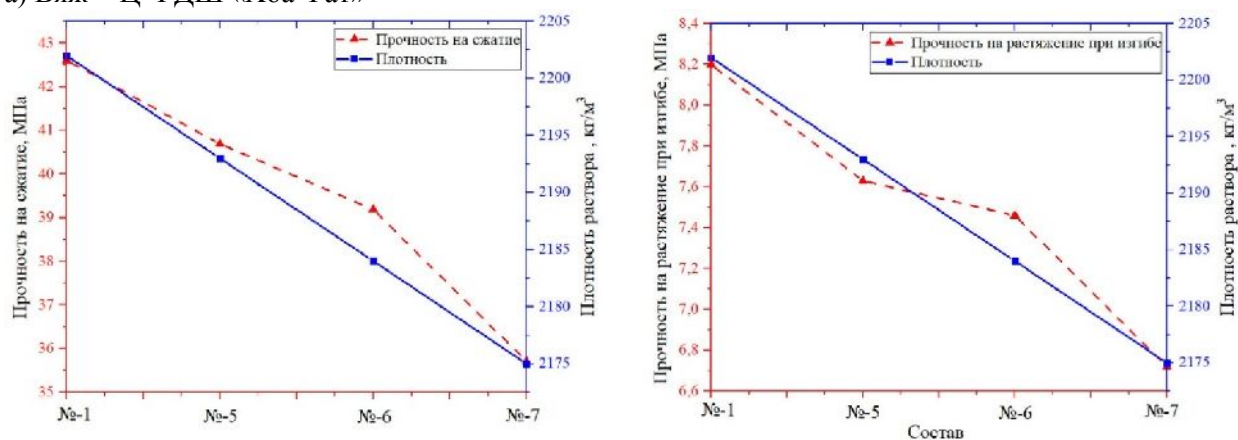


Рис. 4. Диаграмма сравнения Индекс активности ГДШ по прочности на сжатие



а) Вяж = Ц+ГДШ «Хоа Фат»



б) Вяж = Ц+ГДШ «Тхай Нгуен»

Рис. 5. Зависимость прочности цементно-песчаного раствора на комплексном вяжущем от плотности

Из рис. 4 и 5 видно, что:

1. При замене части цемента 1/10 ГДШ «Хоа Фат» можно получить вяжущее с I_R соответствующем С60, С75, С95, а на ГДШ «Тхай Нгуен» - С60, С75.

2. Если соотношение ГДШ увеличить $2/10 \div 3/10$ Вяж, можно получить ГДШ = $2/10$ и $3/10$ I_R соответствующем С60, С75 на шлаке обоих образцов.

3. Индекс активности по прочности на сжатие ГДШ «Хоа Фат» всегда выше ГДШ «Тхай Нгуен». Это можно объяснить тем, что в ГДШ «Хоа Фат» содержится больше аморфного кремнезёма, 36,12 %, который способен связать свободный гидроксид кальция (ОН) в меньше растворимые низкоосновные гидросиликаты кальция (CSH). Данный процесс повышает водонепроницающую способность бетонной смеси и ведет к уплотнению структуры тела бетона, что, в свою очередь, влияет на увеличение прочности на сжатие.

Выводы. Помимо вышеизложенного, можно сказать, что рассмотренные доменные шлаки могут применяться в производстве строительных материалов в качестве тонкомолотых активных минеральных добавок, заменяющих часть цемента (до 30 %), в технологии бетонов и строительных растворов.

Кроме того, ГДШ можно заменить ввозимые в страну активные минеральные добавки, используемые в настоящее время во Вьетнаме для получения строительных растворов и бетонов, что позволит снизить их стоимость и способствовать улучшению экологической ситуации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Nguyen Thanh Sang, Le Thi Trang. Designing cement concrete composition using high-strength blast furnace slag in bridge construction // Journal Bridges and Roads of Vietnam. №1+2. 2012. Pp. 62–65.
2. Pham Chi Cuong. Utilization of metallurgical industry wastes in Vietnam // Vietnam Science Journal. №6 (10). 2012. Pp. 52–54.
3. Government Office. Conclusions of the Prime Minister on the implementation of the production program for the disposal of unburned materials and the use of ash, slag and gypsum - waste of thermal power plants and chemical plants. Announcement № 218/TB-VPSP, Ha Noi, 17/06/2013, 3 p.

4. Баженова С.И., Алимов Л.А. Высококачественные бетоны с использованием отходов промышленности // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2010. №1. С. 226–230.

5. Lam Tang Van, Tho Vu Dinh, Dien Vu Kim, Boris Bulgakov, Olga Aleksandrova and Sophia Bazhenova. Combined Effects of Bottom Ash and Expanded Polystyrene on Light-weight Concrete Properties // MATEC Web of Conferences. 2018. 251. 01007. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201825101007>.

6. Yu Lei, Qiang Zhang, Chris Nielsen, Kebin He. An inventory of primary air pollutants and CO2 emissions from cement production in China, 1990–2020 // Atmospheric Environment. 2011. Vol. 45. Pp. 147–154. DOI:10.1016/j.atmosenv.2010.09.034.

7. Chau An. Dự báo sản lượng tiêu thụ xi măng năm 2019 “Прогноз потребления цемента в 2019 году” [Электронный ресурс]. <https://cafeland.vn/tin-tuc/nam-2019-san-luong-tieu-thu-xi-mang-se-dat-95-trieu-tan-77913.html>. (дата: 16.01.2019).

8. Танг Ван Лам, Нго Суан Хунг, Булгаков Б. И., Александрова О.В., Ларсен О.А., Орехова А.Ю., Тюрина А.А. Использование золошлаковых отходов в качестве дополнительного цементирующего материала // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №8. С. 19–27. DOI:10.12737/article_5b6d58455b5832.12667511.

9. Танг Ван Лам, Булгаков Б.И., Александрова О.В., Ларсен О.А. Возможность использования зольных остатков для производства материалов строительного назначения во Вьетнаме // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №6. С. 06–12. DOI:10.12737/article_5926a059214ca0.89600468.

10. Ngo Van Toan. Research on the production of high-strength concrete using fine sand and mineral additives mixed with activated blast-furnace slag and rice husk ash // Magazine Building Materials – Environment. 2012. №4. Pp. 36–45.

11. Isa Yuksel, Turhan Bilir, Omer Ozkan. Durability of concrete incorporating non-ground blast furnace slag and bottom ash as fine aggregate // Building and environment, 2007(42) 2651–2659. DOI:10.1016/j.buildenv.2006.07.003.

12. Nour T.A., Hamdy A.E., Amel A.E. Utilization of by-pass cement kiln dust and air-cooled blast-furnace steel slag in the production of some “green” cement products // HBRC Journal, 2018 (14), pp 408–414. DOI:10.1016/j.hbrj.2017.11.001.

Информация об авторах

Ву Ким Зиен, аспирант кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов. E-mail: kimdienxdbt@gmail.com. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Танг Ван Лам, аспирант кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов. E-mail: lamvantang@gmail.com. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Баженова Софья Ильдаровна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов. E-mail: sofia.bazhenova@gmail.com. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Нгуен Зуен Фонг, кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Факультет гражданского строительства». E-mail: nguyenduyenphong@gmail.com. Ханойский университет горного дела и геологии. Дык Тхань Уорд, Северо-Ты Лиём района, Ханой, Вьетнам.

Поступила в мае 2019 г.

© Ву Ким Зиен, Танг Ван Лам, Баженова С.И., Нгуен Зуен Фонг, 2019

¹*Vu Kim Dien, ¹Tang Van Lam, ^{1,*}Bazhenova S.I., ²Nguyen Duyen Phong*

¹*National Research Moscow State University of Civil Engineering
Russia, 129337, Moscow, st. Yaroslavskoe Shosse, 26*

²*Hanoi University of Mining and Geology
No 18, Pho Vien, Duc Thang Ward, Bac Tu Liem District-Hanoi
E-mail: sofia.bazhenova@gmail.com

POSSIBILITY OF USING BLAST FURNACE SLAG IN CONCRETE AND MORTAR PRODUCTION IN VIETNAM

Abstract. Blast furnace slag is a waste of metallurgical industry which can be used in production technology of concretes and mortars. The expedient use of blast furnace slag as a component for new building materials will improve the environmental situation and increase the economic efficiency of production. The authors reaserch blast furnace slag processing technology of factories "Hoa Phat" (Vietnam) and "Thai Nguyen" (Vietnam) to produce mineral additives. As a result of the conducted researches the chemical and mineralogical composition of slags are received, their physical and mechanical characteristics are considered and defined: specific surface area, density, water demand, and others.

According to standard of Vietnam and Russia, slag activity index is calculated when considering the possibility of using blast furnace slags to replace part of the binder. The relationship between the strength of the cement-sand mortar and density affected by the binder are reveald (where; binder = Portland cement + Granulated blast furnace slag). Comparison chart of slag activity index I_R (%) has been shown.

The paper uses the Vietnamese standard TCVN 11586: 2016 to analyze the possibility of using blast furnace slag (Vietnam) in the technology of concrete and mortar construction.

Keywords: granulated blast furnace slag, cement, industrial waste, complex binder, active mineral additive, slag activity index.

REFERENCES

1. Nguyen Thanh Sang, Le Thi Trang. Designing cement concrete composition using high-strength blast furnace slag in bridge construction. Journal Bridges and Roads of Vietnam. 2012. No. 1+2. Pp. 62–65.
2. Pham Chi Cuong. Utilization of metallurgical industry wastes in Vietnam. Vietnam Science Journal. 2012. No. 6(10). Pp. 52–54.
3. Government Office. Conclusions of the Prime Minister on the implementation of the production program for the disposal of unburned materials and the use of ash, slag and gypsum - waste of thermal power plants and chemical plants. Announcement No. 218/TB-VPCP, Ha Noi, 17/06/2013, 3 p.
4. Bazhenova S.I., Alimov L.A. High-quality concretes using industrial waste [Vysokokachestvennyye betony s ispol'zovaniyem otkhodov promyshlennosti]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2010. No. 1. Pp. 226–230. (rus)
5. Lam Tang Van, Tho Vu Dinh, Dien Vu Kim, Boris Bulgakov, Olga Aleksandrova and Sophia Bazhenova. Combined Effects of Bottom Ash and Expanded Polystyrene on Light-weight Concrete Properties. MATEC Web of Conferences. 2018. 251, 01007. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201825101007>.
6. Yu Lei, Qiang Zhang, Chris Nielsen, Kebin He. An inventory of primary air pollutants and CO₂ emissions from cement production in China, 1990–2020. Atmospheric Environment. 2011. Vol. 45. Pp. 147–154. DOI:10.1016/j.atmosenv.2010.09.034.

7. Chau An. Dự báo sản lượng tiêu thụ xi măng năm 2019 “Cement Consumption Forecast for 2019” [Electronic resource]. <https://cafeland.vn/tin-tuc/nam-2019-san-luong-tieu-thu-xi-mang-se-dat-95-trieu-tan-77913.html>. (date: 16.01.2019).

8. Tang V. L., Ngo X. H., Bulgakov B. I., Aleksandrova O.V., Larsen O.A., Orekhova A.Yu., Tyurina A.A. Use of ash and slag waste as a supplementary cementing material [Ispol'zovaniye zoloshlakovykh otkhodov v kachestve dopolnitel'nogo tsementiruyushchego materiala]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 8. Pp. 19–27. (rus). https://doi.org/10.12737/article_5b6d58455b5832.12667511.

9. Tang V.L., Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V., Larsen O.A. The possibility of using ash residues for the production of building materials in Vietnam [Vozmozhnost' ispol'zovaniya zol'nykh ostatkov dlya proizvodstva materialov stroitel'nogo naznacheniya vo V'yetname]. Bulletin of BSTU

named after V.G. Shukhov. 2017. No. 6. Pp. 06–12. (rus) https://doi.org/10.12737/article_5926a059214ca0.89600468

10. Ngo Van Toan. Research on the production of high-strength concrete using fine sand and mineral additives mixed with activated blast-furnace slag and rice husk ash. Magazine Building Materials – Environment. 2012. No. 4. Pp. 36–45.

11. Isa Yu'ksel, Turhan Bilir, O'mer O'zkan. Durability of concrete incorporating non-ground blast furnace slag and bottom ash as fine aggregate. Building and environment, 2007(42) 2651–2659. DOI:10.1016/j.buildenv.2006.07.003.

12. Nour T.A., Hamdy A.E., Amel A.E. Utilization of by-pass cement kiln dust and air-cooled blast-furnace steel slag in the production of some “green” cement products. HBRC Journal, 2018 (14), pp 408–414. DOI:10.1016/j.hbrj.2017.11.001.

Information about the authors

Vu Kim Dien, Postgraduate student. E-mail: kimdienxdb@gmail.com. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, st. Yaroslavskoe Shosse, 26.

Tang Van Lam, Postgraduate student. E-mail: lamvantang@gmail.com. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, st. Yaroslavskoe Shosse, 26.

Bazhenova, Sofya I. PhD, Associate Professor. E-mail: sofia.bazhenova@gmail.com. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, st. Yaroslavskoe Shosse, 26.

Nguyen Duyen Phong, PhD. E-mail: nguyenduyenphong@gmail.com. Hanoi University of Mining and Geology. No. 18, Pho Vien, Duc Thang Ward, Bac Tu Liem District-Hanoi.

Received in May 2019

Для цитирования:

Ву Ким Зиен, Танг Ван Лам, Баженова С.И., Нгуен Зуен Фонг. Возможность использования доменных шлаков в производстве бетонов и растворов во Вьетнаме // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 11. С. 17–24. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-17-24

For citation:

Vu Kim Dien, Tang Van Lam, Bazhenova S.I., Nguyen Duyen Phong. Possibility of using blast furnace slag in concrete and mortar production in Vietnam. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 11. Pp. 17–24. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-17-24

DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-25-34

Володченко А.А.*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46**Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН**Россия, 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21**E-mail: alex-0904@mail.ru*

СТЕНОВЫЕ СИЛИКАТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ КРЕМНЕЗЕМИСТОГО СЫРЬЯ И АЛЮМОСИЛИКАТНОГО ВЯЖУЩЕГО НА ОСНОВЕ НЕТРАДИЦИОННЫХ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД

Аннотация. Среди используемых строительных материалов конструкционные автоклавные силикатные изделия занимают одно из лидирующих мест. В традиционной технологии силикатных материалов используется автоклавная обработка изделий, главный недостаток которой - высокая энергоемкость. С целью создания неавтоклавных силикатных композитов на традиционном кремнеземистом сырье предлагается использование специального алюмосиликатного вяжущего на основе глинистых пород незавершенной стадии минералообразования определенного генезиса, и негашеной извести. Рост прочности силикатных материалов в данном случае происходит в результате процесса образования новообразований, синтезирующихся в ходе химической реакции негашеной кальцевой извести с компонентами глинистых пород, не только при использовании режимов повышенных давлений и температур в автоклаве, но и при режимах пропарки с температурами до 100 °С. Высокая удельная поверхность алюмосиликатного вяжущего обеспечивает увеличение плотности упаковки материала. За счет особенностей структурообразования системы $\text{CaO-SiO}_2(\text{Al}_2\text{O}_3)\text{-H}_2\text{O}$ на основе нетрадиционных глинистых пород процесс формирования микроструктуры материала, который продолжается и после гидротермальной обработки изделий придает материалу гидравлические свойства. Предлагаемые вяжущие и технологии их производства можно реализовать в условиях малого и среднего бизнеса, что позволит получать конкурентоспособные неавтоклавные силикатные материалы с пределом прочности при сжатии до 25 МПа и средней плотностью 1850 кг/м³.

Ключевые слова: неавтоклавные материалы, силикатный кирпич, техногенное сырье, техногенный метасоматоз, нетрадиционные глинистые породы.

Введение. Среди используемых строительных материалов конструкционные автоклавные силикатные изделия занимают одно из лидирующих мест. В классической технологии производства подобных стеновых материалов [1–3] используется определенный вяжущий компонент, который получают совместным помолом негашеной кальцевой извести совместно с кремнеземистым компонентом, как правило, это кварцевый песок. Процесс синтеза гидросиликатов кальция на основе подобного сырья [4–5] происходит при высоких температурах и давлениях, что предопределяет высокую энергоемкость производства, также стоит отметить невысокую прочность кирпича-сырца.

Одними из актуальных задач, в строительном материаловедении, является проектирование и разработка композитов нового поколения [6–9] способных улучшить качество жизни человека, поиск путей снижения энергоемкости производства композитов, используемых в строительстве. Решение подобных задач возможно при использовании нетрадиционных и техногенных видов сырьевых ресурсов [10–14]. Теоретической базой решения данных актуальных задач является

трансдисциплинарное научное направление геоника (геомиметика) [15, 16].

В осуществленных ранее экспериментальных исследовательских работах [17, 19] было установлено, что нетрадиционные для строительной промышленности глинистые породы, имеющие определенный вещественный состав, возможно использовать в качестве сырья в технологии неавтоклавных силикатных материалов. Использование таких пород в технологии конструкционных силикатных материалов позволяет существенно увеличить не только прочность кирпича-сырца, и как следствие эксплуатационные показатели изделий, но и синтезировать новообразования в системе $\text{CaO-SiO}_2(\text{Al}_2\text{O}_3)\text{-H}_2\text{O}$ в неавтоклавных условиях.

Исходя из вышеизложенного, представляется интересным вопрос о получении неавтоклавных силикатных композитов на традиционном кремнеземистом сырье с применением специального алюмосиликатного вяжущего на основе глинистых пород незавершенной стадии минералообразования определенного генезиса, и негашеной извести. Рост прочности силикатных материалов в данном случае происходит в ре-

зультате синтеза новообразований, образующихся в результате реакции гидроксида кальция с порообразующими минералами глинистых пород.

Цель работы – получение стеновых силикатных материалов неавтоклавного твердения с применением кремнеземистого сырья и алюмосиликатного вяжущего на основе нетрадиционных глинистых пород и исследование влияния условий эксплуатации на их свойства.

Материалы и методы исследования. В качестве сырьевых материалов для исследований использовали наиболее представительные нетрадиционные глинистые породы региона Курской магнитной аномалии, по своему составу относящиеся к золово-элювиально-делювиальным глинистым породам четвертичного возраста. В качестве кремнеземистого компонента, для получения неавтоклавных силикатных материалов использовался кварцевый песок Нижнеольшанского месторождения Белгородской области. Алюмосиликатное вяжущее получали совместным помолом исследуемых глинистых пород незавершенной стадии минералообразования и негашеной кальциевой извести, соответствующей ГОСТ 9179–2018.

При изготовлении образцов использовали смесь, включающую в себя предварительно приготовленное алюмосиликатное вяжущее с удельной поверхностью 1000 м²/кг и кварцевый песок Нижнеольшанского месторождения Белгородской области.

Образцы-цилиндры формовали на гидравлическом прессе при давлении прессования – 20 МПа. После формования образцы-цилиндры помещались в камеру тепловлажностной обработки с последующим выдерживанием в ней в течение 9 ч при температуре водяного пара 95 °С.

Исходя из требований необходимой нормативной документации в ходе исследований были определены физические, а также механические свойства полученных образцов.

Для определения вещественного состава применяемых нетрадиционных глинистых пород, состава образующихся новообразований получаемых композитов использовали методы рентгенофазового, дифференциально-термического анализов. Морфологические особенности исходных сырьевых материалов и синтезируемых новообразований определяли при использовании методов растрово-электронной микроскопии (РЭМ).

Результаты исследования и их обсуждение. Получение стеновых силикатных материалов неавтоклавного твердения с применением традиционного кремнеземистого сырья, возможно за счет использования алюмосиликатного вяжущего, на

основе нетрадиционных глинистых пород, которые позволяют синтезировать прочный каркас новообразований, представленный соединениями системы $\text{CaO-SiO}_2(\text{Al}_2\text{O}_3)\text{-H}_2\text{O}$ и гидрогранатами, не только при использовании режимов повышенных давлений и температур в автоклаве, но и при режимах пропарки с температурами до 100 °С [18, 20]. Таким образом, достижение необходимого уровня структурообразования предопределяет возможность получения неавтоклавных силикатных материалов на основе кремнеземистого сырья с определенным набором свойств.

Для исследований использовали три наиболее представительные глинистые породы, отличающиеся по составу и относящиеся к золово-элювиальные-делювиальные смешанослойным образованиям четвертичного возраста, отобранные в регионе Курской магнитной аномалии. Определение фракционного состава глинистой породы производили методом ситового анализа. Установлено, что в используемых глинистых породах № 2 и № 3 преобладают частицы относящиеся к пелитовой фракции (51,1 %), для глинистой породы № 1 этот показатель составляет – 22,6 %. Исходя из данных гранулометрического анализа и установленному числу пластичности, используемых в исследованиях глинистых пород региона КМА, глинистая порода № 1 – относится к супеси (число пластичности 6), а глинистые породы № 2, 3 (число пластичности 7 и 11) – к суглинкам.

По результатам рентгенофазового, дифференциально-термического методов анализа установлен минеральный состав (рис. 1). Так, применяемые глинистые породы имеют в своем составе смешанослойные образования вида гидрослюда-монтмориллонит (рефлексы на рентгенограмме 8 – 18 Å), также присутствует гидрослюда (10,0; 5,0; 3,32 Å), в небольших количествах каолинит (7,138–7,2 Å) и монтмориллонит (14,25–17,96 Å), тонкодисперсный слабоокатанный кварц, имеющий корродированную в различной степени поверхность. Используемые для исследования глинистые алюмосиликатные горные породы имеют весьма переменный химический состав, а также характеризуются несовершенством их кристаллической решетки. Исходя из наличия фона на анализируемых рентгенограммах можно предположить о наличии рентгеноаморфной фазы. Таким образом, исходя из генезиса используемых глинистых пород, представляющих очень сложную систему с весьма различным набором свойств, и характеризующуюся незавершенностью

процессов глинообразования, наличием тонкодисперсной пелитовой фракции, предопределяется возможность активного химического взаимодействия компонентов подобных глинистых пород с кальциевой известью с образованием новообразований в системе $\text{CaO-SiO}_2(\text{Al}_2\text{O}_3)\text{-H}_2\text{O}$ в неавтоклавных условиях, способную с течением времени перекристаллизовываться, что приводит к повышению эксплуатационных характеристик материала.

Задачей проведенных исследований явилось проектирование составов сырьевых смесей с применением алюмосиликатного вяжущего на основе нетрадиционных глинистых пород и кремнеземистого сырья с целью оптимизации структуры композита на всех размерных уровнях, и как следствие, достижения необходимых физико-механических свойств неавтоклавных силикатных материалов.

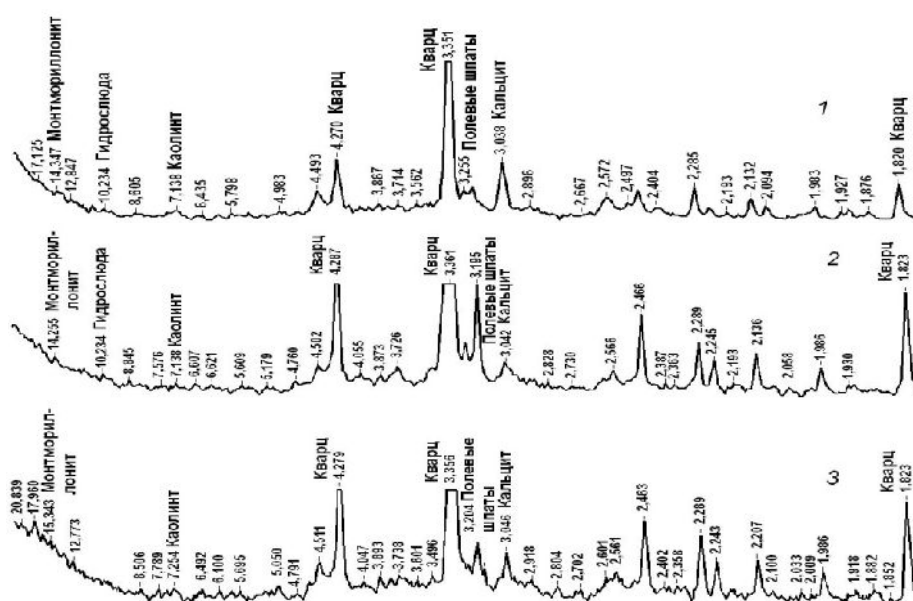


Рис. 1. Рентгенограммы используемых глинистых пород региона КМА:
1 – глинистая порода № 1; 2 – глинистая порода № 2; 3 – глинистая порода № 3

В предыдущих экспериментальных исследованиях в качестве вяжущего компонента использовали молотую негашеная кальциевую известь, а также, в зависимости от состава, известково-глинистое вяжущее. Исходную глинистую породу использовали как заполнитель. Установлено, что рациональное содержание негашеной кальциевой извести для смесей на основе нетрадиционных глинистых пород [18–20] находится в пределах 10–12 мас. %. Исходя из этого, для

проведения исследований было приготовлено алюмосиликатное вяжущее (табл. 1), путем совместного помола в вибромельнице используемых глинистых пород и негашеной кальциевой извести. Процентное содержание CaO в алюмосиликатном вяжущем составило 12 и 20 мас. %. Помол вяжущего осуществлялся до удельной поверхности $1000 \text{ м}^2/\text{кг}$, что обеспечивает увеличение плотности упаковки материала.

Таблица 1

Состав полученного алюмосиликатного вяжущего на основе используемого сырья

№	Негашеная известь, мас. %	Глинистая порода, мас. %	Удельная поверхность вяжущего, $\text{м}^2/\text{кг}$
1	12	85	1000
2	20	80	1000

Сырьевую смесь для изготовления образцов получали путем смешивания полученного алюмосиликатного вяжущего и кремнеземистого компонента, затем в смесь добавляли требуемое количество воды. Далее увлажненную сырьевую смесь помещали в герметичную емкость (с целью гашения CaO) с последующим выдерживанием.

Алюмосиликатное вяжущее вводилось в сырьевую смесь в количество 20 – 50 мас. %. Сырьевая влажность смеси варьировалась в зависимости от состава и составляла 8–12 %. После формования образцы-цилиндры подвергали гидротермальной обработке. Составы сырьевых смесей, использованные для проведения экспериментов, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Составы сырьевых смесей, использованные для проведения экспериментов

Компоненты	№ состава			
	1	2	3	4
Кремнеземистый компонент, мас. %	50	60	70	80
Вязущее, мас. %	50	40	30	20

После тепловлажностной обработки образцы-цилиндры выдерживали 3-е суток в есте-

ственных условиях, с последующим определением свойств образцов. Результаты испытаний представлены на рисунке 2 и в таблице 3.

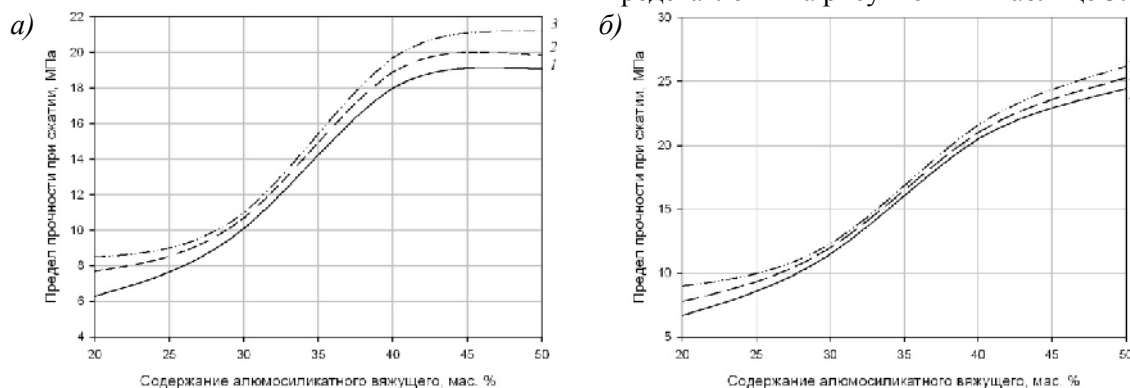


Рис. 2. Влияние содержания алюмосиликатного вязущего (а – содержание СаО в алюмосиликатном вязущем, 12 мас. %; б – содержание СаО в алюмосиликатном вязущем, 20 мас. %) на показатель предела прочности образцов на основе глинистых пород (1 – глинистая порода № 1; 2 – глинистая порода № 2; 3 – глинистая порода № 3)

Таблица 3

Эксплуатационные свойства неавтоклавных силикатных материалов на основе алюмосиликатного вязущего и кремнеземистого компонента

Физико-механические характеристики	№ состава			
	1	2	3	4
<i>Содержание СаО в алюмосиликатном вязущем, 12 мас. %</i>				
Глинистая порода № 1				
Предел прочности при сжатии, МПа	19	18,1	10,2	6,3
Предел прочности при сжатии, МПа (6 месяцев в условиях повышенной влажности)	25,3	21	14	7
Средняя плотность, кг/м ³	1850	1875	1855	1850
Глинистая порода № 2				
Предел прочности при сжатии, МПа	19,6	18,8	10,5	7,6
Предел прочности при сжатии, МПа (6 месяцев в условиях повышенной влажности)	26	21,5	13,5	8,9
Средняя плотность, кг/м ³	1850	1875	1860	1860
Глинистая порода № 3				
Предел прочности при сжатии, МПа	20,2	19,7	11	8,5
Предел прочности при сжатии, МПа (6 месяцев в условиях повышенной влажности)	27	21,5	14	10
Средняя плотность, кг/м ³	1865	1880	1850	1850
<i>Содержание СаО в алюмосиликатном вязущем, 20 мас. %</i>				
Глинистая порода № 1				
Предел прочности при сжатии, МПа	24,4	20,4	11,6	6,8
Предел прочности при сжатии, МПа (6 месяцев в условиях повышенной влажности)	31,5	30	15	7,5
Средняя плотность, кг/м ³	1920	1922	1930	1925
Глинистая порода № 2				
Предел прочности при сжатии, МПа	25,1	21,2	12,3	7,9
Предел прочности при сжатии, МПа (6 месяцев в условиях повышенной влажности)	30	29,5	14,7	9,1
Средняя плотность, кг/м ³	1925	1920	1920	1930
Глинистая порода № 3				
Предел прочности при сжатии, МПа	26,3	21,7	12,4	9,9
Предел прочности при сжатии, МПа (6 месяцев в условиях повышенной влажности)	31	29	14,5	11
Средняя плотность, кг/м ³	1935	1925	1920	1930

Увеличение в сырьевой смеси доли алюмосиликатного вяжущего (рис. 1, *a*) повышает показатель предела прочности на сжатие образцов (алюмосиликатное вяжущее на основе глинистой породы №1 и содержанием CaO – 12 мас. %) с 6,3 до 19 МПа (см. таблица 3). В образцах, где использовалось алюмосиликатное вяжущее, полученное на основе глинистой породы № 2 (CaO 12 мас. %), предел прочности при сжатии повышается 7,6 до 19,6 МПа, а при использовании вяжущего (CaO 12 мас. %) на основе глинистой породы № 3 – с 8,5 до 20,2 МПа.

Увеличение содержания доли CaO в алюмосиликатном вяжущем с 12 до 20 мас. % приводит к повышению показателя предела прочности при сжатии (таблица 3 и рис. 1, *б*). Это увеличение составляет до 20 %.

Показатель средней плотности образцов в основном зависит от процентного содержания негашеной кальциевой извести в алюмосиликатном вяжущем. Установлено, что при увеличении процентного содержания CaO в алюмосиликатном вяжущем значение показателя средней плотности варьируется от 1850 до 1920 кг/м³. Показатель коэффициента размягчения находится в пределах 0,5–0,6. При использовании такого вида сырьевой смеси, показатель коэффициента размягчения ниже по отношению к образцам, в которых в качестве заполнителя использовали исходную нетрадиционную для стройиндустрии глинистую породу [18]. Исходя из этого, предлагаемый материал может использоваться при возведении несущих стен, перегородок внутри зданий и сооружений.

В ранее проведенных исследованиях [21] изучено изменение свойств неавтоклавных силикатных материалов, с использованием нетрадиционных глинистых пород, в условиях повышенной влажности. Установлено, что пелитовая составляющая используемых глинистых пород обеспечивает синтез новообразований, которые обладают гидравлическими свойствами. Исходя из этого, представляется интересным влияния условий повышенной влажности на свойства неавтоклавных силикатных материалов на основе кремнеземистого сырья и алюмосиликатного вяжущего.

Установлено, что после выдерживания образцов в течение 6 месяцев в условиях повышенной влажности показатель предела прочности при сжатии всех составов увеличивается на 20–25 % (см. таблица 3). Увеличение доли негашеной кальциевой извести, в алюмосиликатном вяжущем, с 12 до 20 мас. % не значительно влияет на проявление гидравлических свойств синтезируемых новообразований в системе CaO-SiO₂(Al₂O₃)-H₂O.

Таким образом, в полученных образцах синтезируются новообразования, которые в процессе эксплуатации композита, и особенно в условиях повышенной влажности, способны к перекристаллизации. Описанный процесс способствует модификации структуры формируемых цементирующих соединений, синтезирующихся в алюмосиликатном вяжущем в неавтоклавных условиях, что улучшает свойства композитов на основе кремнеземистого сырья.

Микроструктура полученных образцов на основе используемых глинистых пород при небольших увеличениях представляет собой плотный композит, в котором располагаются сцементированные зерна кварцевого песка (рис. 3). Сформированные новообразования, представляют собой низкоосновные слабокристаллизованные гидросиликаты кальция, которые образуют пространственную сетку, и заполняют поровое пространство между зернами кварца, и формируют кристаллизационную структуру.

Прочность синтезируемой структуры получаемого композита существенно зависит от контактной зоны частиц кварцевого песка с вяжущим компонентом. Так на микрофотографиях наблюдаются крупные зерна кварца, которые покрыты плотной матрицей сформированных новообразований, формирующих кристаллизационную структуру на его поверхности (рис. 4), что определяет необходимые прочностные показатели изделий, за счет адгезии между вяжущим компонентом и заполнителем.

В микроструктуре исходного образца наблюдаются участки со сферическими новообразованиями (рис. 3, *a*) диаметром около 0,5 мкм, которые расположены как на поверхности кварцевых зерен, так и в структуре вяжущего компонента, и скреплены между собой пространственной сеткой новообразований, представленной системой CaO-SiO₂(Al₂O₃)-H₂O, которая частично переходит в гелеобразную форму.

После выдерживания образцов в течение 6 месяцев в условиях повышенной влажности наблюдается изменение морфологии сформировавшихся новообразований (рис. 5) в сравнении с исходными образцами (рис. 3). Так, сферических новообразований в микроструктуре материала не наблюдаются. Однако можно отметить увеличение объема и уплотнения пространственной сетки из новообразований, которая также принимает более хорошо окристаллизованный вид, что также способствует более лучшему скреплению частиц заполнителя, и как следствие повышению эксплуатационных характеристик материала.

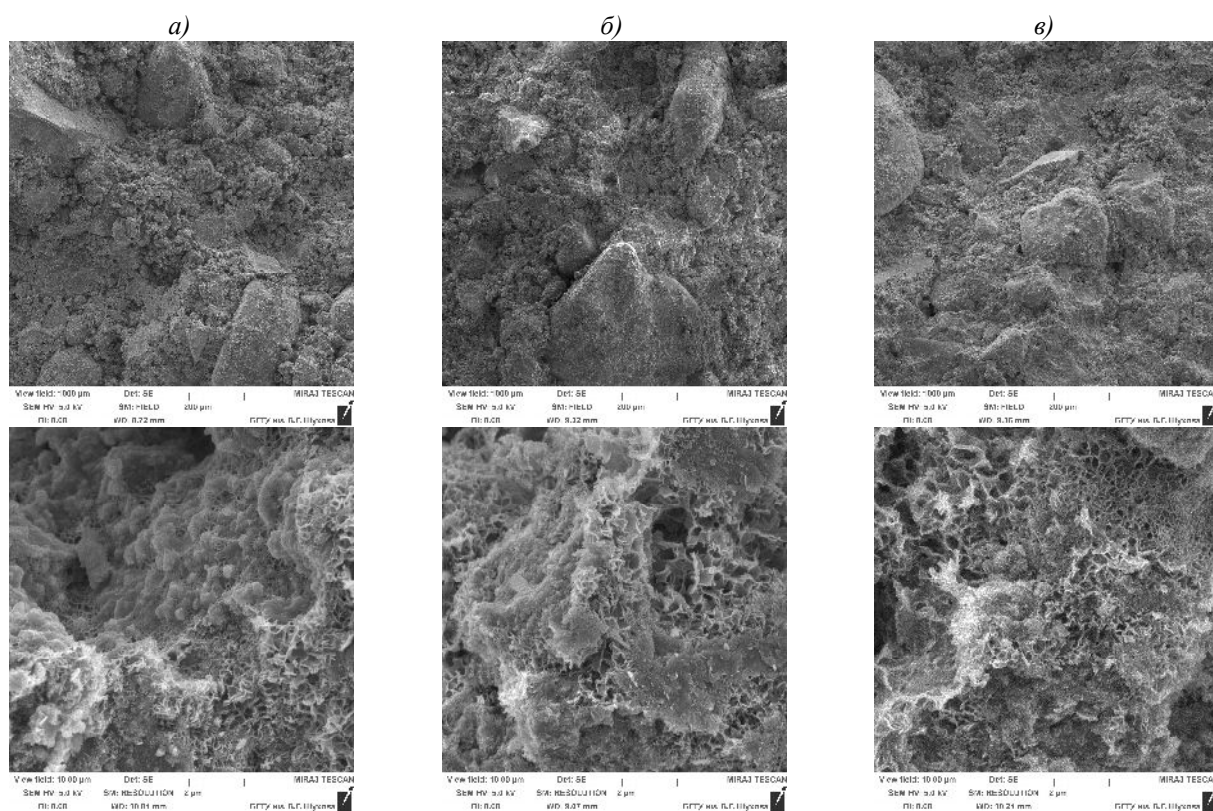


Рис. 3. Микроструктура неавтоклавных силикатных материалов на основе алюмосиликатного вяжущего (CaO – 12 мас. %) и кремнеземистого сырья:

а – на основе глинистой породы № 1; *б* – на основе глинистой породы № 2; *в* – на основе глинистой породы № 3

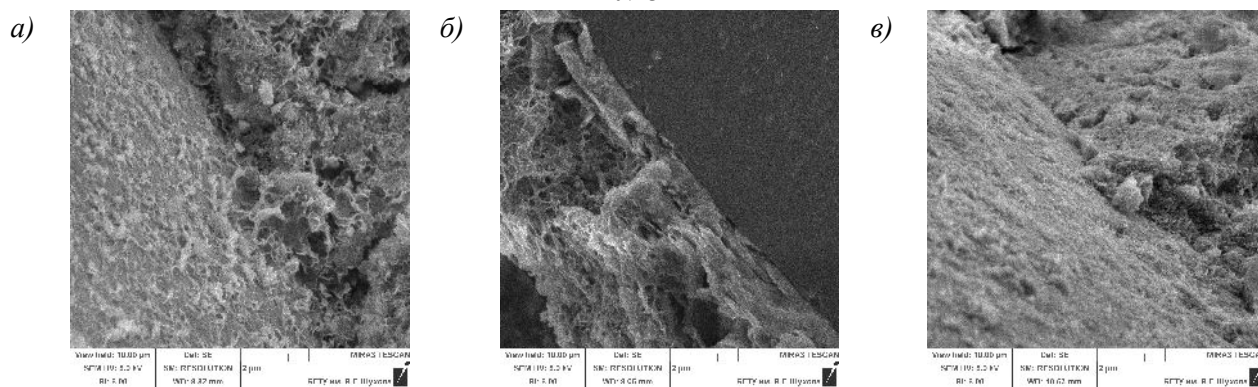


Рис. 4. Контактная зона частиц кварцевого песка с алюмосиликатным вяжущим (CaO – 12 мас. %):

а – на основе глинистой породы № 1; *б* – на основе глинистой породы № 2; *в* – на основе глинистой породы № 3

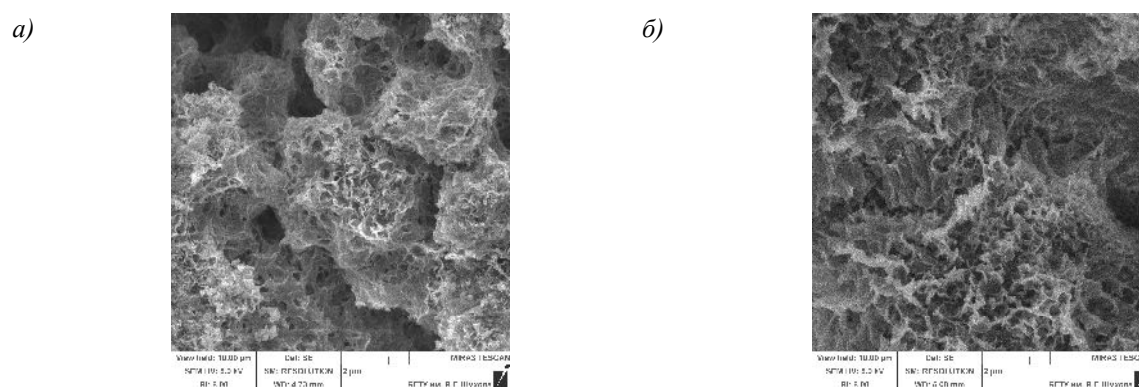


Рис. 5. Кристаллические новообразования в микроструктуре образца на основе алюмосиликатного вяжущего (CaO – 12 мас. %):

а – глинистая порода № 1; *б* – глинистая порода № 2

Таким образом, синтезирующиеся первоначальные сферические новообразования, распределенные по всей структуре материала, выступают в виде подложки, на которой в последующем формируются микрокристаллические новообразования, способные к перекристаллизации, что предопределяет оптимизацию структуры композита.

Заключение. Таким образом, с целью создания неавтоклавных силикатных композитов на традиционном кремнеземистом сырье предлагается использование специального алюмосиликатного вяжущего на основе глинистых пород незавершенной стадии минералообразования определенного генезиса и негашеной извести. Рост прочности силикатных материалов в данном случае происходит в результате процесса образования новообразований, синтезирующихся в ходе химической реакции негашеной кальциевой извести с компонентами глинистых пород. Высокая удельная поверхность вяжущего обеспечивает увеличение плотности упаковки материала. За счет особенностей структурообразования системы $\text{CaO-SiO}_2(\text{Al}_2\text{O}_3)\text{-H}_2\text{O}$ на основе нетрадиционных глинистых пород процесс формирования микроструктуры материала, который продолжается и после гидротермальной обработки изделий, придает материалу гидравлические свойства.

Предлагаемые вяжущие и технологии их производств можно реализовать в условиях малого и среднего бизнеса, что позволит получать конкурентоспособные неавтоклавные силикатные материалы с пределом прочности при сжатии до 25 МПа и средней плотностью 1850 кг/м³. Установлено, что необходимые эксплуатационные показатели получаемых изделий достигаются при расходах алюмосиликатного вяжущего более 30 % от всей массы сырьевой смеси. Исходя из значения коэффициента размягчения, рациональной областью применения разработанных композитов будет использование в качестве стенового материала при возведении внутренних несущих стен и перегородок зданий и сооружений.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счет средств Государственной программы Российской Федерации «Развитие науки и технологий» на 2013-2020 годы, Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, в рамках Плана фундаментальных научных исследований Минстроя России и РААСН, тема 7.5.1.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Brozovsky J. Rebound hammer tests of calcium silicate bricks – effects of internal compressive stress on measurement results // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 595. Pp. 155–158. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.595.155.
2. Starostina Y.L., Plotnikova O.A. Efficient autoclaved silicate concretes with the use of steelmaking slag // *Solid state phenomena*. 2018. Vol. 284. Pp. 956–962. doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.956.
3. Nourredine A., Juberthie R. Calcium silicate materials: substitution of hydrated lime by ground granulated blast furnace slag in autoclaving conditions // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2012. Vol. 24(9). Pp. 1230–1236. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000480.
4. Danielle Klimesch, Abhi Ray. Evaluation of phases in a hydrothermally treated $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ system // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2002. Vol. 70(3). Pp. 995–1003. doi: 10.1023/A:1022289111046.
5. Bernstein S., Thomas Karl Fehr. The formation of 1.13 nm tobermorite under hydrothermal conditions: 1. The influence of quartz grain size within the system $\text{CaO-SiO}_2\text{-D}_2\text{O}$ // *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*. 2012. Vol. 58 (2–3). Pp. 84–91. doi: 10.106/j.pcrysgrow.2012.02.006.
6. Pukharensko Yu.V., Letenko D.G., Nikitin V.A., Morozov V.I. Obtaining the nanomodifier for cement composites based on the «dealtom» carbon nanotubes // *Materials Physics and Mechanics*. 2017. Vol. 31. Pp. 59–62.
7. Строкова В.В., Сумин А.В., Нелюбова В.В., Шаповалов Н.А. Модифицированное вяжущее с использованием наноструктурированного минерального компонента // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2015. № 3. С. 36–39.
8. Лесовик В.С. Строительные материалы. Настоящее и будущее // *Вестник МГСУ*. 2017. Т. 12. Вып. 1(100). С. 9–16. doi: 10.22227/1997-0935.2017.1.9-16.
9. Лесовик В.С., Попов Д.Ю., Глаголев Е.С. Текстиль-бетон – эффективный армированный композит будущего // *Строительные материалы*. 2017. № 3. С. 81–84. doi: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-746-3-81-84.
10. Alfimova N.I., Shadskiy E.E., Lesovik R.V., Ageeva M.S. Organic-mineral modifier on the basis of volcanogenic-sedimentary rocks // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015. Vol. 10(24). Pp. 45131–45136.
11. Фролова М.А., Морозова М.В., Айзенштадт А.М., Тутыгин А.С. Алюмосиликатное вя-

жущее на основе сапонит содержащих отходов алмазодобывающей промышленности // Строительные материалы. 2017. № 7. С. 68–70.

12. Гончарова М.А., Ивашкин А.Н., Симбаев В.В. Разработка оптимальных составов силикатных бетонов с использованием местных сырьевых ресурсов // Строительные материалы. 2016. № 9. С. 6–8.

13. Алфимова Н.И., Лесовик В.С., Глаголев Е.С., Вишневская Я.Ю. Оптимизация условий твердения композиционных вяжущих с учетом генезиса кремнеземсодержащего компонента. Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. 91 с.

14. Murtazaev S-A.Y., Zaurbekov Sh.Sh. A.Kh., Saydumov M.S., Murtazaeva T.S-A., Khadzhiyev M.R. Impact of technogenic raw materials on the properties of high-quality concrete composites // Advances in Engineering Research. 2018. Vol. 177. Pp.275-279. doi: 10.2991/isees-18.2018.53.

15. Лесовик В.С. Геоника (геомиметика). Примеры реализации в строительном материаловедении: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. 287 с.

16. Fediuk R.S., Yevdokimova Yu.G., Smoliakov A.K., Stoyushko N.Yu., Lesovik V.S. Use of geonics scientific positions for designing of building composites for protective (fortification) structures // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 221. 012011. doi: 10.1088/1757-899X/221/1/012011.

17. Володченко А.Н., Строкова В.В. Разработка научных основ производства силикатных автоклавных материалов с использованием глинистого сырья // Строительные материалы. 2018. № 9. С. 25–31. doi: https://doi.org/10.31659/0585_430X-2018-763-9-25-31.

18. Володченко А.А., Загороднюк Л.Х., Прасолова Е.О., Чхин Сован. Нетрадиционное глинистое сырье как компонент неорганических дисперсных систем // Вестник МГСУ. 2014. № 9. С. 67–75.

19. Lesovik V.S., Volodchenko A.A., Glagolev E.S., Chernysheva N.V., Lashina I.V., Feduk R.S. Theoretical backgrounds of non-tempered materials production based on new raw materials // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327. 042064. doi:10.1088/1757-899X/327/4/042064.

20. Володченко А.А., Лесовик В.С. К вопросу влияния комплексного вяжущего на свойства неавтоклавных силикатных композитов с использованием нетрадиционного сырья // Современные наукоемкие технологии. 2018. №12 (2) С. 173–178. doi: 10.17513/snt.37298.

21. Володченко А.А. Влияние условий эксплуатации на свойства неавтоклавных силикатных материалов на основе нетрадиционного сырья // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №12. С. 12–20. doi: 10.12737/article_5c1c994ccee958.42995245.

Информация об авторах

Володченко Александр Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: alex-0904@mail.ru Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46. Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН. Россия, 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21

Поступила в сентябре 2019 г.

© Володченко А.А., 2019

Volodchenko A.A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46

Research Institute of Building Physics RAASN

Russia, 127238, Moscow, Lokomotivnyy proyezd, 21

**E-mail: alex-0904@mail.ru*

WALL SILICATE MATERIALS OF NON-AUTOCLAVE HARDENING WITH THE USE OF SILICA RAW MATERIALS AND ALUMINOSILICATE BINDING BASED ON NON-CONVENTIONAL CLAY ROCKS

Abstract. Among the used building materials, structural autoclave silicate products occupy one of the leading places. The traditional technology of silicate materials uses autoclave processing of products, the main disadvantage of which is the high energy intensity. In order to create non-autoclave silicate composites based on conventional siliceous raw materials, it is proposed to use a special aluminosilicate binder based on clay rocks of the incomplete stage of mineral formation of a certain genesis and quicklime. The strength of

silicate materials is growing as a result of the neoplasm process. They are synthesized in the chemical reaction of quicklime with components of clay rocks when using high pressure and temperature modes in an autoclave, and when steaming with temperatures up to 100 °C. The high specific surface of the aluminosilicate binder provides an increase in the packing density of the material. Due to the structural features of the CaO-SiO₂ (Al₂O₃)-H₂O system based on unconventional clay rocks, the process of formation of the microstructure of the material, which continues and after hydrothermal treatment of the products, gives the material hydraulic properties. The proposed binders and their production technologies can be implemented in small and medium-sized businesses, which will allow to obtain competitive non-autoclave silicate materials with a compressive strength of up to 25 MPa and an average density of 1850 kg/m³.

Keywords: non-autoclave materials, silicate brick, technogenic raw materials, technogenic metasomatism, unconventional clay rocks.

REFERENCES

1. Brozovsky J. Rebound hammer tests of calcium silicate bricks – effects of internal compressive stress on measurement results. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 595. Pp. 155–158. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.595.155.
2. Starostina Y.L., Plotnikova O.A. Efficient autoclaved silicate concretes with the use of steelmaking slag. *solid state phenomena*. 2018. Vol. 284, Pp. 956–962. doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.956.
3. Nourredine A., Juberthie R. Calcium silicate materials: substitution of hydrated lime by ground granulated blast furnace slag in autoclaving Conditions. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2012. Vol. 24(9). Pp. 1230–1236. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000480.
4. Danielle Klimesch, Abhi Ray. Evaluation of phases in a hydrothermally treated CaO-SiO₂-H₂O system. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2002. Vol. 70(3). Pp. 995–1003. doi: 10.1023/A:1022289111046.
5. Bernstein S., Thomas Karl Fehr. The formation of 1.13 nm tobermorite under hydrothermal conditions: 1. The influence of quartz grain size within the system CaO-SiO₂-D₂O. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*. 2012. Vol. 58 (2–3). Pp. 84–91. doi: 10.106/j.pcrysgrow.2012.02.006.
6. Pukharensko Yu.V., Letenko D.G., Nikitin V.A., Morozov V.I. Obtaining the nanomodifier for cement composites based on the «dealtom» carbon nanotubes. *Materials Physics and Mechanics*. 2017. Vol. 31. Pp. 59–62.
7. Strokova V.V., Sumin A.V., Nelubova V.V., Shapovalov N.A. Modified binder with application of nanostructured mineral components [Modificirovannoe vjazhushchee s ispol'zovaniem nanostrukturirovannogo mineral'nogo komponenta]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2015. No. 3. Pp. 36–39. (rus)
8. Lesovik V.S. *Construction Materials. The Present and the Future [Stroitel'nye materialy. nastoyashchee i budushchee]*. Vestnik MGSU. 2017. Vol. 12. Issue 1(100). Pp. 9–16. doi: 10.22227/1997-0935.2017.1.9-16. (rus)
9. Lesovik V.S., Popov D.Ju., Glagolev E.S. Textile-concrete efficient reinforced composite of the future [Tekstil'-beton – jeffektivnyj armirovannyj kompozit budushhego]. *Construction Materials*. 2017. No. 3. Pp. 81–84. doi: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-746-3-81-84> (rus)
10. Alfimova N.I., Shadskiy E.E., Lesovik R.V., Ageeva M.S. Organic-mineral modifier on the basis of volcanogenic-sedimentary rocks. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015. Vol. 10(24). 45131–45136.
11. Frolova M.A., Morozova M.V., Aizenshtadt A.M., Tutygin A.S. An aluminum-silicate binder on the basis of saponite-containing waste of diamond industry [Aljumosilikatnoe vjazhushchee na osnove saponitsoderzhashhih othodov almazodobyvajushhej promyshlennosti]. *Construction Materials*. 2017. No. 7. Pp. 68–70. (rus)
12. Goncharova M.A., Ivashkin A.N., Simbaev V.V. Development of optimal silicate concrete compositions using local raw materials [Razrabotka optimal'nyh sostavov silikatnyh betonov s ispol'zovaniem mestnyh sy'revyh resursov]. *Construction Materials*. 2016. No. 9. Pp. 6–8. (rus)
13. Alfimova N.I., Lesovik V.S., Glagolev E.S., Vishnevskaya Ya.Yu. Optimization of hardening conditions of composite binders taking into account the genesis of the silica-containing component. [Optimizaciya uslovij tverdeniya kompozicionnyh vjazhushchih s uchetom genezisa kremnezem-soderzhashchego komponenta]. Belgorod: BGTU, 2016. 91 p. (rus)
14. Murtazaev S-A.Y., Zaurbekov Sh.Sh. A.Kh., Saydumov M.S., Murtazaeva T.S-A., Khadzhiyev M.R. Impact of technogenic raw materials on the properties of high-quality concrete composites. *Advances in Engineering Research*. 2018. Vol. 177. Pp.275–279. doi: 10.2991/isees-18.2018.53.
15. Lesovik V.S. Geonics (geomimetics). Implementation examples in building materials science. [Geonika (geomimetika). Primery realizacii v stroitel'nom materialovedenii]. Belgorod: BGTU, 2016. 287 p. (rus)
16. Fediuk R.S., Yevdokimova Yu.G., Smoliakov A.K., Stoyushko N.Yu., Lesovik V.S. Use of

geonics scientific positions for designing of building composites for protective (fortification) structures. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 221. 012011. doi: 10.1088/1757-899X/221/1/012011/

17. Volodchenko A.N., Strokov V.V. Development of scientific bases for production of silicate autoclave materials using clay raw materials [Razrabotka nauchnykh osnov proizvodstva silikatnykh avtoklavnykh materialov s ispol'zovaniem glinistogo syr'ya]. Construction Materials. 2018. No. 9. Pp. 25–31. doi: https://doi.org/10.31659/0585_430X-2018-763-9-25-31 (rus)

18. Volodchenko A.A., Zagorodnyuk L.Kh., Prasolova E.O., Chin Sovann. Nontraditional Clay Raw Materials as a Component of Inorganic Dispersed Phases [Netraditsionnoe glinistoe syr'e kak komponent neorganicheskikh dispersnykh system]. Vestnik MGSU. 2014. No. 9. Pp. 67–75. (rus)

19. Lesovik V.S., Volodchenko A.A., Glagolev E.S., Chernysheva N.V., Lashina I.V., Feduk R.S.

Theoretical backgrounds of non-tempered materials production based on new raw materials. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327. 042064. doi:10.1088/1757-899X/327/4/042064

20. Volodchenko A.A., Lesovik V.S. To the question of the influence of complex binder on the properties of non-autoclave silicate composites with the using non-traditional raw materials [K voprosu vliyaniya kompleksnogo vyazhushchego na svoystva neavtoklavnykh silikatnykh kompozitov s ispol'zovaniem netradicionnogo syr'ya]. Modern high technologies. 2018. No. 12(2). Pp. 173–178. (rus)

21. Volodchenko A.A. The influence of exploitation conditions on properties of non-autoclaved silicate materials on the basis of alternative raw materials. [Vliyanie usloviy ekspluatacii na svoystva neavtoklavnykh silikatnykh materialov na osnove netradicionnogo syr'ya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 12. Pp. 12–20. (rus)

Information about the authors

Volodchenko, Alexander A. PhD, Assistant professor. E-mail: volodchenko.aa@bstu.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46. Research Institute of Building Physics RAASN. Russia, 127238, Moscow, Lokomotivnyy proyezd, 21

Received in September 2019

Для цитирования:

Володченко А.А. Стеновые силикатные материалы неавтоклавного твердения с применением кремнеземистого сырья и алюмосиликатного вяжущего на основе нетрадиционных глинистых пород // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 11. С. 25–34. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-25-34

For citation:

Volodchenko A.A. Wall silicate materials of non-autoclave hardening with the use of silica raw materials and aluminosilicate binding based on non-conventional clay rocks. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 11. Pp. 25–34. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-25-34

DOI: 10.34031/2071-7318-2019-4-11-35-42

¹Смоляго Г.А., ²Дрокин С.В., ^{1,*}Дронов А.В., ²Белоусов А.П.,
²Пушкин С.А., ²Смоляго Е.Г.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Россия, 308012, Белгородская область, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46²ООО «Строительная экспертиза», Россия, г. Белгород

*E-mail: dronov.andrey.1989@gmail.com

ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СБОРНЫХ БАЛОЧНЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ КЕРАМЗИТОБЕТОННЫХ МНОГОПУСТОТНЫХ ПЛИТ

Аннотация. Использование керамзитобетона для производства строительных конструкций позволяет значительно снизить их вес, что важно при изготовлении многопустотных плит перекрытий, собственный вес которых составляет значительную долю от общей нагрузки. В действующих нормативных документах физико-механические свойства керамзитобетона значительно отличаются, а иногда и противоречат друг другу в различных документах. На примере здания детского сада, эксплуатируемого около 50 лет, приведены выявленные дефекты и повреждения керамзитобетонных многопустотных плит перекрытия, появившиеся как при изготовлении плит (участки с неуплотнённым бетоном, непробетонированные ребра плит между пустотами на отдельных участках), так и в процессе эксплуатации здания (нормальные трещины в середине пролёта плит, неоформленные отверстия под коммуникации, коррозия арматуры). Были выявлены 2 аварийные плиты перекрытия, имеющие многочисленные продольные и поперечные трещины и сколы бетона, появившиеся вследствие ненормативного загрузжения плит. Показаны различия в нормативных документах и методиках расчетах, используемых на момент проектирования здания детского сада и в настоящий момент времени. Выполнена оценка технического состояния керамзитобетонных плит перекрытий с учетом имеющихся дефектов и повреждений и приведены рекомендации по их усилению.

Ключевые слова: керамзитобетон, многопустотные плиты, долговечность, дефекты, усиление.

Введение. Зарубежный и отечественный опыт использования керамзитобетона как в монолитном, так и сборном вариантах свидетельствует о возможности его применения в качестве несущих конструкций различного функционального назначения.

Использование высокопрочного керамзитобетона позволяет снизить вес конструкций на 25–30 %. Это весьма важно для изготовления многопустотных плит перекрытия, собственный вес которых составляет значительную долю от общей нагрузки.

По мнению [1], несущие конструкции из легких бетонов могут изготавливаться практически при том же армировании и в той же опалубке, что и аналогичные конструкции из тяжелого бетона при массе первых меньше на 20–50 %. Это подтверждается опытом возведения несущих каркасов (или их элементов), зданий и конструкций межэтажных перекрытий.

При использовании керамзитобетона в конструкциях перекрытий, как правило, применяют класс бетонов по прочности на сжатие В15–В30, марки по плотности D1200 – D1800.

Керамзитобетон обладает специфическими свойствами по сравнению с тяжёлым бетоном, что необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации керамзитобетонных конструкций.

Предел прочности при изгибе высокопрочного керамзитобетона примерно на 10–30 % меньше, чем равнопрочного тяжелого бетона [2].

На прочность легких бетонов на растяжение влияет множество факторов, наиболее значимым из которых является размер заполнителя. Прочность при растяжении легких бетонов колеблется приблизительно от 70 до 100 % прочности при растяжении тяжелого бетона одинакового класса по прочности на сжатие [3, 10].

На текущий момент нет однозначного ответа по предельной растяжимости и сжимаемости керамзитобетона, так как предельная растяжимость высокопрочного керамзитобетона также примерно в 2 раза превосходит растяжимость тяжелого бетона и колеблется в основном в пределах 0,2–0,6 мм/м [4] или 0,3–0,35 мм/м [5], что превосходит в 2 раза среднее значение предельной растяжимости для тяжелого бетона. В действующих нормативных документах предельная растяжимость керамзитобетона имеет значительный разброс и составляет для марок 150–200 – 0,0003; для марок 300–500 – 0,00025 [6], что больше предельной растяжимости бетона, равной 0,0001 [7]. В действующих американских нормативных документах [10] предельная сжимаемость легкого бетона практически равна предельной сжимаемости керамзитобетона и принята равной 0,003. От-

мечается также, что на основании опытных данных указанное значение предельной сжимаемости лёгкого бетона можно несколько увеличить.

Значения предельных относительных деформаций согласно [7] допускается принимать при продолжительном действии нагрузки по [8] с понижающим коэффициентом $[(0,4+0,6\rho/2200)\geq 0,7]$, где ρ – плотность бетона в кг/м^3 , т.е. согласно действующему СП предельные относительные деформации керамзитобетона при длительном действии нагрузки меньше значений для тяжелого бетона.

Предельные относительные деформации при сжатии согласно [9] можно принять равными $0,0035 \cdot [(0,4+0,6\rho/2200)]$, где ρ – плотность бетона в кг/м^3 , при этом их величина не должна превышать $0.0025+0.002(1-f_{ck}/100)$, где f_{ck} – характеристика прочности на сжатие при испытаниях цилиндров (нормативная прочность бетона на сжатие).

В отличие от тяжелого бетона, модуль упругости которого возрастает во времени, особенно в образцах, нагруженных сжимающей нагрузкой, модуль упругости конструктивного керамзитобетона с течением времени снижается. В нагруженных постоянной сжимающей нагрузкой образцах его снижение составляет 20–25 % первоначального его значения в 28-суточном возрасте. Как показали эксперименты [4], в керамзитобетоне невысоких классов (B5, B7,5) снижение модуля упругости не отмечается, в отличие от керамзитобетона более высоких классов, где у образцов с неизолированной поверхностью модуль упругости за два года снизился на 13–18 %. У таких же изолированных образцов происходило нарастание модуля упругости на 21 % по сравнению с модулем упругости образцов 28-суточного возраста. Таким образом, модуль упругости снижается в основном в результате высыхания бетона. Поэтому изменение модуля упругости керамзитобетона с течением времени будет зависеть от температурно-влажностных условий эксплуатации конструкций. Наиболее неблагоприятны в этом отношении нормальная и сухая среда для конструкций, находящихся в закрытых помещениях, и сухой и жаркий климат для конструкций, размещенных на открытом воздухе [4]. Существует достаточно много формул для нахождения модуля упругости керамзитобетона в зависимости от прочности на сжатие и плотности [10, 11]. Модуль упругости керамзитобетона в зависимости от состава бетона составляет 50–75 % от модуля упругости тяжелого бетона той же прочности и принимается равным модулю упругости тяжелого бетона, умноженному на $(\rho/2200)^2$ [12, 13].

Данные по значениям усадки и ползучести высокопрочного керамзитобетона противоречивы. Согласно [4] усадка и ползучесть на 20–40 % превосходят соответствующие показатели равнопрочного тяжелого бетона. По [5] границы линейной ползучести керамзитобетона находятся в тех же пределах, что и у тяжелого бетона, а согласно действующему СП [7] значение коэффициента ползучести бетона допускается принимать по [8] с понижающим коэффициентом $(\rho/2200)^2$, где ρ – плотность бетона, т.е. ползучесть керамзитобетона меньше ползучести тяжелого бетона. Согласно [10, 13], усадка и ползучесть бетона на легких заполнителях практически всегда превосходят аналогичные показатели для тяжелого бетона. Эффективным методом снижения усадки и ползучести является использование высокопрочного керамзитобетона или использование керамзитобетона автоклавного твердения.

В [14] отмечено, что пористый заполнитель усиливает ползучесть в связи с его низкой жесткостью, поэтому легкие бетоны имеют большую ползучесть по сравнению с тяжелыми. В среднем деформации ползучести легких бетонов классов до B25 во многих случаях в 1,2–1,4 раза больше деформаций ползучести тяжелых бетонов, и это свойство в полной мере проявляется уже примерно через 2–6 мес. после загрузки (т.е. раньше, чем у тяжелых бетонов). Необходимо отметить, что сам по себе керамзит, подвержен значительным пластическим деформациям и микротрещинообразованию при длительном действии на него сжимающих нагрузок. Это также может являться дополнительными факторами, интенсифицирующими ползучесть керамзитобетона.

В связи с этим представляется целесообразным проанализировать изменения эксплуатационных параметров, соответствие предельным состояниям керамзитобетонных перекрытий по истечению длительного срока их эксплуатации на примере 2-х этажного с подвалом здания детского сада с размерами в плане 12,89×51,91 м. Здание эксплуатируется более 50 лет.

Основная часть. Конструктивная схема исследуемого здания – жесткая, бескаркасная, панельная с поперечными несущими и продольными самонесущими стенами выше отм. ± 0.000 , а также сборными железобетонными поперечными рамами, расположенными ниже отм. ± 0.000 . Пространственная жесткость здания обеспечивается совместной работой панельных стен и железобетонных рам с конструкциями межэтажных перекрытий.

Проведение данного исследования вызвано тем обстоятельством, что представителями под-

рядной организации в процессе выполнения капитального ремонта нежилого здания детского сада были обнаружены многочисленные дефекты и повреждения пустотных керамзитобетонных плит перекрытия, расположенных над подвалом и 1-м этажом исследуемого объекта.



Рис. 1. Многочисленные нормальные трещины в плитах перекрытия

При выполнении обследований пустотных керамзитобетонных плит перекрытия зафиксированы следующие дефекты и повреждения:

1. многочисленные нормальные трещины с предельно допустимой шириной раскрытия до 0,3 мм, расположенные в середине пролета плит, то есть в зоне максимального изгибающего момента (рис. 1);



2. неоформленные отверстия в зонах прохода инженерных коммуникаций, в том числе с

участками с обрезанной продольной рабочей арматурой (рис. 2);



Рис. 2. Неоформленные отверстия в зонах прохода инженерных коммуникаций

3. коррозия продольной рабочей арматуры у отверстий и в связи с недостаточной величиной защитного слоя бетона (рис. 3);



Рис. 3. Коррозия продольной рабочей арматуры

4. участки с неуплотнённым бетоном керамзитобетонных плит (рис. 4), а также непробетонированные ребра плит между пустотами на отдельных участках.



Рис. 4. Участки с неуплотнённым бетоном, непробетонированные ребра плит между пустотами на отдельных участках

Коррозионные изменения прочностных и деформативных параметров бетона сжатой зоны, коррозия стержней растянутой арматуры с нарушением сцепления стержней с бетоном приводят к нарушению нормативного условия ограничения высоты сжатой зоны, что делает возможным хрупкое разрушение изгибаемых элементов [15].

Также в процессе выполнения осмотра были обнаружены две аварийные плиты перекрытия с многочисленными силовыми нормальными трещинами, продольными трещинами и сколами бетона, расположенными над подвалом у наруж-

ных продольных стен (рис. 5). Данное техническое состояние плит перекрытия с большой долей вероятности вызвано их не нормативным неравномерным по ширине плиты загрузением в процессе выполнения капитального ремонта нежилого здания детского сада, что привело к возникновению крутящих моментов [16, 17]. Неравномерное по ширине нагружение плит перекрытий привело к заклиниванию их продольных боковых поверхностей соседними плитами и, как следствие, работе плит на изгиб в продольном направлении, что было не предусмотрено проектной документацией.



Рис. 5. Повреждения аварийных плит перекрытия

Результаты инструментальных исследований конструкций перекрытия показали, что пустотные керамзитобетонные плиты в большей части имеют размеры в плане $1,6 \times 3,2$ м и $1,6 \times 6,4$ м. Плиты выполнены из бетона класса по прочности на сжатие В15. Продольная арматура плит: $2\text{Ø}12 \text{ АIIIв} + 3\text{Ø}14 \text{ АIIIв}$.

Выполненные поверочные расчеты пустотных керамзитобетонных плит с учетом фактических прочностных характеристик, армирования и нагрузок в соответствии с требованиями действующих норм показали несоответствие требованиям предельных состояний, связанное с дей-

ствующими нагрузками, дефектами изготовления плит, проявившихся в нарушении методов подбора состава бетона и технологии изготовления. Об этом свидетельствуют результаты определения прочности бетона, согласно которым отдельные участки плит имеют пониженную прочность и повышенную хрупкость бетона.

Необходимо отметить, что на момент возведения здания при расчете деформаций вес жестких перегородок без проемов мог не учитываться, а нагрузки от прочих перегородок учитывались в размере 40% от их фактического веса. Так же в типовых конструкциях многопустотных

плит, опирающихся на стены, при расчете прогибов обычно учитывался опорный момент на одной опоре в размере 15% от момента свободно лежащей балки [18].

Для восстановления эксплуатационных качеств и соответствия предельным состояниям исследуемые конструкции перекрытия, расположенные над подвалом и 1-м этажом, нуждаются

в усилении путем устройства набетонки толщиной 70 мм из мелкозернистого бетона класса по прочности на сжатие В20 и армированием сеткой Ø10 A500 с шагом 200 мм в двух направлениях, а также заведением каркасов с продольным рабочим стержнем Ø16 A500 в швы между плитами (рис. 6).

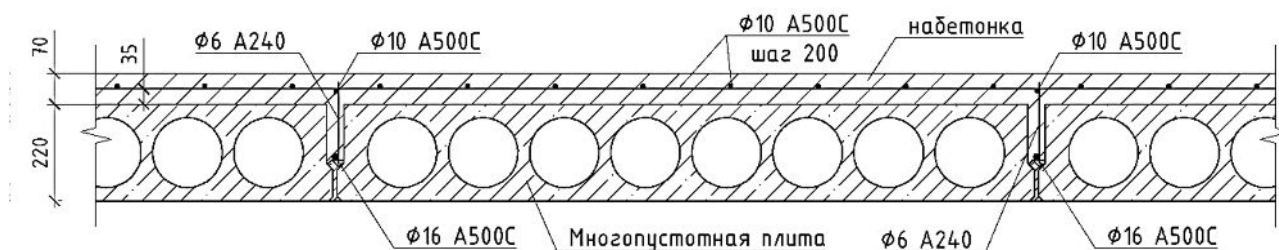


Рис. 6. Фрагмент усиления перекрытия

Совместная работа монолитного нового бетона и плит обеспечивается устройством на верхней поверхности плит насечек, дополнительными поперечными стержнями и сеткой в монолитном слое бетона, установкой каркасов в швы между плитами. Усиление плит необходимо выполнить после полного демонтажа конструктивных слоев пола.

В процессе выполнения капитального ремонта здания необходимо в кратчайшие сроки выполнить усиление двух аварийных плит перекрытия над подвалом подведением под них стальных балок, опирающихся на возведенные кирпичные столбы. Техническое состояние данных плит перекрытия, расположенных над подвалом, оценивается как аварийное, характеризующееся повреждениями и деформациями, свидетельствующими об исчерпании несущей способности и опасности обрушения, при котором существует опасность для пребывания людей и сохранности оборудования, с предварительным выполнением страховочных мероприятий.

Выполненные поверочные расчеты перекрытий с учетом рекомендованных конструктивных решений по усилению подтвердили их соответствие предельным состояниям, в том числе с обеспечением прочности контактного шва.

Выводы. Проведенные обследования не позволили в полной мере дать обоснованный ответ о степени надежности и долговечности керамзитобетонных пустотных плит перекрытий, вследствие выявленных дефектов при их изготовлении. Однако учитывая, что срок их эксплуатации до капитального ремонта составил порядка 50-ти лет, можно отметить их конкурентную способность по сравнению с аналогичными конструкциями из тяжелого бетона и целесообразность их применения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ярмаковский В.Н. Модифицированные легкие бетоны различных видов для ограждающих и несущих конструкций зданий // Бетон и железобетон – пути развития: Всероссийская (международная) конференция по бетону и железобетону. М.: ДИПАК, 2005. Т. 4. С. 324–330.
2. Дорф В.А., Довжик В.Г. Высокопрочный керамзитобетон (Обзор опыта производства, особенностей технологии и свойств). М.: ЦНИИТ-ЭСтром Министерства промышленности строительных материалов СССР. 1968. 52 с.
3. Конструктивный высокопрочный керамзитобетон в США. ЦНИИС Госстроя СССР. Экспресс-информация, серия «Строительные материалы и изделия». Зарубежный опыт. 1965. № 9. 68 с.
4. Кудрявцев А. А. Предварительно-напряженный керамзитобетон. М.: Стройиздат, 1974. 93 с.
5. Курасова Г.П. Свойства конструктивного керамзитобетона марок 200-500. // Легкие и ячеистые бетоны и конструкции из них. Научная сессия института, 1968. Доклады и сообщения. Под редакцией кандидатов технических наук А.Т. Баранова, Г.А. Бужевича, Н.А. Корнева, В.В. Макаричева. М.: НИИЖБ. 1970. С. 48-64.
6. ВСН 28-65. Указания по применению керамзитобетона в автомобильных мостах. М.: Изво «Транспорт». 1965. 19 с.
7. СП 351.1325800.2017. Бетонные и железобетонные конструкции из лёгких бетонов. Правила проектирования. М., 2017. 77 с.
8. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. С изменениями 1, 2, 3. М., 2015. 161 с.

9. Lightweight Aggregate Concrete. Part 1. Recommended extensions to Model Code 90. 2000. 114 p.
10. ACI 213R-14. Guide for structural lightweight aggregate concrete. American Concrete Institute. 2014. 53 p.
11. Yongmei Qiao, Chao Gao. Elastic Modulus Calculation of Lightweight Aggregate Concrete. Advanced Materials Research. Vol 1090. 2015. Pp 93–95.
12. Kum Yung Juan. Cracking mode and shear strength of lightweight concrete beams. National university of Singapore. 2011. 202 p.
13. EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of concrete structures -Part 1-1: General rules and rules for buildings. 2004. 225 p.
14. Каримов Е.Ш. Механизм ползучести бетона и факторы, влияющие на нее (обзор). Часть 1. Технологии бетонов. №3-4. 2011. С. 61–65.
15. Меркулов С.И. Развитие теории конструктивной безопасности объектов в условиях коррозионных воздействий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. №3. С. 44–46.
16. Alex Aswad, Francis J. Jacque. Behavior of Hollow-Core Slabs Subject to Edge Loads. PCI Journal. March-April 1992. P. 72–84.
17. Helén Broo. Shear and Torsion in Concrete Structures. Non-Linear Finite Element Analysis in Design and Assessment. Göteborg, Sweden. 2008. 202 p.
18. Мурашев В.И. Справочник проектировщика. Сборные железобетонные конструкции. М., 1959. 606 с.

Информация об авторах

Смоляго Геннадий Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: tpk-psv@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дрокин Сергей Владимирович, кандидат технических наук, инженер-проектировщик. E-mail: drokin_sergey@mail.ru. ООО «Строительная экспертиза», Россия, г. Белгород.

Дронов Андрей Васильевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры теоретической механики и сопротивления материалов. E-mail: dronov.andrey.1989@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Белоусов Александр Петрович, заместитель директора по техническим вопросам. ООО «Строительная экспертиза», Россия, г. Белгород.

Пушкин Сергей Александрович, начальник отдела обследования зданий и сооружений. ООО «Строительная экспертиза», Россия, г. Белгород.

Смоляго Елена Геннадьевна, кандидат технических наук, начальник отдела строительного аудита. ООО «Строительная экспертиза», Россия, г. Белгород.

Поступила в августе 2019 г.

© Смоляго Г.А., Дрокин С.В., Дронов А.В., Белоусов А.П., Пушкин С.А., Смоляго Е.Г., 2019

¹*Smolyago G.A., ²*Drokin S.V., ¹Dronov A.V., ²Belousov A.P.,
²Pushkin S.A., ²Smolyago E.G.*

¹*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46*

²*ООО «Stroitelnaya expertiza», Russia, Belgorod*

**E-mail: drokin_sergey@mail.ru*

TECHNICAL CONDITION OF PRECAST BEAMS WITH THE USE OF EXPANDED LIGHTWEIGHT CONCRETE HOLLOW-CORE SLABS

Abstract. *The use of expanded lightweight concrete for the production of building structures can significantly reduce the weight, which is important in the manufacture of hollow-core slabs; the weight is a significant proportion of the total load. In the current regulatory documents, the physical and mechanical properties of expanded lightweight concrete differ significantly, and sometimes contradict each other. The defects and damages of expanded lightweight concrete hollow-core slabs are described in the case of the kindergarten built near 50 years ago. They appeared during the manufacture of the slabs - uncompacted concrete and*

uncovered ribs, or in the course of exploitation of the building - normal cracking, holes for pipes and corrosion of reinforcement. Two slabs in emergency condition have numerous longitudinal and shear cracks and chips of concrete caused by overloading. The differences in normative documents and methods of calculations used at the time of designing the kindergarten building and at the present time are shown. The assessment of the technical condition of the expanded lightweight concrete hollow-core slabs considering defects and damages are carried out.

Ключевые слова: *expanded lightweight concrete, hollow-core slab, durability, defects, strengthening.*

REFERENCES

1. Yarmakovskij V.N. Modified lightweight concretes of various types for enclosing and bearing structures of buildings [Modificirovannyye legkie betony razlichnykh vidov dlya ograzhdayushchih i nesushchih konstrukcij zdaniy]. Beton i zhelezobeton – puti razvitiya: Vserossiyskaya (mezhdunarodnaya) konferenciya po betonu i zhelezobetonu. Moscow: DIPAK, 2005. Vol. 4. Pp. 324–330. (rus)
2. Dorf V.A., Dovzhik V.G. High-strength expanded clay concrete (Review of production experience, features of technology and properties) [Vysokoprochnyy keramzitobeton (Obzor opyta proizvodstva, osobennostey tekhnologii i svoystv)]. Moscow: CNIITESTrom Ministerstva promyshlennosti stroitel'nykh materialov SSSR. 1968. 52 p. (rus)
3. Constructive high-strength expanded clay concrete in the United States [Konstruktivnyy vysokoprochnyy keramzitobeton v SSHA]. CNIIS Gostroya SSSR. Ekspres-informatsiya, seriya «Stroitel'nye materialy i izdeliya». Zarubezhnyy opyt. 1965. No. 9. 68 p. (rus)
4. Kudryavcev A. A. Pre-stressed expanded clay concrete [Predvaritel'no-napryazhennyj keramzitobeton]. Moscow: Strojizdat. 1974, 93 p. (rus)
5. Kurasova G.P. Properties of structural expanded clay concrete grades 200–500 [Svoystva konstruktivnogo keramzitobetona marok 200–500]. Legkie i yacheistye betony i konstrukcii iz nih. Nauchnaya sessiya instituta, 1968. Doklady i soobshcheniya. Pod redakciej kandidatov tekhnicheskikh nauk A.T. Baranova, G.A. Buzhevicha, N.A. Korneva, V.V. Makaricheva. Moscow: NIIZHB. 1970. Pp. 48–64. (rus)
6. VSN 28-65. Instructions for use of expanded clay concrete in road bridges [Ukazaniya po primeniyu keramzitobetona v avtodorozhnykh mostah]. Moscow: Iz-vo «Transport». 1965. 19 p. (rus)
7. SP 351.1325800.2017. Concrete and reinforced concrete structures made of lightweight concrete [Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii iz lyogkih betonov]. Moscow. 2017. 77 p. (rus)
8. SP 63.13330.2012. Concrete and reinforced concrete structures. Fundamentals. Updated version of SNiP 52-01-2003. With changes 1, 2, 3 [Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovnye polozheniya. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 52-01-2003. S izmeneniyami 1, 2, 3]. Moscow. 2015. 161 p. (rus)
9. Lightweight Aggregate Concrete. Part 1. Recommended extensions to Model Code 90. 2000. 114 p.
10. ACI 213R-14. Guide for structural lightweight aggregate concrete. American Concrete Institute. 2014. 53 p.
11. Yongmei Qiao, Chao Gao. Elastic Modulus Calculation of Lightweight Aggregate Concrete. Advanced Materials Research. Vol. 1090. 2015. Pp. 93–95.
12. Kum Yung Juan. Cracking mode and shear strength of lightweight concrete beams lightweight concrete beams. National university of Singapore. 2011. 202 p.
13. EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of concrete structures -Part 1-1 : General rules and rules for buildings. 2004. 225 p.
14. Karimov E.Sh. Creep mechanism of concrete and factors affecting it (review). Part 1 [Mekhanizm polzuchesti betona i faktory, vliyayushchie na nee (obzor). Chast' 1]. Tekhnologii betonov. No. 3-4. 2011. Pp. 61–65. (rus)
15. Merkulov S.I. Development of the theory of structural safety of objects under corrosion [Razvitie teorii konstruktivnoj bezopasnosti ob"ektov v usloviyakh korrozionnykh vozdeystvii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2014. No. 3. Pp. 44–46. (rus)
16. Alex Aswad, Francis J. Jacque. Behavior of Hollow-Core Slabs Subject to Edge Loads. PCI Journal. March-April. 1992. Pp. 72–84.
17. Helén Broo. Shear and Torsion in Concrete Structures. Non-Linear Finite Element Analysis in Design and Assessment. Göteborg, Sweden. 2008. 202 p.
18. Murashyov V.I. Directory of the designer. Precast concrete structures [Spravochnik proektirovshchika. Sbornye zhelezobetonnye konstrukcii]. Moscow. 1959. 606 p.

Information about the authors

Smolyago, Gennadiy A. DSc, Professor. E-mail: tpk-psv@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Drokin, Sergey V. PhD, Design engineer. E-mail: drokin_sergey@mail.ru. ООО “Stroitel'naya expertiza”, Russia, Belgorod.

Dronov, Andrey V. PhD, Senior lecturer. E-mail: dronov.andrey.1989@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Belousov, Alexander P. Deputy director of technical problems. ООО «Stroitel'naya expertiza». Russia, Belgorod.

Pushkin, Sergey A. Head of building and construction inspection department. ООО «Stroitel'naya expertiza». Russia, Belgorod.

Smolyago, Elena G. PhD, head of building and construction audit department. ООО «Stroitel'naya expertiza». Russia, Belgorod.

Received in August 2019

Для цитирования:

Смоляго Г.А., Дрокин С.В., Дронов А.В., Белоусов А.П., Пушкин С.А., Смоляго Е.Г. Техническое состояние сборных балочных перекрытий с применением керамзитобетонных многопустотных плит // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 11. С. 35–42. DOI: 10.34031/2071-7318-2019-4-11-35-42

For citation:

Smolyago G.A., Drokin S.V., Dronov A.V., Belousov A.P., Pushkin S.A., Smolyago E.G. Technical condition of precast beams with the use of expanded lightweight concrete hollow-core slabs. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 11. Pp. 35–42. DOI: 10.34031/2071-7318-2019-4-11-35-42

DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-43-52

***Николюкин А.Н., Ярцев В.П., Мамонтов С.А., Коломникова И.И., Аль Вард А.М.**

Тамбовский государственный технический университет

Россия, 392032, Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112Д

*E-mail: valax1@yandex.ru

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БЕТОНА И АРМАТУРЫ В ОБЛАСТИ ИХ ЗАЦЕПЛЕНИЯ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS

Аннотация. В целях ускорения темпов возведения зданий и сооружений в строительной практике широкое применение получили сборные железобетонные конструкции, соединяемые при монтаже посредством закладных стержневых элементов, замоноличиваемых впоследствии бетоном.

Под воздействием внешних нагрузок в таких узловых соединениях возникают осевые растягивающие и поперечные сдвигающие усилия, которыми часто пренебрегают при статическом анализе конструкций. В свою очередь это может привести к развитию предельных деформаций в узле, изменению условий закрепления конструкции и, как следствие, преждевременному их обрушению.

В данной статье рассматривается вопрос о влиянии осевого выдерживающего усилия в арматурном стержне на напряженно-деформированное состояние (НДС) окружающего его бетонного массива. Для решения поставленной задачи в работе проводился численный эксперимент в пакете ANSYS 19.0 Workbench, в котором моделировалось сцепление стеклопластиковой и стальной арматуры с бетоном, что позволило установить характер распределения напряжений в области заделки стержня.

Ключевые слова: композитная арматура, узловые соединения, деформации, НДС, численное моделирование.

Введение. Критический обзор литературы показал, что на данный момент актуальной проблемой в области армирования бетонных конструкций является недостаточная изученность НДС и характера смещения арматурного стержня относительно бетона, которые определяют совместную работу материалов в узловых соединениях.

Исследованиями в данной области занимались М.М. Холмянский и В.И. Мурашев. В своих работах [1, 2] они выделили основные виды «жестких» стыков, которые осуществлялись с помощью выпуска арматурных стержней, впоследствии замоноличенных на месте монтажа. Автор отмечает, что «одной из причин преждевременного разрушения сооружений является недостаточная прочность строительных швов» [2].

Однако, разрушение стыков может происходить из-за неучитываемой при их конструировании податливости соединения вследствие поперечных и продольных деформаций стержневых выпусков в бетонных узлах от различного рода нагрузок. Поэтому стыки не следует рассматривать как абсолютно жесткое соединение. В целях обеспечения нормальной эксплуатации сборных конструкций в стыковых соединениях необходимо производить уточняющий расчет смещения и ослабления сечения от совместной работы различных элементов.

Изучение вопроса расчета и моделирования раскрытия стыковых соединений требует решения ряда весьма важных общих задач, связанных

с работой арматуры в бетоне при продольном и поперечном приложении нагрузки, а также установке физических параметров, характеризующих взаимную работу бетона и стержня при различных способах приложения усилий.

При всех способах нагружения сборных конструкций стержневая арматура в стыках будет работать в основном от двух видов воздействий – поперечных и продольных, которые воспринимаются арматурой на ее торцах, что приводит к образованию в бетонном массиве в области заделки таких контактных усилий, как касательные напряжения сцепления $\tau_{cu}(x)$ и поперечный отпор $p(x)$ [3].

Так, осевое усилие N_0 приводит к продольным смещениям арматуры относительно бетона g_0 , а усилие Q_0 вызывает поперечное смещение стержневой арматуры Δ_0 в бетоне (рисунок 1).

Очевидно, что именно величины указанных смещений g_0 и Δ_0 являются граничными условиями для нормальной работы стыковых соединений в конструкциях. Для определения этих величин необходимо установить зависимости между $g(x)$ и $\tau_{cu}(x)$ (рисунок 1а) и между поперечными перемещениями $\Delta(x)$ и отпором $p(x)$ (рисунок 1б).

Решение данной задачи возможно двумя способами. К первому относятся эмпирические исследования элементов конструкций, которые являются довольно продолжительными, дорогостоящими и трудоемкими, и не позволяют уста-

новить точный характер разрушения и распределения напряжений в области заделки. Вторым способом является аналитическое моделирование процесса сцепления арматуры с бетоном, ко-

торое менее затратное с точки зрения материальных вложений и времени. В данной работе моделирование сцепления арматурного стержня с бетоном проводилось в пакете ANSYS 19.0 Workbench.

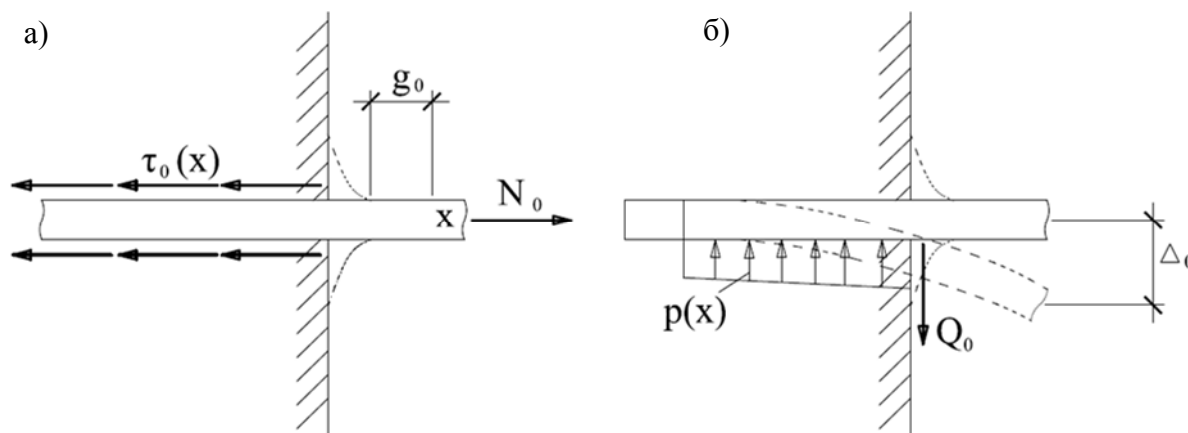


Рис. 1. Работа стержневой арматуры при экспериментальном приложении нагрузки: а) продольное нагружение; б) поперечное нагружение

Методика проведения эксперимента. Перед проведением численного эксперимента были выполнены испытания на вырыв стеклопластиковой (СПА) и стальной арматуры с диаметром (d) 10 мм из бетонных кубов с ребром 100 мм, набравших прочность в нормальных условиях (90 сут., $t=20\pm 2$ °C, $w=65$ %). Данное испытание выполнялось согласно ГОСТ 31938-2012. При этом были приняты класс бетона В25 и длина заделки арматурного стержня в бетон (l), задаваемая по отношению $l/d=5$. Перемещение стержня относительно бетона фиксировалось индикатором часового типа с точностью до 0,001

мм, установленным на нагруженном конце стержня (рисунок 2).

Для построения численной модели в пакете ANSYS 19.0 Workbench задавались механические характеристики бетона и арматуры согласно ГОСТ 31938-2012, ГОСТ 24452-80 и ГОСТ 12004-81, которые приведены в статье [4]. Так модуль упругости для СПА составлял 58 000 МПа, а для стальной арматуры 201 000 МПа. Предел прочности на разрыв у СПА принят 1190 МПа, а у стальной арматуры – 610 МПа

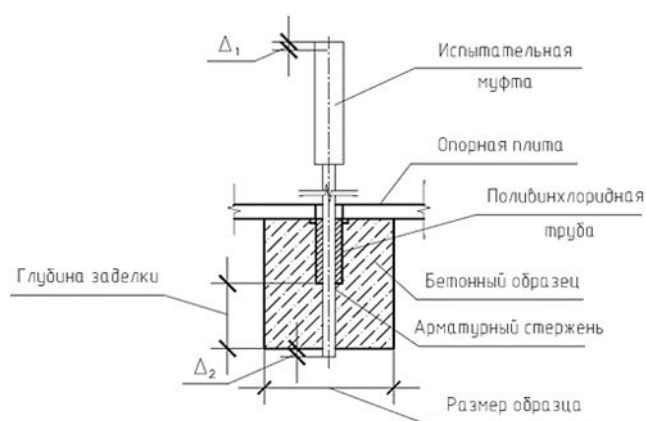


Рис. 2. Схема образца и установка для испытания на выдергивание

Модель. С помощью современного аппарата механики деформируемого твёрдого тела стало возможным решить поставленную задачу с учетом нелинейности работы материала на основе методов конечных элементов (МКЭ). На данный

момент МКЭ получил широкое применение в инженерной практике, чему способствовали разработка и совершенствование таких программных комплексов, как ANSYS [5], MARC, ABAQUS и др.

В качестве модели бетона принята модель

Menetrey-Willam [6–8], основанная на поверхности пластичности Willam-Warnke и зависящая от трех инвариантов тензора напряжений.

Поверхность пластичности Willam-Warnke отличается от поверхности Мора-Кулона тем, что она не имеет острых краев, которые могли бы вызывать некоторые трудности в решении поставленной задачи.

Для описания в ANSYS работы стеклопластикового стержня были использованы закон Гука и модель для ортотропного материала Orthotropic Elasticity (рисунок 3). При этом матрица жесткости будет существовать, поскольку в плоскости СПА располагается вторая плоскость симметрии.

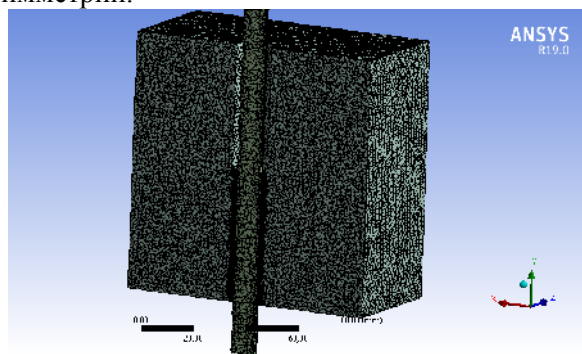
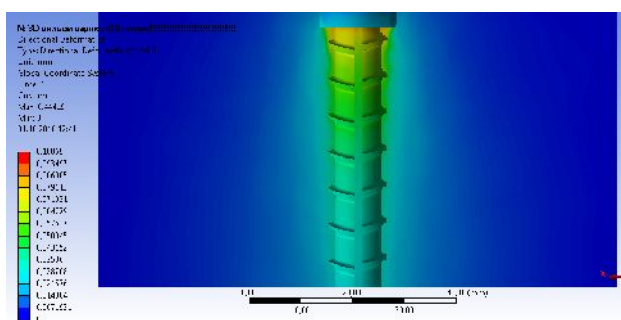


Рис. 3. Расчетная конечноэлементная модель

Для описания в ANSYS работы стеклопластикового стержня были использованы закон Гука и модель для ортотропного материала Orthotropic Elasticity (рис. 3). При этом матрица жесткости будет существовать, поскольку в плоскости СПА располагается вторая плоскость симметрии.

а)



Как было установлено ранее в статье [4], первостепенной причиной разрушения сцепления СПА с бетоном является отслоение периодического профиля от основного стержня. Для моделирования данного процесса применялась модель связанной зоны Cohesive zone model (CZM), в которой разрушение матрицы связующего рассматривается как постепенное отделение поверхности профиля арматуры от основного стержня с последующим его расслоением [9].

Для описания работы стальной арматуры принималась билинейная изотропная модель, поверхность текучести которой расширяется равномерно по всем направлениям в случае изотропного упрочнения материала. Начальный наклон кривой (σ - ϵ) эквивалентен модулю упругости материала. За пределом текучести стали наблюдается рост пластических деформаций [10–15]. Для описания этой зависимости вводится понятие «модуль касательной», который не может быть меньше нуля или больше модуля упругости. В качестве критерия разрушения стальной арматурой выступает достижение эквивалентным напряжением по Mises, величины 610 МПа.

Анализ НДС в бетонном массиве. На основе полученных эмпирических данных была построена модель сцепления арматуры с бетоном. Впоследствии рассматривалось НДС в бетонном массиве, определенное из численного эксперимента при нагрузке 0,5 от разрушающей, так как при больших значениях нагрузки начинается лавинообразный рост деформаций, что в условиях эксплуатации недопустимо [15–18].

Результаты анализа взаимных смещений арматуры и бетона приведены на рис. 4 и 5.

б)

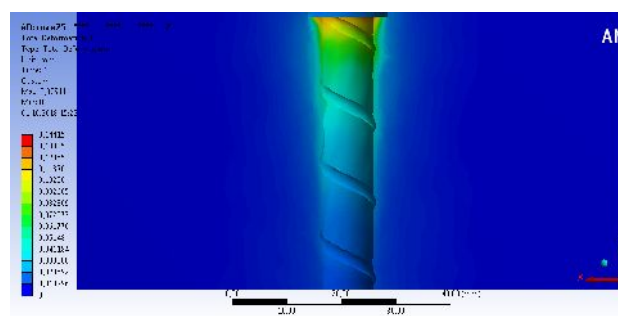


Рис. 4. Модель перемещения арматуры в бетонном массиве: а) стальной; б) СПА

Показаны 3 плоскости для анализа: АВ – по центру арматурного стержня; CD – по поверхности основного стержня; EF – по краю профиля арматуры. Зависимости для плоскости АВ принимают экспоненциальную форму для обеих арматур, однако, величина смещения имеет разные значения. Так, для СПА величина смещения верхнего значения примерно в 1,5 раза выше

нижнего значения. Это объясняется более высоким модулем упругости и однородной структурой у стальной арматуры.

Для плоскостей CD и EF зависимости также принимают экспоненциальную форму, однако наблюдаются скачки величины перемещений, которые совпадают с расположением профилей на стержне. Такое поведение кривых обуслов-

лено тем, что арматура имеет более высокие деформационные характеристики по сравнению с бетоном и, как следствие, в арматуре развиваются деформации, большие чем в бетоне. Стоит

отметить, что у СПА скачки величины перемещений выражены в меньшей степени, чем у стальной арматуры, поскольку СПА имеет сравнительно низкий модуль упругости и по структуре является ортотропным материалом.

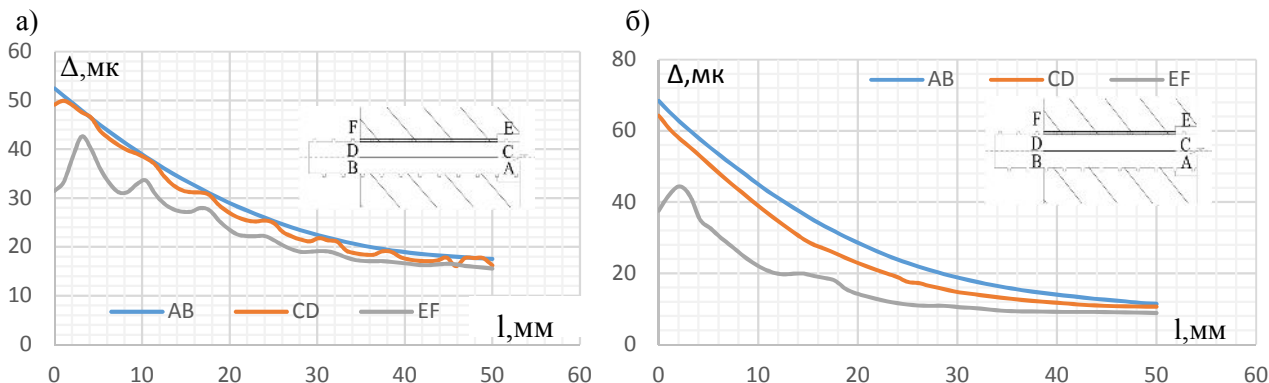


Рис. 5. Зависимость величины взаимного смещения стержня (а – стального; б – СПА) и бетона от глубины его заделки для различных плоскостей в образцах

В итоге, наблюдается совместное деформирование арматуры и бетона при отсутствии взаимных смещений, а также возникновение касательных напряжений в зоне контакта вследствие

различных значений упругих постоянных E и ν .

Следует отметить, что величина сцепления и, как следствие, НДС в области заделки определяются рядом факторов, приведённых на рис. 6.

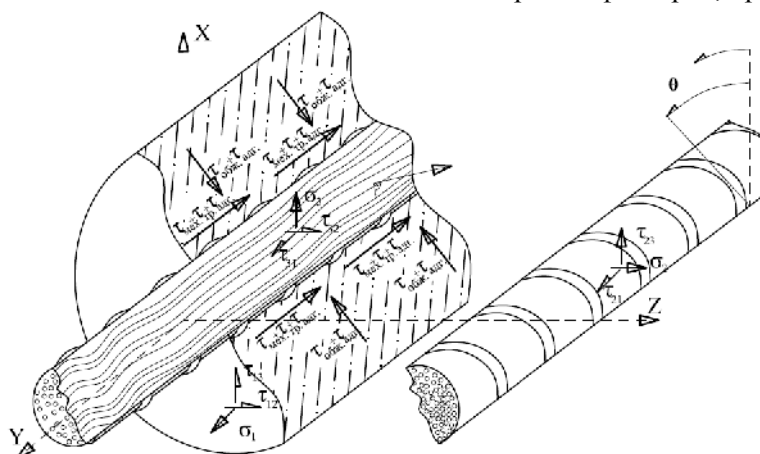


Рис. 6. Напряжения в параллельных волокнах основного стержня СПА

Основопологающим из них является механическое зацепление периодического профиля стержня за бетонные консоли, расположенные между профилями арматуры. Как изображено на рис. 7а, консоли с обеих сторон одновременно

воспринимают распределение сжимающих усилий, возникающих от передачи нагрузки профилем арматуры. Также для выполнения условия равновесия на верхней грани образуются растягивающие усилия [19–23].

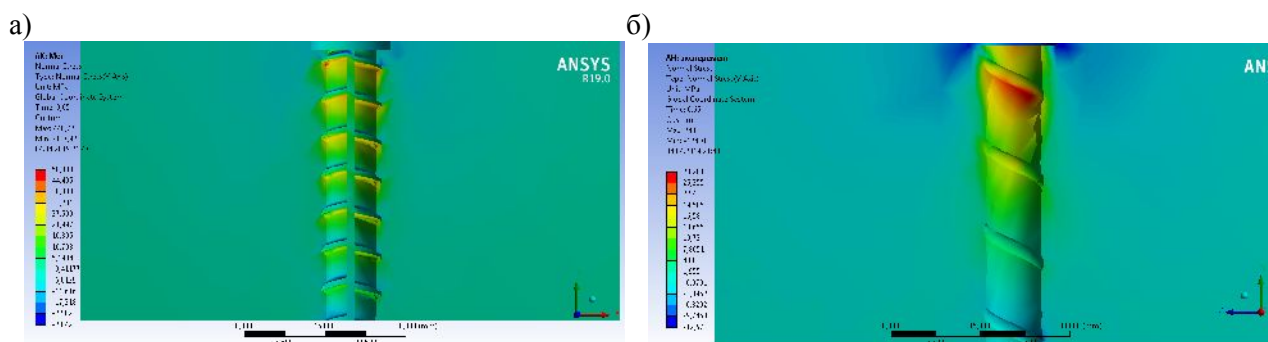


Рис. 7. Распределение нормальных напряжений вдоль оси Y в бетонном массиве у образцов: а) стальной арматуры; б) СПА

Из-за меньшей жесткости профиля СПА консоли бетона полностью работают на сжатие, а, так как профиль имеет резьбу под углом 30 градусов, сжимающая площадка для равновесия образуется под тем же углом между витками профиля (рис. 7, б). Весь остальной массив работает на продольные растягивающие усилия вдоль оси Y.

Следует так же отметить, что классическое понятие инженерной прочности бетона для решения контактной задачи использовать некорректно, поэтому для решения поставленной задачи требуется применять прочностные характеристики бетона при размере образца $0,1 \div 1$ мм.

С увеличением размеров образцов вероятность микродефекта в структуре материала увеличивается, а с уменьшением размеров образцов

прочность бетона, как правило, возрастает. В данном случае это подтверждается тем, что максимальные сжимающие усилия, образуемые под консолями, достигают 100 МПа. Работа бетона при таком уровне напряжений вполне объясняется локальным характером их возникновения, поддерживающим влиянием ненагруженного бетона вне консольных областей, процессом, известным как «местное смятие бетона», прочность при котором много выше призмочной.

Поэтому применять максимальные прочностные характеристики бетона для анализа несущей способности сцепления можно с определенными приближениями. Для более глубокого отражения работы бетона и механизма разрушения следует учесть интенсивность напряжений и пластические деформации бетона (рис. 8 и 9).

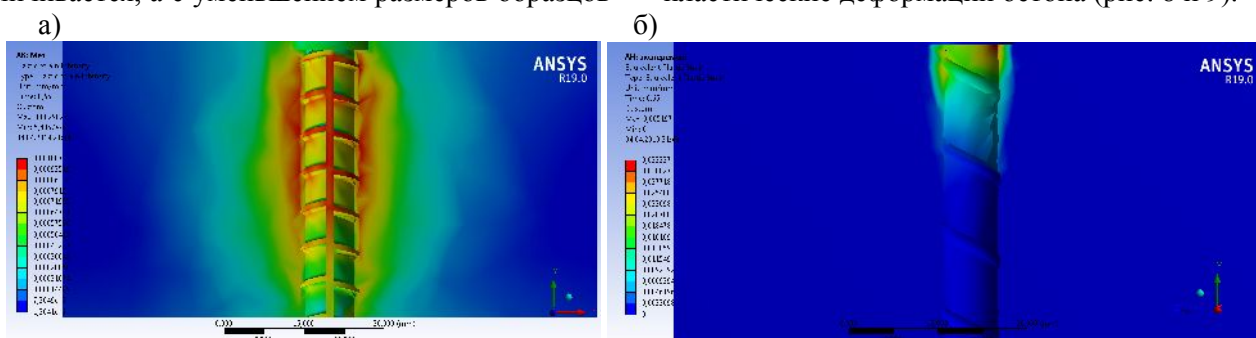


Рис. 8. Максимальные пластические деформации в бетонном массиве у образцов:

а) стальной арматуры; б) СПА

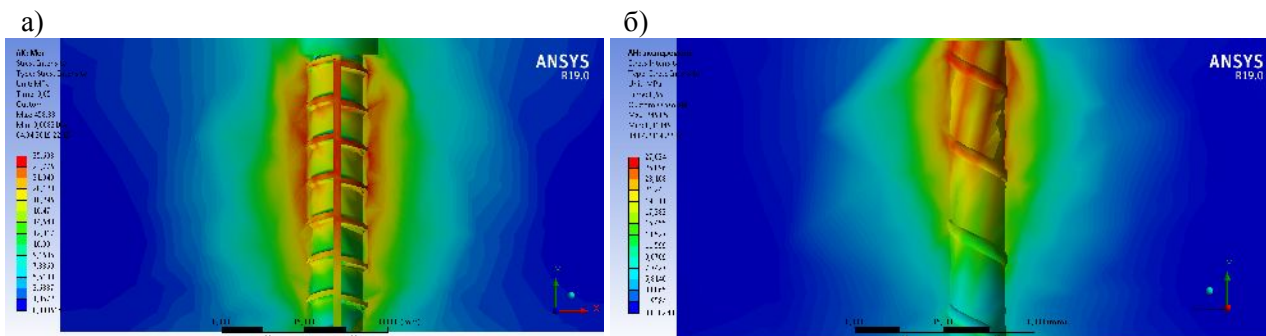


Рис. 9. Интенсивность напряжений в бетонном массиве у образцов:

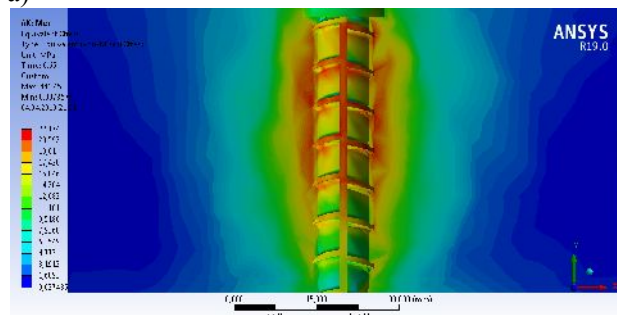
а) стальной арматуры; б) СПА

Изучение законов пластических деформаций намного сложнее, чем упругих, особенно в области контакта арматуры с бетоном при решении задачи сцепления. В этом случае все зависит, описывающие такие деформации, нелинейны и аналитически трудно описываемы. Это связано со следующими обстоятельствами: возникновением анизотропии при больших пластических деформациях; невозможностью рассматривать процесс приложения нагрузки как простое нагружение, при котором все силы изменяются пропорционально одному монотонно возрастающему параметру.

При комплексном рассмотрении ряда параметров наблюдается, что зоны пластических деформаций образуются в местах, где впоследствии происходит прорастание трещин. Например, для образцов с стальной арматурой трещины образуются в областях среза бетонных консолей (рис. 8, а). В тоже время для СПА ярко выражено трещинообразование только вдоль стержня арматуры в плоскостях сжимающих напряжений (рис. 8, б). Таким образом, из вышеизложенного можно сделать вывод, что податливость заделки во многом зависит от мест образования и развития пластических деформаций в бетоне.

Однако, при сопоставлении эпюр распре-

ления нормальных напряжений и зон пластических деформаций с эквивалентными напряжениями



б)

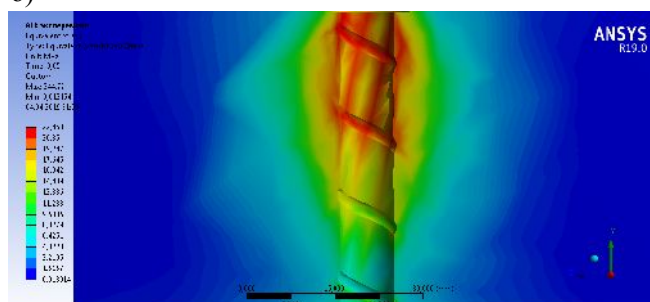


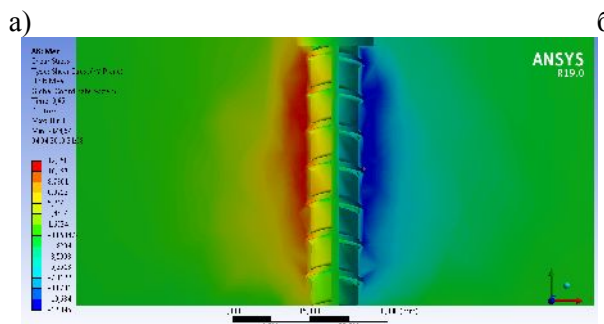
Рис. 10. Эквивалентные напряжения в бетонном массиве у образцов:

а) стальной арматуры; б) СПА

Это подтверждается образованием в экспериментальных образцах вследствие внутризернового сдвига главных и кольцевых трещин, на основании которых происходит разрушение сцепления арматуры с бетоном. Появление сдвига при относительно малых нормальных сжимающих усилиях свидетельствует о неоднородности бетона в контактной зоне и огромной роли касательных напряжений.

Поперечное расположение ребер стержневой арматуры периодического профиля способ-

ствует увеличению сопротивления проскальзыванию стержня относительно бетона. Это показывают основные составляющие интенсивности напряжения, к которым относятся касательные напряжения в плоскости XY, затухающие по мере заглубления стержня (рис. 11). Однако, из-за более высоких деформационных характеристик арматуры в области контакта образуются скачки напряжения (рис. 12), которые и приводят к образованию трещин в растянутой зоне армированных бетонных конструкций.



б)

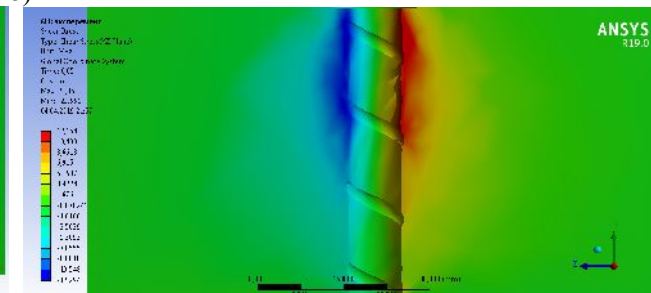


Рис. 11. Распределение касательных напряжений по плоскости XY в бетонном массиве у образцов:

а) стальной арматуры; б) СПА

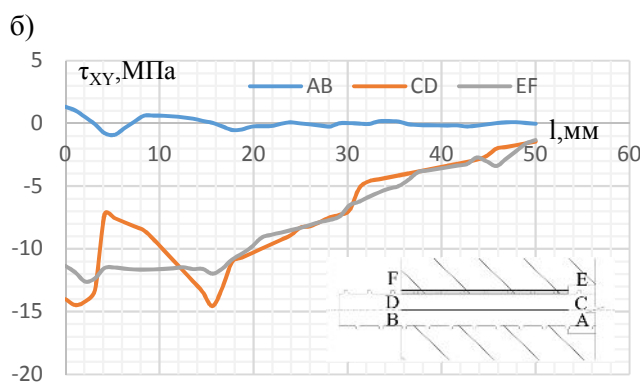
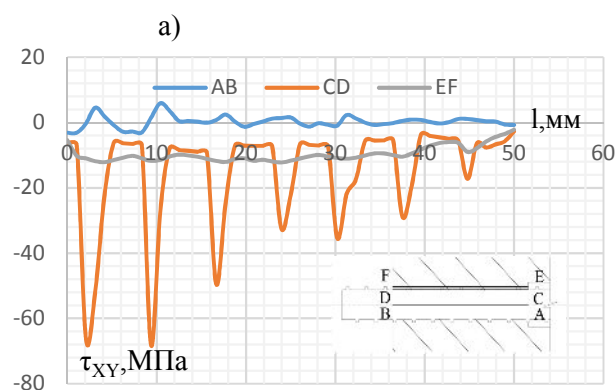


Рис. 12. Распределение касательных напряжений в расчетных плоскостях у образцов:

а) с стальной арматурой; б) с СПА

Выводы. Разработанная на базе комплекса ANSYS 19.0 WorkBench модель сцепления арматуры с бетоном позволила изучить напряженно-деформированное состояние бетонного массива при выдергивании арматуры с учетом её фактического периодического профиля. Проведенный численный эксперимент показал, что на НДС бетона в области заделки и на характер его разрушения оказывает влияние ряд таких факторов, как структура, строение и механические характеристики арматуры.

При рассмотрении НДС для работы стальной арматуры можно выделить два главных фактора её взаимодействия с бетоном в узловых соединениях конструкций. Во-первых, стержень вкручивается в бетон у свободного торца элемента за счет касательных напряжений; во-вторых, приложенная к арматуре внешняя нагрузка исключает ее поворот без разрушения бетона.

У СПА таких процессов не происходит по причине ее более низких деформационных характеристик.

Таким образом, получается, что ведущую роль для обеспечения надежной работы замоноличенного стыка в случае стальной арматуры играет зацепление винтовых выступов её поверхности за бетон, а в случае СПА - силы трения, создающие сцепление. При этом потеря несущей способности заанкеренной арматуры в первом случае происходит при напряжениях 110 МПа в бетоне и 410 МПа в стержне. Для СПА значения предельных напряжений меньше и достигают величин 70 МПа в бетоне и 312 МПа в стержне.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Холмянский М.М. Контакт арматуры с бетоном. М.: Стройиздат, 1981. С. 184.
2. Мурашев В.И. Трещиностойчивость, жесткость и прочность железобетона. М.: Стройиздат, 1950. С. 268.
3. Тевелев Ю.А., Дмитриев А.Н. Железобетонные конструкции в водохозяйственном строительстве: проектирование и изготовление // Росинформаротех. 2006. С. 21
4. Николукин А.Н., Ярцев В.П., Коломникова И.И., Альджабуи Д.З. Экспериментальные исследования прочности сцепления стеклопластиковой арматуры с цементно-песчаным бетоном // Транспортные сооружения. 2019. №1. DOI: 10.15862/02SATS119
5. ANSYS Mechanical APDL theory reference. Release 19.0. Canonsburg, Pennsylvania, USA, 2018. Pp. 952.
6. Drucker D.C., Prager W. Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design. Quarterly of Applied Mathematics. 1952. Vol. 10. № 2. Pp. 157–165.
7. Menetrey P. Numerical Analysis of Punching Failure in Reinforced Concrete Structures. Diss. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, 1994. Pp. 12.
8. Willam K.J., Warnke E.P. Constitutive Models for the Triaxial Behavior of Concrete. Seminar on Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses. International Association for Bridge and Structural Engineering. 1975. Vol. 19. Pp. 1–30.
9. Кашеварова Г.Г., Мартиросян А.С., Травуш В.И. Расчетно-экспериментальное исследование процесса разрушения связей сцепления при вдавливании стержня жесткой арматуры в бетон // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2016. № 3. С. 62–75.
10. Гиздатуллин А.Р. Совместная работа полимеркомпозитной арматуры с цементным бетоном в конструкциях: дисс.канд. техн. наук. Т.: Казань, 2018. С. 190.
11. Бенин А.В. Математическое моделирование процесса разрушения сцепления арматуры с бетоном. Ч.1. Модели с учетом несплошности соединения // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 5. С. 86–144.
12. Римшин В.И., Меркулов С.И. Элементы теории развития бетонных конструкций с неметаллической композитной арматурой // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 5. С. 38–42.
13. Римшин И.В., Кустикова Ю.О. Феноменологические исследования величины сцепления базальтопластиковой арматуры с бетоном // Известия ЮЗГУ. Серия Техника и технологии. 2011. № 1. С. 27–31.
14. Кудяков К.Л. Прочность и трещиностойкость изгибаемых бетонных элементов с базальтофитровым и стержневым стеклокомпозитным армированием при статическом и кратковременном динамическом нагружении: Дисс.канд. техн. наук. Т.: ТГАСУ. 2018. С. 208.
15. Коковцева А.В., Семенов С.Г. Моделирование процесса выдергивания стеклопластиковой арматуры из бетонного блока // Сборник трудов конференции с международным участием «XIII неделя науки СПбГПУ». 2013. С. 182–184.
16. Гутников С.И., Лазорьяк Б.И. Стекланные волокна: учебное пособие. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2010. 53 с.
17. Yalciner H., Eren O., Serhan S. An experimental study on the bond strength between reinforcement bars and concrete as a function of concrete cover, strength and corrosion level // Cem Concr. 2012. N° 14. Pp. 643–655.

18. Николукин А.Н., Ярцев В.П. Численное моделирование композитной арматуры для задачи сцепления с бетоном // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 5. С. 56–65.

19. Nikolyukin A.N., Yartsev V.P. Modeling the coupling of reinforcement in concrete based on an artificial neural network // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2019. № 3 (43). С. 6–16.

20. Yartsev V., Giasov B., Nikolyukin A., Abdul Barei Danish, Giasova I., Aljaboobi D. The impact of high-rise buildings on the living environment // E3S Web of Conferences. High-Rise Construction. 2019. С. 10–16.

21. Mermerdas K., Guneyisi E., Gesoglu M., Ozturan T. Experimental evaluation and modeling of drying shrinkage behavior of metakaolin and calcined kaolin blended concretes. Constr Build Mater. No. 43. 2013. Pp. 337–347.

22. Duan Zh., Kou S.C., Poon C.S. Prediction of compressive strength of recycled aggregate concrete using artificial neural networks // Constr Build Mater 2013. No. 40. Pp. 1200–1206.

23. Adhikary B.B., Mutsuyoshi H. Prediction of shear strength of steel fiber RC beams using neural networks. Constr Build Mater. 2006. No. 20(9). Pp. 801–811.

Поступила в октябре 2019 г.

© Николукин А.Н., Ярцев В.П., Мамонтов С.А., Коломникова И.И., Аль Вард А.М., 2019

Информация об авторах

Николукин Алексей Николаевич, аспирант кафедры «Конструкции зданий и сооружений». E-mail: valax1@yandex.ru. Тамбовский государственный технический университет. Россия, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112.

Ярцев Виктор Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры «Конструкции зданий и сооружений». E-mail: kzis@nnn.tstu.ru. Тамбовский государственный технический университет. Россия, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112.

Мамонтов Семен Александрович, старший преподаватель кафедры «Конструкции зданий и сооружений». E-mail: kardinal61@mail.ru. Тамбовский государственный технический университет. Россия, 392032, Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112.

Коломникова Ирина Игоревна, бакалавр. E-mail: kolomnikova_ii@mail.ru. Тамбовский государственный технический университет. Россия, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112.

Аль Вард А.М., магистрант. E-mail: valax1@yandex.ru. Тамбовский государственный технический университет. Россия, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112.

***Nikolyukin A.N., Yartsev V.P., Mamontov S.A., Kolomnikova I.I., Al Ward A.M.**

*Tambov State Technical University
Russia, 392032, Tambov, st. Michurinskaya, 112*

**E-mail: valax1@yandex.ru*

ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN CONDITION OF CONCRETE AND REINFORCEMENT IN THE AREA OF THEIR ENGAGEMENT IN THE ANSYS SOFTWARE PACKAGE

Abstract. Prefabricated reinforced concrete structures are widely used to speed up the erection of structures in construction practice; they are connected during installation by means of embedded core elements, subsequently monolithic with concrete. Under the influence of external loads, axial tensile and transverse shear forces arise in such nodal joints, which are often neglected in the static analysis of structures. In turn, this can lead to the development of ultimate deformations in the assembly, to a change in the conditions for fixing the structure, and, as a consequence, to their premature collapse.

This article discusses the effect of the axial pulling force in the reinforcing bar on the stress-strain condition (VAT) of the concrete mass surrounding it. To solve this problem, a numerical experiment is carried out in the ANSYS 19.0 Workbench package, in which the adhesion of fiberglass and metal reinforcement to concrete is simulated. It allows establishing the nature of the stress distribution in the core embedment area.

Keywords: composite reinforcement, nodal joints, deformations, VAT, numerical simulation.

REFERENCES

1. Holmyanskij M.M. Reinforcement contact with concrete. [Kontakt armatury s betonom]. Moscow: Strojizdat, 1981. Pp. 184. (rus)
2. Murashev V.I. Crack resistance, rigidity and strength of reinforced concrete. [Treshchinoustojchivost', zhestkost' i prochnost' zhelezobetona]. M.: Strojizdat, 1950. Pp. 268. (rus)
3. Tevelev Yu.A., Dmitriev A.N. Reinforced concrete structures in water construction: design and manufacture. [Zhelezobetonnye konstrukcii v vodohozyajstvennom stroitel'stve: proektirovanie i izgotovlenie. Rosinformagrotekh]. 2006. Pp. 21. (rus)
4. Nikolyukin A.N., Yarcov V.P., Kolomnikova I.I., Al'dzhabubi D.Z. Experimental studies of the adhesion strength of fiberglass reinforcement with cement-sand concrete. [Eksperimental'nye issledovaniya prochnosti scepneniya stekloplastikovoj armatury s cementno-peschanyim betonom. Transportnye sooruzheniya]. 2019. No. 1. doi: 10.15862/02SATS119. (rus)
5. ANSYS Mechanical APDL theory reference. Release 19.0. Canonsburg, Pennsylvania, USA, 2018. P. 952.
6. Drucker D.C., Prager W. Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design. Quarterly of Applied Mathematics. 1952. Vol. 10. No. 2. Pp. 157–165. (rus)
7. Menetrey, P. Numerical Analysis of Punching Failure in Reinforced Concrete Structures. Diss. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, 1994. Pp. 12. (rus)
8. Willam, K. J. and E. P. Warnke. Constitutive Models for the Triaxial Behavior of Concrete. Seminar on Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses. International Association for Bridge and Structural Engineering. 1975. Vol. 19. Pp. 1–30. (rus)
9. Kashevarova G.G., Martirosyan A.S., Travush V.I. Settlement and experimental study of the process of fracture of adhesion bonds when a rigid reinforcing bar is pressed into concrete. [Raschetno-eksperimental'noe issledovanie processa razrusheniya svyazey scepneniya pri vdavlivanii sterzhnya zhestkoj armatury v beton. Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika. 2016. No. 3. Pp. 62–75. (rus)
10. Gizdatullin A.R. Joint work of polymer composite reinforcement with cement concrete in structures. [Sovmestnaya rabota polimerkompozitnoj armatury s cementnym betonom v konstrukciyah]: diss.kand. tekhn. nauk. T.: Kazan, 2018. Pp. 190. (rus)
11. Benin A.V. Mathematical modeling of the process of fracture adhesion of reinforcement with concrete. Part 1. Connection discontinuity models. [Matematicheskoe modelirovanie processa razrusheniya scepneniya armatury s betonom.CH.1. Modeli s uchetom nesploshnosti soedineniya]. Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. 2013. No. 5. Pp. 86–144. (rus)
12. Rimshin V.I., Merkulov S.I. Elements of the theory of development of concrete structures with non-metallic composite reinforcement. [Elementy teorii razvitiya betonnykh konstrukcij s nemetallicheskoj kompozitnoj armaturoj]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2015. No. 5. Pp. 38–42. (rus)
13. Rimshin I.V Kustikova Yu.O. Phenomenological studies of the adhesion of basalt-plastic reinforcement to concrete. [Fenomenologicheskie issledovaniya velichiny scepneniya bazal'toplastikovoj armatury s betonom]. Izvestiya YUZGU. Seriya Tekhnika i tekhnologii. 2011. № 1. Pp. 27–31. (rus)
14. Kudyakov K.L. Strength and crack resistance of flexible concrete elements with basalt fiber and rod glass composite reinforcement under static and short-term dynamic loading. [Prochnost' i treshchinostojkost' izgibaemykh betonnykh elementov s bazal'tofibrovym i sterzhnevym steklokompozitnym armirovaniem pri staticheskom i kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении]: Diss.kand. tekhn. nauk. T.: TGASU. 2018. Pp. 208. (rus)
15. Kokovceva A.V., Semenov S.G. Modeling the process of pulling fiberglass reinforcement from a concrete block. [Modelirovanie processa vydergivaniya stekloplastikovoj armatury iz betonnogo bloka]. Sbornik trudov konferencii c mezhdunarodnym uchastiem «XIII nedelya nauki SPBGPU». 2013. Pp. 182–184. (rus)
16. Gutnikov S.I., Lazoryak B.I Glass fiber. [Steklyannye volokna]: uchebnoe posobie.M.: MGU im. M.V. Lomonosova, 2010. Pp. 53. (rus)
17. Yalciner H., Eren O., Serhan S. An experimental study on the bond strength between reinforcement bars and concrete as a function of concrete cover, strength and corrosion level. Cem Concr. 2012. No. 14. Pp. 643–655.
18. Nikolyukin A.N., Yarcov V.P. CHislennoe modelirovanie kompozitnoj armatury dlya zadachi scepneniya s betonom. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 5. Pp. 56–65. (rus)
19. Nikolyukin A.N., Yartsev V.P. Modeling the coupling of reinforcement in concrete based on an artificial neural network. Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2019. № 3 (43). Pp. 6–16.
20. Yartsev V. Giasov B., Nikolyukin A., Abdul Barei Danish. Giasova I., Aljaboobi D. The impact of high-rise buildings on the living environment. E3S Web of Conferences Ser. High-Rise Construction. 2019. Pp. 10–16. (rus)

21. Mermerdas K., Guneyisi E., Gesoglu M., Ozturan T. Experimental evaluation and modeling of drying shrinkage behavior of metakaolin and calcined kaolin blended concretes. *Constr Build Mater.* 2013. No. 43. Pp. 337–347.

22. Duan ZH., Kou SC., Poon CS. Prediction of compressive strength of recycled aggregate concrete

using artificial neural networks. *Constr Build Mater.* 2013. No. 40. Pp. 1200–1206.

23. Adhikary B.B., Mutsuyoshi H. Prediction of shear strength of steel fiber RC beams using neural networks. *Constr Build Mater.* 2006. No. 20(9). Pp. 801–811.

Information about the authors

Nikolyukin, Alexey N. Postgraduate. E-mail: valax1@yandex.ru. Tambov State Technical University. Russia, 392032, Tambov, st. Michurinskaya, 112.

Yartsev, Viktor P. DSc. E-mail: kzis@nnn.tstu.ru. Tambov State Technical University. Russia, 392032, Tambov, st. Michurinskaya, 112.

Mamontov, Semyon A. Senior lecturer. E-mail: kardinal61@mail.ru. Tambov State Technical University. Russia, 392032, Tambov, st. Michurinskaya, 112.

Kolomnikova, Irina I. Bachelor student. E-mail: kolomnikova_ii@mail.ru. Tambov State Technical University. Russia, 392032, Tambov, st. Michurinskaya, 112

Al Ward A.M. Master student. E-mail: valax1@yandex.ru. Tambov State Technical University. Russia, 392032, Tambov, st. Michurinskaya, 112

Received in October 2019

Для цитирования:

Николюкин А.Н., Ярцев В.П., Мамонтов С.А., Коломникова И.И., Аль Вард А.М. Анализ напряженно-деформированного состояния бетона и арматуры в области их зацепления в программном комплексе ANSYS // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №11. С. 43–52. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-43-52

For citation:

Nikolyukin A.N., Yartsev V.P., Mamontov S.A., Kolomnikova I.I., Al Ward A.M. Analysis of the stress-strain condition of concrete and reinforcement in the area of their engagement in the ansys software package. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov.* 2019. No. 11. Pp. 43–52. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-43-52

DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-53-58

Блажнов А.А.

Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина
Россия, 302019, г. Орёл, ул. Генерала Родина, 69
E-mail: blazhnov47@mail.ru

ПОЛИКАРБОНАТНЫЕ ТЕПЛИЦЫ С ТРАНСФОРМИРУЕМОЙ КРОВЛЕЙ

Аннотация. Рассмотрены однопролётные арочные и рамные теплицы с поликарбонатной кровлей. Культивационные сооружения такого типа поставляются заводами-изготовителями для малых форм хозяйствования. Поликарбонатная кровля имеет ряд преимуществ перед плёчным и стеклянным ограждением: обеспечивает энергосбережение в холодное время года, хорошо сопротивляется ударным нагрузкам, не требует эксплуатационных затрат. Однако в летний период вследствие парникового эффекта в поликарбонатной теплице возможно значительное повышение температуры, снижающее выход сельскохозяйственной продукции и ухудшающее её качество. Максимальное понижение температуры в сооружении возможно при естественном воздухообмене через ленточный вентиляционный проём, создаваемый посредством подъёма коньковой части кровли. По результатам эксперимента на модели теплицы установлены необходимые для снижения внутренней температуры аэрационные параметры – ширина ленточного проёма и высота подъёма кровли, выраженные в функции пролёта культивационного сооружения. Рассмотрена возможность снижения затрат на строительство теплицы в хозяйствах малых форм собственности по сравнению с затратами на теплицы заводской поставки. Предложена конструктивная схема однопролётной рамной теплицы построечного изготовления с каркасом из прокатных профилей с узловыми соединениями на сварке и ограждающими конструкциями из поликарбонатных панелей. Выведены зависимости для определения энергоэкономичных объёмно-планировочных размеров сооружения и расхода стали на элементы каркаса в функции влияющих на него параметров. Для первых трёх снеговых районов обоснован шаг рам каркаса, соответствующий минимуму расхода стали.

Ключевые слова: поликарбонатная теплица, аэрация теплицы, параметры каркаса теплицы.

Введение. Ограждающие конструкции теплиц из поликарбонатных панелей имеют ряд преимуществ по сравнению с плёчным и стеклянным ограждением (основное преимущество – снижение энергозатрат в холодное время года), что обусловило распространение поликарбонатных теплиц как в России, так и за рубежом [1–14]. Однако в летнее время при отсутствии естественной вентиляции температура в сооружении может значительно превышать технологически требуемую и губительно отражаться на выращиваемых культурах, что определяет необходимость обеспечения эффективной аэрации теплицы. Заводская поставка поликарбонатных теплиц требует от застройщика значительных единовременных затрат, увеличивает срок окупаемости сооружения и снижает рентабельность производства. В связи с этим экономически приемлемым решением является изготовление каркаса теплицы в построечных условиях из прокатных стальных профилей с узловыми соединениями на сварке с последующей укладкой поликарбонатных панелей, позволяющее значительно сократить затраты на строительство и не требующее специального оборудования. Для практической реализации такого технического решения необходимо обоснование оптимальных строительных параметров каркаса.

Основная часть. Поликарбонатные теплицы круглогодичного и сезонного использования находят всё большее применение в хозяйствах различных форм собственности. Спрос на теплицы обусловлен значительным увеличением выхода сельскохозяйственной продукции из культивационного сооружения по сравнению с открытым грунтом, а также экономией энергозатрат на отопление в холодный период года. Одним из факторов, отрицательно влияющим на выход тепличной продукции, является высокая внутренняя температура воздуха в тёплый период года. Так, по требованиям норм технологического проектирования теплиц НТП 10–95 температура воздуха для плодоношения огурцов и томатов должна находиться в пределах 22–26 °С. Однако в летнее время температура в теплицах с поликарбонатной кровлей при отсутствии вентиляции вследствие парникового эффекта может достигать 45–50 °С, что значительно снижает урожайность выращиваемых культур.

Эффективно снизить внутреннюю температуру можно посредством удаления перегретого воздуха через ленточный аэрационный проём в верхней части покрытия теплицы [15]. Регулирование температуры в сооружении осуществляется подъёмом коньковой части кровли.

Необходимые для требуемого снижения внутренней температуры аэрационные параметры (ширина проёма в верхней части покрытия, высота подъёма коньковой части кровли) определялись на модели теплицы, изготовленной в масштабе 1:5 применительно к теплице пролётом 9 м (рис. 1, а). Устанавливаемые в процессе исследования параметры считались достаточными, если температура воздуха внутри модели незначительно отличалась от наружной. Для определения рациональных параметров варьировались ширина проёма (а) в покрытии модели теплицы и высота (h) подъёма верхней части кровли (рис. 1, б). Для измерения наружной и внутренней температуры воздуха использовался дистанционный пирометр. На рис. 1, б на раздельных осях абсцисс указаны соотношения исследованных аэрационных параметров, по оси ординат – перепад температур между наружным и внутренним воздухом

а)



б)

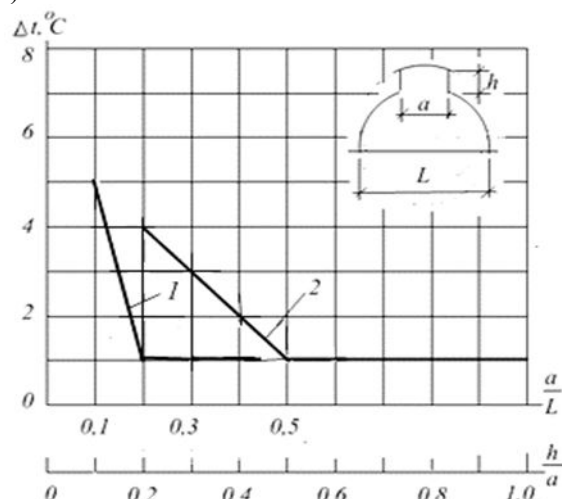


Рис. 1. а – модель теплицы; б – результаты исследования:

- 1 – влияние соотношения ширины проёма (а) к пролёту модели (L) на перепад температур Δt , °C;
2 – влияние соотношения высоты подъёма кровли (h) к ширине проёма (а) на перепад температур Δt , °C

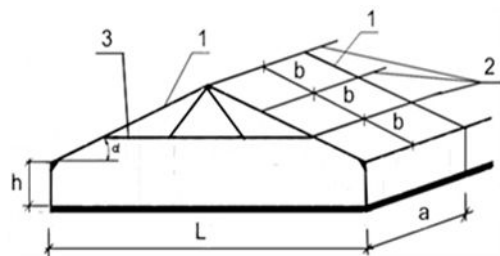


Рис. 2. Конструктивная схема теплицы:

- 1 – сплошная рама из швеллеров;
2 – прогоны из гнутых или прокатных профилей;
3 – затяжка

Полученные результаты могут быть экстраполированы на реальные культивационные сооружения, в том числе и рамной конструкции

$$\Delta t = t_{\text{НАР}} - t_{\text{ВН}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{НАР}}$ – температура воздуха на открытой местности, °C; $t_{\text{ВН}}$ – температура воздуха внутри модели теплицы при открытом вентиляционном проёме, °C.

Результаты исследования позволяют сделать следующие выводы:

- температура воздуха в модели сооружения примерно соответствовала наружной температуре (разность температур ≈ 1 °C) при ширине открытого вентиляционного проёма равной 0,2 пролёта (ширины) модели – график 1 на рис. 1, б;
- примерное равенство наружной и внутренней температур (разность температур ≈ 1 °C) обеспечивалось при высоте подъёма (h) коньковой части кровли равной 0,5 ширины вентиляционного проёма (a) равной 0,2L – график 2 на рис. 1, б.

(рис. 2), характеризуемой лучшим коэффициентом ограждения (отношением площади ограждающих конструкций к площади застройки), чем арочная теплица. Так, для рамной теплицы площадью 500 м² с оптимальными объемно-планировочными параметрами коэффициент ограждения равен 1,55, для арочной теплицы такой же площади – 1,65. То есть, примерно на 6 % площадь поликарбонатного ограждения и теплотери в холодное время года у рамной теплицы будут меньше.

Заводская поставка и монтаж теплиц требуют значительных единовременных затрат, изменяющихся в зависимости от типа сооружения и его инженерного оснащения от 2 до 5 тысяч руб/м² [6], что в дальнейшем может обусловить

нерентабельность производства. Значительно сократить затраты на строительство (в 2–3 раза) возможно при изготовлении теплицы непосредственно в хозяйстве. С целью снижения затрат обосновывались объёмно-планировочные параметры сооружения, разрабатывалась и оптимизировалась конструктивная схема теплицы построения из изготовления из прокатных профилей с узловыми соединениями на сварке (рис. 2). Площадь теплицы в соответствии с номенклатурой теплиц для фермерских хозяйств в нормах технологического проектирования теплиц НТП10-95 принималась равной 500 м². Определялся оптимальный пролёт сооружения, соответствующий минимуму коэффициента ограждения (Когр)

$$K_{огр} = \frac{2h}{L} + \frac{1}{\cos \alpha} + \frac{2h}{A} + \frac{L}{2A} \operatorname{tg} \alpha, \quad (2)$$

где h – высота продольного светопрозрачного ограждения (в соответствии с СП 107.13330.2012 «Теплицы и парники» для ангарных теплиц минимально равная 1,5 м); L и A – соответственно пролёт и длина теплицы ($A = F/L$, где F – принятая площадь теплицы); α – угол наклона скатов кровли (не менее 25° по СП 107.13330.2012).

Заменив $A = F/L$ в формуле (2) и про дифференцировав выражение по L , после преобразований получим кубическое уравнение, из которого после подстановки h и $\operatorname{tg} \alpha$ установим пролёт теплицы, соответствующий минимуму коэффициента ограждения: $L_{опт} = 12$ м.

Для определения оптимальных строительных параметров каркаса устанавливались закономерности изменения расхода металла на основные конструктивные элементы теплицы (прогоны, рамы) в зависимости от влияющих на них факторов. Для прогонов из швеллеров при угле наклона скатов $\alpha = 30^\circ$ установлена зависимость расхода стали на 1 м² площади теплицы

$$G_{пр} = \frac{q^H a^3}{93,12} + \frac{4,1}{b} \text{ кг/м}^2, \quad (3)$$

где a – пролёт прогона (шаг рам каркаса), м; q^H – нормативное значение нагрузки на горизонтальную проекцию покрытия, кН/м²; b – расстояние между прогонами, м.

Из зависимости (3) следует, что с увеличением шага прогонов расход стали на них снижается (величина b находится в знаменателе). Максимальный шаг прогонов (b_{max}), ограничиваемый предельно допустимой деформацией кровельных поликарбонатных панелей (f), определялся из формулы

$$f = \frac{b}{150} = k \frac{q^H b^4}{EI}, \text{ откуда } b_{max} = \sqrt[4]{\frac{0,007 EI}{k q^H}}, \quad (4)$$

где E – модуль упругости поликарбонатных листов равный 2 300 Н/мм² по DIN 53457; I – момент инерции 1 м ширины поликарбонатного листа толщиной 16 мм равный 9,75 см⁴ [6]; k – коэффициент, учитывающий прогиб листов при многопролётной схеме опирания, равный 0,0068 [16].

Установлено, что для I снегового района по СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» ($q^H = 0,22$ кН/м²) $b_{max} = 1,20$ м, для II района ($q^H = 0,424$ кН/м²) – 1,0 м, для III района ($q^H = 0,636$ кН/м²) – 0,85 м.

Для нахождения закономерностей расхода стали на рамы каркаса теплицы применялась статистическая обработка результатов вычислений [17–19]. Так, для I – III снеговых районов установлены следующие зависимости расхода стали на рамы каркаса

$$G_I = 1,01 + 0,091 L + \frac{5,35}{a} + \frac{0,5L}{a} \text{ кг/м}^2, \quad (5)$$

$$G_{II} = 1,63 + 0,10 L + \frac{5,21}{a} + \frac{0,64L}{a} \text{ кг/м}^2, \quad (6)$$

$$G_{III} = 1,63 + 0,12 L + \frac{5,21}{a} + \frac{0,76L}{a} \text{ кг/м}^2, \quad (7)$$

Сварные рамы каркаса сплошного сечения рассчитывались как бесшарнирные. По сравнению с более лёгкими сквозными рамами сплошные рамы проще в изготовлении, монтаже и защите от коррозии в условиях фермерского хозяйства. Элементы рам подбирались из прокатных швеллеров по ГОСТ 8240 – 97 «Швеллеры стальные горячекатаные. Сортамент». Расход стали на рамы определялся в основном вертикальной нагрузкой, изменение ветровой нагрузки от 0,20 до 0,40 кН/м² расход стали увеличивало незначительно.

Шаг рам, соответствующий минимуму расхода стали на каркас сооружения для конкретного снегового района, устанавливался суммированием зависимости (3) и соответствующей зависимости из (5–7), дифференцированием полученного выражения по a и подстановкой в производную значений $L_{опт}$ и q^H . Так, для I снегового района при $L_{опт} = 12$ м и $q^H = 0,22$ кН/м² оптимальный шаг рам каркаса $a_{опт} = 6,35$ м, для II района $a_{опт} = 5,55$ м, для I II района $a_{опт} = 5,15$ м. Для установленных оптимальных значений шага рам удельный расход стали на каркас в I, II и III снеговых районах соответственно равен 7,9, 10,0 и 11,8 кг/м².

Выводы. Показана возможность аэрации поликарбонатных теплиц арочной и рамной конструктивных форм посредством устройства ленточного вентиляционного проёма в коньковой части сооружения и перемещения верхней части

кровли в вертикальной плоскости. Экспериментом на модели теплицы определены необходимые для требуемого снижения внутренней температуры аэрационные параметры в функции пролёта теплицы.

С целью снижения единовременных затрат для малых форм хозяйствования предложена однопролётная теплица построечного изготовления с рамным каркасом из прокатных профилей с узловыми соединениями на сварке. Обоснованы рациональные строительные параметры сооружения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Блажнов А.А. О применении сотового поликарбоната в ограждающих конструкциях зимних теплиц // Вестник строительства и архитектуры. 2017. №6. С. 96–106.
2. Саттарова Р. Сотовый поликарбонат – теплосберегающее покрытие для фермерских теплиц // ГАВРИШ. 2017. №2. С. 48–49.
3. Мухачёв А.Д. Применение поликарбонатов в качестве энергоэффективной светопрозрачной конструкции // Образование, наука, производство: материалы VII Междунар. молодежного форума. БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород: Изд-во БГТУ. 2015. С.1326-1329.
4. Нуралин Б.Н., Некрасов В. Г., Мурзагалиев А.Ж., Шевченко С.А., Константинов М.М. Зимние теплицы для континентального климата // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. №3(65). С.81–84.
5. Новикова Ю.К., Голованова Л.А. Обзор современных светопрозрачных материалов // Новые идеи нового века - 2015: материалы XV Междунар. науч. конф. ФАДТОГУ. Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет. 2015. Т.3. С. 260–265.
6. Блажнов А.А., Фетисова М.А. Производственные сооружения для фермерских хозяйств. Орёл: ООО ПФ «Картуш». 2017, 132 с.
7. Юдаев И.В. Изучение светопропускающих свойств сотового поликарбоната–покрывного материала круглогодичных теплиц // Научный журнал Кубанского ГАУ. 2016. №120(06). С. 239-252.
8. Свойства поликарбоната и его широкое применение в современном мире [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <https://promresursy.com/materialy/polimery/polikarbonat/svoistva.html> (дата обращения: 14.10.2019).
9. Преимущества поликарбонатных теплиц [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <https://samostrojka.ru/materialy/preimushhestva-polikarbonatnyh-teplic.html> (дата обращения: 14.10.2019).
10. Теплицы Фермер от производителя [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: msk.teplicy.ru (дата обращения: 14.10.2019).
11. Теплицы из поликарбоната: преимущества и недостатки [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <https://dekoriko.ru/teplica/iz-polikarbonata-preimushchestva-i-nedostatki> (дата обращения: 14.10.2019).
12. Қазақстанда поликарбонаттан жасалған жылыжайлар [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <https://satu.kz/Teplitsy-iz-polikarbonata.html> (дата обращения: 11.10.2019).
13. Теплиці з полікарбонату в Україні [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <https://prom.ua/Teplitsy-iz-polikarbonata.html> (дата обращения: 15.10.2019).
14. Цяпліцы беларускай вытворчасці [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <https://pan.by/dacha-i-sad/teplitsy-parniki-i-ukryvnoy-material/teplitsy-belarus> (дата обращения: 15.10.2019).
15. Пат.193004, Российская Федерация, МПК А01G9/24(2006.01). Устройство для естественной вентиляции теплиц / А.А. Блажнов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Орловский ГАУ. № 2019102444; заявл. 29.01.2019; опубл. 09.10. 2019, Бюл. №2 8.
16. Справочник проектировщика. Расчётно-теоретический/ под ред. А.А.Уманского. В 2 кн. Кн.1. М.: Стройиздат. 1972, 600 с.
17. Елисеева И.И., Юзбашев М.М. Общая теория статистики. М.: Финансы и статистика. 2004, 656 с.
18. Айвазян С.А. Прикладная статистика. Основы эконометрики. М.: ЮНИТИ-ДАНА. 2013, 432 с.
19. Елисеева И.И. Практикум по эконометрике. М.: Финансы и статистика. 2005, 192 с.

Информация об авторах

Блажнов Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры агропромышленного и гражданского строительства. E-mail: blazhnov47@mail.ru. Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина. Россия, 302019, г. Орёл, ул. Генерала Родина, д. 69.

Поступила в октябре 2019 г.

© Блажнов А.А. 2019

Blazhnov A.A.

Oryol State Agrarian University named after N.V. Parakhin

Russia, 302019, Oryol, General Rodina St., 69

*E-mail: blazhnov47@mail.ru

POLYCARBONATE GREENHOUSES WITH CONVERTIBLE ROOF

Abstract. Single-span arch and frame greenhouses with polycarbonate roof are considered. Cultivation facilities of this type are supplied by manufacturers for small forms of management. Polycarbonate roof has a number of advantages over plastic and glass fencing: it provides energy saving during the cold season, resists impact loads and does not require operating costs. However, during the summer, due to the greenhouse effect in the polycarbonate greenhouse, a significant temperature increase is possible, reducing the yield of agricultural products and deteriorating its quality. The maximum decrease in temperature in the structure is possible with natural air exchange through a tape ventilation opening created by lifting the ridge part of the roof. According to the results of the experiment, the aeration parameters necessary to reduce the internal temperature are established on the model of the greenhouse - the width of the tape opening and the height of the roof, expressed as a function of the span of the cultivation structure. The possibility of reducing the costs for the construction of a greenhouse in small form of ownership farms compared to the costs for the greenhouse of the factory supply are considered. The constructive scheme of a single-span frame greenhouse of construction production with a frame from rolling profiles with nodal connections on welding and enclosing designs from polycarbonate panels is offered. The dependences for determination of energy-efficient space-planning dimensions of the structure and steel consumption on the frame elements as a function of the parameters influencing it are derived. For the first three snow areas the pitch of frame frames corresponding to the minimum of steel consumption is justified.

Keywords: polycarbonate greenhouse, greenhouse aeration, greenhouse frame parameters.

REFERENCES

1. Blazhnov A.A. On the application of cellular polycarbonate walling winter greenhouses [O primeneni sotoovogo polikarbonata v ograzhdayushchih konstrukciyah zimnih teplic]. Bulletin of construction and architecture No. 6. 2017. Pp. 96–106. (rus)
2. Sattarova R. Polycarbonate – heat-saving coating for farm greenhouses [Sotovyj polikarbonat – teplosberegayushchee pokrytie dlya fermerskih teplic]. GAVRISH. Moscow. Research Institute of vegetable growing of the protected ground. 2017. No. 2. Pp. 48–49. (rus)
3. Muhachyov A.D. Use of polycarbonates as energy-efficient glass design [Primenenie polikarbonatov v kachestve ehnergoehffektivnojsvetoprozrachnoj konstrukcii]. Proceedings VII international youth forum «Education, science, production». Belgorod state technological University named after V. G. Shukhov. 2015. Pp. 1326–1329. (rus)
4. Nuralin B.N., Nekrasov V.G., Murzagaliev A. Zh., Shevchenko S.A., Konstantinov M. M. Winter greenhouses for continental climate [Zimnie teplicy dlya kontinental'nogo klimata]. Bulletin of the Orenburg state agrarian University. 2017. No. 3(65). Pp. 81–84. (rus)
5. Novikova Yu.K., Golovanova L.A. Review of modern translucent materials [Obzor sovremennyh svetoprozrachnyh materialov]. Proceedings of the XV international scientific conference «The new Ideas of New Century – 2015». Khabarovsk. FADTOGU. 2015. V.3, Pp. 260–265. (rus)
6. Blazhnov A.A., Fetisova M.A. Production facilities for farms [Proizvodstvennye sooruzheniya dlya fermerskih hozyajstv]. Orel: Publishing house Kartush. 2017. 132 p. (rus)
7. Yudaev I.V. Investigation of the light transmitting properties of cellular polycarbonate - covering material of year-round greenhouses [Izuchenie svetopropuskayushchih svoystv sotoovogo polikarbonata – pokrovnogo materiala kruglogodichnyh teplic]. Scientific journal of the Kuban GAU. 2016. No. 120 (06). Pp. 239–252. (rus)
8. Properties of polycarbonate and its wide application in the modern world. Available at: <https://promresursy.com/materialy/polimery/polikarbonat/svoistva.html> (accessed 14.10.2019). (rus)
9. Advantages of polycarbonate greenhouses. Available at: <https://samostrojka.ru/materialy/preimushhestva-polikarbonatnyh-teplic.html> (accessed 14.10.2019). (rus)
10. Greenhouse Farmer from the manufacturer. Available at: msk.teplisy.ru (accessed 14.10.2019). (rus)
11. Polycarbonate greenhouses: advantages and disadvantages. Available at: <https://dekoriko.ru/teplica/iz-polikarbonata-preimushchestva-i-nedostatki> (accessed 14.10.2019). (rus)
12. Polycarbonate greenhouses in Kazakhstan. Available at: <https://satu.kz/Teplisy-iz-polikarbonata.html> (accessed 11.10.2019). (rus)
13. Polycarbonate greenhouses in Ukraine. Available at: <https://prom.ua/Teplisy-iz-polikarbonata.html> (accessed 15.10.2019). (rus)

14. Greenhouses of Belarusian production. Available at: <https://pan.by/dacha-i-sad/teplitsy-parniki-i-ukryvnoy-material/teplitsy-belarus> (accessed 15.10.2019). (rus)

15. Blazhnov A.A. Device for natural ventilation of greenhouses. Patent RF, no 2019102444, 2019.

16. Directory of the designer. Calculated-theoretical [Spravochnik proektirovshchika. Raschyotno-teoreticheskij]. Edited by A. A. Umansky. In 2 books. Book 1. Moscow: Stroizdat. 1972, 600 p. (rus)

17. Eliseeva I.I., Yuzbashev M.M. General theory of statistics [Obshchaya teoriya statistiki]. Moscow: Finance and statistics. 2004, 656 p. (rus)

18. Ajvazyan S.A. Applied statistics. Basic econometrics [Prikladnaya statistika. Osnovy ehkonometriki]. Moscow: UNITY-DANA. 2013, 432 p. (rus)

19. Eliseeva I.I. Workshop on econometrics [Praktikum po ehkonometrike]. Moscow: Finance and statistics. 2005, 192 p. (rus)

Information about the authors

Blazhnov, Aleksander A. PhD, Assistant professor. E-mail: blazhnov47@mail.ru. Oryol State Agrarian University named after N.V. Parakhin. Russia, 302019, Orel, st. General Rodina, 69.

Received in October 2019

Для цитирования:

Блажнов А.А. Поликарбонатные теплицы с трансформируемой кровлей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 11. С. 53–58. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-53-58

For citation:

Blazhnov A.A. Polycarbonate greenhouses with convertible roof. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 11. Pp. 53–58. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-53-58

DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-59-65

Иванова О.Н., Горожанкин В.К.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46***E-mail: Olaivanova@yandex.ru*

СУБСТАНЦИИ КОМПОЗИТНОЙ ФОРМЫ

Аннотация. Архитектура как язык социальной коммуникации воплощает художественное содержание в разных формах, которые связаны с организацией профессионального труда. В период ремесленного производства зодчий – главный строитель, в постройках выражал космическую гармонию созданной Творцом Вселенной. Став проектировщиком, архитектор выражал математические пропорции в композитных формах здания-чертежа. Разделение труда в проектировании привело к дифференциации композитной формы на функциональную форму, композиционную форму и конструктивную форму. Индустриализация проектирования вела композитную концепцию к развитию пространственных понятий и формированию средового подхода. Развитие формообразующего мышления архитектора привело к созданию новых инновационных экологических архитектурных материалов. Уникальные технологии изготовления позволяют создавать безупречную плоскостность и гибкость композитных материалов, связанную с отсутствием внутреннего напряжения. Это привело к созданию пространственных конструкций без швов в разных температурных и климатических условиях. Статья систематизирует профессионально-проектный опыт, сосредоточенный в понятии композитная форма, называя интегрированную, дифференцированную, и многослойную суперпозиции проектной графики и тела постройки.

Ключевые слова: интегрированная, дифференцированная, многослойная композитные формы, ордерная, функциональная, параметральная суперпозиции.

Карл Маркс в труде «Капитал» писал о том, что даже плохой архитектор отличается от лучшей пчелы тем, что в его голове ещё до начала строительства имеется план [1]. «План в голове» свидетельствует о способности к профессиональной рефлексии, завершающей частью которой является управление принятием решений [2]. Однако, за такую способность ни один человек ещё не был объявлен архитектором; чтобы получить диплом необходимо научиться такой план из головы извлекать, придав мысли знаковую форму в виде постройки, либо чертежа или макета (3Д модели) для обсуждения замысла, демонстрация квалификации и других видов коммуникации. Как и в других искусствах, архитектор создаёт художественную форму, которая служит преобразованию естественного материала в искусственную структуру.

Интегрированная композитная форма.

Открытие композитной формы. Маркс также писал о том, что содержание труда «застывает» в продукте: рабочий прял и его продуктом является пряжа. Подобно архитектурная форма выражает содержание профессионального труда: если архитектор чертил, то его чертёж и его постройка «срослись в фасаде». Другими словами, фасад, являясь чертежом и частью здания, представляет «композитную форму» явления архитектуры, предстаёт зрителю видами её «суперпозиций» - наложения, объединения и синтеза чертежа и тела здания. Первым случаем, названным

в теории архитектуры ордерной суперпозицией, был римский Колизей, трёхъярусная аркада которого декорирована мужественным тосканским ордерам на нижнем ярусе, средний ярус декорирован ионическим ордерам, верхний – легким коринфским. О принципе суперпозиции в зарождающейся проектной культуре заявил Л.-Б. Альберти: «вся архитектура заключена в постройках и очертаниях» [3].

Суперпозиция архитектурных изображений. Один из первых образцов светской архитектуры эпохи Возрождения палаццо Руччеллаи представил «картонный» фасад. «Прорисованные» русты, особенно крупный руст на стене первого этажа, производят впечатление мощи. На фон «картинной» кладки наложен рисунок, имитирующей суперпозицию ордерам. Его основными элементами стали пилястры и антаблемент: на первом этаже - пилястры тосканского ордера, в ордере второго этажа пилястры с оригинальной капителью, разработанной Альберти, на третьем - коринфский ордер в упрощенном варианте. Окна на втором и третьем этажах сдвоены под арками. Фасад, смонтированный из подчеркнутых уплощенных ордерам компонентов, усиливает изобразительный характер пластики «интегрированной» композитной формы (рис. 1).

Дифференцированная композитная форма.

Суперпозиция геометрических объёмов. Другим признанным модельером композитной

формы эпохи Возрождения был А. Палладио, оставивший последователям «Четыре книги об архитектуре», содержащими экспликацию авторских проектов. Всем известная вилла Ротонда демонстрируют формообразование методом составления композиции из простейших геометрических тел – «стандартных примитивов», что

нашло продолжение в истории, как в движении «неопалладианцев», так и в пуристической теории Ле Корбюзье, теориях формальной композиции, и в проектах других модернистов [4, 5] (рис. 2).



Рис. 1. Л.Б. Альберти. Палаццо Ручеллаи. Рим, 1451. Интегрированная композитная форма

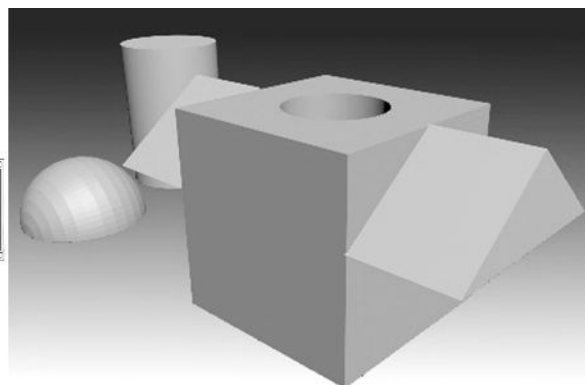
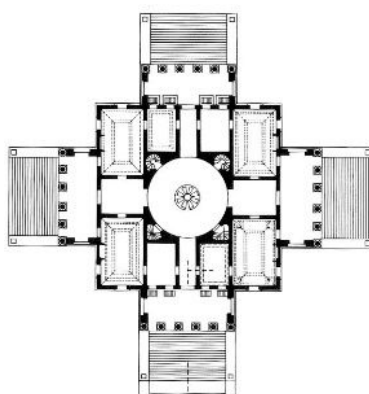


Рис. 2. А. Палладио. Вилла Ротонда близ Виченцы, 1566. Составная композитная форма

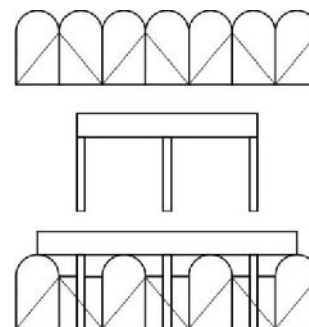
Монтаж типических образов. Смещая ближе/дальше объёмы двух античных базилик, воображение мастера сформировало композитный фасад способом монтажа их порталов (рис. 3).



Рис. 3. А. Палладио. Церковь Иль Редентоне. Венеция, 1592 (монтаж базилик).

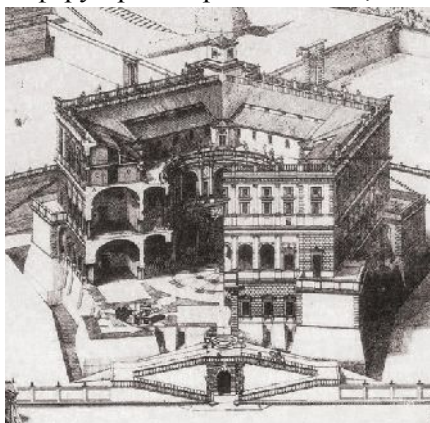


Рис. 4. А. Палладио. Базилика в Венеции, 1549



Многослойная композитная форма

Расслоение композитной формы на изображение и строительный объем предпринял Дж. Виньола в «правилах пяти ордеров архитектуры» [7]. Название книги не содержит различия между черчением и изготовлением деталей ордера из мрамора или дерева, однако, описанное в книге ордерное моделирование свидетельствует об уходе архитектора в сферу проектирования. Так,



например, 32 центра в глазке валюты нужны для вычерчивания спирали ионической капители и были бы бесполезны в работе скульптора. Графические принципы архитектурного формообразования побудили И.В. Михайловского обратиться к урокам античного зодчества и дополнить положения ордерной теории Дж. Виньолы сведениями из материаловедения [8] (рис. 6).

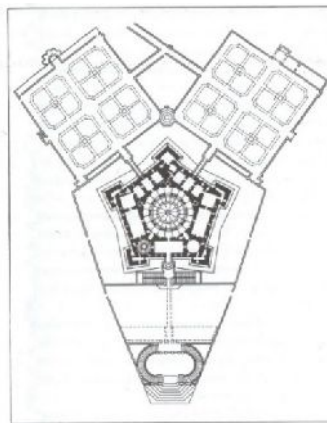


Рис. 6. Дж. Виньола. Вилла Фарнезе в Капрарола, 1559 – тотальность схем симметрических построений сросшихся с объёмом

Функциональная суперпозиция. Следующим шагом в развитии формообразующего мышления архитектора стал предмет формальной композиции, выделенный проектированием в самостоятельную область [9]. Однако и открытие функции американскими прагматиками, наиболее полно выраженное в диалогах Г.Л. Салливена, несёт композиционный оттенок [10]. «Беседы в детском саду» иллюстрируют формулу следования формы за функцией такими примерами: «форма облака следует функции облака, форма дуба следует функции дуба, форма ручья следует функции ручья...» [11]. Динамичная, стабильная и ритмичная формы – примеры формообразующих процессов природы, «естественного слоя» функциональных форм, которых подражал архитектор.

Функционально-зависимый принцип формообразования в работах американских теоретиков искал «последнее доказательство» истины в обращении к Природе, но сразу же был обращён на внутренние, «искусственные» процессы проектного труда, включая разделение труда, отражённое в формуле «функция – форма - конструкция» [12]. Функциональный принцип формообразования, декларированный как природный, не развивает в теоретической рефлексии зависимость от средств проектной деятельности, поэтому область функциональной графики всё ещё не стала предметом специальных исследований, хотя уже ведутся работы по исследованию схем транспортных связей и коммуникаций [13].

Межпредметное пространство, как дистанция между предметами или напряжённая пустота, разделяющая вещи, и **внутреннее пространство** – ограниченное вместилище, контейнер, были неоднократно толкованы теоретиками архитектуры и искусствоведами, и представляют пример «кальки» «естественной» функциональной формы [4, 11, 14]. В обзоре концепций архитектурного пространства Раппапорт А.Г. выделил три группы онтологических категорий: математическое пространство измерений; символическое пространство понятий; поэтическое пространство феноменов [15]. Принципы символического пространства, извлекаемые метаболическими из традиций дзэн-буддизма, сделали популярной ссылку на историю японских садов, методическая актуальность которых создали суперпозицию слоёв исторического аналога и современного объекта (рис. 7). Концепции пространства развивались в 60-е годы, в том числе известный в России «средовой подход». Концепция предметно-пространственной среды связала и сопригляла межпредметные отношения с социальным

поведением, опосредованные в «языках среды» [16–18]. (рис.8).



Рис. 7. Символическое пространство: сад камней монастыря Рёандзи в Киото, 1450



Рис. 8. Суперпозиция ролевых и пространственных отношений в средовом подходе

Параметрические суперпозиции арт-объектов. В последней четверти XX века деконструктивизм активно развивает метод суперпозиции, интерпретируемый как наложение слоёв проектных изображений пространственной морфологии. Метод суперпозиции получил международное признание во время проведения конкурса на парк XXI века (рис. 9). Отметим, что в составе (деконструктивной) суперпозиции нет слоя естественных объектов или традиционной морфологии, поэтому на его языке каждый раз формируется новый (не архитектурный, и не строительный) объект, за которым в автоматизированном проектировании закрепилось название BIM, в более широком круге используется термин параметральная модель, понятие, введенное Патриком Шумахером [19]. Метод параметральной суперпозиции характеризует принцип «искусственных» слоев пришедший в проектирование из популярного искусства – из опыта создания арт-ландшафтов и других арт-объектов средового дизайна (рис. 10).

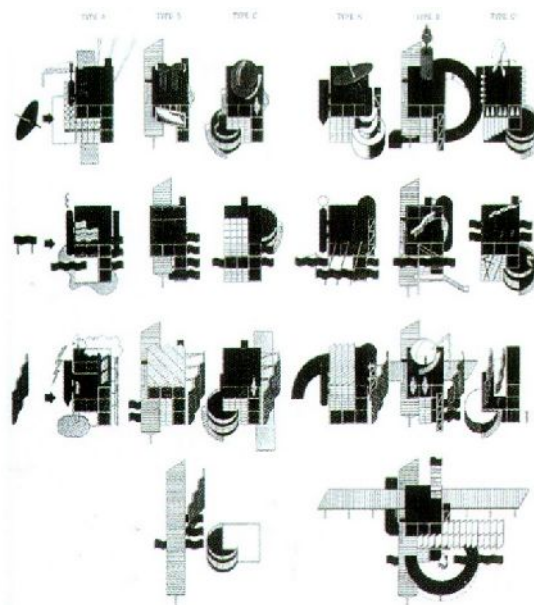
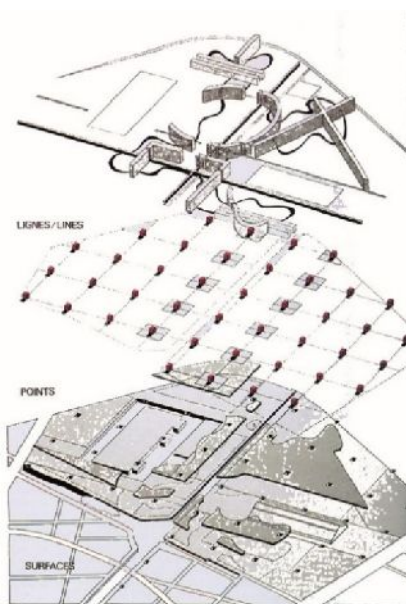


Рис. 9. Б. Чуми. Конкурсный проект парка Ла-Вилет представил суперпозиции слоев: «линии», «точки» и «поверхности». Справа концепт слоя «точки» - объектов-павильонов. Париж, 1983

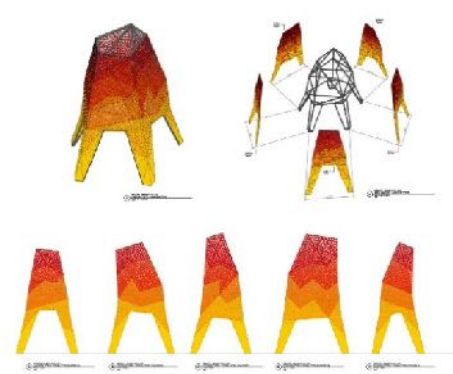


Рис. 10. М. Шварц. Ржавый парк в Фленгминге, 2003

Развитие формообразующего мышления архитектора привело к созданию новых инновационных экологических архитектурных материалов. Уникальные технологии изготовления позволяют создавать безупречную плоскостность и гибкость, связанную с отсутствием внутреннего напряжения, обладают антибактериальными свойствами. В твердости, прочности, долговечности, новые композитные материалы не уступают натуральным, а чаще и превосходят их, что привело к созданию пространственных конструкций без швов в разных температурных и климатических условиях [20].

Источник финансирования. Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Маркс К. Капитал. Критика политической экономики. том1. М., Политиздат, 1973, 902 с.
2. Лефевр В.А. Конфликтующие структуры. М.: Изд-во Советское радио, 1973. 158 с.
3. Альберти Леон Батиста. 10 книг о зодчестве. М.: Академия архитектуры, 1937, Т. 1,2.
4. Кринский В.Ф., Ламцов И.В., Туркус М.А. Элементы архитектурно-пространственной композиции. М.: Стройиздат, 1968.
5. Ле Корбюзье. Новый дух в архитектуре. М.: Strelka Press, 2017. 120 с.
6. Палладио А. Четыре книги об архитектуре. ИАА, 1938. 345 с.
7. Виньола Дж. Правило пяти ордоров архитектуры. М.: Архитектура – С, 2005. 160 с.
8. Михайловский И.Б. Теория классических архитектурных форм. М.: ИАА, 1944. 263 с.
9. Ремизова Е.И. Логические структуры композиционного языка архитектуры: Автореферат докторской диссертации. Харьков, 2013. 36 с.
10. Иконников А.В. Функционализм в дизайне и архитектуре. Функция вещи как предмет исследования в дизайне. Труды ВНИИТЭ, ТЭ. №39. М.: 1982. С. 31–41.

11. Азизян И.А., Добрицына И.А., Лебедева Г.С. Теория композиции как поэтика архитектуры. М.: Прогресс-Традиция, 2002. 568 с.

12. Буряк А.П. Развитие и функции системы графических средств современного архитектурного проектирования. Автореферат на соискание учёной степени кандидата архитектуры. М.: ЦНИИТА, 1979. 16 с.

13. Зейтун Ж. Организация внутренней структуры проектируемых систем. М.: Стройиздат, 1984. 160 с.

14. Арнхейм Р. Динамика архитектурных форм. М.: Стройиздат, 1984. 192 с.

15. Раппапорт А.Г. К пониманию архитектурной формы. Автореферат диссертации доктора искусствоведения. М.: НИИТИАИГ, 2002.

16. Глазычев В.Л. Социально-экологическая интерпретация городской среды. М.: Наука, 1984. 187 с.

17. Шимко В.Т. Основы дизайна и средовое проектирование. М.: Архитектура-С, 2005. 160 с.

18. Горожанкин В.К. Сюжеты тектонических суперпозиций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, 2016 № 4. С. 47–52.

19. Картадзе С. Анатомия архитектуры. Семь книг о логике, форме и смысле. М.: изд. дом Высшей школы экономики, 2018. 472 с.

20. Андреева Е.Ю. Постмодернизм. Искусство второй половины XX – начала XXI века. СПб.: Азбука-Классика, 2007. 488 с.

Информация об авторах

Иванова Ольга Николаевна, магистрант кафедры архитектуры и градостроительства. E-mail: Olaivanova@yandex.ru; Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Горожанкин Валентин Константинович, старший преподаватель кафедры архитектуры и градостроительства. E-mail: gorozhankin.vk@bstu.ru; vk.goro@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в сентябре 2019 г.

© Иванова О.Н., Горожанкин В.К. 2019

***Ivanova O.N., Gorozhankin V.K.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46

**E-mail: Olaivanova@yandex.ru*

SUBSTANTIES OF COMPOSITE FORM

Abstract. *Architecture as a language of social communication embodies the artistic content in various forms that are associated with the organization of professional work. During the period of handicraft production, the architect-the main builder, expressed the cosmic harmony of the Universe made by the Creator. Being a designer, an architect expressed mathematical proportions in the composite forms of the building drawing. The division of labor in design led to the differentiation of the composite form into a functional form, compositional form and constructive form. Industrialization of design led a composite concept to the development of spatial concepts and the formation of an environmental approach. The development of formative thinking of the architect led to the creation of new innovative eco-friendly architectural materials. Unique manufacturing techniques allow to create perfect flatness and flexibility of composite materials associated with the absence of internal stress. This led to the creation of spatial structures without seams in different temperature and climatic conditions. The article systematizes professional design experience concentrated in the concept of composite form, calling the integrated, differentiated and multilayer superpositions of design graphics and the the construction body.*

Keywords: *integrated, differentiated, multilayer composite forms; order, functional, parametric superposition.*

REFERENCES

1. Marx K. Capital. Criticism of political economy. Volume 1. [Kapital. Kritika politicheskoy ekonomiki. tom1] M., Politizdat, 1973, 902 p. (rus)
2. Lefebvre V.A. Conflicting structures. [Konfliktuyushchie struktury] Moscow: Sovetskoe

radio Publ., 1973. 158 p. (rus)

3. Alberti Leon Batista. 10 books about architecture [10 knig o zodchestve]. Moscow: Academy of architecture, 1937, vol. 1,2. (rus)

4. Krinsky V.F., Lomzov I.V., Turkus M.A. The Elements of the architectural-spatial

composition. [Elementy arhitekturno-prostranstvennoj kompozicii.] Moscow: Stroizdat, 1968. (rus)

5. Le Corbusier. A new spirit in architecture [Novyj duh v arhitekture]. M.: Strelka Press, 2017. 120 p. (rus)

6. Palladio A. The Four books on architecture [Chetyre knigi ob arhitekture]. IAA, 1938. 345 p. (rus)

7. Vignola J. Rule of the five orders of architecture [Pravilo pyati orderov arhitektury]. Moscow: Architectura-S, 2005. 160 p. (rus)

8. Mikhailovsky I.B. Theory of classical architectural forms. [Teoriya klassicheskikh arhitekturnyh form]. Moscow: IAA, 1944. 263 p.

9. Remizova E.I. Logical structures of the compositional language of architecture: abstract of the doctoral dissertation. [Logicheskie struktury kompozitsionnogo yazyka arhitektury: Avtoreferat doktorskoj dissertacii]. Kharkiv, 2013. 36 p.

10. Ikonnikov A.V. Functionalism in design and architecture. Function of a thing as a research subject in design. [Funkcionalizm v dizajne i arhitekture. Funkciya veshchi kak predmet issledovaniya v dizajne]. Proceedings of VNIITE, TE No. 39. Moscow: 1982. Pp. 31–41. (rus)

11. Azizyan I. A., Dobritsyna I. A., Lebedeva G. S. Theory of composition as poetics of architecture. [Teoriya kompozicii kak poetika arhitektury]. Moscow: Progress-Tradition, 2002. 568 p. (rus)

12. Buryak A. P. Development and functions of the system of graphic means of modern architectural design. – Author's abstract on competition of a scientific degree of candidate of architecture. [Razvitie i funkciy sistemy graficheskikh sredstv sovremennogo arhitekturnogo proektirovaniya. –

Avtoreferat na soiskanie uchyonoy stepeni kandidata arhitektury]. M: CNIIA, 1979. 16 p. (rus)

13. Zeitun Zh. Organization of the internal structure of the designed systems. [Organizatsiya vnutrennej struktury proektiruemykh sistem]. Moscow: Stroizdat, 1984. 160 p. (rus)

14. Arnheim R. the Dynamics of architectural form. [Dinamika arhitekturnyh form]. Moscow: Stroizdat, 1984. 192 p. (rus)

15. Rappaport A.G. To understanding the architectural form. Abstract of the dissertation of the doctor of art criticism. [K ponimaniyu arhitekturnoy formy. Avtoreferat dissertatsii doktora iskusstvovedeniya]. M.: NIETIG, 2002. (rus)

16. Glazychev V.L. Social and ecological interpretation of the urban environment. [Social'no-ekologicheskaya interpretatsiya gorodskoy sredy]. Moscow: Nauka, 1984. 187 p. (rus)

17. Shimko V.T. Fundamentals of design and environmental design. [Osnovy dizajna i sredovoe proektirovanie]. Moscow: Architectura-S, 2005. 160 p. (rus)

18. Gorozhankin V.K. Plots of tectonic superpositions. [Syuzhety tektonicheskikh superpozitsiy]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov 2016 No. 4. Pp. 47–52. (rus)

19. Carterize S. the Anatomy of architecture. Seven books on logic, form and meaning. [Anatomiya arhitektury. Sem' knig o logike, forme i smysle]. Moscow: ed. house of Higher school of Economics, 2018. 472 p. (rus)

20. Andreeva E. Yu. Postmodernism. Art of the second half of the twentieth-early XXI century. [Postmodernizm. Iskustvo vtoroy poloviny HKH – nachala XXI veka]. SPb.: ABC Classics, 2007. 488 p. (rus)

Information about the authors

Ivanova, Olga N. Master student. E-mail: Olaivanova@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, d. 46.

Gorozhankin, Valentin K. Senior lecturer. E-mail: gorozhankin.vk@bstu.ru; vk.goro@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in September 2019

Для цитирования:

Иванова О.Н., Горозжанкин В.К. Субстанции композитной формы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 11. С. 59–65. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-59-65

For citation:

Ivanova O.N., Gorozhankin V.K. Substanties of composite form // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 11. Pp. 59–65. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-59-65

DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-66-72

Кочеткова Т.В., Алейникова Н.В.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46***E-mail: taniakoch_1997@mail.ru*

КОМФОРТНОСТЬ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

Аннотация. *Идея создания комфортного, по-настоящему удобного города для проживания всех жителей, волнует умы архитекторов и градостроителей не одну сотню лет. Современный город, как мегаполис, так и районный центр, должен представлять собой комфортную среду, не только с точки зрения функциональности, но и экологии, эстетики, безопасности. В статье проведен анализ методик оценки комфортности городской среды, рассмотрены параметры комплексной оценки градостроительного комплекса. Рассмотрены современные градостроительные концепции, такие как смарт-развитие и программа устойчивого развития территорий. Применен критический подход к модернизму и конструктивизму в градостроительстве, на примере городов Чандигарх (Индия) и Бразилиа (Бразилия). Проведен анализ градостроительных теорий, базирующихся на основе исторической и культурной уникальности города, а также «свободных пространств» в современном городе. Исследованы идеи нового урбанизма, гуманизации городского пространства, концепции города для людей, а не для машин. Рассмотрены возможности использования баланса социальных интересов в организации городского ландшафта. Соотношение функциональности и приватности городской среды показано на примере многоэтажной и квартальной застройки. В заключении предлагаются параметры, соблюдение которых необходимо для создания комфортной городской среды.*

Ключевые слова: *морфотипы, городская застройка, комфортность, городской ландшафт, современный город, урбанизм.*

Использование пространства в городской среде представляет собой сочетание и взаимопроникновение природной и антропогенной составляющих среды. Грамотное и ответственное распределение нагрузок на среду составляет главный аспект градостроительного проектирования. Лишь при верном решении этой задачи все элементы городского ландшафта будут выполнять все свои функции в полном объеме. Привлекательность городской среды для современного человека нераздельно следует с экологической безопасностью и гражданской ответственностью, как отдельного индивидуума, так и всего общества в целом.

Современный город должен представлять собой комфортную среду, как с точки зрения функциональности, так и экологии. Одним из актуальных направлений градостроительной науки является создание и совершенствование методики оценки комфорта городской среды. Имея в арсенале надежные критерии оценки городского ландшафта, архитектор может определять комфортность среды не на основе субъективного вкуса и предпочтений, а руководствуясь научным подходом.

Существующие методики оценки комфортности городской среды можно систематизировать по следующим критериям:

– Методики, берущие за основу один из компонентов среды, как правило, количество зеленых насаждений (Таран, Беликова). Безусловно, привлекательность зеленых насаждений

обусловлена не только эстетическими параметрами, но и улучшением микроклимата в городе.

– Методики, включающие комплексную оценку городского комплекса. Для полноты исследования выделяется четыре основных параметра: природный, социальный, экологический и геохимический [1].

1.а Природная концепция

В данной концепции городская среда воспринимается как система природных комплексов, соединенных в одном объекте. Актуальность природной концепции подтверждена многими исследованиями. Так А.Г. Большаков определяет данную концепцию через систему ландшафтно-образных границ и членений. В современном городе, подчиненном ландшафтной топографии, элемент рельефа получает максимальную экологическую упорядоченность. Такая концепция должна учитываться при планировке открытых зеленых пространств, в противном случае разрушается природная основа градостроительной формы [2].

1.б Природно-социальная концепция

Рассматривает воздействие качественно новых процессов, возникающих в процессе функционирования города, на жизнь горожан

1.в Ландшафтно-геохимическая концепция

Рассматривает город, как мощный источник техногенного воздействия на городской ландшафт. В этой концепции выделяют пять типов городских ландшафтов: селитебный, селитебно-

транспортный, парково-рекреационный, агротехнический и промышленный [3].

1.г Экологическая концепция

Сопоставляет компоненты природного комплекса города и различий в их состояниях при антропогенном воздействии. Данная концепция рассматривает городской ландшафт как закрытую экосистему. В основе этой системы - человек и его жизненная среда. В основу положен вопрос оценки условий жизни горожан через отношение застройки и зеленых насаждений, эстетических свойств городской среды, микроклимата, удоб-

ства. Городская экосистема состоит из взаимосвязанных и взаимопроникающих подсистем (сред): квазиприродной (преобразованной географической среды), ландшафтно-архитектурной, социально-экономической, общественно-производственной [4].

2. Смарт-развитие

Smart-code – это попытка определить рамки урбанистического процесса, базируясь на удобстве его жителей. В этой методике городской ландшафт разделяется на шесть морфотипов (рис.1).

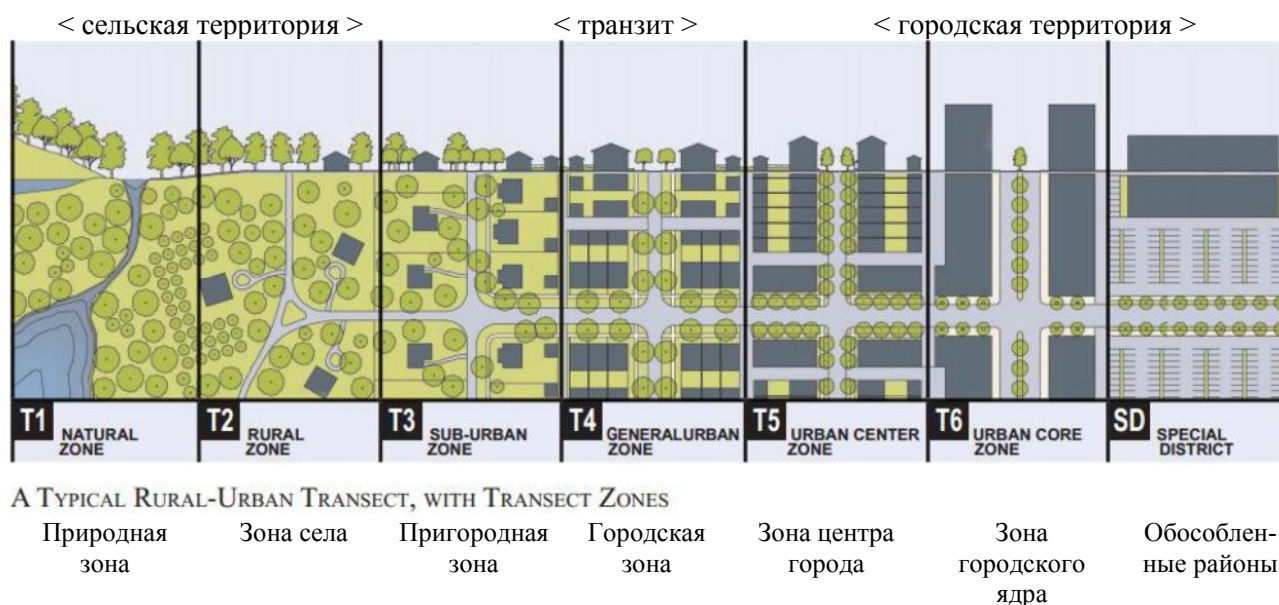


Рис. 1. Морфотипы освоенных территорий

Смарт код разрабатывается индивидуально для каждого города, но основывается на компактном развитии всей агломерации, способствующем более эффективному использованию городской территории. Перспективное развитие обеспечивает защиту сельскохозяйственных земель, повышает комфортность жизни в городе, поддерживает иерархию от высокой плотности застройки в центре города до низкой в сельской и пригородной зонах.

Эта концепция подчинена жесткому структурированию, обеспечивающему высокое качество жизни с минимальным использованием энергоресурсов и охрану природных и сельских территорий.

Движение нового урбанизма призвано обеспечить основу для устойчивого городского развития, что приобрело особую актуальность в конце 20- начале 21 веков.

3. Устойчивое развитие территорий

Основной темой устойчивого развития является нахождение баланса между окружающей средой и промышленным развитием. Концепция получила поддержку ООН, основные ее положения изложены в отчете Brundtland, вышедшем в

1987 году. Этот документ определяет устойчивое развитие как «развитие, которое отвечает нуждам настоящего, не подвергая риску способность будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности» [5].

4. Идеальный город вчера и сегодня

Середина 20-го века ознаменована движением функционализма и модернизма в архитектуре. Техническая революция привела к масштабной индустриализации и всеобщему распространению автомобильного транспорта. Одной из целей модернистов в градостроительстве была создать максимальные удобства для автомобилей. Наиболее показательными примерами модернизма и функционализма в градостроительстве является город Чандигарх в Индии по проекту Ле Корбюзье и столица Бразилии - Бразилиа Оскара Нимейера.

Чандигарх спроектирован в 1950-х гг. прошлого века в расчете на заселение полумиллиона человек. Территория города разбита на жилые сектора, каждый размером 1 кв.км, включающие магазин, школу, храм и т.д., необходимые для жизни (рис. 2).

Четкое деление на кварталы с автодорогами вместе с функциональными серыми зданиями делает Чандигарх похожим на советские города 60–70-х годов. Город был окружен 16-километровой лесополосой, препятствующей расползанию городской застройки, столь характерной для Индии. Но, создав, город максимально функциональным, и по мнению архитекторов, удобным

для жизни, тем самым привело к обезличиванию городского пространства и отмиранию городских центров. Чандигарх – подлинный символ триумфа и трагедии архитектуры тоталитарного колониализма, в основе которой лежит принцип бесправности «адресата», архитектуры для тех, кто вынужден и готов довольствоваться, тем, что ему дали [6].

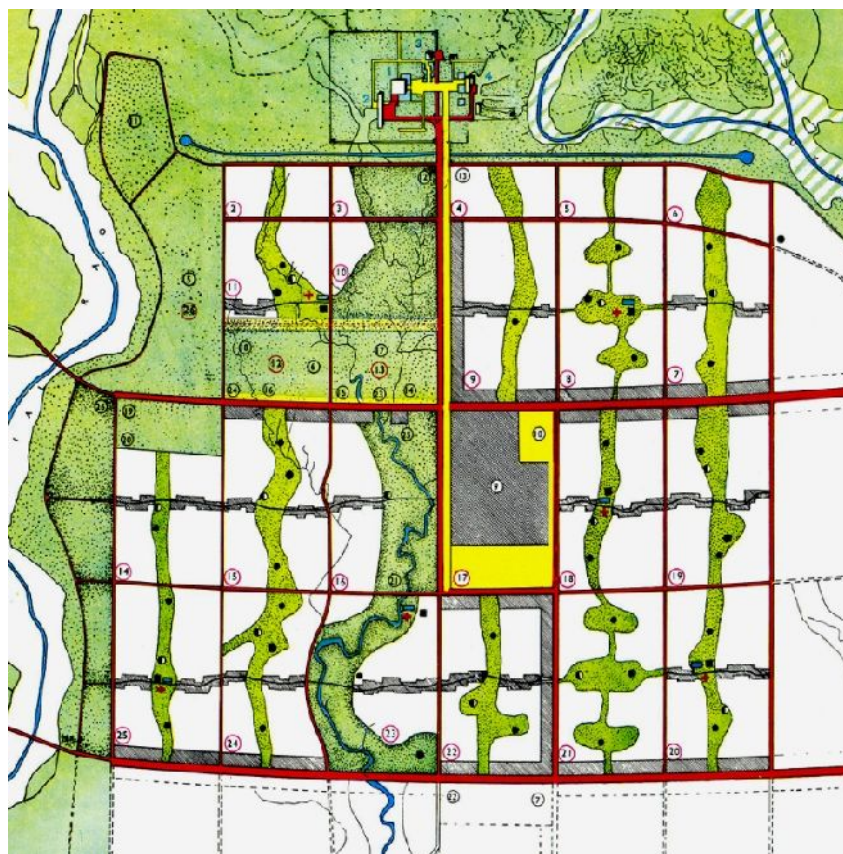


Рис. 2. План города Чандигарх

Современная столица Бразилии – Бразилиа на генеральном плане напоминает крылья летящей огромной птицы. На одном «крыле» расположены в основном общественные сооружения, на другом – жилые здания. Таким образом в проекте реализована не свойственная градостроительству изобразительная символика. «Архитектура должна выражать технические и социальные достижения своего времени, однако если они не уравновешены, возникает конфликт, пагубный как для содержания работы, так и для всего дела в целом.», – такого принципа стремился придерживаться О.Нимейер [7]. Однако, на практике, вскоре после основания, Бразилиа фактически разделится на два города-монументальный город для правительства и большого бизнеса и город лачуг, «фавел», обитатели которого обеспечивают работу правительственного ядра [8].

Модернисты пытались создать единый, универсальный для всех стран и народов город, однако каждый город по-своему уникален и неповторим. Идеи нового урбанизма, возникшие в 70–80-х годах 20 века, особенно развились в 90-х годах. Взяв за основу историческую и культурную особенность городской среды, идеологи нового урбанизма стремились создать город, удобный и доступный человеку без машины. Отойдя от идеи автомобиля, как главной единицы, урбанисты взяли за цель гуманизацию городской среды. Другой компонент, необходимый для современной городской среды – это открытые пространства. Известный архитектор М. Посохин утверждает, что «город без свободных пространств – это лабиринт, угнетающий человека. Необходимо ритмичное чередование закрытых и открытых пространств, сочетание узких и широких улиц, больших и малых площадей, бульваров и парков» [9].

Поисками источников жизненной энергии городов занимался датский архитектор Ян Гейл. Он сформулировал понятие «живой город», которое подразумевает насыщенность пространства человеческой деятельностью. В своей книге «Город для людей» он писал: «Город тем более оживает, чем больше людей передвигаются пешком, используют велосипеды и проводят время в общественных зонах» [10].

Испанский социолог М.Кастельс отмечает, что «развитие электронных коммуникационных и информационных систем позволяет все более уменьшать зависимость между пространственной близостью и выполнением функций повседневной жизни: работой, покупками, развлечениями, заботой о здоровье, образованием, коммунальными услугами, надзором за детьми, ... усиливается тенденция к «офису на ходу» [11].

Концепции развития городского пространства посвящены много современных исследований. Так, В. Князев считает, что основной тренд современного города – это поколенческий сдвиг. Развитие информационных технологий создало предпосылки для перехода от «умных» вещей, таких как смартфон, компьютер к системе «умного» дома. В условиях перехода к «умным» вещам и интеллектуальным системам, построенным по принципу «система в системе», нужна принципиально иная, чем существовавшая в индустриальную эпоху, архитектура, близкая к системному дизайну и системной инженерии. Задачей архитектуры становится связывание «умных» вещей в единую систему – «умный» город» [12].

Детальную систематизацию мотиваций градостроительной деятельности как определенных социальных ценностей провел А.Г. Большаков (табл. 1) [13].

Таблица 1

Интерпретация социальных ценностей в пространствах городской застройки



Так, парки и скверы олицетворяют здоровье. Кварталы с плотной застройкой и максимально допустимой этажностью А.Г. Большаков считает олицетворением «богатства», но мы полагаем данную мотивацию градостроительной деятельности именовать «функциональностью». Квартал с общественными зданиями и пространствами посвящен категории «публичности». Квартал с художественным замыслом, различных по форме и объемам пространств, показывает заботу градостроителей о «красоте». Простой порядок, основанный на доминировании параллельных и перпендикулярных линий планировочных границ кварталов и прямоугольной геометрией объектов указывает на «простоту», преобладающую у его планировщиков. Бережное отношение к сохранности историко-культурного наследия и условиям его экспонирования показывают мотивацию «память» в современном городе.

Соотношение функциональности и приватности можно наглядно рассмотреть на примере микрорайонной и квартальной застройки. Квартальная застройка характеризуется преобладанием мало- и среднеэтажных домов, с уютными

небольшими дворами у каждого дома. Планировка таких кварталов включает необходимые объекты социальной инфраструктуры в шаговой доступности. Компактное дворовое пространство позволяет родителям спокойно отпускать детей гулять, сохраняя их в зоне видимости. В квартальной застройке все большее распространение получает правило «двор без машин», когда автомобили размещаются в специализированных подземных или надземных паркингах, а дворы предназначены для пешеходов, что соответствует концепции гуманизма городской среды.

В отличие от квартальной, микрорайонная застройка, широко распространенная в Советском Союзе не предполагала наличия у жильцов большого количества личного автотранспорта, а все пешеходные маршруты проходят либо через дорогу, либо вдоль нее. В настоящее время, благодаря своему повсеместному распространению, автомобили захватили все свободное пространство во дворах, а по пути в школу или в магазин есть риск попасть под машину.

Отдельно стоящие многоэтажки в микрорайоне порождают «ничейные» пространства между

ними, которые подчас являются неухоженными, замусоренными пустырями [14]. Такая «ничейность» территории порождает незащищенность жителя, как только он выходит за порог собственной квартиры. Другой аспект безопасности – «свои» и «чужие» люди. В микрорайоне не отличить постороннего от местного, все перемещаются во всех направлениях. Потоки «своих» и «чужих» постоянно смешиваются, нарушая безопасность и «приватность» пространства.

Мы живем в огромной стране, где в изобилии присутствуют общественные пространства, а также многоэтажная жилая застройка, олицетворяющая функциональность задействованной площади. Но для настоящего комфорта городской среды не хватает приватного пространства, не только в виде малоэтажной застройки, но и внутри общественных пространств, сомасштабно отдельному человеку.

Вывод. Подводя итоги сказанного хочется отметить, что под комфортной средой подразумевается:

- Безопасность и защищенность, четкое разделение автотранспортных, велосипедных и пешеходных потоков, создание зон с приоритетом пешеходов, в том числе людей с особенностями, формированием безбарьерной среды, оснащением «умными» дорогами.

- Ориентированность городского центра на пешехода, формирование пешеходной сети для горожан, и маршрутов для туристов.

- Эргономическое оснащение улиц необходимыми осветительными приборами, разметкой, местами отдыха и т.д.

- Психозоциональный и эстетический комфорт.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Керженцева А.С. Природный комплекс большого города. Ландшафтно-экологический анализ // Наука. 2000. 273 с.

2. Большаков А.Г. Градостроительная форма городского ландшафта как условие и результат планирования и регулирования градостроительной деятельности в Иркутске // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2005. №2(22). С. 164–171.

3. Касимов Н.С. Экогеохимия ландшафтов. М. 2013. 115 с.

4. Денисов В.В. Экология города Учебное пособие. М.: ИКЦ "МарТ", Ростов н/Д: Издательский центр "МарТ". 2008. 832 с.

5. Our common future. Report of the World Commission of Environment and Development. United Nations, 1987.

6. Микулина Е. Идеалисты. Чандигарх. «Город солнца» // Проект-классика. №2. 2001.

7. Нимейер О. Архитектура и общество. М. 1975. 192 с.

8. Фремpton К. Современная архитектура. Критический взгляд на историю развития. М. 1990. 469 с.

9. Посохин М.В. Город для человека. М. Прогресс. 1973. 166 с.

10. Гейл Я. Город для людей // Альпина Паблишер, 2012. 2763 с.

11. Кастельс М. Информационная эпоха: экономика, общество и культура // ГУ ВШЭ. 2000. 458 с.

12. Княгинин В. Кризис города // Эксперт. 2010. № 18. С.78–82

13. Большаков А.Г. Оценка морфотипов застройки как отражения интересов и ценностей городского сообщества и их баланс как принцип градостроительной регенерации исторического центра // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. №9(68). С. 89–97.

14. Иванченко Е.А. Комфортная городская среда. Основные проблемы придомовых территорий многоквартирных жилых домов. // Строительство и архитектура-2017: материалы науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону, 2017. С. 31–34.

Информация об авторах

Кочеткова Татьяна Владимировна, студент кафедры архитектуры. E-mail: taniakoch_1997@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Алейникова Надежда Васильевна, старший преподаватель кафедры архитектуры. E-mail: n.v.alejnikova@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в августе 2019 г.

© Кочеткова Т.В., Алейникова Н.В., 2019

***Kochetkova T.V., Aleinikova N.V.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46

*E-mail: taniakoch_1997@mail.ru

COMFORT OF THE URBAN ENVIRONMENT

Abstract. *The idea of creating a comfortable, truly convenient city for all residents excites the minds of architects and urban planners for hundreds of years. A modern city, both a megalopolis and a district center, should be a comfortable environment in terms of functionality, ecology, aesthetics and safety. The article analyzes the methods for assessing the comfort of the urban environment, considers the parameters of a comprehensive assessment of the urban development complex. Modern urban planning concepts, such as smart development and the program of sustainable development of territories, are considered. A critical approach to modernism and constructivism in urban planning is applied. The analysis of urban planning theories based on the historical and cultural uniqueness of the city, as well as "free spaces" in the modern city is carried out on the example of the cities of Chandigarh (India) and Brasilia (Brazil). The ideas of a new urbanism, the humanization of urban space, the concept of the city for people, not for cars are explored. The possibilities of using the balance of social interests in the organization of the urban landscape are considered. The ratio of functionality and privacy of the urban environment is shown by the example of multi-storey and quarter buildings. The parameters necessary to create a comfortable urban environment are offered.*

Keywords: *morphotypes, urban development, comfort, urban landscape, modern city, urbanism.*

REFERENCES

1. Kerzhentseva A.S. The natural complex of the big city. Landscape-ecological analysis [Prirodnyy kompleks bol'shogo goroda. Landshaftno-ekologicheskii analiz]. Science. 2000, 273 p. (rus)
2. Bolshakov A.G. Urban planning form of the urban landscape as a condition and result of planning and regulation of urban development in Irkutsk [Gradostroitel'naya forma gorodskogo landshafta kak usloviye i rezul'tat planirovaniya i regulirovaniya gradostroitel'noy deyatel'nosti v Irkutske]. Bulletin of the Irkutsk State Technical University. 2005. No. 2 (22). Pp. 164–171. (rus)
3. Kasimov N.S. Ecogeochemistry of landscapes [Ekogeokhimiya landshaftov]. M. 2013. 115p. (rus)
4. Denisov V.V. Ecology of the city [Ekologiya goroda]. Tutorial. M., 2008. 832 p. (rus)
5. Our common future. Report of the World Commission of Environment and Development. United Nations, 1987.
6. Mikulina E. Idealists. Chandigarh. "City of Sun" [Idealisty.Chandigarkh. «Gorod solntsa»]. Classic project. No. 2. 2001. (rus)
7. Niemeyer O. Architecture and society [Arkhitektura i obshchestvo]. M. 1975. (rus)
8. Frampton K. Modern architecture. A critical look at the history of development [Sovremennaya arkhitektura. Kriticheskiy vzglyad na istoriyu razvitiya]. M. 1990. 469 p. (rus)
9. Posokhin M.V. City for man [Gorod dlya cheloveka]. M. Progress. 1973. 166 p. (rus)
10. Gail I. City for the people [Gorod dlya lyudey]. Alpina Publisher, 2012. 2763 p. (rus)
11. Castells M. Information era: economics, society and culture [Informatsionnaya epokha: ekonomika, obshchestvo i kul'tura]. 2000. 458 p. (rus)
12. Knyagin V. The crisis of the city [Krizis goroda]. Expert. 2010. No. 18. Pp. 78–82 (rus)
13. Bolshakov A.G. Evaluation of building morphotypes as a reflection of the interests and values of the urban community and their balance as the principle of urban planning regeneration of the historical center [Otsenka morfotipov zastroyki kak otrazheniya interesov i tsennostey gorodskogo soobshchestva i ikh balans kak printsip gradostroitel'noy regeneratsii istoricheskogo tsentra]. Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2012. No. 9 (68). Pp. 89–97. (rus)
14. Ivanchenko E.A. Komfortnaya gorodskaya sreda. Osnovnyye problemy pridoimovykh territoriy mnogokvartirnykh zhilykh domov. Construction and architecture-2017: materials of scientific.-practical. conf. - Rostov-on-Don, 2017. Pp. 31–34. (rus)

Information about the authors

Kochetkova, Tatiana V. Student. E-mail: taniakoch_1997@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Aleinikova, Nadezhda V. Senior lecturer. E-mail: n.v.alejnikova@gmail.com Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in August 2019

Для цитирования:

Кочеткова Т.В., Алейникова Н.В. Комфортность городской среды // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 11. С. 66–72. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-66-72

For citation:

Kochetkova T.V., Aleinikova N.V. Comfort of the urban environment. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 11. Pp. 66–72. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-66-72

DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-73-78

Соина Н.С.

Южный федеральный университет. Академия архитектуры и искусств
Россия, 344002, Ростов-на-Дону, пр. Буденновский, д. 39
E-mail: nssoina@sfedu.ru

ИСТОРИОГРАФИЯ ГЕНУЭЗСКИХ СРЕДНЕВЕКОВЫХ ОБОРОНИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКОГО БАССЕЙНА

Аннотация. Искусство оборонительного строительства средневекового периода с XI по XVII вв. является одним из немногих, которое могло быть достойно представлено в истории архитектуры. Множество исторического, археологического материала показывает, что общая картина формирования этого вида архитектуры имеет явные недостатки в исследовании. Это привело к неточному определению принадлежности крепостных сооружений к тому или иному государству. XIII - XV вв. – это расцвет международной торговли Венецианской и Генуэзской республик, которые создали обширные фактории по всему миру. Азово-Черноморский бассейн стал одним из важных регионов пересечения торговых путей Запада и Востока. Это привело к активному строительству укреплённых сооружений различного типа. В данной статье рассматривается история возникновения Генуэзских колоний в акватории Азово-Черноморского бассейна в период, начиная с XIII в. и до взятия под контроль всего Черноморского побережья Османской империей в XV в. В представленном материале были указаны предположительно места нахождения крепостных сооружений, сделана попытка установить принадлежность к определённому государству. В работе описаны некоторые оборонительные укрепления и их характеристика.

Ключевые слова: башня, Генуя, Кона, Тана, укрепление, Чёрное море.

Генуэзская колонизация Северо-восточного Причерноморья является одной из самых неизученных тем архитектуры средневековья. Территориальные границы определены Черноморским побережьем, которое представляет собой полосу земли, протяжённостью 670 км и включающую в себя северную, восточную и часть юго-восточной территории. С северо-запада эта территория ограничена мысом Тузла (полуостров Тамань), на юго-востоке границей с Абхазией, с северо-востока территорию ограничивает водораздельная линия Главного кавказского хребта, со стороны запада границей является Чёрное море. Вся ограниченная территория входила в состав Генуэзской империи. Отдельной частью территории рассматривается участок в устье реки Дон, в пределах нынешнего города Азов, где распалась генуэзская колония Тана.

Исследовались, главным образом, крепостные сооружения XIII–XVII вв. с учётом того факта, что в некоторых регионах такие памятники архитектуры не изучены. В данное исследование вошли только те памятники культурного наследия, которые представляют наибольший интерес в области типологии и индивидуальных стилистических особенностей. В процессе изучения истории возникновения крепостных сооружений, которые до сегодняшнего времени не сохранились, были также проанализированы фортификационные сооружения, которые сохранились до сегодняшнего времени.

В многочисленных исследованиях, посвященных этому вопросу, раскрыты различные его

аспекты: политическая история, экономическое развитие территорий в средневековый период, социальная структура колоний Генуэзской республики. Большое внимание уделено различным торгово-экономическим отношениям Генуи с другими государствами, а также тесному сотрудничеству с правителями Золотой Орды. Исследованием причин возникновения в Северном Причерноморье таких средневековых колоний XII–XV вв. как Генуэзская или Венецианская уделялось и уделяется большое внимание со стороны учёных разных поколений – И. Барбаро, А. Контарини, Г. Интериано, Г.Ю. Клапрота, Ф. Дюбуа де Монпере, М.М. Ковалевского, В. Сизова и др. Среди них были члены Императорского Одесского общества истории и древностей Э. Тебу-де-Мариньи, Н.М. Волков, В.Н. Юргевич, Ф.К. Брун, Н.Н. Мурзакевич и др.

Большой интерес вызывает творчество адыгейского писателя-просветителя второй половины XIX в. Султана Крым-Гирея, который в своих путевых заметках опубликовал (1866 г.) интересный материал о расположении на горе Колдун (п. Мысхако) генуэзской крепости.

Детально изучили и провели анализ роли генуэзцев в истории Северного Кавказа член-корреспондент Императорской Академии наук Ф.А. Щербина в «Истории Кубанского казачьего войска», историк А.Н. Веселовский в «Записках Императорского Русского географического общества» и Е.Д. Фелицын в ряде кубанских и центральных изданий. В предвоенный период в СССР Е.С. Зевакин и Н.А. Пенчко провели ряд

серьезных исследований и опубликовали материал по истории итальянских республик. В последние годы С.П. Карпов всесторонне исследовал развитие генуэзских и венецианских факторий в Причерноморье. Очень интересное исследование по генуэзским факториям провёл И.В. Волков.

В качестве исходного материала использовались архивные публикации как отечественных, так и зарубежных авторов. Наибольший интерес представляют собой различные наброски и зарисовки различных оборонительных сооружений, выполненные авторами XII–XV вв. Большое количество используемого материала датируется XVII–XIX вв. Натурные съёмки и необходимые обмеры были проведены на территории Крымского полуострова, а также, Ростовской области и Краснодарского края, где имеются крепости (Крым) или сохранились остатки сооружений (Ростовская область, Краснодарский край).

Большую часть научных источников составляет литература, которая издавалась за рубежом, где рассматривается история возникновения оборонительных сооружений, так как отечественную науку в меньшей степени интересовали недвижимые памятники архитектуры. Представленными материалами по данной теме и результатами их анализа определяется и степень изученности проблемы. Изучение всех этих источников способствует более глубокому пониманию процессов адаптации и развития итальянской культурной модели в условиях, которые сильно отличались от тех, в которых эта модель изначально установилась.

Акватория Азово-Черноморского бассейна не так хорошо изучена и не содержит большого количества информационного материала.

Историография рассматривается нами в пределах трёх временных периодов: дореволюционного (до 1917 г.), советского (1918–1991 гг.) и постсоветского (с 1992 по настоящее время).

Первые упоминания о средневековых генуэзских поселениях на территориях Крыма, Азова (Тана) и Краснодарского края (Черкессии) появляются в документах с XIII в. (1266 г.). Генуэзцы, стремясь присвоить исключительное право на торговлю в акватории Чёрного моря, в 1266 г. добиваются от золотоордынского ставленника Мангу-хана передачи им во владение земли Каффы (Феодосии), которую, впоследствии, делают центром своих колоний.

Генуэзские поселения являлись одним из важнейших исторических объектов итальянского зодчества, которое было тесно связано с формированием генуэзской культурной модели в области крепостного строительства. В то же время,

такая модель сильно повлияла на культурный облик территорий, принадлежащих Генуэзской республике или тех регионов, которые входили в зону её экономических интересов. Исследование определённых областей позволяет выявить смысл этого формирования и индивидуальные особенности, обусловленные географическим месторасположением такого вида объектов.

Итальянские города Венеция и Генуя начали развиваться в средние века. Это касалось, прежде всего, торговых отношений с другими странами. Свои капиталы они построили на посреднических операциях купли-продажи.

Так, в период с XII по XV вв. главным торговым путём, связывающим Европу со странами Востока, был путь через Средиземное море. После того, как монгольские ханы завоевали большую часть территории и тем самым «объединили» Ближний и Дальний Восток, основным приоритетом становится развитие северной части транзитного пути, который проходил через Центральную и Среднюю Азию к Чёрному морю. Это и послужило точкой отсчёта, когда итальянские города стали бороться за территории.

Ареной их противостояния, которое началось ещё в XII в. в результате противодействия Византийской империи, стало Причерноморье. В 1165 г. генуэзцам разрешают посещать Константинополь, но при этом «предоставили свободу торговли по всей территории Византийской империи, кроме пунктов Россия (Rossia) и Матрега» [1], что, по мнению Братиану, означало Чёрное (Русское) и Азовское (Матрегское) моря.

В 1260 г. Генуя получает право на первые свои колонии в предместье Константинополя – Перу и Галата. В этот период она имеет торговое преимущество перед венецианской республикой в посещении Чёрного моря. Теперь Генуя получила право входить во все гавани Византии. Так, Нимфейский договор 1261 г. позволил генуэзцам иметь доступ ко всем проливам, что сделало Генуэзскую республику первой торговой державой в Европе и на Чёрном море.

В 1266 г. генуэзцы обосновались в Каффе, которая служила главным перевалочным пунктом торговли в акватории Чёрного моря.

1357 г. Генуя захватывает Балаклаву, следующей территорией становится Солдайя (1365 г.). После этого, возникают генуэзские колонии в Крыму, на Азовском и Черноморском побережьях Кавказа.

На территории между Таной (Азов) и Севастополем (Сухум) насчитывалось около 39 колоний, поселений и стоянок, наиболее важными из которых можно выделить две – Копа и Матрега.

В Матреге генуэзцы обосновались не позднее начала XIV в. [2]. В период итальянской колонизации XIII - XV вв. роль Матреги усилилась в торговых отношениях между Западом и Востоком.

Постройка крепости в Матреге относится ко второй половине XV в. и была осуществлена при финансовой помощи Каффы [3], что указывает на значимость этого города для генуэзцев.

Из письма внука Симоне Захария к протекторам банка св. Георгия от 12 августа 1482 г. известно, что его замок (*lo mio castello de la Matrega*) в Матреге был взят турками [4].

Укрепившись в Матреге, генуэзцы получают доступ к проливу Ени-кале [5].

Колония Копы (Локопы, Копарио) (Славянск-на-Кубани), обозначенная на карте Висконти 1318 г. и позднее, получила свое название, скорее всего, от реки Кубань – *Cisoro, Locisoro* [6]. До настоящего времени точное место расположения этой колонии однозначно не определено.

С конца XIII в. торговля Генуи с Копой значительно возросла и достигла значительных размеров, что вызвало, в свою очередь, строительство крепости. «Крепость была выстроена черкесским князем (?) в 1475 г. Колония была окружена черкесскими племенами...» [7]. Колония была большая, на что указывает наличие в городе «консульства, церкви, торговых учреждений» [8].

На месте нынешней Анапы располагалась генуэзская колония Мапа. Колония была небольшая и не имела консула, а по уставу 1449 г. в колонии был президент (или комендант) [9]. Об этой колонии известно мало информации. Но из письма Десимони к Бруну можно понять, что в архиве банка Сан-Джорджо есть сведения, которые могут относиться к городу: «В картуляриях массарии мне удалось открыть два только места, касающиеся Анапы, а именно: 1) 1423 г., где речь идёт о ежегодной субвенции на защиту замка «*de lo Mapa*» и 2) 1471 г., где говорится об издержках *in mittendo fustam in Maparium ad comburendam certos Casapales*» [10].

По словам англичанина Спенсера, крепость Анапа была построена на развалинах некогда стоявшего здесь генуэзского укрепления [11].

На побережье Азовского моря Тана имела экономическое значение для Генуи и Венеции, так как через неё проходил транзитный путь на Сарай, а далее в Среднюю Азию и на Дальний восток. Это направление связывало Черное и Каспийское моря. В обратном направлении сухопутным путём поставлялись грузы из Индии и Ирана.

1340 г. Сенат поручает своему консулу выбрать себе местожительство недалеко от моря:

«*che I Mercanti e fedeli Veneti della Tana abbiano a abitare dal lato sinistro della strada che si dice il Bazar sino a san Francesco, venendo della marina sino al termine del mare*» (Canale, II, 449) [12].

Наличие крепостного сооружения в Тане можно определить не только по остаткам стены, но также её описание мы находим и в работах турецкого туриста Эвлии (Челеби?), который описывает его, как очевидец осады крепости в 1641 г. В записях, относящихся к осаде крепости, есть указание: «огонь снова начался, и городские дома рушились; но стены, крепко построенные Генуэзцами, всё ещё держались». В следующих его записках, которые относятся к строительству турецкой крепости, мы находим слова: «в течение месяца две башни, превосходившие твёрдостью прежние генуэзские башни, были окончены» [13].

Благодаря сохранившимся донесениям вице-адмирала Крюйса [14] можно точно утверждать, что в XVII в. в Тане были построены две церкви – Иоанна Претечи и Николая Чудотворца, на стенах которых были видны генуэзские надписи. Такие надписи были найдены и на воротах. В 1641 г. церкви были разрушены [15].

В донесении консула и массариев Каффы протекторам банка Сан-Джорджо от 16 - 18 мая 1471 г. можно видеть, что в Тане был замок, занимаемый генуэзским консулом: «Много, говорилось уже нами, - пишут они, - о дурном отношении консула венецианской колонии в Тане к нашему консулу и прочим из нашей колонии в Тане... Он ищет случай отнять замок у Мануэле де Гварнерио, нашего консула...» [16].

Из Таны в течение нескольких дней, вверх по Дону, а затем вниз по Волге был проложен путь до Астрахани, через Каспийское море, по которому можно было попасть в Персию.

Постепенно после взятия Константинополя турками в 1454 г., что является началом конца колониальной политики, как Венеции, так и Генуи, начался захват таких колоний как Монкастро (Аккерман) (прим. 1455 г.), затем Севастополь (Сухум). Итак, все Черноморские владения южного направления в 1461 г. были подчинены Турции.

Во многих работах весь материал, который в разной степени можно отнести к фактологическому, даёт не точную типологическую картину, в связи с чем не совсем ясно определены географические и хронологические особенности. Это в свою очередь влияет на наличие точной типологии фортификационных сооружений по их оборонительно-строительным особенностям. Вся имеющаяся типологизация оборонительных комплексов определена географическим расположением или с учётом ландшафтных особенностей.

Рассмотрение крепостей с этой точки зрения позволяет все масштабные архитектурные сооружения классифицировать по географическому расположению на: горные, вершинные, низменные или равнинные, островные. Многими исследователями были предприняты попытки классифицировать комплексы по типам замков. Такая классификация основывалась, главным образом, на плане основной башни (донжона). Предлагалось разделять на комплексы на замки с круглой башней, с прямоугольной, килевидной. Но такая систематизация, которая основывается на башенных, стеновых и рельефных характеристиках не учитывает ряд других факторов.

В отечественной науке крепостное строительство представлено во «Всеобщей истории архитектуры», в «Истории градостроительства», «Истории крепостей» (проф. В. Яковлева). Эта исследовательская работа рассматривает развитие оборонительного зодчества, с точки зрения осады и обороны сухопутных крепостей, что привело к единообразию всех крепостных укреплений.

В монографии Мыца В.Л. «Укрепления Таврики X–XV вв. дан обобщённый материал по фортификации средневековой Таврики, где представлена социально-историческая типология памятника и предложена культурно-историческая их периодизация.

В работе Иванова А.В. «Крепости и замки Южного берега Крыма. Мир крымского Средневековья» даётся краткое описание древних укреплений Северного Причерноморья, таких, как крепости, замки, монастыри, форты и др. В этом издании приведены подробные карты местностей, схематичные планы описываемых памятников и предложена предполагаемая реконструкция, которую представил автор.

В коллективной работе, посвящённой археологии Древней Руси IX–XIV вв., методом многоаспектного анализа реконструируются этапы прогрессивного развития и широко рассматриваются типы древнерусских поселений – города, укрепленные феодальные замки, но в этой работе не дана классификация конкретных сооружений.

Таким образом, одним из значимых периодов в истории появления итальянских колоний является вторая половина XV в., после падения Константинополя, что повлекло за собой возникновение морского пути в Индию. Вследствие чего торговые центры постепенно перемещаются из Средиземного моря к северу – во Францию, Голландию, Англию и другим странам.

В результате исследования крепостных сооружений генуэзского периода на Северном Кавказе, которые сохранились или описаны в литературных источниках, уточнена периодизация их

появления на рассматриваемой территории. Предложена классификация оборонительных сооружений по географическому расположению: горные, вершинные, низменные или равнинные, островные. Выявлено, что все оборонительные сооружения в большинстве случаев относятся к военной и гражданской архитектуре, последние можно разделить на два типа: крепости и отдельно стоящие замки. Проведенные исследования послужат основой для выявления четкой границы между итальянской и турецкой архитектурой и послужат для создания ясной картины особенностей оборонительных сооружений на территории Северо-Восточного Причерноморья.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зевакин Е.С., Пенчко Н.А. Очерки по истории генуэзских колоний на Западном Кавказе в XIII и XV вв. Исторические записки. М., 1938. Т. 3. 74 с.
2. Кубанский сборник. Екатеринодар, 1899. Т. 5. Пар. 17. С. 1-2; Пар. 18. С. 1–24
3. Atti della Società Ligure, VII, f. 1. Док. № 788, 811, 821.
4. Filip Jacob Bruun. Notices historiques et topographiques concernant les colonies italiennes en Gazarie, St.-Petersbourg, 1866, 16 p.
5. Fsnucci G. Storia dei tre celebri popoli marittimi dell'Italia, Veneziani, Genovesi e Pisani e delle loro navigazione e commercio nei bassi secoli, Livorno, 1855, IV, 731 p.
6. Filip J.B. Notices historiques et topographiques concernant les colonies italiennes en Gazarie, St.-Petersbourg, 1866, 16 p.
7. Зевакин Е.С., Пенчко Н.А. Очерки по истории генуэзских колоний на Западном Кавказе в XIII и XV вв.». Исторические записки, Т. 3, М., 1938. С. 83
8. Зевакин Е.С., Пенчко Н.А. Очерки по истории генуэзских колоний на Западном Кавказе в XIII и XV вв. Исторические записки. 1938. Т. 3, Москва, 83 с.
9. Брун Ф.К. О поселениях итальянских в Газарии: Топографические и исторические заметки Ф.К. Бруна. М.: Синод. тип., 1872. С. 385–387.
10. Filip J.B. Notices historiques et topographiques concernant les colonies italiennes en Gazarie, St.-Petersbourg, 1866, 207 p.
11. Spenser E. Travels in Circassia, Krim Tarty, 1839.
12. Filip J.B. Notices historiques et topographiques concernant les colonies italiennes en Gazarie, St.-Petersbourg, 1866, 207 p.
13. Filip J.B. Notices historiques et topographiques concernant les colonies italiennes en Gazarie, St.-Petersbourg, 1866, 208 p.

14. Sammi. Russ. Gesch. II, 85
15. Арцыбашев Н.С. Повесть о России. М.: Университетская типография, 1843, Т. VI. 480 с.
16. Atti della Società Ligure, VII, f. 1. 780.
17. Мыц В.Л. Укрепление Таврики X-XV вв. АН УССР. Ин-т археологии, Наук. думка, 1991, 164 с.
18. Скржинская Е.Ч. Барбаро и Контарини о России. К Истории итало-русских связей в XV веке. Ленинград, АН
19. Якобсон А.Л. Средневековый Крым. М., Ленинград, Изд-во «Наука», 1964, 233 с.
20. Яковлев В.В. История крепостей. М.: ООО «Фирма «Издательство АСТ»»; СПб.: ООО «Издательство Полигон», 2000, 400 с.

Информация об авторах

Соина Наталья Сергеевна, аспирант, старший преподаватель кафедры графики и информационных технологий. E-mail: nssoina@sfnedu.ru. Академия архитектуры и искусств Южного федерального университета. Россия, 344002, Ростов-на-Дону, пр. Буденновский, д. 39.

Поступила в сентябре 2019 г.

© Соина Н.С., 2019

Soina N.S.

*Academy of Architecture and Arts Southern Federal University
Russia, 344082, Rostov-on-Don, Budennovskiy st. 39
E-mail: nssoina@sfnedu.ru*

HISTORIOGRAPHY OF GENOESE MEDIEVAL FORTIFICATIONS OF THE AZOV-BLACK SEA BASIN

Abstract. *The art of defensive construction of the XI–XVII centuries is adequately represented in the history of architecture. Numerous historical and archaeological materials show that the overall picture of the formation of this type of architecture has obvious disadvantages in the study. As a result, inaccurate determination of the belonging of the fortifications to a particular state arose. XIII–XV centuries–this is the beginning of international trade of the Venetian and Genoese republics, which created extensive trading posts around the world. The Azov-Black Sea basin has become one of the important regions of the intersection of trade routes of the West and the East. This led to the active construction of fortified structures of various types. This article discusses the history of the Genoese colonies in the waters of the Azov-Black sea basin in the period from the XIII century and before taking control of the entire Black Sea coast by the Ottoman Empire in the XV century. In the presented material presumably locations of fortress constructions are specified, an attempt to establish belonging to the certain state is made. The paper describes some defensive fortifications and their characteristics.*

Keywords: *tower, Genoa, Copa, Tana, fortification, Black sea.*

REFERENCES

1. Zevakin E.S., Penchko N.A. Essays on the history of the Genoese colonies in the Western Caucasus in the XIII and XV centuries. Historical notes. [Ocherki po istorii genuevskih kolonij na Zapadnom Kavkaze v XIII i XV vv. Istoricheskie zapiski], t. 3, Moskva, 1938. Str. 74. (rus)
2. Kuban collection. [EkaterinodaKubanskij sbornik]. Ekaterinodar, 1899. T. 5. Pag. 17. Pp. 1–2; Pag. 18. Pp. 1–24. (rus)
3. Atti della Società Ligure, VII, f. 1. Dok. No. 788, 811, 821.
4. Filip J.B. Notices historiques et topographiques concernant les colonies italiennes en Gazarie, St.-Petersbourg, 1866, 16 p.
5. Fsnucci G. Storia dei tre celebri popoli marittimi dell'Italia, Veneziani, Genovesi e Pisani e delle loro navigazione e commercio nei bassi secoli, Livorno, 1855, IV, 731.
6. Filip J.B. Notices historiques et topographiques concernant les colonies italiennes en Gazarie, St.-Petersbourg, 1866, 16 p.
7. Zevakin E.S., Penchko N.A. Essays on the history of the Genoese colonies in the Western Caucasus in the XIII and XV centuries. Historical notes. [Ocherki po istorii genuevskih kolonij na Zapadnom Kavkaze v XIII i XV vv. Istoricheskie zapiski]. 1938. Vol. 3, Moskva, Str. 83. (rus)
8. Zevakin E.S., Penchko N.A. Essays on the history of the Genoese colonies in the Western Caucasus in the XIII and XV centuries. Historical notes [Ocherki po istorii genuevskih kolonij na Zapadnom Kavkaze v XIII i XV vv. Istoricheskie zapiski], t. 3, Moskva, 1938 Str. 83(rus)
9. Brun F.K. On the Italian settlements in Gazarie: Topographical and historical notes of F.K. Brun

[O poseleniyah ital'yanskih v Gazarii: Topograficheskie i istoricheskie zametki F.K. Bruna]. Moskva: Sinod. tip., 1872, Pp. 385, 387. (rus)

10. Filip Jacob Bruun. Notices historiques et topographiques concernant les colonies italiennes en Gazarie, St.-Pétersbourg, 1866, 207 p. (rus)

11. Spenser E. Travels in Circassia, Krim Tarty, 3 ed., 1839, I.

12. Filip J.B. Notices historiques et topographiques concernant les colonies italiennes en Gazarie, St.-Pétersbourg, 1866, 207 p. (rus)

13. Filip J.B. Notices historiques et topographiques concernant les colonies italiennes en Gazarie, St.-Pétersbourg, 1866, 208 p.

14. Sammi. Russ. Gesch. II, 85

15. Arcybashev N.S., The Story of Russia [Povest' o Rossii], T. VI, Universitetskaya tipografiya, Moskva, 1843, 480 p. (rus)

16. Atti della Società Ligure, VII, f. 1. 780

17. Myc V.L. Ukreplenie Tavriki X-XV vv. [Fortifications of Taurica X-XV centuries.] AN USSR. In-t arheologii, Nauk. dumka, 1991, 164 p. (rus)

18. Skrzhinskaya E.Ch. Barbaro i Kontarini o Rossii. K Istorii italo-russkih svyazey v XV veke [Barbaro and Contarini on Russia. On the History of Italian-Russian relations in the XV century]. Leningrad, AN SSSR. Inst-storii SSSR, Izd-vo «Nauka», 1971, 274 p. (rus)

19. Yakobson A.L. Srednevekovyj Krym [Medieval Crimea]. M., Leningrad, Izd-vo «Nauka», 1964, 233 p. (rus)

20. Yakovlev V.V. Istoriya krepostey [The history of fortresses]. M.: OOO «Firma «Izdatel'stvo AST»»; SPb.: OOO «Izdatel'stvo Poligon», 2000, 400 p. (rus)

Information about the authors

Soina, Natal'ya S. Postgraduate student, senior lecturer. E-mail: nssoina@sfedu.ru. Academy of architecture and arts Southern Federal University. Russia, 344082, Rostov-on-Don, Budennovskiy st. 39.

Received in September 2019

Для цитирования:

Соина Н.С. Историография генуэзских средневековых оборонительных сооружений Азово-Черноморского бассейна // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 11. С. 73–78. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-73-78

For citation:

Soina N.S. Historiography of Genoese medieval fortifications of the Azov-Black sea basin. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 11. Pp. 73–78. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-73-78

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-79-85

***Бондаренко Н.И., Бондаренко Д.О., Бондаренко М.А., Дороганов Е.А.**
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46
*E-mail: bondarenko-71@mail.ru

ОБЛИЦОВОЧНЫЕ И ДЕКОРАТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СТЕКЛЯННЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

Аннотация. Проанализированы области использования стеклянных бытовых отходов в промышленности строительных материалов. Рассмотрена возможность получения облицовочного и декоративного материала-смальты на основе цветных тарных и сортовых стёкол. Разработана инновационная технология получения смальты на основе тонкоизмельченных порошков цветного тарного стекла с использованием в качестве увлажнителя водных растворов 20-%, 40-% и 60-% жидкого стекла. Установлены зависимости влияния различных концентраций водных растворов жидкого стекла на степень уплотнения смальты. Показано, что добавка водных растворов жидкого стекла в стеклопорошок перед его прессованием снижает температуру обжига с 775 до 725 °С. Исследовано влияние различной концентрации водного раствора жидкого стекла в исходных шихтах на химический состав смальты. С использованием рентгенофлуоресцентного метода исследован элементный состав смальты. Исследована микроструктура смальты, изготовленной из шихты с оптимальным содержанием 40-% водного раствора жидкого стекла. Исследовано влияние различной концентрации жидкого стекла на микротвёрдость смальты. Показано, что при содержании в водном растворе 40-% жидкого стекла микротвёрдость достигает максимальных значений.

Ключевые слова: смальта, цветные тарные и сортовые стёкла, жидкое стекло, микротвёрдость.

Введение. В настоящее время проблема сбора и переработки стеклянных бытовых отходов приобрела особую остроту. Это связано с рядом обстоятельств. Во-первых, в РФ на государственном уровне не разработаны законодательные и нормативные акты, регламентирующие сбор и переработку стекольного боя [1]. Во-вторых, в РФ с 2012 года вступил в действие технический регламент Таможенного союза, запрещающий вторичное использование различных видов тары, включая стеклотару. В-третьих, листовые, тарные, сортовые, медицинские, светотехнические и другие стёкла существенно отличаются по химическому составу, термическим характеристикам, цвету. Это затрудняет сбор и переработку стеклянного боя [2].

На базе БГТУ им В.Г. Шухова на кафедре технологии стекла и керамики выполнены многочисленные исследования и разработаны технологии по получению облицовочных, теплоизоляционных и стеновых материалов с защитно-декоративными покрытиями с использованием стеклянных бытовых отходов. Одним из перспективных направлений переработки стекольного боя является изготовление гранулированного пеностекла из боя стёкол [3].

Тарные и листовые стёкла можно использовать для производства блочных теплоизоляцион-

ных материалов [4, 5]. Различные цветные тарные стёкла служат для получения покрытий на пеностекле [6].

Разработан ряд технологий изготовления стеновых строительных материалов автоклавного твердения с защитно-декоративными покрытиями на основе тонкоизмельченных цветных тарных стёкол [7]. В технологии изготовления изделий из бетона с защитными и декоративными покрытиями использовали смеси на основе боя цветных тарных стёкол с жидким стеклом [8].

Композиционный облицовочный материал на основе боя различных типов стёкол обладает высокими физико-механическими свойствами и оригинальным декоративным эффектом [9]. Разработана энергосберегающая технология получения безусадочного материала на основе стеклобоя и колеманита [10, 11]. Эффективные декоративные покрытия на основе стеклобоя были получены на стеновых строительных материалах с использованием оплавления поверхности электродуговой плазмой [12–15]. В настоящее время продолжают проводиться исследования в области разработки технологий изготовления различных строительных материалов на основе стеклянных бытовых отходов [16, 17].

Методы и материалы. Основными сырьевыми материалами для изготовления смальты служили цветные тарные стёкла синих, оливковых, изумрудных, тёмно-зеленых и различных

коричневых оттенков. Выбор был обусловлен тем, что ежегодно в России производится более 19 миллиардов штук цветной стеклотары для различных алкогольных и безалкогольных напитков. После использования стеклотары в РФ в промышленных масштабах не перерабатывается. Вторичное использование стеклотары на всей территории РФ и стран СНГ запрещено с 2012 года техническим регламентом Таможенного союза (ТРТС). Также около 20 миллиардов штук цветной стеклотары в Россию завозится из-за рубежа в виде импортных алкогольных и безалкогольных напитков. Зарубежная цветная тара также не находит своего промышленного применения. Смальта является декоративным и художественным материалом при строительстве монументальных сооружений, при отделке перегородок и стен в жилых и промышленных зданиях. Использование вторичных сырьевых материалов позволит существенно снизить себестоимость и повысить конкурентоспособность продукции.

Для изготовления смальты стеклянные цветные бутылки измельчали в дробильном лабораторном устройстве. Измельченное цветное стекло помещали в шаровую лабораторную фарфоровую мельницу с керамическими мелющими телами. После восьми часов помола из мельницы извлекали стеклопорошок, который перед прессованием пропусклся через сито. Затем порошок увлажнялся водой и водными растворами 20-%, 40-% и 60-% жидкого стекла. Количество увлажняющего компонента составляло 5 %. После увлажнения прессовали порошок в виде квадра-

тов размером 20×20×6 мм. Отпрессованные таблетки подсушивали в течение 2 ч в сушильном шкафу при 95 °С. Позже таблетки помещали в муфельную печь и извлекали при достижении 700; 725, 750 и 775 °С. Отожженные таблетки подвергали исследованию на микротвердость.

Твёрдость смальты определяли по методу Виккерса. Сущность метода состоит в том, что в исследуемую поверхность вдавливаются четырехгранная правильная пирамида с квадратным основанием. Углы между противоположными гранями составляют 136°. При воздействии статической нагрузки порядка 10–100 кгс и в течение временного интервала от 10 до 60 с пирамидка вдавливается в исследуемую поверхность образца. После испытаний на поверхности образца остается квадратный отпечаток. С использованием оптического микроскопа измеряли две диагонали отпечатка. Для расчёта твёрдости берут среднюю величину между двумя отпечатками. Число твердости по Виккерсу (HV) рассчитывали по следующему выражению:

$$HV = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = \frac{1,8544P}{d^2}, \quad (1)$$

где P – нагрузка, прилагаемая к образцу, кгс; d – среднее значение измеряемых диагоналей, мм.

За истинное значение твёрдости по Виккерсу принималось среднее значение пяти измерений.

Химический состав цветной стеклотары определяли с использованием рентгенофлуоресцентного метода (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав цветной отечественной и зарубежной стеклотары

	Цвет тары	Массовое содержание, мас. %								
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂
Отечественная стеклотара	Зелёная	70,5	3,3	10,0	2,0	13,2	0,2	0,3	0,3	0,4
	Коричневая	71,7	1,9	8,0	4,0	13,0	0,3	0,7	0,2	–
	Синяя	67,5	5,2	4,7	2,2	17,2	0,9	2,0	0,3	–
Зарубежная стеклотара	Изумрудная	69,7	3,21	6,01	3,93	14,59	0,26	–	0,37	–
	Оливковая	72,0	2,3	5,76	4,0	15,5	0,19	–	0,5	–
	Темно-зелёная	72,5	2,5	7,0	4,0	14,0	0,46	–	0,2	–

Жидкое натриевое стекло соответствовало требованиям ГОСТ 13078-81. Показатели качества жидкого стекла представлены в таблице 2. Для увлажнения готовили водные растворы жидкого стекла с плотностью 1,02; 1,08 и 1,16 г/см³, соответствующие 20-%, 40-% и 60-% растворам жидкого стекла в воде.

Результаты и обсуждения. Смальта является относительно дорогим облицовочным, декоративным и художественным материалом. Для

изготовления смальты используется дорогостоящее и дефицитное сырьё. Технология изготовления смальты является достаточно энергоёмкой. Замена сырьевых материалов на цветные стеклопорошки, используемой ранее стеклотары, позволяет снизить стоимостные затраты на приобретение компонентов шихты, различных красителей и пигментов. Введение в состав жидкого стекла позволяет снизить температуру обжига смальты и снизить общие энергозатраты на её изготовление.

После синтеза смальты синего цвета с использованием рентгенофлуоресцентного анализа исследовали элементный состав (табл. 3).

Таблица 2

Показатели качества натриевого жидкого стекла

№ п/п	Наименование показателя качества	Значение показателя качества
1	Органолептические показатели (внешний вид)	Густая жидкость серого и серо-желтоватого цветов
2	Содержание оксида кремния, мас. %	29,5
3	Суммарное содержание оксидов железа и алюминия, мас. %	0,31
4	Содержание оксида кальция, мас. %	0,19
5	Содержание серного ангидрида, мас. %	0,14
6	Содержание оксида натрия, мас. %	10,5
7	Силикатный модуль	2,95
8	Плотность, г/см ³	1,38

Таблица 3

Элементный состав синтезированных смальт на основе синего тарного стекла

Жидкое стекло (водный раствор), %	Массовое содержание, мас. %							
	Na	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Co
0	9,29	1,86	0,94	33,13	0,08	6,58	0,05	0,06
20	9,36	1,87	0,89	31,75	0,10	6,46	0,06	0,05
40	9,63	1,90	0,89	30,86	0,06	5,97	0,05	0,06
60	9,82	1,93	0,93	30,67	0,07	5,67	0,07	0,05

С увеличением концентрации жидкого стекла в смальте увеличивается общее содержание натрия, что способствовало снижению температуры спекания смальты.

Энергодисперсионные спектры исследуемых составов смальт представлены на рисунке 1.

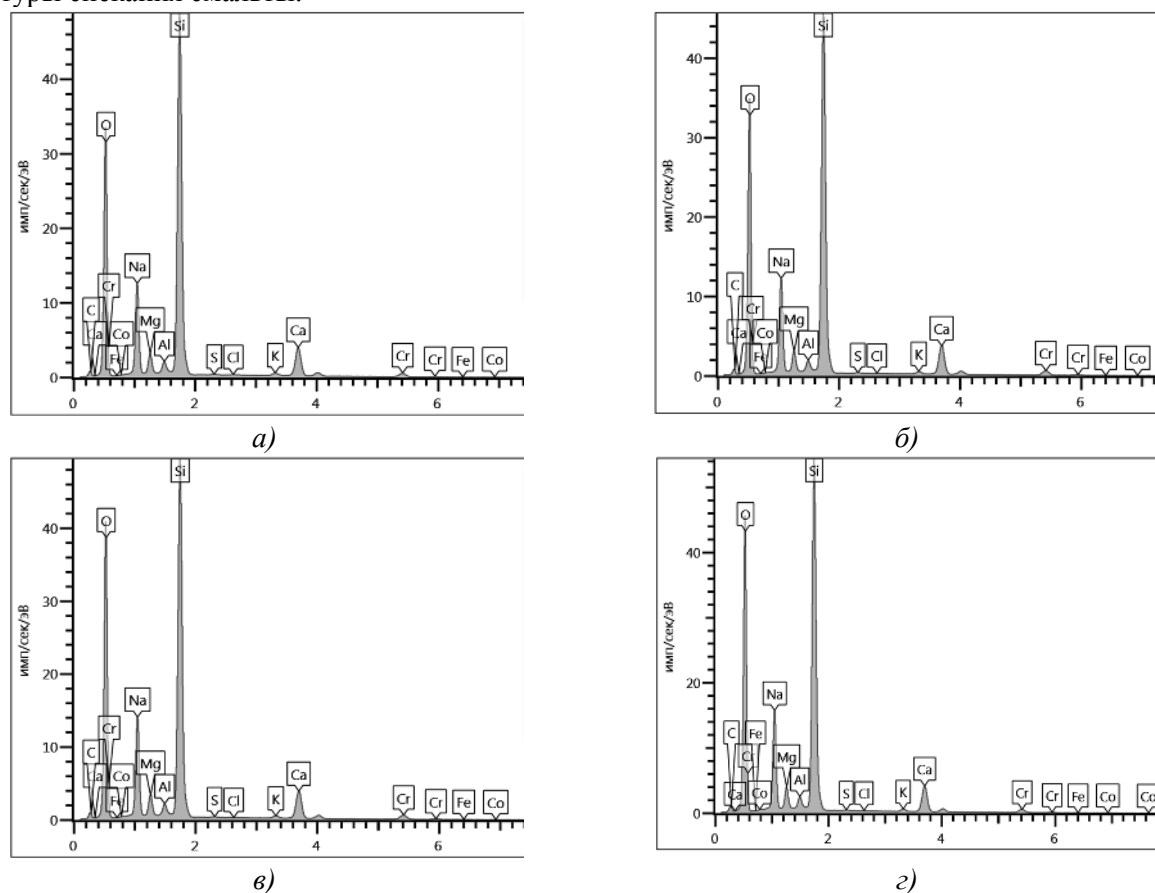


Рис. 1. Энергодисперсионные спектры смальты:

а – на основе шихты без жидкого стекла; б – на основе шихты с 20-% водным раствором жидкого стекла; в – на основе шихты с 40-% водным раствором жидкого стекла; г – на основе шихты с 60-% водным раствором жидкого стекла

С использованием растровой электронной микроскопии исследовали микроструктуру оптимального состава смальты с содержанием 40-%

водного раствора жидкого стекла в исходной шихте.

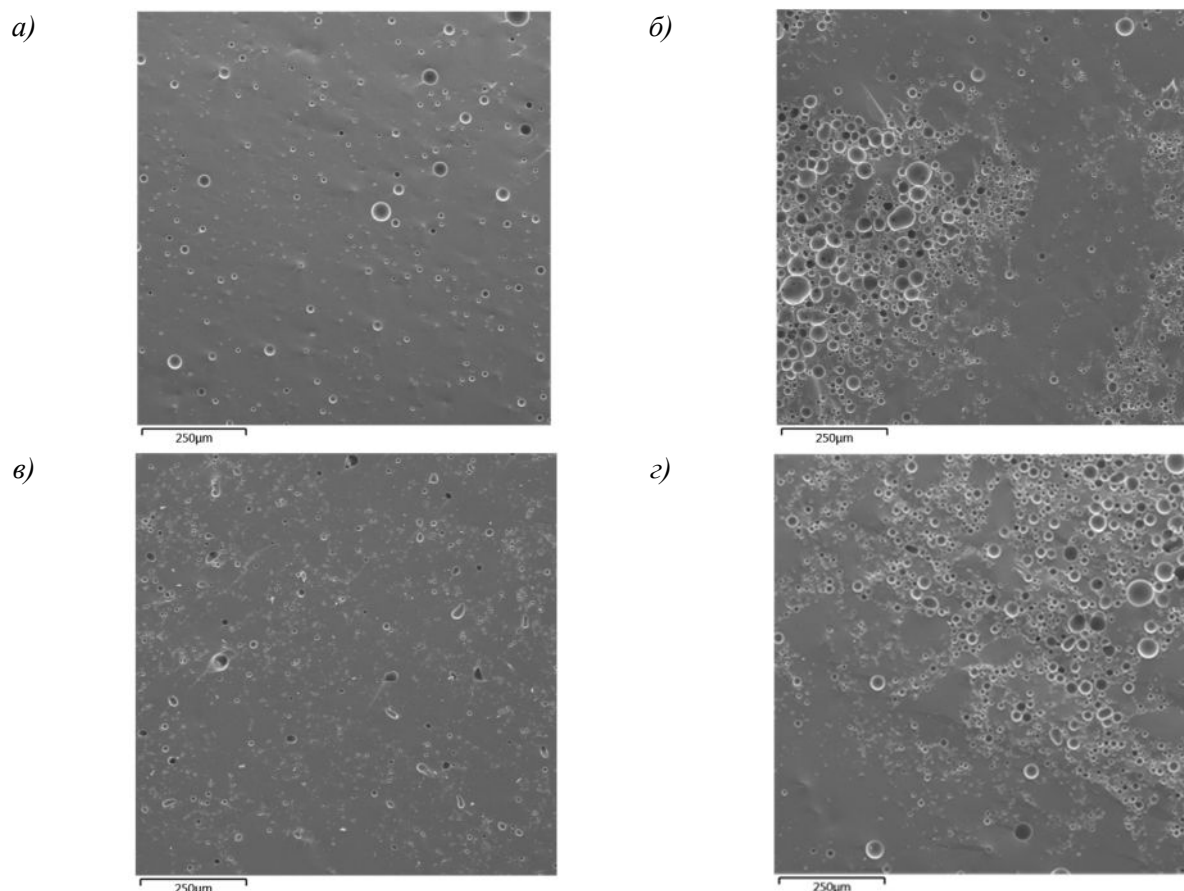


Рис. 2. Микроструктура смальты:

- а* – на основе шихты без жидкого стекла;
б – на основе шихты с 20-% водным раствором жидкого стекла;
в – на основе шихты с 40-% водным раствором жидкого стекла;
г – на основе шихты с 60-% водным раствором жидкого стекла

Наиболее плотной структурой с минимальным количеством газовых включений является смальта синего цвета на основе шихты с 40-% водным раствором жидкого стекла.

На заключительном этапе исследовали микротвёрдость смальты синего цвета, синтезированной

ванной из шихт с 40-% водным раствором жидкого стекла при температурах обжига 700, 725 750 и 775 °С. На величину микротвёрдости оказывает влияние как температура обжига, так и концентрация добавляемого жидкого стекла. Результаты исследований представлены в таблице 4.

Таблица 4

Микротвёрдость смальты синего цвета, синтезированной из шихты с 40-% водным раствором жидкого стекла

№ п/п	Температура обжига, °С	Микротвердость, НВ
1	700	468,45
2	725	575,52
3	750	522,14
4	775	521,18

Оптимальной является концентрация жидкого стекла 40-%. Это позволяет снизить температуру обжига с 775 до 725 °С. При температуре обжига 725 °С наблюдается максимальная микротвёрдость.

Выводы. Разработана технология получения смальты на основе боя цветных тарных стёкол, синтезированных из шихт с водным раствором жидкого стекла. Определены оптимальные технологические параметры синтеза смальты.

Показано, что при температуре синтеза 725 °С микротвёрдость смальты синего цвета, синтезированной на основе шихт с 40-% водным раствором жидкого стекла, достигает максимального значения.

Исследована микроструктура смальты синего цвета. Показано, что смальта по сравнению с другими составами обладает минимальным количеством газовых включений и максимальной плотностью.

Исследован элементный состав смальт, синтезированных из шихт с содержанием 20-%, 40-%, 60-% водного раствора жидкого стекла.

Источник финансирования. Грант Президента для научных школ НШ-2724.2018.8.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лазько Е.А., Минько Н.И., Бессмертный В.С., Лазько А.А. Современные тенденции сбора и переработки стекольного боя // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. № 2. С. 109–112.
2. Болотин В.Н., Минько Н.И. Стеклобой. Вторая жизнь // Стекло мира. 1997. №4. С. 57–62.
3. Смирнова Л.Б. Гранулированное пено-стекло из боя стекла // Стекло и керамика. 1992. № 3. С. 22.
4. Lesovik V.S., Bessonov I.V., Bulgakov B.I., Larsen O.A., Puchka O.V., Vaysera S.S. Approach on improving the performance of thermal insulating and acoustic glass composites // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. Article number 042030.
5. Lesovik V.S., Puchka O.V., Vaisera S.S. Reduction of energy consumption of thermal insulation materials // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10. Issue 19. Pp. 40599–40602.
6. Puchka O.V., Min'ko N.I., Stepanova M.N. Foam-glass based composite heat-insulating material with a protective-decorative coating on the front surface // Glass and Ceramics. 2009. Vol. 66. Issue 1–2. P. 43–45.
7. Бессмертный В.С., Ильина И.А., Соколова О.Н. Получение защитно-декоративных покрытий на стеновых строительных материалах автоклавного твердения // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 3. С. 155–157.
8. Бондаренко Н.И., Бессмертный В.С., Ильина И.А., Гащенко Э.О. Глазурование изделий из бетона с использованием факела низкотемпературной плазмы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. № 2. С. 124–127.
9. Бессмертный В.С., Жерновой Ф.Е., Дорохова Е.С., Изотова И.А. Методология разработки состава и прогнозирования свойств композита на основе стекольного боя // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 3. С. 130–134.
10. Dorokhova E.S., Zhernovaya N.F., Bessmertnyi V.S., Zhernovoi F.E., Tarasova E.E. Control of the structure of porous glass-ceramic material. Glass and Ceramics. 2017. Vol. 74. Issue 3–4. Pp. 95–98.
11. Dorokhova E.S., Zhernovoi F.E., Izotova I.A., Bessmertnyi V.S., Zhernovaya N.F., Tarasova E.E. Shrink-free face material based on cullet and colemanite. Glass and Ceramics. 2016. Vol. 73. Issue 3–4. Pp. 103–106.
12. Bessmertnyi V.S., Krokhin V.P., Panasenkov V.A., Nikiforov V.M., Shvyrkina O.N. Glazed wall ceramics using KMA waste. Glass and ceramics. 1998. Vol. 55. Issue 7–8. Pp. 222–223.
13. Bessmertny V.S., Min'ko N.I., Bondarenko N.I., Simachev A.V., Zdorenko N.M., Rozdolskaya I.V., Bondarenko D.O. Evaluation of the competitiveness of wall building materials with glassy protective-decorative coatings obtained by plasma fusing. Glass and Ceramics. 2015. Vol. 72. Issue 1–2. Pp. 41–46.
14. Bondarenko D.O., Bondarenko N.I., Bessmertnyi V.S., Strokova V.V. Plasma-chemical modification of concrete. Advances in Engineering Research. 2018. Vol. 157. Pp. 105–110.
15. Krokhin V.P., Bessmertnyi V.S., Panasenkov V.A., Drizhd N.A., Nikiforov V.M. Decoration of glass and glass articles using the plasma-spraying method. Glass and Ceramics. 1999. Vol. 56. Issue 3–4. Pp. 78–80.
16. Volokitin O., Volokitin G., Skripnikova N., Shekhovtsov V. Plasma technology for creation of protective and decorative coatings for building materials. AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1698. Article number 070022.
17. Bondarenko D.O., Bondarenko N.I., Bessmertnyi V.S., Burlakov N.M. Plasma-chemical modification of concrete processed by colorific metal salts. Advances in Engineering Research. 2017. Vol. 133. Pp. 128–134.

Информация об авторах

Бондаренко Надежда Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: bondarenko-71@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Бондаренко Диана Олеговна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: di_bondarenko@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Бондаренко Марина Алексеевна, студентка 5 курса кафедры защиты в чрезвычайных ситуациях. E-mail: slaviki1@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дороганов Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: doroganov@intbel.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в августе 2019 г.

©Бондаренко Н.И., Бондаренко Д.О., Бондаренко М.А., Дороганов Е.А., 2019

***Bondarenko N.I., Bondarenko D.O., Bondarenko M.A., Doroganov E.A.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Russia, 308012, Belgorod, St. Kostyukova, 46

**E-mail: bondarenko-71@mail.ru*

FACING AND DECORATIVE MATERIALS BASED ON GLASS DOMESTIC WASTE

Abstract. *The areas of use of glass domestic waste in the building materials industry are considered. The possibility of obtaining a facing and decorative material-smalt based on colored container and high-quality glass is considered. An innovative technology has been developed for the production of smalt based on finely ground powders of colored container glass using 20%, 40% and 60% liquid glass as a humidifier. The dependences of the influence of various concentrations of aqueous solutions of liquid glass on the degree of compaction of smalt are established. It is shown that the addition of aqueous solutions of liquid glass to the glass powder before pressing reduces the firing temperature from 775 to 725 ° C. the influence of different concentrations of aqueous solution of liquid glass in the initial charges on the chemical composition of the smalt is investigated. The elemental composition of smalt is studied using the x-ray fluorescence method. The microstructure of smalt made from a mixture with an optimum content of 40% aqueous solution of water glass is investigated. The effect of various concentrations of liquid glass on the microhardness of smalt is provided. It is shown that when the content of 40% liquid glass in an aqueous solution, the microhardness reaches maximum values.*

Keywords: *smalt, colored container and varietal glass, liquid glass, microhardness.*

REFERENCES

1. Lazko E.A., Minko N.I., Bessmertny V.S., lazko A.A. Modern tendencies of collecting and processing of glass fight [Sovremennye tendencii sbora i pererabotki stekol'nogo boya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2011. No. 2. Pp. 109–112. (rus)
2. Bolotin, V. N., Minko N. I. Broken glass. The second life [Stekloboj. Vtoraya zhizn'] // Glass world. 1997. No. 4. Pp. 57–62. (rus)
3. Smirnova L.B. Granulated foam glass from the battle of glass [Granulirovannoe penosteklo iz boya stekla]. Glass and ceramics. 1992. No. 3. Pp. 22. (rus)
4. Lesovik V.S., Bessonov I.V., Bulgakov B.I., Larsen O.A., Puchka O.V., Vaysera S.S. Approach on improving the performance of thermal insulating and acoustic glass composites. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. No. 042030.
5. Lesovik V.S., Puchka O.V., Vaisera S.S. Reduction of energy consumption of thermal insulation materials. International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10. No 19. Pp. 40599–40602.
6. Puchka O.V., Min'ko N.I., Stepanova M.N. Foam-glass based composite heat-insulating material with a protective-decorative coating on the front surface. Glass and Ceramics. 2009. Vol. 66. No 1-2. Pp. 43–45.
7. Bessmertny V.S., Ilyina I.A., Sokolova O.N. Obtaining protective and decorative coatings on wall construction materials of autoclave hardening [Poluchenie zashchitno-dekorativnyh pokrytij na stenovyh stroitel'nyh materialah avtoklavnogo tverdeniya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2012. No. 3. Pp. 155–157. (rus)
8. Bondarenko N. I., Bessmertny V. S., Ilyina I. A., Gashchenko E. O. Glazing of concrete products using a low-temperature plasma torch [Glazurovanie

izdelij iz betona s ispol'zovaniem fakela nizkotemperaturnoj plazmy]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2012. No. 2. Pp. 124–127. (rus)

9. Bessmertny V.S., Zhernova F.E., Dorokhova E.S., Izotova I.A. Methodology of composition development and prediction of composite properties on the basis of glass fight [Metodologiya razrabotki sostava i prognozirovaniya svojstv kompozita na osnove stekol'nogo boya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2015. No. 3. Pp. 130–134. (rus)

10. Dorokhova E.S., Zhernovaya N.F., Bessmertnyi V.S., Zhernovoi F.E., Tarasova E.E. Control of the structure of porous glass-ceramic material. Glass and Ceramics. 2017. Vol. 74. No. 3–4. Pp. 95–98.

11. Dorokhova E.S., Zhernovoi F.E., Izotova I.A., Bessmertnyi V.S., Zhernovaya N.F., Tarasova E.E. Shrink-free face material based on cullet and colemanite. Glass and Ceramics. 2016. Vol. 73. No. 3–4. Pp. 103–106.

12. Bessmertnyi V.S., Krokhin V.P., Panasenko V.A., Nikiforov V.M., Shvyrkina O.N. Glazed wall ceramics using KMA waste. Glass and ceramics. 1998. Vol. 55. No. 7–8. Pp. 222–223.

13. Bessmertny V.S., Min'ko N.I., Bondarenko N.I., Simachev A.V., Zdorenko N.M., Rozdolskaya

I.V., Bondarenko D.O. Evaluation of the competitiveness of wall building materials with glassy protective-decorative coatings obtained by plasma fusing. Glass and Ceramics. 2015. Vol. 72. No. 1–2. Pp. 41–46.

14. Bondarenko D.O., Bondarenko N.I., Bessmertnyi V.S., Strokova V.V. Plasma-chemical modification of concrete. Advances in Engineering Research. 2018. Vol. 157. Pp. 105–110.

15. Krokhin V.P., Bessmertnyi V.S., Panasenko V.A., Drizhd N.A., Nikiforov V.M. Decoration of glass and glass articles using the plasma-spraying method. Glass and Ceramics. 1999. Vol. 56. No. 3–4. Pp. 78–80.

16. Volokitin O., Volokitin G., Skripnikova N., Shekhovtsov V. Plasma technology for creation of protective and decorative coatings for building materials. AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1698. No. 070022.

17. Bondarenko D.O., Bondarenko N.I., Bessmertnyi V.S., Burlakov N.M. Plasma-chemical modification of concrete processed by colorific metal salts. Advances in Engineering Research. 2017. Vol. 133. Pp. 128–134.

Information about the authors

Bondarenko, Nadezda I. PhD, Assistant professor. E-mail: bondarenko-71@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Bondarenko, Diana O. PhD, Senior lecturer. E-mail: di_bondarenko@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Bondarenko, Marina A. Student. E-mail: slaviki1@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Doroganov, Evgeniy A. PhD, Assistant professor. E-mail: doroganov@intbel.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in August 2019

Для цитирования:

Бондаренко Н.И., Бондаренко Д.О., Бондаренко М.А., Дороганов Е.А. Облицовочные и декоративные материалы на основе стеклянных бытовых отходов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 11. С. 79–85. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-79-85

For citation:

Bondarenko N.I., Bondarenko D.O., Bondarenko M.A., Doroganov E.A. Facing and decorative materials based on glass domestic waste. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 11. Pp. 79–85. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-79-85

DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-86-93

¹Трубицын М.А., ^{1,*}Хоанг Вьет Хунг, ¹Фурда Л.В., ²Ле Ван Тхуан¹Белгородский государственный национальный исследовательский университет
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, д. 85²Зуйтанский университет, Вьетнам, 550000, г. Дананг, ул. Нгуен Ван Линь, д. 254

*E-mail: hung.hoangviet191290@gmail.com

**СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
НАНОРАЗМЕРНОГО ГИДРОКСИАПАТИТА, ДОПИРОВАННОГО
КАРБОНАТ- И СИЛИКАТ-АНИОНАМИ**

Аннотация. Гидроксиапатит $[Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2, \text{ГАП}]$, который очень близок по химическому составу с костной тканью, широко применяется в медицинской практике как заменитель костного трансплантата. Однако немодифицированный ГАП обладает низкой скоростью резорбции и слабым стимулирующим воздействием на рост новой костной ткани. Внедрение карбонат-ионов в структуру ГАП существенно влияет на процесс минерализации и повышает скорость остеоинтеграции. Также важную положительную роль играют анионы кремния (до 5%), особенно на начальных стадиях формирования костного матрикса. В связи с этим представляется перспективным допирование синтетических гидроксиапатитов карбонат- и силикат-анионами. В данной работе приведены результаты физико-химического анализа образцов гидроксиапатита, допированных карбонат- и силикат-анионами, синтезированных методом химического осаждения в водных щелочных растворах. Структура и свойства образцов охарактеризованы с применением рентгенофазового анализа (РФА), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и ИК-спектрометрии. Установлено, что при осаждении твердой фазы ГАП происходит частичное замещение фосфат-ионов карбонат- и силикат-анионами. Результаты показали, что синтезированные материалы представлены наноразмерными кристаллитами игольчатой (ГАП) и сферической формы (КГАП, Si-ГАП) (12-85.5 нм) и являются однофазными. Внедрение карбонат- и силикат-анионов в структуру ГАП существенно влияет на их морфологию и размер частиц. Это дает возможность рассматривать образцы КГАП и Si-ГАП как перспективные биоматериалом для ортопедического и дентального протезирования.

Ключевые слова: гидроксиапатит, допирование, карбонат- и силикат-анионы, биоматериал, морфология, размер частиц.

Введение. В последнее десятилетие костные дефекты, возникающие в результате травм либо различных патологий твердых тканей, представляют серьезную проблему в ортопедии [1]. Гидроксиапатит $[Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2, \text{ГАП}]$, который очень близок по химическому составу с костной тканью, широко применяется в медицинской практике как заменитель костного трансплантата [2–4]. Однако немодифицированный ГАП, используемый в регенеративной медицине, обладает низкой скоростью резорбции и слабым стимулирующим воздействием на рост новой костной ткани.

Известно, что биоапатит содержит в своей структуре 3–8 % масс. карбонат-ионов [5, 6]. Исследователи сообщают [7–9], что внедрение карбонат-ионов существенно влияет на структуру кристаллической решетки ГАП, процесс минерализации и повышает скорость остеоинтеграции. Также указывается, что важную положительную роль играют анионы кремния (до 5 %), особенно на начальных стадиях формирования костного матрикса [10, 11], а дефицит кремния – причина аномального развития скелета [12, 13]. Кроме

того, установлено, что синтетический Si-ГАП обладает более высокой скоростью резорбции и биоактивностью по сравнению с немодифицированным гидроксиапатитом. В связи с этим представляется перспективным допирование синтетических гидроксиапатитов карбонат- и силикат-анионами.

Целью настоящей работы являлся синтез наноразмерного гидроксиапатита, допированного карбонат- и силикат-анионами, а также сопоставительный анализ морфологии и физико-химических характеристик синтезированных образцов.

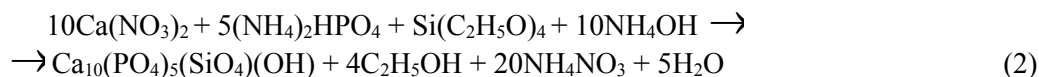
Основная часть. В данной работе были синтезированы образцы наноразмерного ГАП, допированные карбонат-анионами, отвечающие формуле $Ca_{10}(PO_4)_{6-x}(CO_3)_x(OH)_{2-x}$, со степенью замещения $x = 1.0$ и образцы наноразмерного ГАП, допированные силикат-анионами, отвечающие формуле $Ca_{10}(PO_4)_{6-y}(SiO_3)_y(OH)_{2-y}$, со степенью замещения $y = 1.0$. В качестве объекта сравнения использовали образцы немодифицированного

гидроксипатита (ГАП) с мольным соотношением $\text{Ca/P}=1.67$.

Синтез гидроксипатита, допированного карбонат-анионами (КГАП), осуществляли по



В качестве прекурсора карбонат-ионов использовали карбонат аммония, необходимое количество которого растворяли в заранее приготовленном растворе нитрата кальция, исходя из мольного соотношения $\text{Ca}/(\text{PO}_4^{3-} + \text{CO}_3^{2-})=1.67$.



В качестве прекурсора силикат-ионов использовали ТЭОС, необходимое количество которого вводили в заранее приготовленный раствор нитрата кальция с учетом мольного соотношения $\text{Ca}/(\text{PO}_4^{3-} + \text{SiO}_4^{4-})=1.67$.

Во всех случаях синтез проводили при комнатной температуре и pH на уровне 10,5 в реакторе, оборудованном верхнеприводной мешалкой, при интенсивном перемешивании в течение 30 минут. Затем реакционную смесь отстаивали в течение 24 часов, а полученный осадок отфильтровывали, промывали дистиллированной водой, сушили до постоянной массы при температуре 105 °С и далее измельчали в фарфоровой ступке до порошкообразного состояния.

Количественное определение содержания элементов Ca, P, C и Si в синтезированных образцах ГАП, КГАП и Si-ГАП проводили методом рентгеноспектрального микроанализа на растровом ионно-электронном микроскопе Quanta 200 3D.

Фазовый состав полученных порошков изучали методом рентгенофазового анализа (РФА). Размер первичных кристаллитов, образующихся при осаждении немодифицированного ГАП, КГАП и Si-ГАП, рассчитывали по формуле Шеррера согласно данным РФА, а объём элементарных ячеек - по формуле $V_{\text{ячейки}} = \left(\frac{a}{2}\right)^3 \cdot c^2$. Съемку рентгенограмм проводили на дифрактометре Rigaku Ultima IV ($\text{CuK}\alpha$ - излучение с длиной волны $\lambda = 1.54178 \text{ \AA}$, диапазон углов $2\theta = 5-85^\circ$, шаг сканирования $0,02^\circ$, скорость регистрации спектров $3^\circ/\text{мин}$). Результаты обрабатывали с помощью программы PDXL Qualitative Analysis с использованием базы данных ICDD, PDF 2008.

Исследования морфологии поверхности и оценку размера частиц, исследуемых образцов в форме гидрогеля проводили с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ)

известной методике [14] в соответствии с уравнением:

Синтез гидроксипатита, допированного силикат-анионами (Si-ГАП), осуществляли по известной методике [15] в соответствии с уравнением:

JEM-2100 (фирма JEOL Ltd., Япония). Ускоряющее напряжение электронной пушки составляло 200 кВ, материал катода – монокристалл LaB_6 , ток утечки при включенном катоде – 101.5 мкА. Изображения получены в просвечивающем режиме при увеличениях до 200000 раз.

Структуру порошков, полученных после высушивания гидрогелей, изучали на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Quanta 200 3D при ускоряющем напряжении электронной пушки 5 кВ с использованием CCD камеры и применением преобразования Хуга. Увеличение изображения составляло до 20000 раз.

Исследование ИК-спектров поглощения полученных порошков проводилось с применением инфракрасного Фурье спектрофотометра «IRPrestige-21» (фирма Shimadzu, Япония) в интервале волновых чисел $4000-400\text{cm}^{-1}$ (образцы готовили в виде таблетки с KBr).

Результаты и их обсуждение. Согласно результатам РФА все полученные образцы ГАП, допированные карбонат- и силикат-анионами, являются однофазными нанокристаллическими (рис. 1) и могут быть идентифицированы как модификация ГАП (PDF карта № 01-072-1243), а их характеристики представлены в таблице 1. Они принадлежат к той же пространственной группе, что и гидроксипатит, а именно гексагональной сингонии $\text{P6}_3/\text{m}$. Важно отметить, что дифрактограммы образцов ГАП, допированных карбонат-анионами, отличаются более широкими линиями и меньшей интенсивностью по сравнению с немодифицированным ГАП (рис.1).

Из данных таблицы 1 видно, что все синтезированные образцы ГАП, КГАП и Si-ГАП представлены кристаллитами, средний размер которых составляет 14.30 нм для ГАП, а для образцов КГАП и Si-ГАП – 3.92 нм и 9.68 нм соответственно. Это потенциально должно обеспечить повышенную резорбируемость, а также биоактивность данных материалов.

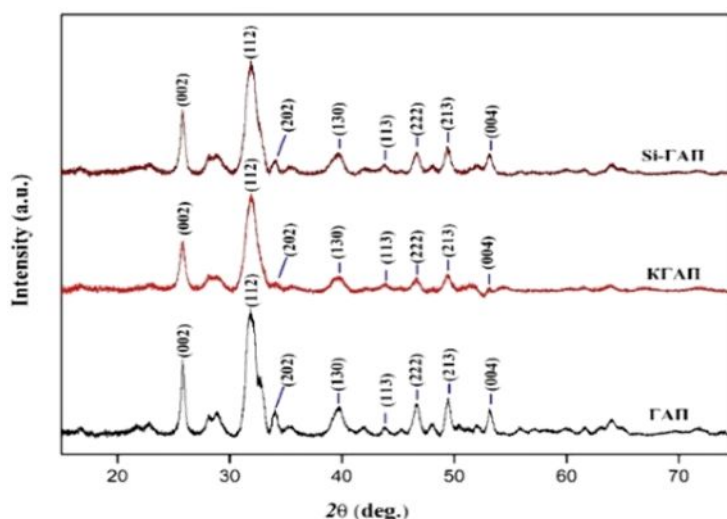


Рис. 1. Порошковые рентгеновские дифрактограммы образцов ГАП, КГАП и Si-ГАП

Таблица 1

Характеристики полученных образцов (по данным РФА)

Образец	Фаза	Параметры элементарной ячейки, Å		Объем элементарной ячейки, Å ³	Средний размер кристаллитов, нм
		a	c		
ГАП	1	9.453	6.905	534.35	14.30
КГАП	1	9.450	6.902	533.79	3.92
Si-ГАП	1	9.448	6.901	533.48	9.68

Для всех синтезированных образцов, находящихся в виде гидрогелей, сразу после синтеза, были проведены морфологические исследования методом просвечивающей электронной микроскопии. Как следует из ПЭМ-изображений (рис. 2), частицы образцов ГАП имеют игольчатую

форму длиной 15–52 нм. В то же время, для частиц образцов КГАП и Si-ГАП характерно наличие сферической формы с размерами 12.4–47.6 нм и 15.7–85.5 нм соответственно. Таким образом, внедрение карбонат- и силикат-ионов в структуру ГАП существенно влияет на морфологию и размер частиц.

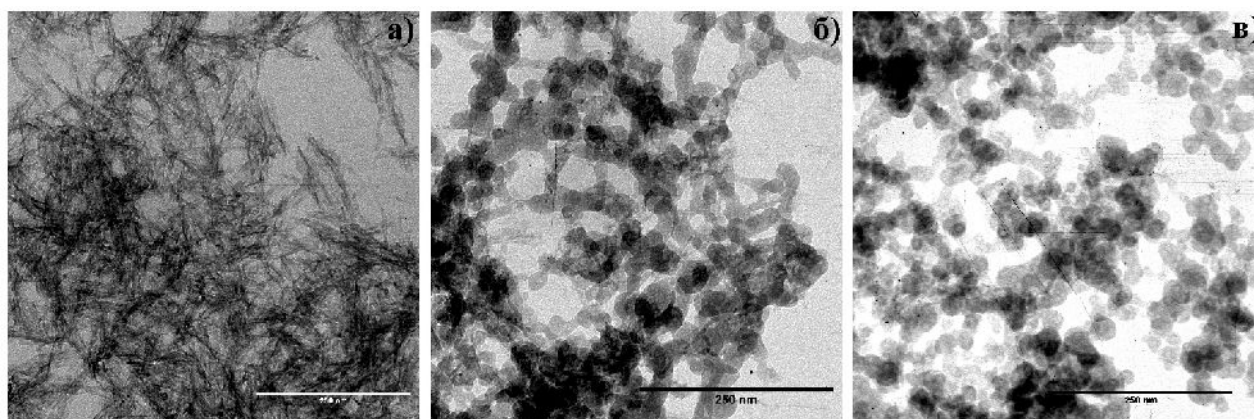


Рис. 2. ПЭМ-изображения образцов ГАП (а), КГАП (б) и Si-ГАП (в).

После высушивания гидрогелей все синтезированные образцы представляли собой порошки белого цвета. Проведенный анализ СЭМ изображений порошков показал, что они имеют схожую морфологию и состоят из агломератов размером

1–17 мкм. На рисунке 3 в качестве примера приведены микрофотографии порошков ГАП, КГАП и Si-ГАП.

На рисунке 4 представлены ИК-спектры поглощения полученных образцов ГАП, КГАП и Si-ГАП.

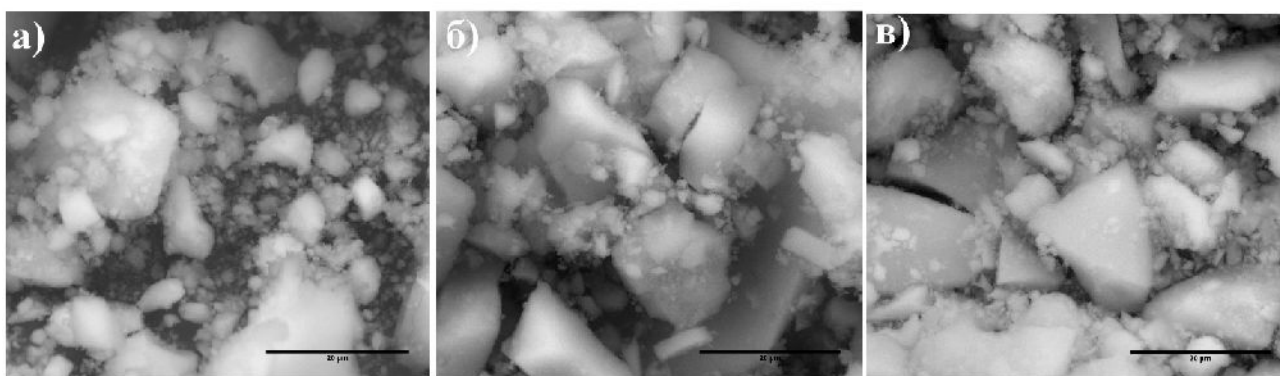


Рис. 3. СЭМ-изображения порошков: ГАП (а); КГАП (б) и Si-ГАП (в).

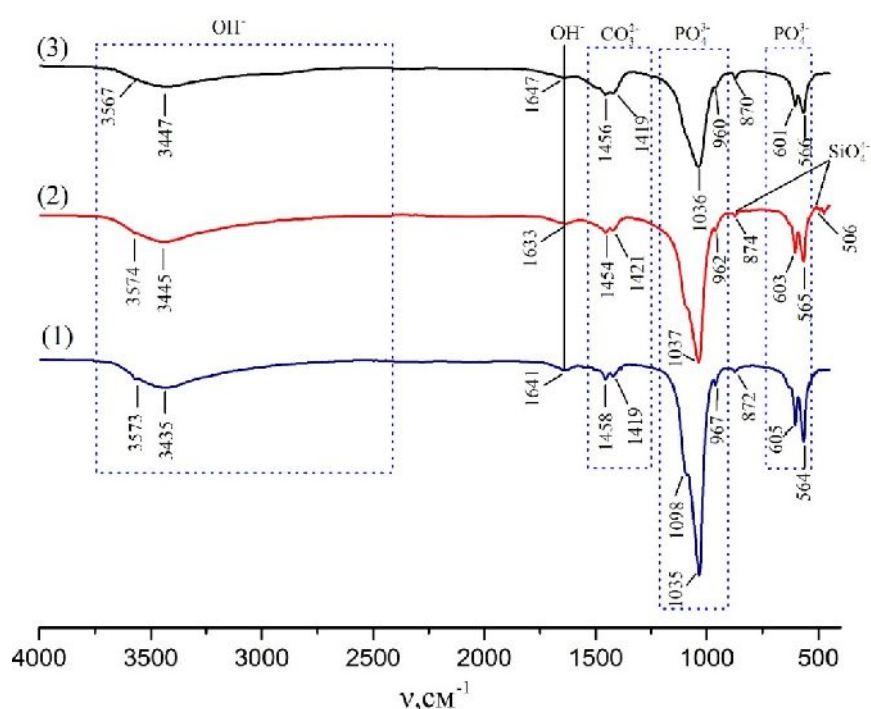


Рис. 4. ИК-спектры образцов: (1) – ГАП; (2) - Si-ГАП и (3) – КГАП.

На спектре (1) присутствуют полосы поглощения, относящиеся к ГАП: полосы 3570 см^{-1} соответствуют валентным колебаниям О-Н групп, полосы $960\text{--}1098\text{ см}^{-1}$ отвечают валентным колебаниям фосфатных групп, а полосы $564\text{--}605\text{ см}^{-1}$ принадлежат деформационным колебаниям фосфатных групп.

На спектрах (2) и (3) для гидроксиапатита, допированного силикат- и карбонат анионами, присутствуют полосы поглощения $506\text{--}874\text{ см}^{-1}$, которые указывают на присутствие SiO_4^{4-} – ионов в структуре ГАП [16], а также полосы поглощения $1419\text{--}1456$ и 870 см^{-1} , характерные для CO_3^{2-} – ионов [17, 18]. В спектрах наблюдается уменьшение интенсивностей полосы валентных (3570 см^{-1}) и деформационных (630 см^{-1}) колебаний как результат встраивания карбонат- и силикат-анионов в структуру ГАП. ИК-спектры немодифицированного ГАП и ГАП, допированного

карбонат- и силикат-анионами, отличаются структурой полос поглощения в интервале частот, отвечающих за валентных колебаний PO_4^{3-} – групп. Если на кривой (1) присутствуют три полосы при частотах 967 , 1035 и 1098 см^{-1} соответственно, то на спектрах (2) и (3) в этой области обнаруживаются только две полосы поглощения ($962\text{--}1037\text{ см}^{-1}$ для Si-ГАП) и ($960\text{--}1036\text{ см}^{-1}$ для КГАП).

Также для спектров всех образцов характерно наличие валентных колебаний CO_3^{2-} – групп, что связано с адсорбцией углекислого газа из атмосферы воздуха в процессе синтеза.

Исходя из данных ИК-спектроскопии, предполагается следующая схема замещения фосфатных групп в структуре ГАП на карбонат- и силикат-анионами (рис. 5) [19, 20].

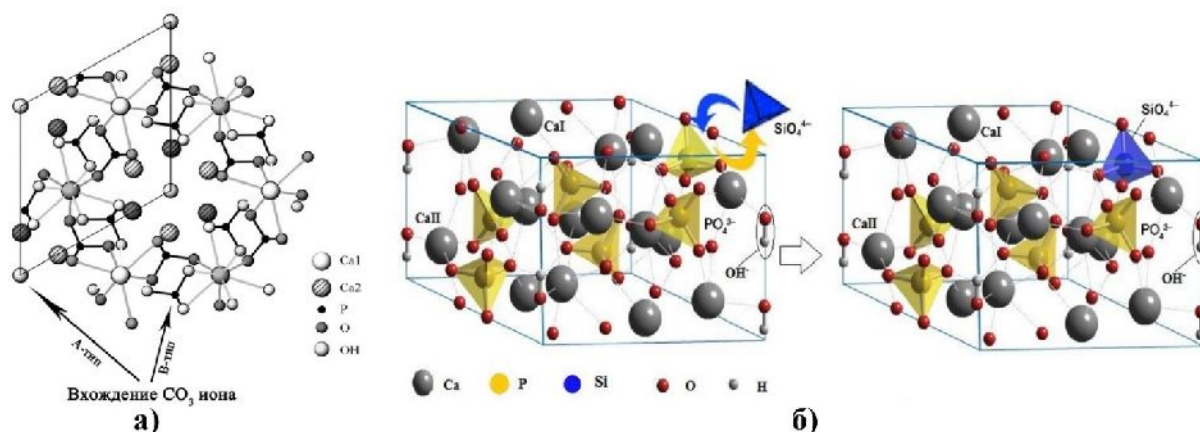


Рис. 5. Схема замещения фосфат ионов на карбонат (а) и силикат-анионами (б)

Выводы. Методом осаждения из водных щелочных растворов синтезированы однофазные наноразмерные образцы ГАП, допированные карбонат- и силикат-анионами. Внедрение данных анионов в структуру ГАП существенно влияет на морфологию и размер частиц. Физико-химическими методами анализа установлено, что данные материалы в отличие от игольчатых наночастиц немодифицированного ГАП имеют сферическую форму кристаллитов размером 12–85.5 нм. Это дает возможность рассматривать образцы КГАП и Si-ГАП как перспективные биоматериалом для ортопедического и дентального протезирования.

Благодарность. Работа выполнена с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования «Технологии и Материалы НИУ «БелГУ».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Dorozhkin S.V. Bioceramics of calcium orthophosphates // *Biomaterials*. 2010. № 31(7). Pp. 1465–1485. doi:10.1016/j.biomaterials.2009.11.050.
2. Best S. M., Porter A. E., Thian E. S., Huang J. Bioceramics: Past, present and for the future // *Journal of the European Ceramic Society*. 2008. № 28 (7). Pp. 1319–1327. doi:10.1016/j.jeurceram-soc.2007.12.001.
3. Ramesh S., Tana C. Y., Bhadurib S. B., Tenge W. D. Rapid densification of nanocrystalline hydroxyapatite for biomedical applications // *Ceramics International*. 2007. № 33(7). Pp. 1363–1367. doi:10.1016/j.ceramint.2006.05.009.
4. Zhou H., Lee J. Nanoscale hydroxyapatite particles for bone tissue engineering // *Acta Biomater*. 2011. № 7(7). Pp. 2769–2781. doi:10.1016/j.actbio.2011.03.019.
5. Xue C., Chen Y., Huang Y., Zhu P. Hydrothermal Synthesis and Biocompatibility Study of Highly Crystalline Carbonated Hydroxyapatite Nanorods // *Nanoscale Res. Lett*. 2015. № 10(1). Pp. 316–321. doi:10.1186/s11671-015-1018-9.
6. Liu Q., Matinlinna J. P., Chen ZF., Ning CY., Ni GX., Pan HB., Darvell B. W. Effect of thermal treatment on carbonated hydroxyapatite: Morphology, composition, crystal characteristics and solubility // *Ceramics International*. 2015. № 41(5). Pp. 6149–6157. doi:10.1016/j.ceramint.2014.11.062.
7. Valletregi M. Calcium phosphates as substitution of bone tissues // *Progress in Solid State Chemistry*. 2004. № 32(1–2). Pp. 1–31. doi:10.1016/j.progsolidstchem.2004.07.001.
8. Landi E., Celottia G., Logroscinob G., Tampieria A. Carbonated hydroxyapatite as bone substitute // *Journal of the European Ceramic Society*. 2003. № 23(15). Pp. 2931–2937. doi:10.1016/S0955-2219(03)00304-2.
9. Landi E., Uggeri J., Sprio S., Tampieri A., Guizzardi S. Human osteoblast behavior on as-synthesized SiO₄ and B-CO₃ co-substituted apatite // *Journal of Biomedical Materials Research Part A*. 2010. № 94A(1). Pp. 59–70. doi:10.1002/jbm.a.32671.
10. Hing K. A., Revell P. A., Smith N., Buckland T. Effect of silicon level on rate, quality and progression of bone healing within silicate-substituted porous hydroxyapatite scaffolds // *Biomaterials*. 2006. № 27(29). Pp. 5014–5026. doi:10.1016/j.biomaterials.2006.05.039.
11. Magnaudeix A., Usseglio J., Lasgorceix M., Lalloue F., Damia C., Brie J., Pascaud-Mathieu P., Champion E. Quantitative analysis of vascular colonisation and angio-conduction in porous silicon-substituted hydroxyapatite with various pore shapes in a chick chorioallantoic membrane (CAM) model // *Acta Biomater*. 2016. № 38. Pp. 179–189. doi:10.1016/j.actbio.2016.04.039.
12. Matesanz M.C., Linares J., Lilue I., Sánchez-Salcedo S., Feito M. J., Arcos D., Vallet-Regi M., Portolés M. T. Nanocrystalline silicon substituted hydroxyapatite effects on osteoclast differentiation and resorptive activity // *Journal of Materials Chemistry B*. 2014. № 2(19). Pp. 2910–2919. doi:10.1039/C3TB21697G.

13. Patel N., Brooks R.A., Clarke M.T., Lee P.M., Rushton N., Gibson I.R., Best S.M., Bonfield W. In vivo assessment of hydroxyapatite and silicate-substituted hydroxyapatite granules using an ovine defect model // Journal of Materials Science: Materials in Medicine. 2005. № 16(5). Pp. 429–440. doi:10.1007/s10856-005-6983-6.

14. Пат. 2588525, Российская Федерация, МПК C01 F11/00. Способ получения наноразмерного кальций-дефицитного карбонатсодержащего гидроксиапатита / М. А. Трубицын; заявитель и патеновладелец Общество с ограниченной ответственностью "Наноапатит". № 2014150230; заявл. 11.12.2014; опубл. 27.06.2016, Бюл. № 18. 18с.

15. Пат. 2500840, Российская Федерация, МПК C30 B29/14. Способ получения нанокристаллического кремнийзамещенного гидроксиапатита / М. А. Трубицын; заявитель и патеновладелец ФГАОУ ВО НИУ БелГУ. № 2012130118; заявл. 16.07.2012; опубл. 10.12.2013, Бюл. № 34. 18с.

16. Bang L. T., Ramesh S., Purbolaksona J., Chinga Y. C., Long B. D., Chandran Hari, Ramesh

S., Othmande R. Effects of silicate and carbonate substitution on the properties of hydroxyapatite prepared by aqueous co-precipitation method // Materials & Design. 2015. № 87. Pp. 788-796. doi:10.1016/j.matdes.2015.08.069.

17. Климашина Е. С. Синтез, структура и свойства карбонатзамещенных гидроксиапатитов для создания резорбируемых биоматериалов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 2011. 23 с.

18. Вересов А.Г., Путляев В.И., Третьяков Ю.Д. Химия неорганических биоматериалов на основе фосфатов кальция // Российский химический журнал. 2004. Т. 48. № 4. С. 52–64.

19. Ле В. Т. Коллоидно-химические аспекты синтеза гидроксиапатита, модифицированного силикат-ионами: дисс. ... канд. техн. наук. Белгород, 2015. 205 с.

20. Вотьяков С.Л., Киселева Д.В., Садыкова Н.О., Смирнов Н.Г., Щапова Ю.В. Физико-химические характеристики ископаемых костных остатков млекопитающих и проблема оценки их относительного возраста. ИК- и радиоспектроскопия, микроскопия. Е.: Изд-во Голицкий, 2009. 82 с.

Информация об авторах

Трубицын Михаил Александрович, кандидат технических наук, профессор кафедры общей химии. E-mail: troubitsin@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д. 85.

Хоанг Вьет Хунг, аспирант кафедры общей химии. E-mail: hung.hoangviet191290@gmail.com. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д. 85.

Фурда Любовь Владимировна, кандидат химических наук, доцент кафедры общей химии. E-mail: furda@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д. 85.

Ле Ван Тхуан, кандидат технических наук, Центр современной химии, Институт исследований и разработок. E-mail: levanthuan3@duytan.edu.vn. Зуйтанский университет. Вьетнам, 550000, г. Дананг, ул. Нгуен Ван Линь, д. 254.

Поступила в сентябре 2019 г.

© Трубицын М.А., Хоанг Вьет Хунг, Фурда Л.В., Ле Ван Тхуан, 2019

¹*Troubitsin M.A., ^{1,*}Hoang Viet Hung, ¹Furda L.V., ²Le Van Thuan*

¹*Belgorod National Research University
Russia, 308015, Belgorod city, st. Pobedy, 85*

²*Duy Tan University, Viet Nam, 550000, Da Nang city, st. Nguyen Van Linh, 254*

**E-mail: hung.hoangviet191290@gmail.com*

SYNTHESIS AND INVESTIGATION THE PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF NANOSIZED HYDROXYAPATITE DOPED BY CARBONATE- AND SILICATE-ANIONS

Abstract. Hydroxyapatite [$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, HAp] is similar in chemical composition to bone tissue and widely used in clinical practice as a bone graft substitute. However, unmodified HAp has a low rate of resorption and a weak stimulating effect on the growth of new bone tissue. The introduction of carbonate ions into

the structure of the HAp significantly affects the mineralization process and increases the rate of osseointegration. Silicon anions (up to 5%) also play an important and positive role, especially in the initial stages of bone matrix formation. In this regard, doping of synthetic hydroxyapatites with carbonate and silicate anions seems promising. This paper presents the results of the physico-chemical analysis of hydroxyapatite (HAp) samples doped with carbonate and silicate anions (CHAp, Si-HAp) synthesized by chemical precipitation in aqueous alkaline solutions. The structure and properties of the obtained samples are characterized using X-ray powder diffraction (XRD), transmission electron microscopy (TEM), scanning electron microscopy (SEM) and infrared spectrometry (IR). It is established that during the precipitation of the solid phase of HAp, a partial of phosphate ions is replaced by carbonate and/or silicate anions. The results show that the synthesized materials have nanoscale-crystallites with needle-shaped (HAp) and/or spherical forms (CHAp, Si-HAp) (12–85.5 nm) and are single-phase. The intrusion of carbonate and silicate anions into the structure of HAp significantly affects their morphology and particle size. This allows to consider CHAp and Si-HAp samples as promising biomaterials for orthopedic and dental prosthetics.

Keywords: hydroxyapatite (HAP), doping, carbonate- and silicate-anions, biomaterial, morphology, particle size.

REFERENCES

1. Dorozhkin S.V. Bioceramics of calcium orthophosphates. *Biomaterials*. 2010. Vol. 31(7). Pp. 1465–1485. doi:10.1016/j.biomaterials.2009.11.050.
2. Best S.M., Porter A.E., Thian E.S., Huang J. Bioceramics: Past, present and for the future. *Journal of the European Ceramic Society*. 2008. Vol. 28 (7). Pp. 1319–1327. doi:10.1016/j.jeurceram-soc.2007.12.001.
3. Ramesh S., Tana C.Y., Bhadurib S.B., Teng W. D. Rapid densification of nanocrystalline hydroxyapatite for biomedical applications. *Ceramics International*. 2007. Vol. 33(7). Pp. 1363–1367. doi:10.1016/j.ceramint.2006.05.009.
4. Zhou H., Lee J. Nanoscale hydroxyapatite particles for bone tissue engineering. *Acta Biomater.* 2011. Vol. 7(7). Pp. 2769–2781. doi:10.1016/j.actbio.2011.03.019.
5. Xue C., Chen Y., Huang Y., Zhu P. Hydrothermal Synthesis and Biocompatibility Study of Highly Crystalline Carbonated Hydroxyapatite Nanorods. *Nanoscale Res. Lett.* 2015. Vol. 10(1). Pp. 316–321. doi:10.1186/s11671-015-1018-9.
6. Liu Q., Matinlinna J.P., Chen Z.F., Ning C.Y., Ni G.X., Pan H.B., Darvell B.W. Effect of thermal treatment on carbonated hydroxyapatite: Morphology, composition, crystal characteristics and solubility. *Ceramics International*. 2015. Vol. 41(5). Pp. 6149–6157. doi:10.1016/j.ceramint.2014.11.062.
7. Valletregi M. Calcium phosphates as substitution of bone tissues. *Progress in Solid State Chemistry*. 2004. Vol. 32(1–2). Pp. 1–31. doi:10.1016/j.progsolidstchem.2004.07.001.
8. Landi E., Celottia G., Logroscinob G., Tampieria A. Carbonated hydroxyapatite as bone substitute. *Journal of the European Ceramic Society*. 2003. Vol. 23(15). Pp. 2931–2937. doi:10.1016/S0955-2219(03)00304-2.
9. Landi E., Uggeri J., Sprio S., Tampieri A., Guizzardi S. Human osteoblast behavior on as-synthesized SiO₄ and B-CO₃ co-substituted apatite. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*. 2010. Vol. 94A(1). Pp. 59–70. doi:10.1002/jbm.a.32671.
10. Hing K.A., Revell P.A., Smith N., Buckland T. Effect of silicon level on rate, quality and progression of bone healing within silicate-substituted porous hydroxyapatite scaffolds. *Biomaterials*. 2006. Vol. 27(29). Pp. 5014–5026. doi:10.1016/j.biomaterials.2006.05.039.
11. Magnaudeix A., Usseglio J., Lasgorceix M., Lalloue F., Damia C., Brie J., Pascaud-Mathieu P., Champion E. Quantitative analysis of vascular colonisation and angio-conduction in porous silicon-substituted hydroxyapatite with various pore shapes in a chick chorioallantoic membrane (CAM) model. *Acta Biomater.* 2016. Vol. 38. Pp. 179–189. doi:10.1016/j.actbio.2016.04.039.
12. Matesanz M.C., Linares J., Lilue I., Sánchez-Salcedo S., Feito M. J., Arcos D., Vallet-Regí M., Portolés M. T. Nanocrystalline silicon substituted hydroxyapatite effects on osteoclast differentiation and resorptive activity. *Journal of Materials Chemistry B*. 2014. Vol. 2(19). Pp. 2910–2919. doi:10.1039/C3TB21697G.
13. Patel N., Brooks R.A., Clarke M.T., Lee P.M., Rushton N., Gibson I.R., Best S.M., Bonfield W. In vivo assessment of hydroxyapatite and silicate-substituted hydroxyapatite granules using an ovine defect model. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*. 2005. Vol. 16(5). Pp. 429–440. doi:10.1007/s10856-005-6983-6.
14. Troubitsin M.A. Method of producing nano-size calcium-deficient carbonate-containing hydroxyapatite [Sposob polucheniya nanorazmernogo kal'cij-deficitnogo karbonatsoderzhashchego gidroksiapatita]. Patent RF, no. 2014150230, 2014.
15. Troubitsin M.A. Producing method of nanocrystalline silicon-replaced hydroxyapatite [Sposob polucheniya nanokristallichesкого кремнийзамещенного гидроксиapatita]. Patent RF, no. 2012130118, 2012.
16. Bang L.T., Ramesh S., Purbolaksona J., Chinga Y.C., Long B.D., Chandran Hari, Ramesh S.,

Othmande R. Effects of silicate and carbonate substitution on the properties of hydroxyapatite prepared by aqueous co-precipitation method. *Materials & Design*. 2015. Vol. 87. Pp. 788–796. doi:10.1016/j.matdes.2015.08.069.

17. Klimashina E.S. Synthesis, structure and properties of carbonate-substituted hydroxyapatites for the creation of reserving biomaterials [Sintez, struktura i svoystva karbonatzameshchennykh gidroksiapatitov dlya sozdaniya rezerbiruemykh biomaterialov]: abstract. diss. ... cand. tech. sciences. Moscow, 2011. 23 p. (rus)

18. Veresov A.G., Putlyaev V.I., Tretyakov Yu.D. Chemistry of inorganic biomaterials based on calcium phosphates [Himiya neorganicheskikh biomaterialov na osnove fosfatov kal'ciya]. Russian

Chemical Journal. Vol. 48. No. 4, 2004. Pp. 52–64. (rus)

19. Le V.T. Colloid-chemical aspects of the synthesis of hydroxyapatite modified with silicate ions [Kolloidno-himicheskie aspekty sinteza gidroksiapatita, modifitsirovannogo silikat-ionami]: diss. ... cand. tech. sciences. Belgorod, 2015. 205 p. (rus)

20. Votyakov S.L., Kiseleva D.V., Sadykova N.O., Smirnov N.G., Shchapova Yu.V. Physico-chemical characteristics of fossil bone remains of mammals and the problem of estimating their relative age. IR and radio spectroscopy, microscopy [Fiziko-himicheskie harakteristiki iskopaemykh kostnykh ostatkov mlekoopitayushchih i problema ocenki ih otnositel'nogo vozrasta. IK- i radiospektroskopiya, mikroskopiya]. Ekaterinburg: Goshchitsky Publishing House, 2009. 82 p. (rus)

Information about the authors

Troubitsin, Mikhail A. PhD, Professor. E-mail: troubitsin@bsu.edu.ru. Belgorod National Research University. Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

Hoang Viet Hung, Postgraduate student. E-mail: hung.hoangviet191290@gmail.com. Belgorod National Research University. Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

Furda, Liubov V. PhD, Assistant professor. E-mail: furda@bsu.edu.ru. Belgorod National Research University. Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

Le Van Thuan, PhD. E-mail: levanthuan3@duytan.edu.vn. Center for Advanced Chemistry, Institute of Research & Development. Duy Tan University. Viet Nam, 550000, Da Nang city, st. Nguyen Van Linh, 254.

Received in September 2019

Для цитирования:

Трубицын М.А., Хоанг Вьет Хунг, Фурда Л.В., Ле Ван Тхуан. Синтез и исследование физико-химических свойств наноразмерного гидроксиапатита, допированного карбонат- и силикат-анионами // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 11. С. 86–93. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-86-93

For citation:

Troubitsin M.A., Hoang Viet Hung, Furda L.V., Le Van Thuan. Synthesis and investigation the physico-chemical properties of nanosized hydroxyapatite doped by carbonate- and silicate-anionS. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019. No. 11. Pp. 86–93. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-86-93

DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-94-100

Бородулин А.С., Калинин А.Н., *Терешков А.Г., Музыка С.С.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

(Национальный исследовательский университет)

Межотраслевой инженеринговый центр «Композиты России»

Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская, дом 5.

*E-mail: atereshkov@emtc.ru

ПОЛИЭФИРИМИДЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТЕПЛОСТОЙКИХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ВЫСОКИМИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

Аннотация. Термопластичные и растворимые в органических растворителях полиэфимиды представляют значительный интерес для создания тепло- и термостойких композиционных материалов, обладающих высокими физико-механическими свойствами. В последние десятилетия разработаны основные научные подходы к синтезу полиимидов со способностью к переработке из расплава и растворов в органических растворителях. Эта методология заключается в снижении температуры стеклования жесткоцепных полиимидов путем увеличения гибкости основной полимерной цепи и/или путем уменьшения межмолекулярного взаимодействия.

Эволюция тонкого органического синтеза является одним из приоритетных направлений развития химической технологии. Химия высокомолекулярных соединений является предметом исследования различных ученых, как в отечественном научном поле, так и за рубежом. Данный интерес обусловлен перспективами применения материалов для промышленных целей. Полиэфимиды относятся к этой группе материалов и содержат в своей цепи различные ароматические, гетероциклические и циклоалифатические группировки и системы. В настоящей статье рассмотрены основные подходы к созданию таких полимеров с улучшенными, по сравнению с полиимидами, технологическими свойствами и перспективы их применения для производства наполненных композиционных материалов на их основе. В работе приводятся свойства рассматриваемых материалов, как обоснование для создания термостойких композиционных материалов.

Ключевые слова: полиимиды, полиэфимиды, температура стеклования, полиамидокислота.

Введение. В настоящее время отечественная промышленность не располагает производством суперконструкционных полиэфирных материалов на основе полиэфиркетонов, полиэфирсульфонов, полиарилэфиркетонов, полиэфимидов. Важность данных материалов обусловлена их широким применением в авиационной, космической и электронной технике, в связи с чем их приходится закупать за рубежом по ценам в десятки раз превышающим широко применяемые на сегодня конструкционные материалы [1, 2].

В настоящее время интенсифицировались работы по разработке отечественных технологий получения суперконструкционных полимеров [3–9]. Однако недостаточно внимания, с нашей точки зрения, уделяется таким материалам, как полиэфимиды. В связи с этим является актуальной оценка мирового уровня технологий их синтеза и зависимости некоторых физико-механических характеристик получаемых материалов от строения и структуры полимерной молекулы.

Методология. В работе были изучены композиционные материалы на основе полиимидов: полимеры «LaRC-TPI» и «Aurum», «Kapton» и «Upilex-RN», полиэфимиды серии «Ultem», полиэфимид «Aurum», полиимидокетон

«LaRC-TPI» («NASA»), полиэфимид «Upilex-RN», полиэфимид «Kapton», полиимид «Upilex-S» («Ube Industries»).

Основная часть. Известно, что полиимиды представляют собой класс конструкционных полимеров с наиболее удачным сочетанием таких важных для практического применения свойств как высокие тепло- и термостойкость, прочность при разрыве и модуль упругости, хорошие диэлектрические свойства, высокую химическую и радиационную стойкость [10, 11, 12]. Однако, наряду с этими достоинствами полиимидам присущ такой важный недостаток, как плохие технологические свойства – из-за высокой жесткости цепи и сильных межмолекулярных взаимодействий их практически невозможно перерабатывать из расплава или раствора. Поэтому изделия из полиимидов изготавливают малопродуктивным способом горячего прессования или в две стадии, используя вначале раствор полиимидокислоты, а затем после испарения растворителя этот полимер циклизуют до полиимиды.

В последние десятилетия разработаны основные научные подходы к синтезу полиимидов со способностью к переработке из расплава и

растворов в органических растворителях. Эта методология заключается в снижении температуры стеклования ($T_{ст}$) жесткоцепных полиимидов путем увеличения гибкости основной полимерной цепи и/или путем уменьшения межмолекулярного взаимодействия. Для этого используют следующие синтетические способы:

1. Введение в основную цепь полимеров химических групп с более высокой степенью свободы вращения, например, $-O-$, $-S-$, $-SO_2-$, $-CO-$, $-C(CH_3)_2-$, $-C(CF_3)_2$

2. Введение асимметричных структур в основную цепь с использованием мета- или орто-связей в ароматических группах.

3. Введение объемных (громоздких) групп, таких как $-C_6H_5$, $-CH_3$ и $-CF_3$, в основные ароматические кольца, что приводит к уменьшению межмолекулярной упаковки.

Для реализации вышеуказанных подходов необходимо специально синтезировать исходные вещества, и в этом плане наиболее удачным с практической точки зрения оказался синтез мономеров, содержащих простые эфирные группы $-O-$ между ароматическими группировками [13]. В таблице 1 приведены для сравнения температуры стеклования и плавления полиимидов и полиэфиримидов, синтезированных с применением вышеуказанного способа синтеза.

Таблица 1

Температуры стеклования и плавления полиимидов (ПИ) и полиэфиримидов (ПЭИ)

№	Марка ПИ или ПЭИ	T_c , °C	$T_{пл}$, °C
1	Upilex-S [14] а)	>500 ж)	—
2	Kapton [14-16] б)	360–410	—
3	Upilex-RN [17, 14, 18] в)	285	—
4	LaRC-TPI [19] г)	250–260	330–350
5	Aurum [20, 21] д)	250	388
6	Ultem [11, 12, 21] е)	217	—

где: а, б, в, г, д описание полимеров см. в тексте;
ж) — температура стеклования выше, чем температура разложения полимера.

Полиимид «Upilex-S» («Ube Industries») имеет следующую структуру элементарного звена [14]:

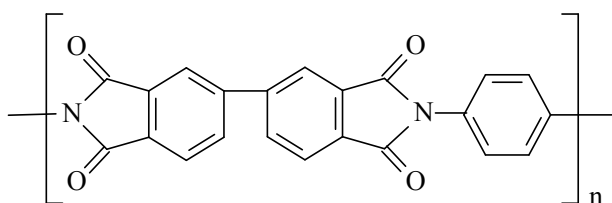


Рис. 1 Структура элементарного звена «Upilex-S»

Полиэфиримид «Kapton», получают из диангида пиромеллитовой кислоты и диаминодифенилоксида [15, 16]. Структура полимера оказалась жесткой, так как он содержит одну мостиковую эфирную связь в повторяющемся элементарном звене, поэтому такой полимер не растворяется в органических растворителях и не перерабатывается из расплава. Его перерабатывают только на стадии образования полиамидокислоты путем пропитки тканей или полива пленок из реакционного раствора в N-метилпирролидоне или диметилацетамиде с последующей циклизацией при ступенчатом нагреве от 200 до 270 °C. Уравнение реакции приведено ниже:

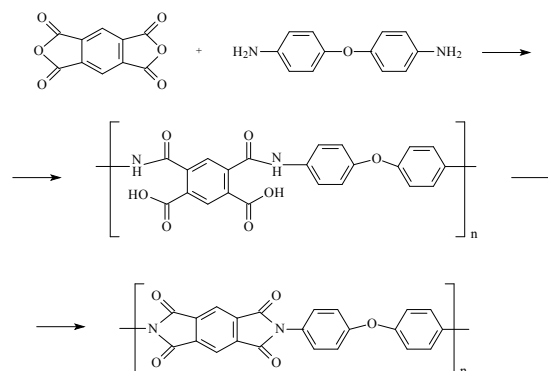


Рис. 2. «Kapton» («Du Pont»)

Полиэфиримид «Upilex-RN» со структурой повторяющегося звена [17, 18]:

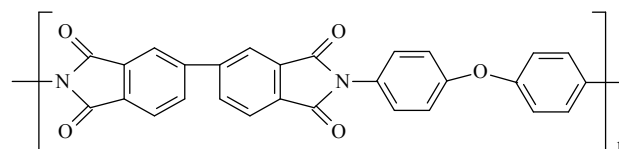


Рис. 3 «Upilex-RN» (Ube Industries)

Также, как и «Kapton» имеет недостаточную гибкость цепи и перерабатывается через растворы полиамидокислоты.

Полиимидокетон «LaRC-TPI» («NASA») имеет следующую структуру элементарного звена [19]:

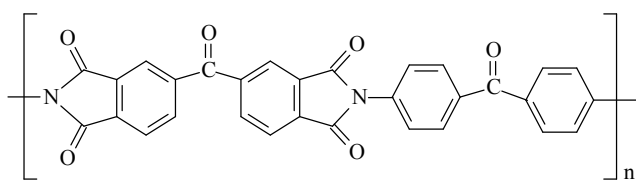


Рис. 4. Полиимидокетон «LaRC-TPI» («NASA»)

Этот полимер, благодаря наличию двух шарнирных групп (C=O) в повторяющемся элементарном звене, размягчается и может перерабатываться через расплав под высоким давлением. Его рекомендуют в качестве формовочного порошка, композитной матричной смолы, высокотемпературной пленки и волокна.

Термопластичный и органорастворимый полиэфиримид марки «Augum» получают из диангида пиромеллитовой кислоты и диамина с дифенильной и двумя простыми эфирными группами [20]:

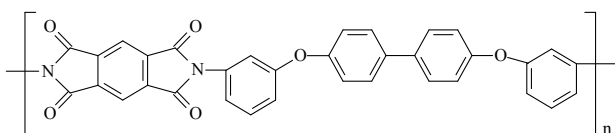


Рис. 5. «Augum» («Mitsui Chemicals»)

Полиэфиримид «Augum» впервые был разработан фирмой «DuPont» и в настоящее время производится фирмой «Mitsui Chemicals». Температура стеклования этого полимера составляет 250 °С, температура плавления кристаллической фазы 388 °С. Максимальная температура эксплуатации изделий на его основе может составить около 240 °С. Так как скорость кристаллизации этого полимера низкая, то его можно перерабатывать обычными методами литья под давлением и экструзии. Для полимера характерны: высокая термическая устойчивость, низкий коэффициент трения, высокая устойчивость к плазме, радиационная стойкость, высокие диэлектрические свойства, превосходная стабильность размеров (лучше, чем у РЕЕК и алюминия), хорошее сохранение модуля упругости при повышенных температурах, низкая ползучесть.

Полимер марки «Augum PL450C» применяют для производства теплостойкой изоляции проводов, кабелей высокого напряжения, трубопроводов и волокон. Литые изделия из него или его стеклонаполненные марки могут заменять детали из металлов, керамики и других более дорогих пластмасс. Например, из него изготавливают жаростойкие шестерни, уплотнения, втулки, крепежные детали, катушки, электрические изоляторы, основы полупроводниковых плат, детали реактивных двигателей, шарики обратных клапанов, шлицевые муфты, лопасти, износостойкие полосы, седла клапанов, носители

для алюминиевых жестких дисков и кремниевых пластин, подшипники скольжения, фиксаторы подшипников и т.п. [21].

Полиэфиримиды серии «Ultem» были разработаны подразделением «General Electric's Plastics Division». После того, как «SABIC» приобрела «Plastics Division GE» в 2007 году марка «Ultem» стала собственностью крупнейшей компании Саудовской Аравии.

«Ultem 1000» имеет следующую структурную формулу:

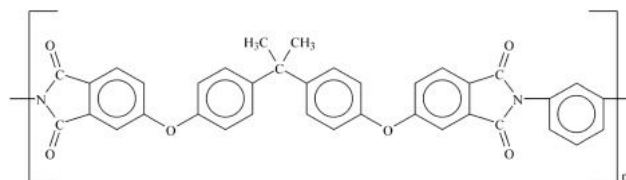


Рис. 6. «Ultem 1000»

Благодаря наличию в элементарном звене сразу трех шарнирных групп, этот полимер легко перерабатывается из расплава и растворов в органических растворителях. Это прочный термопласт с высокой тепло- и термостойкостью, хорошими механическими, диэлектрическими свойствами и огнестойкостью. Материал является более доступной альтернативой полиэфирэфиркетону, но имеет более низкую ударную вязкость и температуру эксплуатации. Благодаря ценному комплексу свойств марка «Ultem 9085» нашла применение в технологии трехмерной 3D-печати.

«Ultem 1000» имеет температуру длительного использования до +170 °С. Он огнестоек без антипиренов, имеет низкое дымовыделение при контакте с открытым пламенем, что делает возможным применение этого материала в пассажирском воздушном сообщении. Основные характеристики «Ultem-1000»: очень высокая прочность, высокая жесткость и твердость, высокая устойчивость к деформации, отличное сопротивление ползучести, превосходная термостойкость расплава, низкий коэффициент теплового расширения, высокая стойкость к химикатам, высокая погодоустойчивость, стойкость к γ -лучам и гидролизу, очень высокая прочность при кручении, допускается для контакта с пищевыми продуктами. Основным недостатком является не очень хорошая стойкость к трещинообразованию, за счёт внутренних напряжений.

Изделия из «Ultem 1000», применяемые в машиностроении и станкостроении: втулки перемещения суппорта, зубчатые колеса распределителя, венцы червячных редукторов РЧ-32, РЧ-37, точные гайки поперечных суппортов, подвижные направляющие, шестерни коробки скоростей, червячные колеса редуктора привода, втулки,

вкладыши в узлах трения (салазки, бабки, ползуны и т.п.), вкладыши шпинделя, салазки, втулки, шестерни, подшипники скольжения, звездочки 7-ми, 12-ти, 14-ти лучевые.

Для химической промышленности из «Ultem 1000» изготавливают такие изделия как: насосы (лопасти, крыльчатки, зубчатые колеса, подшипники скольжения и качения, манжеты сальников, корпуса роторов); фильтры (колеса и ступицы); сетчатые столы; дозаторы, сепараторы (вкладыши узлов трения, корпуса).

Переработка «Ultem 1000» возможна всеми стандартными методами в зависимости от дальнейших целей. Чаще всего его используют для литья тонкостенных изделий, так как он относится к суперконструкционным материалам.

Как видно из таблицы 1, в полимерах «LaRC-TPI» и «Augum» наблюдаются температуры плавления хорошо упорядоченных областей, но у других полиимидов они не наблюдаются. «Karton» и «Uplex-RN» имеют менее упорядоченную агрегатную структуру, которая отличается от кристаллической фазы, но все же делает эти материалы не термопластичными из-за их повышенной жесткости цепи и сильного межмолекулярного взаимодействия [21]. В отличие от этого, полиэфиримид «Ultem» полностью аморфен и имеет хорошую перерабатываемость из расплава или растворов.

Учитывая выше изложенное, нами были разработаны рецептуры сополиэфиримидов на основе диангирида бензофенонтетракарбоновой кислоты, диангирида пиромеллитовой кислоты, 4,4'-диаминодифенилоксида и смеси изомеров фенилендиамина. Полученные сополиимиды охарактеризованы данными ИК-спектроскопии, элементного анализа, гель-проникающей хроматографии, дифференциальной сканирующей калориметрии и динамического механического анализа. Найдено, что замкнутые сополиэфиримиды оптимального состава имеют температуру стеклования от 200 до 240 °С, размягчаются выше этой температуры и могут перерабатываться из расплава. Кроме того, все они растворяются в диполярных апротонных растворителях, а некоторые из них и в хлорированных углеводородах.

Выводы. Таким образом, осуществлена разработка лабораторной технологии получения высокомолекулярных сополиэфиримидов на основе диангирида бензофенонтетракарбоновой кислоты, диангирида пиромеллитовой кислоты, 4,4'-диаминодифенилоксида и смеси изомеров фенилендиамина с температурой стеклования от 200 до 240 °С способных к переработке из расплава и растворов в доступных органических растворителях. Синтезированные сополиэфир-

имиды перспективны для создания высокомолекулярных дисперсно армированных стекловолоконном или углеволоконном литевых и экструзионных композитов, а также активно разрабатываемых в последнее время высоко теплостойких термопластичных препрегов на основе углетканей. Последние представляют особый практический интерес, так как позволяют получать различные конструкционные изделия с помощью доступного метода температурного формования под давлением или вакуумом.

***Источник финансирования.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках реализации научного проекта № 18-29-18035 (договор №18-29-18035/18).*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нелюб В.А. Углепластики с функциональными свойствами на основе металлизированных углеродных лент // Сборник тезисов докладов VII научной молодежной школы-конференции. М.: 2019. 304 с.
2. Нелюб В.А., Берлин А.А. Электрические свойства углепластиков и способы их регулирования // Химическая промышленность сегодня, 2019. № 1. С. 38–43.
3. Патент РФ № 2653058. Нелюб В.А., Бородулин А.С., Калинин А.Н. и др. Огнестойкий ароматический полиэфирсульфон. 2017.
4. Бородулин А.С., Калинин А.Н. и др. Патент РФ № 2683268. Ароматические полиэфир. 2019.
5. Бородулин А.С., Калинин А.Н. и др. Патент РФ № 2683270. Огнестойкий ароматический полиэфир. 2019.
6. Borodulin A.S., Kalinnikov A.N., Bazheva R. C. at all. Receipt and investigation of performance characteristics of super constructions polyesters. - International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018. Vol. 9 (13). Pp. 1117–1127.
7. Borodulin A.S., Kalinnikov A.N., Bazheva R.C. at all. Synthesis and properties of aromatic polyethersul-fones//International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). 2018. Vol. 9 (13). Pp. 1109–1116.
8. Borodulin A.S., Kalinnikov A.N., Kharaev A.M. at all. New Polymeric Binders for the Production of Composit // International Conference on Modern Trends in Man-ufacturing Technologies and Equipment 2018. International Journal of Materials today: proceedings. 2019. Vol. 11. Issue P1. Pp. 3107–3111.
9. Нелюб В.А., Бородулин А.С. и др. Полиэфирсульфоны с улучшенными теплофизическими свойствами // Клеи, герметики, технологии. 2018. № 7. С. 15–20.

10. Бессонов М.И., Котон М.М., Кудрявцев В.В., Лайус Л.А. Полиимиды – класс термостойких полимеров. Л.: Наука, 1983. 328 с.
11. Johnson R.O., Burlhis H.S. Polyetherimide: a new high-performance thermoplastic resin//J. Polym. Sci.: Polym Symp. 1983. Vol. 70. Pp. 129–143.
12. Parker D., Vussink J., Grampel H.T., Wheatley G.W., Dorf E.U., Ostlinning E., Reinking K., Schubert F., Junger O. Polymers, high-temperature. In: Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. Wiley//Weinheim, 2012.
13. Saudi Basic Industries Corporation. URL://www.sabic-ip.com/gep/Plastics/en/ProductsAndServices/ProductLine/ul-tem.html,http://www.sabic-ip.com/ge-papp/eng/weather/weatherhtml?sltRegion-List=1002002000%26sltPrd=1002003018%26slt-Grd=1002011252%26sltUnit=0%26sltMod-ule=DATASHEETS%26sltVersion=Inter-net%26sltType=Online
14. Salamone J.C. (1996) Polymeric materials encyclopedia, vol 8. CRC Press, Boca Raton, 2018
15. DuPont//URL:http://www2.dupont.com/Kapton/en_US/URL assets/downloads/pdf/HN_datasheet.pdf
16. Takekoshi T. Chapter 2: Synthesis of polyimides. In: Ghosh M.K., Mittal K.L. (eds) Polyimides: fundamentals and applications, plastic engineering // Marcel Dekker, Inc., New York. 1996. Pp. 7–48.
17. Polyimide products which has developed by Ube Industries, Ltd.//Ube Industries//URL://www.upilex.jp/e_index.html
18. Encyclopedia of Polymeric Nanomaterials//URL: Ube Industries. http://www.ube.es/archivos/pdfs/UpilexRN-566.pdf
19. Hou T.H., Bai J.M. (1990) LaRC-TPI 1500 series polymers. NASA contractor report 181899//Mitsui Chemicals//URL: www.mitsui-chem.com/service/functional_polymeric/compound/aurum/DuPont. http://www2.dupont.com/Vespel/en_US/assets/downloads/aurum/pl450c.pdf
20. McKeen L.W. Ch. 4.1.8. Polyetherimide. In: Fluorinated Coatings and Finishes Handbook //2016, 112 p.
21. Isoda S., Shimada H., Kochi M., Kambe H. Molecular aggregation of solid aromatic polymers. I. Small-angle X-ray scattering from aromatic polyimide film. J. Polym. Sci. Polym. Phys. Ed. 1981. Vol. 19. Pp. 1293–1312.

Информация об авторах

Бородулин Алексей Сергеевич, кандидат технических наук, заместитель директора МИЦ КР МГТУ им. Баумана. E-mail: asb@emtc.ru. Межотраслевой инжиниринговый центр «Композиты России» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет). Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская, дом 5.

Калинников Александр Николаевич, заместитель директора МИЦ КР МГТУ им. Баумана. E-mail: alexandr.kalinnikov@emtc.ru. Межотраслевой инжиниринговый центр «Композиты России» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет). Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская, дом 5.

Терешков Александр Геннадьевич, ведущий инженер-конструктор МИЦ КР МГТУ им. Баумана. E-mail: atereshkov@emtc.ru. Межотраслевой инжиниринговый центр «Композиты России» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет). Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская, дом 5.

Музыка Сергей Сергеевич, руководитель договорного отдела МИЦ КР МГТУ им. Баумана. E-mail: mss@emtc.ru. Межотраслевой инжиниринговый центр «Композиты России» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет). Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская, дом 5.

Поступила в сентябре 2019 г.

© Бородулин А.С., Калинников А.Н., Терешков А.Г., Музыка С.С., 2019

Borodulin A.S., Kalinnikov A.N., *Tereshkov A.G., Muzyka S.S.

Moscow State Technical University named after N.E. Bauman (National Research University)

Intersectoral engineering center «Composites of Russia MSTU N.E. Bauman»

Russia, 105005, Moscow, 2nd Bauman, 5

*E-mail: atereshkov@emtc.ru

POLYETHERIMIDE FOR CREATION OF HEAT-RESISTANT POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS WITH HIGH PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

Abstract. Thermoplastic and soluble in organic solvents polyetherimide is of great interest for the creation of heat-resistant composite materials with high physical and mechanical properties. In recent decades, the main scientific approaches to the synthesis of polyimides with the ability to process from melt and solutions in organic solvents have been developed. According to this methodology, the glass transition temperature of rigid-chain polyimides is reduced by increasing the flexibility of the main polymer chain and/or by reducing the intermolecular interaction.

Evolution of fine organic synthesis is one of the priority directions of development of chemical technology. Chemistry of high-molecular compounds is the subject of research by various domestic and foreign scientists. This interest is due to the prospects for the use of materials for industrial purposes. The polyetherimide contains various aromatic, heterocyclic and cycloaliphatic groups and systems in its chain. This article describes the main approaches to the creation of polymers with improved, compared with polyimides, technological properties and prospects for their application in the production of filled composite materials based on them. The paper presents the properties of the materials under consideration as a justification for the creation of heat-resistant composite materials.

Key words: polyimides, and polyetherimide, glass transition temperature.

REFERENCES

1. Nelyub V.A. CFRPs with functional properties based on metallized carbon tapes [Ugleplastiki s funktsional'nymi svoystvami na osnove metallizirovannyh uglerodnyh lent]. Abstracts of reports of VII scientific youth school-conference. M.: 2019. 304 p. (rus)
2. Nelyub V.A., Berlin A.A. Electrical properties of carbon plastics and methods for their regulation [Elektricheskie svoystva ugleplastikov i sposoby ih regulirovaniya] Chemical industry today. 2019. No. 1. Pp. 38–43. (rus)
3. RF patent No. 2653058. Nelyub V.A., Borodulin A.S., Kalinnikov A.N. and other Flame retardant aromatic polyethersulfone. 2017. (rus)
4. Borodulin A.S., Kalinnikov A.N. and other RF Patent No. 2683268. Aromatic polyesters. 2019. (rus)
5. Borodulin A.S., Kalinnikov A.N. and other RF Patent No. 2683270. Fire-resistant aromatic polyester. 2019. (rus)
6. Borodulin A. S., Kalinnikov A. N., Bazheva R. C. at all. Receipt and investigation of performance characteristics of super constructions polyesters. - International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018. Vol. 9 (13). Pp. 1117–1127.
7. Borodulin A.S., Kalinnikov A. N., Bazheva R. C. at all. Synthesis and properties of aromatic polyethersulfones. International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). 2018. Vol. 9 (13). Pp. 1109–1116.
8. Borodulin A.S., Kalinnikov A.N., Kharaev A.M. [et all] New Polymeric Binders for the Production of Composi. International Conference on Modern Trends in Man-ufacturing Technologies and Equipment 2018. International Journal of Materials today: proceedings. 2019. Vol. 11. Issue P1. Pp. 3107–3111.
9. Nelyub V.A., Borodulin A.S. [et all] Polyethersulfones with improved thermophysical properties. [Polijefirsul'fony s uluchshennymi teplofizicheskimi svoystvami] M.: Publishing House of Science and Technology LLC, Journal of Adhesives, Sealants, Technologies. 2018. No. 7. Pp. 15–20.
10. Bessonov M.I., Koton M.M., Kudryavtsev V.V., Laius L.A. Polyimides – a class of heat-resistant polymers. [Poliimidy – klass termostojkih polimerov]. L.: Nauka, 1983. 328 p.
11. Johnson R.O., Burlhis H.S. Polyetherimide: a new high-performance thermoplastic resin//J. Polym. Sci.: Polym Symp. 1983. Vol. 70. Pp. 129–143.
12. Parker D., Vussink J., Grampel H.T., Wheatley G.W., Dorf E.U., Ostlinning E., Reinking K., Schubert F., Junger O. Polymers, high-temperature. In: Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry.-Wiley//Weinheim, 2012.
13. Saudi Basic Industries Corporation. URL://www.sabic-ip.com/gep/Plastics/en/ProductsAndServices/ProductLine/ul-tem.html,http://www.sabic-ip.com/gepapp/eng/weather/weatherhtml?sltRegion-List=1002002000%26sltPrd=1002003018%26slt-

Grd=1002011252%26sltUnit=0%26sltModule=DATASHEETS%26sltVersion=Internet%26sltType=Online

14. Salamone J.C. (1996) Polymeric materials encyclopedia, vol 8. CRC Press, Boca Raton, 2018

15. DuPont//URL:http://www2.dupont.com/Kapton/en_US/URL_assets/downloads/pdf/HN_datasheet.pdf

16. Takekoshi T. Chapter 2: Synthesis of polyimides. In: Ghosh M.K., Mittal K.L. (eds) Polyimides: fundamentals and applications, plastic engineering//Marcel Dekker, Inc., New York, 1996. Pp. 7–48.

17. Polyimide products which has developed by Ube Industries, Ltd.//Ube Industries//URL:http://www.upilex.jp/e_index.html

18. Encyclopedia of Polymeric Nanomaterials//URL: Ube Industries. <http://www.ube.es/archivos/pdfs/UpilexRN-566.pdf>

19. Hou T.H., Bai J.M. (1990) LaRC-TPI 1500 series polymers. NASA contractor report 181899//Mitsui Chemicals//URL: www.mitsui-chem.com/service/functional_polymeric/compound/aurum/DuPont. http://www2.dupont.com/Vespel/en_US/assets/downloads/aurum/pl450c.pdf

20. McKeen L.W. Ch. 4.1.8. Polyetherimide. In: Fluorinated Coatings and Finishes Handbook. 2016, 112 p.

21. Isoda S., Shimada H., Kochi M., Kambe H. (1981) Molecular aggregation of solid aromatic polymers. I. Small-angle X-ray scattering from aromatic polyimide film. J. Polym. Sci. Polym. Phys. Ed. 1981. Vol. 19. Pp. 1293–1312.

Information about the authors

Borodulin, Alexey S. PhD. E-mail: asb@emtc.ru. Moscow State Technical University named after N.E. Bauman (National Research University), Intersectoral engineering center «Composites of Russia MSTU N.E. Bauman». Russia, 105005, Moscow, 2nd Baumanskaya, 5.

Kalinnikov, Alexander N. Deputy Director. E-mail: alexandr.kalinnikov@emtc.ru. Intersectoral engineering center "Composites Russia" MGTU im. N. E. Bauman. Russia, 105005, Moscow, 2nd Baumanskaya, 5.

Terechkov, Alexander G. Leading Engineer-designer. Moscow State Technical University named after N.E. Bauman (National Research University), Intersectoral engineering center «Composites of Russia MSTU N.E. Bauman». Russia, 105005, Moscow, 2nd Baumanskaya, 5.

Muzyka, Sergey S. Head of Contract Department. Moscow State Technical University named after N.E. Bauman (National Research University), Intersectoral engineering center «Composites of Russia MSTU N.E. Bauman». Russia, 105005, Moscow, 2nd Baumanskaya, 5.

Received in September 2019

Для цитирования:

Бородулин А.С., Калинин А.Н., Терешков А.Г., Музыка С.С. Полиэфиримиды для создания тепло-стойких полимерных композиционных материалов с высокими физико-механическими свойствами // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 11. С. 94–100. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-94-100

For citation:

Borodulin A.S., Kalinnikov A.N., Tereshkov A.G., Muzyka S.S. Polyetherimide for creation of heat-resistant polymeric composite materials with high physical and mechanical properties. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 11. Pp. 94–100. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-94-100

DOI: 10.34031/2071-7318-2019-4-11-101-111

Кочергин Ю.С., *Золотарева В.В.*Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского
Украина, 83117, Донецк, ул. Щорса, 31***E-mail: viktoria802@gmail.com*

СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СМЕСЕЙ ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ И ОЛИГОСУЛЬФОНОВ. ЧАСТЬ 3. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Аннотация. Исследовано влияние модифицирующих добавок олигосульфонов различной молекулярной массы с концевыми карбоксильными и фенольными группами на физико-механические свойства эпоксидных полимеров. Установлено, что модификация позволяет повысить прочность при растяжении на 32, деформацию при разрыве на 85, модуль упругости на 47 и работу разрушения на 123 %. Максимальный комплекс свойств реализуется при введении в состав эпоксидного полимера 3–5 масс. ч. олигосульфона с молекулярной массой 4700. Показано, что величина эффекта существенно зависит от количества введенного модификатора и его молекулярной массы. Химическая природа концевых групп слабо влияет на основные деформационно-прочностные свойства. Результаты работы позволяют рекомендовать исследованные олигосульфоны для получения на основе эпоксидных смол композиционных полимерных материалов конструкционного назначения с улучшенными физико-механическими свойствами.

Ключевые слова: эпоксидная смола, отвердитель, модификация, олигосульфون, молекулярная масса, концевые карбоксильные и фенольные группы, физико-механические свойства.

Введение. Как известно [1–3], отвержденные эпоксидные смолы (ЭС) характеризуются относительно невысокими ударопрочностью и трещиностойкостью, что в значительной мере ограничивает их применение в условиях воздействия ударных и вибрационных нагрузок и термоциклирования. Одним из наиболее эффективных путей устранения данных недостатков является модификация эпоксиполимеров низкомолекулярными каучуками с концевыми реакционноспособными группами и термопластами [2, 4–10]. Среди термопластов значительный научный и практический интерес представляют соединения, содержащие дифенилсульфоновые фрагменты – $C_6H_4-SO_2-C_6H_4$ [11–14], которые обладают высокой термической устойчивостью (соединения, содержащие их, разлагаются на воздухе при температуре выше 623 К), а наличие дифенилсульфоновых фрагментов в полимерной цепочке придает полимерам высокую теплостойкость. Наглядным примером этого могут служить ароматические полисульфоны (ПЭС), полисульфоксиды, полисульфонарилаты, полисульфонкарбонаты, полисульфонимиды и ряд других полимеров [11, 12].

Хорошую совместимость ПЭС с эпоксидными смолами и отвердителями связывают с близостью их параметров растворимости [15]. Однако, в ходе отверждения эпоксидной матрицы ее параметр растворимости возрастает и молекулы ПЭС выделяются в самостоятельную фазу в виде глобул диаметром от 0,2 до 8 мкм. Добавки ПЭС увеличивают во всех случаях ударную вязкость эпоксидных полимеров [15–20].

Установлено [21], что введение полиэфирсульфона не изменяет механических свойств эпоксидных композиций при низких температурах, но несколько снижает модуль упругости при высоких температурах. Это обусловлено, как полагают, частичным совмещением эпоксидной смолы и полиэфирсульфона и уменьшением за счет этого густоты поперечных связей. Величина сопротивления изгибу не изменяется существенно при введении полиэфирсульфона из-за, как предполагают, невысокой адгезии между частицами модификатора и матрицей и отсутствия вследствие этого факторов, замедляющих скорость роста трещин.

В противоположность данным [21] имеется значительное число патентов [22–27] и ряд публикаций [28, 29], в которых описан эффект повышения за счет добавок полиэфирсульфонов ударной вязкостью эпоксидных полимеров. Например, эпоксидные композиционные материалы с повышенной ударостойкостью, адгезией, механической прочностью и пониженным влагопоглощением получены из ЭС, отвердителей аминного типа, полисульфона и ускорителя отверждения.

Авторы [26] утверждают, что для совмещения полисульфона на основе бисфенола А с молекулярной массой 40 – 50 тыс. и ЭС требуются достаточно высокие температуры. Образующийся продукт совмещения существенно превосходит вязкость исходной смолы. Низкомолекулярные полисульфоны (олигосульфоны) совмещаются с ЭС гораздо легче. При этом их введение не приводит к существенному возрастанию

вязкости системы [30]. Вместе с тем такие модификаторы не обеспечивают нужного повышения стойкости отвержденной композиции к ударным и вибрационным нагрузкам.

В [31] изучена модификация эпоксидной матрицы добавками 4, 8 и 12 % полисульфона на основе бисфенола-А совместно с тремя типами бисмалеимидов, а именно [Н,Н'-бисмалеимидо-4,4'-дифенилметандиизоцианат (БМИ-1), 1, 3-бис (малеимидо) бензол (БМИ-2) и 1,1'-бис (4-малеимидофенил) циклогексан (БМИ-3)]. Данные, полученные в результате механических исследований, свидетельствуют о том, что введение полисульфона с концевыми гидроксильными группами в ЭС повышает значение ударной прочности до 48 % за счет формирования гибких графт-структур, а также увеличивает прочность при растяжении и изгибе. Наилучшие механические свойства получены для эпоксидной смолы, модифицированной 8 вес. % полисульфона и 8 вес. % бисмалеимида БМИ-2.

Таким образом, исследованию структуры и свойств смесей ЭС и полисульфонов, а также расширению областей их применения в настоящее время уделяется большое внимание. Вместе с тем в литературе мало освещены вопросы о зависимости механических, релаксационных и адгезионных свойств эпоксидов от молекулярной массы, химической природы концевых групп вводимых олигосульфонов, температурного и временного режимов отверждения, включая отверждение без подвода тепла извне, что особенно важно для оценки работоспособности таких композиций в качестве клеевых материалов, герметиков и компаундов холодного отверждения.

В связи с этим нами была предпринята попытка восполнить указанные пробелы. Ранее [32,

33] нами описано влияние олигосульфонов на термомеханические, статические и динамические релаксационные свойства эпоксидных полимеров. В развитие данного направления целью настоящей работы явилось исследование влияния молекулярной массы олигосульфонов, химической природы их концевых групп, температурного и временного режимов отверждения на физико-механические свойства эпоксидных полимеров.

Методология. В качестве объектов исследования выбраны эпоксидные полимеры на основе диглицидилового эфира бисфенола А, которые получали отверждением промышленной смолы марки ЭД-20 с массовой долей эпоксидных групп – не менее 20,0 % и молекулярной массой – 390 – 430.

Отвердителем служил диэтилентриаминометилфенол марки УП-583Д.

В качестве модификаторов были использованы олигосульфоны (ОСФ) с концевыми карбоксильными и фенольными группами (таблица). Синтез олигосульфонов осуществляли по реакции нуклеофильного замещения в среде диметилсульфоксида. Состав и строение полученных олигосульфонов подтверждены данными элементного анализа, ИК- и ПМР-спектроскопии. В частности, на ИК-спектрах наблюдаются следующие характерные полосы поглощения: для связей S=O сульфонильных групп при 565, 1110, 1160, 1300 и 1330 см⁻¹; для C-H связей изопропилиденных групп при 1360, 1410 и 2970 см⁻¹; для C-P связей метиленовых групп при 2875 см⁻¹; для O-H связей концевых фенольных и карбоксильных групп при 3600 – 3650 см⁻¹.

Таблица 1

Свойства олигосульфонов

Шифр образца	Молекулярная масса	Параметр растворимости,* (МДж/м ³) ^{0,5}	Температура размягчения, К	
			в капилляре	термомеханический метод
Б-3-К	1200	20,27	425–431	423
Б-6-К	2500	20,33	431–438	433
Б-10-К	4700	20,42	450–456	451
Б-50-К	22500	20,46	–	466
Б-3-Ф	1480	20,91	427–432	436
Б-30-Ф	13500	20,66	–	463
Б-100-Ф	44500	20,46	–	478

*) Определяли расчетным путем по формуле (1) [34]:

$$\delta = \left(\frac{\sum \Delta E_i^*}{N_A \sum \Delta V_i} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где ΔE_i – вклад каждого атома и типа межмолекулярного взаимодействия в величину эффектив-

ной мольной энергии когезии; N_A – число Авогадро; ΔV_i – вандерваальсовый объем молекулы, складывающийся из вандерваальсовых объемов атомов.

Совмещение олигосульфонов с эпоксидной смолой проводили при 393К. Отверждение композиций вели без подвода тепла извне: 293 К /240 ч (режим I) и с термообработкой: 293 К/72 ч + 393 К/3 ч (режим II).

Механические свойства при одноосном растяжении (разрушающее напряжение σ_p и деформация при разрыве ε_p) определяли на приборе типа Поляни с жестким динамометром и автоматической регистрацией измеряемых величин [35]. Модуль упругости (E) рассчитывали по наклону начального участка кривой $\sigma - \varepsilon$. Мерой работы разрушения (A_p) служила площадь под кривой напряжение – деформация.

Объекты исследования представляли собой пленки толщиной 100 – 150 мкм, полученные при отверждении полимерных композиций между двумя полированными поверхностями металлических плит, покрытых тонким слоем антиадгезива;

Тангенс угла механических потерь $\tan \delta$ определяли на крутильном маятнике МК-1 в температурном диапазоне от 123 до 423 К на образцах размерами 75×10×0,5 мм при частоте колебаний 1 Гц. Температура в процессе измерения поддерживалась с точностью до ± 1 К.

Ударную вязкость определяли в соответствии с ГОСТ 4647-80;

Основная часть. Модификация олигосульфонами дает возможность существенно улучшить деформационно-прочностные характеристики эпоксидных полимеров. При этом, как видно из рис. 1 и 2, параметр σ_p довольно сложным образом зависит от концентрации ОСФ. В области малых добавок он резко возрастает с образованием максимума, величина которого, зависит от молекулярной массы (ММ) олигосульфонов (причем наибольшую прочность имеет образец, содержащий Б-10-К). Далее при увеличении концентрации олигосульфона σ_p уменьшается (с тем большей скоростью, чем выше ММ), после чего для ОСФ с $ММ \leq 4700$ прочность несколько возрастает (особенно ощутимо для Б-10-К), а для Б-50-К остается практически на одном уровне. Примерно такой же характер имеют концентрационные зависимости модуля упругости (рис. 3 и 4), с той лишь разницей, что в диапазоне больших содержаний ОСФ увеличение E наблюдается только для Б-10-К. Для других олигосульфонов E либо мало изменяется (Б-6-К), либо уменьшается (Б-3-К и Б-50-К), однако это происходит с меньшей скоростью, чем в области промежуточных концентраций. Зависимости ε_p и A_p также имеют экстремальный характер, причем и для этих показателей концентрация, при которой они максимальны, определяется молекулярной массой олигосульфона (рис. 5–8). По абсолютной величине наибольший эффект достигается при использовании Б-10-К. Как следует из полученных данных, оптимальному различным свойствам соответствует несколько отличающееся содержание ОСФ. Так, при использовании Б-10-К в случае отверждения без подвода тепла, максимумы σ_p , ε_p , E и A_p наблюдаются при 5, 7, 3 и 5 масс. ч соответственно. При указанных концентрациях удается

повысить прочность при растяжении на 32, ε_p – на 85, E – на 47, A_p – на 123 %. Для прогретых пленок величина эффекта несколько ниже и оптимальные свойства достигаются при меньших, по сравнению с отверждением без термообработки, концентрациях.

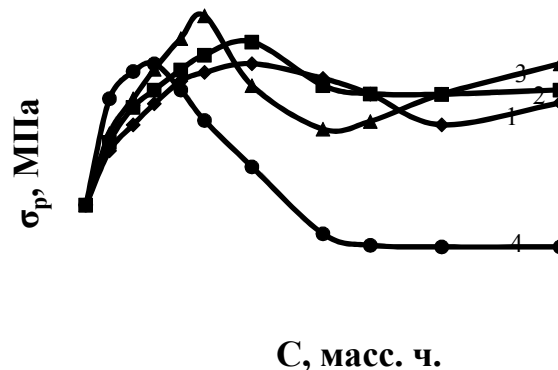


Рис. 1. Зависимость прочности при растяжении (σ_p) пленочных образцов от количества введенного модификатора: Б-3-К (1); Б-6-К (2); Б-10-К (3); Б-50-К (4)

Образцы отверждены по режиму I

Эффект значительного увеличения A_p для смесей эпоксидных полимеров с олигосульфонами дает основание предположить, что введение ОСФ должно способствовать повышению ударной прочности. Результаты прямого измерения удельной ударной вязкости подтверждают это предположение (рис. 9). Вместе с тем известно [2, 36, 37], что высокой ударной прочностью характеризуются материалы, имеющие интенсивный вторичный переход при температурах ниже комнатной. Однако, как свидетельствуют данные динамической механической спектроскопии исследуемых систем (рис. 10), введение ОСФ не только не усиливает, но наоборот, даже несколько ослабляет интенсивность β -перехода, наблюдаемого в эпоксидной смоле при температуре 215 К. Отметим, что подобное явление наблюдалось также в работе [15], однако при этом не происходило и повышение ударной вязкости. Таким образом, выявленный нами эффект увеличения динамической прочности эпоксидных полимеров при модификации их олигосульфонами не может быть объяснен поглощением энергии за счет коротковременных релаксационных процессов. Вместе с тем, отсутствие корреляции между ударной прочностью и интенсивностью релаксационных переходов в стеклообразном состоянии, хотя и является исключением из общепринятого положения, однако оно не единственно. Примером может служить поли-2,5-диметил-1,4-фениленоксид, который имеет очень слабый переход вблизи 273 К, однако сохраняет высокие свойства вплоть до 173 К [15].

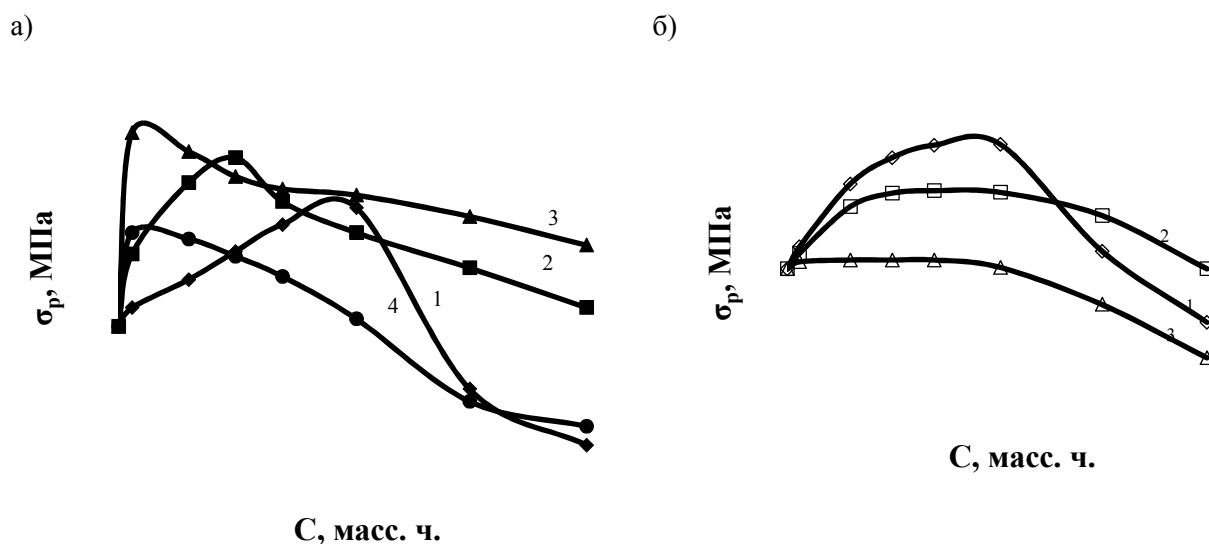


Рис. 2. Зависимость прочности при растяжении (σ_p) пленочных образцов от количества олигосульфона с концевыми карбоксильными (а) и фенольными (б) группами: Б-3-К (1); Б-6-К (2); Б-10-К (3); Б-3-Ф (1); Б-30-Ф (2); Б-100-Ф (3)
Образцы отверждены по режиму II

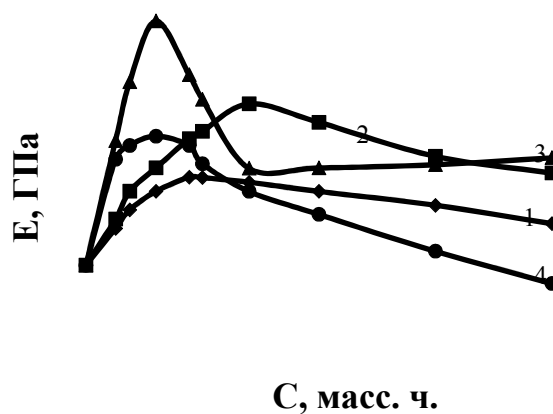


Рис. 3. Зависимость модуля упругости (E) пленочных образцов от количества, введенного олигосульфона: Б-3-К (1); Б-6-К (2); Б-10-К (3); Б-50-К (4)
Образцы отверждены по режиму I

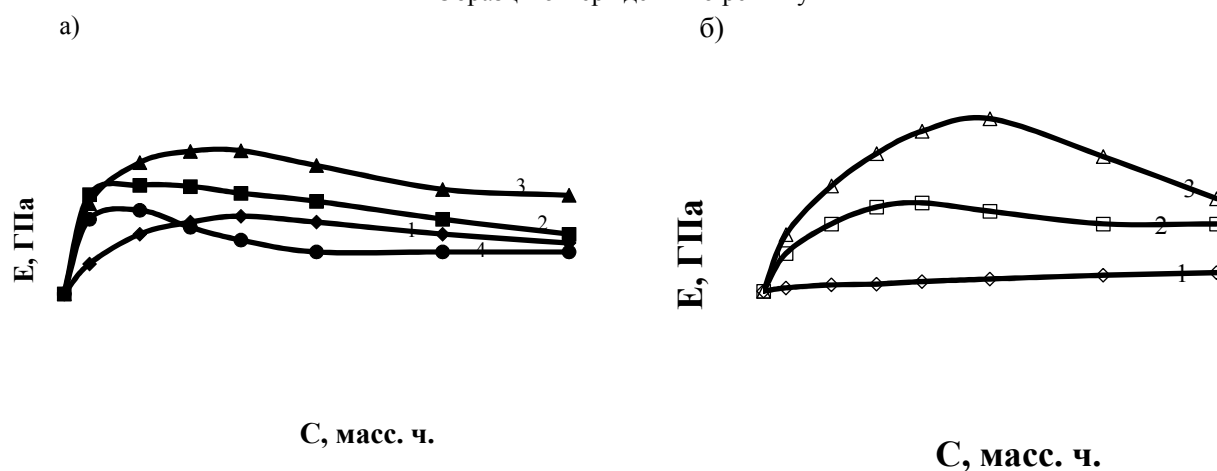


Рис. 4. Зависимость модуля упругости (E) пленочных образцов от количества олигосульфона с концевыми карбоксильными (а) и фенольными (б) группами: Б-3-К (1); Б-6-К (2); Б-10-К (3); Б-3-Ф (1); Б-30-Ф (2); Б-100-Ф (3)
Образцы отверждены по режиму II



Рис. 5. Зависимость деформации при разрыве (ε_r) пленочных образцов от количества введенного олигосульфона: Б-3-К (1); Б-6-К (2); Б-10-К (3); Б-50-К (4)
Образцы отверждены по режиму I

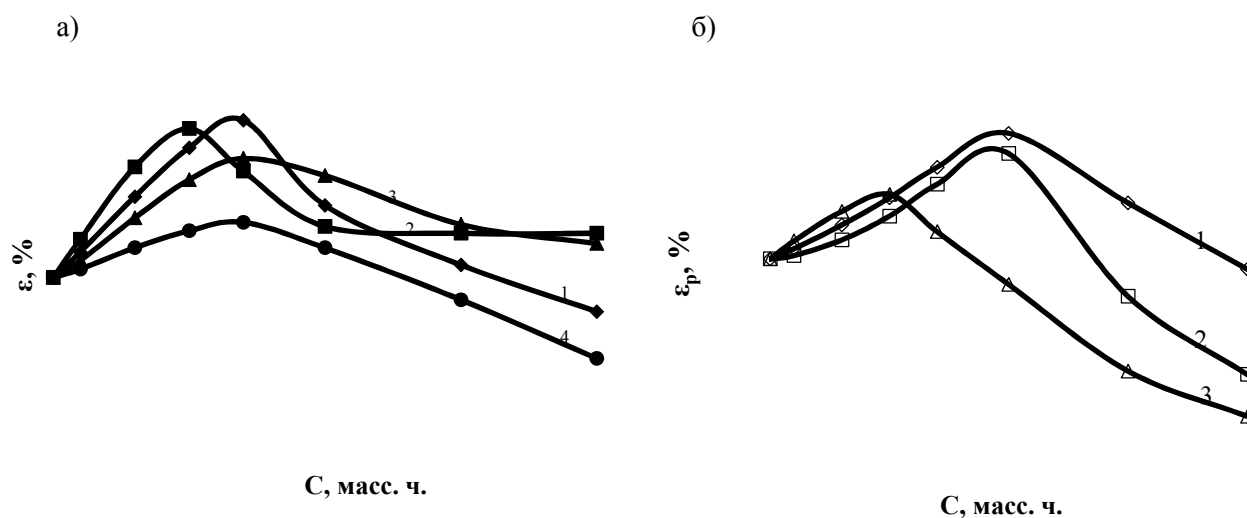


Рис. 6. Зависимость деформации при разрыве (ε_r) пленочных образцов от количества олигосульфона с концевыми карбоксильными (а) и фенольными (б) группами:
Б-3-К (1); Б-6-К (2); Б-10-К (3); Б-3-Ф (1); Б-30-Ф (2); Б-100-Ф (3).
Образцы отверждены по режиму II

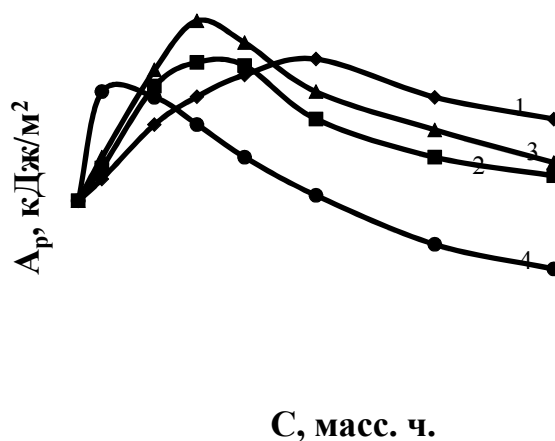


Рис. 7. Зависимость работы разрушения (A_p) пленочных образцов от количества введенного олигосульфона: Б-3-К (1); Б-6-К (2); Б-10-К (3); Б-50-К (4).
Образцы отверждены по режиму I

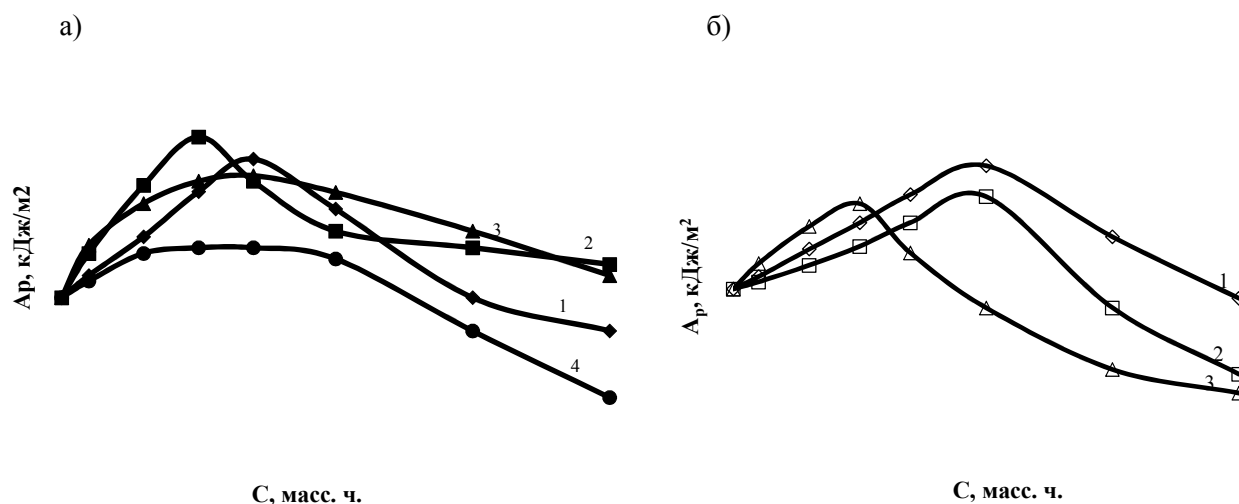


Рис. 8. Зависимость работы разрушения (A_p) пленочных образцов от количества олигосульфона с концевыми карбоксильными (а) и фенольными (б) группами: Б-3-К (1); Б-6-К (2); Б-10-К (3); Б-3-Ф (1); Б-30-Ф (2); Б-100-Ф (3).

Образцы отверждены по режиму II

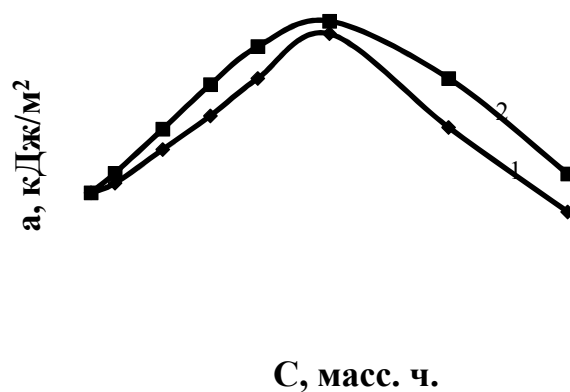


Рис. 9. Зависимость ударной вязкости (a) от содержания олигосульфона: Б-3-К (1), Б-10-К (2). Образцы отверждены по режиму II

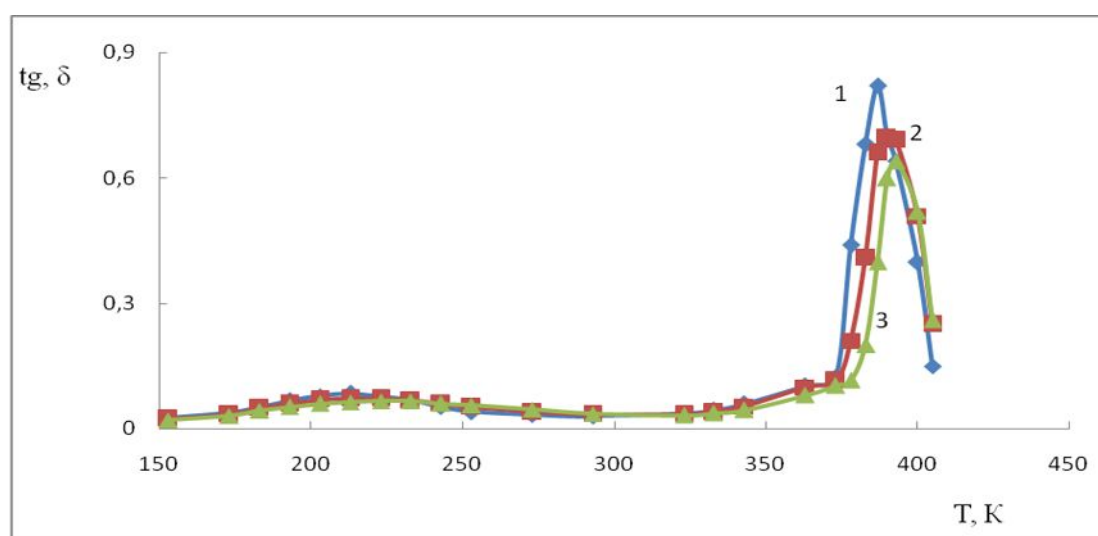


Рис. 10. Температурные зависимости тангенса угла механических потерь $\text{tg } \delta$ для исходного эпоксидного полимера (1) и модифицированного 10 масс. ч. Б-6-К (2) и Б-10-К (3)

Представленные данные свидетельствуют, что природа концевых групп олигосульфонов не оказывает существенного влияния на величину модифицирующего эффекта. Некоторое отличие наблюдается только в значениях модуля упругости (рис. 4). Увеличение же ММ добавок свыше 20 000 неблагоприятно сказывается на свойствах эпоксидных полимеров. Наблюдаемое улучшение комплекса свойств эпоксидных полимеров, модифицированных олигосульфонами, может быть связано (как и в случае исследования термомеханических свойств данных систем [32]) с наложением нескольких эффектов: увеличением плотности химической сетки эпоксидной матрицы при введении модификаторов, насыщением ее компонентом с более высокими жесткостью и теплостойкостью, а также с образованием дополнительных межмолекулярных связей между компонентами системы.

Выводы. Таким образом, модификация эпоксидных смол олигосульфонами приводит к формированию систем с повышенными физико-механическими свойствами. Величина эффекта в большей степени зависит от количества введенного модификатора и его молекулярной массы и в значительно меньшей мере – от природы концевых групп. Максимальный комплекс свойств реализуется для олигосульфона с молекулярной массой 4700 при его концентрации 3 – 5 масс. ч. на 100 масс. ч. эпоксидного олигомера. Полученные данные свидетельствуют о том, что использование олигосульфонов в качестве модификаторов эпоксидных смол позволяет получать полимеры с высокими физико-механическими свойствами, которые могут применяться как композиционные полимерные материалы конструкционного назначения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ли Х., Невил К. Справочное руководство по эпоксидным смолам. М.: Энергия, 1973. 415 с.
2. Полимерные смеси. Т. 1: Систематика. Под ред. Д.Р. Пола, К.Б. Бакнелла / Пер. с англ. под ред. В.Н. Кулезнева. СПб.: Научные основы и технологии, 2009. 618 с.
3. Тростянская Е.Б., Бабаевский П.Г. Формирование сетчатых полимеров // Успехи химии. 1971. Т. 40. № 1. С. 117–141.
4. Кочергин Ю.С., Григоренко Т.И., Шологон В.В. Эпоксидные клеи: свойства и опыт применения // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. 2006. Вип. 5 (61). С. 161–169.

5. Кочергин Ю.С., Кулик Т.А., Григоренко Т.И. Клеевые композиции на основе модифицированных эпоксидных смол // Пластмассы. 2005. № 10. С. 9–16.
6. Кочергин Ю.С., Григоренко Т.И., Кулик Т.А. Клеи на основе модифицированных каучуками эпоксидных смол // Клеи, герметики, технологии. 2005. № 12. С. 5–9.
7. Кочергин Ю.С., Кулик Т.А., Григоренко Т.И. Эпоксидные клеи специального назначения // Клеи, герметики, технологии. 2006. № 3. С. 3–7.
8. Paluvail N.R., Mohanty S., Nayak S.K. Synthesis and Modifications of Epoxy Resins and Their Composites: A Review // Polymer–Plastics Technology and Engineering. 2014. Vol. 53. P. 1723–1758.
9. Alessi S., Conduruta D., Pitarresi G. Accelerated ageing due to moisture absorption of thermally cured epoxy resin – polyethersulphone blends. Thermal, mechanical and morphological behavior // Polym. Degrad. Stab. 2011. Vol. 96. P. 642–648.
10. Горбаткина Ю.А. Влияние модификаторов на адгезионные свойства полимерных композиций. Часть 2. Эпоксидиановые олигомеры (окончание) // Клеи. Герметики. Технологии. 2004. №5. С. 24–24.
11. Бюллер К.У. Тепло- и термостойкие полимеры: Пер. с нем. М.: Химия, 1984. 1056 с.
12. Сторожук И.П., Валецкий П.М. Химия и технология высокомолекулярных соединений: Итоги науки и техники. М.: ВИНТИ, 1978. Т.12. С. 127–176.
13. Бутаева В.И., Никулина Е.П. Высокотермостойкие конструкционные термопласты за рубежом // Химическая промышленность за рубежом: Обзорная информация. М.: НИИТЭХИМ, 1988. Вып. 6. С. 30–63.
14. Tullo A.H. Engineering polymers // Chem. and Eng. News. 2003. Vol. 81, № 22. Pp. 21–25.
15. Raghava R.S. Secondary transitions and fracture toughness of cured epoxy resins and their blends with polyethersulfones // 28th Nat. SAMPE Symp. and Exhib. 1983. Vol. 28. P. 367 – 373.
16. Buckall C.B., Partridge I.K. Addition of polyethersulphone to epoxy resins // Brit. Polym. J. 1983. Vol. 15. No. 1. P. 71–75.
17. Ibrahim A.M., Quinlivan T.J., Seferis J.C. Processing of polyethersulfone reinforced high performance epoxy blends // Amer. Chem. Soc. Polym. Prepr. 1985. Vol. 26, No. 1. Pp. 277–278.
18. Горбунова И.Ю., Кербер М.Л., Шустов М.В. Особенности поведения эпоксидных связующих, модифицированных термопластом // Пластические массы. 2003. № 12. С. 38–41.
19. Alig I., Holst M., Weber M. Modifizierte Epoxidharze. Pat. Germany, no. 10155157, 2003.

20. Кербер М.Л., Горбунова И.Ю., Шустов М.В. Модификация теплостойких связующих для композиционных материалов // Доклады междунар. конф. «Композит–2004». Саратов: Изд-во СГТУ, 2004. С. 27–30
21. Raghava R.S. Role of matrix-particle interface adhesion on fracture toughness of dual phase epoxy-polyethersulfone blend // J. Polym. Sci.: Polym. Phys. Part B. 1987. Vol.25, №5. Pp. 1017–1031.
22. Gardner H.C., Michno M.L., Brode G.L., Cotter R.J. Impact resistant matrix resins for advanced composites. Pat. USA, no. 4661550, 1987.
23. Заявка 62-36422 Япония, МКИ С 08 G 59/50, С 08 J 5/54. Армированные волокнами препреги / Судзуэ С., Моримото Х., Оура А. Оpubл. 17.02.1987.
24. Заявка 62-148533 Япония, МКИ С 08 F 5/24, С 08 G 59/50. Препрег на основе волокнистого наполнителя / Судзуэ С., Моримото Х., Оура А. Оpubл. 02.07.1987.
25. Заявка 62-20555 Япония, МКИ С 08 L 63/00, С 08 G 59/62. Эпоксидная композиция / Ясуда К., Андо Т., Итабаси И. Оpubл. 29.01.1987
26. Saito Y., Morii A., Nakamura H. Epoxy resin composition. Pat. USA, no. 4663401, 1987
27. Пат. 2592597 Ru, МПК C08L 81/06, C08F 29/18, Фотополимеризующая композиция для покрытий защитного назначения / Сидоренко Н.В., Широкова В.В., Новаков И.А. Оpubл. 27.07.2016.
28. Копицына М.Н., Бессонов И.В., Котомин С.В. Трещиностойкость эпоксидных связующих, модифицированных термопластичным полисульфоном и фурфуролацетоновой смолой // Инженерный журнал: наука и инновации. 2016. Вып.12. С.1–9.
29. Котомин С.В., Гусев С.А., Копицын Д.С., Бессонов И.В., Копицына М.Н., Кирейнов А.В., Солодилов В.И. Свойства эпоксидных связующих, модифицированных фурановой смолой и полисульфоном // Высокомолекулярные соединения. Сер. Б. 2018. Т.60. №3. С. 211–220.
30. Беседнов К.Л., Бабин А.Н., Гребенева Т.А., Ткачук А.И., Плешаков Д.В. Исследование процессов растворения полисульфонов в эпоксидных смолах // Успехи в химии и химической технологии. 2016. Т.30. №8. С.15–17.
31. Rajaswaram R., Alagar M. Mechanical Properties of Bismaleimides Modified Polysulfone Epoxy Matrices // Int.J. Polym. Mater. 2007. Vol. 5. №9. P. 911–927.
32. Кочергин Ю.С., Григоренко Т.И., Золотарева В.В. Свойства композиционных материалов на основе смесей эпоксидных полимеров и олигосульфонов. Часть 1. Термомеханические свойства // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 5. С. 66–77.
33. Кочергин Ю.С., Григоренко Т.И., Золотарева В.В. Свойства композиционных материалов на основе смесей эпоксидных полимеров и олигосульфонов. Часть 2. Статические и динамические релаксационные свойства // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 6. С. 140–146.
34. Аскадский А.А., Матвеев Ю.И. Химическое строение и физические свойства полимеров. М.: Химия, 1983. 248с.
35. Малкин А.Я., Аскадский А.А., Коврига В.В. Методы измерения механических свойств полимеров. М.: Химия, 1978. 336 с.
36. Бабаевский П.Г., Кулик С.Г. Трещиностойкость отвержденных полимерных композиций. М.: Химия, 1991. 336 с.
37. Матсуока С., Ишида И. Множественные переходы в поликарбонате // Переходы и релаксационные явления в полимерах. Под ред. Р.Ф. Бойера. М.: Мир, 1968. С. 285–299.

Информация об авторах

Кочергин Юрий Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры общинженерных дисциплин. E-mail: ivano.tanya2011@yandex.ua. Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского» Украина, 83117, Донецк, ул. Щорса, 31.

Золотарева Виктория Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры товароведения и экспертизы непродовольственных товаров E-mail: viktoria802@gmail.com. Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского» Украина, 83117, Донецк, ул. Щорса, 31.

Поступила в октябре 2019 г.

© Кочергин Ю.С., Золотарева В.В., 2019

Kochergin Y.S., *Zolotareva V.V.*Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky
Ukraine, 83117, Donetsk, st. Shchorsa 31***E-mail: viktoria802@gmail.com*

PROPERTIES OF COMPOSITIONAL MATERIALS BASED ON THE MIXTURE OF EPOXY POLYMERS AND OLIGOSULFONES. PART 3. PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES

Abstract. *The influence of modifying additives of oligosulfones of different molecular weight with terminal carboxyl and phenolic groups on the physical and mechanical properties of epoxy polymers is investigated. It is found that the modification allows to increase the tensile strength by 32, the deformation at break by 85, the modulus of elasticity by 47 and the failure rate by 123 %. The maximum set of properties is realized when the epoxy polymer is introduced into the composition of 3–5 wt. c. of oligosulfone with a molecular weight of 4700. It is shown that the magnitude of the effect depends significantly on the amount of the modifier introduced and its molecular weight. The chemical nature of the end groups has little effect on the basic deformation and strength properties. The results of the work allow to recommend the studied oligosulfones for the production of composite polymer materials of structural purpose with improved physical and mechanical properties on the basis of epoxy resins.*

Keywords: *epoxy resin, curing agent, modification, oligosulfone, terminal carboxyl and phenolic groups, physico-mechanical properties.*

REFERENCES

1. Lee H., Neville K. Handbook of epoxy resins. [Spravochnoe rukovodstvo po ehpoksidnym smolam]. Moscow: Energy, 1973. 415 p. (rus).
2. Polymer blends. Vol. 1: Taxonomy [Polimernye smesi. Tom 1: sistematika]. edited by D. R. Paul, C. B. Bucknell. Trans. from English under the editorship of V. N. Kulezneva., SPb.: Scientific bases and technologies, 2009. 618p. (rus)
3. Trostyanskaya E.B., Babaevsky P.G. Formation of polymeric networks [Formirovanie setchatykh polimerov]. Uspehi khimii, 1971. Vol. 40, No. 1. Pp. 117–141. (rus).
4. Kochergin Yu.S., Grigorenko T.I., Shologon V.V. Epoxy adhesives: properties and application experience [Ehpoksidnye klei svoystva i opyt primeneniya]. Visnyk Donbasskoy national Akademii budiwnictva i architektury. 2006. Vol. 5 (61). Pp. 161–169. (rus)
5. Kochergin Yu. S., Kulik T.A., Grigorenko T.I. The Adhesive composition based on modified epoxy resin [Kleevye kompozicii na osnove modifitsirovannykh ehpoksidnykh smol]. Plastic massy. 2005. No. 10. Pp. 9–16. (rus)
6. Kochergin Yu., Grigorenko T.I., Kulik T.A. Adhesives based on rubber-modified epoxy resins [Klei na osnove modifitsirovannykh kauchukami ehpoksidnykh smol]. Glues, sealants, technology. 2005. No. 12. Pp. 5–9. (rus)
7. Kochergin Yu.S., Kulik T.A., Grigorenko T.I. Special-Purpose Epoxy Adhesives [Ehpoksidnye klei specialnogo naznacheniya]. Glues, sealants, technologies. 2006. No. 3. Pp. 3–7. (rus)
8. Paluvai N.R., Mohanty S., Nayak S.K. Synthesis and Modifications of Epoxy Resins and Their Composites: A Review. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2014. Vol. 53. Pp. 1723–1758.
9. Alessi S., Conduruta D., Pitarresi G. Accelerated ageing due to moisture absorption of thermally cured epoxy resin – polyethersulphone blends. Thermal, mechanical and morphological behavior. Polym. Degrad. Stab., 2011. Vol. 96. Pp. 642–648.
10. Gorbatkina Yu.A. Influence of modifiers on the adhesive properties of polymer compositions. Part 2. Epoxy oligomers (ending) [Vliyanie modifikatorov na adgezionnye svoystva polimernykh kompozitsiy. Chast 2. Ehpoksidianovye oligomery (okonchanie)]. Glues. Sealants. Technologies, 2004. No. 5. Pp. 24–24. (rus)
11. Büller K. U. Spezialplaste [Teplo i termostojkie polimery]. Trans. with German. M.: Chemistry, 1984. 1056 p. (rus)
12. Storozhuk I.P., Valetsky P.M. Chemistry and technology of high molecular compounds: Results of science and technology [Himiya i tekhnologiya vysokomolekulyarnykh soedinenij: Itogi nauki i tekhniki]. Moskva: VINITI, 1978. Vol. 12. Pp. 127–176. (rus)
13. Butaeva V.I., Nikulina E.P. High-Temperature structural thermoplastics abroad [Vysokoternostojkie konstrukcionnye termoplasty za rubezhom]. Himicheskaya promyshlennost za

rubezhom: obzornaya informaciya. Moskva: NIITEKHIM. 1988. Vol. 6. Pp. 30–63. (rus)

14. Tullo A.H. Engineering polymers. Chem. and Eng. News. 2003. Vol. 81. No. 22. Pp. 21–25.

15. Raghava R.S. Role of matrix-particle interface adhesion on fracture toughness of dual phase epoxy-polyethersulfone blend. J. Polym. Sci.: Polym. Phys. Part B, 1987. Vol. 25, №5. Pp. 1017–1031.

16. Buckall C.B., Partridge I.K. Addition of polyethersulphone to epoxy resins. Brit. Polym. J., 1983. Vol. 15, No. 1. Pp. 71 – 75.

17. Ibrahim A.M., Quinlivan T.J., Seferis J.C. Processing of polyethersulfone reinforced high performance epoxy blends. Amer. Chem. Soc. Polym. Prepr., 1985. Vol. 26, No. 1. Pp. 277–278.

18. Gorbunova I.Y., Kerber M.L., Shustov M.V. Peculiarities of behavior of epoxy binders modified with a thermoplastic [Osobennosti povedeniya ehpoksidnyh svyazuyushchih modifitsirovannyh termoplastom]. Plasticheskiye massy, 2003. No. 12. Pp. 38–41. (rus)

19. Alig I., Holst M., Weber M. Modifizierte Epoxidharze. Pat. Germany, no. 10155157, 2003.

20. Kerber M.L., Gorbunova I.Yu., Shustov M.V. Modification of the heat-resistant binder for composite materials [Modifikatsiya teplostojkikh svyazuyushchih dlya kompozitsionnyh materialov]. Doklady mezhdun. konf. "Kompozit-2004". Saratov: izd-vo SGTU, 2004. Pp. 27–30. (rus)

21. Raghava R.S. Role of matrix-particle interface adhesion on fracture toughness of dual phase epoxy-polyethersulfone blend. J. Polym. Sci.: Polym. Phys. Part B. 1987. Vol.25. No.5. Pp. 1017–1031.

22. Gardner H.C., Michno M.L., Brode G.L., Cotter R.J. Pat. USA, no. 4661550, 1987

23. Suzue S., Morimoto H., Aura A. Fiber-reinforced preregs. Application Japan, no. 62–36422, 1987

24. Suzue S., Morimoto H., Aura A. Prepreg-based fibrous filler. Application Japan, no. 62–148533, 1987

25. Yasuda K., Ando T., Itabasi I. Epoxy composition. Application Japan, no. 62-20555, 1987.

26. Saito Y., Morii A., Nakamura H. Epoxy resin composition. Pat. USA, no. 4663401, 1987

27. Sidorenko N.V., Shirokova V.V., Novakov I.A. Photopolymerizing composition for protective coatings Pat. RF, no. 2592597, 2016

28. Kopitsyna M.N., Bessonov I.V., Kotomin S. V. Crack resistance of epoxy binders modified with thermoplastic polysulfone resin and furfuryl alcohol

[Treshchinostojkost' epoksidnyh svyazuyushchih, modifitsirovannyh termoplastichnym poli-sul'fonom i furfuralacetonojsmoloy]. Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii. 2016. Vol. 12. Pp. 1–9. (rus)

29. Kotomin S.V., Gusev S. ., Kopitsyn D.S., Bessonov I.V., Kopitsyna M.N., Kireinov A.V., Solodilov V.I. The properties of epoxy resin modified furan resin and polysulfone / [Svoystva ehpoksidnyh svyazuyushchih modifitsirovannyh furanovoj smoloy i polisulfonom]. Vysokomolekulyarnye soedineniya. Ser. B, 2018. Vol. 60, No. 3. Pp. 211–220. (rus)

30. Besednov K.L., Babin A.N., Grebneva T.A., Tkachuk A.I., Pleshakov V.D. The study of the processes of dissolution of polysulfones in the epoxy resin [Issledovanie processov rastvoreniya polisulfonov v ehpoksidnyh smolah] Advances in chemistry and chemical technology. 2016. Vol. 30, No. 8. Pp. 15–17. (rus)

31. Rajaswaram R., Alagar M. Mechanical Properties of Bismaleimides Modified Polysulfone Epoxy Matrices. Int.J. Polym. Mater, 2007. Vol. 56, No. 9. Pp. 911–927.

32. Kochergin Yu.S., Grigorenko T.I., Zolotareva V.V. Properties of composite on the basis of mixtures of epoxy polymers and oligosulfones. Part 1. Thermomechanical properties [Svoystva kompozitsionnyh materialov na osnove smesey ehpoksidnyh polimerov i oligosulfonov. Chast 1. Termomekhanicheskie svoystva]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov, 2018. No. 5. Pp. 66–77. (rus)

33. Kochergin Yu.S., Grigorenko T.I., Zolotareva V.V. Properties of composite on the basis of mixtures of epoxy polymers and oligosulfones. Part 2. Static and dynamic relaxation properties [Svoystva kompozitsionnyh materialov na osnove smesey ehpoksidnyh polimerov i oligosulfonov. Chast 2. Staticheskie i dinamicheskie relaksatsionnye svoystva]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov, 2019. No. 6. Pp. 140–146. (rus)

34. Askadsky A.A., Matveev Yu.I. Chemical structure and physical properties of polymers [Himicheskoe stroenie i fizicheskie svoystva polimerov]. Moskva: Himiya, 1983. 248p. (rus)

35. Malkin A.Y., Askadsky A.A., Kovriga V.V. Methods of measurement of mechanical properties of polymers [Metody izmereniya mekhanicheskikh svoystv polimerov]. Moskva: Himiya, 1978. 336 p. (rus)

36. Babaevsky P.G., Kulik S.G. Fracture resistance of cured polymer compositions [Treshchinostojkost otverzhdennyh polimernykh kompozitsij]. M.: Chemistry, 1991, 336 p. (rus)

37. Matsuoka S., Ishida I. Multiple transitions in polycarbonate [Mnozhestvennyye perekhody v polikarbonate]. Transitions and relaxation phenomena in polymers. Edited by R. F. Boyer, Moscow: Mir, 1968, Pp. 285–299. (rus)

Information about the authors

Kochergin, Yuri S. PhD, Professor. E-mail: ivano.tanya2011@yandex.ua. Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky Ukraine, 83117, Donetsk, st. Shchorsa 31

Zolotareva, Victoriya V. PhD, Assistant professor. E-mail: viktor802@gmail.com Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky Ukraine, 83117, Donetsk, st. Shchorsa 31.

Received in October 2019

Для цитирования:

Кочергин Ю.С., Золотарева В.В. Свойства композиционных материалов на основе смесей эпоксидных полимеров и олигосульфонов. Часть 3. Физико–механические свойства // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 11. С. 101–111. DOI: 10.34031/2071-7318-2019-4-11-101-111

For citation:

Kochergin Y. S., Zolotareva V.V. Properties of compositional materials based on the mixture of epoxy polymers and oligosulfones. Part 3. Physico-mechanical properties. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 11. Pp. 101–111. DOI: 10.34031/2071-7318-2019-4-11-101-111

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-112-120

Никитина И.П., Поляков А.Н.Оренбургский государственный университет
Россия, 430005, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13***E-mail: innanikitina@list.ru*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУСТОРОННЕГО ТОРЦЕШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА

Аннотация. В работе предложена методология экспериментальных исследований двусторонних торцешлифовальных станков по критерию теплоустойчивости, включающая: методику имитации процесса шлифования; методику измерения температур; методику измерения изменений взаимного углового положения кругов; методику измерения погрешности обработки. Предложенные в работе методики экспериментальных исследования теплового поведения и погрешности обработки двустороннего торцешлифовального станка позволяют проводить доводку станка в условиях реального производства. При этом предварительно проведенные натурные испытания двустороннего торцешлифовального станка показали, что при шлифовании промышленной партии цилиндрических роликов избыточные температуры распределились неравномерно по узлам станка как на холостом ходу, так и при шлифовании. Наибольшую избыточную температуру при работе на холостом ходу имели торцы шпиндельных бабок и станины, а при шлифовании – поверхности узлов станка, находящиеся в непосредственной близости от зоны шлифования. Характер изменения избыточных температур характерных точек и смазочно-охлаждающей жидкости при имитации процесса шлифования на станке полностью совпал с экспериментальными данными, полученными на работающем станке.

Ключевые слова. торцешлифовальные станки, температурные деформации, теплоустойчивость, повышение точности, методики.

Введение. По разным оценкам геометрическая погрешность обработанных на станке деталей, обусловленная тепловыми деформациями элементов его несущей системы, составляет не менее 50 % от общих погрешностей обработки [1–5]. В настоящее время существуют две альтернативные точки зрения на эффективность обеспечения теплоустойчивости станков [6]. В соответствии с первой точкой зрения осуществляется детальная проработка конструкторских решений, основанная на максимально подробных математических моделях, учитывающих множество факторов и использующих сложные математические модели [7–11]. Согласно другой точки зрения, теплоустойчивость станков эффективно обеспечивается на основе реализации технологий компенсации тепловой погрешности станков [12–17].

Для узлов станков торцешлифовальной группы, находящихся на стадии проектирования, наиболее важным является определение температурных деформаций, которое позволит оценить качество конструкций по критерию точности обработки, дать рекомендации по улучшению температурных характеристик, выбрать наиболее рациональную конструкцию, удовлетворяющую

предъявленным требованиям к точности обработки.

В настоящее время торцешлифовальные станки используются в основном в подшипниковой промышленности.

Показатели работоспособности подшипников во многом определяются точностью изготовления тел качения, в том числе и цилиндрических роликов, торцы которых обрабатываются на двусторонних торцешлифовальных станках.

Требования по точности обработки торцов цилиндрических роликов задаются следующими показателями: точностью размера по длине (разноразмерностью), допускаемой погрешностью геометрической формы (выпуклостью торца) и торцовым биением. Улучшение первого показателя связано, главным образом, с совершенствованием системы автоматической подналадки шлифовальных кругов на заданный размер при шлифовании партии деталей. Среди двух других – основным показателем точности, исходя из функционального назначения торцовых поверхностей (торец служит технологической базой при обработке цилиндрической поверхности на бесцентровошлифовальном станке), явля-

ется торцовое биение, которое лимитирует величину отклонения от перпендикулярности торцов и поверхности качения. В связи с этим, в качестве основной характеристики точности принято торцовое биение цилиндрических роликов. Допуски на торцовое биение цилиндрических роликов постоянно ужесточаются. Так для цилиндрического ролика диаметром 18 мм предусматриваются первая и вторая степени точности обработки по ГОСТ 22696–2013.

Обработка деталей на торцешлифовальных станках связана с выделением значительного количества теплоты, оказывающей заметное влияние на точность обработки [18]. Так как в результате тепловых деформаций взаимное положение рабочих торцов двух абразивных кругов изменяется в пространстве, то можно, приведя их перемещения к трем осям координат, рассмотреть

возникающую погрешность обработки в каждом из трех направлений. Линейные перемещения (по оси Y , рис. 1) компенсируются износом шлифовальных кругов и величиной их подналадки в процессе шлифования. Отклонения кругов в плоскости XOY (вдоль направления перемещения заготовок) практически не оказывают влияния на качество обработки. И третье направление тепловых перемещений кругов – в плоскости YOZ , проходящей через оси шпинделей перпендикулярно станине станка. Эти перемещения, оказывающие существенное влияние на качество обработки, так как величина их перемещений соизмерима с величиной непараллельности торцов кругов, также являются критерием оценки качества конструкции станка.

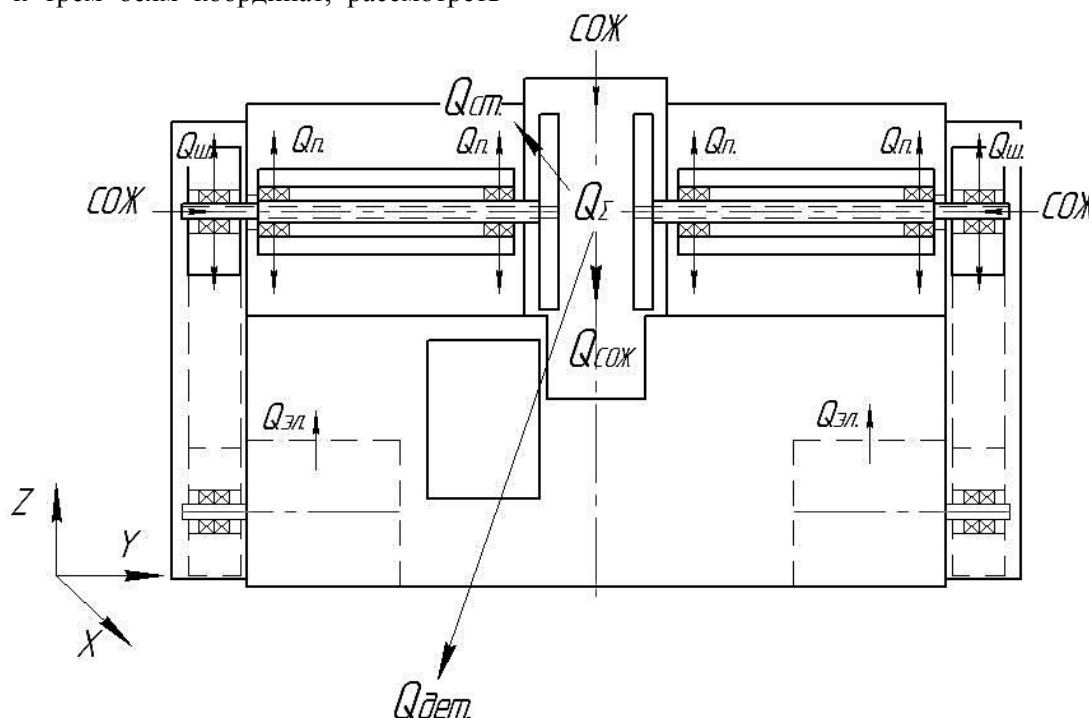


Рис.1. Схема распределения тепловых потоков в двустороннем торцешлифовальном станке

Типовым представителем гаммы двусторонних торцешлифовальных станков с горизонтальным расположением шпинделей является станок модели 3А343АДФ2. Данный станок предназначен для шлифования роликов подшипников, у которых обработка идет с повышенными мощностями шлифования и, как следствие, увеличением погрешности обработки во время работы станка. У этого станка все основные узлы унифицированы с остальными представителями данной гаммы станков. Это позволило с несущественными уточнениями использовать результаты исследований применительно к станкам данной гаммы.

При разработке методики экспериментальных исследований необходимо было решить следующие технические задачи:

- оценить изменение температуры в характерных точках станка и изменение температуры смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) в процессе работы станка;
- измерить взаимное угловое положение кругов во время работы станка.

Для решения этих задач необходимо разработать:

- методику имитации процесса шлифования;
- методику измерения температуры;

- методику определения взаимного углового положения кругов, обусловленного тепловыми деформациями;
- методику измерения погрешности обработки.

Методика имитации процесса шлифования. Во время работы станка измерение температурных деформаций затруднено, поэтому необходимо реализовать методику имитации процесса шлифования на неработающем станке должна приводить к аналогичным тепловыделениям для работающего станка под нагрузкой. В этом случае полученные температурные поля и взаимное угловое положение кругов будут близки к тем, которые имеют место при работе станка под нагрузкой.

Температурный режим работы станка достаточно сложен и находится в широком тепловом и временном диапазонах. Если начало работы характеризуется, в основном, нагревом от работы электродвигателя на холостом ходу, приводного шкива и теплом выделяемым подшипниками, то во время шлифования основная тепловая нагрузка перемещается к центру станка, в зону резания, соответственно тепловые деформации системы изменяют не только свою величину, но, в ряде случаев, и направление.

В связи с этим изменение тепловых перемещений кругов производилось в двух предельных тепловых состояниях станка.

Имитация начала работы осуществлялась при работе станка на холостом ходу с подачей СОЖ от индивидуального бака со следующими характеристиками:

- объем бака – $1,2 \text{ м}^3$;
- площадь теплоотдающей поверхности – 10 м^2 ;
- коэффициент теплоотдачи бака – $0,93 \text{ кВт/м}^2\text{градус}$;
- СОЖ располагается на трех уровнях друг над другом;
- СОЖ в зону шлифования подается с помощью насоса центробежного типа П–180;
- производительность насоса – 90 л/мин ;
- очистка осуществляется магнитным сепаратором с пропускной способностью – $0,2 \text{ м}^3/\text{мин}$.

В качестве СОЖ использовался 3% водный раствор эмульсола НГЛ–205.

Для имитации процесса шлифования была разработана система подогрева СОЖ, проходящей через станок как это происходит во время шлифования. Для этой цели в индивидуальном баке охлаждения с помощью термоэлектрических нагревателей (ТЭН) имитировали различ-

ную мощность шлифования, что, с учетом остывания СОЖ в трубопроводах, соответствовало рабочей мощности. Так, нагрев СОЖ нагревателями мощностью 18 кВт соответствовал рабочей мощности в 12 кВт . Подогрев СОЖ в баке проводился с помощью нагревателей мощностью 18 и 6 кВт . Такие значения мощности характерны для средних условий шлифования роликов диаметрами 18 и 12 мм .

Методика измерения температур. Измерение температур проводилось с помощью двух электродных термодпар со спаем. В качестве электродов термодпар была выбрана пара медь–константан. При выборе пары руководствовались величиной термоЭДС (электродвижущая сила) термодпары в рабочем диапазоне температур и крутизной характеристики, обеспечивающей ее достаточную чувствительность. В качестве регистрирующей аппаратуры использовался гальванометр.

Чтобы уменьшить погрешность измерения, градуировка каждой из термодпар проводилась вместе с прибором. Спай каждой термодпары помещался в термостат с холодной водой. По мере нагрева, через каждые 5°C , записывалась температура, измеряемая с помощью ртутного термометра, пределы измерения которого $0\text{--}100^\circ\text{C}$. Параллельно записывались показания гальванометра.

Измерение температур проводилось в отдельных точках станка, для чего спай каждой термодпары помещался в высверленное отверстие (глубина $0,5$ толщины стенки) на поверхности станка, заполненное маслом. Холодные концы термодпар изолировались полихлорвиниловыми трубками. Температура измерялась в следующих точках (рис. 2):

- на внешнем торце шпиндельных бабок (точки 1, 2, 11, 12);
- на передней стенке шпиндельных бабок, вблизи ограждения зоны шлифования (точки 5, 6, 15, 16);
- на задней стенке шпиндельных бабок, вблизи ограждения зоны шлифования (точки 8, 9, 18, 19);
- на торцах станины, в верхней ее части (точки 3, 13);
- на передней и задней стенках станины, вблизи ограждения зоны шлифования (точки 7, 17, 10, 20);
- на торцах и середине станины, в нижней ее части (соответственно точки 4, 14 и 23);
- под кожухами шкивов (точки 21 и 22).

Для измерения температуры СОЖ, выходящей из зоны шлифования, и температуры окружающей среды использовался ртутный термометр (пределы измерения от 0 до 100°C).

Запись показаний проводилась через каждые 0,5–1 часа в течение 5–7 часов работы станка. Для повышения достоверности результатов изменений эксперименты повторялись до трех раз. По результатам измерений определялись функциональные зависимости вида

$$\Delta T_{\text{изб}} = f(\tau) \quad (1)$$

где $\Delta T_{\text{изб}} = T_z - T_{\text{о.с.}}$ – избыточная температура, градусы; T_z – температура замера в точке, градусы; $T_{\text{о.с.}}$ – температура окружающей среды, градусы; τ – время работы станка, час.

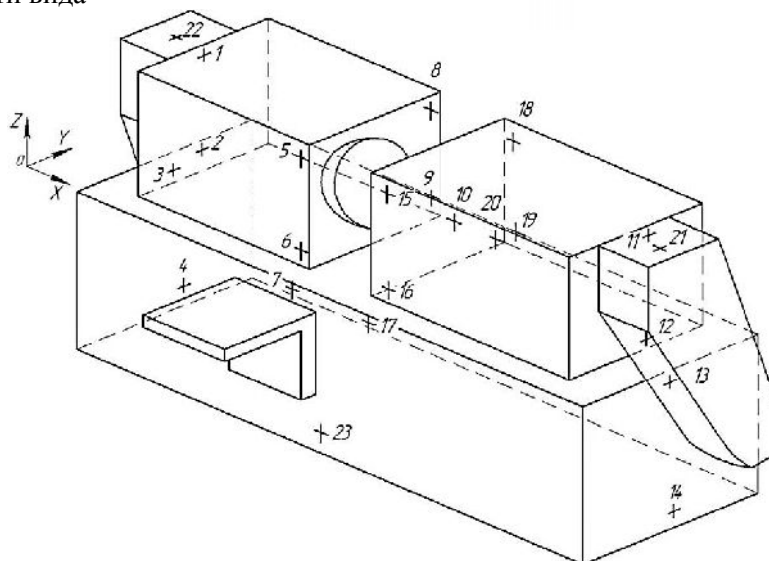


Рис. 2. Схема распределения контрольных точек измерения температур (редуктор с диском подачи не показаны)

Методика измерения изменений взаимного углового положения кругов. Для оценки взаимного положения технологической базы (диска подачи) и инструмента (двух абразивных кругов) была разработана методика, учитывающая имеющиеся сведения о тепловых деформациях торцешлифовальных станков. Как было сказано ранее, перемещение кругов происходит по всем трем осям координат, из которых только перемещение в плоскости YOZ, проходящей через оси шпинделей перпендикулярно станине станка, оказывают существенное влияние на точность обработки, так как величина их перемещений соизмерима с величиной непараллельности торцов кругов, устанавливаемой для формирования зоны шлифования. Необходимо измерять перемещения инструмента во время вращения шпинделей, так как даже краткая их остановка приводит к неточному определению их положения во время работы. Оценка тепловых перемещений инструмента должна проводиться относительно базовой плоскости перемещения заготовок в зоне обработки. Для реализации выдвинутых условий был использован принцип пневматического упора, конструктивная схема которого представлена на рис. 3.

На оси редуктора подачи был закреплен рычаг 4, на конце которого располагались два пневматических сопла 5, каждое для своего круга. Измерительной поверхностью служили торцы фланцев шпинделей, что позволяло поднять точ-

ность отсчета показаний по сравнению с абразивной поверхностью круга. Изменение положения фланца шпинделя относительно плоскости подачи определилось по двум диаметрально расположенным точкам, соответствующим двум положениям рычага 1.

Измерение выполнялось следующим образом. Рычаг устанавливался в положение I, а пиноль (фланец шпинделя) подводилась к соплу до тех пор, пока стрелка сильфонного датчика (6) не занимала определенного положения, принимаемого за «0». На отсчетном устройстве станка, показывающем величину осевого перемещения пиноли, также фиксировалось первоначальное значение – «0». Затем измерительный рычаг с соплом переводился в положение II и перемещением пиноли вперед или назад, стрелка сильфонного датчика устанавливалась на «0». На отсчетной шкале ЧПУ снимались показания, которые указывали на какую величину положение в точке II отличалось от положения в точке I, принятой за нулевое. Аналогичный замер проводился на фланце второго шпинделя. Использование принципа пневматического упора позволило измерять положение фланцев шпинделей без их остановки, так как измерительное сопло не контактировало с вращающимся шпинделем.

Измерение положения фланцев шпинделей производилось параллельно с определением температур, первые два часа через каждые 30 минут, а потом – через каждый час работы станка.

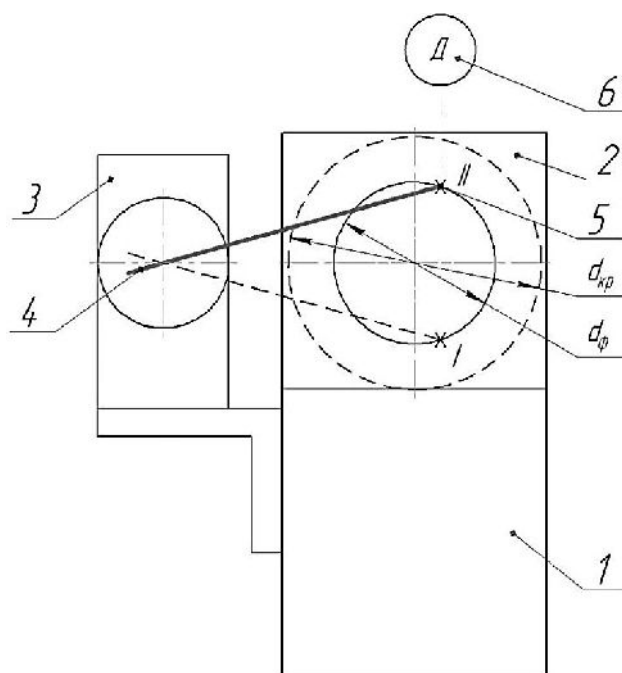


Рис. 3. Конструктивная схема замера положения фланцев шпинделей:
1 – станина; 2 – шпиндельная бабка; 3 – редуктор подачи; 4 – рычаг; 5 – пневматическое сопло;
6 – сильфонный датчик; $d_{кр}$ – диаметр шлифовального круга; $d_{ф}$ – диаметр фланца

Время непрерывной работы станка 5–7 часов. Каждый эксперимент повторялся до трех раз, для повышения достоверности результатов. Полученные отклонения (Δ_T^B) фланцев шпинделей пересчитывались на диаметр круга и определялись функциональные зависимости вида

$$\Delta_T^B = f(\tau) \quad (2)$$

$$\Delta_T^B = f(t_{сож}) \quad (3)$$

где τ – время работы станка, час.; $t_{сож}$ – температура СОЖ на выходе из станка, градусы.

Методика измерения погрешности обработки. В качестве основной характеристики точности обработки было принято торцовое биение ролика. Измерение торцового биения ролика производилось по следующей методике: ролик устанавливался в призму; при помощи резинового ролика приводился во вращение и прижимался к упору на уровне его оси; наконечник измерительной головки устанавливался на наружном радиусе торца ролика; максимальная разность показаний головки за один оборот ролика характеризовала его биение (цена деления измерительной головки 0,5 мкм).

С учетом опыта использования двусторонних торцешлифовальных станков были выбраны абразивные круги и следующие условия:

- способ подачи СОЖ: разбрызгиванием через сопло, установленное поверх кругов и через отверстия в шпинделях;
- режимы правки: компенсация износа кругов проводилась от прибора автоматически, величина компенсации – 2 мкм;

- режимы обработки: подача регламентировалась заданной производительностью 10000 шт./час, что соответствовало скорости подачи изделий – 5,3 м/мин; припуск на обработку – 0,05–0,07 мм; частота вращения кругов 900 об/мин, что соответствовало скорости резания на периферии круга – 28 м/с;

- взаимное положение кругов (настройка): в вертикальной плоскости расстояние между верхними кромками кругов составляло 0,052 мм, в горизонтальной плоскости расстояние между кромками кругов на входе в зону обработки составляло 0,4 мм.

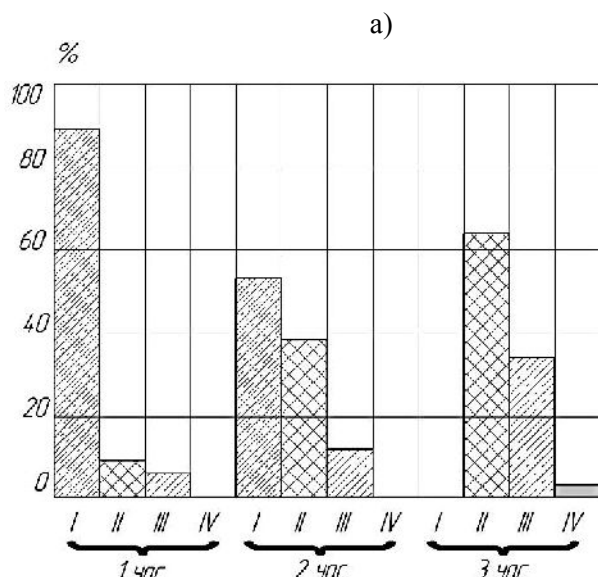
Шлифование цилиндрических коротких роликов диаметром 18 мм производилось на двустороннем торцешлифовальном станке модели 3А343АДФ2.

В ходе подготовки станка, определения рациональных режимов и оптимальной настройки было выполнено шлифование торцов роликов. Прошлифовано три контрольных партии по 3000 штук в каждой.

Контроль качества шлифования проводился по временной выборке – 5 роликов через каждые 10 мин. в течение всего времени шлифования (3 часа работы станка). В фиксированное время из потока цилиндрических роликов брали по 5 штук и одновременно измеряли температуру характерных точек станка и температуру СОЖ. Мощность шлифования оценивалась согласно разработанным методикам. Замеры мощности проводились через каждые 5 минут работы станка. Результаты

замеров мощности показали, что мощность шлифования колебалась в пределах от 7 до 12 кВт, а мощность холостого хода составила 5,5 кВт.

Обработка результатов контроля качества шлифования показала, что рассеяние длины роликов колебалось до 11 мкм, выпуклость торцов – до 3 мкм, шероховатость торцов (R_a) – от 0,2 до 0,09 мкм (т.е. в пределах требуемых степеней точности первой и второй по ГОСТ 22696–2013); прижоги не фиксировались.



Результаты контроля качества шлифования по параметру «торцовое биение» представлены на рис. 4 (I, II, III, IV – степени точности по ГОСТ 22696–2013). Из рисунка видно, что I степень точности обработки для роликов обеспечивалась только в первые два часа работы станка. Последовательный рост тепловых деформаций приводил к существенному росту погрешностей обработки. Начиная с третьего часа непрерывной работы станка, достигалась только допустимая вторая степень точности ролика.

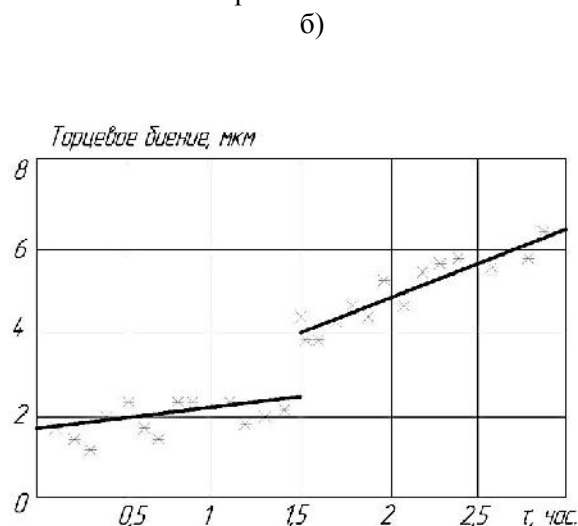


Рис. 4. Изменение точности обработки деталей (торцовое биение во времени): а) балансы точности обработки; б) результаты эксперимента

Выводы. Предложенные в работе методики экспериментальных исследований теплового поведения и погрешности обработки двустороннего торцешлифовального станка позволяют проводить доводку станка в условиях реального производства. При этом предварительно проведенные натурные испытания двустороннего торцешлифовального станка показали, что при шлифовании партии цилиндрических роликов избыточные температуры распределились неравномерно по узлам станка как на холостом ходу, так и при шлифовании. Наибольшую избыточную температуру при работе на холостом ходу имели торцы шпиндельных бабок и станины, а при шлифовании – поверхности узлов станка, находящиеся в непосредственной близости от зоны шлифования. Характер изменения избыточных температур характерных точек и СОЖ при имитации процесса шлифования на станке полностью совпал с экспериментальными данными, полученными на работающем станке.

Источник финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (Российский фонд фундаментальных исследований) и Оренбургской области в рамках научного проекта № 19-48-560001.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bryan J. International status of thermal error research // Ann CIRP. 1990. Vol. 39. Is.2. Pp.645–656
2. Решетов Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков. М.: Машиностроение. 1986, 336 с.
3. Zhou Z.D., Gui L., Tan Y.G., Liu M.Y., Liu Y., Li R.Y. Actualities and development of heavy-duty CNC machine tool thermal error monitoring technology // Chin. J. Mech. Eng. 2017. Vol. 30. Is. 5. Pp. 1262–1281.
4. Liang Y., Su H., Lu L., Chen W., Sun Y., Zhang P. Thermal optimization of an ultra-precision machine tool by the thermal displacement decomposition and counteraction method // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2015. Vol.76. Is.1-4. Pp. 635–645.
5. Putz M., Richter C., Regel J., Bräunig M. Industrial consideration of thermal issues in machine tools // Prod. Eng. Res. Devel. 2018. Vol. 12. Is. 6 Pp. 723–736.
6. Mayr J., Jedrzejewski J., Uhlmann E., Donmez M. A., Knapp W., Härtig F., Wendt K., Moriwaki T., Shore P., Schmitt R., Brecher C., Würz T., Wegener K. Thermal issues in machine tools // Annals of the CIRP. 2012. Vol. 61. Is. 2. Pp. 771–

792.

7. Shi X., Zhu K., Wang W., Fan L., Gao J. A thermal characteristic analytic model considering cutting fluid thermal effect for gear grinding machine under load // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2018. Vol. 99. Is. 5-8. Pp. 1755–1769.

8. Shi X., Wang W., Mu Y., Yang X. Thermal characteristics testing and thermal error modeling on a worm gear grinding machine considering cutting fluid thermal effect // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019. Pp. 1–13.

9. Ortega N., Bravo H., Pombo I., Sanchez J.A., Vidal G. Thermal analysis of creep feed grinding // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 132. Pp. 1061–1068.

10. Wang S., Zhou B., Fang C., Sun S. Research on thermal deformation of large CNC gear profile grinding machine tools // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2017. Vol. 91. Is. 1-4. Pp. 577–587.

11. Fang B., Gu T., Ye D., Luo T. An improved thermo-mechanical model for vertical machining center // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016. Vol. 87. Is. 9-12. Pp. 2581–2592.

12. Cao H., Zhu L., Li X., Chen P., Chen Y. Thermal error compensation of dry hobbing machine tool considering workpiece thermal deformation // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016. Vol. 86. Is. 5-8. Pp. 1739–1751.

13. Поляков А.Н., Гончаров А.Н., Парфёнов И.В. Методика коррекции температурной погрешности станка с ЧПУ // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2019. № 3. С. 117–127.

14. Поляков А.Н., Гончаров А.Н., Марусич К.В. Методика реализации алгоритмов

компенсации температурной погрешности станка с ЧПУ // *Справочник. Инженерный журнал с приложением*. 2018. № 3 (252). С. 23–29.

15. Нассер А.А. Интеллектуальная система управления компенсацией температурных деформаций / Новые информационные технологии и системы: сб. научных статей XII Междунар. науч.-техн. конф. // Пензенский государственный университет (Пенза, 17-19 ноября 2015 г.), Пенза: Изд-во Пензенский государственный университет, 2015. С. 233–235.

16. Горбунов В.П., Григорьев В.Ф. Влияние тепловых деформаций многоцелевого станка на показатели точности / Инновационные технологии в машиностроении: сб. научных трудов Междунар. науч.-практ. конф. // Полоцкий государственный университет (Новополоцк, 28-29 октября 2015 г.), Новополоцк: Изд-во Полоцкий государственный университет, 2015. С. 50–54.

17. Ягопольский А.Г., Крикунов Д.Э. Анализ коррекции тепловых деформаций в станках // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение*. 2014. № 5 (98). С. 98–105.

18. Никитина И.П., Поляков А.Н. Проблемы теплоустойчивости двусторонних торцевшлифовальных станков / Техника и технологии: пути инновационного развития: сб. научных трудов XIII Междунар. науч.-практ. конф. // Юго-Западный государственный университет (Курск, 28 июня 2019 г.), Курск: Изд-во Юго-Западный государственный университет, 2019. С. 6–12.

Информация об авторах

Никитина Инна Петровна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов. E-mail: innanikitina@list.ru. Оренбургский государственный университет, Россия, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Поляков Александр Николаевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов, профессор. E-mail: anp_temos@mail.ru. Оренбургский государственный университет, Россия, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Поступила в августе 2019 г.

© Никитина И.П., Поляков А.Н., 2019

***Nikitina I.P., Polyakov A.N.**

Orenburg State University
Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13
*E-mail: innanikitina@list.ru

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE TEMPERATURE AND ACCURACY CHARACTERISTICS OF DOUBLE-SIDED FACE GRINDING MACHINE

Abstract. The paper proposes a methodology for experimental studies of double-sided face grinding machines on the criterion of heat resistance, including: method of simulating a grinding process; measurement

of temperature; measurement of changes in relative angular position of the circles; the measurement of processing errors. The proposed methods for experimental studies of the thermal behavior and errors in the machining of a double-sided face grinder allow for fine-tuning of the machine under production conditions. At the same time, preliminary tests of a double-sided face grinder show that when grinding an industrial batch of cylindrical rollers, excessive temperatures are distributed unevenly across the machine nodes both at idle and during grinding. The ends of the spindle heads and the stand have the greatest excess temperature when working at idle, and when grinding - on the surface of the machine, located in close proximity to the grinding zone. The nature of changes in excess temperatures of characteristic points and coolant when simulating the grinding process on the machine completely coincided with the experimental data obtained on a working machine.

Keywords: face grinding machines, temperature deformations, heat resistance, improving accuracy, methods.

REFERENCES

1. Bryan J. International status of thermal error research. Ann CIRP. 1990. Vol. 39. Is.2. Pp.645–656
2. Reshetov D.N., Portman V.T. Precision machine tools [Tochnost' metallorezhushchih stankov]. M.: Mashinostroyeniye. 1986, 336 p. (rus)
3. Zhou Z.D., Gui L., Tan Y.G., Liu M.Y., Liu Y., Li R.Y. Actualities and development of heavy-duty CNC machine tool thermal error monitoring technology. Chin. J. Mech. Eng. 2017. Vol. 30. Is. 5. Pp. 1262–1281.
4. Liang Y., Su H., Lu L., Chen W., Sun Y., Zhang P. Thermal optimization of an ultra-precision machine tool by the thermal displacement decomposition and counteraction method. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2015. Vol.76. Is.1-4. Pp.: 635–645.
5. Putz M., Richter C., Regel J., Bräunig M. Industrial consideration of thermal issues in machine tools. Prod. Eng. Res. Devel. 2018. Vol. 12. Is. 6 Pp. 723–736.
6. Mayr J., Jedrzejewski J., Uhlmann E., Donmez M. A., Knapp W., Härtig F., Wendt K., Moriwaki T., Shore P., Schmitt R., Brecher C., Würz T., Wegener K. Thermal issues in machine tools. Annals of the CIRP. 2012. Vol. 61. Is. 2. Pp. 771–792.
7. Shi X., Zhu K., Wang W., Fan L., Gao J. A thermal characteristic analytic model considering cutting fluid thermal effect for gear grinding machine under load. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2018. Vol. 99. Is. 5-8. Pp. 1755–1769.
8. Shi X., Wang W., Mu Y., Yang X. Thermal characteristics testing and thermal error modeling on a worm gear grinding machine considering cutting fluid thermal effect. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2019. Pp. 1–13.
9. Ortega N., Bravo H., Pombo I., Sanchez J.A., Vidal G. Thermal analysis of creep feed grinding. Procedia Engineering. 2015. Vol. 132. Pp. 1061–1068.
10. Wang S., Zhou B., Fang C., Sun S. Research on thermal deformation of large CNC gear profile grinding machine tools. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2017. Vol. 91. Is. 1-4. Pp. 577–587.
11. Fang B., Gu T., Ye D., Luo T. An improved thermo-mechanical model for vertical machining center. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2016. Vol. 87. Is. 9–12. Pp. 2581–2592.
12. Cao H., Zhu L., Li X., Chen P., Chen Y. Thermal error compensation of dry hobbing machine tool considering workpiece thermal deformation. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2016. Vol. 86. Is. 5-8. Pp. 1739–1751.
13. Polyakov A.N., Goncharov A.N., Parfyonov I.V. The method of correction of the temperature error of the CNC machine [Metodika korrektsii temperaturnoj pogreshnosti stanka s CHPU]. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova. 2019. No. 3. Pp. 117–127. (rus)
14. Polyakov A.N., Goncharov A.N., Marusich K.V. The method of implementation of the algorithms for compensating the temperature error of the CNC machine [Metodika realizatsii algoritmov kompensatsii temperaturnoj pogreshnosti stanka s CHPU]. Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniem. 2018. No. 3 (252). Pp. 23–29. (rus)
15. Nasser A.A Intelligent temperature distortion control system [Intellektual'naya sistema upravleniya kompensatsiej temperaturnykh deformatsij]. XII Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya «Novye informacionnye tekhnologii i sistemy». Penzenskiy gosudarstvennyy universitet. 2015. Pp. 233–235. (rus)
16. Gorbunov V.P., Grigor'ev V.F. Influence of thermal deformations of a multi-purpose machine on accuracy rates [Vliyanie teplovykh deformatsij mnogocелеvogo stanka na pokazateli tochnosti]. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya «Innovacionnye tekhnologii v mashinostroyenii». Polockiy gosudarstvennyy universitet. 2015. Pp. 50–54. (rus)
17. YAgopol'skiy A.G., Krikunov D.E. Analysis of the correction of thermal deformations in machine tools [Analiz korrektsii teplovykh deformatsij v stankah]. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Bauman. Seriya: Mashinostroyeniye. 2014. No. 5 (98). Pp. 98–105. (rus)
18. Nikitina I.P., Polyakov A.N. Problems of heat resistance of bilateral face grinding machines

[Problemy teploustojchivosti dvustoronnih torceshlifoval'nyh stankov]. XIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya «Tekhnika i tekhnologii: puti innovacionnogo razvitiya». Yugo-Zapadnyj gosudarstvennyj universitet. 2019. Pp. 6–12. (rus)

Information about the authors

Nikitina, Inna P. PhD, Assistant professor. E-mail: innanikitina@list.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13.

Polyakov, Aleksandr N. PhD, Professor. E-mail: anp_temos@mail.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13.

Received in August 2019

Для цитирования:

Никитина И.П., Поляков А.Н. Экспериментальное исследование температурных и точностных характеристик двустороннего торцешлифовального станка // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 11. С. 112–120. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-112-120

For citation:

Nikitina I.P., Polyakov A.N. Experimental investigation of the temperature and accuracy characteristics of double-sided face grinding machine. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 11. Pp. 112–120. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-112-120

DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-121-127

Кхалифа М., Дуюн Т.А.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46***E-mail: kh.mon@yandex.ru*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОГО ПАКЕТА ANSYSWorkbench

Аннотация. Представлена методика моделирования процесса резания при тчении конструкционной стали (сталь 45). Для моделирования использован конечно-элементный пакет ANSYS Workbench, задача решалась в трехмерной постановке. Для моделирования пластической деформации и разрушения материала использована модель Джонсона-Кука, позволяющая учесть кинематическое упрочнение и адиабатический разогрев деформируемого материала. В качестве критерия стружкоотделения выбрано критическое значение деформации сдвига в слое, разделяющем заготовку и стружку. Имитировалось сводное резание, величина подачи инструмента учитывалась за счет ширины среза. В результате моделирования получены поля напряжений и деформаций обрабатываемого материала и инструмента, а также тепловое поле стружки и обрабатываемого изделия. Полученные результаты хорошо согласуются с известными в литературе экспериментальными данными, а также не противоречат традиционным положениям теории резания. Предложенная методика моделирования позволяет исследовать напряженно-деформированное и тепловое состояние процесса резания, условия стружкообразования, прогнозировать параметры качества поверхностного слоя.

Ключевые слова: моделирование процесса резания, численные методы, метод конечных элементов, модель Джонсона–Кука.

Введение. Применение пакетов прикладных программ, реализующих метод конечных элементов, с целью моделирования процессов резания и деформирования приобретает в последнее время все большую популярность [1–11]. Это объясняется высоким быстродействием современных компьютеров и широкими возможностями таких программ как ANSYS, ABAQUS, Deform 3D, позволяющих не только моделировать сложный процесс резания с высокой степенью достоверности, но и визуализировать его в реальном времени [1, 2]. Компьютерное моделирование существенно экономичнее дорогостоящих экспериментальных исследований и позволяет получать ряд параметров процесса резания, недоступных для прямого измерения: тепловое поле в инструменте и заготовке, поля напряжений и деформаций. Таким образом, моделирование может быть использовано для управления процессом резания: обеспечения параметров качества изделия, например, остаточных напряжений поверхностного слоя, прогнозирования условий формирования стружки и износа инструмента, определения температурно-силовых характеристик [3, 4].

Целью настоящей работы являлась разработка методики моделирования процесса резания с использованием программы ANSYSWorkbench для возможности дальнейшего исследования силовых и тепловых процессов резания, а также

формирования параметров качества обрабатываемой поверхности в различных технологических условиях обработки.

Основная часть. Адекватное моделирование резания металла является сложной многокомпонентной задачей, так как резание сопровождается взаимосвязанным протеканием ряда физических и химических процессов: упругопластическое деформирование и разрушение материала, тепловыделение, структурные и фазовые превращения. Сложность состоит также в том, что указанные процессы взаимно обуславливают друг друга: интенсивность тепловыделения зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала, которые в свою очередь претерпевают изменения под действием температуры; одновременное воздействие температуры и деформаций вызывает структурные и фазовые изменения материала, что также определяет физико-механические характеристики [5, 6].

В процессе стружкообразования можно выделить две основные зоны сдвига: сдвиг, характеризующий непосредственно резание, то есть превращение срезаемого слоя в стружку, а также вторичная зона сдвига, так называемый заторможенный слой, то есть зона контакта стружки и инструмента (рис. 1) [7].

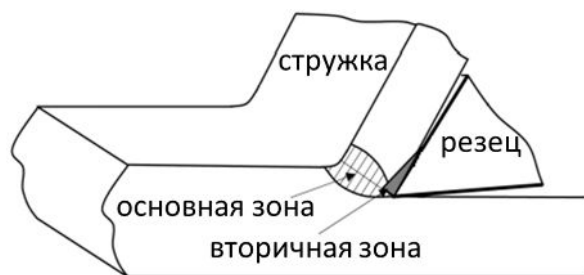


Рис. 1. Схема формирования зон сдвига при резании

Зона сдвига формируется в результате пластических деформаций металла снимаемого припуска и поверхностного слоя под влиянием температуры и деформации. Как отмечалось выше процесс стружкообразования обусловлен физико-механическими свойствами обрабатываемого материала, однако условия протекания этого процесса в свою очередь изменяют механические параметры. Скорость деформаций оказывает существенное влияние на предел текучести, кроме того при высоких скоростях деформаций происходит явление адиабатического разогрева

метала в зоне наибольших деформаций и, соответственно, его локальное разупрочнение [8]. На рис. 2 представлены диаграммы испытаний на растяжение стали 45 в координатах истинное напряжение–истинная деформация при разных температурах и скоростях деформации. Величина напряжений при пластической деформации материала формируется при одновременном действии двух процессов: процесса упрочнения, повышающего напряжение, и процесса отжига, снижающего упрочнение и, следовательно, понижающего напряжение. При увеличении температуры отжиг материала протекает более интенсивно, поэтому повышение температуры снижает напряжение деформации. Скорость деформации существенно влияет на процесс отжига материала, он проявляется более полно при низких скоростях деформации, повышение скорости деформации приводит к увеличению напряжения. Таким образом, при высоких температурах и меньших скоростях деформации отжиг материала протекает настолько интенсивно, что компенсирует его упрочнение [9].

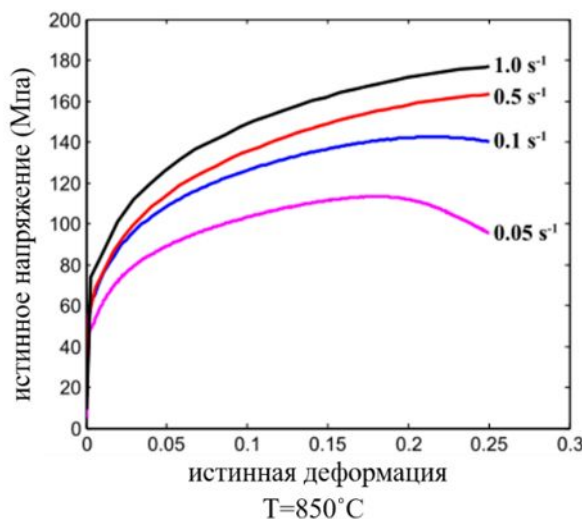
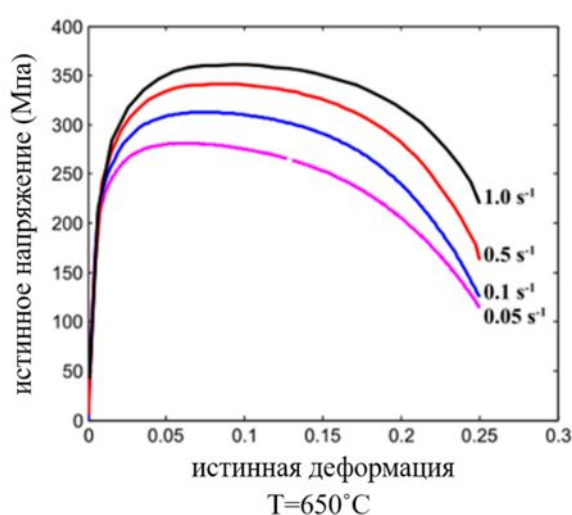


Рис. 2. Диаграммы испытаний на растяжение стали 45 при разных температурах и скоростях деформации

Одной из наиболее известных моделей, описывающих поведение металла при пластических деформациях, является модель Джонсона-Кука в форме уравнения состояния Ми-Грюнайзена [10]. Данная модель учитывает, как кинематическое упрочнение, так и адиабатический разогрев деформируемого материала в виде зависимости напряжения от скорости деформирования и температуры. В этой модели, эквивалентное пластическое напряжение определяется выражением:

$$\sigma = (A + B \cdot \bar{\epsilon}^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \dot{\epsilon}^*) \cdot (1 - T^{*m}), \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}, \quad T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0}, \quad (2)$$

где A – предел текучести при медленном нагружении; B – изотропное (статическое) упрочнение, характеризующее чувствительность к деформации; $\bar{\epsilon}$ – эквивалентная пластическая деформация; n – коэффициент, представляющий эффект упрочнения; C – коэффициент чувствительности к скорости деформации; $\dot{\epsilon}$ – скорость пластической деформации; $\dot{\epsilon}_0$ – скорость деформации при статических испытаниях; T_0 , T_m – температура окружающей среды и температура плавления материала соответственно; m – показатель степени, учитывающий явление термического разупрочнения материала.

В уравнении (1) первый множитель описывает явление наклепа, второй – динамическое упрочнение, третий – явление термического разупрочнения.

Для моделирования отделения стружки от обрабатываемой поверхности в качестве критерия разрушения материала использована сопряженная модель Джонсона-Кука, которая описывает историю повреждения каждого элемента на основе кумулятивного закона накопления поврежденности D :

$$D = \sum \frac{\Delta \bar{\varepsilon}}{\varepsilon_f}, \quad (3)$$

где $\Delta \bar{\varepsilon}$ – инкремент эффективной пластической деформации во время цикла интегрирования; ε_f – эквивалентная деформация разрушения при текущих условиях температуры деформации, давления и эквивалентного напряжения. Разрушение происходит, если параметр повреждения D превышает значение единицы $D \geq 1$.

Процесс деформации разрушения определяется соотношением:

$$\varepsilon_f = \left(D_1 + D_2 \cdot \exp\left(D_3 \cdot \frac{p}{q}\right) \right) \cdot \left(1 + D_4 \cdot \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \cdot \left(1 + D_5 \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right) \quad (4)$$

где D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 – параметры разрушения материала; p – гидростатическое давление; q – напряжение Мизеса.

Деформация разрушения зависит от эффективной скорости деформации $\dot{\varepsilon}^*$, коэффициента жесткости напряженного состояния, определяемого отношением гидростатического давления к напряжению Мизеса, и температуры.

Параметры материала D_1, D_2, D_3 характеризуют отношение гидростатического давления, или среднего напряжения, к эквивалентному напряжению Мизеса, параметр D_4 учитывает влияние скорости деформации на разрушение, параметр D_5 определяет влияние температуры на деформацию при разрушении.

Для реализации моделирования процесса резания был использован программный пакет ANSYS, его приложение Workbench содержит модель Джонсона-Кука и позволяет моделировать сложное поведение материала при динамическом нагружении. Для определения параметров модели Джонсона-Кука и критериев разрушения необходимо иметь экспериментальные данные о динамических свойствах исследуемого материала. В данной работе для исследования была принята сталь 45, инструментальный материал – твердый сплав. Физико-механические свойства обрабатываемого и инструментального материала представлены в табл. 1, параметры модели Джонсона-Кука – в табл. 2, 3 [11].

Таблица 1

Физико-механические свойства обрабатываемого и инструментального материала

Материал	Плотность, кг/м ³	Модуль Юнга, Па	Коэффициент Пуассона	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C)	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·°C
Сталь 45	7850	$2 \cdot 10^{11}$	0,29	486	52
Твердый сплав	14500	$560 \cdot 10^{11}$	0,22	220	34

Таблица 2

Параметры модели Джонсона-Кука для стали 45, характеризующие условия пластического деформирования

A , Па	B , Па	n	C	m	$\dot{\varepsilon}_0$	T_m , °C	T_0 , °C
$616 \cdot 10^6$	$668 \cdot 10^6$	0,225	0,0134	1,078	1	1350	22

Таблица 3

Параметры модели Джонсона-Кука для стали 45, характеризующие условия разрушения

D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
0,04	1,03	1,39	0,002	0,46

Расчетная схема имитационной модели процесса резания представлена на рис. 3. Модель состоит из трех основных компонентов: 1 – режущий инструмент с геометрическими параметрами режущей части: передний угол $\gamma = 5^\circ$, задний угол $\alpha = 10^\circ$; 2 – обрабатываемая поверхность, поверхностный слой, подлежащий удалению со стружкой; 3 – основная часть заготовки. Задача решалась в трехмерной постановке со следующими режимами резания: скорость резания $v = 300$ м/мин, глубина резания $a = 0,1$ мм, подача $s = 0,05$ мм. Имитировалось сводное резание, величина подачи учитывалась за счет ширины среза. В качестве критерия стружкоотделения выбрано критическое значение деформации сдвига в слое, разделяющем заготовку и стружку.

При моделировании условий трения на площадках контакта «стружка–инструмент», «инструмент–заготовка» использовалась модель на основе закона Кулона-Амонтона:

$$F = \mu \cdot N, \quad (5)$$

где μ – коэффициент кулоновского трения; N – сила нормальной реакции. Коэффициент трения на основе анализа литературных источников принят равным $\mu=0,22$.

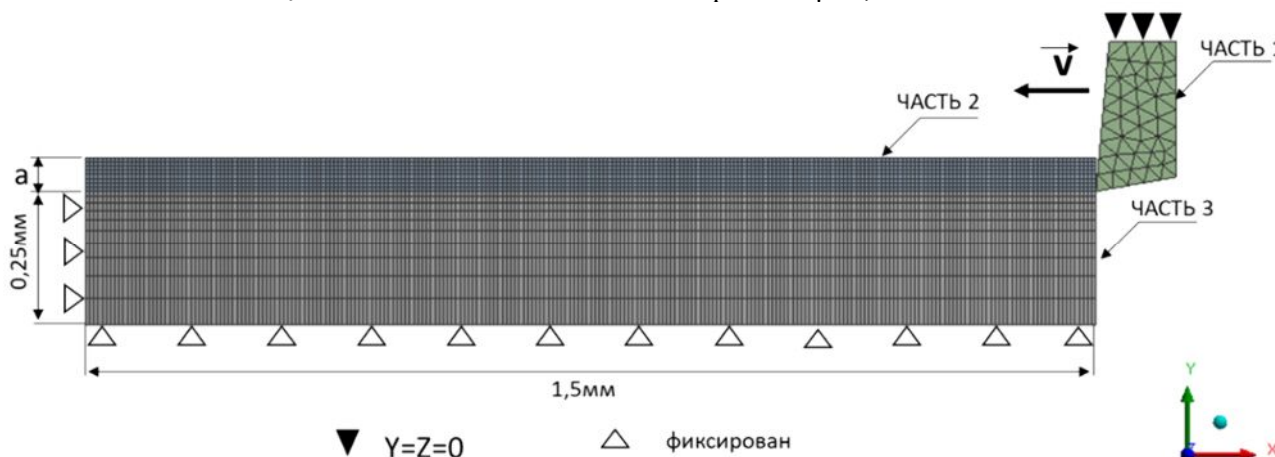


Рис. 3. Расчетная схема имитационной модели процесса резания

В процессе моделирования были получены следующие результаты: эквивалентное напряжение Мизеса (рис. 4), поле пластических деформаций в заготовке и инструменте (рис. 5) и тепловое поле в заготовке (рис. 6). Анализируя рис. 4, можно заметить, что максимальная величина напряжений концентрируется в узкой части, называемой плоскостью сдвига, эти результаты имеют хорошее совпадение с известными аналитическими моделями стружкообразования. На рис. 5 представлено поле пластических деформаций, также можно отметить, что максимальные значения деформации концентрируются в среза-

емом слое и стружке, при этом резец не деформируется, отчетливо просматриваются сегменты стружки, зона стружкообразования, переходной и заторможенный слой.

Рассмотрим тепловое поле рис.6, максимальную температуру 366°C имеет зона резания вблизи плоскости сдвига, тепловое поле сконцентрировано с узкой области, большая часть теплоты резания уносится со стружкой. При моделировании учитывался только тепловой поток, относящиеся к деформации материала без учета теплового потока от трения, поэтому экспериментальные данные имеют значения более высоких температур.

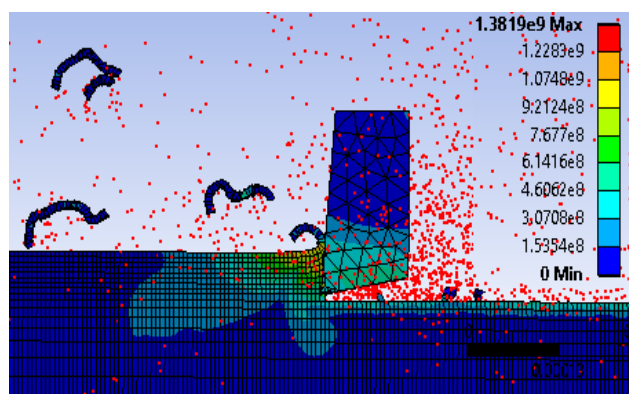


Рис. 4. Эквивалентное напряжение Мизеса

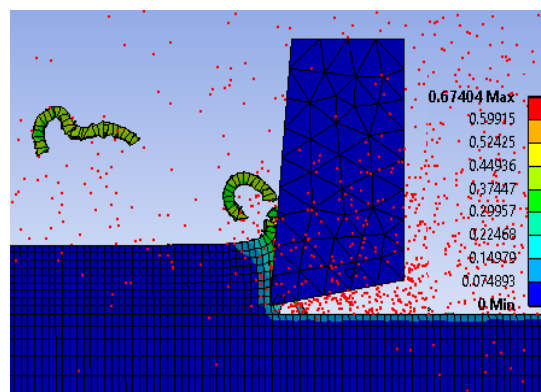


Рис. 5. Значения пластической деформации

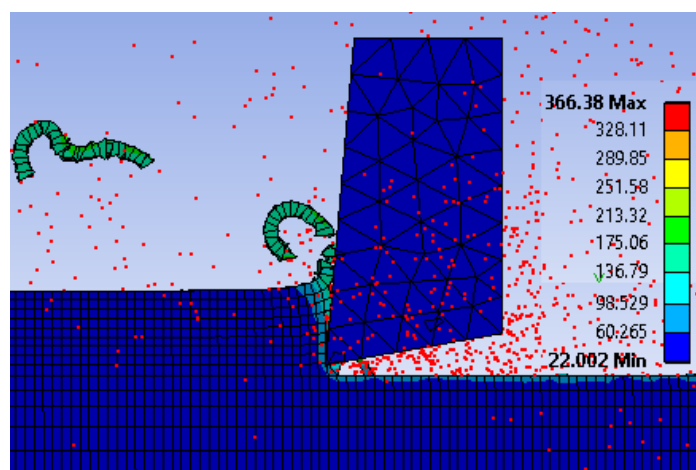


Рис. 6. Тепловое поле стружки, обрабатываемой поверхности и заготовки

Выводы. Моделирование процесса резания металла с применением программы Ansys Workbench и использование модели Джонсона-Кука для отображения пластической деформации и разрушения материала позволяет получить поля напряжений и деформаций обрабатываемого материала и инструмента, тепловое поле стружки и обрабатываемого изделия. Полученные результаты хорошо согласуются с известными в литературе данными, полученными экспериментально, а также не противоречат традиционным положениям теории резания. Предложенная методика моделирования позволяет исследовать напряженно-деформированное и тепловое состояние процесса резания, условия стружкообразования, прогнозировать параметры качества поверхностного слоя. Дальнейшее совершенствование методики моделирования будет направлено на проработку различных технологических условий резания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Корендясев Г.К. О Конечноэлементном моделировании процесса обработки металлов резанием (часть 1) // Вестник научно-технического развития. 2015. № 2. С. 14–24.
2. Корендясев Г.К. О Конечноэлементном моделировании процесса обработки металлов резанием (часть 2) // Вестник научно-технического развития. 2015. № 3. С. 14–24.
3. Дуюн Т.А., Гринек А.В. Математическое моделирование процессов механической обработки как средство управления технологическими параметрами на основе нейросетевых и нечетких моделей // Труды международной конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении», Севастополь – 2016. №3. С. 28–33.
4. Öpöz T., Chen X. Chip formation mechanism using finite element simulation // Journal of Mechanical Engineering. 2016. №1. Pp. 11.
5. Ozel T. The Influence of friction models on finite element simulations of machining // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2006. №1. Pp. 518–530.
6. Kushner V., Storchak M. Modelling the material resistance to cutting // International Journal of Mechanical Sciences. 2017. №1. Pp. 44–54.
7. Bhoyar Y.R., Kamble P.D. Finite element analysis on temperature distribution of turning process // International Journal of Modern Engineering Research (IJMER). 2013. №1. Pp. 541–546.
8. Соболев А.В., Радченко М.В. Использование модели пластичности Джонсона-Кука в численном моделировании бросковых испытаний контейнеров для транспортирования оят // Ядерная энергетика. № 3. 2016. С. 188–195.
9. Murugesan M., Jung D.W. Johnson Cook material and failure model parameters estimation of AISI-1045 medium carbon steel for metal forming applicatio // journal of materials. №1. 2019. Pp. 18.
10. Бузюркин А.Е., Гладкий И.Л., Краус Е.И. Определение параметров модели Джонсона-Кука для описания процессов деформирования и разрушения титановых сплавов // Прикладная механика и техническая физика. Т. 56. № 2. 2015. С. 82–93.
11. Wang K. Calibration of the Johnson-cook failure parameters as the chip separation criterion in the modelling of the orthogonal metal cutting process. 2016. Pp. 44–50.

Информация об авторах

Кхалифа Мона, аспирант кафедры технологии машиностроения. E-mail: kh.mona@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дуюн Татьяна Александровна, доктор технических наук, заведующий кафедрой технологии машиностроения. E-mail: tanduun@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в июле 2019 г.

© Кхалифа М., Дуюн Т.А. 2019

***Khalifa M., Dujun T.A.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46

*E-mail: kh.mona@yandex.ru

FINITE ELEMENT MODELING OF THE CUTTING PROCESS DURING MACHINING OF STRUCTURAL STEEL USING ANSYS WORKBENCH

Abstract. The technique of modeling the cutting process when sharpening structural steel (steel 45) is presented. The 3D finite element simulations of machining are conducted using commercial code ANSYS Workbench. For the simulation of plastic deformation and failure of the materials, a Johnson-Cook model is used as constitutive equation to describe behavior of material during cutting process. This model takes into account the effects of the kinematic hardening and adiabatic heating of the deformable material. To model separation of chip from the workpiece, the Johnson-Cook (J-C) damage criterion is used. In the suggested model, the value of feed is taken into account as the width of the strip of the workpiece for modeling workpiece. As a result of modeling, the stress and strain fields for both the workpiece and the tool are presented, as well as the thermal field of the chip and the machined piece. The results are compared and evaluated with the experimental results; they are similar and do not contradict the traditional theory of the metal cutting. The proposed method of modeling allows to study the stress-strain state and thermal distributions of the cutting process, chip formation conditions and prediction of the quality of finished surface.

Keywords: modeling of the cutting process, numerical methods, finite element method, Johnson-Cook Model.

REFERENCES

1. Korendyasev G.K. Finite element modeling of the metal cutting process (part 1) [O Konechno-elementnom modelirovanii protsessa obrabotki metallov rezaniyem (chast' 1)]. Bulletin of scientific and technical development. 2015. No. 2. Pp. 14–24. (rus)
2. Korendyasev G.K. Finite element modeling of the metal cutting process (part 2) [O Konechno-elementnom modelirovanii protsessa obrabotki metallov rezaniyem (chast' 2)]. Bulletin of scientific and technical development. 2015. No. 3. Pp. 14–24. (rus)
3. Dujun T.A., Grinek A.V. Mathematical modeling of machining processes as a means of controlling technological parameters based on neural network and fuzzy models [Matematicheskoye modelirovaniye protsessov mekhanicheskoy obrabotki kak sredstvo upravleniya tekhnologicheskimi parametrami na osnove neyrosetevykh i nechetkikh modeley]. Jobs of the international conference «modern direction and prospects for the development of technologies of processing and equipment in mechanical engineering», Sevastopol. 2016. No. 3. Pp. 28–33. (rus)
4. Öpöz T., Chen X. Chip formation mechanism using finite element simulation // Journal of Mechanical Engineering. 2016. No. 1. Pp. 11.
5. Ozel T. The influence of friction models on finite element simulations of machining // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2006. Pp. 518–530.
6. Kushner V., Storchak M. Modelling the material resistance to cutting // International Journal of Mechanical Sciences. 2017. No. 1. Pp. 44–54.
7. Bhoyar Y.R., Kamble P.D. Finite element analysis on temperature distribution of turning process // International Journal of Modern Engineering Research (IJMER). 2013. No. 1. Pp. 541–546.
8. Sobolev A.V., Radchenko M.V. Use of Johnson-Cook plasticity model for numerical simulations of throwing tests of containers for transporting OAT [Ispol'zovaniye modeli plastichnosti Dzhonsona-Kuka v chislennom modelirovanii broskovykh ispytaniy konteynerov dlya transportirovaniya oyat]. Nuclear energy. 2016. No. 3. Pp. 188–195. (rus)
9. Murugesan M., Jung D.W. Johnson Cook material and failure model parameters estimation of AISI-1045 medium carbon steel for metal forming application // Journal of materials. 2019. No. 1. Pp. 18.

10. Buzyurkin A.E., Gladky I.L., Kraus E.I. Determination of parameters of the Johnson-Cook model for the description of deformation and fracture of titanium alloys [Opredeleniye parametrov modeli Dzhonsona-Kuka dlya opisaniya protsessov deform-

irovaniya i razrusheniya titanovykh splavov]. Applied Mechanics and Technical Physics. 2015. Vol. 56. No. 2. Pp. 82–93. (rus)

11. Wang K. Calibration of the Johnson-cook failure parameters as the chip separation criterion in the modelling of the orthogonal metal cutting process. 2016. Pp. 44–50.

Information about the authors

Khalifa Mona, Graduate student. E-mail: kh.mona@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Duyun, Tatyana A. DSc, Professor. E-mail: tanduun@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in July 2019

Для цитирования:

Кхалифа М., Дуюн Т.А. Моделирование процесса резания конструкционной стали с использованием конечноэлементного пакета ANSYSWorkbench // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 11. С. 121–127. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-121-127

For citation:

Khalifa M, Dujun T.A. Finite element modeling of the cutting process during machining of structural steel using ansys workbench. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 11. Pp. 121–127. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-121-127

DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-128-138

Данилов А.В.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, дом 5, с. 1

E-mail: 157304@rambler.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЯ МЕТОДА «КОНЕЧНОГО ПОВОРОТА И СМЕЩЕНИЯ» НА ПРОХОЖДЕНИЕ МАНИПУЛЯЦИОННЫМ РОБОТОМ EUROPEAN ROBOTIC ARM СИНГУЛЯРНЫХ ТОЧЕК

Аннотация. Рассматривается моделирование испытания метода «конечного поворота и смещения» (МКПС) на прохождение через сингулярные точки манипуляционного робота (МР) European Robotic Arm (ERA). Моделированием испытания подтверждена работоспособность метода при прохождении сингулярных точек и показаны способы управления манипуляционным механизмом ERA при различных проявлениях сингулярности. В зависимости от вида проявления сингулярности управление манипуляционным механизмом в окрестности сингулярной точки осуществляется с помощью малых изменений его конфигурации или посредством ограничения и задания конкретных значений обобщенным координатам на программно-аппаратном уровне. Метод МКПС предназначен для решения обратной задачи кинематики (ОЗК) для манипуляционных механизмов последовательной структуры с произвольным числом звеньев, связанных кинематическими парами пятого класса. Метод основан на определении точных и оптимальных итерационных шагов, обеспечивающих максимальное приближение к заданным параметрам конечного звена, для каждой степени подвижности. По алгоритму метода разработано программное обеспечение, состоящее из подпрограмм для организации общего решения ОЗК и частного для конкретного манипуляционного механизма в виде исходных данных. Исходными данными являются векторная модель манипуляционного механизма, значения конструктивных ограничений обобщенных координат и признаки кинематических пар по виду и по классу.

Ключевые слова: метод «конечного поворота и смещения», манипулятор ERA, обратная задача кинематики, прохождение через сингулярные точки.

Введение. В настоящее время манипуляционные роботы (МР) находят широкое применение во всех отраслях промышленности. Их также используют в космосе и под водой. Для проведения технологических операций, не требующих особой точности, используется ручное управление по степеням подвижности от задающего манипулятора. В случае удаленного управления оператор использует камеру наблюдения. Такая организация работы не может обеспечить выполнения всё возрастающего перечня работ с повышенными требованиями к точности и скорости их выполнения. Современное управление манипуляционными механизмами (ММ) предполагает управление конечным звеном. Такое управление позволяет организовать программное движение конечного звена и обеспечить выполнение технологических операций с высокой точностью и скоростью. При таком управлении важной задачей является определение желаемых значений обобщенных координат звеньев манипулятора посредством решения ОЗК, а в случаях использования произвольных траекторий, формируемых автоматически от систем технического зрения и распознавания, добавляется задача прохождения ММ сингулярных точек.

Из всех популярных на сегодняшний день методов, а именно: FABRIK [1, 2], Cyclic Coordinate Descent (CCD) [3, 4, 5], Jacobian Transpose [6,

7], Jacobian DLS [8, 9], Jacobian SVD-DLS [10, 11], FTL [12], Триангуляция [13], метод МКПС не уступает самому быстрому эвристическому методу FABRIK и имеет более естественную настройку для конкретного МР [14, 15].

Цель статьи – показать прохождение сингулярных точек с помощью метода МКПС на примере космического МР ERA, установленного на российском модуле международной космической станции.

Краткое описание метода «конечного поворота и смещения». Метод МКПС геометрический, использует ортогональное преобразование векторов, основан на кинематических свойствах ММ последовательной структуры, а именно: пятый класс кинематической пары, вид соединения в паре (шарнир, призма), ориентация оси и звена в абсолютной системе координат в виде единичного вектора оси и вектора звена соответственно. Углы Эйлера-Крылова используются только для удобства задания ориентации конечного звена манипуляционного механизма МР при вводе/выводе. Точные и оптимальные итерационные шаги для максимально быстрого достижения заданных параметров положения и ориентации конечного звена в методе названы конечными. Для кинематической пары в виде призмы определяется конечное смещение для вектора соответствующего звена. В случае шарнира определяется конечный

угол поворота вектора соответствующего звена и всех векторов, следующих за ним согласно векторной модели ММ, показанной на рисунке 4 в общем виде, и алгоритму, изложенному в [15]. В методе используется ортогональное преобразование, которое является математической формой описания вращательного движения твердого тела. Операцию вращения можно выполнить с помощью кватерниона, который задает ортогональное преобразование своей векторной частью. Оно может быть рассмотрено как ортогональное преобразование в вещественном трехмерном пространстве. Если орты векторной части кватерниона формально совмещены с любым базисом трехмерного пространства, то ортогональное преобразование с помощью матрицы сложного поворота эквивалентно ортогональному преобразованию с помощью кватерниона. В методе для операций ортогонального преобразования векторов используется матрица сложного поворота.

В процессе решения ОЗК по алгоритму, изложенному в [15], выполнение условия

$$\sum_{i=1}^n |\Delta q_i| = 0$$

для каждого $i = 1, \dots, n$, где n – число степеней подвижности ММ, Δq_i – конечный угол/смещение для i -ой кинематической пары в виде шарнира/призмы согласно теоремам 1, 2 и 3 приведенным в [14], соответствует наличию сингулярной точки для данной конфигурации ММ, что в дальнейшем называется мониторингом сингулярных точек ММ. В этой точке итерационный процесс не приближает параметры конечного звена к заданным, и начинается проявление сингулярности в виде непредсказуемого вращения группы звеньев, или поворот соседних звеньев в непредсказуемую сторону при значении угла между ними равном 180° . Для продолжения решения ОЗК, в зависимости от вида проявления сингулярности, используются разные механизмы обхода. Для обхода сингулярности, связанной с углом между звеньями равным 180° , используется механизм изменения конфигурации путем прибавления заданного малого числа $\delta q_i > \varepsilon_{\text{зад}}$ ($\varepsilon_{\text{зад}}$ – заданная точность решения ОЗК) к обобщенной координате с заранее выбранным знаком для того, чтобы звенья поворачивались относительно друг друга в нужную сторону. Прохождение через сингулярные точки, вызывающие непредсказуемое вращение группы звеньев, обеспечивается «замораживанием» конкретных значений обобщенных координат или их управлением в окрестности влияния этих точек на движение звеньев ММ. После этого итерационный процесс продолжается до получения решения ОЗК согласно теоремам в [14] и алгоритму в [15]. Окон-

чательную формулу решения ОЗК для обобщенной координаты i -й степени подвижности можно записать в виде суммы:

$$q_i = q_{i0} + \sum_{j=1}^z \Delta q_{ij} + \sum_{k=1}^m \delta q_{ik},$$

где q_i – конечное значение i -й обобщенной координаты: $q_i = \theta_i$ для шарнира, $q_i = d_i$ для призмы;

q_{i0} – начальное значение i -й обобщенной координаты: $q_{i0} = \theta_{i0}$ для шарнира, $q_{i0} = d_{i0}$ для призмы;

Δq_{ij} – конечный угол/смещение для i -го шарнира/призмы и j -го номера конечного угла/смещения;

i – номер степени подвижности манипулятора $i = 1, 2, \dots, n$;

j – номер конечного угла/смещения для i -го шарнира/призмы;

n – число степеней подвижности схвата манипулятора;

$z = z_0 + z_1 + z_2 + \dots + z_m$ – общее число конечных поворотов и смещений;

z_0 – число конечных поворотов и смещений до точки сингулярности;

z_k – число конечных поворотов и смещений от k -ой сингулярности до $(k+1)$ -ой;

m – число сингулярных точек на пути решения ОЗК;

δq_{ik} – малые значения обобщенных координат, используемые для изменения конфигурации манипулятора при обходе k -ой сингулярной точки.

Рассматриваемый метод обладает следующими свойствами: однозначностью решения ОЗК, высокой скоростью решения ОЗК, универсальностью алгоритма по отношению к числу звеньев ММ, возможностью использовать вычислители малой мощности, линейной зависимостью времени решения ОЗК от числа звеньев ММ, что даёт возможность проектировать ММ произвольной конструкции, отвечающей оптимальной конфигурации для тех или иных требований.

Описание манипулятора ERA. Семистепенной МР ERA, показанный на рисунке 1, представляет собой симметричную манипуляционную цепь последовательной структуры с кинематическими парами пятого класса в виде шарниров, где основание и конечное звено могут меняться местами для перемещения в другую рабочую зону, используя специальные контактные площадки, размещенные на обслуживаемом объекте.

Модель и кинематическая схема манипуляционного механизма ERA показаны на рисунках 2, 3. Связь основания и конечного звена с осталь-

ной кинематической цепью позволяет её ориентировать по рысканию, тангажу и крену соответственно.

Для применения метода МКПС в решении ОЗК необходимо построить в прямоугольной декартовой системе координат $x_0y_0z_0$ нулевого звена математическую модель ММ, показанную в общем виде на рис. 4.

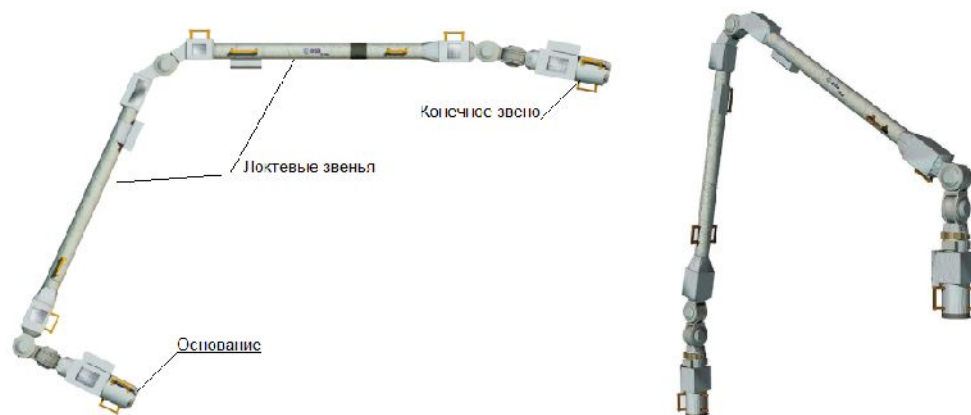


Рис. 1. Семистепенный манипуляционный робот ERA

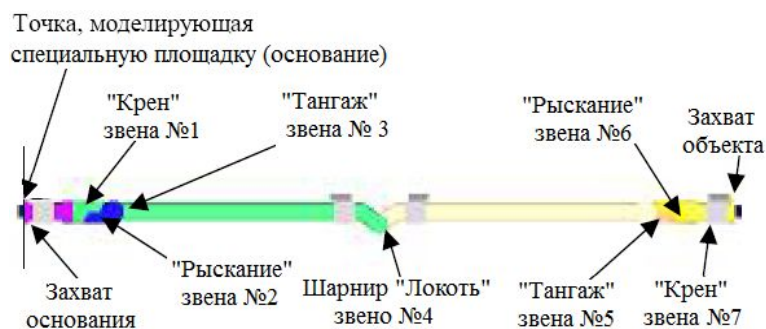


Рис. 2. Модель манипулятора ERA

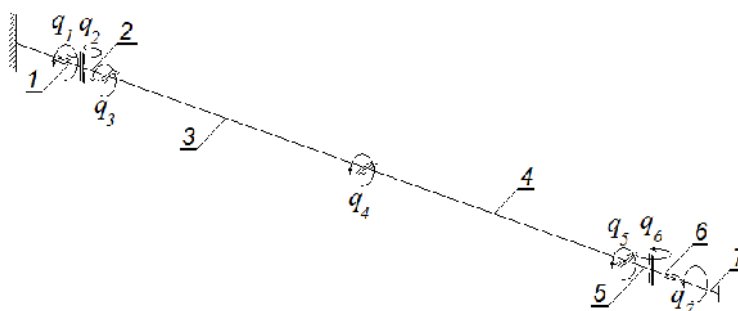
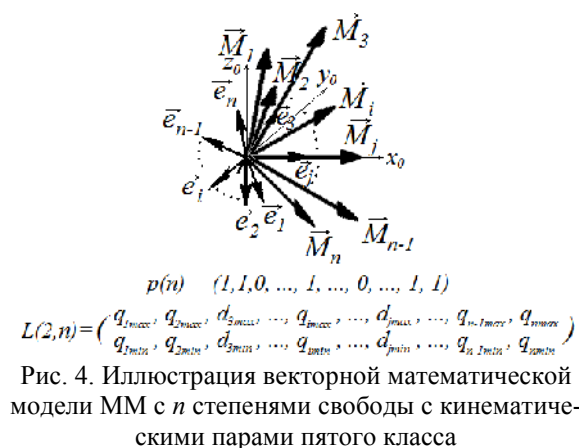


Рис. 3. Кинематическая схема манипулятора ERA



Для манипуляционного механизма ERA в прямоугольной декартовой системе координат $x_0y_0z_0$ нулевого звена построим с помощью векторов модель ММ, кинематическая схема которого показана на рисунке 3. Для определения звеньев ММ введем векторы $\vec{M}_i$, направленные вдоль каждого звена и равные по модулю длинам звеньев. Для определения ориентации осей кинематических пар введем единичные векторы $\vec{e}_i$, направленные вдоль осей шарниров кинематических пар. N – характерная точка схвата, $\vec{M}_7$ и $\vec{M}_y$ – векторы, указывающие текущую

ориентацию схвата, $\vec{E}_x$ и $\vec{E}_y$ – векторы, указывающие заданную ориентацию схвата. Признаки кинематических пар (1 – шарнир, 0 – призма) задаются массивом $p(n)$ в порядке очередности от

основания. Конструктивные ограничения в кинематических парах задаются массивом $L(2,n)$. Нижний индекс $i=1,...,n$, где $n=7$ – число звеньев ММ. Построенная таким образом векторная модель манипуляционного механизма ERA показана на рисунке 5.

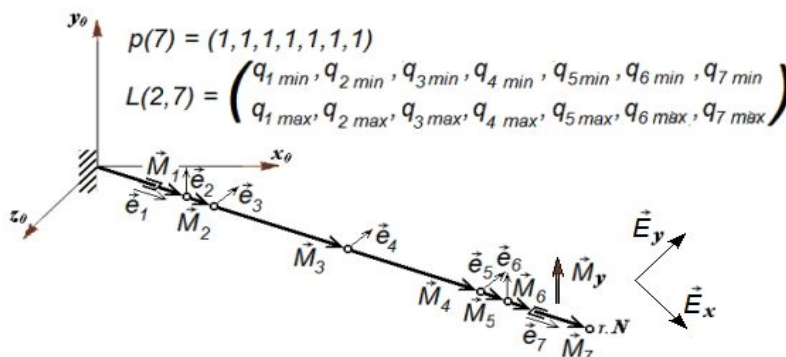


Рис. 5. Векторная математическая модель манипуляционного механизма ERA и необходимые массивы: $p(n)$ и $L(2,n)$

Моделирование испытания по прохождению сингулярных точек манипулятора ERA проводим с помощью разработанного программно-аппаратного комплекса, в состав которого входит программа решения ОЗК по методу МКПС, пакет Matlab/Simulink, программа визуализации ММ, программа выводов необходимых графиков и параметров движения ММ для анализа прохождения через сингулярные точки, рукоятка 3D Connexion Space Navigator и плата STM32F407G-DISC1 с микроконтроллером STM32F407VGT6 для определения времени решения ОЗК [16].

Моделирование испытания метода на прохождение через сингулярные точки манипуляционного робота ERA. Из сингулярных точек манипуляционного робота ERA отобраны три сингулярные точки с разным проявлением сингулярности, которые полностью отображают

характерные виды их проявления. Для подтверждения работоспособности метода МКПС проведено моделирование прохождения через эти точки модели манипуляционного робота ERA. Рассмотрим прохождение через эти точки по порядку.

Сингулярная точка №1. При движении конечного звена вдоль оси x_0 до построения локтевых звеньев в линию, ММ попадает в первую сингулярную точку, показанную на рисунке 6. Для прохождения через эту точку в методе предусмотрено изменение конфигурации манипулятора путем изменения обобщенных координат манипулятора на малые величины ($\delta q > \varepsilon_{\text{зад}}$) с заранее настроенными знаками для каждого шарнира. Это обеспечивает центральному шарниру, соединяющему локтевые звенья, в автоматическом режиме всегда сгибаться в нужную сторону.

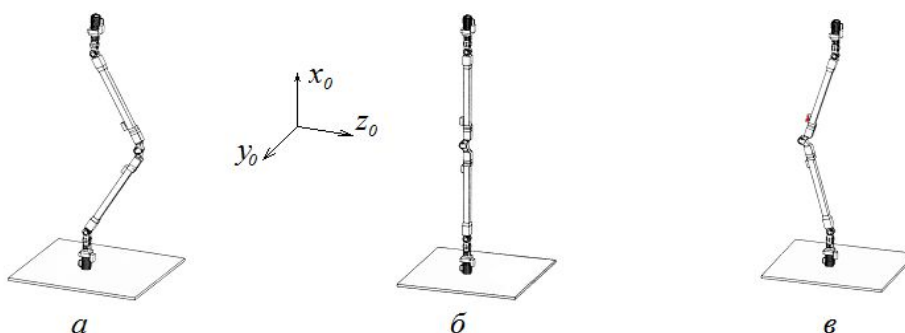


Рис. 6. Движение локтевых звеньев ММ через точку сингулярности:
а) движение вверх вдоль оси x_0 , б) точка сингулярности,
в) движение вниз вдоль оси x_0 .

Обобщенные координаты при прохождении первой сингулярной точки без обхода и с обходом сингулярности представлены на рисунках 7 и 8 соответственно в виде графиков.

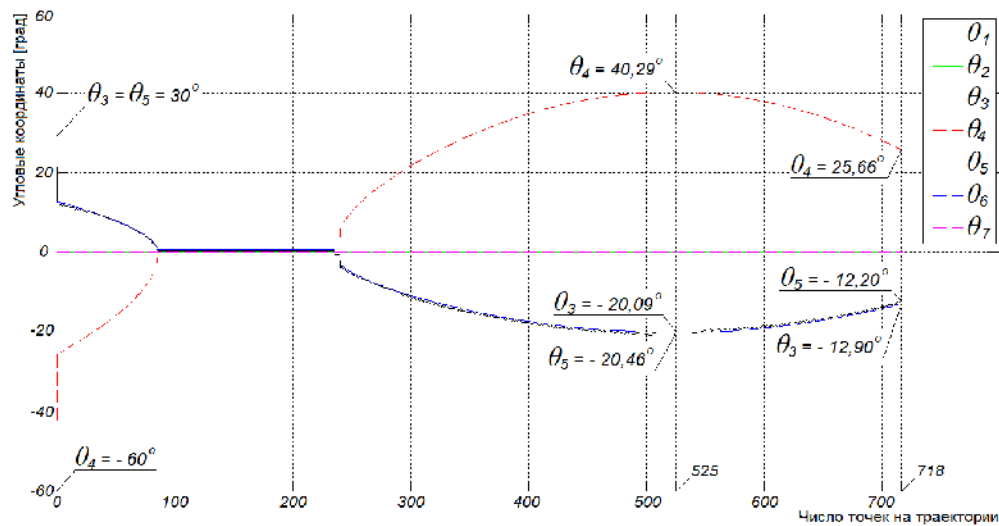


Рис. 7. Графики обобщенных координат при прохождении первой точки без обхода сингулярности

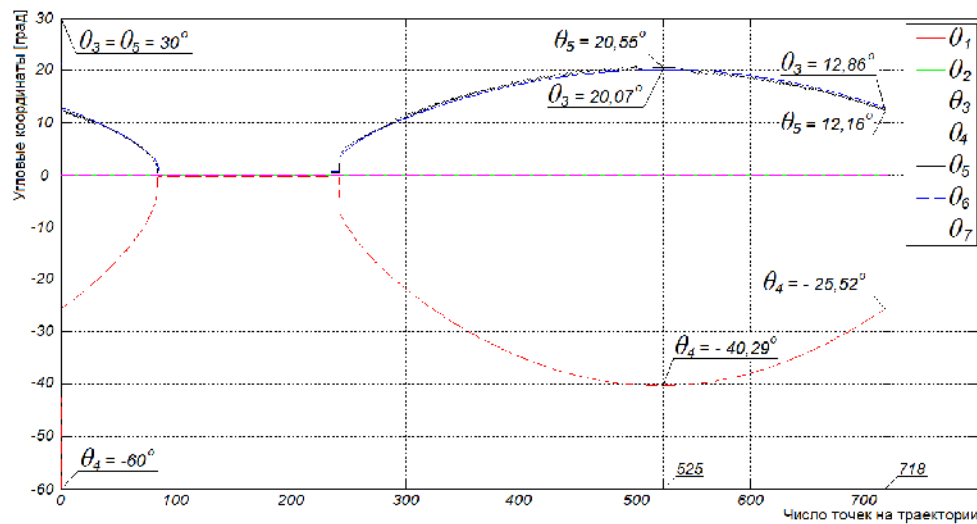


Рис. 8. Графики обобщенных координат при прохождении первой точки с обходом сингулярности

На рисунке 8 графики изменения обобщенных координат θ_3 , θ_4 , θ_5 , в отличие от графиков показанных на рисунке 7, находятся каждый в своем квадранте, что подтверждает движение локтевых звеньев в нужном направлении.

Сингулярная точка №2. При движении запястья снизу вверх параллельно оси y_0 ММ попадает во вторую сингулярную точку, показанную

на рисунке 9, в так называемый карданный замок. Прохождение через эту точку обеспечивается ограничением обобщенных координат $q_5 < 80^\circ$, $q_6 < 80^\circ$ или $q_1 = \text{Const}$, что предотвращает проявление сингулярной точки в шарнирах в виде быстрого вращения локтевых звеньев.

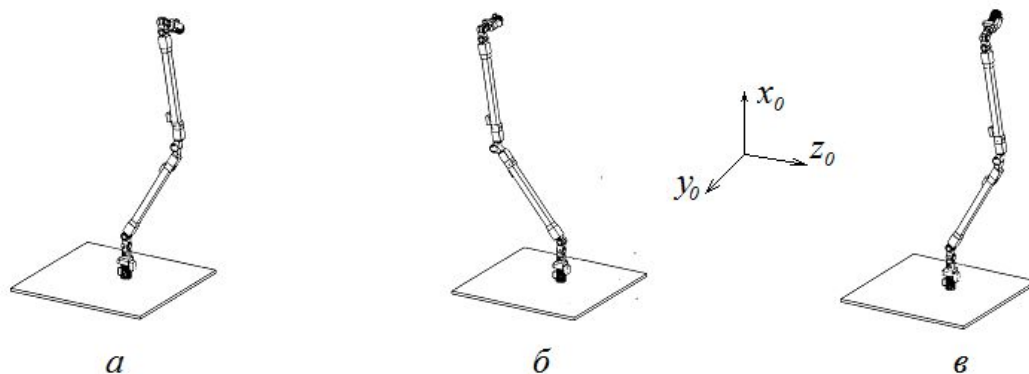


Рис. 9. Движение запястья ММ через точку сингулярности:
а) движение запястья параллельно оси y_0 до сингулярной точки,
б) точка сингулярности, в) движение запястья параллельно оси y_0 после сингулярной точки

Обобщенные координаты при прохождении второй сингулярной точки без обхода и с обходом сингулярности представлены на рисунках 10 и 11 соответственно в виде графиков.

Большие значения обобщенных координат на рисунке 10 означают проявление сингулярности вращением группы звеньев и суммированием углов, полученных при вращении.

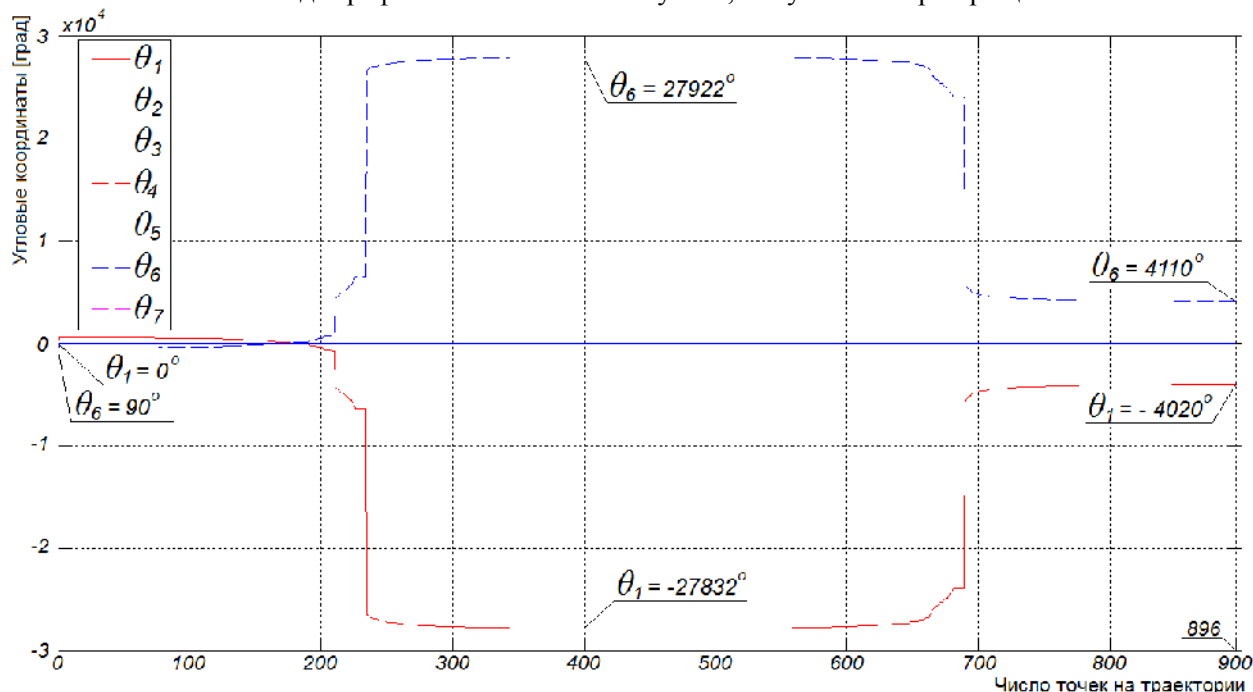


Рис. 10. Графики обобщенных координат при прохождении второй точки без обхода сингулярности

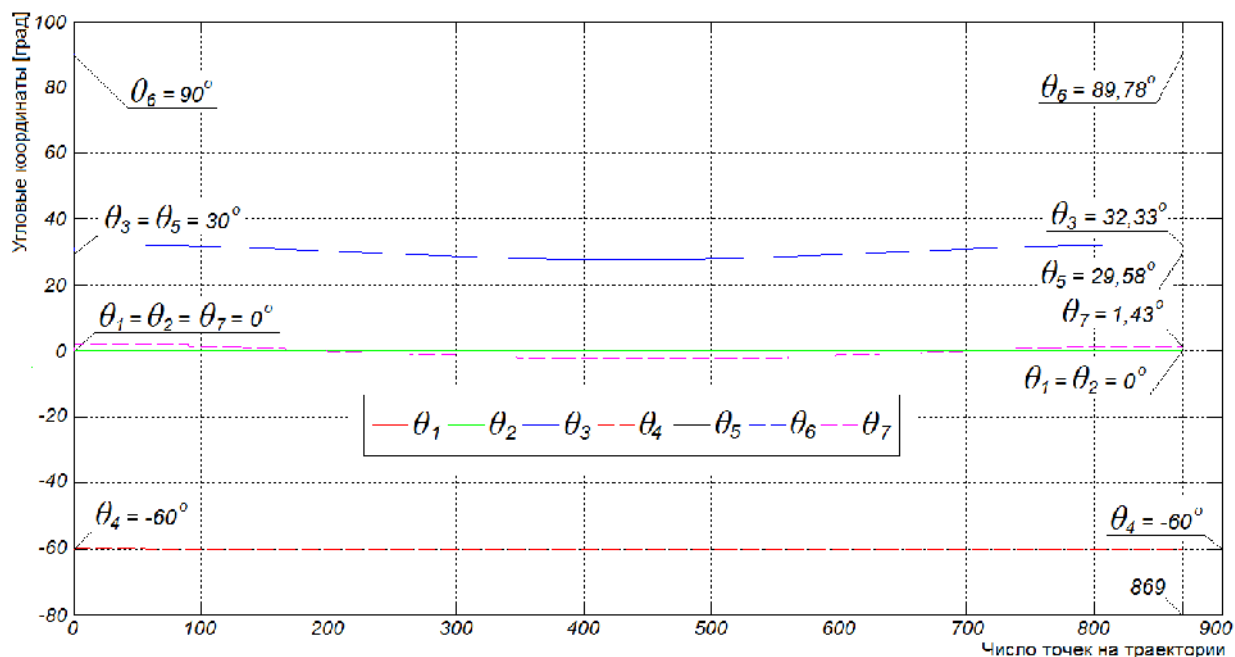


Рис. 11. Графики обобщенных координат при прохождении второй точки с обходом сингулярности

На рисунке 11 видим плавное изменение графиков обобщенных координат, которое соответствует и плавному движению звеньев ММ.

Сингулярная точка №3. При движении плеча ММ через окрестность точки на вертикальной линии (ось x_0) или вокруг неё, показанного на рисунке 12, звенья ММ 3 и 4 начинают синфазное движение вращения при движении схвата

по окружности. Так проявляет себя третья сингулярная точка.

Обобщенные координаты при прохождении третьей сингулярной точки без обхода и с обходом сингулярности представлены на рисунках 13 и 14 соответственно в виде графиков.

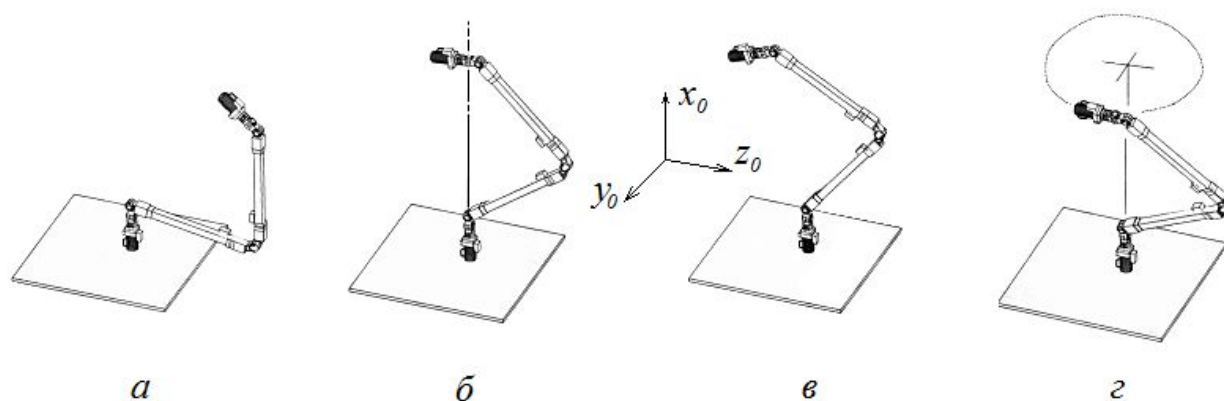


Рис. 12. Движение плеча ММ через точку сингулярности:

а) движение плеча назад, б) точка сингулярности, в) движение плеча вперед, г) движение плеча по окружности

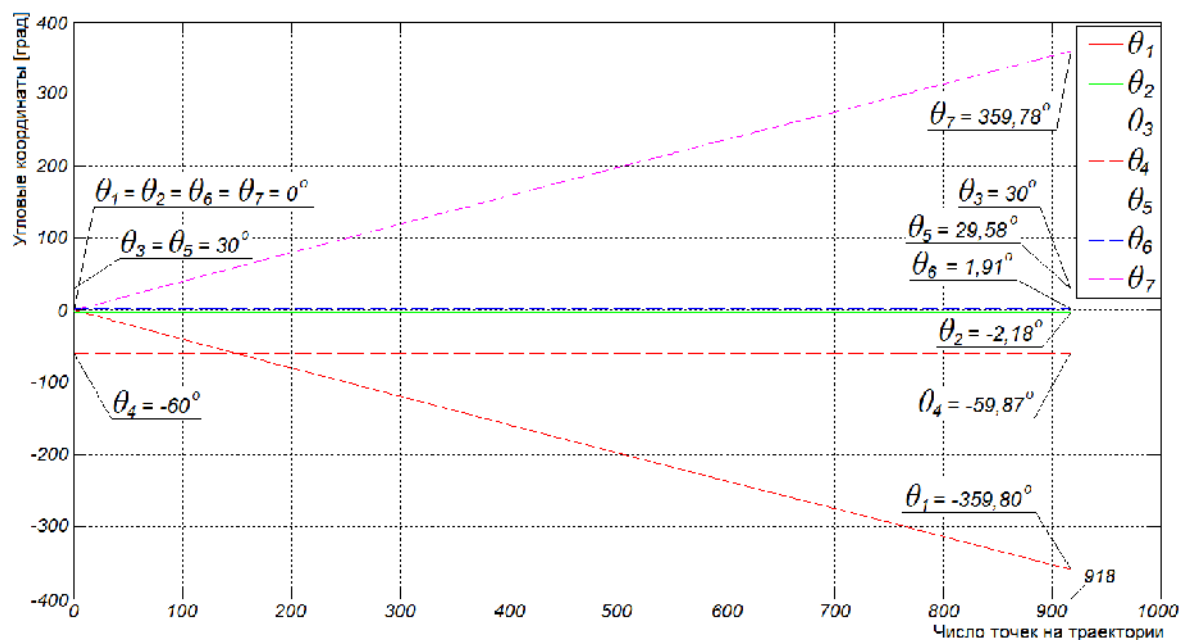


Рис. 13. Графики обобщенных координат при прохождении третьей точки без обхода сингулярности

На рисунке 13 линейное увеличение углов в противоположных шарнирах ММ происходит в результате вращения группы звеньев вокруг оси, проходящей в окрестности третьей сингулярной точки.

Прохождение через третью точку сингулярности обеспечивается ограничением обобщенных координат q_1 или q_7 путем задания конкретного значения. Так как это ограничение препятствует движению звеньев в зонах, где нет точек сингулярности, то имеет место временная фиксация указанных значений обобщенных координат при прохождении плеча через третью точку сингулярности. При использовании метода в режиме непосредственного управления можно легко организовать динамическую фиксацию обобщенных координат при прохождении сингулярных точек и исключить их проявление в виде быстрых

вращательных движений группы звеньев ММ, что и показано на рисунке 14.

Численные испытания метода проводились с помощью программного аппаратного комплекса (ПАК), включающего метод МКПС, путем прохождения через сингулярные точки, показанные на рисунках 6, 9 и 12 с выводом графиков обобщенных координат, показанных на рисунках 7, 8, 10, 11, 13, 14 и визуализацией движения звеньев ММ, показанных в [16]. Анализ графиков изменения обобщенных координат и просмотр визуализации движения звеньев манипуляционного механизма ERA подтверждают работоспособность метода при прохождении сингулярных точек.

Данное испытание показало, что в алгоритме метода предусмотрено прохождение сингулярных точек различного проявления. На примере

манипуляционного робота ERA показана визуализация прохождения сингулярных точек с механизмом обхода и без него. В качестве механизма обхода сингулярности в методе используются следующие внешние параметры метода: малые

приращения обобщенных координат с учетом знака, ограничения обобщенных координат в виде интервала значений или конкретного значения.

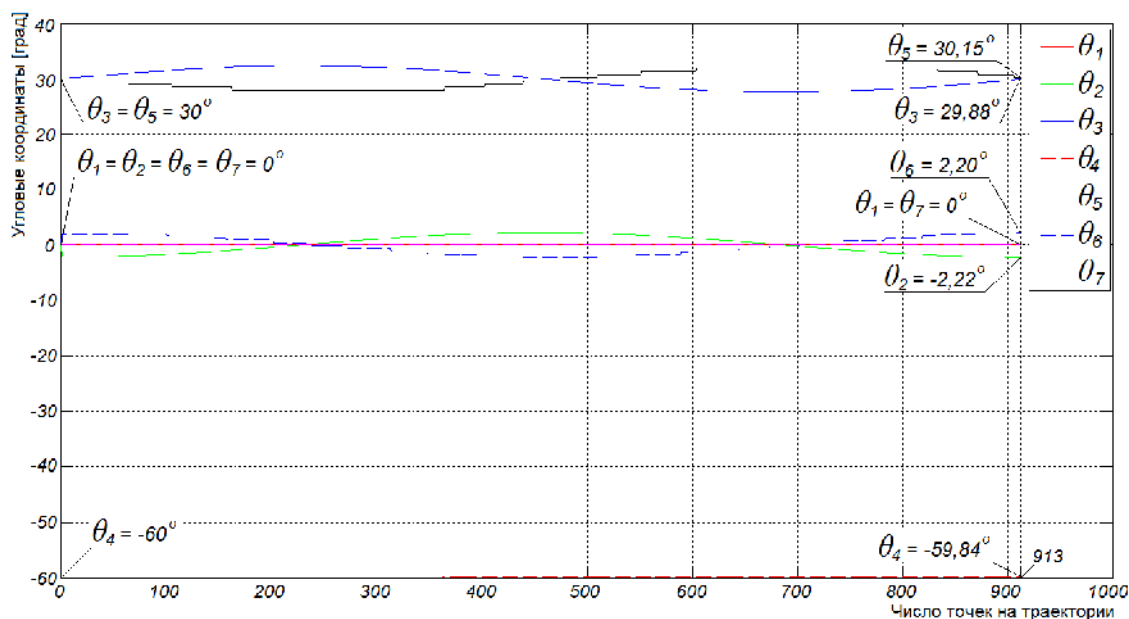


Рис. 14. Графики обобщенных координат при прохождении третьей точки с обходом сингулярности

В частности, для манипуляционного робота ERA при прохождении первой сингулярной точки (Elbow Reach Singularity), обобщенной координате центрального шарнира задается знак минус перед малым приращением δq , что всегда соответствует повороту колена в нужную сторону. Для прохождения через точки, аналогичные второй и третьей (Wrist Gimbal Lock and Shoulder Singularities), требуются ограничения части обобщенных координат в виде задания интервала значений или задания конкретных значений. Используемый механизм обхода сингулярности можно обеспечить на программном или программно-аппаратном уровне, не изменяя алгоритма метода при наличии дополнительных кнопок управления режимами изменения обобщенных координат звеньев манипулятора, например, фиксацией обобщенной координаты, или ограничением с помощью введения интервала значений. Можно учитывать существующий в алгоритме [15] мониторинг сингулярных точек, заключающийся в выполнении условия

$$\sum_{i=1}^n |\Delta q_i| = 0$$

, приведенного выше, в процессе решения ОЗК и автоматически включать и выключать механизм их обхода.

Выводы. Метод успешно прошел испытания на прохождение через сингулярные точки манипуляционного робота ERA. Моделированием подтверждена работоспособность исполь-

зуемых в методе механизмов прохождения сингулярных точек различного проявления. Определены возможности реализации механизмов обхода сингулярных точек с учетом существующего в алгоритме мониторинга сингулярных точек в процессе итерационного решения ОЗК. Все параметры для предотвращения различных влияний на движение звеньев при прохождении сингулярных точек являются внешними задающими параметрами для метода и поэтому при его применении могут быть включены в разработку системы управления на программно-аппаратном уровне или автоматически на программном уровне с учетом существующего мониторинга.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Aristidou A., Lasenby J. FABRIK: A fast, iterative solver for the Inverse Kinematics problem. *Graphical Models*. 2011. Vol. 73. Iss. 5. Pp. 243–260. doi: 10.1016/j.gmod.2011.05.003
2. Aristidou A., Lasenby J. Inverse Kinematics: a review of existing techniques and introduction of a new fast iterative solver. *Cambridge University Engineering Department (CUEDF-INFENG, TR-632)*. 2009. 60 p.
3. Canutescu A.A., Dunbrack Jr. R.L. Cyclic coordinate descent: A robotics algorithm for protein loop closure. *Protein Science*. 2003. Vol. 12, Iss. 5. Pp. 963–972. doi: 10.1110/ps.0242703
4. Wang L.-C.T., Chen C.C. A combined optimization method for solving the inverse kinematics

problems of mechanical manipulators. IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1991. Vol. 7 (4). Pp. 489–499. doi: 10.1109/70.86079

5. Welman C. Inverse kinematics and geometric constraints for articulated figure manipulation. Master Dissertation, Simon Fraser University, Department of Computer Science, 1993. 77 p.

6. Balestrino A., De Maria G., Sciavicco L. Robust control of robotic manipulators // IFAC Proceedings Series. 1985. Pp. 2435–2440.

7. Wolovich W.A., Elliott H. A computational technique for inverse kinematics. Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. 1984, Pp. 1359–1363.

8. Orin D., Schrader W. Efficient computation of the jacobian for robot manipulators. The International Journal of Robotics Research. 1984. Vol. 3, Iss. 4. Pp. 66–75. doi: 10.1177/027836498400300404

9. Wampler C. Manipulator inverse kinematic solutions based on vector formulations and damped least-squares methods. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 1986. Vol. 16, Iss. 1, Pp. 93–101. doi: 10.1109/TSMC.1986.289285

10. Baillieul J. Kinematic programming alternatives for redundant manipulators. Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1985. 1087234. Pp. 722–728. doi: 10.1109/ROBOT.1985.1087234

11. Buss S. Selectively damped least squares for inverse kinematics. Journal of Graphics Tools. 2005. Vol. 10(3). Pp. 37–49. DOI: 10.1080/2151237X.2005.10129202

12. Brown J., Latombe J.-C., Montgomery K. Realtime knot-tying simulation. The Visual Computer: International J. of Computer Graphics. 2004. Vol. 20 (2). Pp. 165–179.

13. Müller-Cajar R., Mukundan R. Triangulation: A new algorithm for inverse kinematics. Proceedings of Image and Vision Computing. 2007, December, Hamilton, New Zealand. Hamilton, 2007, Pp. 181–186. Режим доступа: <http://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/743>, Дата обращения 01.02.2016.

14. Данилов А.В. Кропотов А.Н., Трифонов О.В. Общий подход к решению обратной задачи кинематики для манипулятора последовательной структуры с помощью конечного поворота и смещения // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2018. № 81. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-81> (дата обращения: 20.02.2019)

15. Данилов А.В., Кропотов А.Н., Трифонов О.В. Применение метода конечного поворота и смещения для манипулятора последовательной структуры с кинематическими парами пятого класса // Препринты ИПМ им. Келдыша. 2018. № 107. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-107> (дата обращения: 20.02.2019)

16. Данилов А.В. Видеофайлы. Визуализация прохождения сингулярных точек манипулятора ERA [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.sasha-dan.ru/era.html (дата обращения: 20.02.2019)

Информация об авторах

Данилов Александр Владимирович, младший научный сотрудник НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: 157304@rambler.ru. Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет). Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, дом 5, с. 1.

Поступила в октябре 2019 г.

© Данилов А.В., 2019

Danilov A.V.

*Bauman Moscow State Technical University
Russia, 105005, Moscow, 2nd Baumanskaya st., 5/1.
E-mail: 157304@rambler.ru*

TEST SIMULATION OF «FINITE ROTATION AND DISPLACEMENT» METHOD BY THE EUROPEAN ROBOTIC ARM PASSING THROUGH THE SINGULAR POINTS

Abstract. The article consider the test simulation of the «finite rotation and displacement» method (FRDM) when the European Robotic Arm (ERA) manipulator is passing through the singular points. The test simulation confirms the method's efficiency when passing through singular points and shows how to control the manipulator with various manifestations of the singularity. Depending on the type of singularities manifestation the manipulator is controlled in the vicinity of the singular point by means of small changes in its configuration or by limiting and setting specific values to generalized coordinates at the software and hardware level. The

FRDM method is designed to solve the inverse kinematics (IK) for sequential-structure manipulators with an arbitrary number of links connected by fifth-class kinematic pairs. The method is based on determining the exact and optimal iterative steps that provide the maximum approximation to the given parameters of the final link for each degree of mobility. The software has been developed that consists of subprograms for organizing a general solution of the IK and a particular one for a particular manipulator in the form of source data according to the algorithm of the method. The initial data are the vector model of the manipulator, the values of the structural constraints of the generalized coordinates and signs of kinematic pairs by type and class.

Keywords: «finite rotation and displacement» method, ERA manipulator, inverse kinematics, passing through singular points.

REFERENCES

1. Aristidou A., Lasenby J. FABRIK: A fast, iterative solver for the Inverse Kinematics problem. *Graphical Models*. 2011. Vol. 73. Iss. 5. Pp. 243–260. doi: 10.1016/j.gmod.2011.05.003
2. Aristidou A., Lasenby J. Inverse Kinematics: a review of existing techniques and introduction of a new fast iterative solver. Cambridge University Engineering Department (CUEDF-INFENG, TR-632). 2009. 60 p.
3. Canutescu A.A., Dunbrack Jr. R.L. Cyclic coordinate descent: A robotics algorithm for protein loop closure. *Protein Science*. 2003. Vol. 12, Iss. 5. Pp. 963–972. doi: 10.1110/ps.0242703
4. Wang L.-C.T., Chen C.C. A combined optimization method for solving the inverse kinematics problems of mechanical manipulators. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1991. Vol. 7 (4). Pp. 489–499. doi: 10.1109/70.86079
5. Welman C. Inverse kinematics and geometric constraints for articulated figure manipulation. Master Dissertation, Simon Fraser University, Department of Computer Science, 1993. 77 p.
6. Balestrino A., De Maria G., Sciavicco L. Robust control of robotic manipulators // *IFAC Proceedings Series*. 1985. Pp. 2435–2440.
7. Wolovich W.A., Elliott H. A computational technique for inverse kinematics. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*. 1984, Pp. 1359–1363.
8. Orin D., Schrader W. Efficient computation of the jacobian for robot manipulators. *The International Journal of Robotics Research*. 1984. Vol. 3, Iss. 4. Pp. 66–75. doi: 10.1177/027836498400300404
9. Wampler C. Manipulator inverse kinematic solutions based on vector formulations and damped least-squares methods. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. 1986. Vol. 16, Iss. 1, Pp. 93–101. doi: 10.1109/TSMC.1986.289285
10. Baillieul J. Kinematic programming alternatives for redundant manipulators. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 1985. 1087234. Pp. 722–728. doi: 10.1109/ROBOT.1985.1087234
11. Buss S. Selectively damped least squares for inverse kinematics. *Journal of Graphics Tools*. 2005. Vol. 10(3). Pp. 37–49. DOI: 10.1080/2151237X.2005.10129202
12. Brown J., Latombe J.-C., Montgomery K. Realtime knot-tying simulation. *The Visual Computer: International J. of Computer Graphics*. 2004. Vol. 20 (2). Pp. 165–179.
13. Müller-Cajar R., Mukundan R. Triangulation: A new algorithm for inverse kinematics. *Proceedings of Image and Vision Computing*. 2007, December, Hamilton, New Zealand. Hamilton, 2007, Pp. 181–186. Access mode: <http://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/743>, date of access: 01.02.2016.
14. Danilov A.V., Kropotov A.N., Trifonov O.V. Obshchij podhod k resheniyu obratnoj zadachi kinematiki dlya manipulyatora posledovatel'noj struktury s pomoshch'yu konechnogo povorota i smeshcheniya [A general approach to solving the inverse kinematics problem for a serial structure manipulator using finite rotation and displacement]. *Preprinty IPM im. Keldysha*. 2018. No. 81. Access mode: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-81> (date of access: 02.20.2019). (rus)
15. Danilov A.V., Kropotov A.N., Trifonov O.V. Primenenie metoda konechnogo povorota i smeshcheniya dlya manipulyatora posledovatel'noj struktury s kinematcheskimi parami pyatogo klassa [Application of the finite rotation and displacement method for a sequential-structure manipulator with kinematic pairs of the fifth class]. *Preprinty IPM im. Keldysha*. 2018. No. 107. Access mode: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-107> (date of access: 02.20.2019). (rus)
16. Danilov A.V. Video files. Visualization of the passage of the singular points of the ERA manipulator [Videofajly. Vizualizaciya prohozhdeniya singulyarnyh toчек manipulyatora ERA]. Access mode: www.sasha-dan.ru/era.html (data obrashcheniya: 20.02.2019).

Information about the authors

Danilov, Alexander V. Junior Researcher. E-mail: 157304@rambler.ru. Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, Russia, 2-ya, 5/1 Baumanskaya str., Moscow Postcode, 105005, Russia.

Received in October 2019

Для цитирования:

Данилов А.В. Моделирование испытания метода «конечного поворота и смещения» на прохождение манипуляционным роботом European Robotic Arm сингулярных точек // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 11. С. 128–138. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-128-138

For citation:

Danilov A.V. Test simulation of «finite rotation and displacement» method by the European Robotic Arm passing through the singular points. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 11. Pp. 128–138. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-128-138

Научное издание

«Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова»
№ 11, 2019 г.

Научно-теоретический журнал

Координатор журнала
Алфимова Наталия Ивановна

Редактор журнала
Агеева Марина Сергеевна

Компьютерная верстка
Яшкина Светлана Юрьевна

Перевод на английский язык
Колесник Оксана Юрьевна

Учредитель журнала – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»
(БГТУ им. В.Г. Шухова)

Журнал зарегистрирован Министерством РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовой информации ПИ №ФС77-26533

Подписано в печать 25.11.19. Формат 60×84/8

Усл. печ. л. 16,04. Уч.-изд. л. 17,25

Тираж 40 экз. Заказ 194. Цена договорная.

Все публикуемые материалы представлены в авторской редакции.

Адрес редакции: г. Белгород, ул. Костюкова, 46, оф. 724/4 Гк.

Номер сверстан в редакции научно-теоретического журнала
«Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова».

Отпечатано в РИЦ БГТУ им. В.Г. Шухова