

# ВЛИЯНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР НА СТРУКТУРУ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

В статье рассматривается влияние знакопеременных температур на параметры физико механических свойств и структуры высокопрочных бетонов

Текст: А.Л. Гольденберг,  
НИИЖБ им. А.А. Гвоздева – филиал ОАО НИЦ  
«Строительство»

Долговечность сооружений из бетона, находящихся в переменных условиях эксплуатации, может быть переменной величиной. Это особенно актуально для Российской Федерации, где период климатической зимы в северных регионах страны сменяется относительно теплыми среднесуточными температурами. При этом для большинства мостовых сооружений характерна ситуация, когда вода, в которой находятся опоры, замерзает, происходит морозное разрушение, а затем вода оттаивает, и сооружение достаточно время находится во влажной среде при положительной температуре. Возникает вопрос о степени ущерба нанесенного сооружению. Ряд исследователей [2,6,8] считают, что при таких условиях эксплуатационный ресурс конструкций может быть не полностью исчерпан.

В настоящее время при строительстве транспортных сооружений начинают все чаще использоваться высокопрочные бетоны. Эти бетоны, помимо высокой (55–100 МПа) прочности, обладают низкой проницаемостью, повышенной коррозионной стойкостью, долговечностью и позволяют снизить материалоемкость конструкций, а также уменьшить трудоемкость работ при укладке бетона в конструкцию за счет применения высокоподвижной бетонной смеси.

Целью работы являлось определение зависимости некоторых эксплуатационных свойств бетонов (при изменной и кубиковой прочности, динамического и статического модулей упругости, диффузионной проницаемости, плотности структуры) от параметров микроструктуры цементного камня.

Поскольку свойства цементного камня предопределяются свойствами его структуры: пористостью, составом кристаллогидратов (балансом между субмикрокристаллами геля и крупными кристаллами), возникает задача исследования влияния микроструктуры цементного камня на эксплуатационные свойства высокопрочных бетонов при периодическом воздействии знакопеременных температур, моделирующем циклическую смену отрицательной температуры окружающей среды, в которой находятся железобетонные конструкции, на положительные.

По результатам ранее проведенных исследований была разработана модель эксперимента, которая за-

ключалась в сравнении динамики изменения некоторых физико механических свойств бетонов одинаковых классов по прочности на сжатие, имеющих равный объем цементного камня, но разного состава. Сравнения проводили по таким параметрам, как морозостойкость, прочность на сжатие, приизменная прочность, статический и динамический модули упругости, диффузионная проницаемость. Методика исследований моделировала условия эксплуатации бетонов в условиях воздействия знакопеременных температур, то есть, период циклического замораживания оттаивания сменялся периодом выдерживания бетона в нормальных условиях и в воде.

Исследования велись на 2 составах высокопрочных бетонов на органо минеральном модификаторе 20%й дозировки (с газообразующей добавкой на основе полигидросилоксанов и без нее). В качестве контрольного состава был взят бетон с добавкой суперпластификатора на нафталинформальдегидной основе с водовяжущим отношением, как и у бетонов на модификаторе. Контрольный образец бетона приготовлен из смеси с ОК=20 см, бетоны с модификатором – из смеси с ОК=22 см. Все образцы тяжелого бетона имели одинаковое водовяжущее отношение [вода/(цемент + модификатор)] равное 0,25, примерно одинаковое количество вяжущего (цемент+модификатор или цемент) в диапазоне 550±580.

Заформованные образцы хранились в камере нормального твердения ( $t=20\pm2^{\circ}\text{C}$ ,  $W=95\text{--}98\%$ ) до достижения ими возраста 28 суток.

Методику оценки эксплуатационных свойств бетона при периодическом воздействии знакопеременных температур можно условно разбить на две стадии.

Первая стадия представляла собой циклическое замораживание – периодическое замораживание и оттаивание в морозильной камере в течение 37 циклов – условный порог, соответствующий марке по морозостойкости F300 в солях по ГОСТ 10060.2 95 – испытания осуществлялись путем попеременного замораживания и оттаивания при  $50^{\circ}\text{C}$  в 5% м растворе хлористого натрия в морозильной камере ILKA. Выбор данного метода был обусловлен его распространностью в практике испытаний на морозостойкость научно исследовательскими и контрольно ревизионными ор-

ганизациями России и возможностью получать результаты высокой точности за относительно небольшой промежуток времени.

На второй стадии исследования проводилось выдерживание образцов бетона в нормальных и водных условиях – хранение образцов в воздушной среде ( $T=20\pm2^{\circ}\text{C}$ ,  $W=95\text{--}98\%$ ) или в водной среде ( $T=20\pm2^{\circ}\text{C}$ ,  $W=100\%$ ) в течение 28 суток.

Данный порядок проведения исследований на 2-й стадии эксперимента был выбран по следующим соображениям: большинство сооружений в течение процесса эксплуатации находятся частично в воде и частично на воздухе. Важно было исследовать влияние морозной деструкции при самом экстремальном воздействии на участки бетона, остающиеся на воздухе или в воде, после смены температурного режима с отрицательного на положительный (условный период «зима–лето»).

В целях определения достоверности проводимых исследований эксперимент по вышеизложенной методике проводился не в две стадии, а в четыре на одних и тех же образцах. Две последующие стадии испытаний полностью повторяли предыдущие.

Перед началом эксперимента проводились испытания образцов в возрасте 28 суток. Эти данные принимались за нулевую точку отчета. После каждой стадии эксперимента проводились испытания образцов, в количестве достаточном для статистической достоверности

сти исследований.

В работе была поставлена задача получения высо-

кой. В соответствии с поставленной задачей выбирались вид и качество используемых материалов. Составы бетонов и их свойства приведены в таблице 1.

Для приготовления бетонов использовались следующие материалы:

портландцемент ПЦ500 Д0 (минералогический состав,  $\% \text{C}_3\text{S}=58$ ,  $\text{C}_2\text{S}=19$ ,  $\text{C}_3\text{A}=6$ ,  $\text{C}_4\text{AF}=17$ ), соответствующий ГОСТ 10178 и ГОСТ 30515;

песок природный кварцевый ( $\text{Mkr}=2,8$ ), соответствующий ГОСТ 8736;

щебень гранитный (фракции 5–20 мм), соответствующий ГОСТ 8267 и ГОСТ 26633;

модификатор бетона МБ 10–30С, ТУ 5743 083 46854090 98;

нафталинформальдегидный суперпластификатор С 3, ТУ 5870 002 58042865 03;

газообразующая добавка на основе полигидросилоксанов КЭ 30 04 (50% концентрации), ТУ 2251 035 00209013 2004.

Кубиковая и приизменная прочность, статический модуль упругости определялись в соответствии с требованиями ГОСТов.

Динамический модуль упругости определялся по прохождению резонансных ультразвуковых колеба-

ний через образцы размерами 70 x 70 x 210 мм на приборе ИЧМК 3.

Плотность бетонов оценивалась по коэффициенту диффузионной проницаемости D6 по ГОСТ Р 52804 2007 на образцах размером 40 x 40 x 160 мм.

Исследования микроструктуры цементного камня проводились методами рентгеноструктурного анализа, дифференциально термического анализа и электронной микроскопии.

Для проведения исследований из цементного теста формовались образцы цементного камня размерами 30 x 30 x 30 мм, с расходами цемента и количеством добавки аналогичными для составов бетона, использовавшихся в работе. Водовяжущее отношение было постоянным и составляло 0,2.

В возрасте 28 суток нормального твердения образ-

ированные для рентгеноструктурного, дериватографического анализов и микрофотографии, а затем по наступлении 37 циклов попеременного замораживания и оттаивания и 28 суток хранения в водных условиях. Таким образом, образцы проходили первые 3 стадии эксперимента по оценке эксплуатационных свойств бетонов, подвергаемых периодическому воздействию значительных температур. Составы цементного камня и результаты определения прочности на сжатие образцов при периодическом воздействии значительных температур представлены в таблице 4.

Замещение части цемента на органо минеральный модификатор при постоянном водотвердом отношении

объема вовлеченного воздуха, а также, соответственно, к снижению объемной массы смеси. Кроме того, введение в бетонную смесь добавки кремнийорганической эмульсии на основе полигидросилоксанов приводит к дополнительному воздухововлечению (если сравнить состав 3 с составами 1, 2).

Образцы бетона составов на органо минеральном модификаторе (составы 2 и 3) обладали примерно равной кубиковой прочностью на сжатие, в то время как у бетона на нафталинформальдегидном суперпластификаторе, при том же количестве вяжущего прочность была меньше на  $\approx 11\%$ . Таким образом, по показателю

Таблица 1  
Составы и свойства бетонных смесей

№ состава	МБ10 30С, % от Ц	Состав бетонных смесей, кг/м <sup>3</sup>							Свойства бетонных смесей			
		Ц	МБ10 30С	П	Щ	В	СП С 3	КЭ	В/ Ц+МБ	γ, кг/м <sup>3</sup>	ОК, см	V <sub>BB</sub> , %
1	0	580			960	145	12,8		0,25	2393	20	4,2
2	20	460	90	730	960	140			0,25	2380	22	4,3
3	20	460	90	730	960	140		0,5	0,25	2381	22	4,9

Таблица 2

Физико механические характеристики бетонов в возрасте 28 суток нормального твердения

№№ соста вов	Прочность бетона, МПа		Модуль упругости E, ГПа		$\frac{R_{\text{пр}}}{R_{\text{куб}}}$	$\frac{E_{\text{ст}}}{E}$
	кубов	призм	статиче ский	динами ческий		
1	82,4	67,0	35,8	38,5	0,81	0,93
2	90,2	75,3	44,0	46,1	0,83	0,95
3	93,1	78,9		45,9	0,84	0,98

прочности бетоны на модификаторе МБ 10 30С можно отнести к классу В70 согласно ГОСТ 53231 2008, а бетон на суперпластификаторе С 3 к классу В60. Аналогичные показатели зафиксированы при испытании призм размерами 100 x 100 x 400 мм.

Статический модуль упругости высокопрочных бетонов на органо минеральном модификаторе после 28 суток нормального твердения составлял  $\approx 46,0$  ГПа. Это значительно выше (на 20%) значений статического модуля упругости для бетона на суперпластификаторе С 3 (35,8 ГПа).

Значения динамического модуля упругости высоко прочных бетонов незначительно отличались в большую сторону по сравнению со статическим модулем. В работе определялось отношение статического модуля упругости бетона к динамическому. Полученные результаты соотносятся с полученными другими исследователями, например А. Невиллем [4], в которых приводятся данные, что с повышением прочности на сжатие отноше-

ние. Зависимости между  $R_{\text{куб}}$  и  $E_{\text{пр}}$ ,  $E_{\text{ст}}$  и  $E$ , полученные по данным результатов исследований, представлены в таблице 2.

Диффузионная проницаемость высокопрочных бетонов изменялась в более широком диапазоне. После 28

суток нормального твердения образцов бетона коэффициент диффузии бетонов на модификаторе МБ 10 30С составлял  $42,8 \cdot 10^{-9}$ . Повышенный более чем в 10 раз по сравнению с бетоном на МБ коэффициент диффузии у бетона на суперпластификаторе С 3 позволяет говорить о более высокой проницаемости этого бетона, что согласуется с данными по его структуре, полученными по измерению скорости прохождения ультразвука в теле бетона.

После получения исходных результатов исследований высокопрочных бетонов, подвергаемых периодически воздействию знакопеременных температур на «нулевом этапе», были последовательно получены и обработаны данные на каждой из стадий эксперимента.

Призменная прочность бетона на органо минеральном модификаторе МБ 10 30С после 37 циклов периодического замораживания и оттаивания в среднем снизилась на 22% от первоначального уровня, а бетона на органо минеральном модификаторе с добавкой на основе полигидросилоксанов на 16%. Таким образом, подтверждается благоприятное воздействие кремнийорганической эмульсии на морозостойкость высокопрочных бетонов [5].

Результаты, полученные по испытаниям образцов кубов на прочность при сжатии, хорошо коррелируют с со значениями призменной прочности – падение кубовой прочности на сжатие составило 20% для бетона на органо минеральном модификаторе МБ 10 30С и 15% для бетона на МБ 10 30С с добавкой кремнийорганической эмульсии КЭ 30 04. Для контрольного состава бетона на основе нафталинформальдегидного суперпластификатора С 3 потери призменной и кубиковой прочности составляли соответственно 19 и 14%.

Снижение статического и динамического модулей упругости составило в среднем 10% для бетонов на модификаторе и бетонов с добавкой МБ и КЭ. Для бетона на С 3 статический и динамический модули понизились на 12%.

Коэффициент диффузии у бетонов на модификаторе МБ 10 30С повысился на 17%, что означает снижение плотности структуры высокопрочных бетонов в результате морозного воздействия.

После помещения образцов бетона в нормальные

температурно влажностные условия и влажную среду наблюдалось повышение эксплуатационных характеристик высокопрочных бетонов. Наиболее интенсивное восстановление свойств бетонов («самозалечивание») наблюдалось в водной среде, что согласуется с данными ряда авторов [2, 6, 7]. Прирост призменной и кубиковой прочности на сжатие для высокопрочных бетонов составил в среднем 10%, в то время как статический и динамический модули упругости повысились в среднем на 5–7%. Более высокий процент восстановления свойств наблюдался у бетонов на органо минеральном модификаторе (на 5–7%).

Коэффициент диффузионной проницаемости понижался, что означает повышение плотности структуры бетона и может служить косвенным признаком «самозалечивания» его микротрещин. Снижение коэффициента диффузии составило в среднем 5–10% от его значений после морозной деструкции.

При повторном морозном воздействии на образцы бетона с последующим восстановлением были получены аналогичные результаты, которые подтверждают адекватность используемой модели исследования. Тем не менее была выявлена тенденция более высокого прироста эксплуатационных показателей высокопрочных бетонов на модификаторе МБ 10 30С на уровне 10–12% от его значений на этапе замораживания и оттаивания. Важно отметить, что прочностные характеристики восстанавливались практически до начального значения.

Графическая интерпретация полученных результатов приведена на рис.1, 2, 3.

Для более глубокого анализа и подтверждения на микроуровне полученных результатов параллельно с основным экспериментом проводились исследования микроструктуры цементного камня. В таблице 4 приведена информация о составе цементного камня и его прочности на сжатие в возрасте 28 суток нормального твердения, фазовый состав цементного камня в возрасте 28 суток нормального твердения, после прохождения 37 циклов переменного замораживания и оттаивания и 28 суток восстановления. Из приведенных в таблице результатов исследований можно сделать вывод о том, что наличие добавки модификатора МБ 10 30С в соста-

Таблица 3  
Эксплуатационные свойства высокопрочных бетонов при периодическом воздействии

№№ составов	Период испытаний	Прочность бетона, МПа		Модуль упругости Е, ГПа		Диффузионная проницаемость, 10 <sup>-9</sup> Дб, см <sup>2</sup> /с
		призм	кубов	статический	динамический	
1	0	67,0	82,4		38,5	42,8
	37	54,5	70,7	31,5	33,8	59,4
	норм.	56,5	71,1		34,9	46,2
	водн.	60,2	76,8	34,8	37,4	43,1
	37 2	54,1	66,2	28,3	31,4	67,9
	норм. 2	57,0	72,0		32,9	60,4
	водн. 2	59,0	74,3	33,2	35,3	57,5
2	0	75,3	90,2	44,0	46,1	3,25
	37	58,4	72,1	42,7	42,1	5,24
	норм.	66,0	80,3	44,5	43,7	4,02
	водн.	71,2	84,3	46,1	45,0	3,89
	37 2	65,8	77,8	38,6		5,72
	норм. 2	68,2	80,5	44,8	41,5	4,88
	водн. 2	74,1	84,5	45,7	44,9	3,66
3	0		93,1	45,2	45,9	3,09
	37	66,2	79,3	40,1	41,6	4,86
	норм.	71,0	83,5	40,9	42,7	3,71
	водн.	74,9	89,6	45,1		3,50
	37 2	68,5	80,8	40,1	42,0	4,46
	норм. 2		83,9	45,0	42,3	3,54
	водн. 2	72,5	85,9	45,9	44,1	3,39

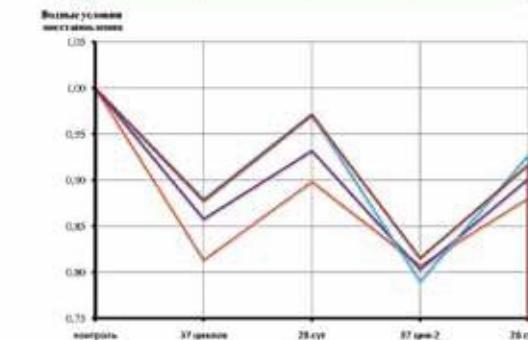
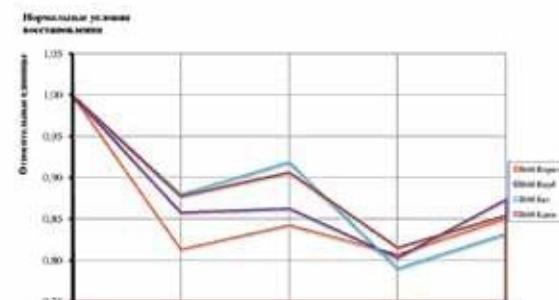


Рис. 1. Динамика изменения свойств высокопрочного бетона В10 при периодическом воздействии знакопеременных температур.

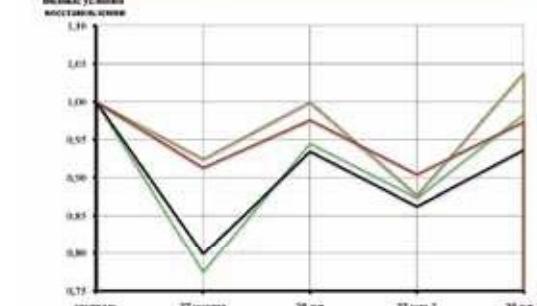
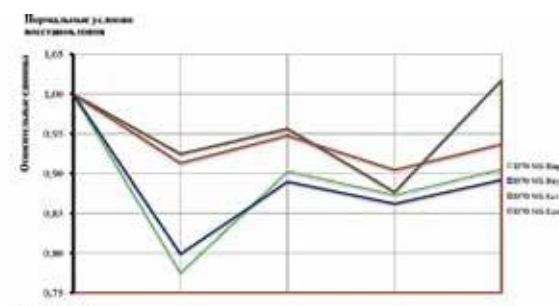


Рис. 2. Динамика изменения свойств высокопрочного бетона В10 при периодическом воздействии знакопеременных температур.

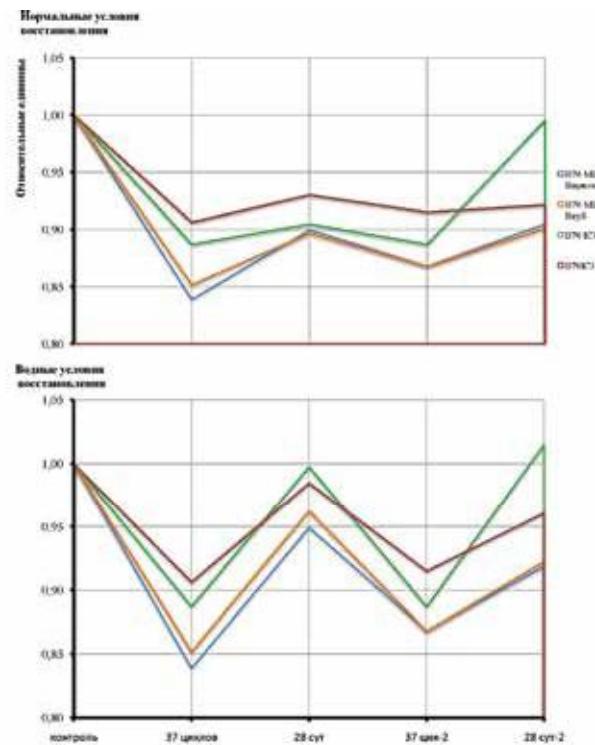


Рис. 3. Динамика изменения свойств высокопрочного бетона В70 МБ+КЭ при периодическом воздействии одновременных температур

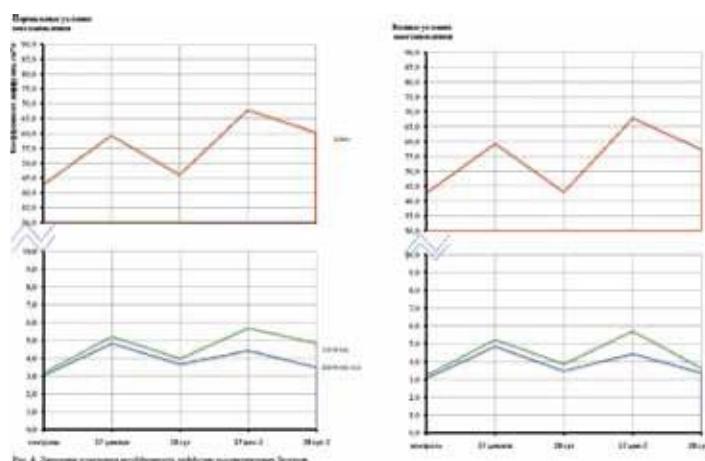


Рис. 4. Динамика изменения эффективного действия различных добавок

Таблица 4

№ состава	Состав цементного камня, кг/м <sup>3</sup>					В Ц+МБ	Период испытаний	Прочность цементного камня, МПа	Свойства цементного камня		
	Ц	МБ10 30С	В	СП С 3	КЭ				Степень гидратации, %	Кол во Ca(OH) <sub>2</sub> , отн. ед.	CSH(I), отн. ед.
1	580		115	12,8		0,2	0	115,4	80	11	100
							37	105,7	83	9,6	120
							норм.	120,8	87	9,4	145
2	460	90	110			0,2	0	138,8	59	3,6	100
							37	112,2	64	2,3	152
							норм.	148,9	71	2,2	210
3	460	90	110			0,2	0	126,4	58	3,4	100
							37	115,7	63	2,7	149
							норм.	129,2	69	2,4	200

ве высокопрочных бетонов, имеющих одинаковое водо вяжущее отношение и практически одинаковую проч

ную степень гидратации цемента и оказывает значительное влияние на содержание гидратных фаз. Степень гидратации цемента образцов на нафталинформальдегидном суперпластификаторе С 3 составляла 80% на начальной стадии эксперимента, после 37 циклов замораживания и оттаивания – 83%, а на стадии восстановления – 87%. Даные исследования показывают высокую степень гидратации цемента и низкую реакционную способность цементного камня к дальнейшему кристаллообразованию. С другой стороны, степень гидратации цемента образцов на органо минеральном модификаторе МБ 10 30С составляла ≈59% на начальной

стадии эксперимента, после 37 циклов замораживания и оттаивания – ≈63%, а на стадии восстановления – 70%. Из полученных результатов видно, что у образцов цементного камня степень гидратации была ниже, что может объяснять более существенное восстановление эксплуатационных свойств высокопрочных бетонов в зрелом возрасте после морозной деструкции.

Содержание портландита  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  у образцов цементного камня с органо минеральным модификатором уменьшено практически в 3 раза по сравнению с образцами на суперпластификаторе, в то время как количество низкоосновных гидросиликатов CSH(I) на стадии восстановления увеличилось в 2 раза. Структу

перной с преобладанием мелкозернистых кристалло

гидратов и гелеобразных новообразований. Результаты исследований свидетельствуют о самозалечивании микротрещин высокопрочных бетонов на модификаторе за счет низкоосновных гидросиликатов, кольматающих микротрещины. Фотография микроструктуры цементного камня с органо минеральным модификатором МБ 10 30С на трех стадиях эксперимента приведена на рис. 5.

### Выводы

1. Эксплуатационные свойства (призменная и кубовая прочности, статический и динамический модуль упругости, диффузионная проницаемость) высоко прочных бетонов могут восстанавливаться после периодического воздействия знакопеременных температур.

2. После повторного периодического воздействия на бетоны, подвергаемые периодическому воздействию знакопеременных температур, бетон на органо минеральном модификаторе МБ 10 30С восстанавливается

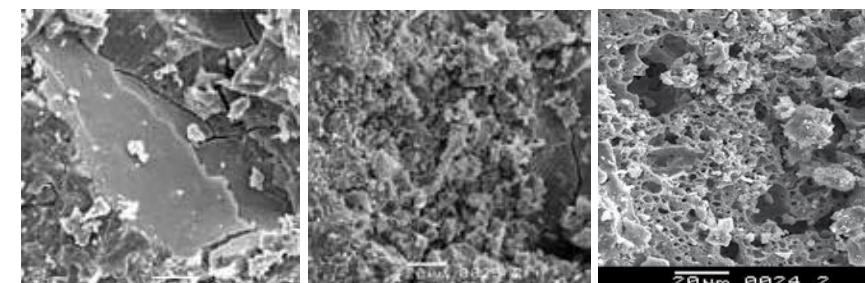
отсутствия добавки на основе полигидросилоксанов – кремнийорганической эмульсии КЭ 30 04.

3. Исследования микроструктуры высокопрочных бетонов методами дифференциального термического и рентгеноструктурного показали, что высокопрочные бетоны на основе органо минерального модификатора МБ 10 30С в зрелом возрасте имеют степень гидратации

бетоном на С 3. При помещении бетона в водные ( $T=20^{\circ}\text{C}$ ,  $W=100\%$ ) или влажные ( $T=20^{\circ}\text{C}$ ,  $W=95\text{--}98\%$ ) условия в структуре бетона, за счет не полностью использованного ресурса гидратации, происходит восстановление структуры и, соответственно, эксплуатационных свойств бетона. Залечивание микроструктуры происходит за счет новообразований низкоосновных гидросиликатов кальция, образующихся в устье микротрещин.

### Список литературы

1. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. – М.: Стройиздат, 1998.
2. Вербецкий Г.П. Прочность и долговечность бетона в водной среде. – М.: Стройиздат, 1976.
3. Каприлов С.С., Шейнфельд А.В. Бетоны нового поколения с высокими эксплуатационными свойствами // Материалы Международной конференции "Долговечность и защита конструкций от коррозии", Москва, 25–27 мая 1999, с.191 196.
4. Невиль А. Свойства бетона– М.: Стройиздат, 1972.
5. Шейнфельд А.В., Батудаева А.В. Морозостойкость и морозостойкость высокопрочных бетонов из высокоподвижных смесей. / Международная конференция «Долговечность и защита конструкций от коррозии». // Материалы международной конференции 7-9 октября, 2002, г. Волгоград, с.136 141.
6. C. Edvardsen. Water permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete – ACI Materials Journal, 1994
7. S. Dunn. Self Healing Concrete – A Sustainable Future – Cardiff University
8. A. Hosoda & S. Komatsu. Self healing properties with various crack widths under continuous water leakage



1

3

Рис. 5. Микрофотография цементного камня

- 1 контроль
- 2 37 циклов 3.0
- 3 восстановление  
Добавка – МБ 10 30С

**EUROBEND**

Innovation&History

Wire processing machines

- Оборудование для обработки проволоки

Rebar processing machines

- Оборудование для обработки арматурной стали

Mesh welding lines

- Сварочные линии для производства сеток

**EUROBEND S.A.**  
350, Tatoiou Ave., 13677 Athens – Greece  
Tel +30-210-8077775, Fax +30-210-6206567  
[www.eurobend.com](http://www.eurobend.com) [info@eurobend.com](mailto:info@eurobend.com)

**ПРЕДСТАВИТЕЛЬСТВО В РОССИИ**  
Компания "ИНТЕРНА"  
Тел. +7-495-662-3133 факс +7-495-662-3134  
[www.interna.su](http://www.interna.su) [info@interna.su](mailto:info@interna.su)