

**О САМОЗАЛЕЧИВАНИИ ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА,
ПОДВЕРГНУТОГО ДЕСТРУКЦИИ
ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ЗАМОРАЖИВАНИИ**

**ABOUT SELF-HEALING HIGH-STRENGTH CONCRETE,
UNDERLOADED DESTRUCTION IN CYCLIC FREEZING**

С.С. КАПРИЕЛОВ, А.Л. ГОЛЬДЕНБЕРГ, А.Г. ТАМРАЗЯН
S.S. KAPRIELOV, A.L. GOLDENBERG, A.G. TAMRAZYAN

(Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона им. А.А. Гвоздева, структурное подразделение АО "НИЦ "Строительство", ООО НИЛ "СТРОЙМАТЕРИАЛЫ", Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет) (Research, Design and Technological Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, a Structural Unit of JSC "SIC "Construction", LLC NILE "STROYMATERIALY", National Research Moscow State University of Civil Engineering)
E-mail: kapriellov@mail.ru; alexandrgolden@gmail.com; tamrazian@mail.ru

Приводятся данные по самозалечиванию высокопрочных бетонов при периодическом знакопеременном воздействии. Дается 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.

The information is about self-healing high strength concrete performance properties under alternating temperature influence. Experimental quantitative mark of destruction and self-healing processes is given, processes developing in the cement stone at the micro-structure level are described in the article. Degree of destruction of the concrete with the additive of MB-30C with frost effects in comparison with

the usual 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. Identified trends indicate that the performance properties of concrete by organic modifier with the MB-30C lasts longer than for conventional concrete.

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

Keywords: durability, self-healing of concrete, high strength concrete, periodical influence of alternating temperatures.

Массовое применение высокопрочного бетона и некоторые особенности его свойств и поведения при циклическом воздействии отрицательной температуры дают повод обратиться к проблеме объективной оценки долговечности высокопрочного бетона при сезонном замораживании и последующем выдерживании в нормальных условиях. Исходя из частой формулировки требований к бетонным конструкциям – они должны быть стойкими, пригодными к эксплуатации, долговечными, экономичными и эстетичными [4]. Тема исследования ранее освещалась в [11], [12].

Объект исследований – высокопрочный бетон, приготовленный с использованием традиционного цемента и заполнителей, а также органоминерального модификатора МБ-30С, содержащего в своем составе мик-

рокремнезем, золу-унос и суперпластификатор.

Исследовали изменения основных физико-технических свойств бетона, определяющих 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, призмическую), 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).

Таблица 1

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

Примечание. Ц – цемент марки ПЦ 500-Д0-Н, соответствующий ГОСТу 10178–85; П – песок с M_{кр} = 2,8, соответствующий ГОСТу 8736–2014; Щ – щебень прочностью М 1400 фр. 5–20 мм, соответствующий ГОСТу 8267–93; В – вода; СП – суперпластификатор С-3 на основе сульфированных нафталинформальдегидных поликонденсатов, соответствующий ТУ 5870-002-58042865–03; КЭ – кремнийорганическая эмульсия КЭ 30-04 50% концентрации, соответствующая ТУ 2251-035-00209013–2004; ОК – осадка конуса; γ – плотность; V_{вв} – воздухо-вовлечение.

Характеристики бетона после твердения в течение 28 суток в нормальных температурно-влажностных условиях (t=20±2°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 в табл. 2 приняты в качестве исходных величин, относительно которых впоследствии оценивали изменения при выдерживании бетона в разных условиях.

№ состава	Класс бетона	Характеристики в возрасте 28 суток нормального твердения				
		прочность, МПа		модуль упругости, ГПа		коэффициент диффузии, $1 \cdot 10^{-9}$ см ² /с
		кубиковая	призменная	статический	динамический	
1-К	В60	76,3	72,4	35,8	49,4	32,8
2-МБ	В70	89,2	83,1	44,0	47,7	3,2
3-МБ	В70	88,1	83,8	46,7	48,8	3,1

Испытания проводили после периодов замораживания-оттаивания и чередующимися с ними периодами восстановления в нормальных условиях в две стадии: замораживание-оттаивание при температуре -50°C в 5%-ном растворе NaCl по ГОСТу 10060–2012, затем в течение 28 суток выдерживание образцов при температуре 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.

Для анализа результатов эксперимента использовали два показателя: степень деградации и степень самозалечивания. Под первым подразумевается изменение той или иной характеристики бетона в течение одной стадии эксперимента. Определяли отношением значения физической характеристики до начала циклического замораживания к значению той же характеристики после 37 циклов замораживания-оттаивания.

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

Оказалось, 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 – относительные значения прочности при сжатии (а) и массы (б) образцов при двухстадийном циклическом замораживании-оттаивании и восстановлении в воде при температуре $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ (100% на оси ординат соответствуют абсолютным значениям исходных характеристик каждого образца по табл. 2)).

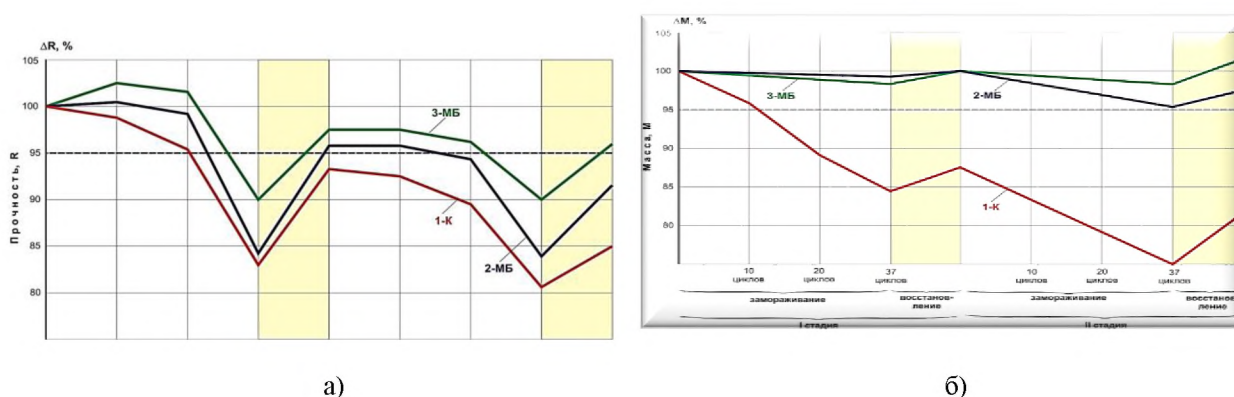


Рис. 1

Исследования, проведенные в работе, показали, что выдерживание в водной среде может способствовать повышению прочности после снижения при цикличе-

ском замораживании до уровня 5%, что соответствует значению потери прочности при испытаниях на морозостойкость (ранее нормировалось по ГОСТу 10060). Это озна-

чает, что частично утраченный при замораживании прочностной потенциал бетона может быть восстановлен.

Шелушение при замораживании в солях, как известно [2], [3], связано с такими факторами, как водопоглощение, то есть с плотностью структуры, и реакционной способностью цементного камня по отношению к жидкому агрессивному агенту, в данном случае к хлорид-ионам, содержащимся в 5%-ном растворе хлорида натрия. К тому же растворимость портландита значительно повышается в растворах NaCl [2]. Так как плотность, или непроницаемость модифицированного бетона, значительно выше, что подтверждается данными о характере дифференциальной пористости [12] и полученными в эксперименте результатами испытаний диффузионной 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. В данном случае это не только свидетельство высокой степени самозалечивания структуры, но и следствие водонасыщения материала, которое способствует, как известно [7], повышению значений модуля упругости (рис. 2 – относительные значения статического модуля упругости ($\Delta E_{ст}$) при двухстадийном циклическом замораживании–оттаивании и восстановлении на воздухе (а) и в воде (б) при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$ (100% на оси ординат соответствуют абсолютным значениям исходных характеристик по табл. 2)).

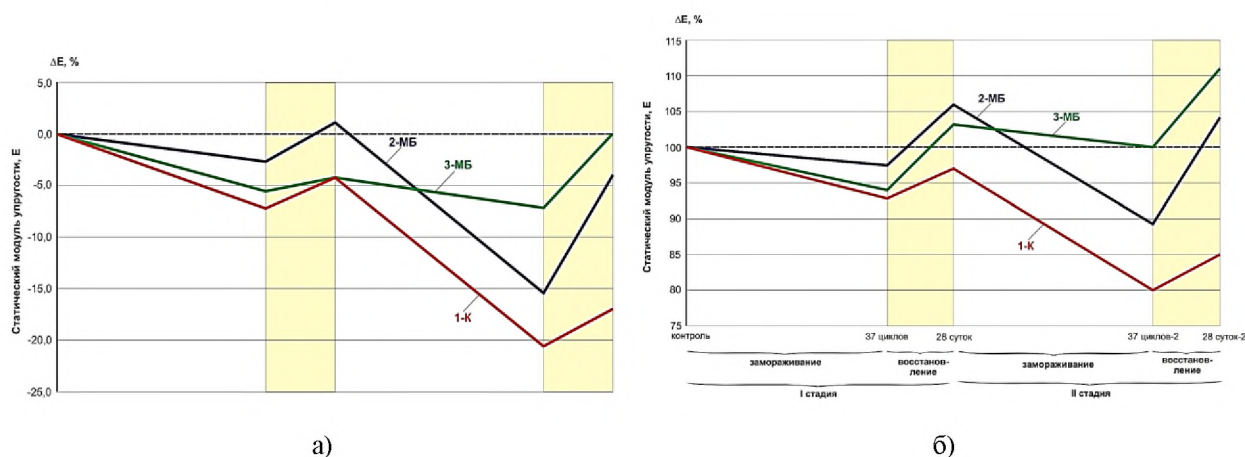


Рис. 2

Из полученных данных по диффузионной проницаемости следует, что проницаемость для хлорид-ионов модифицированного бетона (2-МБ и 3-МБ) на порядок меньше (табл. 2), чем контрольного образца аналогичной прочности, что выявлено ранее [8] и связано с особенностями фазового состава и пористости цементного камня. Однако у модифицированного бетона в процессе двухстадийного эксперимента величина проницаемости почти полностью возвращается к исходному значению, в отличие от контрольного.

По результатам исследований можно сделать вывод – 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 – в особенностях структуры цементного камня и бетона и в потенциале гидратации цемента, которые предопределяют обратимость измене-

ния 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 имеющего 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), имеющими размеры не более 0,01 мкм [9], смещен в сторону последнего [1].

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 основном 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. Микротрещины могут дислоцироваться как в структуре цементного камня, так и в контактной зоне – между цементным камнем и заполнителем. Но, как известно, в структуре высокопрочного бетона, содержащего в своем составе микрокремнезем и золу-унос, 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, складываясь с отсутствием ослабленной контактной зоны, делает модифицированный бетон более стойким к деструктивным процессам.

Степень гидратации цемента α в модифицированном высокопрочном бетоне в возрасте более 28 суток, как правило, находится на уровне 0,5...0,6 [1], [2], более низком, по сравнению со степенью гидратации

цемента в обычном бетоне (0,8...0,9), то есть нереализованный клинкерный фонд у первого выше.

По данным [9] при степени гидратации цемента α 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, прироста прочности не наблюдается.

Таким образом, связанное с неизбежным сокращением клинкерного фонда самозалечивание и восстановление физико-технических свойств бетона носит затухающий характер.

ВЫВОДЫ

1. Выявленные тенденции 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.

2. Реальная долговечность бетона с органоминеральным модификатором МБ-30С при морозном воздействии выше уровня, который обычно определяется маркой бетона по морозостойкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В. Бетоны нового поколения с высокими эксплуатационными свойствами // Мат. Междунар. конф.: Долговечность и защита конструкций от коррозии. – М., 25–27 мая 1999. С. 191...196.
2. Москвин В.М., Иванов Ф. М., Алексеев С. Н., Гузев Е. А. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. – М.: Стройиздат, 1980.
3. Толмачев С.Н., Кондратьева И. Г., Матяш А. В. Особенности морозно-солевого воздействия на свойства аэродромного бетона // Строительные материалы. – 2011, № 3. С. 107...109.
4. Тамразян А.Г. Бетон и железобетон: проблемы и перспективы // Промышленное и гражданское строительство. – 2014, № 7. С. 51...54.
5. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Силина Е.С., Жигулев Н.Ф., Борьгин С.Т. Высокопрочные

бетоны повышенной морозостойкости с органоминеральным модификатором. // Транспортное строительство. – № 11, 2000. С. 24...27.

6. Кунцевич О.В. Бетоны высокой морозостойкости для сооружений Крайнего Севера. – М.: Стройиздат, Ленинградское отделение, 1983.

7. Шейнфельд А.В., Батудаева А.В. Морозостойкость и морозостойкость высокопрочных бетонов из высокоподвижных смесей // Мат. Междунар. конф.: Долговечность строительных конструкций. Теория и практика защиты от коррозии. – Волгоград, 7–9 октября, 2002. С. 136...141.

8. Невилль А. Свойства бетона. – М.: Стройиздат, 1972.

9. Бабков В.В., Мохов В.Н., Капитонов С.М., Комохов П.Г. Структурообразование и разрушение цементных бетонов. – Уфа: Уфимский полиграфкомбинат, 2002.

10. Гольденберг А.Л. Влияние периодического воздействия знакопеременных температур на структуру и эксплуатационные свойства высокопрочных бетонов // Вестник МГСУ. – 2011, № 2. С. 93.

11. Каприелов С.С., Гольденберг А.Л. Свойства высокопрочного бетона, подвергнутого периодическому воздействию температуры // Строительные материалы. – 2013, № 3. С. 60.

12. Edvardsen S. Properties of High Strength Concrete Impacted by Periodical Freezing-thawing and Curing under normal conditions. Water permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete // ACI Materials Journal. – 1994.

13. Mehta P.K., Monteiro P.J.M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. Concrete and the Environment. – Prentice Hall, 1993.

REFERENCES

1. Kaprielov S.S., Shejnfel'd A.V. Betony novogo pokolenija s vysokimi jekspluatacionnymi svojstvami // Мат. Mezhdunar. конф.: Dolgovechnost' i zashhita konstrukcij ot korrozii. – М., 25–27 maja 1999. S.191...196.

2. Moskvин V.M., Ivanov F. M., Alekseev S. N., Guzeev E. A. Korrozija betona i zhelezobetona, metody ih zashhity. – М.: Strojizdat, 1980.

3. Tolmachev S.N., Kondrat'eva I.G., Matjash A.V. Osobennosti morozno-solevogo vozdejstvija na svojstva ajerodromnogo betona // Stroitel'nye materialy. – 2011, № 3. S. 107...109.

4. Tamrazjan A.G. Beton i zhelezobeton: problemy i perspektivy // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2014, № 7. S. 51...54.

5. Kaprielov S.S., Shejnfel'd A.V., Silina E.S., Zhigulev N.F., Borygin S.T. Vysokoprochnye betony povyshennoj morozostojkosti s organomineral'nym modifikatorom. // Transportnoe stroitel'stvo. – № 11, 2000. S. 24...27.

6. Kuncевич O.V. Betony vysokoj morozostojkosti dlja sooruzhenij Krajnego Severa. – М.: Strojizdat, Leningradskoe otdelenie, 1983.

7. Shejnfel'd A.V., Batudaeva A.V. Morozostojkost' i morozostojkost' vysokoprochnyh betonov iz vysokopodvizhnyh smesej // Мат. Mezhdunar. конф.: Dolgovechnost' stroitel'nyh konstrukcij. Teorija i praktika zashhity ot korrozii. – Volgograd, 7–9 oktjabrja, 2002. S. 136...141.

8. Nevill' A. Svojstva betona. – М.: Strojizdat, 1972.

9. Babkov V.V., Mohov V.N., Kapitonov S.M., Komohov P.G. Strukturnoobrazovanie i razrushenie cementnyh betonov. – Ufa: Ufimskij poligrafkombinat, 2002.

10. Gol'denberg A.L. Vlijanie periodicheskogo vozdejstvija znakoperemennyh temperatur na strukturu i jekspluatacionnye svojstva vysokoprochnyh betonov // Vestnik MGSU. – 2011, № 2. S. 93.

11. Kaprielov S.S., Gol'denberg A.L. Svojstva vysokoprochnogo betona, podvergnutogo periodicheskomu vozdejstviju temperatury // Stroitel'nye materialy. – 2013, № 3. S. 60.

12. Edvardsen S. Properties of High Strength Concrete Impacted by Periodical Freezing-thawing and Curing under normal conditions. Water permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete // ACI Materials Journal. – 1994.

13. Mehta R.K., Monteiro P.J.M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. Concrete and the Environment. – Prentice Hall, 1993.

Рекомендована Ученым советом МГСУ. Поступила 18.05.17.