

А.С. ИНОЗЕМЦЕВ, канд. техн. наук, Е.В. КОРОЛЕВ, д-р техн. наук,
директор Научно-образовательного центра «Наноматериалы и нанотехнологии»
Московский государственный строительный университет (129337, Москва, Ярославское ш., 26)

Деформации высокопрочных легких бетонов на полых микросферах и способ их снижения*

Представлены результаты исследования деформационных свойств высокопрочных легких бетонов на полых микросферах. Предложена методика повышения трещиностойкости высокопрочных бетонов на алюмосиликатных микросферах, заключающаяся в создании на поверхности полого заполнителя активной железисто-кремнеземистой оболочки, вступающей во взаимодействие с основными компонентами и продуктами гидратации цемента, упрочняя границу раздела фаз. Показано, что полые микросферы являются перспективным наполнителем для получения легких бетонов с повышенными эксплуатационными свойствами. Установлено, что коэффициент трещиностойкости таких бетонов, оцениваемый по отношению предела прочности при изгибе к пределу прочности при сжатии, сопоставим с показателем мелкозернистых высокопрочных тяжелых бетонов и составляет более 0,1. Модифицирование поверхности полых микросфер наноразмерным модификатором на основе коллоидных растворов гидроксида железа и кремниевой кислоты для увеличения адгезии на границе раздела фаз приводит к снижению продольных и поперечных деформаций высокопрочных легких бетонов на 7–12% и 8,5–16,5% соответственно. Модуль упругости наномодифицированного высокопрочного легкого бетона составляет 6–8,5 ГПа, а коэффициент Пуассона – 0,08–0,14. Интенсивность трещинообразования высокопрочного легкого бетона при воздействии усадочных напряжений снижается на 56,9% при использовании полых микросфер, аппретированных активным наномодификатором.

Ключевые слова: высокопрочный легкий бетон, конструкционный легкий бетон, полые микросферы, наномодификатор, нанотехнологии.

A.S. INOZEMTCEV, Candidate of Sciences (Engineering) (InozemcevAS@mgsu.ru),
E.V. KOROLEV, Doctor of Sciences (Engineering), director, research and educational center «Nanomaterials and Nanotechnology»
Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavl Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

Deformations of High-Strength Lightweight Concrete Having Hollow Microspheres and Method of Reduce Them*

The paper presents the researching results of deformation properties of the high-strength lightweight concrete with hollow microspheres. The method of increasing the fracture toughness of high-strength lightweight concrete with aluminosilicate microspheres by using the modifier as a coupling agent on the surface of the microparticles of aggregate is proposed. The hollow microspheres are perspective filler for lightweight concrete with high performance characteristics; the increasing of content of the spherical microparticles in the concrete composition promotes to forming close-packed structure with low deformations. The coefficient of fracture toughness of the high-strength lightweight concrete is comparable with the same parameter for fine-grained high-strength heavy concrete (more than 0.1) and is limited by strength characteristics of micrometric particles of aggregate. It is to create the active iron-silica shell on the surface of the hollow filler, which interacts with the major components and products of the cement hydration and reinforces the phase boundary. The proposed method of modifying allows to reduce the longitudinal and transverse deformations of the high-strength lightweight concrete at 7–12% and 8.5–16.5% respectively. The elastic modulus of the high-strength lightweight concrete is 6–8.5 GPa, and Poisson's ratio is 0.08–0.14. The nanomodifier reduces the intensity of the cracking under the influence of shrinkage stresses of high-strength lightweight concrete by 56.9%.

Keywords: high-strength lightweight concrete, structural lightweight concrete, hollow microspheres, nanoscale modifier, nanotechnology.

В настоящее время общепризнанной мировой тенденцией является решение задачи по комбинированию положительных качеств тяжелых и легких цементных бетонов [1–5]. Накоплен богатый опыт [6–9] создания конструкционно-теплоизоляционных материалов, применение которых позволит снизить затраты строительства объектов промышленного и гражданского назначения. В России для создания таких бетонов предложено использовать полые стеклянные или алюмосиликатные микросферы [10–13]. Существует практика применения легких бетонов на полых микросферах в дорожных плитах при реконструкции моста через Волгу [14]. В [15, 16] показано, что увеличение доли полых микросфер в составе бетона приводит к формированию плотноупакованной структуры, в которой близко расположенные полые микросферы способствуют ветвлению трещин и повышению удельной прочности (ранее указанное свойство имело название «коэффициент конструкционного качества») за счет меньшей скорости снижения предела прочности при сжатии, чем скорость снижения средней плотности.

Currently, the task of combining the positive qualities of light and heavy cement concrete is a recognized global trend [1–5]. Extensive experience [6–9] in establishing constructional and thermal insulation materials is accumulated around the world. In Russia [10–13] the using of the hollow glass and alumina-silicate microspheres is suggested for creating the such concrete. There are practical applications of lightweight concrete with microspheres for road plates in the reconstruction of the bridge over the Volga-river [14]. Authors [15, 16] shown that increasing the volume fraction of the hollow microspheres promotes to forming the close-packed structure where micro-sized

Таблица 1
Table 1

	Содержание, % Content, %									
	C ₃ S		C ₂ S	C ₃ A			C ₄ AF			
Соединение Compound	61,5		16,1	6,2			6,2			
Вещество Substance	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl ⁻	CaSO ₄	R ₂ O	ППП/LOI
	23,4	5	4	60,4	1,1	2,8	0,003	5,4	0,75	1,7

* Печатается при поддержке гранта Президента РФ молодым ученым МК-5950.2015.8.
* Supported of the grant of the President RF for young scientists МК-5950.2015.8.

Таблица 2
Table 2

Состав Composition label	Проектная плотность, $\times 10^3 \text{ кг/м}^3$ Project density, $\times 10^3 \text{ kg/m}^3$	Содержание компонента, % мас. Content, % mas.					Σ
		Цемент Cement C	Микросферы Microspheres MS	Кварцевый песок Quartz sand QS	Минеральные добавки Mineral additives MA	Вода* Water W*	
0 Comp. 0	2,4	29,7	–	43,2	17,8	9,3	100
1; 4 ^М Comp. 1; Comp. 4 ^М	1,3	48	21,8	2,8	9,9	17,5	
2; 5 ^М Comp. 2; Comp. 5 ^М	1,4	44,6	18,5	9,2	11,4	16,2	
3; 6 ^М Comp. 3; Comp. 6 ^М	1,5	41,6	15,6	14,9	12,8	15,2	

Примечания: Состав 0 – мелкозернистый высокопрочный тяжелый бетон; состав 1–6 – высокопрочный легкий бетон; где индекс «М» обозначены составы, приготовленные на модифицированных микросферах; * с учетом расхода пластифицирующей добавки Melflux 1641F 0,8% от массы цемента.
Notes: Comp. 0 – composition of the fine-grained high-strength heavy concrete; Comp. 1–6 – composition of the high-strength lightweight concrete, where index m – composition with modified microspheres; * There is taken into account the content of the plasticizer (Melflux 1641F) 0,8% by weight of cement.

Таблица 3
Table 3

Состав Composition	Объемная доля полых микросфер v_f Volume fraction of the hollow microspheres v_f	Средняя плотность $\rho_{cp}, \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ Average density $\rho_{cp},$ $\times 10^3 \text{ kg/m}^3$	Предел прочности при изгибе $R_{изг}, \text{ МПа}$ Flexural strength $R_{fs},$ MPa	Предел прочности при сжатии (кубиковая прочность) $R_{сж}, \text{ МПа}$ Compressive strength (cube) $R_{com}, \text{ МПа}$	Коэффициент трещиностойкости $k_{тр}$ Coefficient of fracture toughness k_{ft}
0 Comp. 0	0	2,32	19,1	115,1	0,166
1 Comp. 1	0,532	1,25	4,9	45,3	0,108
2 Comp. 2	0,485	1,35	6,6	47,6	0,139
3 Comp. 3	0,438	1,46	7,8	54	0,145
4 ^М Comp. 4 ^М	0,532	1,28	5	49,7	0,101
5 ^М Comp. 5 ^М	0,485	1,37	5,7	51,4	0,11
6 ^М Comp. 6 ^М	0,438	1,48	7,3	62,1	0,116

То есть использование микросфер правильной геометрической формы в составе бетона обеспечивает экстремальную зависимость изменения удельной прочности от средней плотности. Однако, несмотря на перспективное сочетание низкой средней плотности и высокой прочности таких высокопрочных легких бетонов (ВПЛБ), для их реализации в нагружаемых конструкциях необходимо уделять особое внимание деформативным свойствам при воздействии эксплуатационных нагрузок.

Исследование деформативных свойств высокопрочного легкого бетона осуществлялось на составах, приготовленных с использованием портландцемента СЕМ I-42.5 R производства ОАО «Мордовцемент» (ГОСТ 31108–2003 «Цементы общестроительные. Технические условия»); химико-минералогический состав клинкера представлен в табл. 1.

Минеральная часть представлена кремнеземистыми фракциями различной дисперсности: кварцевый песок (фракции 0,16–0,63 мм), каменная мука (удельная по-

particles of filler provide to branching the cracks and increasing the specific strength. However, implementation of such a combination of low average density and high strength of the high-strength lightweight concrete (HSLW) in practice requires a special attention to the structure and deformations of this material under the influence of operating loads.

The Portlandcement CEM I-42.5 R («Mordovcement») was used for preparation the test samples of the concrete with the next chemical composition:

The mineral part of concrete mixture includes siliceous materials different dispersion: quartz sand (fraction – 0.16–0.63 mm), stone powder (specific surface area – 700–800 m²/kg) and microsilica (particle size – less than 10 mkm). The hollow alumina-silicate hollow microspheres was chosen as a functional filler with SiO₂ and Al₂O₃ content in the amount 58–62% and 32–38% respectively.

The physical and mechanical properties was determined using by the samples of the cubes 70 mm and prisms

верхность 700–800 м²/кг) и микрокремнезем. Дисперсный состав выбирался исходя из требования обеспечения формирования плотного каркаса за счет заполнения частицами мелких фракций пустот между частицами крупных фракций. В качестве функционального наполнителя были выбраны полые алюмосиликатные микросферы (средний диаметр частиц 70 мкм) с содержанием SiO₂ и Al₂O₃ в количестве 58–62 и 32–38% соответственно.

Определение физико-механических свойств осуществляли по ГОСТ 10180–90 «Бетоны. Методы определения прочности при сжатии и изгибе по контрольным образцам» (or ASTM C39/C39M «Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens») на образцах-кубах 70 мм и балочках 40×40×160 мм соответственно, на сервогидравлическом прессе «Advantest 9» с программным управлением. Модуль упругости и коэффициент Пуассона определяли в соответствии с ГОСТ 24452–80 «Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона» (or ASTM C469/C469M – 14 «Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression») на образцах-призмах размером 70×70×280 мм. Испытания проводились на прессе «Advantest 9» с датчиками высокой точности (универсальный электронный экстензометр) чувствительностью до 0,02 мкм (ASTM C469, ISO 6784, DIN 1048, UNI 6556)*.

Коэффициент трещиностойкости оценивали методом МИИТ [17, 18]. Две серии образцов в возрасте 28 сут выдерживались в воде в течение 6 сут. Определялся предел прочности при сжатии и изгибе для первой серии образцов в водонасыщенном состоянии (R'), для второй серии – после выдерживания в течение 24 ч в воздушно-сухих условиях при относительной влажности воздуха от 40 до 60% и температуре 30–40°C (R''). Так как под действием усадки и других факторов происходит образование различного рода локальных трещин, трещиностойкость оценивается по формуле:

$$k_{тр} = \frac{R''}{R'}$$

В процессе эксплуатации материал испытывает воздействие различных эксплуатационных факторов, которые приводят к образованию трещин и разрушению материала. Поэтому для оценки трещиностойкости высокопрочных легких бетонов использовали коэффициент трещиностойкости, характеризующий отношение предела прочности при изгибе к пределу прочности при сжатии. Исследование осуществлялось на составах высокопрочного легкого бетона (табл. 2) на полых алюмосиликатных микросферах. Так как при формировании прочной цементно-минеральной матрицы, обволакивающей микрочастицы наполнителя, процессы разрушения материала будут зависеть от характеристик сцепления цементного камня и наполнителя. Для повышения сопротивляемости к формированию и развитию трещин целесообразно использовать методы, повышающие адгезию на границе раздела фаз. В качестве модификатора предложена наноразмерная добавка «BisNanoActivus» на основе золя гидроксида железа и кремниевой кислоты [19, 20], применение которой основывается на ее нанесении на поверхность микросфер. Химическое взаимодействие, интенсифицируемое предлагаемым модификатором, обеспечит формирование дополнительных продуктов гидратации в зоне контакта (рис. 1) и упрочнит границу раздела фаз. Анализ исследуемых свойств осуществлялся в сравнении с показателями высокопрочного

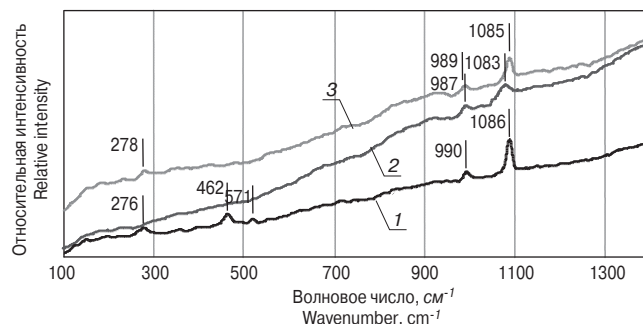


Рис. 1. Спектры комбинационного рассеяния, демонстрирующие повышение относительной интенсивности пиков при 278, 989 и 185 см⁻¹ на границе раздела цементный камень/микросферы, характерных для внутренних деформаций связей Si–O и O–Si–O, что свидетельствует об образовании дополнительных силикатных соединений: 1 – КР-спектр цементного камня; 2 – КР-спектр границы раздела цементный камень/микросфера; 3 – КР-спектр границы раздела цементный камень/модифицированная микросфера

Fig. 1. Raman spectra which demonstrate the increase of the peaks intensity at 278, 989 and 185 cm⁻¹ on the interface of cement stone/microspheres for internal deformation of the Si–O and O–Si–O bonds that indicates the formation of the additional silicate compounds: 1 – Raman spectra of cement stone; 2 – Raman spectra of the interface boundary between cement stone and microsphere; 3 – Raman spectra of the interface boundary between cement stone and nanomodified microsphere

40×40×160 mm according to ASTM C39/C39M «Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens». ASTM C469/C469M – 14 «Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression» was used for determination of Elastic modulus and Poisson's ratio by the prisms 70×70×280 mm*.

The coefficient of fracture toughness was evaluated by the MIIT method [17, 18] according to formula:

$$k_{fr} = \frac{R''}{R'}$$

where R' – flexural or compressive strength of the water-saturated samples for 6 days, MPa; R'' – flexural or compressive strength of the dried samples in condition at the relative humidity from 40 to 60% and temperature 30–40°C, MPa.

The different operational factors lead to the formation of cracks and destruction of the material when it is operated in constructions. That is why relation of tensile and compressive strength as a coefficient of fracture toughness is important characteristics for structural concrete. In this research the composition of high-strength lightweight concrete (Table 2) was used. The processes of destruction depend on adhesion properties of the cement stone to filler particles. For increasing the resistance to forming and development of the cracks need to use the methods which improve strength in the interface boundary. The nanoscale additive «BisNanoActivus» [19] based on sol of iron hydroxide and silicic acid is offered as an adhesive. The chemical interaction intensified by the proposed modifier will provide to forming additional products of cement hydration in the contact zone (Fig. 1) and will strengthen the phase boundary.

The analysis of the examined properties was carried out in comparison with the high-strength fine-grained heavy concrete. The results of studies are shown in Table 3.

The experimental data in Table 3 show that developed high-strength lightweight concrete has fracture toughness comparable with heavy concrete. It can be seen that the increasing the content of the hollow microspheres leads to

* Подробная информация о технических характеристиках используемого оборудования на сайте www.nocnt.ru/oborudovanie.
* Detailed information on the specifications of the equipment used on the site www.nocnt.ru/oborudovanie

Таблица 4
Table 4

Состав Composition	$\rho_{cp}, \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ $\rho_{cp}, \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	$R_{сж}, \text{ МПа}$ $R_{com}, \text{ МПа}$	Удельная прочность $R_{уд}, \text{ МПа}$ Specific strength $R_{sp}, \text{ МПа}$		Призменная прочность $R_{пр}, \text{ МПа}$ Prism strength $R_{pr}, \text{ МПа}$		
1 Сomp. 1	1,29	45,3	35,1		41,8		
2 Сomp. 2	1,38	49,4	35,8		44,2		
3 Сomp. 3	1,48	54,9	37		47		
4 ^м Сomp. 4 ^м	1,29	52,2	+15,2%*	40,5	+15,5%	47,4	+13,4%
5 ^м Сomp. 5 ^м	1,39	55,2	+11,7%	39,7	+11,1%	49,7	+12,4%
6 ^м Сomp. 6 ^м	1,5	65,8	+19,9%	43,9	+18,7%	56,5	+20,2%
0 Сomp. 0	2,34	122,2	52,3		93,4		

Примечание: * изменения показателя для наномодифицированного высокопрочного легкого бетона по отношению к составу с аналогичной средней плотностью без наномодификатора.
Notes: * changes for nanomodified high-strength lightweight concrete in relation to the composition with the same average density without nanomodifier.

Таблица 5
Table 5

Состав Composition	Относительные продольные деформации* $\varepsilon_1, \times 10^{-6}$ Relative longitudinal* $\varepsilon_1, \times 10^{-6}$		Относительные поперечные деформации* $\varepsilon_2, \times 10^{-6}$ Transverse deformation (respectively)* $\varepsilon_2, \times 10^{-6}$		Модуль упругости $E, \text{ ГПа}$ Elastic modulus $E, \text{ GPa}$		Коэффициент Пуассона μ Poisson's ratio μ	
1 Сomp. 1	2163		279		5,55		0,129	
2 Сomp. 2	2210		314		7,25		0,142	
3 Сomp. 3	2678		214		7,47		0,08	
4 ^м Сomp. 4 ^м	2002	-7,4%	233	-16,4%	6	+8%	0,116	-9,7%
5 ^м Сomp. 5 ^м	2053	-7,1%	278	-11,5%	7,8	+7,6%	0,136	-4,7%
6 ^м Сomp. 6 ^м	2347	-12,3%	195	-8,6%	8,52	+14,1%	0,083	+4,2%
0 Сomp. 0	1669		142		19,2		0,085	

Примечание: * ε_1 и ε_2 – при величине нагрузки 30% от разрушающей.
Notes: * ε_1 and ε_2 – at 30% load from breaking value.

мелкозернистого тяжелого бетона. Результаты исследований показаны в табл. 3.

Представленные в табл. 3 экспериментальные данные свидетельствуют о том, что разработанные высокопрочные легкие бетоны обладают сопоставимыми с высокопрочным тяжелым мелкозернистым бетоном показателем трещиностойкости, рассчитанным как отношение предела прочности при изгибе к пределу прочности при сжатии. При этом снижение средней плотности легкого бетона за счет увеличения содержания полых микросфер приводит к снижению указанного показателя, что объясняется уменьшением толщины прослойки цементного камня. Видно, что составы немодифицированного высокопрочного легкого бетона обладают большим на 6–20% (в зависимости от средней плотности) коэффициентом трещиностойкости по сравнению с образцами, изготовленными с комплексным наноразмерным модификатором. Причина подобного снижения

а decrease of this parameter. It is explained by smaller thickness of layer of cement paste at low average density of concrete. The compositions of the unmodified high-strength lightweight concrete have more fracture toughness comparable at 6–20% (depending on the average density) than composition with nanomodifier.

The reason for this decreasing of the fracture toughness is exclusively arithmetic:

$$k_{ft} = \frac{R_{fs}}{R_{com}},$$

where R_{fs} и R_{com} – flexural and compressive strength, respectively.

The interaction of the nanomodifier components with cement and hydration products (Fig. 1) provides to increasing of compressive strength at the constant of the flexural strength. Therefore this parameter can not exhaustively and adequately to characterize the fracture

Таблица 6
Table 6

Состав Composition	$R'_{изг}$, МПа R'_{is} , МПа	$R'_{сж}$, МПа R'_{com} , МПа	$R''_{изг}$, МПа R''_{is} , МПа	$R''_{сж}$, МПа R''_{com} , МПа	$k_{тр}$ по $R_{сж}$ k_{tr} from R_{com}	$k_{тр}$ по $R_{изг}$ k_{tr} from R_{is}
1 Comp. 1	4,92	44,6	1,42	41	0,919	0,289
2 Comp. 2	6,5	48,4	1,75	44,7	0,924	0,269
3 Comp. 3	7,04	53,7	1,87	49,3	0,918	0,266
4 ^м Comp. 4 ^m	5,28	50,2	2,13	45,7	0,911	0,403
5 ^м Comp. 5 ^m	6,07	52,1	2,56	47,2	0,906	0,422
6 ^м Comp. 6 ^m	7,31	60,3	3,22	56	0,928	0,44

трещиностойкости исключительно арифметическая: имеет место увеличение предела прочности при сжатии наномодифицированного высокопрочного легкого бетона за счет взаимодействия компонентов наномодификатора с цементом и продуктами его гидратации (рис. 1) при сохранении или незначительном увеличении предела прочности при изгибе. Поэтому очевидно, что подобная оценка не может исчерпывающим и адекватным образом характеризовать как трещиностойкость, так и эффективность предложенной методики ее улучшения.

Как показано в табл. 4, предложенный комплексный модификатор, нанесенный на поверхность полых микросфер, выполняя функцию адгезива, увеличивает прочностные показатели высокопрочного легкого бетона на 12–20% независимо от его средней плотности, что связано с увеличением сопротивляемости структуры бетона к формированию и развитию трещин.

Для оценки характеристик разрушения высокопрочного легкого бетона и влияния на них предложенного модификатора выполнены исследования величины деформаций при воздействии 30% разрушающей нагрузки. Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 2 и в табл. 5, где показаны графики изменения относительных продольных и поперечных деформаций от приложенной нагрузки.

Из табл. 5 видно, что деформации в продольном и поперечном направлениях у высокопрочного легкого бетона на 17–42% и в 1,37–2,21 раза больше, чем деформации мелкозернистого высокопрочного тяжелого бетона. Очевидно, что наличие менее плотных компонентов с меньшим модулем упругости, таких как полые микросферы, при возникновении нагрузок будет способствовать их разрушению, чем и объясняется существенное отличие величины деформаций высокопрочных легких бетонов. При этом видно, что составы 1 и 4^м со средней плотностью 1290 кг/м³ обладают меньшей величиной продольных и поперечных деформаций, чем составы 2, 3, 5^м, 6^м с большей плотностью. Это подтверждает гипотезу о том, что полые микросферы, являясь естественными дефектами структуры, при увеличении их количества приводят к интенсивному ветвлению трещин, развитие которых в магистральную трещину происходит при больших нагрузках.

Сравнительный анализ данных рис. 2 и табл. 5 показывает, что составы высокопрочного легкого бетона обладают меньшим по сравнению с тяжелым бетоном модулем упругости, а большее значение коэффициента Пуассона для такого бетона свидетельствует о меньшей хрупкости разрушения высокопрочных легких бетонов по сравнению с контрольными составами. Обработка поверхности микросфер модификатором на основе золя гидроксида железа и кремниевой кислоты для приготовления высокопрочных легких бетонов также положительно влияет на снижение деформаций. Упрочнение зоны контакта цементно-минеральной матрицы и полого наполнителя (табл. 3) способствует улучшению сопротивляемости сформированной структуры к деформациям. Составы 4^м, 5^м и 6^м, приготовленные с применением наномодифицированных полых микросфер, имеют на 7–12 и 8,5–16,5% меньшие деформации в продольном и поперечном направлениях к приложенной нагрузке соответственно. Это указывает на повышение модуля упругости высокопрочного легкого бетона на 7,5–14% за счет уплотне-

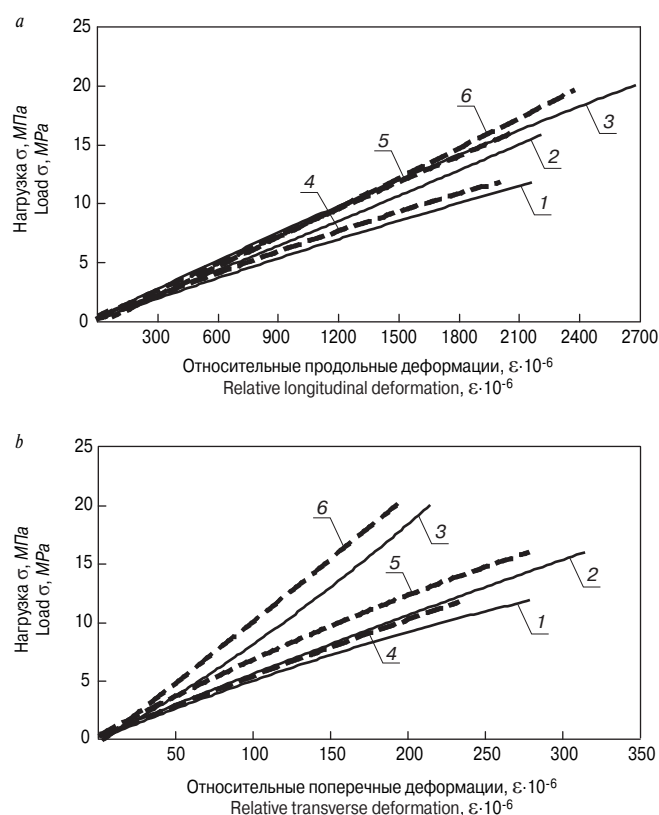


Рис. 2. Диаграммы деформирования в продольном (а) и поперечном (б) направлениях образцов высокопрочных легких бетонов и образцов наномодифицированных высокопрочных легких бетонов: 1 – ВПЛБ средней плотностью 1300 кг/м³; 2 – ВПЛБ средней плотностью 1400 кг/м³; 3 – ВПЛБ средней плотностью 1500 кг/м³; 4 – НМВПЛБ средней плотностью 1300 кг/м³; 5 – НМВПЛБ средней плотностью 1400 кг/м³; 6 – НМВПЛБ средней плотностью 1500 кг/м³

Fig. 2. The diagrams of the longitudinal (a) and transverse (b) deformations of high-strength lightweight concrete and nanomodified high-strength lightweight concrete: 1 – HSLWC with $\rho=1300$ kg/m³; 2 – HSLWC with $\rho=1400$ kg/m³; 3 – HSLWC with $\rho=1500$ kg/m³; 4 – NMHSLWC with $\rho=1300$ kg/m³; 5 – NMHSLWC with $\rho=1400$ kg/m³; 6 – NMHSLWC with $\rho=1500$ kg/m³

toughness and efficiency of the proposed method to improve it.

The table 4 shows that the proposed complex nanomodifier on the surface of microspheres performing the function of the adhesive increases strength values of high-strength lightweight concrete by 12–20% regardless of its

ния структуры вследствие взаимодействия наномодификатора с продуктами гидратации цемента и образования дополнительных связей в виде гидросиликатов кальция на границе раздела фаз (рис. 1). При этом за счет более интенсивного снижения поперечных деформаций наблюдается снижение коэффициента Пуассона на 5–10% для составов средней плотности 1300 и 1400 кг/м³.

Образование различного рода локальных трещин в процессе эксплуатации, приводящее к снижению прочности, происходит под действием усадки и многих других внешних факторов, поэтому дополнительным критерием для адекватной оценки коэффициента трещиностойкости высокопрочного легкого бетона выбран метод МИИТ [17, 18]. Экспериментальные исследования трещиностойкости по этому методу осуществлялись по показателям прочности при сжатии и изгибе, результаты которых представлены в табл. 6.

Анализ табл. 6 показывает, что возникновение внутренних напряжений (вследствие экстремального изменения эксплуатационных условий: попеременного увлажнения и высушивания), процессы образования и развития трещин в составах наномодифицированного высокопрочного легкого бетона протекают с меньшей интенсивностью. Использование предлагаемого наномодификатора способствует повышению трещиностойкости на 39,4–65,4% при расчете по изменению прочности при изгибе. Показатель трещиностойкости при расчете по изменению прочности при сжатии является неинформативным: изменение не превышает статистической погрешности и составляет 0,8–1,9%.

Таким образом, предложенная методика модифицирования поверхности полых микросфер активным по отношению к цементу и продуктам гидратации цемента наномодификатором на основе коллоидных растворов гидроксида железа и кремниевой кислоты является эффективной для снижения величины деформаций при воздействии сжимающих нагрузок за счет упрочнения границы раздела фаз цементный камень – полые микросферы. Однако, как показано выше, недостаточные по сравнению с мелкозернистыми высокопрочными тяжелыми бетонами показатели модуля упругости и коэффициента Пуассона наномодифицированных высокопрочных легких бетонов требуют поиска комбинированных решений, обеспечивающих армирующий и/или демпфирующий эффект, для снижения величины внутренних напряжений при воздействии эксплуатационных нагрузок.

На основании полученных результатов экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

- полые микросферы являются перспективным наполнителем для получения легких бетонов с повышенными эксплуатационными свойствами; увеличение объемной доли сферических микрочастиц в составе бетона способствует формированию плотноупакованной структуры, приводящей к снижению величины деформаций, вызванных интенсивным ветвлением трещин при увеличении нагрузки. Коэффициент трещиностойкости высокопрочных легких бетонов на полых микросферах, оцениваемый по отношению предела прочности при изгибе к пределу прочности при сжатии, сопоставим с показателем мелкозернистых высокопрочных тяжелых бетонов и составляет более 0,1 и ограничивается прочностными характеристиками микрометрических частиц наполнителя;

- предложена методика повышения трещиностойкости высокопрочных легких бетонов на алюмосиликатных микросферах, заключающаяся в создании на поверхности полого наполнителя активной железисто-

average density. These are due to the increase in resistance of the concrete structure to forming and develop of cracks.

For evaluation of the destruction characteristics of the high-strength lightweight concrete and influence modifier on these properties was performed the research of the deformation values at 30% of the breaking load. The results of experimental research are presented in Fig. 2 and Table 5 where diagrams of the longitudinal and transverse deformations of high-strength lightweight concrete and nanomodified high-strength lightweight concrete are shown.

It can be seen that relative longitudinal and transverse deformations of the high-strength lightweight concrete more than deformations of the fine-grained high-strength heavy concrete at 17–42% and 1.37–2.21 times. This is because the presence of microspheres with low elastic modulus in the structure. The hollow particles destroy when exposed to more low loads. But Comp. 1 and Comp. 4^m with average density 1290 kg/m³ have a less value of longitudinal and transverse deformations than other composition with higher density. This supports the hypothesis that hollow microspheres are natural structural defects and the increasing of their number provides to intensive branching of the cracks that allows to more resistance to cracking.

The Fig. 2 and Table 5 show that compositions of HSLWC have less elastic modulus than heavy concrete but more values of Poisson's ration. The modifying of the microspheres surface using by nanoscale additive has a positive effect to reduce deformations and fragility fracture of this concrete. The Comp. 4^m, 5^m and 6^m prepared with nanomodifier have less relative longitudinal and transverse deformation at 7–12 and 8.5–16.5% than without it. It allows to increase a elastic modulus at 7.5–14.1% due to compaction the structure because of the forming additional bonds of calcium hydrosilicates in the phase boundary (Fig. 1). The due to intensive reducing of the transverse deformation than longitudinal deformation the reducing of the Poisson's ration at 5–10% is observed for compositions with average density 1300 and 1400 kg/m³.

The forming the various kinds of local cracks in-service occurs under the effect of shrinkage and many other external factors therefore additional criteria for evaluation of the coefficient of fracture toughness was chosen method МИИТ. The results of experiments presented in the table 6 characterize the fracture toughness by the flexure and compressive strength.

The analysis of the table 6 show that the occurrence of internal stresses (due to extreme changes in operating conditions: variable wetting and drying), processes of forming and growth of the cracks into the nanomodified high-strength lightweight concrete occur with less intensity.

The using proposed nanomodifier allows to increase the fracture toughness at 39.4–65.4% through the calculation of flexure strength. The coefficient of fracture toughness through the calculation of compressive strength is not informative – changing of the values is not more of the statistical error (0.8–1.9%).

Thus, the proposed modification method of the surface of the hollow microspheres using by the active to cement and hydration products modifier based on the colloidal solutions of iron hydroxide and silicic acid is effective to reduce of the deformations due to the hardening of the interface boundary cement stone/hollow filler.

However the improvement of the deformation properties by using the nanosized adhesive is inadequate as compared with the values of elastic modulus and Poisson's ratio of the fine-grained high-strength heavy concrete. It

кремнеземистой оболочки, вступающей во взаимодействие с основными компонентами и продуктами гидратации цемента, упрочняя границу раздела фаз;

– установлены закономерности изменения деформаций высокопрочного легкого бетона от объемного содержания полых микросфер, показано влияние наноразмерного модификатора на модуль упругости и коэффициент Пуассона исследуемых составов. Модифицирование поверхности полых микросфер активным наноразмерным модификатором на основе золя гидроксида железа и кремниевой кислоты для увеличения адгезии на границе раздела фаз способствует снижению продольных и поперечных деформаций высокопрочных легких бетонов на 7–12 и 8,5–16,5% соответственно. Интенсивность трещинообразования высокопрочного легкого бетона при воздействии усадочных напряжений снижается на 56,9% при использовании полых микросфер, аппретированных предложенным наномодификатором;

– повышение показателей модуля упругости и коэффициента Пуассона наномодифицированных высокопрочных легких бетонов до значений, близких к высокопрочным тяжелым бетонам, требует поиска комбинированных решений, обеспечивающих армирующий и/или демпфирующий эффект.

Список литературы

1. Wilson H.S., Malhotra V.M. Development of high strength lightweight concrete for structural applications // *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. 1988. Vol. 10. Iss. 2, pp. 79–90.
2. Kılıç A., Atiş C.D., Yaşar E., Özcan F. High-strength lightweight concrete made with scoria aggregate containing mineral admixtures // *Cement and Concrete Research*. 2003. Vol. 33, Iss. 10, pp. 1595–1599.
3. Costa H., Júlio E., Lourenço J. New approach for shrinkage prediction of high-strength lightweight aggregate concrete // *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 35, pp. 84–91.
4. Korolev E.V., Smirnov V.A. Using particle systems to model the building materials // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 746, pp. 277–280.
5. Tanyıldız H. Post-fire behavior of structural lightweight concrete designed by Taguchi method // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 68, pp. 565–571.
6. Ming Kun Y.M., Bin M.H., Chin A.B., Chian Y.M. Effects of heat treatment on oil palm shell coarse aggregates for high strength lightweight concrete // *Materials & Design*. 2014. Vol. 54, pp. 702–707.
7. Daniel M., Franco Z., Álvaro P., Mauricio L. High strength lightweight concrete (HSLC): Challenges when moving from the laboratory to the field // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 56, pp. 44–52.
8. Kockal N.U., Ozturan T. Strength and elastic properties of structural lightweight concretes // *Materials & Design*. 2011. Vol. 32 (4), pp. 2396–2403.
9. Sajedi F., Shafiq P. High-strength lightweight concrete using leca, silica fume, and limestone // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2012. Vol. 37. No. 7, pp. 1885–1893.
10. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Полые микросферы – эффективный наполнитель для высокопрочных легких бетонов // *Промышленное и гражданское строительство*. 2013. № 10. С. 80–83.
11. Орешкин Д.В., Семенов В.С., Розовская Т.А. Облегченные тампонажные растворы с противоморозными добавками для условий многолетне-мерзлых пород // *Нефтяное хозяйство*. 2014. № 4. С. 42–45.
12. Орешкин Д.В. Эффективные облегченные тампонажные растворы для условий аномально низких

takes to find out combined solutions provides to the reinforcement and/or damping effect.

The results of researches in this paper allow to make a follow conclusions: The method of increasing the fracture toughness of high-strength lightweight concrete with aluminosilicate microspheres is proposed. It is to create the active iron-silica shell on the surface of the hollow filler, which interacts with the major components and products of the cement hydration and reinforces the phase boundary. The patterns of changing the deformations of the high-strength lightweight concrete on volume content of the hollow microspheres are researched. The influence of the nanomodifier on the elastic modulus and Poisson's ratio for the studied concrete is shown. The proposed method of modifying allows to reduce the longitudinal and transverse deformations of the high-strength lightweight concrete at 7–12% and 8.5–16.5% respectively. The nanomodifier reduces the intensity of the cracking under the influence of shrinkage stresses of high-strength lightweight concrete by 56.9%.

References

1. Wilson H.S., Malhotra V.M. Development of high strength lightweight concrete for structural applications. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. 1988. Vol. 10. Iss. 2, pp. 79–90.
2. Kılıç A., Atiş C.D., Yaşar E., Özcan F. High-strength lightweight concrete made with scoria aggregate containing mineral admixtures. *Cement and Concrete Research*. 2003. Vol. 33. Iss. 10, pp. 1595–1599.
3. Costa H., Júlio E., Lourenço J. New approach for shrinkage prediction of high-strength lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 35, pp. 84–91.
4. Korolev E.V., Smirnov V.A. Using particle systems to model the building materials. *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 746, pp. 277–280.
5. Tanyıldız H. Post-fire behavior of structural lightweight concrete designed by Taguchi method. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 68, pp. 565–571.
6. Ming Kun Y.M., Bin M.H., Chin A.B., Chian Y.M. Effects of heat treatment on oil palm shell coarse aggregates for high strength lightweight concrete. *Materials & Design*. 2014. Vol. 54, pp. 702–707.
7. Daniel M., Franco Z., Álvaro P., Mauricio L. High strength lightweight concrete (HSLC): Challenges when moving from the laboratory to the field. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 56, pp. 44–52.
8. Kockal N.U., Ozturan T. Strength and elastic properties of structural lightweight concretes. *Materials & Design*. 2011. Vol. 32 (4), pp. 2396–2403.
9. Sajedi F., Shafiq P. High-Strength Lightweight Concrete Using Leca, Silica Fume, and Limestone. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2012. Vol. 37. No. 7, pp. 1885–1893.
10. Inozemtcev A.S., Korolev E.V. Hollow microspheres is an efficient filler for high-strength lightweight concrete. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2013. No. 10, pp. 80–83. (In Russian).
11. Oreshkin D.V., Semenov V.S., Rozovskaya T.A. Light-weight backfill mortars with antifreeze additives for the permafrost conditions. *Neftyanoe khozyaistvo*. 2014. Vol. 4, pp. 42–45. (In Russian).
12. Oreshkin D.V. Effective lightweight tamping solutions for the conditions of abnormally low reservoir pressures and permafrost. *Neftyanoe khozyaistvo*. 2008. No. 1, pp. 50–53. (In Russian).

- пластовых давлений и многолетнемерзлых пород // *Нефтяное хозяйство*. 2008. № 1. С. 50–53.
13. Semenov V., Rozovskaya T., Oreshkin D. Properties of the dry masonry mixtures with hollow ceramics microspheres // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 860–863, pp. 1244–1247.
 14. Пономарев А.Н. Высококачественные бетоны. Анализ возможностей и практика использования методов нанотехнологии // *Инженерно-строительный журнал*. 2009. № 6. С. 25–33.
 15. Inozemtcev A.S. High-strength lightweight concrete mixtures based on hollow microspheres: technological features and industrial experience of preparation // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 71 (1). <http://iopscience.iop.org/1757-899X/71/1/012028> Open access.
 16. Иноземцев А.С. Средняя плотность и пористость высокопрочных легких бетонов // *Инженерно-строительный журнал*. 2014. № 7 (51). С. 31–37.
 17. Лещинский М.Ю. Испытание бетонов. М.: Стройиздат, 1980. 360 с.
 18. Шейкин А.Е. О структуре и трещиностойкости бетонов // *Бетон и железобетон*. 1972. № 10. С. 18–20.
 19. Гришина А.Н., Королев Е.В. Эффективная наноразмерная добавка, повышающая устойчивость пен для пенобетонов // *Вестник МГСУ*. 2012. № 10. С. 159–165.
 20. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Структурообразование и свойства конструкционных высокопрочных легких бетонов с применением наномодификатора BisNanoActivus // *Строительные материалы*. 2014. № 1–2. С. 33–37.
 13. Semenov V., Rozovskaya T., Oreshkin D. Properties of the dry masonry mixtures with hollow ceramics microspheres. *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 860–863, pp. 1244–1247.
 14. Ponomarev A.N. High quality concrete. Analysis of the opportunities and the practice of using nanotechnology methods. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2009. No. 6, pp. 25–33. (In Russian).
 15. Inozemtcev A.S. High-strength lightweight concrete mixtures based on hollow microspheres: technological features and industrial experience of preparation. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 71 (1). <http://iopscience.iop.org/1757-899X/71/1/012028> Open access.
 16. Inozemtcev A.S. Average density and porosity of high-strength lightweight concrete. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2014. No. 7 (51), pp. 31–37. (In Russian).
 17. Leshchinskii M.Yu. Ispytanie betonov [Test of the concrete]. Moscow: Stroizdat. 1980. 360 p.
 18. Sheikin A.E. On the structure and fracture of concrete. *Beton i zhelezobeton*. 1972. No. 10, pp. 18–20. (In Russian).
 19. Grishina A.N., Korolev E.V. Efficient nano-scale admixture for foam stability improvement of cellular concretes. *Vestnik MGSU*. 2012. No. 10, pp. 159–165. (In Russian).
 20. Inozemtcev A.S., Korolev E.V. Structuring and properties of the structural high-strength lightweight concretes with nanomodifier BisNanoActivus. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. No. 1–2, pp. 33–37. (In Russian).