

Протьюко Н. С., кандидат технических наук, заведующая лабораторией технологии растворов и специального бетона РУП «Институт БелНИИС», г. Минск, Беларусь
Мечай А. А., кандидат технических наук, доцент кафедры химической технологии вяжущих материалов УО «Белорусский государственный технологический университет» (БГТУ), г. Минск, Беларусь

РАСШИРЯЮЩИЙ СУЛЬФОАЛЮМИНАТНЫЙ МОДИФИКАТОР ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ УСАДОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ БЕТОНОВ И РАСТВОРОВ

Приводятся результаты исследований по разработке расширяющей сульфоалюминатной добавки РСАМ, изготовление которой осуществляется на предприятии по производству керамзита.

Изучение свойств добавки РСАМ и ее влияния на физико-механические характеристики бетонов и растворов показало эффективность применения модификатора для компенсации усадочных деформаций цементных бетонов и растворов.

Приведены предложения по совершенствованию нормативных документов, учитывающих применение энергоактивных вяжущих.

Введение

Среди широкой номенклатуры химических и минеральных модификаторов особое место занимают расширяющие добавки, которые придают цементным композициям способность расширяться при твердении.

В Российской Федерации в последнее десятилетие осуществляется активная разработка и применение такого вида добавок [1-4]. По своему составу расширяющие добавки подразделяют на:

- алюминатно-сульфатные;
- алюминатно-оксидные;
- оксидные.

В соответствии с действующим в РФ ГОСТ24211-2003 «Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия» расширяющие добавки должны обеспечивать деформации расширения при твердении в воде в течение 28-ми суток не менее 0,2%. Для придания энергоактивности вяжущему расширяющая добавка может размалываться совместно с цементным клинкером на цементном заводе или дозироваться в размолотом виде при приготовлении бетонной смеси.

При выполнении РУП «Институт БелНИИС» государственной программы [5] по разработке эффективных материалов и конструкций, обладающих, в том числе, компенсированной усадкой или самонапряжением, совместно с БГТУ (г. Минск) получен отечественный расширяющий сульфоалюминатный модификатор – добавка РСАМ.

Разработка расширяющего сульфоалюминатного модификатора

На кафедре химической технологии вяжущих материалов БГТУ (г. Минск) в течение ряда лет проводились исследования, направленные на получение расширяющей сульфоалюминатной добавки, которая при совместном помоле с цементным клинкером позволяла бы получить энергоактивное вяжущее. Прототипом такой добавки послужил сульфоалюминатный клинкер, полученный обжигом смеси известняка, боксита и гипса и использованный еще в первой половине прошлого века Г. Лоссье в качестве расширяющей добавки при получении расширяющегося или безусадочного цемента [6].

Учитывая, что в Республике Беларусь указанные сырьевые компоненты отсутствуют, для синтеза добавок с необходимой минералогической основой, которая включала бы ангидрит, твердые растворы сульфоалюмината и сульфосиликата кальция, метакаолинит, аморфные кремнезем и глинозем, использовались фосфогипс, глина и мел, смесь которых обжигалась при температуре 900–1100°C. Предполагалось, что наличие вышеуказанных компонентов в составе добавки позволило бы значительно интенсифицировать гидратационные и кристаллизационные процессы в цементном камне с целью создания эффекта расширения и самонапряжения.

Более ранние исследования в этом направлении в БГТУ [7, 8] были посвящены получению сульфоалюминатных добавок, синтезированных на основе двухкомпонентной сырьевой смеси, содержащей фосфогипс и глину. Такие добавки предназначались для получения добавочных быстротвердеющих цементов. Было установлено, что свойства добавок существенно зависели от химического состава глин, что резко сокращало перечень месторождений, пригодных для производства модификатора. В связи с этим было высказано предположение, что введение в состав сырьевой смеси кальцийсодержащего компонента позволило бы расширить сырьевую базу за счет использования практически любых месторождений глин.

Использование в сырьевой смеси карбоната кальция (в виде мела) обусловлено недостаточным количеством оксида кальция в составе глин для образования соединений необходимой стехиометрии, а так-

же необходимостью связывания вредных примесей при обжиге в балластные соединения. Глины, использовавшиеся для синтеза РСАМ, отличались содержанием примесных оксидов (K_2O , Na_2O , Fe_2O_3 , TiO_2), которые препятствуют образованию сульфоалюмината и сульфосиликата кальция при формировании минералогического состава.

Термодинамический расчет соответствующих реакций в системе “фосфогипс – мел - глина” при обжиге показал, что процессы фазообразования в данной системе при температуре 700-1100°C позволяют получить продукт синтеза с необходимой минералогической основой, включающей ангидрит, сульфоалюминат и сульфосиликат кальция. В то же время обнаружилась вероятность значительного влияния примесей, содержащихся в глинах, на ее формирование. Оксид железа (III) активно связывает CaO и Al_2O_3 , препятствуя образованию сульфоалюмината и сульфосиликата кальция при синтезе РСАМ. При этом образуются твердый раствор типа $C_3A_{2,75}F_{0,25}CS - C_3F_3CS$, а также $2CaO \cdot Fe_2O_3$, обладающие слабыми вяжущими свойствами. Достаточно велика вероятность образования геленита, являющегося гидравлически инертным веществом. В то же время при наличии в системе избыточного количества CaO и взаимодействии с ним геленита происходит разложение последнего с образованием алюмината и силиката кальция.

Значительный интерес при исследовании процессов фазообразования в системе “фосфогипс-мел-глина” представляет взаимодействие щелочных примесей с основными минералообразующими оксидами. Отрицательное изменение энергии Гиббса при этом достаточно велико и позволяет предположить значительное влияние щелочных оксидов на фазовый состав РСАМ. Щелочные силикаты и алюмосиликаты, термодинамическая вероятность образования которых очень высока, могут связывать значительное количество активных SiO_2 и Al_2O_3 , необходимых для получения сульфоалюмината и сульфосиликата кальция. Разложение сульфата кальция в исследуемом интервале температур термодинамически маловероятно.

Проведенные исследования выявили также факт ускорения процессов минералообразования в присутствии фтор- и фосфорсодержащих соединений, находящихся в составе фосфогипса, что выражается в снижении температуры образования необходимой минералогической основы на 150-200°C по сравнению с сырьевой смесью, включающей природный гипс.

Данный факт является предпосылкой наличия в РСАМ не только ангидрита, сульфоалюмината, сульфосиликата кальция, но и аморфного SiO_2 и метакаолинита, играющих важную роль в процессе гид-

ратации. Предотвращение интенсивного газовыделения фторсодержащих примесей при обжиге достигается за счет нейтрализации его кислотных соединений карбонатом кальция при приготовлении сырьевого шлама.

Таким образом, установлено негативное влияние на качество РСАМ примесей Fe_2O_3 , K_2O , Na_2O , TiO_2 , препятствующих образованию сульфоалюмината и сульфосиликата кальция и способствующих образованию малоактивных и балластных соединений. Модифицирование сырьевой смеси дополнительным количеством карбоната кальция дает возможность управления синтезом РСАМ на основе глин различных месторождений, что позволяет получить необходимую минералогическую основу, а также минимизировать выделение фторгазов при обжиге. Необходимая концентрация CaCO_3 в сырьевой смеси является индивидуальной для каждой глины и зависит от содержания в ее составе Al_2O_3 , вредных примесей и соотношения между ними [7].

Расширяющий сульфоалюминатный модификатор (добавка РСАМ) синтезирован на кафедре химической технологии вяжущих материалов БГТУ г. Минска в 2002 г. Для получения необходимой минералогической основы при синтезе добавки использовали фосфогипс ОАО «Гомельский химический завод» – 45,0...65,0%, глину месторождения «Кустиха» – 25,0...35,0%, добываемую ОАО «Керамзит» (в настоящее время Петриковский керамзитовый завод ОАО «Гомельский ДСК»), и мел месторождения «Колядичи» – 10,0...20,0%.

При изготовлении добавки в лабораторных условиях из смеси сырьевых компонентов и воды готовили гранулы, которые обжигали до неполного спекания при температуре 1000°C. Скорость подъема температуры составляла 6–7°C/мин, время выдержки – 20 минут. После обжига гранулы подвергались естественному охлаждению на воздухе. Полученные гранулы размалывались до различной дисперсности. На основании исследований влияния на самоупругивание вяжущего (смеси цемента и РСАМ) дисперсности и содержания РСАМ в вяжущем, совместно с РУП «Институт БелНИИС» были установлены оптимальная дисперсность добавки и ее содержание в вяжущем (10–15%). Самоупругивание определяли по СТБ 1335-2002 «Цемент напрягающий. Технические условия». Гранулы добавки оптимального состава имели светло-коричневый цвет, истинная плотность полученного материала составила 2890 кг/м³, самоупругивание вяжущего с РСАМ 1,65 МПа. На получение вяжущего с расширяющей добавкой РСАМ была оформлена заявка на изобретение [9].

Изготовление расширяющей добавки в виде гранул хорошо вписалось в технологический процесс производства керамзита на Петриков-

ском керамзитовом заводе ОАО «Гомельский ДСК». Кроме того, месторождение глины «Кустиха» расположено в 7 км от завода, а с ОАО «Гомельский химический завод» имеется железнодорожное сообщение.

На производство добавки РСАМ были разработаны технологический регламент, подробные рекомендации по подготовке производства для выпуска добавки РСАМ, ТУ ВУ 100354659.411-2005 «Расширяющий сульфалоуминатный модификатор для бетонов и растворов». В соответствии с техническими условиями для получения добавки РСАМ, готовой к применению, гранулы должны быть размолоты до остатка на сите №008 не более 5,0%. Эффективность добавки, в качестве расширяющей, определяется по методике СТБ 1335-2002 при испытании вяжущего, содержащего 10–15% добавки РСАМ. При этом вяжущее, состоящее из смеси добавки РСАМ и бездобавочного портландцемента, содержащего C_3A в пределах 3–7%, должно обеспечивать при определении в возрасте 28 суток линейное расширение не менее 0,05%, самонапряжение не менее 1,0 МПа.

В табл. 1 приведены характеристики трех промышленных партий добавки РСАМ, выпущенных в течение 2004–2006 гг. общим объемом около 200 т. В табл. 1 также приведены результаты испытаний расширяющей добавки, полученной в лабораторных условиях БГТУ на основе глины месторождения «Лукомль» (в табл. 1 б/н), по технологии пластического формования, используемой ОАО «Завод керамзитового гравия» (г. Новолукомль) при производстве керамзита. Использовались также фосфогипс и мел, изменилось только соотношение компонентов.

Таблица 1

Характеристики различных партий добавки РСАМ

№ партии РСАМ	Цвет гранул	Массовая доля, %		Плотность РСАМ, кг/м ³	Самонапряжение, МПа при определении в возрасте, сут.		
		Al ₂ O ₃	SO ₃		1	14	28
1	Бежево-розовый	10,27	15,72	2715	0,40	1,12	1,39
2	Светло-коричневый	7,8	24,22	2890	0,67	1,65	2,0
3	Светло-коричневый	6,34	28,45	2890	0,62	1,46	1,95
б/н Новолукомль	Светло-коричневый	5,7	30,18	2990	0,78	1,52	1,9

Примечание:

Химический состав различных партий РСАМ определен в Центральной лаборатории филиала РУП «БЕЛГЕОЛОГИЯ», истинная плотность по ГОСТ 310.2-76

Из представленных в табл. 1 характеристик добавки РСАМ следует, что для получения напрягающего вяжущего марки НЦ-2, определяемой по методике СТБ 1335-2002, содержание Al_2O_3 должно находиться в пределах 6–8%, SO_3 – 20–30%. Расширяющая добавка РСАМ может быть получена, в том числе и по технологии пластического формования, используемой ОАО «Завод керамзитового гравия» (г. Новолукомль) при производстве керамзита.

Исследование свойств расширяющей добавки

С помощью рентгенофазового и дифференциально-термического анализов, а также сканирующей электронной микроскопии установлено, что РСАМ значительно активизирует процессы гидратации и кристаллизации цементного камня.

Установлено, что в его присутствии изменяются условия формирования, структура и состав продуктов новообразований в сторону увеличения количества хорошо закристаллизованных низкоосновных гидросиликатов кальция с различным строением кристаллов типа гиролита, афвиллита, $CSH(B)$, создающих прочный пространственный кристаллический каркас, причем ускоренная кристаллизация гидросиликатного геля, повышенное количество которого образуется вследствие интенсивной пуццоланизации цементного камня аморфным SiO_2 , и метакаолинитом, происходит за счет наличия эттрингита, выполняющего роль центров кристаллизации, а также армирующих и расширяющих твердеющую систему.

Обнаружено явление активации нерастворимого ангидрита за счет фтор-, фосфор- и щелочесодержащих примесей, вследствие чего он активно участвует в процессе гидратации, образуя в 1–3 суток твердения вторичный эттрингит и гидросульфосиликат кальция.

Исследование свойств добавки РСАМ начинали с изучения ее влияния на сроки схватывания теста из вяжущего (цемент+РСАМ), в том числе модифицированного различными по эффекту действия химическими добавками. В табл. 2 и 3 приведены отдельные результаты исследований.

В смеси с добавкой РСАМ использовались:

- бездобавочный цемент ПЦ 500-Д0 производства ОАО «Красносельскстройматериалы»;
- суперпластификатор С-3, получаемый на основе натриевых солей продукта конденсации нафталинсульфокислоты и формальдегида;
- суперпластификатор Melment F10 – сульфированный меламинформальдегид, ускоритель схватывания и твердения формиат кальция (ФК);

– ускоритель твердения и противоморозная добавка нитрит натрия (НН).

В скобках указана дозировка добавок в процентах от массы (цемент+PCAM).

Таблица 2

Влияние пластифицирующих добавок на изменение сроков схватывания вяжущего с PCAM

Вяжущее	Цемент (Ц)	Ц+PCAM	Ц+PCAM + С-3 (0,7 %)	Ц+PCAM+ Melment F10 (1%)
В/Вяз	0,245	0,245	0,245	0,245
Начало схватывания	4 ч. 20 мин.	5 ч. 25 мин.	7 ч. 05 мин.	7 ч. 25 мин.
Конец схватывания	5 ч. 40 мин.	6 ч. 25 мин.	9 ч. 00 мин.	-

Таблица 3

Влияние ускорителей схватывания и твердения и комплексных добавок на изменение сроков схватывания вяжущего с PCAM

Вяжущее	Цемент	Ц+PCAM+ ФК (3%) + С-3(0,6%)	Ц+PCAM+ Melment F10 (0,5%)+ФК (1,5%Мсм)	Ц+PCAM+Melment F10 (1%)+НН(1%)
В/Вяз	0,265	0,265	0,265	0,265
Начало схватывания	2 ч. 30 мин.	2 ч. 05 мин.	18 мин.	4 ч. 50 мин.
Конец схватывания	3 ч. 00 мин.	4 ч. 20 мин.	23 мин.	6 ч. 10 мин.

Анализ результатов показывает, что добавка PCAM не приводит к сокращению сроков схватывания вяжущего по сравнению со сроками схватывания цементного теста; применение добавок С-3 или Melment F10 приводит к удлинению сроков схватывания теста из вяжущего с добавкой PCAM; формиат кальция приводит к резкому сокращению сроков схватывания в присутствии пластификатора Melment F10, а при совместном введении с добавкой С-3 сроки схватывания не сокращаются; нитрит натрия в смеси с Melment F10 не приводит к сокращению сроков схватывания.

Исследования влияния пластифицирующих добавок на физико-механические характеристики цементных композиций с PCAM показали, что применение добавок суперпластификаторов в бетонных смесях с добавкой PCAM позволяет без снижения водовяжущего отношения повысить плотность смеси, прочность на растяжение при изгибе, прочность на сжатие, самоупрочнение при некотором снижении проч-

ности бетона и самоупрочения в суточном возрасте. Например, при применении добавки С-3 в композициях с РСАМ прочность на сжатие и самоупрочение увеличивается не менее чем на 15%.

Представляют также интерес результаты исследований влияния отрицательной температуры выдерживания на изменение деформаций расширения и физико-механические характеристики цементных композиций с добавкой РСАМ.

Исследования проводились на мелкозернистом бетоне при соотношении (цемент+РСАМ): песок 1:1. В состав смеси входили формиат кальция в качестве противоморозной добавки (2,0% от массы вяжущего), суперпластификатор Melment F10 (0,4% от массы вяжущего). Определялись линейные деформации образцов, твердеющих в связанном состоянии в течение 28-ми суток при минус 5°С и в нормально-влажностных условиях (контрольные образцы), прочность на сжатие и водонепроницаемость.

Самоупрочение определяли на образцах-балочках размером 31,5x31,5x95 мм в динамометрических кольцах по СТБ 1335-2002, прочность на сжатие при испытании образцов-кубов с ребром 70 мм по ГОСТ 10180-90 (уплотнение с вибрацией), водонепроницаемость на образцах-цилиндрах по ГОСТ 12730.5-84 (по «мокрому пятну»). При определении прочности на сжатие и водонепроницаемости образцы твердели по двум температурно-влажностным режимам: первый – НВУ 56 суток, второй – при минус 5°С 28 суток и затем 28 суток в НВУ.

При определении самоупрочения образцов, твердеющих при отрицательной температуре, в дополнение к требованиям СТБ 1335-2002 перед проведением начальных измерений динамометрические кольца выдерживали в течение суток в морозильной камере при температуре минус 5°С, затем производили начальные измерения колец, собирали формы и заформовывали образцы.

Таблица 4

Влияние температуры минус 5°С на изменение самоупрочения мелкозернистого бетона с добавкой РСАМ

Наименование показателя	Значение	
	НВУ	минус 5°С
Условия выдерживания		
Дозировка воды, % от массы сухой смеси	12,3	
Подвижность по ГОСТ 5702-86 ПК, см	5,0	
Самоупрочение, МПа, на i сут.: 1	0,147	0,105
3	0,758	0,119
14	1,249	1,291
21	1,305	1,677
28	1,56	1,6

Влияние температуры минус 5°С на изменение прочности на сжатие и водонепроницаемость мелкозернистого бетона с добавкой РСАМ

Наименование показателя	Значение	
	НВУ	минус 5°С (28 суток)* 28 суток НВУ
Условия выдерживания	НВУ	минус 5°С (28 суток)* 28 суток НВУ
Прочность на сжатие, МПа, на 1 сут	52,2	24,6*
28		
56	59,2	39,9
Средняя плотность бетона в возрасте 56 сут., кг/м ³	2195	2140
Водонепроницаемость в возрасте 56 сут., МПа	более 0,8 (W8)	0,4 (W4)

* Прочность определена при испытании образцов после 28-ми суток выдерживания при минус 5°С

Из полученных результатов следует, что при отрицательной температуре твердения деформации расширения в связанном состоянии (самонапряжение) наиболее активно начинают проявляться к 7 суткам, а к 14 суткам и до 28-ми суток почти одинаковы с бетоном, твердеющим в НВУ. В связи с этим наблюдается разуплотнение бетона, твердеющего при отрицательной температуре, которое не восстанавливается со временем. О разуплотнении бетона свидетельствует снижение средней плотности бетона образцов, прочности на сжатие более чем на 30%, водонепроницаемости более чем в два раза.

Для применения бетонов и растворов с расширяющей добавкой РСАМ в холодный период времени следует устанавливать влияние условий твердения на снижение их физико-механических характеристик, в том числе водонепроницаемость и морозостойкость; корректировать состав растворов в сторону снижения самонапряжения и ускорения набора ранней прочности.

Была также изучена возможность применения в композициях с добавкой РСАМ воздухововлекающих добавок для повышения морозостойкости и тонкодисперсного доломита для снижения расхода цемента. Проведенные исследования подтвердили теоретические предпосылки: применение воздухововлекающих добавок неэффективно в композициях на энергоактивных вяжущих; применение тонкодисперсного доломита следует осуществлять не для снижения расхода цемента, а при необходимости для обеспечения требуемой удобоукладываемости смеси.

Изучение свойств добавки РСАМ показало, что смеси с добавкой технологичны, и добавка может быть использована для компенсации усадочных деформаций цементных композиций.

Оценка компенсации усадочных деформаций

В. В. Тур в [10] приводит одно из определений бетонов с компенсированной усадкой: «бетоны, приготовленные на расширяющихся цементах, расширение которых в условиях внешнего ограничения приводит к появлению собственных сжимающих напряжений, компенсирующих последующие растягивающие напряжения, являющиеся результатом усадки». По его мнению, бетоны с компенсированной усадкой «следует классифицировать как разновидность напрягающих бетонов», величину самонапряжения которых не нормируют.

Несмотря на многочисленные публикации о бетонах и добавках для получения бетонов с компенсированной усадкой, в них отсутствует методологический подход для ее определения. Например, из расчета деформаций усадки цементных бетонов, выполненных в соответствии с указаниями раздела 6.1.4 СНБ 5.03.01-02 «Бетонные и железобетонные конструкции» следует, что к одному году твердения в среде с относительной влажностью 50-60% в бетоне могут развиваться деформации усадки до 0,6 мм/м. По исследованиям, приведенным в работе [11], свободному линейному расширению в пределах 0,06%-0,08% (0,6-0,8 мм/м) соответствует самонапряжение 0,5-0,6 МПа.

Следовательно, для компенсации усадки должен использоваться напрягающий бетон, с маркой по самонапряжению не менее Sp0,6. А если учесть, что марка по самонапряжению устанавливается при испытании в возрасте 28 суток, то, по-видимому, бетон должен обладать большей энергоактивностью.

Усложняет решение задачи и то, что «соотношение между самонапряжением и свободным линейным расширением для различных НЦ непостоянно» [11]. Это имеет отношение не только к композициям с расширяющей добавкой или глиноземистым цементом, которые применяются в смеси с портландцементом, но и к композициям, приготовленным на глиноземистом цементе, который может иметь различное соотношение между алюминатной составляющей и гипсом и т.д.

Вместе с тем, определяемая величина свободного линейного расширения будет в том числе зависеть от прочности композиций при распалубке (снятие начальных показаний образца) и при существующем методе определения деформаций усадки или свободного линейного расширения только с очень большим приближением может рассматриваться как величина, компенсирующая усадку.

По нашему мнению определение *компенсированная усадка* предполагает, что выполняется сравнение усадочных деформаций исследуемого материала с усадочными деформациями какого-то базового

(контрольного) материала. В работе [12] было предложено оценивать компенсированную усадку, получаемую за счет применения напрягающего вяжущего марки НЦ-1 или НЦ-2 по СТБ 1335-2002, коэффициентом степени компенсации усадки - $K_{с.к}$, определяемым по следующей зависимости:

$$K_{с.к} = \frac{\varepsilon_{y.к} - \varepsilon_{y.o}}{\varepsilon_{y.к}} \cdot 100, \quad \%, \quad (1)$$

где: – деформации усадки контрольного образца;

– деформации усадки основного образца (исследуемого материала).

Деформации усадки записываются со знаком «-», деформации расширения – со знаком «+». Так, например:

– при $K_{с.к} = 100 \%$ – усадка полностью скомпенсирована (равна нулю);

– при $K_{с.к} > 100\%$ – за счет применения материала скомпенсирована усадка и обеспечивается дополнительное расширение;

– при $K_{с.к} < 100 \%$ усадочные деформации скомпенсированы не полностью.

Исходя из представлений о компенсации усадочных деформаций, при помощи $K_{с.к}$ предлагается следующий алгоритм для определения деформаций усадки тяжелых и мелкозернистых бетонов, изготовленных с применением напрягающего бетона с самоупрочением не более 1,0 МПа.

Для определения усадки базового (контрольного) материала предлагается использовать указания раздела 6.1.4 СНБ 5.03.01-02 «Бетонные и железобетонные конструкции».

Для определения усадки бетона с учетом компенсации усадочных деформаций предлагается использовать следующие зависимости, учитывающие влияние на усадочные деформации применения напрягающего вяжущего, которое оценивается коэффициентом $K_{с.к}$:

- для оценки усадки бетона в возрасте от 1 до 28 суток – $\varepsilon'_{с.к}$

$$\varepsilon'_{с.к} = \varepsilon_{с} \cdot (1 - K_{с.к} \cdot 10^{-2}), \quad \tau \leq 28 \text{ сут.}; \quad (2)$$

- для оценки усадки бетона в возрасте свыше 28 суток – $\varepsilon''_{с.к}$

$$\varepsilon''_{с.к} = \varepsilon'_{с.к,28} + \varepsilon_{с} - \varepsilon_{с,28}, \quad \tau > 28 \text{ сут.}; \quad (3)$$

где: $\varepsilon_{с}$ – величина усадки бетона, определяемая по 6.1.4.5 и 6.1.4.6 СНБ 5.03.01-02;

$\varepsilon_{с,28}$ – то же в возрасте 28 суток;

$\epsilon'_{\text{с.к.28}}$ – величина усадки бетона с учетом компенсации усадочных деформаций в возрасте 28 суток, определенная по зависимости (2).

Расчет по зависимостям (2, 3) предполагает корректировку деформаций усадки за счет применения энергоактивного бетона (с маркой по самоупругности до Sp1,0) по сравнению с обычным бетоном. Причем, влияние на деформации энергоактивного бетона предложено учитывать за период до 28-ми суток твердения.

Проведенные исследования по влиянию расширяющей добавки РСАМ на изменение физико-механических характеристик бетонов и растворов, в том числе самоупругности и деформации усадки, показывают, что для компенсации усадочных деформаций применения энергоактивного вяжущего недостаточно.

Определяющее влияние оказывают влажностные условия выдерживания (в том числе продолжительность орошения водой после распалубки для интенсификации образования этtringита) на свободные линейные деформации цементных композиций, которые в зависимости от этих условий могут иметь как положительные деформации (расширение), так и отрицательные (усадку). Следует отметить, что необходимость влажностного ухода регламентируется всеми нормативными документами на энергоактивные вяжущие и их применение.

Вместе с тем, в производственных условиях, по-видимому, не представляется реальным выдерживать конструкции в воде или во влажных опилках до 28-ми или даже 14-ти суток твердения. Исследования проводились не при водном хранении образцов, а при периодическом (1 раз в сутки) орошении водой в течение не более 3–7 суток.

Деформации усадки исследовались на образцах–призмах размером 70x70x210 мм, изготовленных из тяжелого бетона и образцах–балочках из мелкозернистого бетона с размерами 40x40x160 мм. Образцы–балочки из мелкозернистого бетона изготавливались в соответствии с требованиями СТБ 1335-2002 с пластинами с усиками и керном, на бетонные образцы–призмы после распалубки наклеивались репера.

После начальных замеров все образцы устанавливались в камеру НВТ и периодически увлажнялись водой в течение принятых сроков водного хранения, после чего находились в среде с требуемой относительной влажностью воздуха (RH, %) В этот период производились текущие замеры показаний индикатора при установке образцов на индикаторную стойку по методике СТБ 1335-2002 и ГОСТ 11052-74 – на индикаторной стойке по центральной части образца.

Принятые методы определения деформаций усадки не противоречили нормируемым условиям применения энергоактивных вяжущих, а также требованиям ГОСТ 24544-81 по времени проведения замеров, точности измерения и обработке результатов испытаний.

Анализ исследований по определению деформаций усадки крупнозернистых и мелкозернистых бетонов, модифицированных добавкой РСАМ, показывает, что для получения бетона с компенсированной усадкой должен применяться напрягающий бетон с маркой по самоупругиванию $Sr 0,6 - Sr 1,0$, обеспечиваемой при твердении в камере НВТ с орошением водой после распалубки в течение 6 суток (7 суток ухода). При помещении такого бетона после водного ухода в условия с $RH = (60 \pm 5)\%$ усадочные деформации за 28 суток будут компенсированы полностью, т.е. к 28-ми суткам твердения в среде с $RH = (60 \pm 5)\%$ деформации усадки будут равны 0.

В производственных условиях осуществление водного ухода может происходить при поливе водой под пленку или при помощи водонасыщенных опилок, песка, водоудерживающих матов.

На основании проведенных исследований составлена табл. 6, в которой предложены значения для оценки усадки бетона, приготовленного на вяжущем с расширяющей добавкой РСАМ, и твердеющего в различных влажностных условиях до 28-ми суток.

Таблица 6

Значения коэффициента $K_{с.к}$ для бетонов с компенсированной усадкой на вяжущем с добавкой РСАМ

RH, %	K _{с.к} при продолжительности водного ухода, сут.											
	3				5				7			
	при определении в возрасте, сут.											
	7	14	21	28	7	14	21	28	7	14	21	28
40	100	72	45	17	150	108	67	25	>450	100	73	45
60	175	133	92	50	200	158	117	75	>450	175	138	100
80	250	194	139	83	300	242	183	125	>450	225	188	150
90	350	267	183	100	400	317	233	150	>450	350	263	175

Примечание:

1. Для получения бетона с компенсированной усадкой применяется бетон с самоупругиванием 0,6–1,0 МПа, обеспечиваемым при твердении в камере НВТ с водным уходом после распалубки в течение 6 суток (7 суток ухода).

2. Водный уход заключается в орошении водой 1 раз в сутки бетона, твердеющего при относительной влажности около 90% (укрытие пленкой, влагозащитными матами).

3. В промежуточном возрасте значение следует принимать по интерполяции.

Разработанный алгоритм определения величины компенсации усадочных деформаций при применении энергоактивных вяжущих предложен в проект ТКП «Бетонные и железобетонные конструкции. Часть 1. Основные положения. Строительные нормы проектирования», разрабатываемый взамен СНБ 5.03.01-02 «Бетонные и железобетонные конструкции».

Область применения материалов с компенсированной усадкой

Анализ технической литературы и рекламной информации показывает, что рациональной областью применения добавки РСАМ является получение высококачественных бетонов, обладающих компенсированной усадкой (трещиностойкие бетонные полы промышленных зданий высокой прочности и плотности, протяженные трещиностойкие монолитные бетонные конструкции и т.д.) и строительных растворов с повышенными морозостойкостью, водонепроницаемостью, линейным расширением, самоупрочением, прочностью не менее 25–30 МПа.

Для определения самоупрочения при подборе составов мелкозернистого бетона и растворов можно использовать методику СТБ 1335-2002, а методы контроля самоупрочения крупнозернистого бетона будут приведены в разрабатываемом республиканском стандарте «Бетон на напрягающем цементе. Технические условия».

Проанализируем требования нормативных документов к строительным растворам и мелкозернистым бетонам, которые по нашему мнению по приведенным в стандартах характеристикам должны обладать компенсированной усадкой. Конечно же, это не растворы общестроительного назначения, а растворы, изготавливаемые из сухих растворных смесей, содержащие в своем составе для обеспечения высоких требований к их характеристикам кроме энергоактивного вяжущего, химические добавки различного назначения.

К нормативным документам, в которых присутствуют требования к таким композициям, следует отнести:

- СТБ 1464-2004 «Материалы для ремонта бетонных и железобетонных конструкций автомобильных дорог. Технические условия». В соответствии с п. 3.9 материалы, выпускаемые по стандарту, могут классифицироваться как безусадочные. К сожалению, в стандарте отсутствует методика оценки безусадочности композиций. Только указано, что в качестве вяжущего может применяться безусадочный портландцемент, удовлетворяющий требованиям СТБ 942-93. Материалы, изготавливаемые по стандарту с требованиями по безусадоч-

ности, должны иметь класс прочности на сжатие В25-В30, марки по морозостойкости F200 – F250 (по второму базовому методу ГОСТ10060.0-95), марки по водонепроницаемости W6-W8;

- СТБ 1534-2005 «Смеси бетонные сухие на безусадочном цементе. Технические условия». Стандарт разработан при участии ЧУП «Монофлекс – Френкеля» и некоторыми показателями адаптирован под сухие смеси «Монофлекс». По стандарту изготавливаются только мелкозернистые бетоны. В качестве вяжущего рекомендуется применять портландцемент безусадочный по СТБ 942-93. Для смесей конструкционных и гидроизоляционных нормируется марка по самонапряжению – не ниже Sp0,6, которая определяется по СТБ 1335-2002. Бетон из смесей конструкционных должен иметь класс прочности на сжатие не ниже C35/45, гидроизоляционных - C30/37, марка по морозостойкости не ниже F300, по водонепроницаемости не ниже W6, прочность сцепления с бетонным основанием не менее 1,0 МПа;

- СТБ 1307-2002 изменение №1 (дата введения 01.06.2007 г.) «Смеси растворные и растворы строительные. Технические условия». В классификацию строительных растворов по назначению введены ремонтные растворы. Введение этого вида растворов было основано на проведенных в РУП «Институт БелНИИС» исследованиях физико-механических характеристик мелкозернистых бетонов и растворов с добавкой РСАМ. В стандарте установлено, что для ремонтных растворов следует применять энергоактивное вяжущее, к которому относятся: безусадочный, напрягающий, глиноземистый или высокоглиноземистый, гипсоглиноземистый цементы, а также смесь портландцемента и расширяющей добавки, при которой обеспечивается получение вяжущего марки НЦ-1 или НЦ-2 по СТБ1335. Ремонтные растворы должны обладать следующими характеристиками:

- самонапряжение растворов должно находиться в пределах 0,3–1,5 МПа, линейное расширение не менее 0,03%;

- прочность на растяжение при изгибе должна быть не менее 6 МПа;

- прочность сцепления растворов с основанием в проектном возрасте не менее 0,5 МПа.

Высокие физико-механические требования, предъявляемые к перечисленным материалам, могут быть обеспечены только при применении энергоактивных вяжущих и, в частности, в смеси с цементом расширяющей добавки РСАМ.

Так, например, РУП «Институт БелНИИС» разработало для ЗАО «Парад» составы сухих растворных смесей, содержащих в своем со-

ставе расширяющую добавку РСАМ, и заменяющие дорогостоящие материалы импортного производства. С добавкой РСАМ выпускаются сухие растворные смеси:

– по СТБ1534-2005 для герметизации стыков и отверстий сборной железобетонной тоннельной обделки методом торкретирования при строительстве Минского метрополитена;

– по СТБ1464-2004 для выполнения различных видов ремонтных работ, в том числе методом торкретирования (пешеходных переходов в г. Минске, на РУП «ПО «Беларуськалий», ОАО «Нафтан» и др.).

Заключение

1. Дальнейшее развитие конструктивных систем зданий и сооружений с применением монолитных железобетонных конструкций должно осуществляться на основе использования бетонов с компенсированной усадкой, обеспечивающих широкие возможности для улучшения физико-технических характеристик бетона, ограничения усадочных деформаций и повышения трещиностойкости железобетонных конструкций.

2. В республике разработан расширяющий сульфоалюминатный модификатор-добавка РСАМ, которая в виде гранул выпускается на промышленной основе на Петриковском керамзитовом заводе ОАО «Гомельский ДСК». Применение добавки РСАМ в смеси с бездобавочным портландцементом обеспечивает получение напрягающего вяжущего марки НЦ 2 по СТБ 1335-2002. Изучение свойств добавки РСАМ показало, что смеси с добавкой технологичны, и добавка может быть использована для компенсации усадочных деформаций цементных композиций.

3. Для расширения применения бетонов с компенсированной усадкой разработан алгоритм определения величины компенсации усадочных деформаций при применении энергоактивных вяжущих, который предложен в проект ТКП «Бетонные и железобетонные конструкции. Часть 1. Основные положения. Строительные нормы проектирования», разрабатываемый взамен СНБ 5.03.01-02 «Бетонные и железобетонные конструкции».

4. Для повышения эффективности применения добавки РСАМ в бетонах и растворах планируется разработать органоминеральные добавки, обладающие полифункциональным действием, способные повышать подвижность, скорость твердения, водонепроницаемость, морозостойкость, придавать безусадочность цементным композициям.

5. Установлена необходимость введения в новую редакцию стандарта на добавки для бетонов нормируемого уровня для оценки эф-

фективности расширяющих добавок. Проведенные исследования по изучению свойств добавки РСАМ показали, что нормируемое в аналогичном российском стандарте для расширяющих добавок линейное расширение 0,2% явно завышено. Для цементных композиций с компенсированной усадкой линейное расширение может быть не выше 0,05%, самонапряжение 0,6–1,0 МПа.

Список цитированных источников

1. Титова Л. А., Бейлина М. И. Расширяющие добавки для бетонов нового поколения // Бетон и железобетон. – 2001. – № 4. – С. 24–27.
2. Патент № 2149843. Расширяющая добавка к цементу. Оpubл. 27.05.2000 БИ №15.
3. Патент № 2211194. Расширяющая добавка, гидравлическое вяжущее с указанной добавкой и способ его изготовления. Оpubл. 27.08.2003 БИ №24.
4. Патент № 2211194. Расширяющая добавка, гидравлическое вяжущее с указанной добавкой и способ его изготовления // Юдович Б. Э., Кириллов Г.М., Грили Д. – № 2002107243/03. Заявл. 22.03.02., опубл. 27.08.2003. Бюл. №24.
5. Провести исследования, разработать и внедрить новые композиции бетона, химические и минеральные модификаторы к ним, технологию приготовления и транспортирования бетонных и растворных смесей, обеспечивающие изготовление эффективных материалов и железобетонных конструкций, в том числе с компенсированной усадкой или самонапряжением. Отчет о НИР (заключит.) / УП «Институт БелНИИС»: рук. темы Н.П. Блещик. № гр. 20023797. – Минск, 2004.
6. Михайлов В. В., Литвер С. Л. Расширяющие и напрягающие цементы и самонапряженные конструкции. – М.: Стройиздат, 1974.
7. Кузьменков М. И., Мечай А. А., Куницкая Т. С. Влияние состава глин на минералообразование и свойства сульфалоомосиликатной добавки. / Цемент и его применение, 1998, № 5–6, С. 17–19.
8. Мечай А.А. Получение высокоактивного белитового цемента модифицированием его сульфалоомосиликатной добавкой: Автореферат канд. техн. наук: 05.17.11. – Мн., 1999 – 19 с.
9. Патент ВУ 8696. Способ получения расширяющей добавки в цемент.
10. Тур В.В. Экспериментально-теоретические основы предварительно напряженных конструкций при применении напрягающего бетона. – Брест: Изд. БПИ, 1998. – 243 с.
11. Литвер С.Л., Загурский В. А., Панченко А. И. Соотношение самонапряжения и свободного расширения напрягающих бетонов // Бетон и железобетон. – 1985. – №5. – С. 15-16.
12. Блещик Н. П., Протько Н. С. Бетоны с компенсированной усадкой. Основные проблемы и пути их решения // Сборник статей XIV научно-практического семинара «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь» (Минск, 22–23 июня 2006 г.) / Ред.коллегия: Т. М. Пецольд, Н. П. Блещик, Э. И. Батяновский (отв.ред.). – Мн.: БНТУ, 2006. Том 1. – С.12-23.