

УДК 691.32/.334:531.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ КВАЗИСАМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА С МИКРОКРЕМНЕЗЕМОМ

Кононова О.В., Смирнов А.О.

*ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», Йошкар-Ола,
e-mail: KononovaOV@volgatech.net, SmirnovAO@volgatech.net*

Исследованы особенности формирования прочности квазисамоуплотняющегося бетона с микрокремнеземом. Учитывались следующие условия: содержание цемента в бетоне варьировалось от 150 до 330 кг/м³, бетон твердел в нормальных условиях, содержание микрокремнезема составляло 2 и 10% от массы цемента, бетон модифицировался добавкой суперпластификатора Glenium® ACE 430 в количестве 1,5% от массы цемента. Осадка конуса контрольного состава бетонной смеси составляла 12±2 см. Контрольные составы бетона не содержали микрокремнезема. Установлено, что повышение содержания добавки микрокремнезема в нормальных условиях твердения в исследуемых пределах в малощелочных составах способствует приросту прочности бетона, а при повышенном содержании цемента постепенно снижает прочность бетона. Модифицирование составов бетона добавкой Glenium® ACE 430 при содержании цемента 330 кг/м³ делает влияние 10% микрокремнезема на прочность статистически не значимым в сравнении с контрольными составами. При этом предел прочности при сжатии и кинетика роста прочности бетонов повышаются.

Ключевые слова: квазисамоуплотняющийся бетон, микрокремнезем, суперпластификатор, подвижность, предел прочности при сжатии, кинетика роста прочности

ALMOST SELF-COMPACTING CONCRETE WITH MICROSILICA STRENGTH FORMING INVESTIGATION

Kononova O.V., Smirnov A.O.

*Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, e-mail: KononovaOV@volgatech.net,
SmirnovAO@volgatech.net*

The features of almost self-compacting concrete with microsilica strength forming studied. The following conditions were taken into account: cement content in concrete varied from 150 to 330 kg/m³, concrete was hardened under normal conditions, the content of microsilica was 2 and 10% of cement mass, concrete was modified by adding Glenium® ACE 430 superplasticizer in 1,5% amount of cement. The cone of immobile control concrete mixtures sediment was 12 ± 2 cm. The control concrete compositions did not contain microsilica. It has been established that an increase in the microsilica additive content under normal conditions of hardening within the investigated limits in low-cement compositions contributes to the increase in concrete strength, and with an increased of cement content, gradually reduces the strength of concrete. Modification of concrete compositions with the Glenium® ACE 430 at cement content 330 kg/m³ additive makes the effect of 10% microsilica on strength statistically insignificant in comparison with the control compositions. In this case, the compressive strength and the concrete strength growth kinetics increase.

Keywords: almost self-compacting concrete, microsilica, superplasticizer, flow ability, compressive strength, kinetics of strength

В последние годы получены и опубликованы данные многих исследователей, показывающие, что сочетание тонкодисперсного наполнителя и суперпластификатора обеспечивает синергический эффект в бетоне, позволяя получать наилучший результат по прочности [1–5]. Большой интерес сегодня как у строителей, так и у исследователей вызывает применение в бетонах отхода производства ферросплавов – микрокремнезема. Положительное влияние микрокремнезема как тонкодисперсной активной минеральной добавки и необходимость его использования в бетоне в сочетании с суперпластификатором описывалось в публикациях уже около 40 лет тому назад [5]. Была выдвинута идея повышения плотности упаковки твердых частиц в свежееуложенном бетоне, которая достигается оптимиза-

цией зернового состава частиц бетонной смеси. К. Loland и О. Суйорг показали, что частицы микрокремнезема, размер которых составляет 0,5...0,05 мкм, способны заполнять пустоты между частицами цемента и заполнителей. Частицы микрокремнезема создают вокруг себя прочно связанную оболочку воды, что затрудняет миграцию воды к поверхности бетона и, как следствие, снижает расслаиваемость бетонной смеси и усадку бетона [5].

Сегодня наибольшие надежды производителей бетонов связываются с совместным использованием в бетоне суперпластификаторов поликарбоксилатного типа и ультрадисперсных порошковых наполнителей, позволяющих получать особо высокопрочные самоуплотняющиеся составы бетонов. В частности, разработаны порошково-активированные бетоны ново-

го поколения, содержащие повышенное количество суспензионной составляющей из цемента, порошкообразных дисперсных добавок из молотых горных пород и тонкого песка для улучшения разжижаемости их суперпластификаторами. Получены самоуплотняющиеся песчаные бетоны с карбонатным наполнителем с прочностью при сжатии 140–160 МПа [2]. Публикуемые результаты исследований бетонов с использованием микрокремнезема и суперпластификаторов не однозначны, что в определенной степени обусловлено применением разных базовых составов. Совместное использование суперпластификаторов на основе поликарбоксилатных эфиров и микрокремнезема является необходимым, но недостаточным условием формирования способности бетона к самоуплотнению. Способность к самоуплотнению обычно проявляется у бетона при повышенном содержании суперпластификатора (2...3 % от массы цемента) и повышенном содержании микрокремнезема или другого ультрадисперсного наполнителя (10...25 % от массы цемента) в сочетании с рациональным зерновым составом компонентов бетонной смеси [2; 3].

С учетом высоких цен на суперпластификаторы поликарбоксилатного типа и микрокремнезема, стоимость которого в 2...3 раза выше стоимости портландцемента, представляются важными исследования, направленные на дальнейшее совершенствование составов и свойств квазисамоуплотняющихся бетонов, получение которых проще и дешевле.

В этих условиях становится очевидной необходимость исследования влияния микрокремнезема и суперпластификатора на формирование свойств квазисамоуплотняющихся бетонов с различным содержанием цемента при использовании рядовых и доступных материалов, в том числе рядовых цементов и широко распространенных на территории РФ мелкозернистых песков.

Цель исследования состояла в изучении участия микрокремнезема и суперпластификатора поликарбоксилатного типа в формировании прочности и кинетики твердения тяжелого бетона при различном содержании цемента.

Материалы и методы исследования

Исследования выполнены на рядовом портландцементе ЦЕМ I 42,5Н, производства ЗАО «Ульяновскцемент» с удельной поверхностью 353 м²/кг, который имел следующий минералогический состав: C₃A = 7,2 %, C₃S = 58,0 %, C₃A + C₄AF = 20 %. Изучались составы бетонов с базовой подвижностью ПЗ и расходом цемента на 1 м³ 150, 180, 210 и 330 кг,

твердевшие в нормальных условиях. Для приготовления бетона использовался заполнитель из плотного доломитового щебня, с прочностью по дробимости 1200, при соотношении фракций по массе: 5/10 мм – 40 % и 10/20 мм – 60 %. В качестве мелкого заполнителя применен местный мелкозернистый природный кварцевый песок с модулем крупности 1,9. В качестве активного микронаполнителя использовался микрокремнезем марки МК-85, который вводился в бетонную смесь в сухом виде одновременно с цементом и дополнительно к нему. При этом его количество составляло 2 и 10 % от массы цемента. С учетом ранее проведенных исследований, показывающих, что при повышении содержания суперпластификатора в бетоне может замедляться кинетика набора ранней прочности, в исследованиях был применен суперпластификатор Glenium® ACE 430, обеспечивающий получение бетонных смесей с высокими показателями ранней и конечной прочности [1; 6].

Смеси приготавливались в лабораторном смесителе при общей продолжительности перемешивания 8 минут. Содержание воды подбиралось таким образом, чтобы обеспечить получение равноподвижных смесей с осадкой стандартного конуса КА 12 ± 2 см. Изготовлено две серии бетонов. Первая серия приготавливалась без суперпластификатора. Составы бетонов второй серии содержали суперпластификатор Glenium® ACE 430 в количестве 1,5 % от массы портландцемента. Поликарбоксилатный суперпластификатор Glenium® ACE 430 добавлялся в бетонную смесь с последней третьей частью воды затворения после предварительного перемешивания бетонной смеси в течение 5 минут [6]. Затем смесь дополнительно перемешивалась в течение 3 минут. В каждой серии приготавливались контрольные составы, не содержащие микрокремнезема.

Из бетонных смесей виброуплотнением, в течение 10 с, формовались образцы-кубы размерами 100×100×100 мм. В процессе твердения в нормальных условиях в возрасте 3, 7 и 28 суток на испытательном прессе контролировалась их прочность при сжатии.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 приведены результаты испытания составов бетона, не содержащих суперпластификатора.

В целом проведенный эксперимент выявил следующие особенности в кинетике набора прочности исследованных составов бетона на применяемом цементе.

В возрасте 3 суток составы бетона, содержащие 2 % микрокремнезема, набирают от 45 % проектной (28-суточной) прочности при расходе цемента 150 кг/м³ до 53 % соответственно при расходе цемента 330 кг/м³. Составы бетона, содержащие 10 % микрокремнезема, в этом же диапазоне расхода цемента набирают от 47 до 54 % проектной прочности. Таким образом, выявлено, что при постоянном расходе цемента увеличение содержания микрокремнезема от 2 до 10 % не снижает кинетику набора ранней прочности бетона.

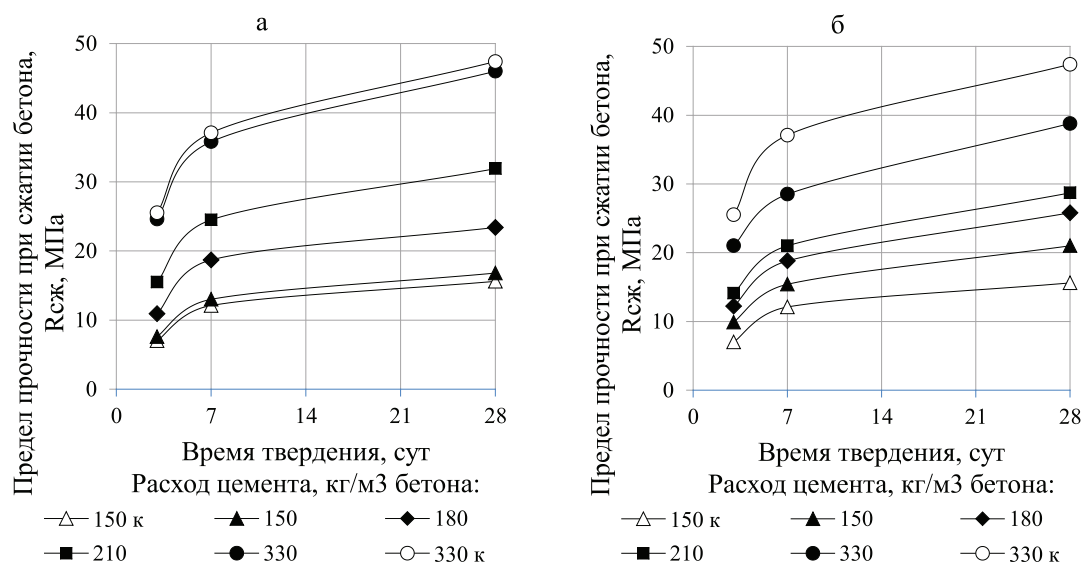


Рис. 1. Влияние содержания микрокремнезема (а – 2%, б – 10% от массы цемента) на кинетику твердения немодифицированного бетона из равноподвижных смесей; к – контрольные составы бетона без микрокремнезема

В возрасте 7 суток твердения составы, содержащие 2% микрокремнезема, набрали 77...79% проектной прочности. Увеличение содержания микрокремнезема от 2 до 10% сопровождается понижением кинетики набора прочности бетонов в среднем от 78 до 73%. Полученный результат может быть объяснен постепенным проявлением химической активности микрокремнезема в период после 7 суток твердения.

В структуре бетона микрокремнезем выполняет две функции – наполнителя и активной минеральной добавки. Это отражается на том, что в малоцементных составах с высокой структурно обусловленной макропористостью, несмотря на рост водоцементного отношения, в условиях соблюдения принципа равноподвижности, при увеличении содержания микрокремнезема от 0 до 10% прочность бетона увеличивается. В частности, в возрасте 3 суток прочность контрольного состава бетона, не содержащего микрокремнезем, при расходе цемента 150 кг/м³ возросла у состава с расходом микрокремнезема 2% с 7,0 МПа до 7,6 МПа, и до 9,9 МПа у состава, с расходом микрокремнезема 10% от массы цемента. Прочность бетона контрольного состава в возрасте 28 суток с 15,6 МПа за счет введения 2% микрокремнезема повысилась до 16,8 МПа, а добавка микрокремнезема в количестве 10% от массы цемента привела к увеличению прочности состава до 21 МПа, то есть на 34%.

Увеличение содержания цемента в немодифицированном бетоне снижает положительное влияние микрокремнезема как уплотнителя структуры. При расходе цемента 210 кг/м³ наполняющий эффект становится менее заметным. Это объясняется уменьшением объема структурно обусловленной макропористости бетона и разуплотняющим действием микрокремнезема в силу его высокой водопотребности и склонности к агрегатированию.

Анализ результатов исследования показал, что повышение содержания микрокремнезема в бетоне с расходом цемента 330 кг/м³ приводит к снижению прочности немодифицированных составов бетона. В возрасте 28 суток прочность бетона при введении 2% микрокремнезема в сравнении с контрольным составом понизилась с 47,4 до 46,0%, а при добавлении 10% микрокремнезема, соответственно, до 38,8 МПа. Таким образом, снижение прочности при увеличении содержания микрокремнезема в исследованном диапазоне достигает 18%.

На рис. 2 приведены результаты изучения кинетики твердения цементных бетонов, с добавкой Glenium® ACE 430 в количестве 1,5% от массы цемента.

Исследованные составы при осадке конуса 12 см приобретают способность к качественному уплотнению при кратковременном виброуплотнении в течение 5 с. В возрасте 3 суток составы квазисамоуплотняющегося бетона с расходом цемента

150...210 кг/м³, содержащие 2...10 % микрокремнезема и до 1,5 % суперпластификатора Glenium® ACE 430, набирают 50...53 % 28-суточной прочности. В возрасте 7 суток твердения эти модифицированные составы бетона набирают 76...77 % проектной прочности. Приведенные результаты означают, что эффект ускорения твердения бетона в ранние сроки твердения при низких расходах цемента 150...210 кг/м³ под влиянием суперпластификатора Glenium® ACE 430 практически не проявляется.

При расходе цемента 330 кг/м³ составы квазисамоуплотняющегося бетона, содержащие 2...10 % микрокремнезема, за первые трое суток твердения набирают 67...68 % проектной прочности. В возрасте 7 суток модифицированные составы набирают 81...82 % конечной прочности. Таким образом, очевидно, что эффективность влияния добавки Glenium® ACE 430 на повышение кинетики набора ранней прочности взаимосвязана с ростом концентрации цемента в бетоне.

Сопоставление прочности квазисамоуплотняющихся составов при постоянном расходе цемента показало, что эффективность введения микрокремнезема в бетон также зависит от содержания цемента в бетоне.

В малощелочных составах с расходом цемента 150...210 кг/м³ введение микро-

кремнезема однозначно повышает прочность. Наибольший эффект получен при расходе цемента 150 кг/м³. В сравнении с контрольным составом с проектной прочностью 18,0 МПа за счет введения 2 % микрокремнезема прочность повысилась до 19,2 МПа, а при увеличении содержания микрокремнезема до 10 % от массы цемента прочность повысилась до 22,2 МПа, что составляет 23,3 %. Суммарное влияние применения 10 % микрокремнезема и 1,5 % суперпластификатора Glenium® ACE 430 выражается в приросте прочности бетона с 15,6 МПа до 22,2 МПа, что составляет 42 %.

При расходе цемента 330 кг в квазисамоуплотняющемся бетоне с суперпластификатором Glenium® ACE 430 увеличение содержания микрокремнезема от 0 до 10 % от массы цемента приводит к постепенному понижению прочности бетона с 71 МПа до 67,5 МПа, то есть составляет 4,9 %, что практически, при доверительной вероятности 95 %, можно признать статистически незначимым. В итоге применение 1,5 % суперпластификатора Glenium® ACE 430 и 10 % микрокремнезема в сравнении с контрольным немодифицированным бетоном также обеспечивает повышение прочности бетона на 42 %. Удельный расход цемента на единицу прочности в этом квазисамоуплотняющемся бетоне составляет 4,89 кг/МПа.

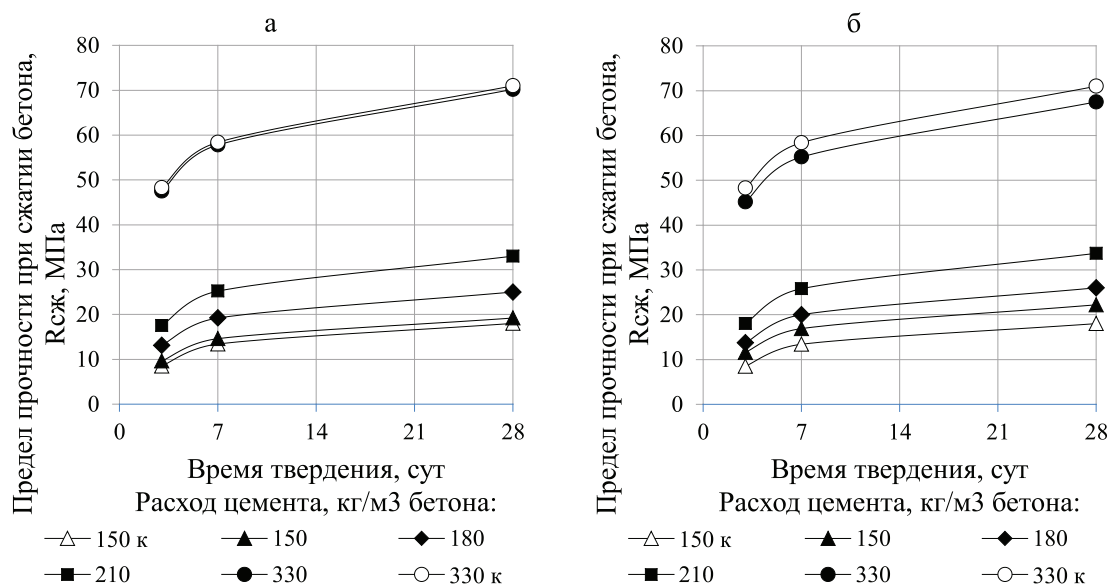


Рис. 2. Влияние содержания микрокремнезема (а – 2 %, б – 10 % от массы цемента) на кинетику твердения квазисамоуплотняющегося бетона модифицированного добавкой суперпластификатора Glenium® ACE 430; к – контрольные составы бетона без микрокремнезема

Влияние добавок суперпластификатора Glenium® ACE 430
и микрокремнезема на свойства бетона

№ состава	Расход цемента, кг/м³	Содержание добавок, % от массы цемента		Средняя плотность бетона, кг/м³	В/Ц
		микрокремнезем	Glenium® ACE 430		
1	330	0	0	2360	0,51
2	330	0	1,5	2460	0,40
3	330	10	0	2350	0,60
4	330	10	1,5	2425	0,45
5	210	0	0	2330	0,80
6	210	0	1,5	2385	0,68
7	210	10	0	2340	0,86
8	210	10	1,5	2400	0,71

В таблице приведены результаты исследования влияния добавок микрокремнезема и суперпластификатора Glenium® ACE 430 на формирование водоцементного отношения (В/Ц) и среднюю плотность бетона в сухом состоянии при различном содержании цемента.

Анализ формирования средней плотности бетона в сухом состоянии показывает, что она в значительной степени отражает установленные особенности формирования прочности исследованных составов. При расходе цемента 210 кг на наибольшую среднюю плотность в сухом состоянии имеет состав № 8 с добавкой микрокремнезема 10% и 1,5% суперпластификатора Glenium® ACE 430. При расходе цемента 330 кг/м³ наибольшая средняя плотность была получена у состава № 2 с добавкой суперпластификатора. Состав бетона № 2 обеспечил наименьшее водоцементное отношение.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие **выводы**:

1. Влияние добавок микрокремнезема и суперпластификатора Glenium® ACE 430 на прочность тяжелого бетона и кинетику его твердения зависит от содержания цемента в бетоне.

2. Установлено, что повышение содержания добавки микрокремнезема до 10% от массы цемента в нормальных условиях твердения в исследуемых пределах при содержании цемента 150 кг/м³ способствует приросту прочности бетона на 23% за счет уплотнения его структуры. Общий эффект от применения 10% микрокремнезема и 1,5% суперпластификатора Glenium® ACE 430 выражается в повышении прочности бетона на 42%.

3. При содержании цемента 330 кг/м³ повышение содержания микрокремнезема

от 0 до 10% постепенно снижает прочность бетона на 18%. Модифицирование этого состава бетона добавкой Glenium® ACE 430 в количестве 1,5% от массы делает влияние 10% микрокремнезема на прочность статистически не значимым в сравнении с контрольным составом без микрокремнезема. В сравнении с контрольным немодифицированным составом прочность бетона также повысилась на 42%. Удельный расход цемента на единицу прочности в этом квазисамоуплотняющемся бетоне составляет 4,89 кг/МПа.

4. Отмечено повышение кинетики набора ранней прочности квазисамоуплотняющихся бетонов с добавкой Glenium® ACE 430 у составов с повышенным содержанием цемента.

Список литературы

1. Гамалий Е.А. Структура и свойства цементного камня с добавками микрокремнезема и поликарбоксилатного пластификатора / Е.А. Гамалий, Б.Я. Трофимов, Л.Я. Крамар // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. – 2009. – № 16. – С. 29–35.
2. Дрянин Р.А. Влияние содержания микрокремнезема на повышение прочности реакционно-порошковых бетонов / Р.А. Дрянин, Г.П. Сехпосян, С.В. Ананьев, В.И. Калашников // Молодой ученый. – 2014. – № 13. – С. 44–47.
3. Калашников В.И. Суспензионно-наполненные бетонные смеси для порошково-активированных бетонов нового поколения / В.И. Калашников, В.Т. Ерофеев, О.В. Тараканов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2016. – № 4. – С. 30–37.
4. Фомина Н.Н. Исследование влияния комплексной добавки суперпластификатора и микрокремнезема на свойства цементных композитов / Н.Н. Фомина, И.С. Алексеенко, Д.С. Царапкин // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2016. – № 1(15). – С. 54–59.
5. Loland K., Cyiorv O. Silikabetong. Nordisk betong, 1981. – Vol. 6. – P. 5–10.
6. Glenium® ACE 430 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tdpragmatica.ru/assets/glenium-ase-430.pdf> (дата обращения: 10.07.2017).