

**СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА  
ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ  
ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР**

Д-р техн. наук С.С. Каприев

(Научно-исследовательский  
институт бетона и железобетона

им. А.А. Гвоздева),

инженер А.Л. Гольденберг

(ООО НИЛ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ»),

д-р техн. наук, профессор А.Г. Тамразян

(Национальный исследовательский

Московский государственный

строительный университет (НИУ МГСУ))

Конт. информация: [kapriev@mail.ru](mailto:kapriev@mail.ru);

[alexandrgolden@gmail.com](mailto:alexandrgolden@gmail.com);

[tamrazian@mail.ru](mailto:tamrazian@mail.ru)

*Приводятся данные по самозалечиванию высокопрочных бетонов при периодическом знакопеременном воздействии. Даны экспериментальная количественная оценка процессов деструкции и самозалечивания, описаны процессы, развивающиеся в цементном камне на микроуровне. Степень деструкции бетона с добавкой МБ-30С при морозном воздействии в сравнении с обычным меньше, а степень самозалечивания, напротив, выше, чем у обычного бетона, что связано с интенсивностью гидратации остаточного клинкерного фонда. Выявленные тенденции свидетельствуют, что эксплуатационные свойства бетона с органоминеральным модификатором МБ-30С сохраняются значительно дольше, чем у обычного бетона.*

**Ключевые слова:** высокопрочный бетон, долговечность, самозалечивание, микротрецина, периодическое воздействие, знакопеременная температура.

Поводом обратиться к проблеме объективной оценки долговечности высокопрочного бетона при сезонном замораживании и последующем выдерживании является массовое применение высокопрочного бетона и некоторые особенности изменения его свойств и при циклическом воздействии отрицательной температуры. Исходя из традиционных и нормативных требований к бетонным конструкциям, они должны быть стойкими, пригодными к эксплуатации, долговечными, экономическими и эстетичными [1].

Тема исследования ранее освещалась в ряде публикаций [2, 3].

Объектом исследований в работе, представленной в настоящей статье, являлся высокопрочный бетон, приготовленный с использованием традиционного цемента и заполнителей, а также органо-минерального модификатора МБ-30С, содержащего в своем составе микрокремнезем, золу уноса и суперпластификатор.

Экспериментальные исследования касались изменений ряда важных физико-технических свойств бетона, предопределяющих эксплуатационную надежность конструкций, в зависимости от периодического воздействия низкой отрицательной температуры с последующим выдерживанием в нормальных температурно-влажностных условиях.

Экспериментально определяли прочность при сжатии (кубиковую, призменную), статический и динамический модули упругости, склонность к шелушению по изменению массы, диффузионную проницаемость, относительные деформации.

Исследования проводили на трех разновидностях высокопрочного бетона, отличающихся между собой вещественным составом цементного теста (**табл. 1**).

Характеристики бетона после твердения в течение 28 сут. в нормальных температурно-влажностных условиях ( $t = 20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ , относительная влажность – 96-98 %) приведены в **табл. 2**. По прочности при сжатии, с учетом коэффициента вариации 13,5 %, образцы соответствовали классам В60-В70.

Значения характеристик (**табл. 2**) приняты в качестве исходных величин, относительно которых впоследствии оценивали изменения при выдерживании бетона в разных условиях.

Испытания проводили после периодов замораживания-оттаивания и чередующимися с ними периодами восстановления в нормальных условиях в 2 стадии: замораживание-оттаивание при температуре минус 50 °C в 5 % растворе NaCl по ГОСТ 10060–2012, затем в течение 28 сут. выдерживание образцов при температуре плюс 20 °C в воздушной и водной средах при влажности соответственно 96-98 % и 100 %. Графическое изображение методики и полученные результаты приведены на (**рис.1, 2**).

Анализ результатов экспериментов осуществлялся при помощи двух показателей: степени деструкции и степени самозалечивания. Под первым подразумевается изменение той или иной характеристики бетона в течение одной стадии эксперимента. Определялось отношением значения физической характеристики до начала циклического замораживания к значению той же характеристики после 37 циклов замораживания-оттаивания.

Таблица 1

## Состав и свойства бетонной смеси

№ со- става	Состав бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup>							Свойства смеси				
	Ц	П	Щ	В	МБ-30С	СП	КЭ	В/Ц	В/(Ц+МБ)	ОК, см	γ, кг/м <sup>3</sup>	V <sub>вв</sub> , %
<b>1-К</b>	585	690	965	150	-	7	-	0,26	0,26	20	2396	2,1
<b>2-МБ</b>	475	755	950	145	98	-	-	0,31	0,25	22	2423	2
<b>3-МБ</b>	465	740	930	145	96	-	0,5	0,31	0,26	22	2375	4

**Примечание.** Ц – цемент марки ПЦ 500-Д0-Н, соответствующий ГОСТ 10178–85; П – песок с Мкр = 2,8, соответствующий ГОСТ 8736–2014; Щ – щебень прочностью М 1400 фракции 5–20 мм, соответствующий ГОСТ 8267–93; В – вода; МБ-30С – вид модификатора бетона; СП – суперпластификатор С-3 на основе сульфированных нафталин-формальдегидных поликонденсатов, соответствующий ТУ 5870-002-58042865-03; В/Ц – отношение массы воды к массе цемента в свежеизготовленной бетонной смеси; КЭ – кремний-органическая эмульсия КЭ 30-04 50 % концентрации, соответствующая ТУ 2251-035-00209013–2004; ОК – осадка колпака; γ – плотность; V<sub>вв</sub> – воздухововлечение.

Таблица 2

## Характеристики бетона

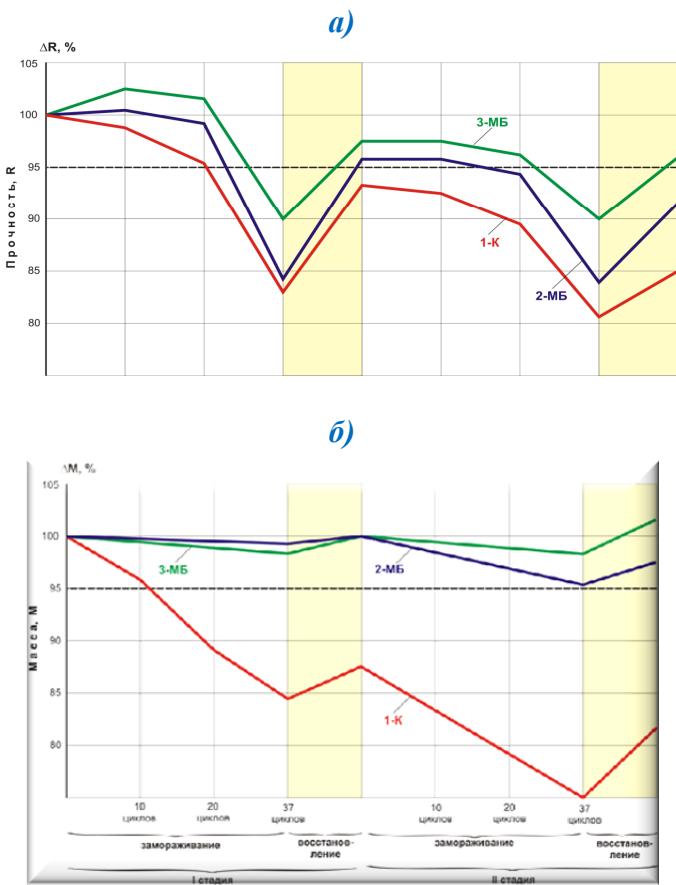
№ со-ставы	Класс бето-на	Характеристики бетона в возрасте 28 сут. нормального твердения				
		Прочность, МПа		Модуль упругости, ГПа		Коэффициент диффузии, $1 \times 10^{-9}$ см <sup>2</sup> /с
		кубико-важная	призмен-ная	стати-ческий	динами-ческий	
<b>1-К</b>	B60	76,3	72,4	35,8	49,4	32,8
<b>2-МБ</b>	B70	89,2	83,1	44,0	47,7	3,2
<b>3-МБ</b>	B70	88,1	83,8	46,7	48,8	3,1

Под вторым показателем подразумевается отношение значения одних и тех же характеристик бетона после восстановительного периода, отнесенных к значению до восстановления.

Анализ экспериментальных данных показал, что для всех разновидностей бетона снижение прочности вследствие деструктивных процессов, связанных с замораживанием-оттаиванием, частично компенсируется приростом прочности, связанным с самозалечиванием в восстановительном периоде. Графическое изображение результатов исследований приведено на рис. 1.

Проведенные исследования, показали, что выдерживание в водной среде может способствовать повышению прочности после снижения при циклическом замораживании до уровня 5 %, что соответствует значению потери прочности при испытаниях на морозостойкость (ранее нормировалось по ГОСТ 10060). Это означает, что частично утраченный при замораживании прочностной потенциал бетона может быть восстановлен.

Шелушение при замораживании в солях, как известно [4, 5], связано с такими факторами, как водопоглощение, т.е. с плотностью структуры, и реакционной способностью цементного камня по отношению к жидкому агрессивному агенту, в данном случае к хлорид-ионам, содержащихся в 5 % растворе хлорида натрия. К тому же, растворимость портландита значительно повышается в растворах NaCl [4].



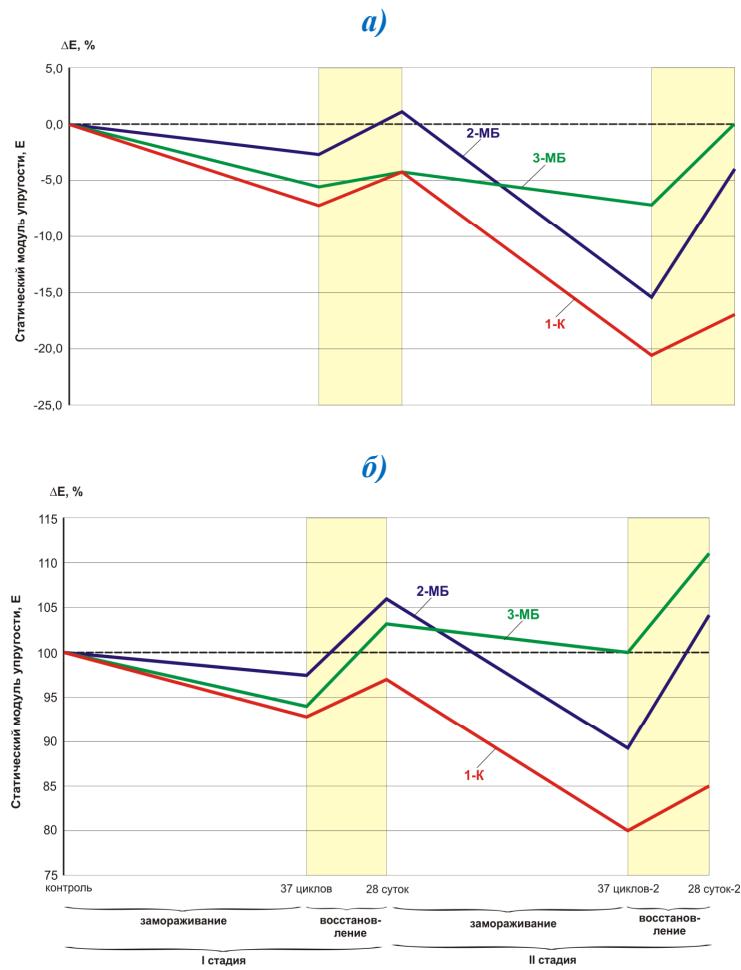
**Рис. 1. Относительные значения прочности при сжатии (а) и массы (б) образцов при двухстадийном циклическом замораживании-оттаивании и восстановлении в воде при  $t = 20 \pm 2$  °С**

(100 % на оси ординат соответствуют абсолютным значениям исходных характеристик каждого образца по табл. 2)

Так как плотность или непроницаемость модифицированного бетона значительно выше, что подтверждается данными о характере дифференциальной пористости [3] и полученными в эксперименте результатами испытаний диффузационной проницаемости, а фазовый состав цементного камня отличается от обычного (контрольного) минимизированным содержанием кристаллов портландита, стойкость к шелушению у него, в отличие от обычного, также выше.

Характер изменения статического модуля упругости подобен изменению прочности при сжатии, однако при восстановлении в водной среде заметен более интенсивный, в сравнении с прочностью, прирост значений модуля. Это является не только свидетельством высокой сте-

пени самозалечивания структуры, но и следствием водонасыщения материала, которое способствует, как известно [6], повышению значений модуля упругости (**рис. 2**).



**Рис. 2. Относительные значения статического модуля упругости ( $\Delta E_{\text{ст}}$ ) при двухстадийном циклическом замораживании-оттаивании и восстановлении на воздухе (а) и в воде (б) при  $t = 20 \pm 2^{\circ}\text{C}$  (100 % на оси ординат соответствуют абсолютным значениям исходных характеристик по табл. 2)**

Из полученных данных по диффузационной проницаемости следует, что проницаемость для хлорид-ионов модифицированного бетона (2-МБ и 3-МБ) на порядок меньше (**табл. 3**), чем контрольного образца аналогичной прочности, что выявлено ранее [7], и связано с особенностями фазового состава и пористости цементного камня. Однако у мо-

дифицированного бетона в процессе двухстадийного эксперимента величина проницаемости почти полностью возвращается к исходному значению, в отличие от контрольного.

По результатам исследований можно сделать вывод, что степень деструкции, определенная по изменению основных физико-технических характеристик, у образцов модифицированного бетона меньше, чем у обычного, а степень самозалечивания – выше. В целом при повторяющихся циклах свойства модифицированного бетона относительно исходного состояния ухудшаются в меньшей степени. Причина заключается в особенностях структуры цементного камня и бетона, а также потенциале гидратации цемента, что предопределяет обратимость изменения основных свойств бетона в зависимости от условий выдерживания.

Известно, что цементный камень с модификатором МБ отличается не только низкой капиллярной пористостью, но и фазовым составом, в котором минимизировано содержание имеющей форму крупного кристалла портландита (размер не более 10 мкм), а баланс между высокоосновными гидросиликатами CSH(II) с размерами от 0,01 до 0,05 мкм и низкоосновными тонкодисперсными CSH(I), имеющих размеры не более 0,01 мкм [8], смешен в сторону последнего [9].

Следовательно, фазовый состав модифицированного цементного камня отличается от обычного преобладанием в нем (точнее в тоберморитовом геле) тонкодисперсных низкоосновных гидросиликатов типа CSH(I). Удельная поверхность кристаллизационных контактов и соответственно прочность КС и цементного камня в целом как при сжатии, так и при растяжении выше.

Напряжения, возникающие в бетоне от воздействия знакопеременных температур, достигая уровня, превышающего прочность материала при растяжении, приводят соответственно к деформациям и образованию микротрещин. Микротрефчины могут дислоцироваться как в структуре цементного камня, так и в контактной зоне между цементным камнем и заполнителем. В структуре высокопрочного бетона, содержащего микрокремнезем и золу уноса, по известным литературным данным, практически отсутствует контактная зона, в которой обычно в большей мере концентрируется портландит – самый слабый и неустойчивый кристаллогидрат цементного камня [10].

Таким образом, повышенная прочность при растяжении, связанная с более дисперсной структурой цементного камня, в сочетании с отсутствием ослабленной контактной зоны, способствует повышению стойкости модифицированного бетона к деструктивным процессам.

Степень гидратации цемента ( $\alpha$ ) в модифицированном высоко-прочном бетоне в возрасте более 28 сут., как правило, находится на уровне 0,5-0,6 [4, 9], более низком по сравнению со степенью гидратации

ции цемента в обычном бетоне (0,8–0,9), т.е. нереализованный клинкерный фонд у первого выше.

По данным [8], при степени гидратации цемента ( $\alpha$ ) менее 0,8 структурообразующие процессы преобладают над деструктивными, что способствует самозалечиванию и приросту прочности; при  $\alpha \approx 0,8$ –0,9 наблюдается равновесие; при  $\alpha > 0,9$  преобладают деструктивные процессы. Поэтому самозалечивание не проявляется, прирост прочности не наблюдается. Самозалечивание и восстановление физико-технических свойств бетона, связанное с неизбежным сокращением клинкерного фонда, носит затухающий характер.

Тенденции, выявленные в работе, свидетельствуют, что эксплуатационные свойства бетона с органоминеральным модификатором МБ-30С, подвергнутого в связи с климатическими условиями циклическому замораживанию-оттаиванию и выдерживанию в нормальных температурно-влажностных условиях, сохраняются значительно дольше, чем у обычного бетона. Фактическая долговечность бетона с органоминеральным модификатором при морозной деструкции выше того уровня, который обычно определяется маркой бетона по морозостойкости.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Тамразян А.Г. *Бетон и железобетон: проблемы и перспективы. / А.Г. Тамразян // Промышленное и гражданское строительство.* – 2014. – № 7. – С. 51-54.
2. Каприев С.С. *Свойства высокопрочного бетона, подвергнутого периодическому воздействию температуры / С.С. Каприев, А.Л. Гольденберг // Строительные материалы.* – 2013. – № 3. – С. 60-66.
3. Edvardsen C. *Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete // ACI Materials Journal.* – 1994.
4. Москвин В.М. *Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.М. Москвин, Ф.М. Иванов, С.Н. Алексеев, Е.А. Гузев.* – М.: Стройиздат, 1980. – 536 с.
5. Толмачев С.Н. *Особенности морозно-солевого воздействия на свойства аэродромного бетона / С.Н. Толмачев, И.Г. Кондратьева, А.В. Матяши // Строительные материалы.* – 2011. – № 3. – С. 107–109.

6. Шейнфельд А.В., Батудаева А.В. Морозостойкость и морозостойкость высокопрочных бетонов из высокоподвижных смесей: материалы Международной конференции «Долговечность строительных конструкций. Теория и практика защиты от коррозии», Волгоград, 7–9 октября, 2002. – С. 136–141.
7. Невилль А. Свойства бетона / А. Невилль; пер. с англ. В.Д. Парфенова и Т.Ю. Якуб. — М.: Стройиздат, 1972. – 344 с.
8. Бабков В.В. Структурообразование и разрушение цементных бетонов / В.В. Бабков, В.Н. Мохов, С.М. Капитонов, П.Г. Комохов. — Уфа: Уфимский полиграфкомбинат, 2002. – 376 с.
9. 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.
10. Гольденберг А.Л. Влияние периодического воздействия знакопеременных температур на структуру и эксплуатационные свойства высокопрочных бетонов / А.Л. Гольденберг // Вестник МГСУ. – 2011. – № 2. – С. 93-104.

## *LITERATURA*

1. Tamrazjan A.G. Beton i zhelezobeton: problemy i perspektivy. / A.G. Tamrazjan // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2014. – # 7. – S. 51-54.
2. Kaprielov S.S. Svojstva vysokoprochnogo betona, podvergnutogo periodicheskому vozdejstviju temperatury / S.S. Kaprielov, A.L. Gol'denberg // Stroitel'nye materialy. – 2013. – # 3. – S. 60-66.
3. Edvardsen S. Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete // ACI Materials Journal. – 1994.
4. Moskvin V.M. Korrozija betona i zhelezobetona, metody ih zashchity / V.M. Moskvin, F.M. Ivanov, S.N. Alekseev, E.A. Guzeev. – M.: Stroizdat, 1980. – 536 s.
5. Tolmachev S.N. Osobennosti morozno-solevogo vozdejstvija na svojstva ajerodromnogo betona / S.N. Tolmachev, I.G. Kondrat'eva, A.V. Matjash // Stroitel'nye materialy. – 2011. – # 3. – S. 107–109.
6. Shejnfel'd A.V., Batudaeva A.V. Morozostojkost' i morozosolestojkost' vysokoprochnyh betonov iz vysokopodvizhnyh smesej: materialy Mezhdunarodnoj konferencii «Dolgovechnost' stroitel'nyh

- konstrukcij. Teorija i praktika zashhity ot korrozii», Volgograd, 7–9 oktyabrja, 2002. – S. 136–141.*
7. *Nevill' A. Svojstva betona / A. Nevill'; per. s angl. V.D. Parfenova i T.Ju. Jakub. – M.: Strojizdat, 1972. – 344 s.*
  8. *Babkov V.V. Strukturoobrazovanie i razrushenie cementnyh betonov / V.V. Babkov, V.N. Mohov, S.M. Kapitonov, P.G. Komohov. – Ufa: Ufimskij poligrafkombinat, 2002. – 376 s.*
  9. *Kaprielov S.S., Shejnfel'd A.V. Betony novogo pokolenija s vysokimi jekspunktacionnymi svojstvami: materialy Mezhdunarodnoj konferencii «Dolgovechnost' i zashhita konstrukcij ot korrozii», Moskva, 25–27 maja 1999. – S. 191–196.*
  10. *Gol'denberg A.L. Vlijanie periodicheskogo vozdejstvija znakope-remennyh temperatur na strukturu i jekspunktacionnye svojstva vysokoprochnyh betonov / A.L. Gol'denberg // Vestnik MGSU. – 2011. – # 2. – S. 93–104.*
- 

## **PROPERTIES OF HIGH STRENGTH CONCRETE WHEN NEGATIVE TEMPERATURES CYCLING**

Doctor of Engineering **S.S. Kaprielov**  
(Concrete and Reinforced Concrete  
Research Institute n. a. A.A. Gvozdev),

Engineer **A.L. Goldenberg**  
(LTD NIL «STROJMATERIALY»),  
Doctor of Engineering, Professor **A.G. Tamrazyan**  
(National Research  
Moscow State University  
of Civil Engineering (NRU MGSU))  
Contact information: [kaprielov@mail.ru](mailto:kaprielov@mail.ru);  
[alexandrgolden@gmail.com](mailto:alexandrgolden@gmail.com);  
[tamrazian@mail.ru](mailto:tamrazian@mail.ru)

*The data concerning self-healing high strength concrete when freeze-thaw cycling is presented. The experimental quantitative evaluation of destruction and self-healing processes is given. The processes developing in the cement stone at the micro-structure level are described. The destruction degree of the concrete with the additive of MB-30C, when frost action developing in comparison with the conventional, is smaller, and the degree of self-healing, however, is higher than for conventional concrete, which is associated with the intensity of the residual clinker hydration fund. Revealed trends indicate that the performance properties of concrete with organo-*

*mineral modifier MB-30C remain unchanged significantly longer than for conventional concrete.*

**Key words:** *high strength concrete, durability, self-healing, microfracture, periodical impact, freeze-thaw temperature.*

---

Рецензент: канд. техн. наук Б.П. Кутько (ФАУ «РОСДОРНИИ»).

Статья поступила в редакцию: 30.08.2018 г.