

**Гуриненко Наталья Сергеевна**, магистр техн. наук, старший преподаватель, Белорусский национальный технический университет, г. Минск (Беларусь)

**Natalia Gurinenko**, Master of Engineering, senior lecturer, Belarusian National Technical University, Minsk (Belarus)

## **МИКРО- И УЛЬТРАКРЕМНЕЗЕМ В ВЫСОКОПРОЧНОМ БЕТОНЕ**

### **MICRO- AND ULTRA SILICA IN HIGH-STRENGTH CONCRETE**

#### **АННОТАЦИЯ**

*В составы высокопрочного бетона (наряду с высокоэффективными пластификаторами) с целью уплотнения его структуры, как необходимого условия обеспечения высокой прочности, вводят микрокремнезем ( $S_{y_0} \sim 3,0 \text{ м}^2/\text{г}$ ) в дозировке (по разным данным) от 5% до 30% массы цемента, что существенно усложняет технологию приготовления бетона. Для введения в бетон твердофазного порошкообразного микрокремнезема необходимо дополнительное оборудование бетоносмесительных установок (узлов), в частности, технологическими линиями приготовления водной суспензии, качество которой (однородность, седиментационная устойчивость) непостоянно.*

*В материале статьи показано, что равный эффект в обеспечении прочности цементного бетона может быть достигнут заменой традиционного микрокремнезема на ультрадисперсный аморфный микрокремнезем (УДМК), при дозировке последнего на порядок меньше. Описана роль исследуемого вещества (УДМК) в формировании структуры бетона (уплотнение структуры зоны контакта между цементным камнем и заполнителем, ускорение формирования кристаллогидратных новообразований и др., что приводит в дальнейшем к увеличению его плотности и прочности). С использованием стандартизированных и оригинальных методик экспериментально обоснована эффективность введения*

в конструкционный тяжелый бетон (приведены результаты исследований на образцах мелкозернистого бетона и высокопрочного бетона с крупным заполнителем) ультрадисперсного микрокремнезема ( $S_{\text{yd}} \sim 350 \text{ м}^2/\text{г}$ ) в количестве 0,05...1,0% от массы цемента, обеспечивая рост прочности на сжатие мелкозернистого тяжелого бетона до 30% и замену 10%-ной дозировки традиционного микрокремнезема на 1% от массы цемента ультрадисперсного микрокремнезема в бетоне прочностью 100...110 МПа, твердеющего в нормальных температурных условиях (15...20 °C) и с начальным нагревом (30...40 °C).

## ABSTRACT

*In compositions of high-strength concrete (along with high performance softeners) for the purpose of consolidation of its structure as necessary condition of ensuring high durability, enter micro silica ( $S_{\text{sp}} \sim 3,0 \text{ м}^2/\text{г}$ ) in a dosage (on different data) from 5% to 30% weight of the cement, which significantly complicates the preparation of concrete technology. Introduction to concrete of solid-phase powdery micro silicon requires an accessories the concrete-mixing of installations (hubs), in particular, technological lines of preparation of aqueous slurry which quality (uniformity, sedimentation stability) is changeable.*

*In material of article it is shown that the equal effect in ensuring durability of cement concrete can be reached by replacement of traditional micro silicon ultra dispersible amorphous micro silicon dioxide (UDMS), at dosage of the latter on the order of magnitude smaller. The role of the studied substance (UDMS) in formation of structure of concrete is described (consolidation of structure of a zone of contact between a cement stone and filler, acceleration of formation of crystal hydrated new growths, etc.) that leads, further, to increase in its density and durability. Using standardized and original methods experimentally proved the effectiveness of the introduction of structural heavy (high-strength fine-grained and a coarse aggregate) concrete micro silica ultra dispersible ( $S_{\text{sp}} \sim 350 \text{ м}^2/\text{г}$ ) in an amount of 0.05 ... 1.0% by weight of cement to ensure the growth of strength fine heavy concrete compression to 30% and 10% replacement of conventional dosage micro silica 1% by weight of cement of micro silicon*

*ultra dispersible in concrete strength of 100 ... 110 MPa, hardening in standard heating environments (15 ... 20 °C) and an initial heating (30 ... 40 °C).*

**Ключевые слова:** высокопрочный бетон, микрокремнезем, ультрадисперсный микрокремнезем, твердение, структура, прочность.

**Keywords:** high-strength concrete, micro silica, micro silica ultra dispersible, hardening, structure, strength.

## **ВВЕДЕНИЕ**

В современном строительном производстве все большую значимость приобретают разработки, направленные на получение высокопрочного, особо плотного, повышенной долговечности бетона. Одним из способов получения такого материала является использование в его составе дополнительных компонентов и, в частности, микрокремнезема в активной (аморфной) форме в количестве 5–30% от массы цемента [5, 6]. По классификации Ратинова-Розенберг [11], такие вещества относят к добавкам третьего класса (кристаллические затравки). Их эффективность известна (добавки-кренты) с 60-х годов XX века и в наибольшей мере реализуется в современных условиях при использовании микрокремнезема с удельной поверхностью  $S_{уд} \sim 3,0 \text{ м}^2/\text{г}$  [2, 8, 13]. Однако при этом существенно усложняется технология приготовления бетона, т. к. необходимо дополнительное техническое оснащение для введения данного вещества в состав.

В этой связи представляется перспективной замена традиционного микрокремнезема на ультрадисперсный микрокремнезем (УДМК). Особенность и уникальность применения вещества УДМК, характеризующегося огромным потенциалом поверхности ультрадисперсных частиц ( $S_{уд} \sim 350 \text{ м}^2/\text{г}$ ), заключается в достижении (как это будет показано далее) положительного результата, выраженного равенством прочности на сжатие бетона на уровне 100 ... 110 МПа при дозировке УДМК в пределах до 1% от массы цемента, вместо 10% для микрокремнезема.

Оценка эффективности ультрадисперсного микрокремнезема в цементных бетонах практически отсутствует. Вместе с тем степень его дисперсности на один-два порядка выше, чем у «традиционного» микрокремнезема, и, можно ожидать, соответственно более высокой окажется эффективность в бетоне. Учитывая, что равномерному распределению вещества ультрадисперсного микрокремнезема в объеме приготавливаемой бетонной смеси способствуют молекулы ПАВ пластифицирующих добавок [10], было необходимо исследовать эффективность их сочетания [12]. Кроме того, в исследованиях исходили из известных данных [5, 6], что сочетание высококачественного пластификатора и ультракремнезема будет достаточным для получения бетона прочностью  $f_{cm,28} \geq 100$  МПа из малоподвижных смесей. Получение же бетона прочностью более 100 МПа из литых бетонных смесей (на принципах «самоуплотняющегося» бетона), который бы в высоком темпе набирал прочность в начальные сроки твердения, требует использования комплексных добавок, с дополнительным введением ускоряюще-уплотняющего компонента, обеспечивающего этот эффект. Основные результаты экспериментальной проверки изложенного представлены в материале настоящей статьи.

## **РОЛЬ АМОРФНОГО КРЕМНЕЗЕМА В ФОРМИРОВАНИИ СТРУКТУРЫ БЕТОНА**

Известно [1, 3, 4], что прочность зоны контакта (переходной зоны) между цементным камнем и заполнителем меньше прочности самого цементного камня. Добавка в бетон аморфного кремнезема приводит к уплотнению структуры контактной переходной зоны за счет реакции с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Одновременно тонкодисперсные частицы УДМК могут служить «центрами кристаллизации» вокруг которых с меньшими затратами энергии, а значит – и в более высоком темпе, формируются кристаллогидратные новообразования – продукты взаимодействия клинкерных минералов цемента с водой. Являясь своеобразной «подложкой», мельчайшие частицы УДМК катализируют процесс формирования кристаллогидратной структуры в твердеющем цементном камне, что отражается в росте темпа «набора» прочности бетоном. Очевидно также, что

появление с первых минут этого взаимодействия [7 и др.] в жидкости щелочи вызовет развитие реакции с кремнеземом, что, в свою очередь, будет способствовать повышению скорости гидролиза и гидратации трех- и двухкальциевого силиката клинкерной части цемента. Следует отметить, что связывание и перевод аморфным кремнеземом  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в нерастворимые гидросиликаты кальция требует исследований и оценки защитной способности высокопрочных бетонов по отношению к стальной арматуре, т. к. возможно ее снижение (из-за понижения с течением времени рН-фактора бетона), несмотря на рост его плотности.

Особенностью применения аморфного кремнезема является проблема равномерного распределения его вещества в объеме бетона при использовании в малом количестве от массы цемента, т. к. добавка находится в твердом (порошкообразном) состоянии. Один из путей решения этой проблемы – использование высокоэффективных пластифицирующих добавок, молекулы вещества которых обладают способностью дезагрегатирования частиц и обеспечивают условия для равномерного распределения тонкодисперсного, нерастворимого в воде, твердофазного УДМК. Вместе с тем известно, что на начальном этапе твердения бетона пластифицирующие добавки замедляют темп набора прочности, в связи с этим одной из задач исследований была оценка эффективности совместного действия сочетания «УДМК + пластификатор + ускоряюще-уплотняющий компонент». При этом исходили из того, что такой «комплекс» будет эффективен в высокопрочном бетоне из литых смесей (марки П5; расплыв – РК6). Для решения этой задачи следовало определить рациональное соотношение компонентов, которое при замене традиционного микрокремнезема на ультрадисперсный даст наибольший эффект.

## **ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ**

В исследованиях использовали материалы со следующими характеристиками.

В качестве вяжущего вещества использован портландцемент марки ПЦ 500 – по ГОСТ 10178, соответствующий классу СЕМ I 42,5 N по СТБ ЕН 197–1 (примерный минералогический

состав:  $C_3S \sim 58,4\%$ ,  $C_2S \sim 18,9\%$ ,  $C_3A \sim 5,57\%$ ,  $C_4AF \sim 13,3\%$ );  $K_{нр} = 0,25$ , со сроками схватывания: начало – 2 ч 10 мин, конец – 3 ч 50 мин.

Крупный заполнитель для бетона – щебень гранитный (Микашевичи) фракций 5–10 и 5–20 мм; прочностью (по дробимости)  $\geq 110$  МПа, насыпной плотностью:  $\rho_0 \sim 1380$  кг/м<sup>3</sup> и 2410 кг/м<sup>3</sup>; плотностью зерен:  $\rho_3^0 \sim 2700$  кг/м<sup>3</sup>, соответствующий требованиям ГОСТ 8267–93.

Крупный заполнитель для бетона – щебень кубовидный фракции 2–4; 4–6 мм, прочностью (по дробимости)  $\geq 110$  МПа, насыпной плотностью:  $\rho_0 \sim 1400 \dots 1420$  кг/м<sup>3</sup>; плотностью зерен:  $\rho_3^0 \sim 2700$  кг/м<sup>3</sup>, соответствующий требованиям СТБ 1311–2002.

Мелкий заполнитель – природный (мытый) песок; с модулем крупности:  $M_k \sim 2,6–2,8$ ; насыпной плотностью:  $\rho_0 = 1550$  кг/м<sup>3</sup>, плотностью зерен  $\rho_3^0 \sim 2650$  кг/м<sup>3</sup>; соответствующий требованиям ГОСТ 8736–93.

Вода для затворения и последующего твердения бетона, соответствующая требованиям СТБ 1114–98 и ГОСТ 23732–2011.

Сульфат натрия ( $Na_2SO_4$ ; СН) кристаллизационный, по ГОСТ 21458–75.

Сульфат алюминия ( $Al_2(SO_4)_3$ ; СА) по ГОСТ 12966–85.

В качестве пластификатора использовали «Стахемент 2000» – пластифицирующую добавку для бетонных смесей и растворов отечественного производства. По эффективности пластифицирующего действия относится к пластифицирующим добавкам I группы согласно СТБ 1112–98 (суперпластификаторы с повышенным водоредуцирующим эффектом). Сертификат соответствия требованиям СТБ 1112–98 «Добавки для бетонов» № ВУ /11203.1.3 ГА 1764. В исследованиях использовали водный раствор добавки 35%-ной концентрации.

Микрокремнезем – в соответствии с требованиями СТБ EN197–1–2007 с содержанием аморфного диоксида кремния не менее 85 % по массе; потери при прокаливании не более 4,0 %; удельная поверхность (по методу БЭТ)  $\sim 15,0$  м<sup>2</sup>/г

(при использовании приборов типа «ПСХ»  $S_{уд}^{МК} \sim 3,0 \text{ м}^2/\text{г}$  или  $30\,000 \text{ см}^2/\text{г}$ ).

Ультрадисперсный микрокремнезем, соответствующий ТУ 2168–002–14344269–09 «Ковелос» (диоксид кремния осажденный) с характеристиками, приведенными в таблице 1. Для затворения цемента использовали питьевую водопроводную воду.

Таблица 1

### Характеристики ультрадисперсного микрокремнезема

Показатель	Фактически
Внешний вид и цвет	Белый рыхлый порошок
Запах	Не выражен
Массовая доля диоксида кремния (в сухом остатке), %	98
Массовая доля воды, %	6
Массовая доля растворимого Fe, %	0,1
Массовая доля сульфатов, %	1,8
Площадь удельной поверхности, $\text{м}^2/\text{г}$	350
pH (5%-ная водная суспензия)	6,1
Насыпная плотность при 20 °С, г/л	55

### КИНЕТИКА ТВЕРДЕНИЯ И ПРОЧНОСТЬ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА С ДОБАВКАМИ

На начальном этапе исследований прежде, чем приступить к экспериментам с высокопрочным бетоном, выявили влияние ультрадисперсного микрокремнезема на кинетику твердения и прочность на сжатие и изгиб (в статье не приводится) мелкозернистого (цементно-песчаного) тяжелого бетона на примере состава: Ц: П = 1: 3 (расход цемента (ПЦ М500 Д0) – 400 кг), при водоцементном отношении  $(В/Ц)_г = 0,5$  (табл. 2), на образцах-балочках (40\*40\*160 мм), изготовленных вибрированием (здесь и далее) на стандартной лабораторной виброплощадке ( $A \sim 0,5 \text{ мм}$ ;  $f \sim 50 \text{ Гц}$ ).

**Прочность на сжатие образцов мелкозернистого бетона  
(В/Ц = 0,5) в зависимости от дозировки УДМК  
и условий твердения**

Вид добавки и количество в % от МЦ	Условия изготовле- ния и хране- ния	Средняя плот- ность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность на сжатие, МПа	Средняя плот- ность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность на сжатие, МПа	Средняя плот- ность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность на сжатие		
								МПа	%**
		1 сутки		3 сутки		28 суток			
Без добавки	НВУ	2251	4,4	2260	17,3	2279	31,2	100	
0,005%SiO <sub>2</sub>		2258	5,6	2258	21,4	2246	36,4	117	
0,0125%SiO <sub>2</sub>		2239	5,7	2266	21,5	2250	34,6	111	
0,05%SiO <sub>2</sub>		2240	4,9	2260	19,4	2275	40,2	129	
0,1%SiO <sub>2</sub>		2241	4,5	2255	16,8	2262	38,3	123	
Без добавки	нагрев среды до 50 °С *	2255	14,2	2255	20,0	2263	31,1	100	
0,005%SiO <sub>2</sub>		2256	16,0	2272	22,6	2269	36,3	116	
0,0125%SiO <sub>2</sub>		2246	16,5	2257	22,9	2269	37,6	121	
0,05%SiO <sub>2</sub>		2252	14,8	2253	23,1	2269	39,8	128	
0,1%SiO <sub>2</sub>		2261	13,0	2271	18,7	2262	36,4	117	
0,2%SiO <sub>2</sub>		2270	13,8	2289	17,7	2269	36,2	116	
Без добавки	нагрев среды до 80 °С *	2250	12,0	2268	17,1	2258	30,1	96	
0,05%SiO <sub>2</sub>		2266	14,5	2275	18,3	2245	40,8	131	
0,1%SiO <sub>2</sub>		2278	12,8	2273	17,5	2274	40,6	130	
0,2%SiO <sub>2</sub>		2251	13,3	2254	17,3	2259	37,8	121	

\* остывание в тепловом агрегате

\*\* в % от прочности образцов «без добавок» в возрасте 28 суток для нормально-влажностных условий твердения



Анализ данных о влиянии ультрадисперсного микрокремнезема на кинетику твердения и прочностные свойства мелкозернистого бетона показывает, что и для нормально-влажностных условий твердения, и для варианта твердения образцов с начальным нагревом до  $t \leq 80$  °С (при «термостатировании» в первые сутки и «дозревании» в нормально-влажностных условиях) рациональна дозировка этой добавки  $\sim 0,05\%$  от массы цемента. Ее увеличение в мелкозернистом бетоне сверх указанной дозировки не сопровождается ростом прочности на изгиб (в статье не приведена) и сжатие.

Учитывая планируемое использование УДМК в виде добавки в высокопрочный бетон, на следующем этапе исследовали влияние дополнительных к нему компонентов разрабатываемой комплексной полифункциональной добавки на кинетику твердения и прочность тяжелого мелкозернистого бетона. Во всех случаях  $(B/C)_6 = 0,5$ , кроме составов с гиперпластификатором «Ст2000»; в последнем случае  $(B/C)_6 = 0,28$  (при одинаковой консистенции смеси). В таблице 3 приведены результаты экспериментальных исследований влияния на прочностные характеристики мелкозернистого бетона, соответственно, ускоряюще-уплотняющей добавки, включающей:  $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  (СН + СА); компонентов полифункциональной добавки без гиперпластификатора и полифункциональной комплексной добавки, включающей: Ст2000 + СН + СА +  $\text{SiO}_2$  (УДМК).

Анализ данных таблицы 3, относящихся к образцам мелкозернистого бетона, изготовленным на основе составов с введением монодобавки сульфата натрия (1 % СН); в сочетании его с УДМК в оптимальной дозировке (0,05 %  $\text{SiO}_2$  от МЦ), а также в комплексе: 0,5 % СН + 0,25 % СА + 0,05 %  $\text{SiO}_2$ , но без компонента-пластификатора, показывает следующее.

Во всех вариантах дозировок и условий твердения образцов комплексные добавки обеспечили больший прирост прочности мелкозернистого бетона, чем монодобавка сульфата натрия, что подтверждает эффективность разнопланового воздействия на формирование структуры цементного камня и бетона ускоряющего компонента (СН) и уплотняющего их структуру сульфата алюминия (СА) [9 и др.]. При этом общий расход вещества комплексных

добавок во всех случаях был меньше 1 % от массы цемента, что подтверждает вывод о наличии и эффективности разнопланового воздействия компонентов комплексных добавок на процессы взаимодействия цемента с водой и формирование структуры бетона, приводящее к росту его плотности и прочности.

В еще большей степени этот вывод подтверждается результатами испытаний образцов мелкозернистого бетона с комплексной полифункциональной добавкой, содержащей 1 % от массы цемента ультрадисперсного микрокремнезема: 1,5 % Ст2000+0,25 % СН+0,25 % СА+1 % SiO<sub>2</sub>, показавшими максимальный рост прочности за счет совокупности эффектов от снижения водосодержания бетона и каждого из ее компонентов, включая влияние на процессы гидратации и твердения цемента ультрадисперсного микрокремнезема УДМК.

## **КИНЕТИКА ТВЕРДЕНИЯ И ПРОЧНОСТЬ ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА С ДОБАВКАМИ**

Основной задачей, которая была решена в экспериментальных исследованиях с высокопрочным бетоном, являлась оценка возможности замены микрокремнезема в его составе на ультрадисперсный микрокремнезем, при дозировке последнего в 10 раз меньше, но без снижения прочности бетона. Реализация такого решения позволяет существенно упростить технологию приготовления высокопрочного бетона, благодаря приему введения УДМК в виде седиментационно устойчивой дисперсии с водой затворения, либо в виде водного раствора-суспензии комплексной полифункциональной добавки.

Для исследований использовали номинальный состав, приведенный в таблице 4 и обоснованный в источниках [5, 6], как обеспечивающий прочность бетона на сжатие в проектном возрасте:  $f_{cm,28} \sim 100...110$  МПа, использовании «традиционного» микрокремнезема (МК-85 или УМК-85) в дозировке 10 % от МЦ и пластификатора I-й группы – «гиперпластификатора» Ст2000 (в виде раствора 35 % концентрации) в дозировке (1...2)% от массы цемента.

Таблица 3

**Прочность на сжатие образцов мелкозернистого бетона  
в зависимости от сочетания введенных добавок  
и условий твердения**

Вид добавки и количество в % от МЦ	В/Ц	Условия изготов- ления и хране- ния	Средняя плот- ность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность на сжатие, МПа	Средняя плот- ность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность на сжатие, МПа	Средняя плот- ность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность на сжатие		
			1 сутки		3 сутки		28 сутки		МПа	%**
			1	2	3	4	5	6		
Без добавки	0,5	НВУ	2232	6,1	2239	18,2	2242	32,6	100	
1%СН			2236	8,9	2238	20,5	2243	36,1	111	
1%СН+0,05%SiO <sub>2</sub>			2235	9,2	2235	22,8	2244	39,2	120	
0,5%СН+0,05%SiO <sub>2</sub>			2263	6,9	2263	19,3	2257	38,0	117	
0,5%СН+0,25%СА+ +0,05%SiO <sub>2</sub>			2236	7,6	2247	17,6	2245	42,0	129	
Без добавки		с нагревом до 30 °С *	2239	14,7	2240	18,8	2247	33,3	102	
1%СН			2240	20,1	2239	22,1	2241	36,4	112	
1%СН+0,05%SiO <sub>2</sub>			2239	23,1	2237	25,3	2240	38,6	118	
Без добавки	0,5	с нагревом до 50 °С *	2249	16,8	2234	18,9	2248	32,2	99	
0,5%СН			2258	19,9	2249	24,0	2260	36,1	111	
1%СН			2230	22,7	2228	23,4	2252	36,4	112	
1%СН+0,05%SiO <sub>2</sub>			2256	24,8	2240	26,9	2245	38,1	117	
0,5%СН+0,05%SiO <sub>2</sub>			2239	21,3	2233	24,2	2259	37,8	116	
0,5%СН+0,25%СА+ +0,05%SiO <sub>2</sub>			2241	22,3	2247	23,7	2257	40,9	125	
0,75%СН+0,25%СА+ +0,05%SiO <sub>2</sub>			2233	24,4	2239	25,3	2229	39,6	121	

Окончание таблицы 3

1	2	3	4		5		6		
1,5%Ст2000	0,28	НВУ	2292	2,0	2263	29,6	2277	43,0	132
1,5%Ст2000+1%SiO <sub>2</sub>			2283	3,2	2263	33,2	2271	51,0	156
1,5%Ст2000+ +0,25%CH+1%SiO <sub>2</sub>			2271	3,7	2262	37,2	2267	64,4	198
1,5%Ст2000+ +0,25%CH+ 0,25%CA+1%SiO <sub>2</sub>			2284	4,4	2265	40,8	2290	72,0	221

\* остывание в тепловом агрегате

\*\* в % от прочности образцов «без добавок» в возрасте 28 суток для нормально-влажностных условий твердения

Таблица 4

**Составы бетона для исследований**

№ состава	Расход компонентов, кг:						Хим. добавка, Ст 2000, % от МЦ*	(В/Ц) б	(В/Ц) <sub>общ.</sub> или (В/(Ц+МК))б	ОК, см	
	Цемент	Песок	Кубовидный щебень крупностью мм		МК	УДМК					Вода
			2...4	4...6							
1	500	570	350	760	50	–	139	1,5**	0,278	0,253	6
2	500	570	350	760	–	5	141	1,5**	0,282	0,279	5

\* водный раствор Ср = 35 % концентрации;

\*\* в отдельных экспериментах с литыми бетонными смесями (не приведенными в статье) дозировка соответствовала 3 % раствора Ср = 35 % от массы цемента (т. е. ~ 1,05 % по сухому веществу).

Таблица 5

**Прочность на сжатие образцов высокопрочного бетона  
в зависимости от состава и условий твердения**

№ состава бетона по таблице 4	(В/Ц) <sub>б</sub> ; марка по подвижности	Условия изготовления	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность на сжатие, МПа	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность на сжатие, МПа	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность на сжатие, МПа	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность на сжатие, МПа	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность на сжатие, МПа
			1 сутки		3 сутки		7 суток		28 суток		90 суток	
			НВУ									
1 (10% МК)	0,223; П1	НВУ	2469	49,5	2473	76,2	2471	82,2	2481	105,2	2474	107,6
2 (1% УДМК)	0,263; П1		2484	47,7	2480	76,1	2458	82,1	2476	101,7	2495	105,0
1 (10% МК)	0,258; П2		2533	41,7	2519	77,2	2545	87,2	2520	107,0	2489	108,7
2 (1% УДМК)	0,282; П2		2512	44,4	2539	81,7	2541	93,4	2534	107,9	2487	109,7
1 (10% МК)	0,258; П2	нагрев среды до t = 45 °С	2420	49,2	2422	77,8	2484	83,1	2474	100,0	2487	102,4
2 (1% УДМК)	0,282; П2		2410	50,3	2426	79,2	2487	84,7	2477	101,9	2483	103,4

В таблице 5 приведены данные исследований кинетики роста и уровня прочности бетона, определенной на образцах-кубах с ребром 70 мм, которые изготавливали в 3-местных формах формированием бетонной смеси подвижностью ОК ~ 3...4 см (П1) и 6...8 см (П2) на стандартной лабораторной виброплощадке (A ~ 0,5 мм; f ~ 50 Гц).

Образцы во всех случаях распалубливали через 21...22 часа от момента изготовления; одни серии испытывали в возрасте 24 ч и через указанные в таблице 5 периоды (1, 3, 7, 14, 28 и 90 суток) твердения в нормально-влажностных условиях; другие подвергали тепловой обработке, включавшей медленный нагрев

бетона в формах до температуры ~ 30...35 °С (при температуре среды в пропарочном бачке 40...45 °С) за 2...2,5 ч и последующее термостатирование–выдерживание в тепловом агрегате 21...22 ч от момента изготовления до распалубки, при первом испытании через 24 ч и последующем «дозревании» в нормально-влажностных условиях.

Анализ экспериментальных данных таблицы 5 позволяет сделать вывод о практическом равенстве прочности бетона в проектном (и более позднем) возрасте при использовании обоих вариантов аморфного микрокремнезема. Это же относится и к кинетике ее роста, т. е. к темпу твердения бетона. Существенно также то, что при меньшей на порядок дозировке УДМК (при соблюдении условия равноподвижности бетонных смесей) и более высоком значении водоцементного отношения бетона с ним «паритет» и темпа роста, и уровня его прочности сохраняется. Это свидетельствует о более высокой эффективности влияния вещества УДМК на процессы его взаимодействия с продуктами гидролиза–гидратации цемента, следствием которых является рост плотности структуры цементного камня как основы прочности его и бетона в целом. Одновременно результаты экспериментов подтверждают возможность замены традиционного микрокремнезема в дозировке 10 % от массы цемента на ультракремнезем в дозировке 1 % от МЦ без снижения темпа твердения и уровня прочности высокопрочного бетона при твердении в нормально-влажностных условиях и с низкотемпературным нагревом во все сроки в период до 90 суток. С учетом того обстоятельства, что УДМК может быть введен в бетонную смесь на стадии ее приготовления в виде дисперсионной комплексной полифункциональной добавки, такая замена обеспечивает существенное упрощение технологии приготовления бетона по сравнению с существующей технологией с использованием традиционного микрокремнезема.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Экспериментально подтверждена (с позиции темпа роста и уровня прочности) эффективность введения в тяжелый

конструкционный (мелкозернистый и высокопрочный с крупным заполнителем) бетон разновидности аморфного кремнезема–ультрадисперсного микрокремнезема, характеризующегося повышенной удельной поверхностью ( $S_{уд} \sim 350 \text{ м}^2/\text{г}$ ).

Подтверждена возможность замены в высокопрочном бетоне «традиционного» микрокремнезема на ультрадисперсный микрокремнезем с десятикратным уменьшением дозировки ( $\sim 1\%$  от МЦ), при обеспечении равной прочности бетона, твердеющего в нормальных температурных условиях и с кратковременным разогревом до 30...40 °С.

Показана возможность использования УДМК в составе комплексной полифункциональной добавки, исследования по разработке которой с целью использования в литых бетонных смесях, включая высокопрочный бетон, завершаются и будут представлены в последующих публикациях.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Detwiler Rachel J., Monteiro Paulo J. M., Wenk Hans-Rudolf, ZhongZengqiu. Texture of Calcium Hydroxide near the Cement Paste-Aggregate Interface // Cem. And Concr. Res., 1988, Vol. 5.–Pp. 823–829.
2. Ma, J. Ultra High Performance Self Compacting Concrete / J. Ma, J. Dietz // LACER № 7. 2002.
3. Scrivener, Karen L., Crumby, Alison K., Pratt, P. L. A Study of the Interfacial Region between Cement Paste and Aggregate in Concrete // Bond. Cementitious Compos.: Symp., Boston, Mass., Dec. 2–4, 1987.–Pittsburgh (Pa), 1988.–Pp.87–88.
4. Wang Jia. Investigation of structure and properties of the Interfacial Zone between Lime Aggregate and Cement Paste. // J. Chin. Silic. Soc., 1987, № 2.–Зр. 114–121.
5. Батыновский, Э.И. Особенности технологии бетона прочностью 100–150МПа с углеродными наноматериалами / Э.И. Батыновский, В.Д. Якимович, П.В. Рябчиков // Строительная наука и техника.– 2012.– № 2.–С. 59–67.
6. Батыновский, Э.И. Особенности технологии высокопрочного бетона на отечественных материалах,

- включая наноуглеродные добавки / Э.И. Батяновский, В.Д. Якимович, П.В. Рябчиков // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр.: в 2 т.– Вып. 3.– Минск: РУП «БелНИИС», 2011.– Т. 2.– С. 53–68.
7. Батяновский, Э.И. Основы технологии изготовления бетонных и железобетонных изделий и конструкций с применением сухих бетонных смесей: Дис. докт. технич. наук: БНТУ.– Минск, 2002.– 351 с.
  8. Вавржин, Ф. Химические добавки в строительстве / Ф. Вавржин, Р. Крмча.– М.: Стройиздат, 1964.– 288 с.
  9. Гуриненко, Н.С. Кинетика твердения и свойства цементного камня с ускоряющими твердение бетона добавками / Н.С. Гуриненко, Э.И. Батяновский // Автомобильные дороги и мосты.– 2014.– № 2.– С. 90–98.
  10. Каприелов, С.С. Общие закономерности формирования структуры цементного камня и бетона с добавкой ультрадисперсных материалов. // Бетон и железобетон.– 1995.– № 4.– С. 16–20.
  11. Ратинов, В.Б. Добавки в бетон / В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг.– М.: Стройиздат, 1989.– 188 с.
  12. Добавки для бетонов. Общие технические условия: СТБ 1112–98.– Введ. 01.01.99.– Минск: Минстройархитектуры, 1998.– 24 с.
  13. Чернышов, Е.М. Модифицирование структуры цементного камня микро- и наноразмерными частицами кремнезема (вопросы теории и приложения) / Е.М. Чернышов, Д.Н. Коротких // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века.– 2008.– № 5.– С. 30–32.

## REFERENCES

1. Detwiler Rachel J., Monteiro Paulo J. M., Wenk Hans-Rudolf, ZhongZengqiu. Texture of Calcium Hydroxide near the Cement Paste-Aggregate Interface // Cem. And Concr. Res., 1988. Vol. 5. P. 823–829.
2. Ma, J. Ultra High Performance Self Compacting Concrete / J. Ma, J. Dietz // LACER2002. № 7.



3. Scrivener, Karen L., Crumbie, Alison K., Pratt, P. L. A Study of the Interfacial Region between Cement Paste and Aggregate in Concrete // *Bond. Cementitious Compos.: Symp.*, Boston, Mass., Dec. 2–4, 1987. Pittsburgh (Pa). 1988. P. 87–88.
4. Wang Jia. Investigation of structure and properties of the Interfacial Zone between Lime Aggregate and Cement Paste. // *J. Chin. Silic. Soc.* 1987. No 2. P. 114–121.
5. Batyanovskiy E. I., Yakimovich V. D., Ryabchikov P. V. *Stroitel'naya nauka i tekhnika*. 2012. № 2. pp. 59–67. (rus)
6. Batyanovskiy E. I., Yakimovich V. D., Ryabchikov P. V. *Scientific Articles «Issues of Modern Concrete and Reinforced Concrete»*. 2011. Vol. 3. Part. 2. P. 53–68 (rus).
7. Batyanovskiy E. I., *Osnovy tekhnologii betonnykh i zhelezobetonnykh izdeliy i konstruktsiy s primeneniem sykhikh betonnykh smesey: Dis. dokt. tekhnich. nayk: BNTU* [Fundamentals of technology manufacture of concrete and concrete products and structures using dry concrete mixtures: Dis. doct. techn. sc.: BNTU]. Minsk, 2002. 351 p (rus).
8. Vavrzhin F., Krmcha R. *Khimicheskie dobavki v stroitelstve* [Chemical additives in the construction]. Moscow: Stroyizdat, 1964. 288 p (rus).
9. Gurinenko N. S., Batyanovskiy E. I. *Roads and bridges*. 2014. No 2. P. 90–98. (rus).
10. Kaprielov, S. S. *Beton i zhelezobeton*. 1995. No 4. P. 16–20 (rus).
11. Ratinov V. B., Rozenberg T. I. *Dobavki v beton* [Concrete admixtures]. M.: Stroyizdat, 1989. 188 p. (rus).
12. *Dobavki dlya betonov. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [Additives for concrete. General specifications.]: STB112–98. Minsk: Minstroyarkhitektury, 1988. 24 p. (rus).
13. Chernyshov E. M., Korotkikh D. N. *Building materials, equipment, technologies of XXI century*. 2008. No 5. P. 30–32 (rus).

Статья поступила в редакцию 18.11.2016.