

II Всероссийская Международная конференция по бетону и железобетону «Бетон и железобетон – пути развития», 5-9 сентября 2005, Москва, том 3, с.24-31.

Батудаева А.В., инж., Кардумян Г.С., к.т.н., Каприелов С.С., д.т.н.

**ВЫСОКОПРОЧНЫЕ МОДИФИЦИРОВАННЫЕ БЕТОНЫ
ИЗ САМОВЫРАВНИВАЮЩИХСЯ СМЕСЕЙ**

Представлены исследования свойств высокопрочных бетонов из самовыравнивающихся смесей, полученных на основе комплексных органико-минеральных добавок, которые содержат микрокремнезем, золу-уноса, метакаолин (термически обработанный каолин), гипс и суперпластификатор в разных соотношениях. Для сравнения было выбрано два вида суперпластификаторов: на основе нафталинформальдегидных поликонденсатов с электростатическим механизмом действия на цементную систему и на основе поликарбоксилатов преимущественно со стерическим механизмом действия.

Рассмотрено влияние физико-химических свойств тонкодисперсных минеральных наполнителей (удельная поверхность, гранулометрический состав, морфология частиц и химико-минералогический состав) на свойства цементного теста. Произведен выбор комбинированных микронаполнителей, удовлетворяющих условию обеспечения прочности цементного камня и оптимального сочетания технологических свойств (водопотребность, подвижность и водоудерживающая способность).

Получены основные характеристики бетонных смесей. Определены основные физико-технические свойства бетонов из самовыравнивающихся смесей, проведена их сравнительная оценка со свойствами вибрированного бетона того же класса по прочности. Показано, что морозостойкость, истираемость, водонепроницаемость, сцеплением с арматурой самовыравнивающихся бетонов не ниже чем у вибрированных бетонов.

Основными двигателями технического прогресса в технологии бетона всегда являлись две ключевые задачи: получение прочного и долговечного бетона и снижение трудовых и энергетических затрат при его производстве. Долгое время не удавалось найти совместного решения этих кажущихся противоречивыми задач. С одной стороны, производство прочных и долговечных бетонов было сопряжено с интенсивными механическими воздействиями на бетонную смесь, что неизбежно увеличивало затраты. С другой стороны, получение высокоподвижных бетонных смесей происходило главным образом, за счет увеличения расхода воды, что, в свою очередь, приводило к снижению прочности бетона.

С появлением суперпластификаторов (СП) в середине 70-х годов в значительной степени были решены одновременно обе задачи. Оказалось возможным на обычных портландцементе и заполнителях достигать сравнительно высокой прочности (50 МПа) с применением высокоподвижных бетонных смесей ($OK \geq 20$ см), которые сейчас можно назвать прототипом современных так называемых самоуплотняющихся бетонов.

Под самовыравнивающимися подразумеваются смеси, способные укладываться в опалубку без вибрации и равномерно распределяться во всем ее объеме при сохранении однородности даже при наличии густорасположенной арматуры. Определяющим свойством таких смесей является их высокая удобоукладываемость, сочетающая две противоположных по своей природе характеристики: низкое предельное сопротивление сдвигу (τ_0), которое предопределяет высокую текучесть смеси, и повышенную вязкость (η), которая обеспечивает стабильность и связность смеси. Существуют общепринятые критерии, по которым такие смеси идентифицируются: осадка конуса – не менее 27 см и распыл – не менее 65 см [1].

Таким образом, естественная тенденция развития технологии в направлении повышения прочности и долговечности бетонов, с одной стороны, и повышения удобоукладываемости, с другой стороны, выдвигают новую задачу: получение высокопрочных бетонов ($R_{сж} \geq 60$ МПа) из самовыравнивающихся смесей. Эта задача представляется комплексной (многофакторной), поэтому для ее решения необходимо основываться на современных принципах получения как высокопрочного бетона, так и самовыравнивающихся смесей.

Как известно, формирование высокопрочной и плотной структуры цементного камня и бетона возможно путем введения в цементную систему дисперсных и ультрадисперсных материалов, содержащих преимущественно аморфный диоксид кремния, с одновременным снижением водопотребности за счет использования суперпластификаторов [2].

Что касается самовыравнивающихся смесей, то условиями их получения является сочетание таких параметров как [3, 4, 5]:

- гранулометрический состав заполнителя, обеспечивающий равномерное объемное распределение частиц по фракциям;
- объем цементного теста, обеспечивающий необходимую раздвижку зерен заполнителя;
- содержание воды, обеспечивающее текучесть системы при сохранении седиментационной устойчивости.

Непрерывная гранулометрия дисперсной системы, каковой является бетонная смесь, создает структуру с плотной упаковкой, в которой крупные частицы окружены более мелкими, т.е. в свою очередь, - еще более мелкими, т.е. каждая частица находится в контакте с несколькими соседними частицами, пустоты между ними практиче-

ски отсутствуют или минимальны. Это благоприятный фактор, если иметь в виду, что пустоты обычно заполняются водой, которая может быть избыточной, негативно влияющей и на седиментационную устойчивость, и на структуру системы. С точки зрения механизма «течения» можно сказать, что при деформации такой структуры ее частицы способны «перекатываться» друг по другу, не застревая в пустотах. Регулирование гранулометрии бетонной смеси производится за счет использования фракционированного щебня и песка средней крупности.

В свою очередь, необходимый и достаточный для заполнения пространства между частицами заполнителя объем цементного теста обеспечивает оптимальную раздвижку и «смазку» поверхности заполнителя, снижая силы сцепления между его частицами. Соответствие данному критерию обеспечивается за счет регулирования соотношения между объемом заполнителей и объемом цементного теста в смеси. Доля заполнителей в самовыравнивающихся смесях меньше, чем в обычных бетонах, и соответственно увеличен объем цементного теста за счет использования минеральных добавок. Поэтому общее количество минеральных добавок в самовыравнивающихся смесях может достигать 50 % от массы цемента [6].

Содержание воды в самовыравнивающихся смесях, как правило, на уровне обычных бетонов, а высокая подвижность обеспечивается повышенными в 1,5-2 раза дозировками суперпластификатора.

По основным физико-техническим свойствам бетоны, полученные из самовыравнивающихся смесей, не отличаются от вибрированных бетонов. Однако, из-за повышенного расхода вяжущего у них возрастает вероятность усадки, а из-за особенностей безвибрационной укладки таких бетонов возникает вопрос о сцеплении такого бетона с арматурой, морозостойкости и проницаемости.

Актуальной для этого вида бетонов, учитывая вероятность их использования для устройства полов и покрытий, является также проблема стойкости к истираемости.

Вышеизложенные соображения явились основанием для исследований, результаты которых приводятся ниже.

Бетонная смесь условно разделена на две составные части: на цементное тесто (матрицу), под которым подразумевается смесь цемента, дисперсных материалов – микрозаполнителей, воды и суперпластификатора, а также на заполнители.

Исследовали влияние компонентов матрицы на ее свойства, а затем на свойства бетонов.

Для приготовления высокопрочной цементной матрицы использовали портландцемент марки ПЦ500 Д0, микрозаполнители (МН) и два разных суперпластификатора: на основе сульфированных нафталинформальдегидных поликонденсатов (марка С-3) и на основе поликарбоксилатов (марка FM 435).

В качестве активных микрозаполнителей (МН) были использованы микрокремнезем конденсированный (МК) марки МК-85 (ТУ 5743-048 -02495332), кислая зола-уноса (З-У) Рефтинской ГРЭС, метакаолин (МКЛН) – термически обработанный каолин Глуховецкого месторождения, молотый гипсовый камень (гипс) по ГОСТ 4013 и три различных композиции (смеси) из перечисленных выше материалов, в частности:

- комплекс, содержащий микрокремнезем и золу-уноса в соотношении 50:50 (условное обозначение «50С»);
- комплекс, содержащий метакаолин и гипс, который представляет собой расширяющую композицию сульфоалюминатного типа, представленную в работе [7, 8] для регулирования усадочных деформаций высоко-прочных бетонов (условное обозначение «РК»);
- комплекс, составляющий сумму первых двух комбинаций в соотношении 50:50 (условное обозначение «50С+РК»).

Кроме того, в качестве инертного микрозаполнителя использовали известняк молотый (Изв-к) по ГОСТ 16557.

Характеристики вышеперечисленных микрозаполнителей приведены в табл.1.

Таблица 1

Физико-химические характеристики микрозаполнителей

| Наименование микрозаполнителя | Характеристики | | | | | | |
|-------------------------------|----------------------|-------------------------------------|--------------------------|------------------------------------|--------------------------------|-------------------|---------------------------------------|
| | ρ, г/см ³ | S _{уд} , м ² /г | d _{средн} , мкм | содержание основных компонентов, % | | | |
| | | | | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | CaCO ₃ | CaSO ₄ · 2H ₂ O |
| Микрокремнезем | 2,20 | 20,00 | 0,14 | 90,50 | 1,25 | - | - |
| Зола-уноса | 2,20 | 0,30 | 76,00 | 60,20 | 39,40 | - | - |
| Метакаолин | 2,63 | 1,20 | 1,92 | 54,70 | 39,40 | - | - |
| «50С» | 2,20 | 10,15 | - | 75,35 | 14,68 | - | - |
| «50С+РК» | 2,35 | 5,45 | - | 50,6 | 17,50 | - | 24,95 |
| «РК» | 2,49 | 0,74 | - | 27,35 | 20,00 | - | 49,90 |
| Известняк молотый | 2,60 | 0,29 | 95,00 | - | - | 93,20 | - |
| Гипс | 2,34 | 0,28 | 52,30 | - | - | - | 99,98 |

В качестве заполнителей были использованы песок кварцевый с $M_{кр} = 2,6$ и щебень гранитный двух фракций: 5-10 мм и 10-20 мм.

На предварительном этапе проведена оценка эффективности каждого микрозаполнителя, а также композиций (смесей) из разных микрозаполнителей как компонентов высокопрочной цементной матрицы.

В качестве критериев оценки были выбраны следующие параметры: водопотребность, водоудерживающая способность и прочность цементной матрицы.

Водопотребность МН оценивали на цементных пастах одинаковой консистенции по изменению нормальной густоты, которая определялась на приборе Вика по методике ГОСТ 310.3.

Водоудерживающую способность МН оценивали по водоотделению цементного теста, состоящего из вяжущего (90% цемента и 10% МН) и воды ($V/V_{вяж} = 1$), при оседании частиц твердой фазы на градуированном цилиндре по ГОСТ 310.6.

Прочность цементной матрицы оценивали по показателю индекса активности, который определялся отношением прочности на сжатие в 28 суток нормального твердения растворяемых образцов-кубов состава 1:3 (Вяж:Песок), где 90% вяжущего представлено цементом, а 10% - МН, к прочности контрольного образца с вяжущим - цементом при постоянном водотвердом отношении.

Свойства бетонных смесей оценивали двумя методами: по осадке и расплыву конуса, а также по прохождению смеси сквозь препятствия [1]. Сущность второго метода заключается в следующем: конус Абрамса ставили внутрь кольца со стержнями, имитирующими арматуру, заполняли его бетонной смесью и после снятия конуса измеряли разницу высот (Δh) непосредственно у стержней внутри кольца и снаружи. Этот параметр, зависящий от вязкости смеси, позволяет оценить способность смеси проходить сквозь арматуру и косвенно определить связность смеси.

Физико-технические свойства бетонов исследовали по стандартным методикам. Прочность на осевое сжатие определяли на образцах 10x10x10 см, которые хранились в нормальных температурно-влажностных условиях ($t=20\pm 3^{\circ}\text{C}$, $\phi=95\pm 5\%$). Деформации расширения-усадки определяли согласно ГОСТ 24544 и ТУ 5743-157-46854090-2003 на образцах 5x5x20 см при комбинированных условиях хранения: первые сутки под пленкой, затем до семи суток – водное хранение, затем – воздушно-сухих условиях ($\phi=66\%$) до стабилизации деформаций. Водо-непроницаемость бетонов определяли по показателю воздухопроницаемости с помощью прибора «Агама-2Р». Морозостойкость определяли в соответствии с ГОСТ 10060.2 по третьему методу с замораживанием (при температуре -50°C) и оттаиванием в 5%-м водном растворе хлористого натрия. Истираемость определяли по ГОСТ 13087 на приборе ЛКИ-3 (круг истирания). Оценку качества и назначение категории бетонов по сопротивлению истираемости проводили по ГОСТ 13015.

Для сравнения прочности сцепления арматуры с равнопрочными бетонами из самовыравнивающихся и вибрированных ($OK=20$ см) смесей были проведены испытания на выдергивание арматуры диаметром 10 и 25 мм класса А500С из бетонных кубов, размеры которых, согласно методике RILEM [8], составляли 100 и 250 мм соответственно.

Водопотребность так же, как подвижность и водоудерживающая способность цементного теста (матрицы), изменяется в зависимости от вида микрозаполнителя и интегральной удельной поверхности ($S_{вяж}$) смешанного вяжущего, под которым подразумеваем смесь цемента и микрозаполнителей. С увеличением удельной поверхности водопотребность и водоудерживающая способность, естественно, возрастают, а подвижность уменьшается. Наименее подвижными и, напротив, более водопотребными и обладающими повышенной водоудерживающей способностью оказались образцы цементного теста с добавкой микрокремнезема ($S_{вяж} = 2,3 \text{ м}^2/\text{г}$) и метакаолина, который характеризуется высокой гидрофильностью ($S_{вяж}=0,42$), т.е. с микрозаполнителями, отличающимися сравнительно высоким (более 1) индексом активности. Однако заметим, что смеси разных по влиянию на консистенцию цементного теста микрозаполнителей, в частности: «50С», «50С+ПК», «ПК», позволяют также повысить водоудерживающую способность, практически не изменяя водопотребность цементного теста. Очевидно, это объясняется более оптимальным гранулометрическим составом комплексных МН, которые включают в себя полидисперсные зерна различной формы.

Характерный для комплексных МН сравнительно высокий индекс активности во многом предопределен присутствием аморфных диоксида кремния и оксида алюминия, содержание которых в вышеуказанных композициях доходит до 75%.

Следует отметить также, что по показателю подвижности комплексные МН отличаются друг от друга. С увеличением количества расширяющей композиции в их составе подвижность цементного теста повышается, что объясняется, вероятно, ее гранулометрическим составом и пластичностью метакаолина как глинистого материала, входящего в состав расширяющей композиции.

Введение молотого известняка в цементную систему способствует повышению водоудерживающей способности системы и в то же время практически не влияет на ее водопотребность и подвижность (табл.2).

Таблица 2

Свойства цементной матрицы с различными микрополннителями

| № | Состав цементной матрицы | Свойства матрицы | | | |
|---|--------------------------|--|------------------------------------|--|--------------------------------------|
| | | $S_{\text{ввяж}}, \text{M}^2/\text{г}$ | Водопо- требность по н.г., % | Водоудерживающая способность по водо- отделению, % | Индекс активности по прочности |
| 1 | Цемент 100% | 0,30 | 25,00 | 14,0 | 1,00 |
| 2 | Цемент + 10% МК | 2,27 | 31,25 | 4,2 | 1,20 |
| 3 | Цемент + 10% ЗУ | 0,30 | 26,00 | 17,0 | 0,95 |
| 4 | Цемент + 10% МКЛН | 0,42 | 29,80 | 7,8 | 1,10 |
| 5 | Цемент + 10% «50С» | 1,30 | 27,00 | 5,8 | 1,20 |
| 6 | Цемент + 10% «50С+РК» | 0,36 | 26,75 | 8,2 | 1,17 |
| 7 | Цемент + 10% «РК» | 0,80 | 26,50 | 9,7 | 1,15 |
| 8 | Цемент + 10% Изв-к | 0,30 | 25,01 | 9,2 | - |
| 9 | Цемент + 10% Гипс | 0,30 | 25,70 | 18,0 | - |

Далее на основе трех выбранных минеральных композиций по критерию обеспечения равной подвижности (расплав мини-конуса = 240-260 мм) цементных паст с $V/T=0,35$ оценивали эффективность двух видов СП..

Как видно на рис.1, эффективность СП зависит от механизма их действия на цементную систему, что выражается в том, что для достижения требуемой подвижности дозировка СП FM435, действующего по стерическому механизму, практически в 5 раз меньше дозировки СП С-3 с электростатическим механизмом действия. При этом оптимальная дозировка обоих СП зависит от состава комплексного МН. В частности, цементное тесто, содержащее комплекс из золы-уноса и микрокремнезема, характеризуется наибольшей дозировкой СП для обеспечения требуемой консистенции, а наименьшая дозировка СП характерна для цементного теста с расширяющей композицией. Цементное тесто, содержащее комплекс этих двух композиций, занимает промежуточное положение.

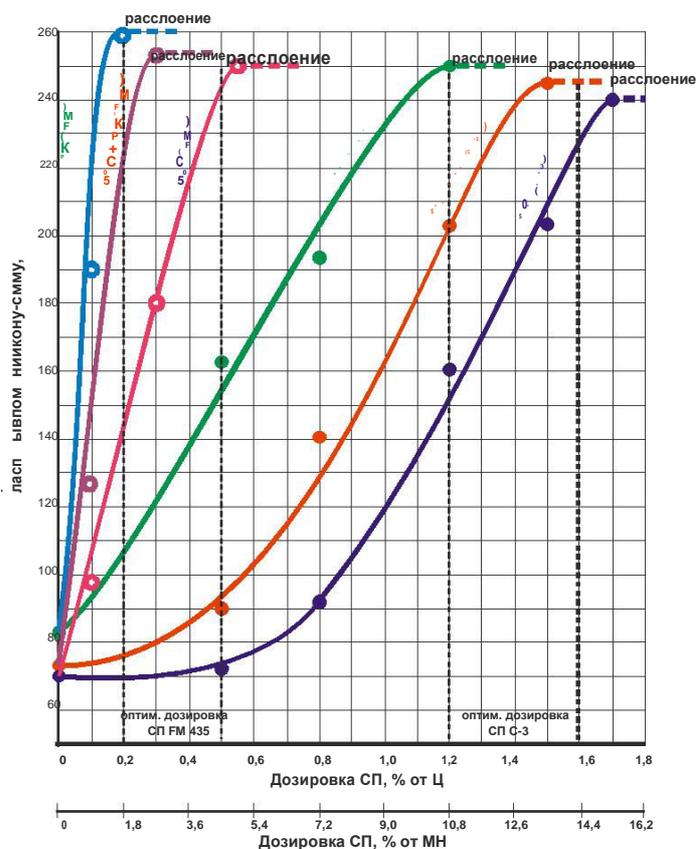


Рис.1. Влияние вида и дозировки СП на подвижность цементного теста с комплексными МН при постоянном содержании воды [$V=90\%$, $MH=10\%$; $V/(V+MH)=const=0,35$]

Так как повышение дозировок СП приводит к расслоению (пунктирные линии на рис.1), были установлены критические («пороговые») дозировки СП при сочетаниях с МН, превышение которых нежелательно. Для СП С-3 она составила 10% массы МН, а для СП FM435 – 2%.

Таким образом, оптимизированы составы поликомпонентных органо-минеральных композиций комплексных добавок, включающих МН и СП.

Для сравнения свойств высокопрочных бетонов из самовыравнивающихся и вибрированных смесей были приготовлены несколько образцов, в том числе контрольный образец высокопрочного бетона с осадкой конуса 20 см. Ранее выполненные нами исследования позволили оптимизировать гранулометрический состав и расход за-полнителей для самовыравнивающихся смесей. Оптимальное соотношение фракций в щебне составляет: 60% фракции 5-10 и 40% фракции 10-20, оптимальное содержание песка в смеси заполнителей равно 0,5. Составы и свойства бетонных смесей и бетонов представлены в таблице 3.

Полученные самовыравнивающиеся бетонные смеси по параметрам текучести и связности удовлетворяют требуемым критериям: диаметр расплыва для всех составов больше 65 см и разница высот Δh по методике “J-ring” [1] менее 15 мм (табл.3). Отметим также изменение свойств смеси в зависимости от состава минеральной части комплексной добавки: увеличение подвижности, характеризуемой расплывом конуса, и уменьшение показателя Δh в зависимости от количества расширяющей композиции в составе минеральной части комплексной добавки, которые прослеживались и в предыдущих исследованиях на цементном тесте. Очевидно, также влияние состава минеральной части комплексной добавки на объем вовлеченного воздуха и на плотность смеси (рис.2) независимо от вида суперпластификатора: наибольшее воздухововлечение и наименьшую плотность имеет бетонная смесь, содержащая в составе минеральной части комплексной добавки МН «50С», наименьшее воздухововлечение и максимальная плотность у бетонной смеси с «РК», бетонная смесь с комплексным МН «50С+РК», занимает промежуточное положение. По-видимому, такая зависимость объясняется увеличением плотности упаковки частиц цементного теста и снижением вероятности заземления воздуха между частицами, обусловленными формой, размерами частиц и их гранулометрией.

Как видно из табл.3 и рис.2, присутствие в смесях СП С-3 приводит к повышению объема вовлеченного воздуха и снижению прочности бетона в сравнении с СП FM 435. Это еще одно свойство, которое делает СП на поликарбоксилатной основе предпочтительным компонентом бетонов, изготавливаемых из самовыравнивающихся смесей.

Все бетоны обладают высокой плотностью: марка по водонепроницаемости достигает W20 и выше.

Испытания на морозостойкость показали, что бетоны, полученные из самовыравнивающихся смесей, не уступают вибрированным бетонам.

Испытания на истираемость проводились совместно с лабораторией строительных материалов НИИЭС. По результатам этих испытаний, представленных в табл.4, можно сказать, что по сопротивлению истираемости бетоны из самовыравнивающихся смесей не уступают равнопрочным вибрированным бетонам, полученным из пластичных смесей с осадкой конуса 20 см, и могут быть использованы для устройства покрытий, работающих в условиях повышенной интенсивности.

Данные по кинетике развития деформаций расширения-усадки, представленные на рис.3, показывают, что при хранении в водных условиях происходит пророст деформаций расширения, явно связанный с увеличением доли расширяющей композиции в составе минеральной части комплексной добавки. Следует отметить, что составы с СП С-3 (составы 2, 3, 4) имеют большее расширение, чем составы с СП FM435 (составы 5, 6, 7). Вероятно, это объясняется более высокой прочностью бетонов с СП FM435, которая препятствует процессу расширения. Для образцов бетона из самовыравнивающихся смесей без расширяющей композиции наблюдали небольшое набухание (кривые № 2 и № 5).

При помещении образцов в воздушно-сухие условия наблюдали процессы развития усадочных деформаций, которые стабилизировались к 70 суткам. Образцы, содержащие 100 % расширяющей композиции, характеризующиеся наибольшей величиной линейного расширения, к сроку стабилизации деформаций имели минимальную усадку, равную 0,01%, почти в 2 раза меньшую, чем у образцов контрольного состава и образцов без расширяющей композиции.

Из рис.3 видно, что деформации усадки бетонов из самовыравнивающихся смесей не превышают деформаций усадки равнопрочного вибрированного бетона. Введение в состав минеральной части комплексной добавки расширяющей композиции независимо от вида СП приводит к снижению усадочных деформаций бетонов из самовыравнивающихся смесей.

Для сопоставления результатов испытаний по сцеплению арматуры с бетоном необходимо принять во внимание различие в прочности бетона. Существует несколько подходов к приведению прочности сцепления к одной прочности бетона. Эти подходы предопределяются формулами для определения расчетного сопротивления сцепления арматуры с бетоном или формулами для определения длины зоны анкеровки, принятыми в нормах проектирования железобетонных конструкций.

В данной работе мы придерживались отечественных СП 52-101-03 и зарубежных АСІ 318 норм. Данные табл.5 показывают, что приведенная по СП 52-101-03 критическая прочность сцепления арматуры с самоуплотняющимся бетоном в среднем на 21% превышает предельную прочность сцепления арматуры с вибрированным бетоном.

Свойства бетонных смесей и бетонов

| № | Вид МН | Фактический состав бетона, кг/м ³ | | | | | | Характеристики бетонной смеси | | | | | Прочност | |
|---|---------------------------|--|----|-------|-----|-----|-----|-------------------------------|----------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|----------|----------|
| | | Ц | МН | Изв-к | П | Щ | В | ОК, см | Д _{распл} , см | Δ _h , см | γ, кг/м ³ | V _в , % | 1 сут | 3 сут |
| 1 | 50 (С-3) (контрольный) | 407 | 53 | - | 813 | 915 | 177 | 20,0 | - | - | 2365 | 3,9 | 17,8 | 40,7 |
| 2 | 50 (С-3) С | 389 | 51 | 135 | 762 | 780 | 169 | 27,0 | 66 | 1,25 | 2286 | 6,4 | 18,7 | 45,0 |
| 3 | 50 + РК (С-3) С | 393 | 52 | 137 | 769 | 786 | 171 | 27,5 | 68 | 1,20 | 2307 | 5,8 | 13,9 | 43,8 |
| 4 | РК (С-3) | 396 | 52 | 138 | 775 | 792 | 172 | 28,0 | 70 | 1,15 | 2324 | 5,5 | 10,2 | 39,0 |
| 5 | 50 (FM) С | 401 | 52 | 140 | 785 | 803 | 175 | 27,0 | 66 | 1,20 | 2356 | 3,5 | 20,5 | 47,3 |
| 6 | 50 + РК (FM) С | 407 | 54 | 141 | 796 | 813 | 177 | 27,5 | 69 | 1,15 | 2387 | 2,5 | 24,0 | 48,0 |
| 7 | РК (FM) | 409 | 53 | 142 | 801 | 818 | 178 | 28,5 | 71 | 1,15 | 2402 | 2,5 | 18,8 | 41,2 |

ПРИМЕЧАНИЯ:

1. Вид МН – состав минеральной части комплексной **органо**-минеральной добавки:

- 50С – минеральная композиция, содержащая смесь золы-уноса и микрокремнезема в соотношении 50:50 по массе;

- РК – композиция, содержащая из метакрилата и гипса

расширяющая, состоящая смесь золы-уноса и микрокремнезема с расширяющей композицией в соотношении

содержащая

2. В скобках указан вид суперпластификатора:

- С-3 – суперпластификатор на основе нафталинформальдегидных соединений,

- FM – суперпластификатор FM-435 на основе поликарбоксилатов.

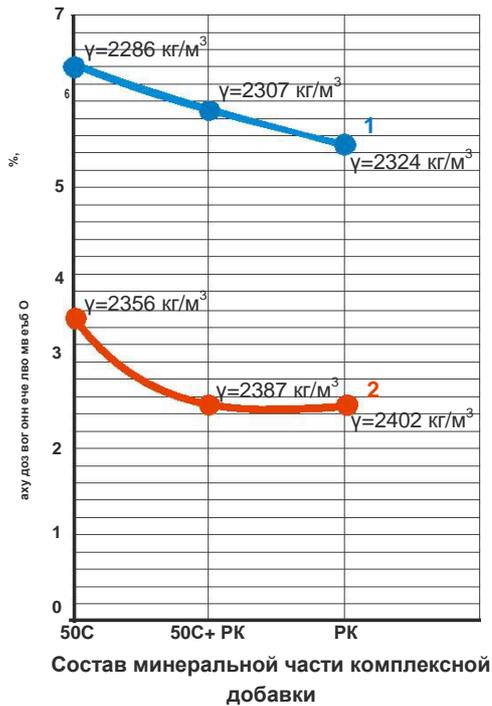


Рис.2. Влияние состава минеральной части комплексной добавки и вида СП на объем вовлеченного воздуха и плотность самовыравнивающихся бетонных смесей

1 - суперпластификатор С-3
2 - суперпластификатор FM-435

Таблица 4

Истираемость бетонов

| № | Вид МН | ОК, см | Прочность при сжатии, МПа | Фактическая истираемость, г/см ² | Истираемость согласно ГОСТ 13015 | | |
|---|-------------------|--------|---------------------------|---|----------------------------------|-----------|---|
| | | | | | г/см ² | категория | вид конструкции |
| 1 | 50С | 27 | 76,5 | 0,62 | 0,7 | I | конструкции, работающие в условиях повышенной интенсивности движения (плиты тротуаров на магистральных улицах и т.п.) |
| 2 | 50С+РК | 27 | 75,8 | 0,60 | | | |
| 3 | РК | 27 | 74,0 | 0,50 | | | |
| 4 | 50С (контрольный) | 20 | 78,0 | 0,46 | | | |

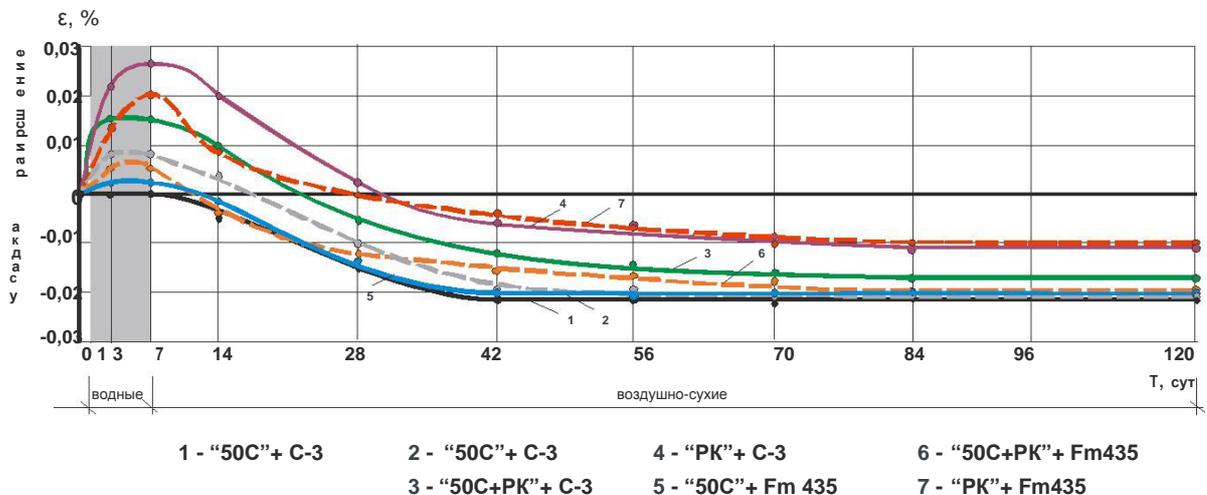


Рис.3. Деформации расширения - усадки образцов контрольного состава 1 с ОК =20 см на основе комплексной добавки 50С + С-3 и образцов из самовыравнивающихся смесей на основе комплексных добавок

Характеристики сцепления самовыравнивающегося и вибрированного бетонов

| Маркировка | Диаметр арматуры, мм | Вид бетона | Приведенная критическая прочность сцепления, МПа | |
|------------|-------------------------|-------------|--|------------|
| | | | по СНиП 52-01-03 | по АСІ 318 |
| 1-1 | 25 | вибрирован. | 6,19 | 2,68 |
| 1-2 | 25 | вибрирован. | 7,01 | 3,03 |
| 2-1 | 25 | самовыравн. | 8,83 | 2,98 |
| 2-2 | 25 | самовыравн. | 6,08 | 2,70 |
| 1-1 | 10 | вибрирован. | 6,82 | 2,94 |
| 1-2 | 10 | вибрирован. | 6,83 | 2,95 |
| 2-1 | 10 | самовыравн. | 8,49 | 2,86 |
| 2-2 | 10 | самовыравн. | 9,04 | 3,05 |

Критические значения прочности сцепления, приведенные в АСІ 318, для обоих видов бетона практически одинаковы.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что характеристики сцепления с арматурой самоуплотняющегося бетона сопоставимы с характеристиками сцепления вибрированного бетона.

Выводы

1. Исследование влияния микрокремнезема, золы-уноса, метаксаолина и гипса на свойства цементной мат-рицы показало, что микронаполнители, введенные в цементную систему в виде композиций (смесей) предпочтительнее по сравнению с их отдельным введением.

Наиболее эффективными с точки зрения обеспечения водоудерживающей способности смесей и высокой прочности бетона являются следующие композиции:

- микрокремнезем и зола-уноса в соотношении 50:50;
- расширяющая композиция, состоящая из метаксаолина и гипса;
- композиция, содержащая микрокремнезем с золой-уноса и расширяющую композицию в соотношении 50:50.

2. Для обеспечения высокой подвижности смесей, соответствующей критерию самовыравнивающихся, в дополнение к вышеуказанным композициям микронаполнителей следует использовать суперпластификаторы как на основе нафталинформальдегидных соединений, так и на основе поликарбоксилатов. Предпочтительными являются суперпластификаторы на основе поликарбоксилатов.

3. Сочетание вышеуказанных композиций микронаполнителей и суперпластификаторов при оптимизации гранулометрического состава заполнителей позволяет получать высокопрочные бетоны ($R_{сж} \geq 70$ МПа) из само-выравнивающихся смесей.

4. Использование расширяющей композиции, состоящей из метаксаолина и гипса, позволяет минимизировать усадочные деформации самовыравнивающихся высокопрочных бетонов.

5. Некоторые параметры, характеризующие долговечность бетонов, такие как морозостойкость, водоне-проницаемость и истираемость для полученных высокопрочных бетонов из самовыравнивающихся смесей не ниже, чем у вибрированных бетонов того же класса по прочности, полученных из менее подвижных ($OK=20$ см) смесей.

6. Сцепление с арматурой высокопрочных бетонов из самовыравнивающихся смесей не ниже, чем у вибрированных бетонов того же класса по прочности, полученных из менее подвижных смесей ($OK=20$ см).

Библиографический список

1. Specification & Guidelines for Self-Compacting Concrete, EFNARC, February 2002
2. Каприелов С.С., Батраков В.Г., Шейнфельд А.В. Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива. // Бетон и железобетон. – 1999. - № 6. – с. 6-10.
3. Saak A.W., Jenning H.M. and Shah S.P. "New Methodology for Designing Self-Compacting concrete" ACI Material Journal, V.98, №6, November-December 2001.
4. Noguchi T., Oh S.G. and Tomosava F. "Toward Mix Design for Rheology of Self-Compacting concrete" www.baustoffchemie.de/en/db/selfcompacting-concrete
5. Okamura H., Ouchi M. "Self-Compacting Concrete" Journal of Advanced Concrete Technology V.1, №1,5-15 April 2003.

6. Khayat K.H. "Workability, Testing, and Performance of Self-Consolidating Concrete" ACI Material Journal, V.96, №3, May-June 1999.
7. Научно-технический отчет НИИЖБ по теме «Разработка комплексного органо-минерального модификатора нового поколения для получения высокопрочного мелкозернистого бетона с улучшенными деформативными характеристиками» /Кардумян Г.С., М.,- 2004г.
8. Kardumian G., Kaprielov S. Shrinkage Controlling of Self-Compacting High-Strength Concrete. -15 Internationale Baustofftagung, Weimar, Deutschland, 2003. – Band 2, pp. 519-523.
9. RILEM / CEB / FIP Recommendation RC6. Bond test for reinforcing steel 2. Pull-out test. 1978.