

УДК 691.542

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-2-114-124

*О.В. ДЕМЬЯНЕНКО, Н.О. КОПАНИЦА,
А.А. КУЛИКОВА, А.М. УСТИНОВ,
Томский государственный архитектурно-строительный университет*

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВОВ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ

Проведен анализ существующих методов проектирования состава мелкозернистого бетона.

С помощью цифровых технологий разработан алгоритм проектирования состава мелкозернистого бетона, максимально учитывающий характеристики исходных, в том числе и высокодисперсных компонентов, и обеспечивающий получение однородной, плотной структуры мелкозернистого бетона с высокими эксплуатационными свойствами.

Апробирована разработанная методика проектирования состава мелкозернистого бетона с полифункциональной добавкой. Представлены результаты исследования по влиянию полифункциональной добавки на эксплуатационные характеристики мелкозернистого бетона.

Ключевые слова: мелкозернистый бетон; проектирование состава бетона; полифункциональные добавки; моделирование; эксплуатационные характеристики бетона.

Для цитирования: Демьяненко О.В., Копаница Н.О., Куликова А.А., Устинов А.М. Особенности проектирования составов многокомпонентных мелкозернистых бетонов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 2. С. 114–124.
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-2-114-124

*O.V. DEM'YANENKO, N.O. KOPANITSA, A.A. KULIKOVA, A.M. USTINOV,
Tomsk State University of Architecture and Building*

COMPOSITION DEVELOPMENT OF MULTICOMPONENT FINE CONCRETE

The paper presents the analysis of the composition development of fine concrete. The design algorithm is proposed for the fine concrete composition with respect to its initial properties, including finely-dispersed components providing a homogeneous dense concrete structure with high performance properties. The proposed method is tested for the concrete composition with the multifunctional additive. The results concern the effect of this additive on the performance of fine concrete.

Keywords: fine concrete; concrete composition; modifying additive; modeling; performance characteristics.

For citation: Dem'yanenko O.V., Kopanitsa N.O., Kulikova A.A., Ustinov A.M. Osobennosti proektirovaniya sostavov mnogokomponentnykh melkozernistykh betonov [Composition development of multicomponent fine concrete]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 2. Pp. 114–124.
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-2-114-124.

Введение

Одним из важных направлений для обеспечения технического прогресса в строительной отрасли является применение мелкозернистых высококачественных цементобетонов, обеспечивающих стабильные физико-механические характеристики и долговечность зданий и сооружений. Широкие возможности в совершенствовании технологии мелкозернистых бетонов открывает применение разнообразных модифицирующих добавок, в том числе и нанообъектов, эффективно влияющих на свойства и структуру композиционного материала. В Томском государственном архитектурно-строительном университете разработаны комплексные полифункциональные добавки, содержащие микро- и нанодисперсные компоненты, значительно улучшающие физико-механические характеристики цемента и бетона [1].

В технологии производства мелкозернистых бетонов остаются недостаточно изученными вопросы, связанные с проектированием их составов, максимально учитывающие характеристики исходных, в том числе и высокодисперсных компонентов, особенности формирования структуры и свойств композиционного материала. Совокупность указанных проблем подтверждает актуальность проведения комплексного исследования по разработке составов и методов проектирования модифицированных мелкозернистых бетонов, максимально учитывающих свойства дисперсных компонентов.

Целью работы является разработка алгоритма проектирования состава мелкозернистого бетона с высокими эксплуатационными свойствами.

Выбор эффективного способа проектирования рациональных составов композиционных строительных материалов, в том числе бетонных смесей, является важным технологическим параметром, влияющим на формирование требуемых структуры и свойств готового продукта.

Вопросы оптимизации плотности упаковки зерен заполнителей обсуждаются во многих монографиях, посвященных технологии производства бетона (К.Р. Chong, Е.Ј. Garboczi, А.И. Кудяков, В.В. Белов и др.). Чем выше плотность упаковки заполнителей для мелкозернистого, песчаного и других видов бетонов, тем выше будет качество бетона: прочность, однородность и другие показатели. Простейшей моделью плотности упаковки является модель «Аполлона»: полидисперсная система представляется в виде совокупности модельных шариков различного диаметра. При этом шарики меньшего диаметра свободно (без изменения положения крупных шаров) размещаются в сформированных крупными шарами пустотах. Данная модель не в полной мере соответствует реальности производства бетонной смеси и не отвечает на вопрос, какой будет плотность упаковки готового конгломерата, если размер мелких шаров будет больше размеров пустот между крупными зёрнами [2].

Помимо модели «Аполлона», в конце XIX – начале XX в. были предложены варианты различных «идеальных» кривых отсева заполнителей, например кривая Фуллера, Функа – Дингера и др. [3]. Предполагалось, что заполнители, гранулометрия которых соответствует некоторой «идеальной» кривой, обеспечат более высокое качество бетона. Однако производственные задачи формулируются иначе: в каком соотношении смешать мелкий запол-

нитель (песок) с крупным (щебнем или гравием), чтобы получить смесь, например, с наименьшей пустотностью, или в каком соотношении смешать заполнители с разными характеристиками с аналогичной целью.

Новый виток развития в вопросах обеспечения плотности упаковки материалов с разной дисперсностью пришелся на 70–80-е гг. прошлого века, когда параллельно сформировались два направления исследования гранулометрических систем: разработка метода дискретного элемента и линейная модель плотности упаковки [4–7]. В первом случае используется компьютерное представление частиц, задаются силы поверхностного взаимодействия и далее исследуется поведение системы на основе законов Ньютона. Во втором случае вводится понятие доминирующего класса, виртуальной плотности упаковки, а взаимодействие частиц приводит к их раздвижке и разрыхлению. Первый метод ограничен небольшим количеством используемых в расчете фракций заполнителей. Второй метод позволяет получить аналитические уравнения для плотности упаковки зерен различных фракций заполнителей, что делает его привлекательным для применения в решении производственных задач [5, 6].

По нашему мнению, наиболее удачной для решения задач, связанных с оптимизацией состава, является модель линейной плотности упаковки. Предложенная авторами линейная модель позволяет оценить значение плотности упаковки по заданной гранулометрической кривой компонентов смеси. Однако, как показывает сравнение теоретических и экспериментальных данных, линейная модель не способна учесть процесс формирования структуры бетона и значения плотности упаковки частиц. Например, в линейной модели плотности упаковки нельзя учесть отличие виброуплотнения и вибропрессования бетонных изделий, хотя на практике эти режимы приводят к различным значениям пустотности смеси. В цикле работ зарубежных ученых [2] область применения модели линейной плотности упаковки была значительно расширена путем введения в нее так называемого «индекса компактности», эмпирически определяемого параметра, зависящего от процесса упаковки смеси. Получившуюся модель авторы назвали «модель упаковки с уплотнением» (Compressible Packing Model, СРМ). Данная модель представляет интерес с практической точки зрения, потому что позволяет описать эффект «разрыхления» крупной фракции заполнителя мелкими частицами и эффект «упорядочивания в пограничном слое» мелкой фракции вокруг крупных частиц. Суть эффектов «разрыхления» и «упорядочивания» представлена на рис. 1. Частицы мелкой фракции, вклиниваясь между крупными частицами, приводят к увеличению пустотности конечной смеси, «разрыхляя» исходную смесь (без мелкой фракции). При добавлении крупной частицы в область, занимаемую мелкой фракцией, мелкие частицы упорядочиваются вблизи поверхности крупной, что также может привести к увеличению пустотности дисперсных частиц.

Таким образом, достижение рационального соотношения заполнителей в мелкозернистом бетоне – это существенная предпосылка для получения композиционного материала со стабильными характеристиками качества. А модернизация аналитического метода расчета состава бетонной смеси с возможностью учета в ней соотношения дисперсных материалов до нескольких фракций, а также возможность дополнения модели СРМ исходными

данными, учитывающими в том числе толщину обмазки зерен дисперсных материалов, позволит с большей точностью и достоверностью оценивать особенности формирования структуры бетона.

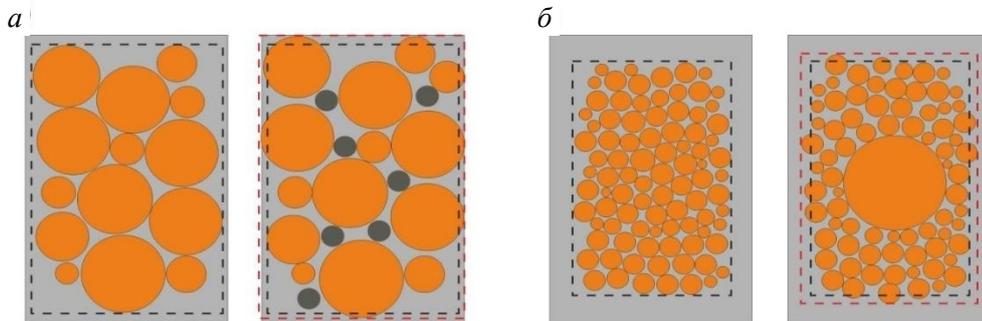


Рис. 1. Эффект разрыхления крупной фракции мелкими частицами (а); эффект упорядочивания мелкой фракции вблизи поверхности крупной частицы (б). Черной пунктирной линией показан объем смеси до введения мелких частиц в случае (а) и крупной частицы в случае (б), красной пунктирной линией показан конечный объем [4–6]

С этой целью, совместно со специалистами из инновационного центра «Сколково» [5], было предложено использовать модернизированную модель плотности упаковки компонентов бетона СРМ, учитывающую: индекс компактности дисперсных материалов K , полидисперсность системы, коэффициенты взаимодействия дисперсных частиц (функции α , функция β) и критический диаметр раздвижки зерен x_0 . На рис. 2 схематично представлено взаимодействие зерен заполнителей. Состав бетонной смеси проектируется исходя из заданной прочности бетона.

Взаимодействие зерен: разрыхление и раздвижка

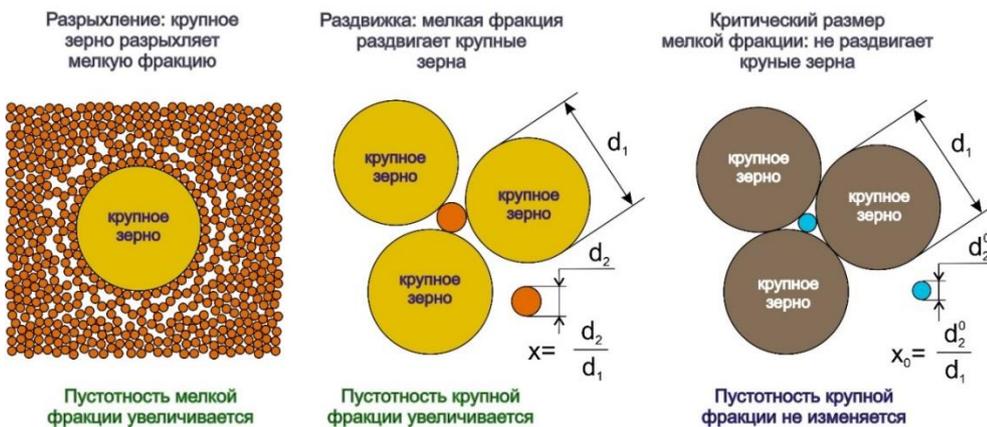


Рис. 2. Эффект разрыхления мелкой фракции крупной частицей (слева), эффект раздвижки крупных зерен мелкой частицей (середина) и определение критического диаметра раздвижки (справа) [6]

В работе был использован алгоритм калибровки модели СРМ, применимый для любого сыпучего материала, на основе экспериментальных данных по насыпной и истинной плотностям. Основная задача предложенного алгоритма состоит в том, чтобы однозначно сопоставить любой многокомпонентный материал и эквивалентный набор модельных бидисперсных материалов с определенными коэффициентами взаимодействия и единой виртуальной плотностью упаковки, что позволит обеспечить сходимость параметров модели СРМ.

Схема расчета состава бетона с гарантированной сходимостью параметров модели представлена на рис. 3. Используя информационные технологии моделирования для расчета плотности упаковки смеси сыпучих материалов – мелкого заполнителя (отсев и песок), можно предложить расчетно-экспериментальную методику определения состава бетона, позволяющую эффективно использовать данные по гранулометрическому составу заполнителей как технологический параметр, регулирующий свойства бетонной смеси. С этой целью необходимо проектируемую бетонную смесь представить в виде двух составляющих: цементное тесто + заполнители.

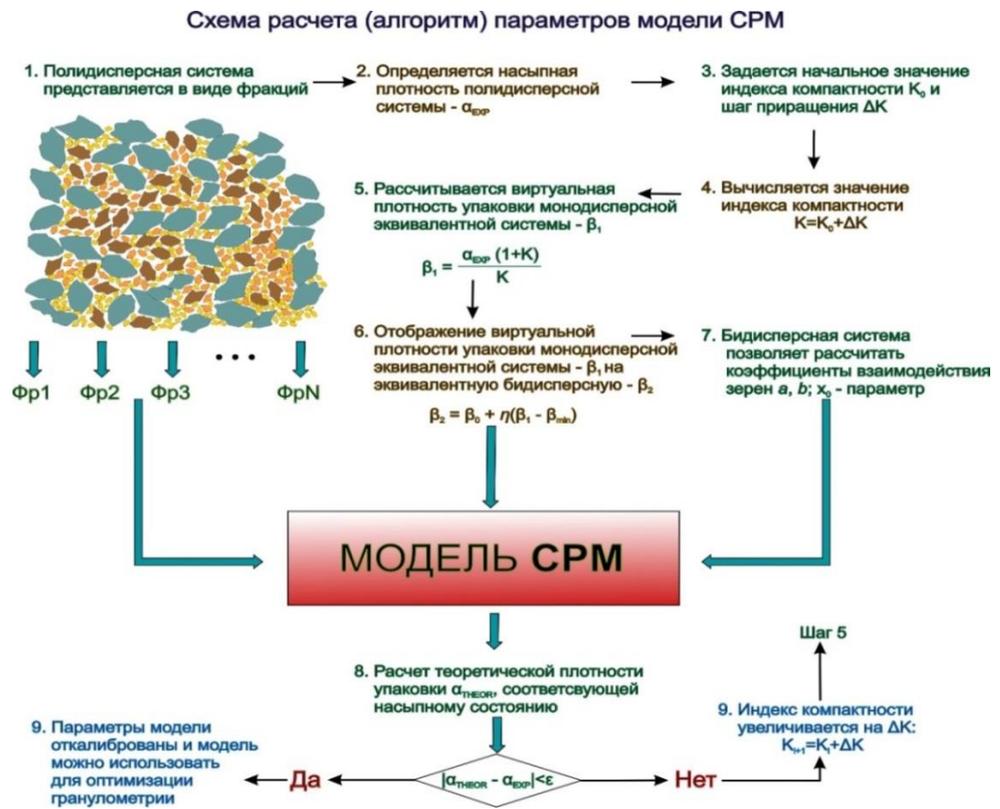


Рис. 3. Алгоритм расчета параметров модели СРМ для калибровки на конкретный материал

Объем бетонной смеси, формирующий структуру бетона, может быть представлен в виде зерен заполнителей, цементного теста, расходующегося на заполнение пустот между заполнителями, и цементного теста, требующегося

на обмазку зерен заполнителя. В соответствии с этим на основе метода абсолютных объемов расчета состава бетонной смеси для проверки сходимости расчетных и экспериментальных данных мелкозернистого бетона на лабораторных образцах был проведен комплекс исследований физико-механических свойств бетона. Изготавливались образцы размером 10×10×10 см, составы которых рассчитаны с применением программного комплекса T-sim. Для каждого состава готовилось не менее 20 образцов. Значение прочности определялось как среднеарифметическое из 5 образцов на каждый срок твердения, коэффициент вариации – не более 5 %. Образцы твердели при температуре (20 ± 5) °С, относительной влажности (95 ± 5) %. Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 26633–2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия» в лаборатории ИЦ «Стромтест» ТГАСУ. Морозостойкость определялась в соответствии с ГОСТ 10060–2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости. Общие требования. Тяжелые, мелкозернистые, легкие и плотные силикатные бетоны», водонепроницаемость и открытая пористость – по ГОСТ 12730.5 на приборе для определения воздухопроницаемости АГАМА-2Р. Составы исследуемых бетонных смесей приведены в таблице.

Составы мелкозернистого бетона

Состав	Отсев щебня, кг	Песок, кг	Цемент, кг	Вода, л	ПД (полифункциональная добавка), кг	Пластификатор, л	ОК, см	Расчетная прочность бетона, 28 сут, МПа	Величина погрешности ε	Усадка, мм/м
Контрольный	1106,6	551,5	557,6	195	–	2,23	16	49	3,51	1,9
Модифицированный	1141	588	521	180	26,05	1,56	17	67	5,25	0,8

Прочностные характеристики контрольного мелкозернистого бетона и модифицированного определялись в 3, 7, 28 и 120 сут твердения. На рис. 4 показаны сравнительные результаты набора прочности от времени твердения исследуемых составов.

Анализ экспериментальных данных (рис. 4) позволяет сделать вывод, что введение разработанной авторами комплексной полифункциональной добавки способствует увеличению прочностных показателей качества мелкозернистого бетона на 50 %. Испытание на водонепроницаемость образцов мелкозернистого бетона показало, что значительное влияние разработанной комплексной добавки на уплотнение его структуры и обеспечило мелкозернистому бетону повышенную марку по водонепроницаемости. Контрольный мелкозернистый бетон имеет марку по водонепроницаемости W8, а с ПД – до W16. Результаты испытаний представлены на рис. 5. Повышение марки по водонепроницаемости может быть объяснено снижением открытой пористости, а следовательно, и уплотнением структуры мелкозернистого бетона, что также подтверждает эффективность раз-

работанной добавки. Образцы контрольного состава бетона выдержали 5 циклов испытаний на морозостойкость по третьему ускоренному методу, что соответствует марке F₁₂₀₀, а бетон с ПД выдержал 27 циклов, что соответствует марке F₁₈₀₀. Это связано с уплотнением структуры компонентов бетона (рис. 6).

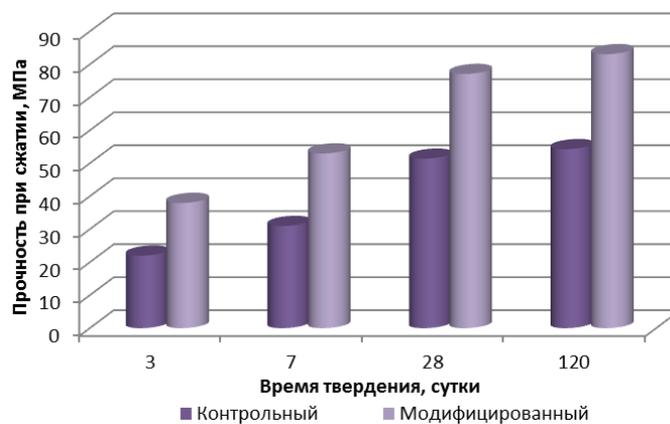


Рис. 4. Кинетика набора прочности мелкозернистого бетона

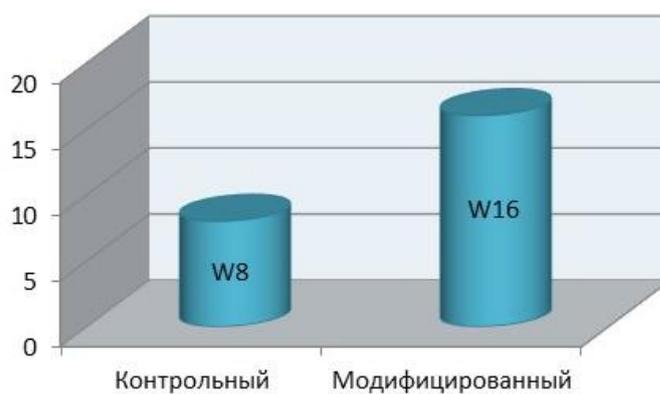


Рис. 5. Результаты испытаний на водонепроницаемость образцов мелкозернистого бетона

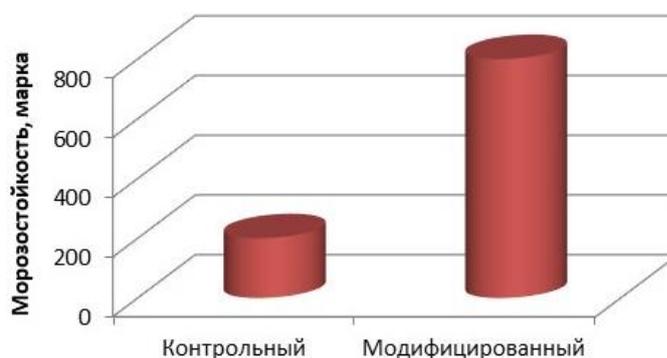


Рис. 6. Морозостойкость мелкозернистого бетона с применением разработанных комплексных добавок

Деформативные свойства мелкозернистого бетона, его трещиностойкость являются важными характеристиками для оценки его эксплуатационных свойств, особенно для высокопрочных бетонов. В работе были проведены исследования по влиянию разработанных составов бетонов с использованием полифункциональных добавок на его деформативные свойства. Испытано 2 серии образцов бетона, модифицированных и контрольных в возрасте 28 сут. Исследования проводились с использованием цифровой оптической системы VIC-3D, позволяющей получить стереоскопические изображения деформированной поверхности во всем диапазоне прочности исследуемого образца от стадии упругого деформирования до разрушения. Полученные результаты приведены на рис. 7 и 8. Для каждого образца сделано три снимка деформированной поверхности. На рис. 7 представлены сводные деформации, показывающие их максимальные значения по всему образцу. В данном случае рассматривается развитие поперечных деформаций (образование магистральных трещин), являющихся причиной разрушения образцов. Справа от каждого изображения деформированной поверхности приведена шкала значений поперечных деформаций в соответствии с цветовой гаммой.

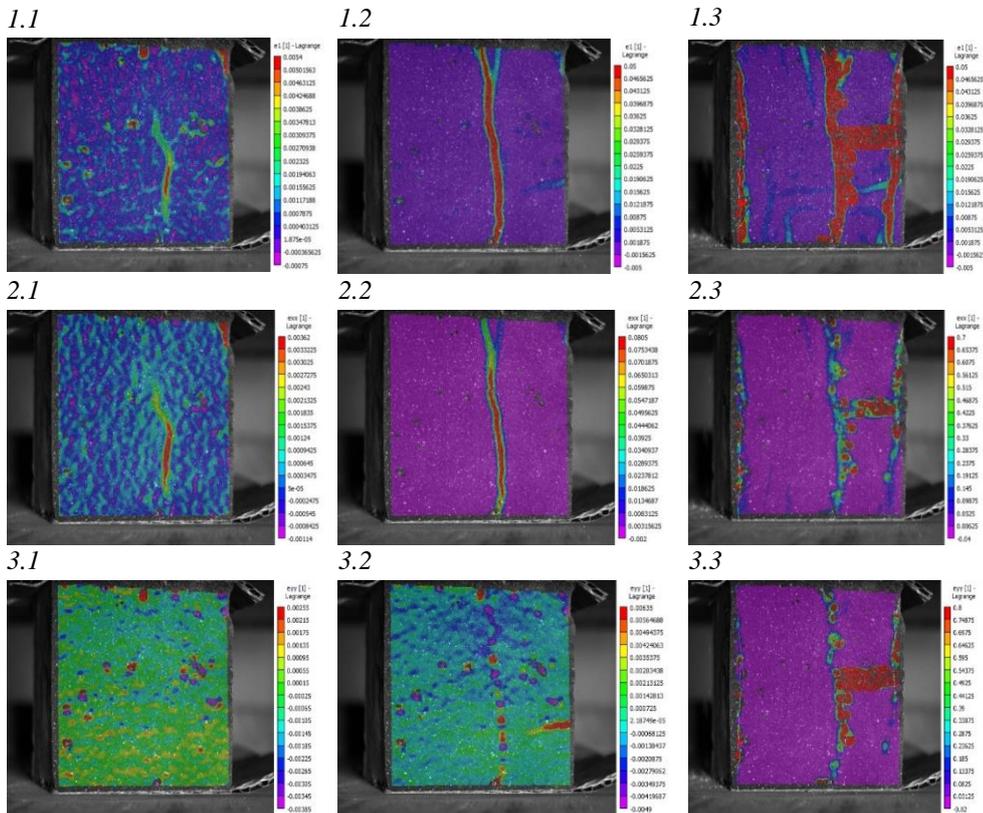


Рис. 7. Изображения деформированной поверхности контрольных образцов бетона:
 1.1, 2.1, 3.1 – снимок выполнен при нагрузках, равных 1/2 от разрушающего значения; 1.2, 2.2, 3.2 – снимок выполнен при разрушающих нагрузках; 1.3, 2.3, 3.3 – снимок характеризует стадию разрушения образцов

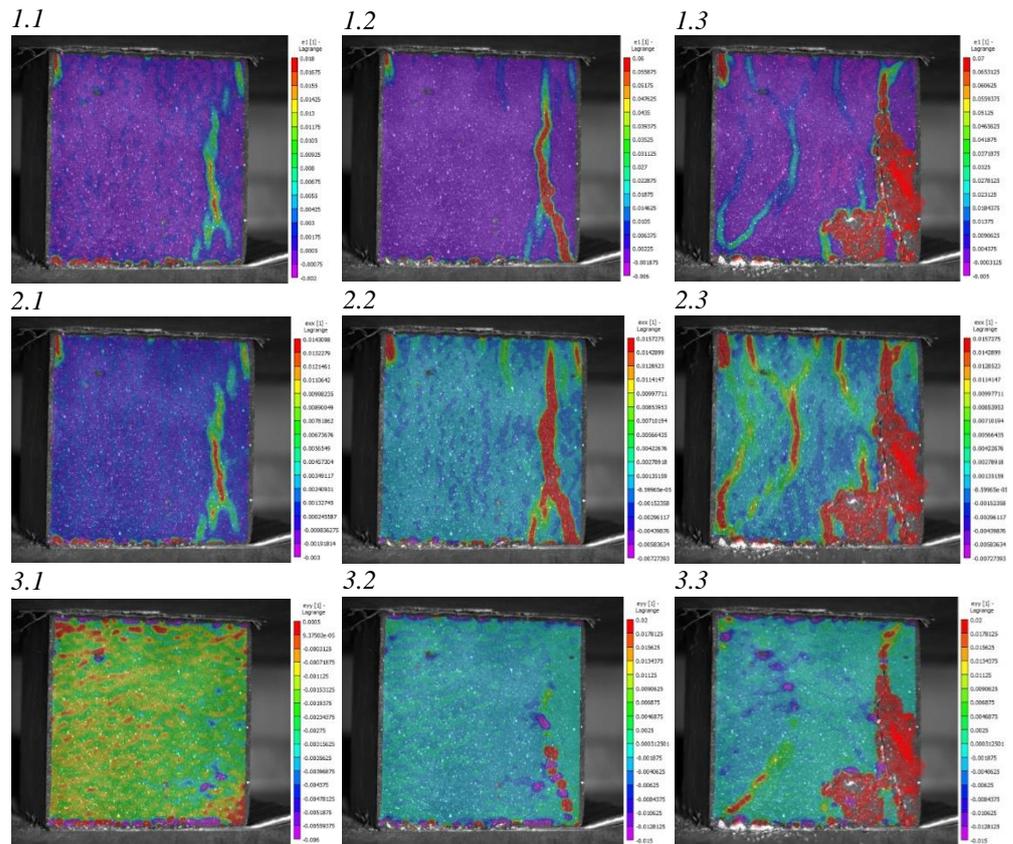


Рис. 8. Изображения деформированной поверхности модифицированного ПД образцов бетона:

1.1, 2.1, 3.1 – снимок выполнен при нагрузках, равных 1/2 от разрушающего значения; 1.2, 2.2, 3.2 – снимок выполнен при разрушающих нагрузках; 1.3, 2.3, 3.3 – снимок характеризует стадию разрушения образцов

На рис. 7, 1.1 зафиксировано начало трещинообразования, на рис. 7, 1.2 – развитие трещин, на рис. 7, 1.3 – процесс разрушения образца. Максимальное раскрытие трещин деформаций соответствует значению 0,54. С появлением трещин происходит откол боковых сторон образца примерно на 80 % от разрушения.

На рис. 8 представлены снимки образцов модифицированного бетона. Анализ снимков показывает, что трещинообразование происходит иначе в сравнении с контрольным образцом, на рисунках отсутствуют магистральные трещины, нет откольных частей. На снимках можно наблюдать множество трещин, которые в ГОСТ 29167–91 описываются как нормальное (правильное) разрушение образца. Такой вид трещинообразования является эталонным. Начало трещинообразования изображено на рис. 8, 1.1 – процесс образования трещин идет из правого нижнего угла, на рис. 8, 1.2 происходит развитие трещин – трещина перемещается в центр и стремится в правый верхний угол, процесс разрушения образцов бетона показан на рис. 8, 1.3.

Развитие упругих деформаций у образцов с добавками характеризуется формированием зоны уплотнения в средней части куба и постепенным разуплотнением среды в окрестности свободных граней кубов. Можно отметить линейную зависимость роста поперечных деформаций от напряжений до уровня средних значений нагрузок. Разрушение исследуемых кубов началось с появления микротрещин на периферийных участках. Откола боковых граней не наблюдается. Модуль упругости бетонных образцов на 40 % выше по сравнению с контрольным образцом.

Результаты проведенного исследования показали, что модифицированный бетон может работать упруго в более широком диапазоне нагрузок, что позволит обеспечить высокую трещиностойкость и деформативность бетонных смесей на основе модифицированного цемента.

Модернизация метода проектирования состава бетона на основе линейной теории плотности упаковки и толщины обмазки зерен заполнителя цементным тестом позволяет включить в расчет весь диапазон дисперсных материалов и получить заданные характеристики бетона с высокой степенью достоверности. Расчетные и экспериментальные данные показали хорошую сходимость результатов (величина погрешности для контрольного состава составила 3,51 %, для модифицированного – 5,25 %). Таким образом, проведенный комплекс физико-механических исследований показал эффективность модернизированного метода проектирования состава мелкозернистого бетона с разработанной полифункциональной добавкой. Анализируя полученные данные, можно сделать вывод об эффективности влияния разработанной добавки и способов проектирования состава МЗБ, позволяющих получить мелкозернистые бетоны с высокими показателями водонепроницаемости (до W16), прочности (до 50 %) и морозостойкости (F1800) при одновременном снижении открытой пористости и увеличении модуля упругости до 40 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Демьяненко О.В., Куликова А.А., Копаница Н.О. Оценка влияния комплексной полифункциональной добавки на эксплуатационные характеристики цементного камня и бетона // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 5. С. 139–152. DOI: <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-5-139-152>
2. De Larrard F. Concrete mixture proportioning. A scientific approach. London ; New York, 1998. P. 448.
3. Белов В.В., Смирнов М.А. Оптимизация гранулометрического состава композиций для изготовления безобжиговых строительных конгломератов // Вестник Центрального регионального отделения РААСН. Воронеж : РААСН, ВГАСУ, 2010. Вып. 9. С. 65–72.
4. Frank D., Friedemann K., Schmidt D. Optimierung der Mischung sowie Verifizierung der Eigenschaften Sauerresistente Hochleistungsbetone // Betonwerk Fertigteil-Technik. 2003. № 3. P. 30–38.
5. Резаев Р.О. Оптимизация рецептур тяжелого бетона на основе теории плотности упаковки // Дороги и мосты. 2019. Вып. 42. С. 271–288.
6. Резаев Р.О., Демьяненко О.В., Копаница Н.О. Определение максимальной плотности упаковки поликомпонентных заполнителей для бетона // Alitinform: цемент. Бетон. Сухие смеси. 2019. № 1. С. 28–38.
7. Кудряков А.И., Смирнов А.Г., Петров Г.Г., Душенин Н.П. Проектирование и использование заполнителей с оптимальной межзерновой пустотностью // Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура. 1987. № 7. С. 135.

REFERENCES

1. Dem'yanenko O.V., Kulikova A.A., Kopanitsa N.O. Razrabotka kompleksnoi polifunktsional'noi dobavki dlya tsementnogo kamnya i betona [The effect of complex multi-purpose additive on operating properties of hydrated cement and concrete]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2020. V. 22. No. 5. Pp. 139–152. (rus)
2. De Larrard F. Concrete mixture proportioning. A scientific approach. London; New York, 1998. 448 p.
3. Belov V.V., Smirnov M.A. Optimizatsiya granulometricheskogo sostava kompozitsii dlya izgotovleniya bezobzhigovykh stroitel'nykh konglomeratov [Optimisation of particle size distribution of compositions for unburnt building conglomerate production]. *Vestnik Tsentral'nogo regional'nogo otdeleniya RAASN*. 2010. No. 9. Pp. 65–72. (rus)
4. Frank D., Friedemann K., Schmidt D. Optimisierung der Mischungsowie Verifizierung der Eigenschaften Sauerresistente Hochleistungbetone. *Betonwerk Fertigteil-Technik*. 2003. No. 3. Pp. 30–38.
5. Rezaev R.O. Optimizatsiya retseptur tyazhologo betona na osnove teorii plotnosti upakovki [Optimisation of heavy concrete composition based on packing density theory]. *Dorogi i mosty*. 2019. No. 42. Pp. 271–288. (rus)
6. Rezaev R.O., Dem'yanenko O.V., Kopanitsa N.O. Opredelenie maksimal'noi plotnosti upakovki polikomponentnykh zapolnitelei dlya betona [Maximum packing density of multi-component aggregates for concrete]. *Alitinform: Tsement. Beton. Sukhie smesi*. 2019. No. 1. Pp. 28–38. (rus)
7. Kudyakov A.I., Smirnov A.G., Petrov G.G., Dushenin N.P. Proektirovanie i ispol'zovanie zapolnitelei s optimal'noi mezhzernovoi pustotnost'yu [Design and use of aggregates with optimum grain spacing]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 1987. No. 7. Pp. 135. (rus)

Сведения об авторах

Демьяненко Ольга Викторовна, ст. преподаватель, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, demyanenko.olga.v@gmail.com

Куликова Анжелика Андреевна, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, lika.panda.19@gmail.com

Копаница Наталья Олеговна, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2,

Устинов Артем Михайлович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2,

Authors Details

Olga V. Dem'yanenko, Senior Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, demyanenko.olga.v@gmail.com

Anzhelika A. Kulikova, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, lika.panda.19@gmail.com

Natal'ya O. Kopanitsa, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kopanitsa@mail.ru

Artem M. Ustinov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia