

**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<br>и количество в %<br>от МЦ | Условия<br>изготовле-<br>ния<br>и хране-<br>ния | Средняя плот-<br>ность, кг/м <sup>3</sup> | Прочность на<br>сжатие, МПа | Средняя плот-<br>ность, кг/м <sup>3</sup> | Прочность на<br>сжатие, МПа | Средняя плот-<br>ность, кг/м <sup>3</sup> | Прочность<br>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<br>среды до<br>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<br>среды до<br>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<br>и количество в % от<br>МЦ   | В/Ц | Условия изгото-<br>вления и хране-<br>ния | Средняя плот-            | Прочность на | Средняя плот-            | Прочность на | Средняя плот-            | Прочность |     |     |
|--|-----|---|--------------------------|--------------|--------------------------|--------------|--------------------------|-----------|-----|-----|
|  |     |   | ность, кг/м <sup>3</sup> | сжатие, МПа  | ность, кг/м <sup>3</sup> | сжатие, МПа  | ность, кг/м <sup>3</sup> | на сжатие | МПа | %** |
|  |     |   | 1 сутки                  |              | 3 сутки                  |              | 28 сутки                 |           |     |     |
| 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+<br>+0,05%SiO <sub>2</sub>  |     |   | 2236                     | 7,6          | 2247                     | 17,6         | 2245                     | 42,0      | 129 |     |
| Без добавки                                |     | с нагревом до<br>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+<br>+0,05%SiO <sub>2</sub>  |     |   | 2241                     | 22,3         | 2247                     | 23,7         | 2257                     | 40,9      | 125 |     |
| 0,75%СН+0,25%СА+<br>+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+<br>+0,25%CH+1%SiO <sub>2</sub>             |      |     | 2271 | 3,7 | 2262 | 37,2 | 2267 | 64,4 | 198 |
| 1,5%Ст2000+<br>+0,25%CH+<br>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., 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.–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. Батяновский, Э.И. Особенности технологии бетона прочностью 100–150МПа с углеродными наноматериалами / Э.И. Батяновский, В.Д. Якимович, П.В. Рябчиков // Строительная наука и техника.– 2012.– № 2.–С. 59–67.
6. Батяновский, 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.*