



Т. А. НИЗИНА
Д. И. КОРОВКИН
А. С. БАЛЫКОВ
В. В. ВОЛОДИН

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ УПРУГО-ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДИФИЦИРОВАННЫХ И НЕМОДИФИЦИРОВАННЫХ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ ВЛАЖНОСТНОГО СОСТОЯНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ ИСПЫТАНИЙ

**ANALYSIS OF CHANGES IN THE ELASTIC-STRENGTH CHARACTERISTICS OF MODIFIED
AND UNMODIFIED FINE-GRAINED CONCRETES DEPENDING ON THEIR WET STATE
AND TEST TEMPERATURE**

На примере модифицированных и немодифицированных цементных композитов изучено влияние температурно-влажностных эксплуатационных факторов на прочностные показатели мелкозернистых бетонов. Выявлено, что для немодифицированного бетона варьирование температуры испытаний приводит к существенному изменению прочностных показателей цементных композитов, повышаясь (с учетом их влагосодержания) при испытаниях на изгиб и сжатие в области отрицательных температур. Наибольшее повышение упруго-прочностных показателей наблюдается у влагонасыщенных образцов. Для образцов в сухом состоянии изменение прочностной характеристики при сжатии с понижением температуры с +40 до -40 °C составляет 17 %, на растяжение при изгибе – 22 %. По результатам исследований установлено, что для модифицированных высокопрочного и дисперсно-армированного бетонов наблюдается значительное повышение предела прочности на растяжение при изгибе на всем диапазоне исследуемых температур для водонасыщенных образцов по сравнению с образцами в сухом и равновесно-влажностном состоянии. Существенные различия в характере влияния температуры испытания и влажностного состояния на изменение физико-механических характеристик модифицированных и немодифицированных цементных бетонов объясняются, в первую очередь, различиями в их структуре и, как следствие, видом содержащейся влаги. В частности, в структуре модифицированных композитов преобладает адсорбционная и кристаллизационно-связанная вода, отличающаяся высокой энергией связи, а в структуре «традиционного» бетона присутствует большое количество капиллярно-насыщенной и свободной воды, которая слабо связана с твердой фазой немодифицированных композитов.

Using the example of unmodified and modified cement composites, the effect of temperature and humidity operating factors on the strength characteristics of fine-grained concretes was studied. It was revealed that for unmodified concrete, varying the test temperature leads to a significant change in the strength characteristics of cement composites, increasing (taking into account their moisture content) during bending and compression tests in the region of negative temperatures. The greatest increase in the elastic strength characteristics is observed in moisture-saturated samples. For samples in the dry state, the change in the strength characteristics under compression with a decrease in temperature from +40 to -40 °C is 17 %, and 22 % for bending stretching. According to the research results, it has been established that for modified high-strength and dispersion-reinforced concrete there is a significant increase in tensile strength in bending throughout the entire range of temperatures studied for water-saturated samples compared to samples in a dry and equilibrium-moisture state. These differences in the nature of the influence of the test temperature and the moisture content of the samples on the change in the physicomachanical characteristics of the modified and unmodified concretes are explained by the difference in the structure and the type of moisture contained in them. In particular, the structure of modified composites is dominated by adsorption and crystallization-related water, characterized by high binding energy, and in the structure of “traditional” concrete there is a large amount of capillary-saturated and free water, which is weakly associated with the solid phase of unmodified composites.

Ключевые слова: мелкозернистый бетон, полифункциональные добавки, температурно-влажностный режим, трещиностойкость, эффект Ребиндера

Технологии изготовления бетона в современном мире постоянно развиваются. За последние 25 лет созданы бетоны нового поколения с прочностью при сжатии 150 – 200 МПа и более, которые возможно производить на современных бетонных заводах в промышленных масштабах [1]. Помимо традиционной рецептуры мелкозернистого бетона (цемент – песок – вода), одним из приоритетных направлений мирового бетоноведения является использование высокопрочных и ультравысокопрочных цементных бетонов, так называемых High-Strength Concretes (HSC) и Ultra-High-Strength Concretes (UHSC), отличительными особенностями которых являются более высокая дисперсность зернистых компонентов, повышенные значения площадей поверхности раздела фаз, существенно увеличенное число физических и физико-химических контактов в единице объема материала, возросшая плотность, преобладание мелко- и скрытокристаллических сростков новообразований [2, 3].

Особую роль в многокомпонентном составе высокопрочного цементного бетона имеет применение высокоактивных добавок-разжижителей, в том числе суперпластификаторов IV поколения. Это ПАВ-пластификаторы (поверхностно-активные вещества) на основе поликарбоксилатов и акрилатов, обеспечивающих возможность значительного снижения водоцементного отношения и водопотребности бетонных смесей (до 35–40 %), что обеспечивает улучшенные упруго-прочностные характеристики [3].

Авторы работ [4, 5] отмечают, что вследствие особенностей строения высокотехнологичные многокомпонентные бетоны могут быть потенциально более неравновесными и активными по отношению к воздействиям среды в отличие от традиционных трех-четырехкомпонентных бетонов. Особенно это касается температурно-влажностного воздействия в природных климатических условиях, поскольку при постоянных колебаниях температуры и влажности воздуха нарушается формирование структуры композита, происходит интенсивная гидратация и обезвоживание бетона. В результате снижается его прочность и модуль упругости, возрастают деформации усадки и ползучести. Значительный перепад температуры в течение суток также вызывает неравномерное распределение температурных деформаций и напряжений по сечениям бетона, что сказывается на снижении их трещиностойкости, несущей способности и жесткости,

Keywords: fine-grained concrete, polyfunctional additives, temperature and humidity conditions, crack resistance, Rehbinder's effect

а в целом и на эксплуатационной надежности [2, 4–8].

Из этого следует, что анализ изменения упруго-прочностных характеристик мелкозернистых цементных бетонов различных видов (начиная от «традиционных» трехкомпонентных и заканчивая высокофункциональными бетонами и фибробетонами) с учетом комплексного влияния рецептуры композитов и эксплуатационных температурно-влажностных факторов является актуальной задачей.

Для проведения экспериментальных исследований, основываясь не предыдущих работах, были выбраны следующие три вида мелкозернистых бетонов [3, 9–11]:

– «традиционный» трехкомпонентный бетон (состав № 1). В качестве вяжущего использовался портландцемент со шлаком класса ЦЕМ II/A-III 42,5Н производства «Азия Цемент» Никольского района Пензенской области. Его активность на стандартном вольском песке на момент испытаний составляла 47,9 МПа; мелкозернистый заполнитель – природный кварцевый песок Новостепановского карьера (п. Смольный, Ичалковский район, Республика Мордовия) с размером зерна менее 5 мм – 75 % от массы твердой фазы; водоцементное отношение 0,4;

– фибробетон (состав № 2). В качестве вяжущего использовался портландцемент со шлаком класса ЦЕМ II/A-III 42,5Н производства «Азия Цемент» Никольского района Пензенской области; мелкозернистый заполнитель – природный кварцевый песок Новостепановского карьера с размером зерна менее 5 мм – 63,4 % от массы твердой фазы; микрокремнезем конденсированный неуплотненный (МК-85) – 11 % от массы вяжущего; полипропиленовое мультифиламентное волокно – 0,62 % от массы вяжущего; суперпластификатор Melflux 6681 F – 1 % от массы вяжущего; водоцементное отношение 0,33;

– высокопрочный бетон (состав № 3). В качестве вяжущего использовался портландцемент класса ЦЕМ I 42,5Б производства ПАО «Мордовцемент»; мелкозернистый заполнитель – природный кварцевый песок Новостепановского карьера с размером зерна менее 0,63 мм – 49 % от массы твердой фазы; микрокальцит (МКМ) – 45 % от массы вяжущего; МК-85 – 11 % от массы вяжущего; суперпластификатор Melflux 6681 F – 1 % от массы вяжущего; водоцементное отношение 0,318.

Экспериментальные исследования проводились на образцах в виде призм с размерами

40×40×160 мм. После твердения в нормальных условиях в течение 28 суток образцы были разделены на три группы (по 90 образцов). Первая группа образцов высушивалась до постоянной массы в течение 14 суток при температуре 105 °С, вторая – выдерживалась этот же временной промежуток в нормальных лабораторных условиях (температура воздуха 20 ± 3 °С, влажность – 50 ± 5 %), третья – помещалась в воду для насыщения до постоянной массы.

Прочностные характеристики (предел прочности при сжатии и на растяжение при изгибе) определялись на установке WilleGeotechnik® (модель 13PD/401) для испытания строительных материалов [12]. Наличие климатической камеры в указанном прессе позволяет регулировать влажность (от 10 до 96 %) и температуру (от - 40 до + 100 °С) среды испытания. Фиксация полученных в ходе эксперимента результатов и настройка параметров среды испытания осуществлялись с применением программного обеспечения GEOSYS 8.7.8. Полученные результаты экспериментального исследования обрабатывались с помощью методов статистического анализа.

При проведении экспериментальных исследований варьируемыми факторами являлись: температура испытаний (-40, -20, 0, +20, +40 °С), влажностное состояние образцов (сухое, равновесно-влажностное, влагонасыщенное) и вид мелкозернистого бетона («традиционный» трехкомпонентный, фибробетон и высокопрочный бетон). Для того чтобы избежать возникновения внутренних напряжений в образцах из-за резких перепадов температуры, композиты перед испытанием помещали в климатическую камеру и устанавливали требуемую для испытания температуру, а также относительную влажность (10, 50 или 90 %). После достижения требуемого уровня климатических факторов композиты дополнительно выдерживались в камере еще в течение часа.

По результатам проведенных исследований установлено (рис. 1), что при испытании «традиционного» трехкомпонентного бетона в диапазоне отрицательных температур отмечается заметный прирост прочностных показателей с увеличением влагосодержания бетонных образцов. Предел прочности влагонасыщенных образцов (с содержанием влаги около 6,32 %) на растяжение при изгибе при - 40 °С, соответственно, на 91 и 71 % выше, чем у образцов в сухом и равновесно-влажностном состоянии (с содержанием влаги 2,06 %). Подобное явление в первую очередь связано с образованием в структуре бетона криофазы, вследствие чего сопротивлению развития трещины препятствует не только сам материал, но и образовав-

шийся в порах лед. Упрочнение происходит за счет затрат дополнительной энергии на разрушение и деформирование ледяных включений, отрыв льда от твердой фазы и т. д. [8, 13]. Кривые изменения прочностных показателей мелкозернистого бетона при воздействии сжимающих нагрузок при температуре испытаний -40 и -20 °С носят подобный характер, однако повышение прочностных показателей происходит, соответственно, всего на 20 и 16 %.

Напротив, при испытании цементных композитов при нулевой и положительных температурах наблюдается снижение прочностных показателей с повышением содержания влаги в бетонных образцах (см. рис. 1). Для равновесно-влажностных и влагонасыщенных цементных композитов увеличение температуры способствует усилению эффекта падения прочности, так как из-за снижения вязкости жидкости и облегчения условий смачивания вода, являющаяся адсорбирующим веществом, быстрее проникает к поверхности разрушения в момент образования трещин.

Стоит отметить, что композиты в сухом состоянии гораздо меньше подвержены воздействию температурного режима – прочностные показатели практически не изменяются на всем диапазоне исследуемых температур (см. рис. 1). Повышение прочности сухих образцов как при сжатии, так и на растяжение при изгибе с понижением температуры с + 40 до - 40 °С составляет, соответственно, всего 17 и 22 %.

При введении в состав цементного композита микрокремнезема конденсированного неуплотненного и суперпластификатора на поликарбоксилатной основе наблюдается значительное повышение предела прочности на растяжение при изгибе для влагонасыщенных образцов по сравнению с образцами в сухом и равновесно-влажностном состоянии. В частности, повышение влажности фибробетона (состав № 2) с 2,38 до 3,76 % приводит к увеличению прочностных показателей для всех исследуемых температур (в ряду от + 40 до - 40 °С) от 1,8 до 2,25 раза (рис. 2, а). Для высокопрочного бетона аналогичный прирост предела прочности на растяжение при изгибе (в 1,8–2,3 раза) наблюдается при повышении влагосодержания образцов с 1,97 до 2,24 % (рис. 3, а).

Более низкие значения прочностных показателей при изгибе для образцов в равновесно-влажностном и сухом состоянии, на наш взгляд, объясняются пересушиванием поверхности композитов, возникновением неравновесного температурно-влажностного состояния во внутренних и наружных слоях образцов и, как следствие, появлением в их поверхностных слоях дополнительных растягивающих напряжений.

Существенное различие в характере кривых изменения предела прочности на растяжение при изгибе трех исследуемых видов бетона, испытанных в интервале температур от 0 до 40 °С, предположительно объясняется различием в структуре модифицированных и немодифицированных композитов и, как следствие, различным соотношением содержащейся в образцах видов влаги. В частности, в структуре модифицированных мелкозернистых бетонов составов № 2 и 3 преобладает адсорбционная

и кристаллизационно-связанная вода, отличающаяся высокой энергией связи со структурой. Напротив, в образцах состава № 1 присутствует большое количество капиллярно-насыщенной и свободной воды, которая слабо связана с твердой фазой немодифицированных композитов.

При высушивании образцов «традиционного» трехкомпонентного бетона в сушильном шкафу при температуре 105 °С наблюдается значительное испарение свободной внутренней влаги из всего объема композита. При

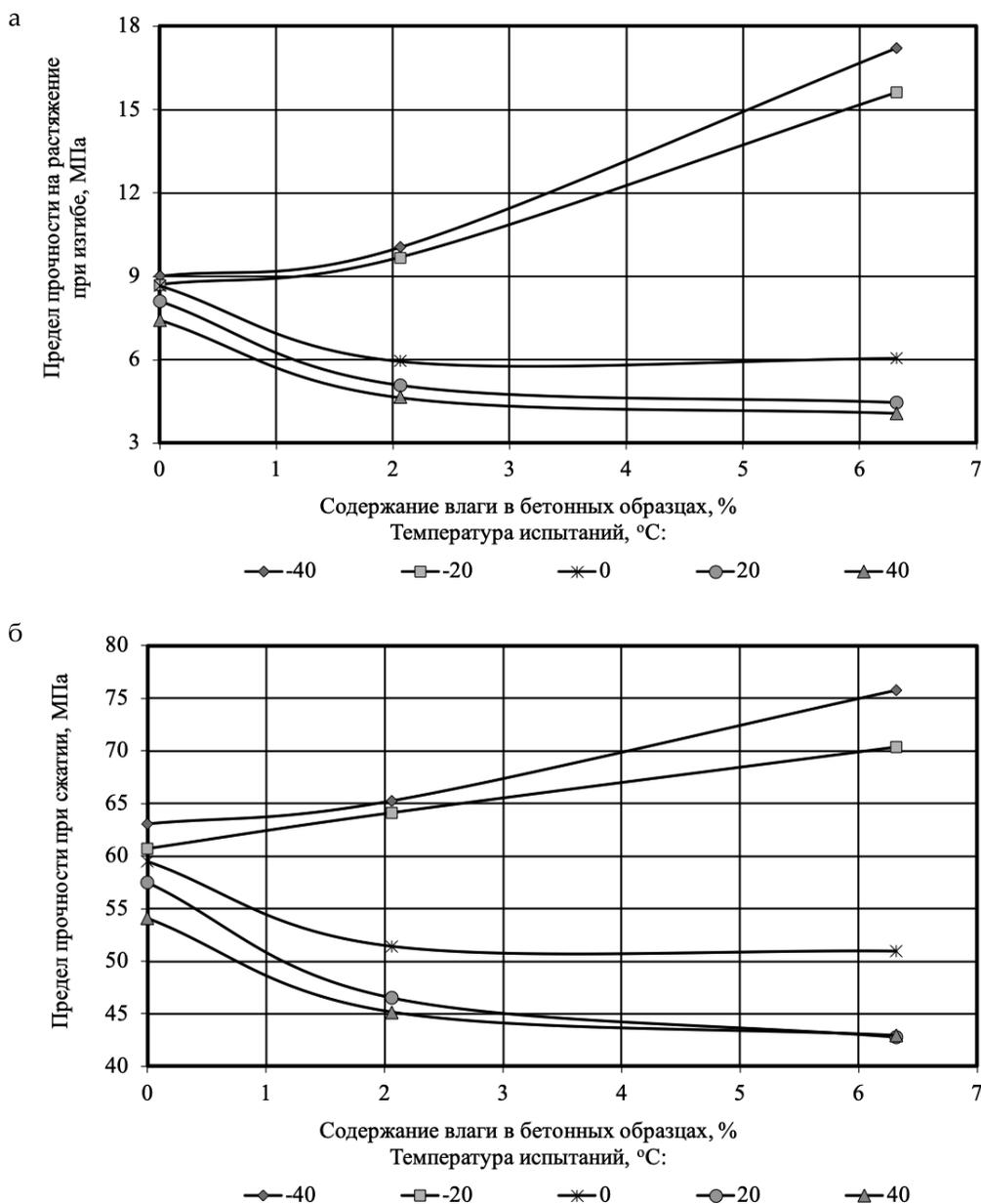


Рис. 1. Изменение предела прочности на растяжение при изгибе (а) и сжатии (б) цементных композитов «традиционного» трехкомпонентного бетона (состав № 1) в зависимости от температуры испытаний и влажностного состояния

этом происходит выравнивание температурно-влажностного состояния по объему бетона, что предотвращает возникновение концентраций растягивающих напряжений в поверхностных слоях, обуславливающих падение предела прочности при изгибе с уменьшением влажности образцов в модифицированных композициях составов № 2 и 3.

Анализ изменения предела прочности при сжатии высокопрочного бетона и фибробетона в зависимости от температурно-влажност-

ных условий показал (рис. 2, б; 3, б), что прочность влагонасыщенных образцов на 5–20 % ниже, чем у сухих и равновесно-влажностных на всем диапазоне температур (рис. 2, б; 3, б). Это объясняется тем, что при введении в состав ультрадисперсного микрокремнезема и суперпластификатора, позволяющего снизить водосодержание бетонных смесей при сохранении высокого уровня их удобоукладываемости, в структуре бетона увеличивается количество наноразмерных пор. При этом сила связи

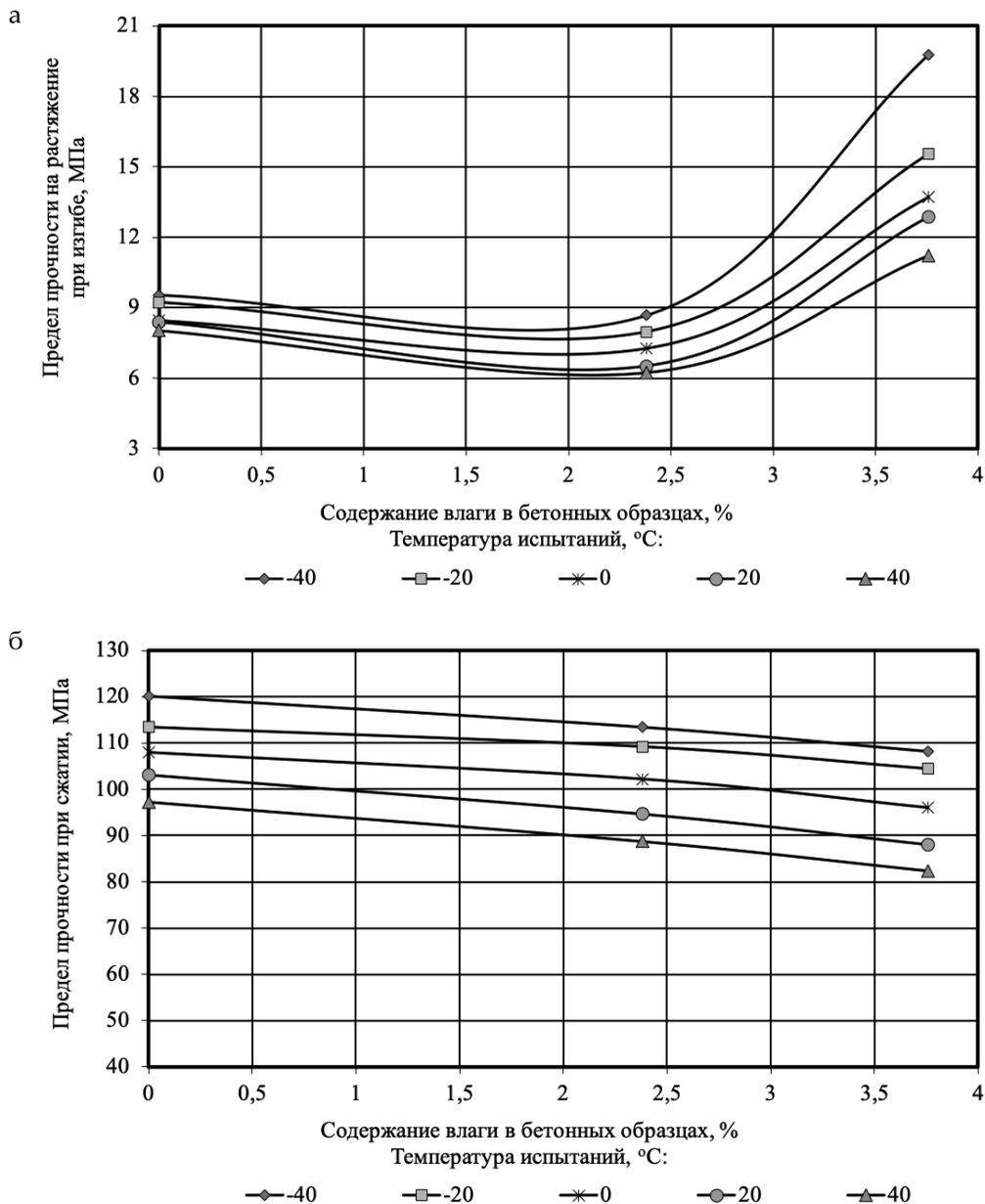


Рис. 2. Изменение предела прочности на растяжение при изгибе (а) и сжатии (б) цементных композитов фибробетона (состав № 2) в зависимости от температуры испытаний и влажностного состояния

структуры с водой в порах такого размера настолько высока, что вода в них не замерзает в исследуемом диапазоне отрицательных температур и не принимает на себя часть нагрузки, как у состава № 1.

Падение предела прочности при сжатии для фибробетона (состав № 2) в диапазоне температур от -40 до +40 °С в цементных композитах составляет для сухих образцов 19 %, для равномерно-влажностных – 22 %, для влагонасыщенных – 24 % (рис. 2, б). Для высокопрочного

бетона падение предела прочности составляет, соответственно, для сухих, равномерно-влажностных и влагонасыщенных – 15, 16 и 18 % (рис. 3, б).

Несколько меньшее падение прочностных показателей высокопрочного бетона состава № 3 при увеличении температуры с - 40 до + 40 °С по сравнению с дисперсно-армированным композитом № 2 объясняется, на наш взгляд, рядом рецептурно-технологических отличий – сниженным водосодержанием при

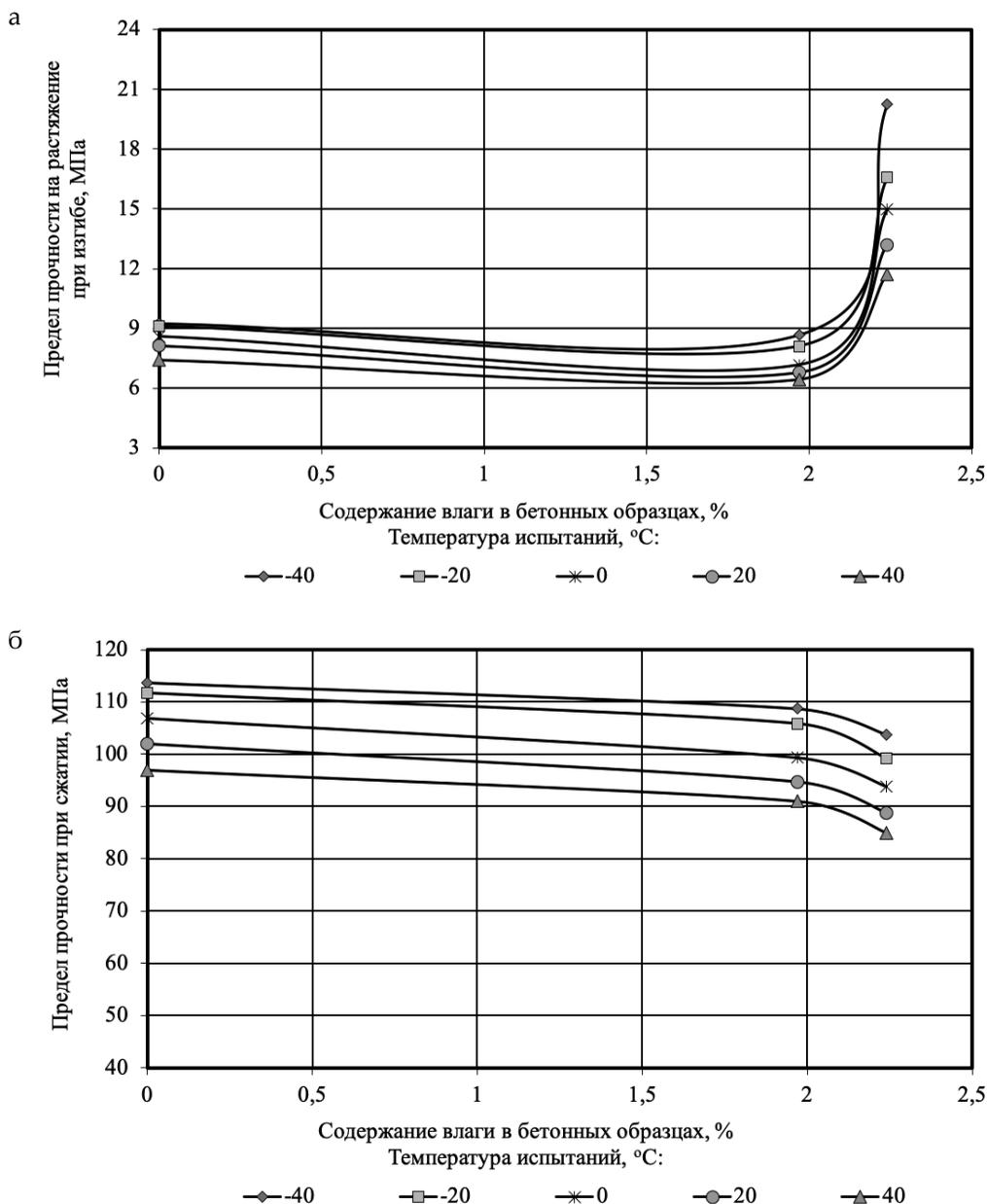


Рис. 3. Изменение предела прочности на растяжение при изгибе (а) и сжатии (б) цементных композитов высокопрочного бетона (состав № 3) в зависимости от температуры испытаний и влажностного состояния

лучшей удобоукладываемости бетонной смеси, а также более сбалансированным гранулометрическим составом, позволяющим обеспечить повышение плотности упаковки частиц. В связи с этим еще больше по сравнению с немодифицированным бетоном (состав № 1) снижается объем открытых капиллярных пор и, как следствие, уменьшается количество свободной влаги в структуре высокопрочного бетона.

Выводы. Проведенный анализ влияния температуры и влажностного состояния образцов при испытании бетонов трех различных составов показал существенное различие в характере влияния на «традиционный» трехкомпонентный и модифицированные цементные бетоны, что необходимо учитывать при проектировании составов цементных бетонов, эксплуатируемых в условиях воздействия природных климатических факторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-29-12036

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калашников В. И. Эволюция развития составов и изменение прочности бетонов. Бетоны настоящего и будущего // Строительные материалы. 2016. № 1–2. С. 96–103.
2. Коротких Д.Н. Повышение прочности и трещиностойкости структуры современных цементных бетонов: дис. ... док. техн. наук / Воронеж. гос. архитектур.-строит. ун-т. Воронеж, 2014. 359 с.
3. Низина Т.А., Селяев В.П., Балыков А.С., Володин В.В., Коровкин Д.И. Оптимизация составов многокомпонентных мелкозернистых фибробетонов, модифицированных на различных масштабных уровнях // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2017. Т.9. №2. С. 43–65.
4. Чернышов Е.М., Славчева Г.С., Ким Л.В. О конструкционном потенциале структуры высокотехнологичных бетонов с учетом температурно-влажностных эксплуатационных состояний // Строительные материалы. 2015. №9. С. 3–17.
5. Славчева Г.С. Структура высокотехнологичных бетонов и закономерности проявления их свойств при эксплуатационных влажностных воздействиях: автореф. дис. ... док. техн. наук. Воронеж, 2009. 44 с.
6. Славчева Г.С. Влажностное состояние цементных и силикатных бетонов в связи с их структурой // Научный журнал строительства и архитектуры. 2008. №4. С. 119–131.
7. Низина Т.А., Коровкин Д.И., Макарова Л.В., Балыков А.С., Володин В.В. Исследование влияния температурно-влажностного режима на физико-механические свойства бездобавочного мелкозернистого бетона // Региональная архитектура и строительство. 2018. №1. С. 68–73.
8. Коровкин Д.И., Низина Т.А., Макарова Л.В., Балыков А.С., Володин В.В. Анализ изменения прочностных показателей мелкозернистых бетонов в зависимости от влажностного состояния и температуры испытаний // Известия ВУЗов. Строительство. 2018. № 3. С. 43–51.
9. Nizina T.A., Balykov A.S., Volodin V.V., Koroovkin D.I. Fiber fine-grained concretes with polyfunctional modifying additives. Magazine of Civil Engineering. 2017. No. 4. Pp. 73–83. Doi: 10.18720/MCE.72.9.
10. Балыков А.С., Низина Т.А., Макарова Л.В. Критерии эффективности цементных бетонов и их применение для анализа составов высокопрочных композитов // Строительные материалы. 2017. №6. С. 69–75.
11. Балыков А.С., Низина Т.А., Коровкин Д.И., Володин В.В., Каиштанов А.А., Каиштанова Е.А. Высокопрочные мелкозернистые бетоны на основе природного и техногенного сырья [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/vysokoprochnye-melkozernistyebetonu-na-osnove-prirodnogo-i-texnogennogo-syrya> (дата обращения: 16.11.2018).
12. Низина Т.А., Селяев В.П. Материальная база вуза как инновационный ресурс развития национального исследовательского университета // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Всерос. науч.-техн. конф. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. С. 115–121.
13. Пирадов К.А. Исчерпание ресурса бетона при температурно-влажностных и силовых воздействиях // Бетон и железобетон. 1997. №6. С. 26–28.

Об авторах:

НИЗИНА Татьяна Анатольевна

доктор технических наук, советник РААСН,
профессор кафедры строительных конструкций
Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет
430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевистская, 68
E-mail: nizinata@yandex.ru

NIZINA Tatiana A.

Doctor of Engineering Science, Professor of the
Building Structures Chair
National Research Mordovia State University
430005, Russia, Saransk, Bolshevistskaya str., 68
E-mail: nizinata@yandex.ru

КОРОВКИН Дмитрий Игоревич

аспирант кафедры строительных конструкций
Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет
430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевистская, 68
E-mail: asfkorovkin@yandex.ru

KOROVKIN Dmitry I.

Postgraduate Student of the Building Structures
Chair
National Research Mordovia State University
430005, Russia, Saransk, Bolshevistskaya str., 68
E-mail: asfkorovkin@yandex.ru

БАЛЫКОВ Артемий Сергеевич

младший научный сотрудник кафедры
строительных конструкций
Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет
430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевистская, 68
E-mail: artbalrun@yandex.ru

BALYKOV Artemy S.

Junior Researcher of the Building Structures Chair
National Research Mordovia State University
430005, Russia, Saransk, Bolshevistskaya str., 68
E-mail: artbalrun@yandex.ru

ВОЛОДИН Владимир Владимирович

аспирант кафедры строительных конструкций
Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет
430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевистская, 68
E-mail: volodinvv1994@gmail.com

VOLODIN Vladimir V.

Postgraduate Student of the Building Structures
Chair
National Research Mordovia State University
430005, Russia, Saransk, Bolshevistskaya str., 68
E-mail: volodinvv1994@gmail.com

Для цитирования: Низина Т.А., Коровкин Д.И., Балыков А.С., Володин В.В. Анализ изменения упруго-прочностных характеристик модифицированных и немодифицированных мелкозернистых бетонов в зависимости от их влажностного состояния и температуры испытания // Градостроительство и архитектура. 2019. Т.9, №1. С. 71–78. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.01.12.

For citation: Nizina T.A., Korovkin D.I., Balykov A.S., Volodin V.V. Analysis of changes in the elastic-strength characteristics of modified and unmodified fine-grained concretes depending on their wet state and test temperature // Urban Construction and Architecture. 2019. V. 9, 1. Pp. 71–78. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.01.12.

Уважаемые читатели!

Научно-технический центр «АРХИГРАД» приглашает к сотрудничеству.

Основные направления деятельности Центра:

- градостроительство; градостроительная реконструкция;
- территориальное планирование;
- архитектурное и ландшафтное проектирование;
- реконструкция зданий и сооружений;
- экспертная деятельность;
- повышение квалификации руководителей и специалистов организаций.

Руководитель Вавилонская Татьяна Владимировна

Контакты: 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194, корпус 13, каб. 0102
тел. (846) 242-52-21, E-mail: baranova1968@mail.ru