

## Влияние полифункциональной добавки на процесс твердения и свойства цементного бетона

Магистр техн. наук Н. С. Гуриненко<sup>1)</sup>, докт. техн. наук, проф. Э. И. Батяновский<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019  
Belarusian National Technical University, 2019

**Реферат.** В статье приведены результаты исследований, направленных на разработку новой полифункциональной добавки в бетон, обеспечивающей повышение темпа и уровня роста его прочности при снижении энергетических затрат на ускорение процесса твердения, как базы для снижения энергоёмкости производства бетонных и железобетонных изделий и конструкций. Экспериментально выявлено рациональное соотношение компонентов полифункциональной добавки от массы цемента: суперпластификатор на основе поликарбоксилатных смол (например, «Стахемент 2000» или «Реламикс ПК») – 0,5 %, ультрадисперсный микрокремнезем ( $\text{SiO}_2$ ) – 1,0 %, сульфат натрия ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), ускоритель твердения – 0,5 %, сульфат алюминия ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), уплотняющий структуру добавки, – 0,25 %. Перечисленные компоненты обеспечивают наибольший рост прочности цементного камня и конструкционного тяжелого бетона. Результаты дериватографического и рентгенофазового анализов показывают, что рост прочности базируется на образовании мелкокристаллической формы низкоосновных кристаллогидратов силикатной группы CSH, дополняющей традиционно формирующиеся при реакции трех- и двухкальциевого силиката цемента с водой –  $\text{C}_2\text{SH}$ , а также на увеличении количества новообразований за счет реакции  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  с аморфным  $\text{SiO}_2$  и этtringита  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ , образующегося за счет реакций с алюминатами цемента вещества ускоряюще-уплотняющего компонента добавки, что в совокупности обеспечивает рост плотности и прочности цементного камня. В бетоне эффект дополняется упрочнением зоны контакта поверхности заполнителя с цементным камнем за счет реакции между  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и  $\text{SiO}_2$ . Эти эффекты подтверждены ростом (до 38 %) химически связанной цементной воды в присутствии полифункциональной добавки в пробах цементного камня, характеризовавшегося наибольшей прочностью. С использованием стандартизованных методик испытаний экспериментально подтверждена эффективность полифункциональной добавки, выразившаяся в росте качественных характеристик и свойств конструкционного тяжелого бетона: прочности на сжатие – до 40–60 %, в растяжении при изгибе – до 15, снижении усадки – до 50 % и водопоглощения – в 1,5–2 раза, росте морозостойкости с марки F250 до F500, водонепроницаемости с W6–W8 до W20.

**Ключевые слова:** полифункциональная добавка, микрокремнезем, ультрадисперсный микрокремнезем, цементный камень, бетон, высокопрочный бетон, прочность, свойства

**Для цитирования:** Гуриненко, Н. С. Влияние полифункциональной добавки на процесс твердения и свойства цементного бетона / Н. С. Гуриненко, Э. И. Батяновский // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 4. С. 330–338. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-330-338>

## Influence of Polyfunctional Additive on Hardening Process and Properties of Cement Concrete

N. S. Gurinenko<sup>1)</sup>, E. I. Batyanovskiy<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The paper presents results of research aimed at developing a new semi-functional concrete additive that provides an increase in rate and level of its strength growth while reducing energy costs to accelerate hardening process, as a basis for reducing energy intensity in manufacturing of concrete and reinforced concrete products and structures. Experimentally

### Адрес для переписки

Батяновский Эдуард Иванович  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Я. Колоса, 12,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 265-95-87  
tbsm@bntu.by

### Address for correspondence

Batyanovskiy Eduard I.  
Belarusian National Technical University  
12 Ya. Kolasa str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 265-95-87  
tbsm@bntu.by

a rational ratio of components for a polyfunctional additive has been found of mass cement: a superplasticizer based on polycarboxylate resins (for example, “Stachement 2000” or “Relamiks PC”) – 0.5 %, ultradispersed microsilica ( $\text{SiO}_2$ ) – 1.0 %, sodium sulfate ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), hardening accelerator – 0.5 %, aluminum sulfate ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), sealing additive structure – 0.25 %. The mentioned components ensure the largest increase in strength of cement stone and structural heavy concrete. Results of derivatographic and X-ray phase analyses have shown that strength growth is based on formation of a fine-crystalline form of low-base crystalline silicates of CSH-silicate group, which complements traditionally formed  $\text{C}_2\text{SH}$  by the reaction of three- and two-calcium silicate cement with water, as well as it is based on an increase in the number of neoplasms due to the reaction of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  with amorphous  $\text{SiO}_2$  and ettringite  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ , being formed due to reactions with cement aluminates these are accelerating-compacting additive components, that in total provides an increase in density and strength of cement stone. While having the case with concrete, the effect is complemented by hardening the zone of contact between aggregate surface and cement stone due to the reaction between  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and  $\text{SiO}_2$ . These effects have been confirmed by growth (up to 38 %) of water which is chemically bound with cement in presence of a multifunctional additive in samples of cement stone, which is characterized by the largest strength. While using standardized testing methods, effectiveness of a multifunctional additive has been experimentally confirmed and it has been expressed in growth of quality characteristics and properties of structural heavy concrete: compressive strength – up to 40–60 %, flexural strength – up to 15 %, reduction of shrinkage – up to 50 % and water absorption – by 1.5–2 times, increase in frost resistance from brand F250 to F500, water resistance – from W6–W8 to W20.

**Keywords:** polyfunctional additive, microsilica, ultradispersed microsilica, cement stone, concrete, high strength concrete, strength, properties

**For citation:** Gurinenko N. S., Batyanovskiy E. I. (2019) Influence of Polyfunctional Additive on Hardening Process and Properties of Cement Concrete. *Science and Technique*. 18 (4), 330–338. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-18-4-330-338> (in Russian)

## Введение

Одной из важнейших задач строительной отрасли Беларуси является снижение энергопотребления в строительном производстве. При изготовлении сборных бетонных и железобетонных изделий и строительстве из монолитного бетона и железобетона эту задачу можно решить за счет использования химических и минеральных добавок. Например, тех из них, которые обеспечивают повышение темпа роста прочности бетона, позволяют снижать температуру (особенно это важно в начальный период – 24–72 ч) твердения и сокращать время подвода тепла к бетону. При этом наиболее перспективно направление по разработке комплексных добавок, в которых сочетаются разные эффекты воздействия на реагирующую систему «цемент – вода» в цементном бетоне, взаимно дополняющие друг друга. В частности, многокомпонентные вещества, составляющие которых способствуют снижению начального водосодержания, развитию процессов гидриза-гидратации цемента, зарождению кристалло-гидратных новообразований, их ускоренному образованию, а на этой основе – ускоренному формированию плотной структуры цементного камня и бетона, обеспечивают как высокий темп роста прочности бетона, так и уровень всей совокупности его физико-технических свойств.

## Материалы для исследований

В исследованиях использовали материалы: портландцемент марки ПЦ 500 по ГОСТ 10178–85, соответствующий классу СЕМ I 42,5 N по СТБ EN 197-1; компоненты полифункциональной добавки: ускоритель твердения сульфат натрия ( $\text{CH}$ ;  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) по ГОСТ 21458–75 и уплотняющий структуру цементного камня (бетона) сульфат алюминия ( $\text{CA}$ ;  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) по ГОСТ 12966–85; заполнители для бетона – щебень гранитный традиционный фракций 5–10 и 5–20 мм (ГОСТ 8267–93) и щебень кубовидный фракций 2–4 и 4–6 мм (СТБ 1311–2002); песок природный Мк ~ 2,6–2,8 (ГОСТ 8736–93); в качестве активного минерального компонента добавки – традиционный микрокремнезем МК-85 (МК), соответствующий требованиям СТБ EN 197-1–2015, и ультрадисперсный микрокремнезем (УДМК), соответствующий ТУ 2168-002-14344269–09, характеризующийся большей удельной поверхностью за счет малых размеров частиц аморфного  $\text{SiO}_2$ , а значит, и большим «реакционным» потенциалом, что подтверждают данные сравнительного гранулометрического анализа дисперсности традиционного микрокремнезема (МК) (рис. 1а) и ультрадисперсного микрокремнезема (УДМК) (рис. 1б), полученные с помощью прибора для измерения дисперсности твердофазных материалов Analysette 22, Nano Tec (Fritsch).

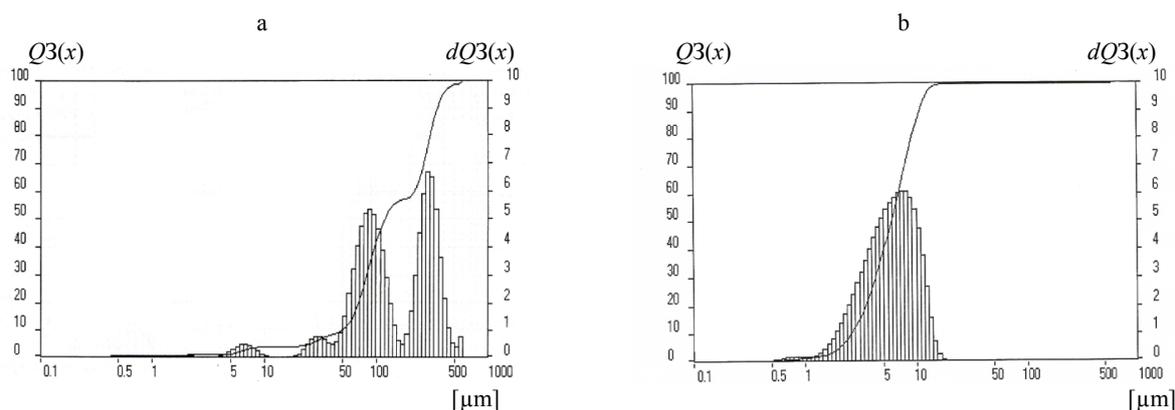


Рис. 1. Гранулометрический состав: а – микрокремнезема; б – ультрадисперсного микрокремнезема

Fig. 1. Granulometric composition: a – microsilica; b – ultradispersed microsilica

В качестве пластификаторов использовали «Стахемент 2000-М Ж 30» (Ст), выпускаемый по ТУ ВУ 800013176.004–2011, С-3 (ТУ 5745-001-97474489–2007) и «Реламикс ПК» (ТУ ВУ 1906 79156.002–2013), которые согласно СТБ 1112–98 относятся к пластифицирующим добавкам I группы.

Целью исследований было получение комплексной полифункциональной добавки, характеризующейся пластифицирующим и ускоряющим твердение бетона действием. Для ее достижения на начальном этапе исследовали кинетику роста прочности цементного камня и особенности его структурно-морфологических характеристик, выявленных с помощью рентгенофазового и дериватографического анализов, а также при оценке количества химически связываемой цементом воды и степени его гидратации.

### Свойства цементного камня

В графическом виде (рис. 2) частично приведены экспериментально выявленные изменения в кинетике твердения (в нормально-влажных условиях) образцов (20×20×20 мм; 6–12 шт. в серии) цементного камня без добавки (№ 1), с добавкой пластификатора 0,5 % Ст (№ 2), с пластификатором и микрокремнеземом 0,5 % Ст + 10 % МК (№ 3), с пластификатором и ультрадисперсным микрокремнеземом в разных количествах: 0,5 % Ст + 1,0 % УДМК (№ 4), 0,5 % Ст + 1,5 % УДМК (№ 5) и с полифункциональной комплексной добавкой, включающей пластификатор, ультрадисперсный микрокремнезем и ускоряюще-уплотняющую составляющую (СН + СА) в состав

ве 0,5 % Ст + 1,0 % УДМК + 0,5 % СН + 0,25 % СА (№ 6). Все образцы были изготовлены из теста нормальной густоты ( $K_{нг} = 0,255$  доли ед. (чистый цемент),  $K_{нг} = 0,20$  доли ед. (с пластификатором)).

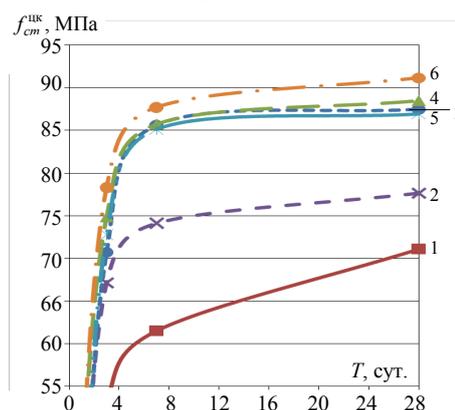


Рис. 2. Кинетика твердения цементного камня:

- № 1 – без добавок; № 2 – 0,5 % Ст;
- № 3 – 0,5 % Ст + 10 % МК; № 4 – 0,5 % Ст + 1,0 % УДМК;
- № 5 – 0,5 % Ст + 1,5 % УДМК;
- № 6 – 0,5 % Ст + 1,0 % УДМК + 0,5 % СН + 0,25 % СА

Fig. 2. Kinetics of cement stone hardening:

- No 1 – without additives; No 2 – 0.5 % Stachement (St);
- No 3 – 0.5 % St + 10 % microsilica (MC);
- No 4 – 0.5 % St + 1.0 % ultradispersed microsilica (UDMC);
- No 5 – 0.5 % St + 1.5 % UDMC; No 6 – 0.5 % St + 1.0 % UDMC + 0.5 % sodium sulfate (SS) + 0.25 % aluminum sulfate (AS)

Очевидно практическое совпадение по значениям прочности цементного камня, содержащего 10 % традиционного микрокремнезема (№ 3) и 1,0 % УДМК (№ 4) от массы цемента (при соблюдении правила прочих равных условий). Также очевиден эффект от введения в цементный камень полифункциональной комплексной добавки, которую готовили в виде водного раствора в воде затворения требуемого количества

сульфата натрия, сульфата алюминия и пластификатора, затем вводя в него в расчетном количестве ультрадисперсный микрокремнезем.

С учетом того обстоятельства, что введение с разрабатываемой добавкой аморфного кремнезема в цементный бетон способствует связыванию гидроксида кальция ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) в нерастворимые гидросиликаты кальция и может понизить за этот счет уровень щелочности среды в бетоне, провели соответствующую оценку влияния УДМК на данный показатель. Измерения проводили с помощью портативного рН-метра марки HI 83141 (табл. 1). Очевидно, что исследуемое вещество (УДМК) в целом не критически снижает рН-фактор и, соответственно, при использовании его в железобетоне не потребуются дополнительной защиты арматуры.

Одной из задач исследований, выполненных по методике, описанной в [3], была оценка влияния

разрабатываемой полифункциональной добавки на тепловыделение цемента, поскольку тепло экзотермии позволяет существенно снизить энергетические затраты на ускорение твердения бетона как в производстве сборных изделий, так и в монолитном строительстве (рис. 3).

Очевидно, что на начальную фазу процесса гидратации цемента с добавками замедляющее влияние (№ 2) оказывает вещество пластификатора, молекулы поверхностно-активной составляющей которого частично «блокируют» поверхность частиц (флокул) вяжущего и сдерживают развитие его реакций с водой затворения. Также очевидно, что введение 10 % МК (№ 3), 1,0 % УДМК (№ 4) и 1,5 % УДМК (№ 5) характеризуется практически равенством их влияния на тепловыделение цемента и саморазогрев цементного камня в оцениваемых временных пределах при соблюдении правила прочих равных условий.

Таблица 1

рН водных вытяжек образцов цементного камня  
pH of water extracts for cement stone samples

Время твердения	Без добавок	0,5 % Ст	0,5 % Ст + 10 % МК	0,5 % Ст + 1,0 % УДМК	0,5 % Ст + 1,5 % УДМК	0,5 % Ст + 1,0 % УДМК + 0,5 % СН + 0,25 % СА
1 мин	12,4	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3
2 мин	12,4	12,4	12,3	12,3	12,3	12,3
10 мин	12,55	12,55	12,44	12,41	12,40	12,41
30 мин	12,55	12,55	12,44	12,41	12,40	12,41
60 мин	12,55	12,55	12,44	12,41	12,40	12,41
2 сут.	12,73	12,73	12,71	12,65	12,65	12,50
10 сут.	12,73	12,73	12,71	12,65	12,65	12,50
20 сут.	12,70	12,71	12,69	12,65	12,63	12,55
30 сут.	12,70	12,70	12,67	12,63	12,61	12,50
60 сут.	12,70	12,70	12,67	12,63	12,61	12,50

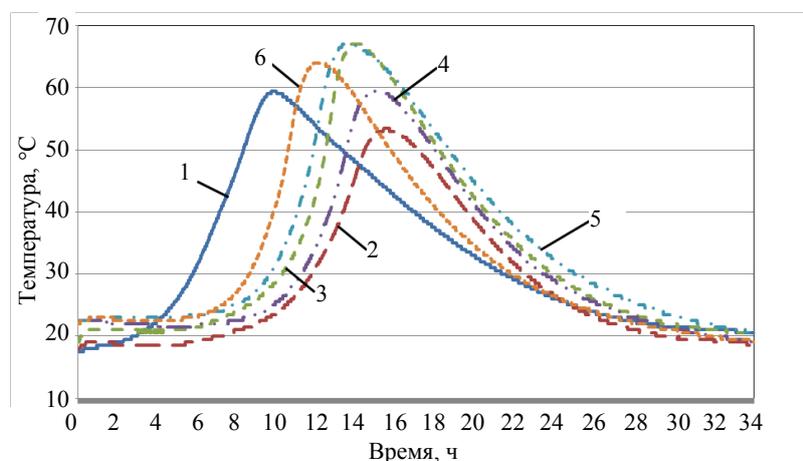


Рис. 3. Кинетика изменения температуры цементного теста: № 1–6 – то же, что на рис. 2

Fig. 3. Kinetics of temperature changes in cement paste: No 1–6 – the same as in fig. 2

Логично, что наибольший эффект по совокупности явлений темпа саморазогрева и уровня температуры обеспечило введение полифункциональной добавки (№ 6), в состав которой входит ускоряюще-уплотняющий компонент, способствующий ускорению процесса гидратации цемента. Эти результаты подтверждают данные оценки

степени гидратации цемента (табл. 2; рост в пробах с полифункциональной добавкой составил ~38 %), а также дериватографический (термогравиметрический анализатор TGA/DSC1-1/1600 HF (METTLER TOLEDO), рис. 4) и рентгенофазовый анализы (дифрактометр D8 Advance (Bruker AXS, Германия); рис. 5) проб цементного камня.

Таблица 2

Результаты определения степени гидратации цемента

Results of determining degree of cement hydration

№ пробы	Состав пробы	Масса пробы, г		Количество воды, доли ед.		Степень гидратации цемента, %
		высушенной при $t = 105\text{ }^{\circ}\text{C}$	прокаленной при $t = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$	химически связанной	связанной при полной гидратации цемента	
1	Без добавки	7,71	6,90	0,1174	0,227	51,71
2	0,5 % Ст	6,22	5,55	0,1207		53,18
3	0,5 % Ст + 10 % МК	6,22	5,43	0,1455		64,09
4	0,5 % Ст + 1,0 % УДМК	8,22	7,15	0,1490		65,62
5	0,5 % Ст + 1,5 % УДМК	8,72	7,53	0,1580		69,62
6	0,5 % Ст + 1,0 % УДМК + 0,5 % СН + 0,25 % СА	8,75	7,53	0,1620		71,37

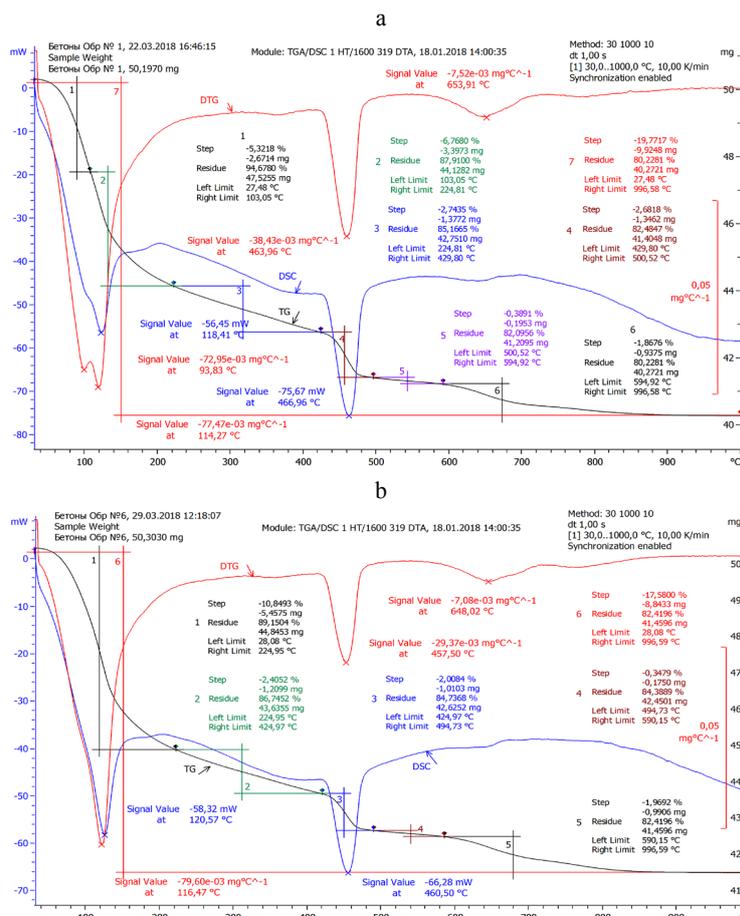


Рис. 4. Дериватографический анализ пробы «чистого» цементного камня (а) и цементного камня, содержащего 0,5 % Ст + 1,0 % УДМК + 0,5 % СН + 0,25 % СА (б) от массы цемента

Fig. 4. Derivatographic analysis for sample of “pure” cement stone (a) and cement stone containing 0.5 % St + 1.0 % UDMC + 0.5 % SS + 0.25 % AS (b) by weight of cement

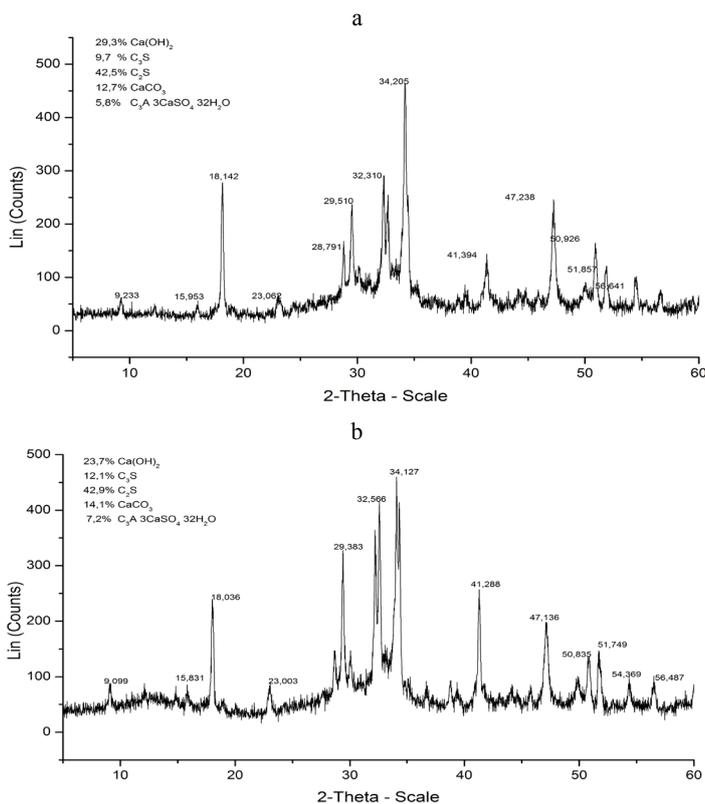


Рис. 5. Рентгенофазовый анализ пробы «чистого» цементного камня (а) и цементного камня, содержащего 0,5 % Ст + 1,0 % УДМК + 0,5 % СН + 0,25 % СА (б) от массы цемента  
 Fig. 5. X-ray phase analysis for sample of “pure” cement stone (a) and cement stone containing 0.5 % St + 1.0 % UDMC + 0.5 % SS + 0.25 % AS (b) by weight of cement

Анализ графиков DSC и DTG на рис. 4а (проб «чистого» цементного камня) с рис. 4б (проб с полифункциональной добавкой) показывает, во-первых, разницу в зоне температуры 110 °С, отражающей потери «свободной» (находящейся в поровом пространстве проб цементного камня) воды. Снижение показателя проб «чистого» камня составляет 70 мВт, а проб с добавкой 60 мВт, т. е. существенно меньше. Это свидетельствует об уменьшении объема пор в пробах цементного камня с добавкой, т. е. о росте плотности его структуры. Во-вторых, существенно уменьшилась площадь эндотермического «пика» в зоне температур (420–480) °С, отражающего разложение гидроксида кальция ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), что свидетельствует о его «связывании» аморфным  $\text{SiO}_2$  с образованием гидросиликатов кальция.

Как следствие, увеличилась площадь эндотермического «пика» в зоне температур (650–750) °С; при этом в пробах с добавкой снижается уровень минимальной температуры разложения: с 653,91 °С (проба без добавок) до 648,91 °С

(проба с добавкой), что связано с появлением низкоосновных силикатов кальция [4, 5]. Результаты рентгенофазового анализа (рис. 5) по оценке возможных изменений в морфологии продуктов гидратации цемента под влиянием веществ полифункциональной добавки подтвердили ранее полученные данные (в статье не приводятся) для ускоряюще-уплотняющего компонента (0,5 % СН + 0,25 % СА) этой добавки о появлении гидросиликатов кальция низкой основности CSH и увеличении количества этtringита. Кроме этого, отличие заключается в снижении количества  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  с 29,3 до 23,7 % для пробы с полифункциональной добавкой при уменьшении отражений клинкерных минералов цемента, что свидетельствует о росте степени его гидратации и согласуются с ранее приведенными (табл. 2) данными.

### Свойства бетона

Дальнейшие исследования проводили на тяжелом бетоне. Была разработана технология приготовления полифункциональной комплексной добавки, включающая подготовку водного раствора ускоряюще-уплотняющих компонентов  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  введением требуемого количества этих веществ в воду, подогретую до (30–35) °С, так как это оптимальная температура для растворения сульфата натрия. Затем в этот раствор вводили в расчетном количестве пластификатор, для которого указанная температура также является оптимальной. Последним компонентом в подготовленный раствор из трех указанных веществ дозировали требуемое количество ультрадисперсного микрокремнезема. Полученный раствор-дисперсию в процессе приготовления и перед применением механически перемешивали, смешивали в требуемом количестве с водой затворения и вводили в бетон. Период устойчивого сохранения свойств раствора-дисперсии в состоянии покоя (без признаков седиментации кремнезема) составлял 45–60 мин при механическом перемешивании (мешалки, барботаж сжатым воздухом) и не менее 7 сут. при ультразвуковой (кавитационной) обработке на стадии приготовления.

Оценку влияния разрабатываемой добавки (с учетом изменения соотношения компонентов

в ней) на кинетику роста и уровень прочности (сжатие и изгиб) на начальной стадии экспериментов произвели на тяжелом мелкозернистом бетоне (здесь эти данные не приводятся, так как соотносятся с данными для бетона с крупным заполнителем). Одновременно на мелкозернистом бетоне оценили важное следствие использования добавок в бетон, заключающееся в их влиянии на усадочные деформации (ГОСТ 24544–81; табл. 3), особенно при твердении цементного бетона в воздушно-сухих условиях ( $\phi \sim 40\%$ ,  $t = (20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ). Для мелкозернистого бетона эти деформации значительнее, чем для бетона с крупным заполнителем, что может сопровождаться трещинообразованием (ухудшением качества бетона).

Результаты экспериментов свидетельствуют о снижении (на  $\geq 20\%$ ) усадки бетона при замене МК на УДМК, а также практически в два раза – при использовании разрабатываемой добавки, что (как мы считаем) связано с ранее выявленным увеличением под влиянием ее вещества количества этtringита в новообразованиях цементного камня и большим количеством кристаллогидратов силикатной группы, способствующих росту его плотности. Следствием является установленное снижение усадочных деформаций.

В современных условиях ведения бетонных работ и производства сборных изделий микрокремнезем и добавки его содержащие вводятся [6–9] в основном в состав высокопрочных бетонов, а также для обеспечения повышенных характеристик в части плотности и непроницаемости «рядового» по прочности бетона ряда конструкций (изделий). В этой связи одной из

задач была 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 конструкционного бетона (для бетона прочностью до 60–70 МПа здесь материал не приводится) за счет введения УДМК в виде дисперсии с водой затворения. Не менее значимой является задача по обеспечению прочности бетона более 100 МПа [10], полученного из литых бетонных смесей ( $OK > 21$  см), которую решили применением разработанной полифункциональной добавки (в данных экспериментах с повышенным содержанием пластификатора «Реламикс ПК» (Рел) – около 1,0 % от массы цемента по сухому веществу) (рис. 6). Номинальный состав бетона: цемента – 500 кг; песок – 570 кг; щебень кубовидный фракции 2–4 – 350 кг, фракции 4–6 – 760 кг; подвижность марок П2 и П5 при  $V/C_{П2} \sim 0,28$  долей ед. и  $V/C_{П5} \sim 0,29$  долей ед. соответственно [10].

По совокупности результатов экспериментов с высокопрочным бетоном подтверждена возможность замены традиционно применяемого микрокремнезема на ультрадисперсный микрокремнезем с эффектом 10-кратного снижения расхода последнего, что позволяет упростить технологию и организацию процесса его введения в приготавливаемую бетонную смесь, а в целом – упростить технологию получения конструкционного бетона с использованием разработанной полифункциональной добавки, содержащей УДМК.

Таблица 3

Результаты определения усадки мелкозернистого бетона

Results of determining shrinkage of fine concrete

Возраст образца, сут.	0,5 % Ст + 10 % МК		0,5 % Ст + 1,0 % УДМК		0,5 % Ст + 1,0 % УДМК + 0,5 % СН + 0,25 % СА	
	$\Delta l$ , мм	$\varepsilon_{ус}$ , %	$\Delta l$ , мм	$\varepsilon_{ус}$ , %	$\Delta l$ , мм	$\varepsilon_{ус}$ , %
1	0	0	0	0	0	0
3	0,08	0,05	0,06	0,04	0,04	0,03
7	0,10	0,06	0,08	0,05	0,05	0,03
14	0,14	0,09	0,12	0,07	0,07	0,04
21	0,17	0,11	0,14	0,09	0,09	0,06
28	0,21	0,13	0,16	0,10	0,10	0,06

**Примечание.**  $\Delta l$ ,  $\varepsilon_{ус}$  – абсолютная и относительная деформации соответственно.

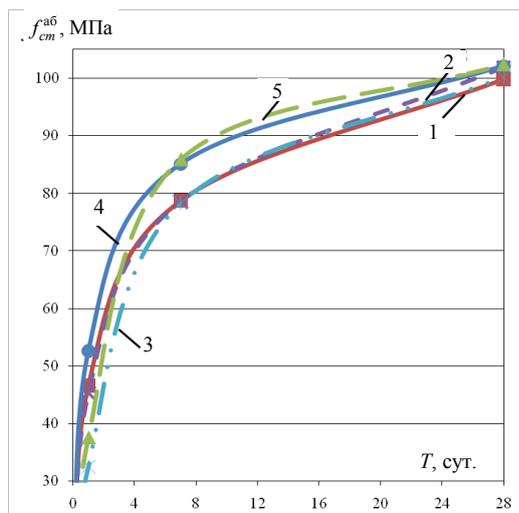


Рис. 6. Тенденция роста прочности бетона:

№ 1 – 0,5 % Рел + 10 % МК;

№ 2 – 0,5 % Рел + 1,0 % УДМК;

№ 3 – 1,0 % Рел + 1,0 % УДМК (П5);

№ 4 – 0,5 % Рел + 1,0 % УДМК + 0,5 % СН + 0,25 % СА;

№ 5 – 1,0 % Рел + 1,0 % УДМК + 0,5 % СН + 0,25 % СА (П5)

Fig. 6. Tendency of increasing concrete strength:

No 1 – 0.5 % Relamiks (Rel) + 10 % MC;

No 2 – 0.5 % Rel + 1.0 % UDMC;

No 3 – 1.0 % Rel + 1.0 % UDMC (P5);

No 4 – 0.5 % Rel + 1.0 % UDMC + 0.5 % SS + 0.25 % AS;

No 5 – 1.0 % Rel + 1.0 % UDMC + 0.5 % SS + 0.25 % AS (P5)

Исследования свойств «рядового» по прочности бетона ( $f_{cm,28} \sim (40-70)$  МПа, класс по прочности на сжатие С 25/30–С 45/55) показали, что за счет комплексного влияния веществ полифункциональной добавки на пластические свойства бетонной смеси (с сохранением равноподвижности при снижении водосодержания) и на формирование (уплотнение и упрочнение) структуры цементного камня и бетона прочность в нормально-влажностных условиях твердения повышается за первые 24 ч на 50–80 % и к проектному (28 сут.) возрасту – на 40–60 %, что позволяет на 10–15 % снизить расход цемента. При твердении с начальным разогревом бетона до  $t \sim (40-45)$  °С и последующим выдерживанием в условиях «термоса» (при медленном – до 2 °С/ч – остывании среды в тепловом агрегате) прочность за 12–16 ч достигает уровня 70–90 % от проектной (при больших значениях для бетона из жестких смесей), что обеспечивает снижение в 1,5–2 раза энергозатрат на тепловую обработку изделий.

Одновременно с повышением прочности бетона снижается его водопоглощение ( $\leq 2,0$  %), растет водонепроницаемость (до марки W20) и морозостойкость (до марки F500). В соот-

ветствии с увеличением непроницаемости бетона обеспечивается высокая степень защиты стальной арматуры, определенная экспериментальным электрохимическим методом контроля (по СТБ 1168–99).

## ВЫВОДЫ

1. Разработаны теоретические и экспериментальные аспекты получения новой полифункциональной добавки в бетон, обеспечивающей повышение темпа и уровня его прочности в проектном возрасте до 40–60 % при одновременном снижении энергетических затрат на ускорение процесса твердения в 1,5–2 раза.

2. Экспериментально обоснованы рациональное соотношение компонентов разработанной полифункциональной добавки и ее влияние на кинетику твердения цементного бетона, а результатами дериватографического и рентгенофазового анализов показано, что этот эффект базируется на образовании в цементном камне мелкокристаллической формы кристаллогидратов силикатной группы CSH, дополняющей традиционно формирующиеся при реакции трех- и двухкальциевого силиката с водой –  $C_2SH$ , а также на увеличении количества новообразований за счет реакции  $Ca(OH)_2$  с аморфным  $SiO_2$  и эттрингита  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ , образующегося за счет реакций с алюминатами вещества ускоряюще-уплотняющего компонента добавки. В бетоне эффект дополняется упрочнением зоны контакта поверхности заполнителя с цементным камнем за счет реакции между  $Ca(OH)_2$  и  $SiO_2$ , что подтверждено ростом (до 38 %) химически связанной воды цементом в присутствии полифункциональной добавки.

3. Имеет практическую значимость экспериментально подтвержденное равенство эффекта по влиянию на прочность бетона традиционно применяемого микрокремнезема с дозировкой в бетон 10 % и более от массы цемента и ультрадисперсного микрокремнезема в дозировке 1,0 % от массы цемента. При этом существенно упрощается технология приготовления бетона, поскольку ультрадисперсный микрокремнезем можно вводить в бетон как индивидуально с водой затворения, так и в составе разработанной полифункциональной добавки.

4. Результаты экспериментальных исследований подтверждены опытно-производственной апробацией на КУП «Управление дорожно-

мостового строительства и благоустройства Мингорисполкома» (г. Минск) и на Заводе железобетонных мостовых конструкций ОАО «Дорстройиндустрия» (г. Фаниполь).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гуриненко, Н. С. Основы эффективности ультрадисперсного микрокремнезема в цементном бетоне / Н. С. Гуриненко, Э. И. Батяновский // Проблемы современного строительства: сб. науч.-техн. статей, материалы науч.-техн. конф., Минск, 30 мая 2018 г. / Белор. нац. техн. ун-т; редкол.: В. Ф. Зверев [и др.]. Минск, 2018. Ч. 2. С. 256–264.
2. Гуриненко, Н. С. Об эффективности применения в цементном камне и бетоне полифункциональной добавки с ультрадисперсным микрокремнеземом / Н. С. Гуриненко, Э. И. Батяновский // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров: сб. науч. статей XXI Междунар. науч.-метод. семинара, Брест, 25–26 окт. 2018 г.: в 2 ч. / Брест. гос. техн. ун-т; редкол.: Н. Н. Шалобыта [и др.]. Брест, 2018. Ч. 2. С. 14–22.
3. Бибик, М. С. Оценка кинетики твердения цементного камня с использованием термодатчиков системы «Термохрон» / М. С. Бибик, В. В. Бабицкий // Строительная наука и техника. 2010. № 4. С. 23–26.
4. Тейлор, Х. Химия цемента. Пер. с англ. / Х. Тейлор. М: Мир, 1996. 500 с.
5. Чистяков, В. В. Интенсификация твердения бетона / В. В. Чистяков, Ю. М. Дорошенко, И. Г. Гранковский; под ред. А. А. Пашенко. Киев: Будівельник, 1988. 118 с.
6. Каприелов, С. С. Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива / С. С. Каприелов, В. Г. Батраков, А. В. Шейнфельд // Бетон и железобетон. 1999. № 6. – С. 6–10.
7. Effects of the Chemical Structure on the Properties of Polycarboxylate-Type Superplasticizer / K. Yamada [et al.] // Cement and Concrete Research. 2000. Vol. 30, No 2. P. 197–207. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(99\)00230-6](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(99)00230-6).
8. Калашников, В. И. Самоуплотняющийся высокопрочный бетон / В. И. Калашников // Современные бетоны: сб. тр. IX Междунар. науч.-практ. конф., Запорожье, 1–3 июня 2007 г. / ООО «Будиндустрия ЛТД»; под общ. ред. А. В. Ушерова-Маршака [и др.]. Запорожье, 2007. С. 30–40.
9. Чернышов, Е. М. Модифицирование структуры цементного камня микро- и наноразмерными частицами кремнезема / Е. М. Чернышов, Д. Н. Коротких // Строительные материалы, оборудование и технологии XXI в. 2008. № 5. С. 30–32.
10. Батяновский, Э. И. Особенности технологии бетона прочностью 100–150 МПа с углеродными наноматериалами / Э. И. Батяновский, В. Д. Якимович, П. В. Рябчиков // Строительная наука и техника. 2012. № 2. С. 59–67.

Поступила 17.04.2019  
Подписана в печать 25.06.2019  
Опубликована онлайн 31.07.2019

## REFERENCES

1. Gurinenko N. S., Batyanovskii E. I. (2018) Fundamentals of Efficiency for Ultra-Disperse Micro-Silica in Cement Concrete *Problemy Sovremennogo Stroitel'stva: Sb. Nauch.-Tekhn. St., Materialy Nauch.-Tekhnich. Konf., Minsk, 30 Maya 2018 g. Ch. 2* [Problems of Modern Construction: Collection of Scientific and Technical Papers, Proceedings of Scientific and Technical Conference, Minsk, May 30, 2018. Part 2]. Minsk, Belarusian National Technical University, 256–264 (in Russian).
2. Gurinenko N. S., Batyanovskii E. I. (2018) On Efficient Application of Polyfunctional Additive with Ultra-Disperse Micro-Silica in Cement Stone and Concrete. *Perspektivnye Napravleniya Innovatsionnogo Razvitiya Stroitel'stva i Podgotovki Inzhenernykh Kadrov: Sb. Nauch. St. XXI Mezhdunar. Nauch.-Metod. Seminara, Brest, 25–26 Okt. 2018 g. Ch. 2* [Prospective Directions in Innovation Development of Construction and Training of Engineering Personnel: Collection of research Papers of XXI International Scientific and Methodological Workshop, Brest, Oct. 25–26, 2018. Part 2]. Brest, Brest State Technical University, 14–22 (in Russian).
3. Bibik M. S., Babitskii V. V. (2010) Evaluation of Kinetics in Hardening of Cement Stone while Using Heat-Sensing Device of “Termokhron” System. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Equipment], (4), 23–26 (in Russian).
4. Taylor H. (1997) *Cement Chemistry*. Thomas Telford. 459. <https://doi.org/10.1680/cc.25929>.
5. Chistyakov V. V., Doroshenko Yu. M., Grankovskii I. G. (1988) *Intensification of Concrete Hardening*. Kiev, Budivelnik Publ. 118 (in Russian).
6. Kapriyelov S. S., Batrakov V. G., Sheynfeld A. V. (1999) Modified Concrete of New Generation: Reality and Prospects. *Beton i Zhelozobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], (6), 6–10 (in Russian).
7. Yamada K., Takahashi T., Hanehara S., Matsuhisa M. (2000) Effects of the Chemical Structure on the Properties of Polycarboxylate-Type Superplasticizer. *Cement and Concrete Research*, 30 (2), 197–207. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(99\)00230-6](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(99)00230-6).
8. Kalashnikov V. I. (2007) Self-Compacting and High-Strength Concrete. *Sovremennyye Betony: Sb. Tr. IX Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., Zaporozh'e, 1–3 Iyunya 2007 g.* [Modern Concrete: Collection of Papers of IX International Scientific and Practical Conference, Zaporozhie, June 1–3, 2007]. Zaporozhie, 30–40 (in Russian).
9. Chernyshov E. M., Korotkikh D. N. (2008) Modification of Cement Stone Structure by Micro- and Nano-Particles of Silica. *Stroitelnye Materialy, Oborudovanie i Tekhnologii XXI Veka* [Construction Materials, Equipment and Technologies of the XXI Century], (5), 30–32 (in Russian).
10. Batyanovskii E. I., Yakimovich V. D., Ryabchikov P. V. (2012) Specific Features of Technology for Concrete of 100–150 MPa Strength with Carbon Nano-Materials. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Equipment], (2), 59–67 (in Russian).

Received: 17.04.2019  
Accepted: 25.06.2019  
Published online: 31.07.2019