



ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВОВ ЦЕМЕНТНЫХ ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННЫХ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ, СОДЕРЖАЩИХ УГЛЕРОДНЫЕ НАНОМОДИФИКАТОРЫ

OPTIMIZATION OF COMPOSITIONS OF CEMENT FIBER FINE-GRAINED CONCRETES CONTAINING CARBON NANOMODIFIERS

УДК 691.32, ВАК 05.23.05, DOI: 10.22184/1993-8578.2017.78.7.82.91

Т.Низина*, А.Балыков*, Д.Коровкин*, В.Володин* / nizinata@yandex.ru
T.Nizina*, A.Balykov*, D.Korovkin*, V.Volodin*

Приведены результаты исследования физико-механических характеристик дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов, содержащих углеродные наномодификаторы. В результате экспериментальных исследований произведена оптимизация рецептуры модифицированных мелкозернистых дисперсно-армированных бетонов, позволяющая определить рациональные составы цементных композитов на полях основных прочностных свойств – пределов прочности при сжатии и на растяжение при изгибе. По результатам многокритериальной оптимизации установлены зоны пересечения областей допустимых значений предела прочности при сжатии и на растяжение при изгибе, характеризующие области оптимальных величин исследуемых факторов и прочностных характеристик.

Results of investigation of physical and mechanical characteristics of fiber fine-grained concretes containing carbon nanomodifiers are presented. The experimental studies allowed optimizing the formulations of modified fine-grained fiber concretes, which makes it possible to determine the rational compositions of cement composites in the margins of the main strength properties (the compressive strength and tensile strength in bending). The results of multicriteria optimization allowed identifying the zones of intersection of tolerance ranges of the compressive strength and tension in bending, which characterize the preferable regions of the factors and strength characteristics investigated.

В последние десятилетия при создании высокофункциональных строительных композитов все большее значение отводится методам управления их структурой на различных уровнях: макро-, мезо-, микро-, вплоть до наноразмерного уровня организации строения материи. Нанотехнологии – методы (технологии) производства, основанные на использовании физических, химических и биологических явлений и наноразмерных объектов для создания материалов и изделий, свойства которых определяются их структурой в нанометровом диапазоне [1]. Одной из задач

нанотехнологии в строительстве является синтез и использование наночастиц как инструментов регулирования и улучшения эксплуатационных свойств и характеристик строительных материалов. Перспективными для целенаправленного изменения свойств цементных систем (прочности, долговечности и др.) считаются следующие наномодификаторы [2]:

- наночастицы SiO_2 с удельной поверхностью не менее $180 \text{ м}^2/\text{г}$, способствующие достижению кардинально новых прочностей и структур цементного камня за счет улучшенной упаковки

* МГУ им. Н.П.Огарева (Саранск) / Ogarev Mordovia State University.



и пониженной пористости, а также позволяющие контролировать реакции образования и превращения гидросиликатов кальция C-S-H, ответственных за долговечность композитов, и ряд эксплуатационных характеристик (ползучесть, усадку и др.);

- наночастицы Fe_2O_3 , повышающие прочность бетона на сжатие и растяжение, а также придающие свойство "самозондирования", заключающееся в возможности регистрации собственных сжимающих напряжений цементных систем через изменение объемного электрического сопротивления растворов с данными наночастицами;
- наночастицы Al_2O_3 и глины (алюмосиликатов), позволяющие значительно увеличить модуль упругости, повысить сопротивление проникновению хлоридов, снизить усадку бетонов;

- наночастицы TiO_2 , являющиеся фотокатализаторами при формировании самоочищающихся поверхностей бетона за счет явления гидрофильности (выделения атомарного кислорода из паров воды или атмосферного кислорода), что позволяет поддерживать и сохранять эстетический вид построенных объектов на требуемом уровне в течение продолжительного времени.

Дополнительные возможности при синтезе композиционных материалов с повышенной прочностью, жесткостью и долговечностью предоставляют производимые в настоящее время в промышленных масштабах углеродные наночастицы. К подобным наночастицам можно отнести высокоупорядоченные кластеры углерода, такие как фуллерены, нанотрубки и нановолокна, астралены, свободные наноразмерные пленки – графены и т.д. [2–5]. С целью снижения трудоемкости синтеза и,

In recent decades, when creating highly functional composites for building, the methods of controlling the structure of the organization of the matter at various levels – macro, meso, micro, up to the nanoscale level – are increasingly important. Nanotechnologies are the methods (technologies) of production, based on the use of physical, chemical and biological phenomena and nanoscale objects to create materials and products whose properties are determined by their structure in the nanometer range [1]. One of the tasks of nanotechnology in construction is the synthesis and use of nanoparticles as tools for regulating and improving the operational properties and characteristics of building materials. The following nanomodifiers are considered promising for a purposeful change in the properties (strength, durability, etc.) of cement systems [2]:

- SiO_2 nanoparticles with a specific surface area of at least $180 \text{ m}^2/\text{g}$, contributing to the achievement of cardinally new strengths and structures of cement stone due to improved packaging and reduced porosity, and also allowing to control the formation and conversion

of calcium hydrosilicates C-S-H, which are responsible for the durability of composites and a number of operational characteristics (creep, shrinkage, etc.);

- Fe_2O_3 nanoparticles, which increase the compressive strength and tensile strength of concrete, and also add the property of "self-sounding", consisting in the possibility of registering the own compressive stresses of cement systems through the change in the volume electrical resistance of solutions with the given nanoparticles;
- nanoparticles of Al_2O_3 and clays (aluminosilicates), which significantly increase the modulus of elasticity, increase resistance to chlorides penetration, reduce shrinkage of concretes;
- TiO_2 nanoparticles that are photocatalysts in the formation of self-cleaning concrete surfaces due to the phenomenon of hydrophilicity (separation of atomic oxygen from water vapor or atmospheric oxygen), which allows maintaining and preserving the aesthetic appearance of the constructed objects at the required level for a long time.

Additional opportunities for the synthesis of composite materials with increased strength, stiffness and durability provide carbon nanoparticles that are currently produced on an industrial scale. Such nanoparticles include highly ordered carbon clusters such as fullerenes, nanotubes and nanofibres, astralenes, free nano-sized films (graphenes), etc. [2–5]. In order to reduce the complexity of synthesis and, as a consequence, the cost of nanomodifiers, Russian scientists have obtained a whole group of carbon nanoclusters called "fulleroids" [5, 6].

In recent years, there has been a significant complication of the composition of concrete, consisting of six, seven or more components. Numerous additives in concrete are a kind of "key" to solving many technological problems. The multifunctionality and multicomponent nature of the modifiers allows to effectively control the processes of structure formation at various stages of the preparation of concrete and to obtain composites with high performance characteristics [7–12]. Therefore, a critical task in planning experimental studies



как следствие, себестоимости наномодифицирующих веществ российскими учеными была получена целая группа углеродных нанокластеров, названных "фуллероиды" [5, 6].

В последние годы наблюдается существенное усложнение состава композиционных бетонов, состоящих из шести-семи и более компонентов. Многочисленные добавки в бетоне являются своеобразным "ключом" к решению многих технологических задач. Полифункциональность и многокомпонентность применяемых модификаторов позволяет эффективно управлять процессами структурообразования на различных этапах приготовления бетона и получать композиты с высокими эксплуатационными характеристиками [7-12]. Поэтому важнейшей задачей при составлении планов экспериментальных исследований, проводимых с целью получения оптимальных составов строительных материалов, является многокритериальная оптимизация с выявлением наиболее целесообразного содержания вяжущих, наполнителей и заполнителей, модифицирующих добавок и т.д.

Увеличение числа компонентов и рост общего числа рецептурно-технологических факторов цементных композиций приводят к необходимости преодоления трудностей, вызванных так называемым "проклятием размерности" [13]. Кроме того, при оптимизации составов должны быть гарантированы требуемые уровни большого числа эксплуатационных и технологических свойств материала, включая критерии ресурсосбережения. Координаты оптимумов исследуемых критериев

качества системы при этом, как правило, не совпадают. Решение подобных многокритериальных задач возможно при комплексной реализации рациональных (как по теоретическим предпосылкам, так и по исполнению) физических и вычислительных экспериментов, а также оптимизации их результатов с принятием компромиссных решений.

При этом существуют сложности, связанные, в основном, с вопросом совместимости "цемент-добавка" и добавок между собой [9, 14], который является предметом многочисленных исследований и обсуждений, дискуссий мировых форумов. В частности, на авторитетных форумах Canmet задача количественной оценки совместимости компонентов комплексных добавок между собой и добавок с цементами выделена в качестве первоочередной [14]. При оценке совместимости важны все факторы, особенно вид и содержание добавки в смеси. Одна и та же добавка в различных дозировках, по аналогии с высказыванием великого немецкого врача Парацельса о лекарственных препаратах, может быть и "лекарством", и "ядом". При этом увеличение числа компонентов бетонных смесей выводит принцип "не навреди" на передний план.

Многокритериальная оптимизация составов и свойств дисперсно-армированных модифицированных мелкозернистых бетонов, несомненно, является актуальной задачей, для качественного решения которой необходимо использование методов математического моделирования и анализа. При этом наибольший интерес, на наш

to obtain optimal compositions of building materials is multicriteria optimization with the identification of the most appropriate content of binders, fillers, modifying additives, etc.

An increase in the number of components and technological factors of cement compositions lead to the need to overcome the difficulties caused by the so-called "curse of dimensionality" [13]. In addition, when optimizing the formulations, the required levels of a large number of operational and technological properties of the material, including resource-saving criteria, must be guaranteed. The coordinates of the

optimums of the investigated quality criteria of the system, as a rule, do not coincide. The solution of such multi-criteria problems is possible with the complex implementation of rational (from the point of view of theoretical prerequisites and execution) physical and computational experiments, as well as optimization of their results with the adoption of compromise solutions.

At the same time, there are difficulties associated mainly with the issue of compatibility of "cement-additive" and additives among themselves [9, 14], which is the subject of numerous studies and discussions on

international forums. In particular, according to the authoritative Canmet forums, the task of quantifying the compatibility of the components of complex additives among themselves and additives with cements is primary [14]. When assessing compatibility, all factors are important, especially the type and content of the additive in the mixture. The same additive in various dosages, by analogy with the statement of the great German physician Paracelsus about medicinal preparations, can be both a "medicine" and a "poison". At the same time, an increase in the number



Уровни варьирования исследуемых факторов

Levels of variation of factors studied

| Факторы Factors | | | Уровни варьирования Levels of variation | | | |
|---------------------------------|-------|--|--|-------|------|-----|
| | | | 0 | 0,333 | 0,5 | 1 |
| Вид добавки Type of additive | v_1 | МКУ, % от массы цемента MCP, % by weight of cement | 0 | 6,667 | 10 | 20 |
| | v_2 | ВМК, % от массы цемента HMK, % by weight of cement | 0 | 2 | 3 | 6 |
| | v_3 | "Адмикс", % от массы цемента Admix, % by weight of cement | 0 | 0,5 | 0,75 | 1,5 |
| Вид фибры Type of fiber | w_1 | ППН, % от массы цемента PP, % by weight of cement | 0 | 0,333 | 0,5 | 1 |
| | w_2 | ПАН, % от массы цемента PAN, % of cement mass | 0 | 0,5 | 0,75 | 1,5 |
| | w_3 | МБМ, % от массы цемента MBM, % by weight of cement | 0 | 1,667 | 2,5 | 5 |

взгляд, представляет метод экспериментально-статистического (ЭС) моделирования, предложенный В.А.Вознесенским [15, 16] и активно развиваемый в настоящее время [17, 18].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данной работы являлась оптимизация составов мелкозернистых фибробетонов, армированных на разных масштабных уровнях. Основными критериями оптимизации являлись прочностные характеристики – предел прочности при сжатии и на растяжение при изгибе (ГОСТ 310.4) в возрасте 28 суток.

Основные этапы планирования и проведения экспериментального исследования представлены в работах [19–23]. При применении D-оптимального плана, содержащего 15 опытных точек, варьировалось две группы факторов – вид и содержание используемых добавок (v_i), а также вид и содержание применяемой фибры (w_i).

Использовались следующие активные минеральные добавки:

- микрокремнезем конденсированный уплотненный производства ОАО "Кузнецкие ферросплавы" (v_1 , МКУ);

of components of concrete mixes leads the principle of "do no harm" to the fore.

Multicriteria optimization of the compositions and properties of dispersed-reinforced modified fine-grained concretes is undoubtedly an actual task, for the qualitative solution of which it is necessary to use methods of mathematical modeling and analysis. At the same time, the most interesting, in our opinion, is the method of experimental statistical (ES) modeling, proposed by V.A. Voznesensky [15, 16] that is actively developed at the present time [17, 18].

EXPERIMENTAL STUDIES

The purpose of this work was to optimize the compositions of fine-grained fibrous concrete reinforced at different levels. The main optimization criteria were the strength characteristics – compressive strength and tensile strength at bending (GOST 310.4) at the age of 28 days.

The main stages of planning and conducting an experimental study are presented in [19–23]. When applying the D-optimal plan containing 15 experimental points, two groups of factors were varied: the type and

content of the additives used (v_i), and the type and content of the applied fiber (w_i).

The following active mineral additives were used:

- condensed microsilica produced by Kuznetskie Ferrosplav (v₁, MCP);
- highly active white metakaolin produced by Meta-D LLC (v₂, HMK);
- waterproofing additive for the concrete Penetron Admix (v₃, Admix).

The following materials were used as dispersed fibers:

- polypropylene multifilament fiber with a cutting length of



- высокоактивный метаксаолин белый производства ООО "Мета-Д" (v_2 , ВМК);
- гидроизоляционная добавка в бетонную смесь "Пенетрон Адмикс" (v_3 , "Адмикс").

В качестве дисперсных волокон применялись следующие материалы:

- полипропиленовое мультифиламентное волокно с длиной резки 12 мм, диаметром 25–35 мкм, плотностью 0,91 г/см³ (w_1 , ППН);
- полиакрилонитрильное синтетическое волокно специальной обработки для бетонов FibARM Fiber WB с длиной резки 12 мм, диаметром 14–31 мкм, плотностью 1,17±0,03 г/см³ (w_2 , ПАН);
- модифицированная астраленами базальтовая микрофибра под фирменным названием "Астрофлекс-МБМ" длиной 100–500 мкм, средним диаметром 8–10 мкм, насыпной плотностью 800 кг/м³, с содержанием астраленов 0,0001–0,01% от массы фибры (w_3 , МБМ).

Уровни варьирования исследуемых факторов приведены в таблице. При составлении плана эксперимента обеспечивалось выполнение следующих условий:

$$\begin{aligned} 0 \leq v_i \leq 1; \sum v_i = 1; i = 1, 2, 3; \\ 0 \leq w_i \leq 1; \sum w_i = 1; i = 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (1)$$

В ходе экспериментальных исследований изготавливались серии образцов-призм 40×40×160 мм из равноподвижных фибробетонных смесей, в рецептуре которых наряду с приведенными

выше модификаторами использовались: портландцемент класса ЦЕМ I 42,5Б; мелкозернистый заполнитель – природный кварцевый песок Новостепановского карьера (п. Смольный, Ичалковский район, Республика Мордовия) с размером зерна менее 5 мм (65% от массы твердой фазы); суперпластификатор Melflux 1641 F (0,5% от массы вяжущего).

Технология изготовления дисперсно-армированной бетонной смеси включала несколько этапов. На первом этапе осуществлялось введение и перемешивание в сухом состоянии требуемого количества вяжущего заполнителя и модифицирующих добавок; на втором – вводились дисперсные волокна с первой порцией воды ($В/Ц=0,2$); на третьем – производилась корректировка водой для получения равноподвижных составов.

По результатам исследования были построены экспериментально-статистические модели зависимости исследуемых физико-механических показателей качества мелкозернистых фибробетонов от вида и содержания модифицирующих добавок (смесь I) и дисперсных волокон (смесь II). Обобщенные ЭС-модели прочностных показателей задавались в виде приведенного полинома $M_{I,II}Q$ "смесь I, смесь II – свойство" вида:

• для предела прочности на растяжение при изгибе –

$$\begin{aligned} \sigma_{p,из} = & 0,65 \cdot v_1 \cdot v_2 - 3,28 \cdot v_1 \cdot v_3 - 1,02 \cdot v_2 \cdot v_3 + 2,16 \cdot w_1 \cdot w_2 + \\ & + 1,02 \cdot w_1 \cdot w_3 + 3,03 \cdot w_2 \cdot w_3 + 4,70 \cdot v_1 \cdot w_1 + 3,69 \cdot v_2 \cdot w_1 + \\ & + 4,73 \cdot v_3 \cdot w_1 + 4,92 \cdot v_1 \cdot w_2 + 5,88 \cdot v_2 \cdot w_2 + 4,82 \cdot v_3 \cdot w_2 + \\ & + 3,68 \cdot v_1 \cdot w_3 + 5,59 \cdot v_2 \cdot w_3 + 5,13 \cdot v_3 \cdot w_3; \end{aligned} \quad (2)$$

- 12 mm, a diameter of 25–35 μ m, a density of 0.91 g/cm³ (w_1 , PP);
- polyacrylonitrile synthetic fiber of special treatment for concrete FibARM Fiber WB with a cutting length of 12 mm, a diameter of 14–31 μ m, a density of 1.17 ± 0.03 g/cm³ (w_2 , PAN);
 - astralene-modified basaltic microfiber Astroflex-MBM with a length of 100–500 μ m, an average diameter of 8–10 μ m, a bulk density of 800 kg/m³, with an astralene content of 0.0001–0.01% of the weight of the fiber (w_3 , MBM).

The levels of variation of the factors studied are shown in the table. During the design of the

experiments, the following conditions were met:

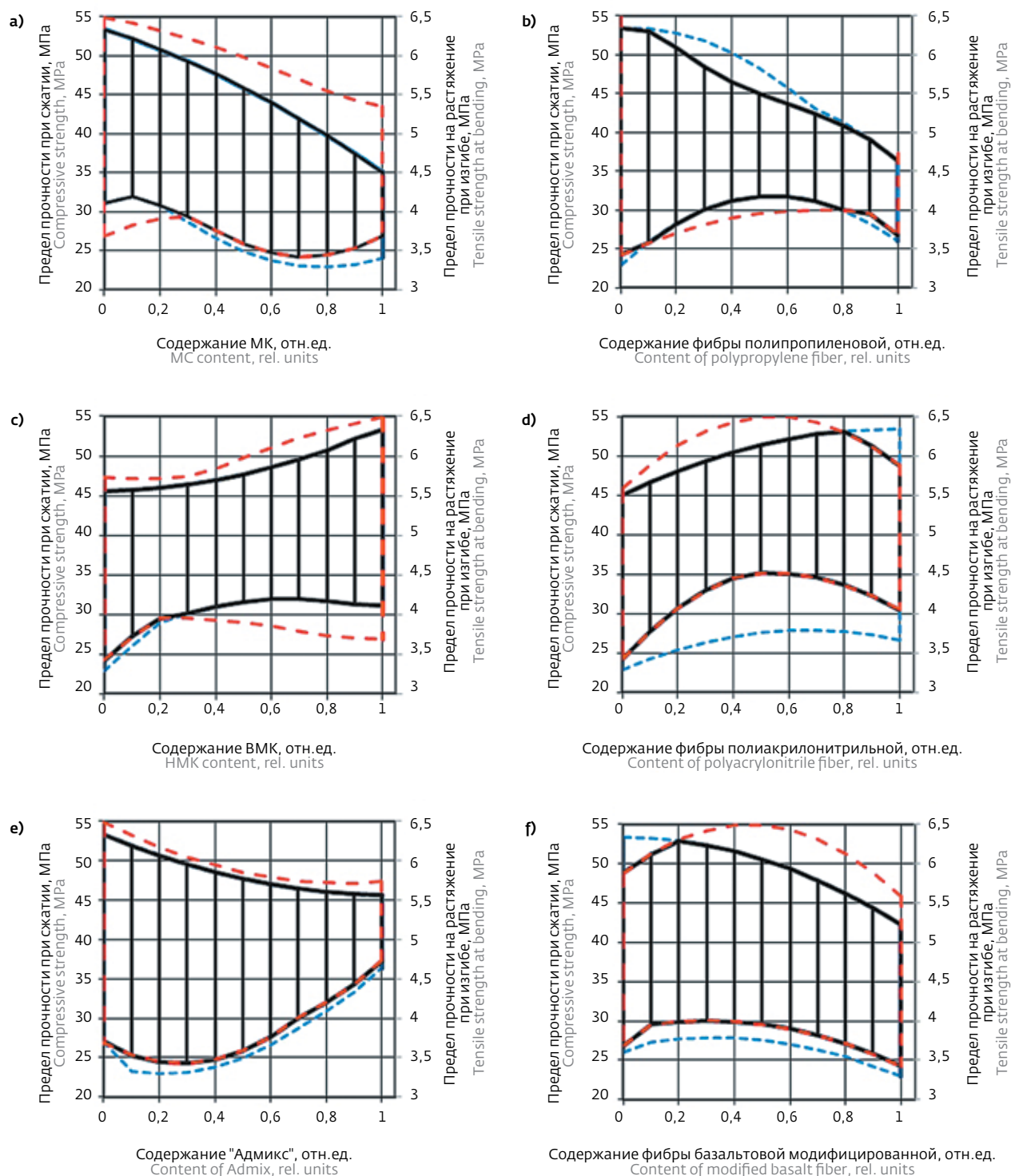
$$\begin{aligned} 0 \leq v_i \leq 1; \sum v_i = 1; i = 1, 2, 3; \\ 0 \leq w_i \leq 1; \sum w_i = 1; i = 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (1)$$

In the experimental studies, series of prism samples 40×40×160 mm were made using fiber-reinforced concrete mixtures, in the recipe of which, along with the mentioned above modifiers, the following were used: Portland cement of EM I 42.5 B class; fine-grained aggregate – natural quartz sand of the Novostepanovsky quarry (Smolny, Ichalkovsky district, Republic of Mordovia) with grain

size less than 5 mm (65% of the mass of the solid phase); superplasticizer, Melflux 1641 F (0.5% of the weight of the binder).

The technology of manufacturing a dispersed-reinforced concrete mix included several stages. In the first stage, the required amount of binder, aggregate and modifying additives was mixed in a dry state; on the second stage, dispersed fibers were introduced with the first portion of water ($W/C = 0.2$); on the third stage the water was adjusted for obtaining optimal compositions.

Based on the results of the study, experimental statistical models of the dependence of the



Зоны пересечения областей допустимых значений и оптимальные области пределов прочности при сжатии и на растяжение при изгибе дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов с учетом содержания в составах модифицирующих добавок (а, с, е) и дисперсных волокон (b, d, f)

Areas of intersection of regions of acceptable values and optimal areas of compressive strength and tensile strength at bending of dispersed-reinforced fine-grained concrete, taking into account the content of modifying additives (a, c, e) and dispersed fibers (b, d, f)



- для предела прочности при сжатии –

$$\sigma_{сж.} = 12,65 \cdot v_1 \cdot v_2 - 25,24 \cdot v_1 \cdot v_3 - 2,98 \cdot v_2 \cdot v_3 + 24,16 \cdot w_1 \cdot w_2 + 29,04 \cdot w_1 \cdot w_3 + 11,09 \cdot w_2 \cdot w_3 + 29,17 \cdot v_1 \cdot w_1 + 31,09 \cdot v_2 \cdot w_1 + 36,32 \cdot v_3 \cdot w_1 + 28,21 \cdot v_1 \cdot w_2 + 53,36 \cdot v_2 \cdot w_2 + 40,76 \cdot v_3 \cdot w_2 + 24,12 \cdot v_1 \cdot w_3 + 42,26 \cdot v_2 \cdot w_3 + 38,29 \cdot v_3 \cdot w_3. \quad (3)$$

Многокритериальная оптимизация по каждому фактору в отдельности при предъявлении совместных требований по пределам прочности при сжатии и на растяжение при изгибе осуществлялась с помощью наложения областей допустимых значений указанных прочностных характеристик и определения зон их пересечения с выявлением оптимальной области (см. рисунок, заштрихованную область). Установлено, что повышение доли метакАОлина в общей массе активных минеральных добавок (рис., с) приводит к росту граничных значений прочностных показателей в оптимальной области. При максимальном содержании ВМК (6% от массы портландцемента) возможно получить фибробетоны с широким диапазоном прочностных характеристик в оптимальной зоне – от 31 до 53 МПа при сжатии и от 4,1 до 6,3 МПа на растяжение при изгибе.

Введение в бетонные смеси микрокремнезема конденсированного уплотненного (рис., а) приводит к снижению диапазона исследуемых прочностных показателей фибробетонов, а также его граничных значений, что свидетельствует о негативном влиянии МКУ на процессы структурообразования цементных композитов по сравнению с другими видами

применявшихся добавок. Составы с максимальным содержанием МКУ характеризуются невысокими значениями пределов прочности при сжатии и на растяжение при изгибе в оптимальной области – 27–35 МПа и 3,7–4,5 МПа соответственно.

Эффективность ВМК по сравнению с МКУ можно объяснить следующими факторами: большей (примерно в 2,0–2,5 раза) пуццоланической активностью метакАОлина; разной химической природой добавок (силикатной – у МКУ, алюмосиликатной – у ВМК); ускорением протекания реакции ВМК с известью по сравнению с МКУ, что обеспечивает ее надежное связывание в первые сутки твердения; более высокой пластичностью и технологичностью бетонных и растворных смесей, отсутствием поверхностной липкости бетона с добавкой ВМК, присущих бетонам с МКУ; меньшей водопотребностью смесей с ВМК, а тем самым и меньшим требуемым расходом суперпластификаторов для достижения одинаковой подвижности бетонных смесей.

При увеличении содержания в составе минеральной добавки "Адмикс" максимальные значения прочностных показателей в оптимальной области несколько снижаются, а минимально возможные – повышаются; при этом сужается область допустимых решений (рис., е) – от 27–53 до 37–45 МПа при сжатии и от 3,7–6,3 до 4,7–5,5 МПа на растяжение при изгибе. Объяснения приведенного эффекта лежат в формирующихся новообразованиях гидросульфoалюминатов и гидрокарбоалюминатов кальция при взаимодействии

physical-mechanical quality indicators of fine-grained fibrous concrete on the type and content of modifying additives (mixture I) and dispersed fibers (mixture II) were build. Generalized ES-models of strength indicators were specified in the form of the reduced polynomial $M_1 M_{II} Q$ "mixture I, mixture II – property":

- for tensile strength at bending –

$$\sigma_{р.из} = 0,65 \cdot v_1 \cdot v_2 - 3,28 \cdot v_1 \cdot v_3 - 1,02 \cdot v_2 \cdot v_3 + 2,16 \cdot w_1 \cdot w_2 + 1,02 \cdot w_1 \cdot w_3 + 3,03 \cdot w_2 \cdot w_3 + 4,70 \cdot v_1 \cdot w_1 + 3,69 \cdot v_2 \cdot w_1 + 4,73 \cdot v_3 \cdot w_1 + 4,92 \cdot v_1 \cdot w_2 + 5,88 \cdot v_2 \cdot w_2 + 4,82 \cdot v_3 \cdot w_2 + 3,68 \cdot v_1 \cdot w_3 + 5,59 \cdot v_2 \cdot w_3 + 5,13 \cdot v_3 \cdot w_3. \quad (2)$$

- for compressive strength –

$$\sigma_{сж.} = 12,65 \cdot v_1 \cdot v_2 - 25,24 \cdot v_1 \cdot v_3 - 2,98 \cdot v_2 \cdot v_3 + 24,16 \cdot w_1 \cdot w_2 + 29,04 \cdot w_1 \cdot w_3 + 11,09 \cdot w_2 \cdot w_3 + 29,17 \cdot v_1 \cdot w_1 + 31,09 \cdot v_2 \cdot w_1 + 36,32 \cdot v_3 \cdot w_1 + 28,21 \cdot v_1 \cdot w_2 + 53,36 \cdot v_2 \cdot w_2 + 40,76 \cdot v_3 \cdot w_2 + 24,12 \cdot v_1 \cdot w_3 + 42,26 \cdot v_2 \cdot w_3 + 38,29 \cdot v_3 \cdot w_3. \quad (3)$$

Multi-criteria optimization for each factor separately with joint requirements for the compressive strength and tensile strength in bending, was carried out by overlapping the allowable values of these strength characteristics and determining the zones of their intersection with the identification of the

optimal region (shaded area in Fig.). It was found that an increase in the proportion of metakaolin in the total mass of active mineral additives (Fig.c) leads to an increase in the boundary values of the strength parameters in the optimal region. At the maximum content of HMK (6% of Portland cement) it is possible to obtain fiber-reinforced concrete with a wide range of strength characteristics in the optimal zone – from 31 to 53 MPa at compression and from 4.1 to 6.3 MPa for bending tensile.

The introduction of condensed microsilica into concrete mixes (Fig.a) leads to a reduction in the



компонентов добавки "Пенетрон Адмикс" с продуктами гидратации цемента. Данные новообразования, образующиеся с увеличением объема, наряду с первоначальным уплотнением структуры, при неоптимальном использовании могут вызвать существенное повышение внутренних напряжений. Таким образом, учитывая это, необходимо тщательным образом выбирать дозировку добавки с целью рационального управления кристаллизационного процесса и формирования структуры цементных композитов.

Введение дисперсных волокон ППН в составы цементных композитов приводит к значительному снижению максимальных значений пределов прочности при сжатии и на растяжение при изгибе и сужению оптимальной области допустимых решений данных прочностных показателей (рис., b) – от 25–53 до 27–37 МПа при сжатии и от 3,5–6,3 до 3,7–4,7 МПа на растяжение при изгибе.

Анализируя оптимальные области допустимых решений при исследовании влияния дисперсных волокон на пределы прочности при сжатии и на растяжение при изгибе, можно сделать вывод об эффективности армирования мелкозернистых бетонов ПАН-волокном и МБМ (рис., d и f). При этом, при использовании комплекса фибр ПАН+МБМ с соотношением содержания ПАН к МБМ в диапазоне от 50/50 до 90/10 масс. ч. возможно получить цементные композиты с наиболее высокими значениями прочностных показателей – предела прочности при сжатии 51–53 МПа, предела прочности на растяжение при

изгибе 6,1–6,3 МПа. Это свидетельствует о целесообразности и эффективности многоуровневого армирования мелкозернистых бетонов с использованием углеродных наноструктур (применение полиакрилонитрильного волокна – армирование на макромасштабном уровне структуры; модифицированной астраленами базальтовой микрофибры – на верхнем микромасштабном уровне).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, получены следующие результаты экспериментальных исследований:

- произведена оптимизация рецептуры модифицированных мелкозернистых дисперсно-армированных бетонов, позволяющая определить рациональные составы цементных композитов на полях основных прочностных свойств (пределов прочности при сжатии и на растяжение при изгибе), описанных структурированными ЭС-моделями;
- установлено, что при данной рецептуре и технологии получения мелкозернистых дисперсно-армированных бетонов допустимый диапазон предела прочности на растяжение при изгибе составляет 3,5–6,5 МПа, а предела прочности при сжатии – 24–54 МПа;
- по результатам многокритериальной оптимизации определены зоны пересечения областей допустимых значений пределов прочности при сжатии и на растяжение при изгибе, характеризующие области оптимальных

range of strength parameters of fiber-concrete as well as its boundary values, which indicates the negative influence of MCP on the processes of structure formation of cement composites in comparison with other types of additives. Compositions with the maximum content of MCP are characterized by low values of compressive strength and tensile strength in the optimal range of 27–35 MPa and 3.7–4.5 MPa, respectively.

The effectiveness of HMK in comparison with MCP can be explained by the following factors: greater (approximately 2.0–2.5 times) pozzolanic activity of metakaolin; different chemical nature of additives

(silicate in MCP, aluminosilicate in HMK); acceleration of the reaction of HMK with lime in comparison with MCP, which ensures its reliable binding on the first day of hardening; higher plasticity and manufacturability of concrete mixes, absence of surface stickiness of concrete with the addition of HMK inherent in concretes with MCP; lower water consumption of mixtures with HMK, and thus the smaller required consumption of superplasticizers to achieve the same mobility of concrete mixtures.

With the increase in the content of the mineral additive Admix, the maximum values of strength

indicators in the optimal area are somewhat reduced, and the minimum possible – increases; at the same time, the range of feasible solutions is narrowing (Fig.e) from 27–53 MPa to 37–45 MPa under compression and from 3.7–6.3 MPa to 4.7–5.5 MPa for bending tension. Explanations of this effect lie in the emerging new formations of hydro-sulfoaluminates and calcium hydrogen carbonates when the components of the Penetron Admix additive interact with the products of cement hydration. These new formations, formed with an increase in volume, along with the initial compaction of the structure, with non-optimal use



величин исследуемых факторов и прочностных показателей;

- из анализа оптимальных областей допустимых решений при исследовании влияния модифицирующих добавок на прочностные характеристики установлена эффективность модифицирования мелкозернистых бетонов белым высокоактивным метаксаолином (ВМК), что позволило при максимальном содержании ВМК (6% от массы портландцемента) получить фибробетоны с широким диапазоном прочностных характеристик в оптимальной зоне – 31–53 МПа при сжатии и 4,1–6,3 МПа на растяжение при изгибе;
- анализируя области допустимых решений при исследовании влияния дисперсных волокон на прочностные характеристики, установлена эффективность многоуровневого армирования мелкозернистых бетонов ПАН-волокном и МБМ. При использовании комплекса фибр ПАН+МБМ с соотношением содержания ПАН и МБМ в диапазоне от 50/50 до 90/10 масс. ч. возможно получить цементные композиты с наиболее высокими значениями прочностных показателей – пределами прочности при сжатии 51–53 МПа и на растяжение при изгибе – 6,1–6,3 МПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Селяев В.П., Осипов А.К., Писарева А.С. Наночастицы, -порошки, -структуры, -технологии: аналитический обзор. – Саранск, 2010. 84 с.
2. Баженов Ю.М., Фаликман В.Р., Булгаков Б.И. Наноматериалы и нанотехнологии в современной технологии бетонов // Вестник МГСУ. 2012. № 12. С. 125–133.
3. Войтович В.А. Нанонаука. Нанотехнология. Нанобетоны // Экспозиция. Бетоны & Сухие смеси. 2009. 2/Б (85). С. 5–7.
4. Фиговский О.Л., Бейлин Д.А., Пономарев А.Н. Успехи применения нанотехнологий в строительных материалах // Нанотехнологии в строительстве: научный Интернет-журнал. 2012. Т. 4. № 3. С. 6–21. URL: http://nanobuild.ru/ru_RU/ (дата обращения: 16.08.17).
5. Пономарев А.Н. Высококачественные бетоны. Анализ возможностей и практика использования методов нанотехнологии // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 6. С. 25–33.
6. Войтович В.А. Строительные наноматериалы // Руководитель строительной организации. 2011. № 2. С. 49.
7. Калашников В.И. Эволюция развития составов и изменение прочности бетонов. Бетоны настоящего и будущего // Строительные материалы. 2016. № 1–2. С. 96–103.
8. Фаликман В.Р. Новые эффективные высокофункциональные бетоны // Бетон и железобетон. 2011. № 2. С. 78–84.
9. Ушеров-Маршак А.В. Бетоны нового поколения – бетоны с добавками // Бетон и железобетон. 2011. № 1. С. 78–81.
10. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардунян Г.С. Новые модифицированные бетоны. – М.: Типография "Парадиз", 2010. 258 с.

can cause a significant increase of internal stresses. Thus, taking this into account, it is necessary to carefully select the dosage of the additive in order to rationally control the crystallization process and form the structure of cement composites.

The introduction of dispersed fibers of PP into cement composites leads to a significant decrease in the maximum values of compressive strength and tensile strengths in bending and narrowing the optimal range of acceptable solutions of these strength parameters (Fig.b) from 25–53 MPa to 27–37 MPa under compression and from 3.5–6.3 MPa to 3.7–4.7 MPa for bending strain.

Analyzing the optimal areas of admissible solutions when investigating the effect of disperse fibers on compressive strength and tensile strength in bending, we can conclude that the reinforcement of fine-grained concrete with PAN-fiber and MBM is effective (Fig.d and f). In this case, when using the PAN + MBM complex with the ratio of PAN to MBM in the range from 50/50 to 90/10 wt. it is possible to produce cement composites with the highest values of strength indexes – with compressive strength of 51–53 MPa, tensile strength at bending of 6.1–6.3 MPa. This indicates the expediency and effectiveness of multi-level

reinforcement of fine-grained concrete with the use of carbon nanostructures (the use of polyacrylonitrile fiber – reinforcement at the macroscale level of the structure; modified by astralenes of basaltic microfiber – at the upper microscale level).

CONCLUSION

Thus, the following results of experimental studies were obtained:

- optimization of the formulation of modified fine-grained dispersed-reinforced concrete has been performed, which makes it possible to determine the rational compositions of cement composites on the fields of the main strength



11. Aitcin P.-C. High Performance Concrete. E&FN Spon. 2004. 140 p.
12. Edward G., Nawy P. Fundaments of High Performance Concrete. Sec. ed., Willy, 2001. 302 p.
13. Гарькина И.А., Данилов А.М., Королев Е.В., Смирнов В.А.. Преодоление неопределенностей целей в задаче многокритериальной оптимизации на примере разработки сверхтяжелых бетонов для защиты от радиации // Строительные материалы. 2006. № 8. С. 23–26.
14. Ушеров-Маршак А.В. Добавки в бетон: прогресс и проблемы // Строительные материалы. 2006. № 10. С. 8–12.
15. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Иванов Я.П., Николов И.И. ЭВМ и оптимизация композиционных материалов. – Киев: Будивельник, 1989. 240 с.
16. Вознесенский В. А., Ляшенко Т.В. ЭС-модели в компьютерном строительном материаловедении. – Одесса: Астропринт, 2006. 116 с.
17. Низина Т.А., Балыков А.С. Построение экспериментально-статистических моделей "состав – свойство" физико-механических характеристик модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. № 45. С. 54–66.
18. Низина Т.А., Балыков А.С. Экспериментально-статистические модели свойств модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 2. С. 13–25.
19. Nizina T.A, Ponomarev A.N., Balykov A.S., Pankin N.A. Fine-grained fibre concretes modified by complexed nanoadditives // International Journal of Nanotechnology. 2017. Vol. 14. Nos. 7/8. P. 665–679. DOI: 10.1504/IJNT.2017.083441.
20. Низина Т.А., Пономарев А.Н., Балыков А.С. Мелкозернистые дисперсно-армированные бетоны на основе комплексных модифицирующих добавок // Строительные материалы. 2016. № 9. С. 68–72.
21. Низина Т.А., Балыков А.С., Макарова Л.В. Применение моделей "состав – свойство" для исследования свойств модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г.Шухова. 2016. № 12. С. 15–21.
22. Низина Т.А., Балыков А.С., Сарайкин А.С. Экспериментальные исследования дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов // УралНИИпроект РААСН. 2015. № 4. С. 91–95.
23. Низина Т.А., Балыков А.С. Сравнительный анализ влияния вариантов дисперсного армирования и полифункционального модифицирования на изменение физико-механических характеристик мелкозернистых бетонов // Вестник Волжского регионального отделения РААСН. Нижний Новгород: ННГАСУ, 2016. Вып. 19. С. 238–247.

properties (compressive strength and tensile strength in bending) described by structured ES models;

- it has been determined that with this recipe and the technology of obtaining fine-grained dispersed-reinforced concrete, the permissible range of tensile strength at bending is 3.5–6.5 MPa, and the compressive strength limit is 24–54 MPa;
- based on the results of multicriteria optimization, the zones of intersection of the regions of admissible values of the compressive strength and bending tensile strengths are determined, characterizing the regions of optimal

values of the investigated factors and strength indicators;

- from the analysis of optimal areas of admissible solutions, the effectiveness of modifying fine-grained concrete with white highly active meta-kaolin (HMK) was established in the study of the effect of modifying additives on strength characteristics, which allowed to obtain fibrous concrete with a wide range of strength characteristics in the optimal zone at the maximum content of HMK (6% of weight of Portland cement) – 31–53 MPa under compression and 4.1–6.3 MPa for bending tension;

- analyzing the areas of admissible solutions when investigating the effect of dispersed fibers on strength characteristics, the effectiveness of multilevel reinforcement of fine-grained concrete using PAN-fiber and MBM has been established. When using the PAN + MBM complex with the ratio of PAN to MBM in the range from 50/50 to 90/10 wt. it is possible to produce cement composites with the highest values of strength indexes – with compressive strength limits of 51–53 MPa and bending tensile strength of 6.1–6.3 MPa. ■