

УДК 666.972.55

С.С. КАПРИЕЛОВ, д-р техн. наук, А.Л. ГОЛЬДЕНБЕРГ, инженер,
НИИЖБ им. А.А. Гвоздева (структурное подразделение ОАО «НИЦ «Строительство») (Москва)

S. S. KAPRIELOV, Dr. Sc., A. L. GOLDENBERG, engineer,
NIIZHB named after A.A Gvozdev (JSC «SRC «Building Construction» Department) (Moscow)

Свойства высокопрочного бетона, подвергнутого периодическому воздействию температуры

Properties of High Strength Concrete Impacted by Periodical Freezing-thawing and Curing under normal conditions

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.

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

Исследовали изменения основных 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, призмную), 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).

В качестве контрольного образца использовали бетон с повышенным расходом цемента и добавкой суперпластификатора на основе сульфированных нафталин-формальдегидных поликонденсатов. В двух других образцах количество цемента снижено на 110 и 120 кг/м³, но содержался органоминеральный модификатор в количестве 20% массы цемента и структурообразующая добавка. Состав бетонных смесей подбирали так, чтобы цементное тесто (цемент + модификатор + вода + вовлеченный воздух) во всех образцах имело одинаковый объем 0,369±0,01 м³. Это во многом предопределило получение трех образцов смесей практически равной подвижности, отличающейся не более чем на 2 см.

Mass application of high-strength concrete and some features and behaviors under cyclic influence of negative temperature gives a reason to refer the problem of objective estimation of the high strength concrete durability while seasonal freezing and forward keeping in normal conditions.

Research object is high strength concrete (HSC), prepared with ordinary cement and aggregates, and organic mineral modifier MB-30C, which contains micro silica, fly ash and super-plasticizer.

Changes of base physical-technical properties of concrete were researched, which determined construction serviceability depending from periodical influence low negative temperature with subsequent curing in normal temperature and humidity conditions.

Compressive strength (cubic, prism), static and dynamic module of elasticity, concrete scale through mass changing, diffusion permeability, relative deformations were determined experimentally.

Researches were provided with three high strength concrete varieties, distinguished by material composition of cement paste (tab. 1).

The concrete with a high cement consumption and super-plasticizer admixture based on naphthalene formaldehyde poly condensates was used in the control specimen. Cement consumption in other two samples was reduced by

Таблица 1
Table 1

№ состава № composition	Состав бетонной смеси, кг/м ³ Concrete mixture composition, kg/m ³							Свойства смеси Mixture properties				
	Ц C	П S	Щ A	В W	МБ-30С MB-30C	СП SP	КЭ SE	В/Ц W/C	В/(Ц+МБ) W/(C+MB)	ОК, см slump, cm	γ, кг/м ³ γ, kg/m ³	V _{вв} , % V _a , %
1	585	690	965	150	-	7	-	0,26	0,26	20	2396	2,1
2	475	755	950	145	98	-	-	0,31	0,25	22	2423	2
3	465	740	930	145	96	-	0,5	0,31	0,26	22	2375	4

Примечания: Ц – цемент; П – песок; Щ – щебень; В – вода; СП – суперпластификатор; КЭ – кремний-органическая эмульсия; ОК – осадка конуса; γ – плотность; V_{вв} – воздухововлечение.

Remark. C – cement; S – sand; A – aggregate; W – water; SP – superplasticizer; SE – silica organic emulsions; γ – density; V_a – involved air volume.

Как известно, морозостойкость бетонов повышается при дозировках модификатора до 10% массы, затем снижается [1]. Назначенная при подборе составов бетона намеренно повышенная вдвое дозировка, нерациональная и лишённая практического смысла с точки зрения обеспечения максимальной морозостойкости, даёт тем не менее возможность усилить деструкцию при циклическом замораживании-оттаивании и ускоренно провести эксперимент.

Материалы, использованные для приготовления бетона, имели следующие характеристики:

- портландцемент марки ПЦ 500-Д0-Н, ГОСТ 10178–85;
- песок с $M_{кр} = 2,8$, ГОСТ 8736–93;
- щебень гранитный прочностью М 1400 фр. 5–20 мм, ГОСТ 8267–93;
- суперпластификатор С-3 на основе сульфированных нафталин-формальдегидных поликонденсатов, ТУ 5870-002-58042865–03;
- органоминеральный модификатор МБ 10-30С, ТУ 5743-083-46854090–98;
- кремнийорганическая эмульсия КЭ 30-04 50% концентрации, ТУ 2251-035-00209013–2004.

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 в табл. 2 приняты в качестве исходных величин, относительно которых впоследствии оценивали изменения при выдерживании бетона в разных условиях.

Условия выдерживания образцов приводятся ниже.

I стадия: замораживание-оттаивание при температуре -50°C в 5% растворе NaCl по III методу ГОСТ 10060.2–95, затем в течение 28 сут выдерживание образцов при температуре 20°C в воздушной и водной средах при влажности соответственно 96–98% и 100%.

II стадия: 37 циклов замораживания-оттаивания, затем в течение 28 сут выдерживание при 20°C в воздушной и водной средах.

Испытания проводили после периодов замораживания-оттаивания и чередующимися с ними периодами восстановления в нормальных условиях.

Для анализа результатов эксперимента использовали два показателя: степень деструкции и степень самозалечивания. Под первым подразумевается изменение той или иной характеристики бетона в течение одной стадии эксперимента. Определяли отношение 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.

На начальных стадиях циклического замораживания-оттаивания (10 и 20 циклов) прочность образцов относительно контрольного уровня у модифицированного бетона повышается, тогда как у контрольного образца незначительно снижается (менее 5%).

С увеличением количества циклов происходит резкое уменьшение прочности, что проявилось на 37-м цикле. Заметим, что некоторое

110 kg/m^3 and 120 kg/m^3 , and there contained an organic mineral modifier in amount of 20% of cement mass and microstructure forming admixture. The design of concrete mixtures was chosen in such way that the concrete paste (cement+modifier+water+involved air) in all three samples had the same composition. That case in many respects had determined the receipt of three specimen of concrete mixtures with a practically equal workability that differed not more than 2 cm.

As generally known that frost resistance of concrete raises at modifier dosages to 10% of weight, then decreases [1]. Appointed at selection of compositions of concrete intentionally doubled consumption, not rational and deprived of practical sense from the point of view of ensuring the maximum frost resistance, gives the chance to strengthen, nevertheless, a destruction is enforced at cyclic freezing thawing and is accelerated to make experiment.

The materials used for the preparation of concrete, had the following characteristics:

- portland cement of the mark PC 500-D0-N according to GOST 10178–85;
- sand with finess modulus = 2,8, according to GOST 8736–93;
- aggregate hardness of M1400 5–20 mm, according to GOST 8267–93;
- a super-plasticizer S-3 admixture based on naphthalene formaldehyde poly condensates, according to technical specifications 5870-002-58042865–03;
- the MB organic mineral modifier 10–30C according to technical specifications 5743-083-46854090–98;
- the organic silicon emulsion of KE 30-04 50% the concentration, according to technical specifications 2251-035-00209013–2004.

Characteristics of the concrete after curing for 28 days at normal temperature and humidity conditions ($t=20\pm 2^\circ\text{C}$, relative humidity 96–98%) are shown in tab. 2. On a compressive strength, taking into account a variation factor 13,5%, specimens according to B60–B70 class.

Values of characteristics in tab. 2 were taken as a reference of initial magnitudes concerning whom subsequently changes were evaluated at a curing of concrete in different conditions.

The condition of specimen curing are given below.

Stage I: freezing-thawing at -50°C in 5% NaCl solution by the method of GOST 10060.2–95 III, then within 28 days of holding the samples at 20°C in air and water, respectively, with a moisture content of 96–98% and 100%.

Stage II: 37 cycles of freezing and thawing, then within 28 days of conditioning at 20°C in air and water.

Tests after periods of freezing and thawing, and alternating with periods of recovery in normal conditions were carried out.

For the analysis of the experimental results using two measures: the degree of destruction and the degree of self-

Таблица 2
Table 2

№ состава № composition	Класс бетона Concrete class	Характеристики в возрасте 28 сут нормального твердения Properties in age 28 days normal curing				
		Прочность, МПа Strength, MPa		Модуль упругости, ГПа Modulus of elasticity, GPa		Коэффициент диффузии, $1 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{c}$ Coefficient of diffusion, $1 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{c}$
		кубиковая cubic	призменная prism	статический static	динамический dynamic	
1	B60	76,3	72,4	35,8	49,4	32,8
2	B70	89,2	83,1	44	47,7	3,2
3	B70	88,1	83,8	46,7	48,8	3,1

повышение прочности на ранних стадиях замораживания в растворе NaCl уже наблюдали [2] и связано оно с влиянием хлоридов, интенсифицирующих гидратацию цемента при оттаивании. Подобная картина характерна для обычного бетона, что подтверждают, например, результаты испытаний бетона, подвергнутого замораживанию-оттаиванию в присутствии содержащих ионы Cl^- солей антиобледенителей [3].

Особенностью всех разновидностей бетона является то, что снижение прочности вследствие деструктивных процессов, связанных с замораживанием-оттаиванием, частично компенсируется приростом прочности, связанным с самозалечиванием в восстановительном периоде.

Степень деструкции после морозного воздействия у модифицированного бетона меньше, чем у контрольного, но степень самозалечивания практически одинакова или выше (табл. 3). Степень самозалечивания зависит от влажности среды в восстановительный период: в воде при 100% влажности она выше, чем в воздушной среде.

Выдерживание в водной среде может способствовать повышению прочности после снижения при циклическом замораживании до уровня, соответствующего допустимому ГОСТом 5% значению потери прочности при испытаниях на морозостойкость. Это означает, что частично утраченный при замораживании прочностной потенциал бетона может быть восстановлен.

Изменение массы, связанное с шелушением, определяли по ГОСТ 10060.0–95. В процессе двух повторяющихся стадий испытаний в образцах модифицированных бетонов потеря массы незначительна и не превышает 2%, т. е. в пределах нормы, что отличает их от обычного бетона и отмечалось ранее [4]. Это проявляется и на внешнем виде при качественной оценке образцов: отсутствие видимых дефектов и хорошо сохранившаяся форма образцов с модификатором резко контрастируют с контрольным образцом.

Шелушение при замораживании в солях, как известно [2, 3], 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, содержащимся в 5% 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 (рис. 1). Однако при восстановлении в водной среде заметен более интенсивный в сравнении с прочностью прирост значений модуля.

Если по истечении II стадии периодического замораживания-оттаивания и восстановления при 100% влажности прочность бетона, например модифицированного (состав 3, табл. 2) со структурообразующей добавкой, может уменьшиться в сравнении с исходным значением на 5%, то статический модуль при тех же условиях не ниже исходного значения (рис. 1 и 2, б). 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.

Динамический модуль упругости (ДМУ) является одной из наиболее достоверных характеристик матери-

healing. Under the first change meant some concrete performance during one stage of the experiment. Determined the ratio of the physical characteristics of the cycles before freezing to the value of the same characteristics after 37 cycles of freezing and thawing.

Under the second index means the ratio of the value of the same characteristics of the concrete after the recovery period up to the value assigned to the recovery.

In the initial stages of the cycle of freezing and thawing (10 and 20 cycles) the strength of the samples cubes with respect to a reference level of the modified concrete was increased, while the control sample decreased slightly (less than 5%).

As the number of cycles, a sharp decrease in the strength was occurred, this showed a 37 cycle. Note that some increase in strength in the early stages of freezing in NaCl solution was observed [2], and it was connected with the influence of chloride, intensified the hydration of cement during thawing. Such a situation is typical for conventional concrete, which was confirmed, for example by the results of tests of concrete subjected to freeze-thaw cycles in the presence of ions containing Cl^- defrosting salts [3].

A feature of all types of concrete was that the reduction in strength due to the destructive processes associated with freezing and thawing, partially offset by the increase of strength associated with self-healing in the recovery period.

The degree of destruction after frost exposure in modified concrete was less than it was in the control, but the degree of self-healing was almost the same or higher (tab. 3). The degree of self-healing depends on the humidity of the environment in the recovery period: in water, at 100% humidity, it is higher than in air.

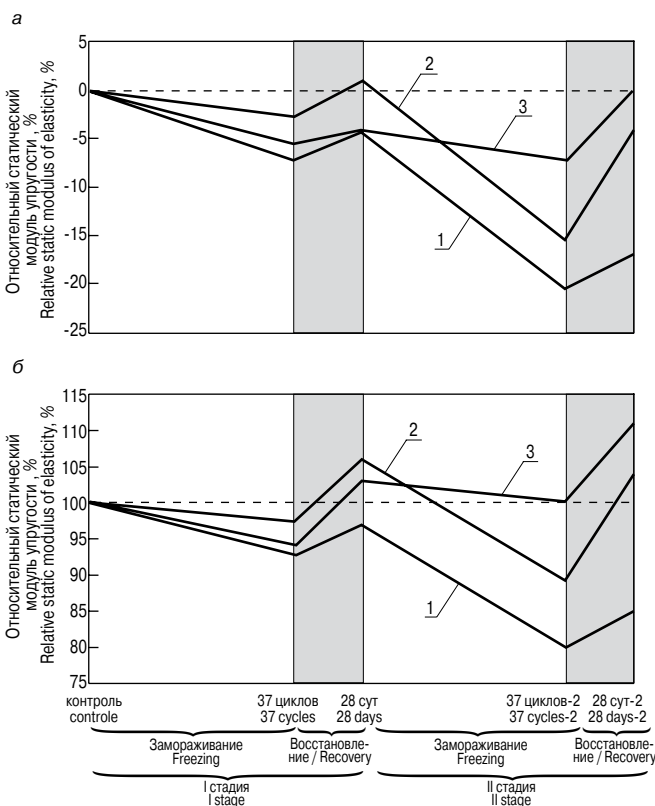


Рис. 1. Относительные значения статического модуля упругости ($\Delta E_{ст}$) при двухстадийном циклическом замораживании-оттаивании и восстановлении на воздухе (а) и в воде (б) при температуре $20 \pm 2^\circ C$ (100% на оси ординат соответствуют абсолютным значениям исходных характеристик по табл. 2)

Fig. 1. The relative values of static modulus of elasticity (ΔE_{st}) with two-stage cyclic freezing and thawing, and recovery in air (a) and in water (b) at $20 \pm 2^\circ C$ (100% on the vertical axis correspond to the absolute values of baseline characteristics on Table 2)

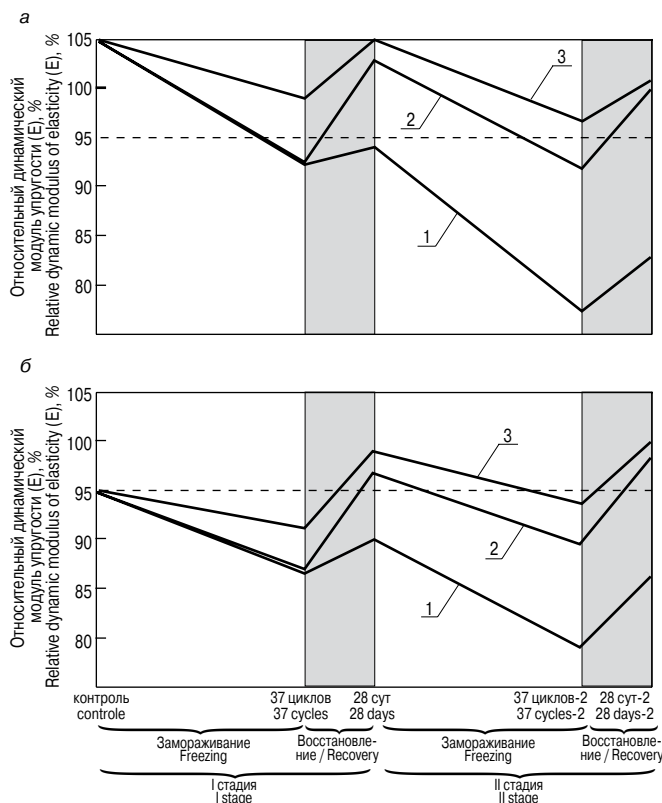


Рис. 2. Относительные значения динамического модуля упругости ($\Delta E_{дин}$) при двухстадийном циклическом замораживании–оттаивании и восстановлении на воздухе (а) и в воде (б) при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$

Fig. 2. The Relative values of dynamic modulus of elasticity (ΔE_{dyn}) with two stage cyclic freezing and thawing, and recovery in air (a) and in water (b) at $20 \pm 2^\circ\text{C}$ (100% on the vertical axis correspond to the absolute values of baseline characteristics on Table 2)

ала, отражающих состояние его структуры с учетом плотности. Поэтому мониторинг его изменения лежит в основе оценки морозостойкости по некоторым зарубежным стандартам, например ASTM C666, и предусмотрен проектом нового ГОСТ 10060.0–2011 «Методы определения морозостойкости. Общие положения». Характер изменения ДМУ имеет общие черты с прочностью и статическим модулем, однако заметна значительная разница в относительных значениях. Если динамический модуль модифицированного бетона после двух стадий выдерживания уменьшается относительно исходной величины не более чем на 8%, то у контрольного образца – на 20% (рис. 2). Это связано с образованием дефектов в структуре, на которое накладывается более существенная потеря массы вследствие шелушения контрольного образца бетона.

Диффузионную проницаемость определяли согласно методике лаборатории № 13 НИИЖБ им. А.А. Гвоздева измерением коэффициента диффузии, который отражает характер поровой структуры, в частности общую площадь капилляров. Из полученных данных следует, что проницаемость для хлорид-ионов модифицированного бетона (2 и 3) на порядок меньше (табл. 3), 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.

Частичное восстановление прочности бетона, подвергнутого замораживанию–оттаиванию, при дальнейшем выдерживании в нормальных термовлажностных

Curing in the water environment may contribute to the increase of strength of concrete after degradation during the cyclical freezing to levels refer to the allowable value at 5% strength loss when tested in frost. It means that concrete strength potential which lost while freezing could be restored.

The change in mass associated with scaling, determined according to GOST 10060.0–95. During the two repeating stages of tests in samples modified concrete mass loss was negligible and did not exceed 2%, which is within the normal range, which set them apart from ordinary concrete and was previously noted [4]. This is manifested by the appearance of the qualitative evaluation of samples: no visible defects and a well-preserved specimen with the modifier form sharply contrasts with the control.

Flaking while freezing in the salts is well known [2, 3], due to factors such as water absorption, i. e., the density of the structure and reactivity of the cement paste to the liquid corrosive agent, in this case, chloride ions containing 5% sodium chloride solution. In addition, the solubility of portlandite increases significantly in solutions NaCl [2]. Since the density or impenetrability modified concrete is much higher, which is confirmed by data about the nature of differential porosity [12] and the results obtained in experiments testing the diffusion permeability, and the phase composition of the cement is different from the normal (control) to minimize the content of portlandite crystals, it has resistance to flaking also higher in contrast to the usual.

Nature of the change of static modulus of elasticity similar to changing the compressive strength (Fig. 2). However, the recovery in water has more intense in comparison with the strength, increase the values of the module.

If at the end of stage II of the periodic freezing and thawing and recovery at 100% humidity strength of the concrete, such as modified (the composition of 3, Tab. 2) with the structure-forming additive, may be reduced in comparison to the initial value of 5%, values of the static module in the same conditions are not less than the initial value (Fig. 1 and 2, b). In this case it is not only evidence of a high degree of self-healing structure, but also a consequence of water saturation of the material, which helps, as it is known [7], increasing values of the modulus of elasticity.

Dynamic modulus of elasticity (DME) is one of the most significant characteristics of the material, reflecting the status of its structure with the density. Therefore, monitoring for changes is the basis of assessment of frost resistance by some foreign standards as ASTM C666 and provided by the draft of the new GOST 10060.0–2011 «Methods for determination of frost resistance. General Provisions». Nature of the change DME has common features with the strength and static modulus, but a significant difference in the apparent relative values. If the dynamic modulus of the modified concrete after two stages of aging is reduced relative to the initial value of not more than 8%, then the test sample – 20%. This is due to the formation of defects in the structure, which is superimposed on a more significant weight loss due to flaking of the control sample of concrete.

Diffusion permeability was determined according to the method of laboratory № 13 NIIZhB named after A.A. Gvozdev by measuring the diffusion coefficient, which reflects the nature of the pore structure, in particular the total area of the capillaries. The data obtained indicate that the permeability to chloride ions modified concrete (2 and 3), an order of magnitude (tab. 3) than the control sample of similar strength, which was detected earlier [8], due to the peculiarities of the phase composition and porosity of the cement. However, the modified concrete in the two-stage experimental value of the permeability is almost completely returned to its original value, as opposed to the control.

Partial restoration of the strength of concrete subjected to freeze-thaw cycles, with further storage in normal hygrothermal conditions pointed out by other researchers, linking

Таблица 3
Table 3

условиях отмечали другие исследователи, связывая это с продолжающейся гидратацией цемента, а именно вовлечением в процесс остаточного клинкерного фонда в цементном камне, что способствует кольматации микродефектов структуры. Одна из последних публикаций [9] информирует, что интенсивность процесса кольматации микротрещин, который справедливо называется самозалечиванием (selfhealing), напрямую зависит от влажности среды: в воде она выше, как следовало ожидать, более того, она возрастает с увеличением напора воды. По полученным данным, это в большей или меньшей степени проявляется не только на прочности, но и на плотности, проницаемости, деформативности.

Из табл. 3 следует, что степень деформации, 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 изменения основных свойств бетона в зависимости от условий выдерживания.

Представив цементный камень твердой массой, состоящей из кристаллического сростка (КС), макропор и частиц не вступившего в гидратацию цемента, заметим, что прочность его зависит от прочности КС и пористости. Прочность КС, в частности при растяжении, которая имеет решающее значение для обеспечения морозостойкости, находится в прямой зависимости от прочности кристаллизационных контактов и их удельной поверхности. Последняя зависит от размеров кристаллогидратов.

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 [10], смещен в сторону последнего [1].

Итак, фазовый состав модифицированного цементного камня отличается от обычного преобладанием в нем (точнее в тоберморитовом геле) тонкодисперсных низкоосновных гидросиликатов типа CSH(I). Поэтому 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. 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, содержа-

Характеристика Characteristic	Состав по табл. 1 Composition as in tab. 1	I стадия I stage			II стадия II stage		
		Деструкция Destruction	Самозалечивание Self-healing		Деструкция Destruction	Самозалечивание Self-healing	
			на воздухе air	в воде water		на воздухе air	в воде water
Прочность при сжатии / Compression strength							
Кубиковая Cubic	1	1,22	1,07	1,12	1,19	1,04	1,04
	2	1,19	1,05	1,14	1,24	1,06	1,11
	3	1,11	1,03	1,07	1,13	1,04	1,07
Призмная Prism	1	1,18	1,11	1,07	1,23	1,01	1,05
	2	1,14	1,13	1,17	1,04	1,08	1,12
	3	1,11	1,12	1,15	1,03	1,1	1,14
Потеря массы / Mass loss							
	1	1,18	1,03	1,03	1,16	1,09	1,1
	2	1,03	1,03	1,03	1,04	1,02	1,03
	3	1,02	1,02	1,02	1,03	1,05	1,06
Модуль упругости / Modulus of elasticity							
Статический Static	1	1,07	1,02	1,03	1,2	1,04	1,06
	2	1,03	1,05	1,09	1,2	1,11	1,17
	3	1,06	1,04	1,11	1,03	1,06	1,11
Динамический Dynamic	1	1,13	1,02	1,02	1,19	1,06	1,08
	2	1,12	1,08	1,11	1,11	1,08	1,09
	3	1,06	1,03	1,08	1,07	1,03	1,07

it to the continued hydration of cement, namely involvement in the process of residual clinker in cement stone foundation that promotes clogging microdefects structure. One of the recent publications [9] reports that the intensity of mudding microcracks, which rightly called self-healing, depends on the humidity of the environment: in the water it is, as expected, in fact it increases with increasing water pressure. The data obtained to a greater or lesser extent, is evident not only strength, but also on the density, permeability, deformability.

From tab. 3 it should be that the degree of destruction, determined as the change of the basic physical and technical characteristics of the samples modified concrete, is less than the average, and the degree of self-healing above. In general, in repeating cycles modified concrete properties relative to the original condition worsened to a lesser degree. The reason is in the peculiarities of the structure of cement and concrete, and in the potential of cement hydration, which determine the reversibility of changes in the basic properties of concrete, depending on the conditions of curing.

Representing the cement stone solid as the mass consisting of a crystalline concretion (CC), macropores and particles that don't involved into the hydration of cement, we note that its strength depends on the strength and porosity of the CC. The strength of the CC, in particular, at a tensioning, which is crucial for the frost, is in direct proportion to the strength of the crystallization of contacts and their specific surface area. Last is depended on sizes of crystallohydrates.

It is well known that cement paste with a modifier МБ differs not only a low capillary porosity and phase composition, in which the content of shaped large crystal portlandite

щей 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 [11].

Таким образом, повышенная прочность при растяжении, связанная с более дисперсной структурой цементного камня и с отсутствием ослабленной контактной зоны, делает модифицированный бетон более стойким к деструктивным процессам.

Как уже отмечалось, самозалечивание структуры и частичное восстановление физико-технических свойств бетона в водной среде возможно при наличии резервного клинкерного фонда.

При помещении материала в водные ($t=20^{\circ}\text{C}$, $W=100\%$) или влажные ($t=20^{\circ}\text{C}$, $W=95-98\%$) условия в устьях микротрещин благодаря наличию клинкерного фонда продолжается гидратация вяжущего. В обычном цементном камне преимущественно образуются первичные кристаллогидраты, в частности портландит $\text{Ca}(\text{OH})_2$, в модифицированном – преимущественно гидросиликаты $\text{C}-\text{S}-\text{H}$, формирующие тоберморитовый гель, которые кольматируют трещины и таким образом залечивают структуру цементного камня и бетона.

Степень гидратации цемента (α) в модифицированном высокопрочном бетоне в возрасте более 28 сут, 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), т. е. нереализованный клинкерный фонд у первого выше.

Ранее [12] было показано, что степень гидратации цемента в образцах модифицированного бетона после одной стадии циклического замораживания-оттаивания и восстановления в нормальных условиях возрастает интенсивнее, чем в контрольном, в 1,4–1,5 раза. Странное на первый взгляд наблюдение в образцах с равным $W/(\text{C}+\text{МБ})$, объясняется состоянием воды в цементных системах – разным соотношением объемов химически и физически связанной (кристаллизационной и адсорбционной) влаги. При одинаковой водопотребности смесей в модифицированном бетоне, в котором истинное W/C повышено, доля адсорбционной влаги больше, соответственно потенциал для дальнейшей гидратации выше. Этим объясняется высокая степень самозалечивания структуры бетонов с МБ.

По данным [10], 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, прирост прочности не наблюдается.

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

Выводы. Свойства высокопрочного бетона (прочность, проницаемость, статический и динамический модули упругости), сниженные при циклическом замораживании-оттаивании, при последующем выдерживании в нормальных условиях и особенно в водной среде могут быть частично восстановлены.

Снижение физико-технических характеристик связано с деструктивными процессами, а восстановление – с продолжающейся в нормальных условиях гидратацией цемента, реализацией остаточного клинкерного фонда.

Степень деструкции модифицированного добавкой МБ-30С бетона при морозном воздействии в сравнении с обычным меньше, что является следствием повышенной прочности, связанной с особенностями фазового

(size less than 10 microns) is minimized, and the balance of highly hydrosilicates CSH (II) with the size of 0.01 to 0.05 microns and fine particles low based CSH (I), having dimensions of not more than 0.01 mm [10] is shifted towards the latter. [1]

So, phase composition of the modified cement differs from the usual by predominance in it (or rather in tobermorite gel) fine low based hydrosilicates type CSH (I). Therefore, the specific surface crystallization contacts and accordingly the strength of the CC and cement as a whole, both in compression and in tension above.

Stresses which appear in the concrete, from the effects of alternating temperatures, reaching a level higher than the tensile strength of the material, respectively, lead to deformation and micro-cracking. Microcracks are deployed in the structure of the cement stone, and in the contact zone between the cement paste and aggregate. But as we know, the structure of high-strength concrete containing silica fume and fly ash in its composition, virtually no contact zone, which usually are more concentrated portlandite – the weak and unstable hydrated cement paste [11].

Thus, the increased tensile strength associated with more dispersed structure of cement stone, adding to the lack of a weakened surface area, making the modified concrete more resistant to the destructive processes.

As noted, the structure of the self-healing and a partial restoration of physical and technical properties of the concrete in the water environment are possible with availability of clinker reserve fund.

When the material is placed in the water ($t=20^{\circ}\text{C}$, $W=100\%$) or wet ($t=20^{\circ}\text{C}$, $W=95-98\%$) conditions, in the mouths of microcracks due to the presence of clinker fund continuing hydration of the binder. In a typical cement paste are mainly formed primary crystalline, in particular, portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$, in a modified – mainly hydrosilicates CSH, forming tobermorite gel that bridging cracks and thus heal the structure of cement and concrete is provided.

The degree of hydration of cement (α) in a modified high-performance concrete over the age of 28 days, is usually at the level of 0.5–0.6 [1, 2], lower than the degree of hydration of cement in conventional concrete (0.8–0.9), that is not implemented in the first clinker fund above.

Earlier [12] it was shown that the degree of hydration of cement in the samples modified concrete after one stage of the freeze-thaw cycle and restoring normal conditions increases more rapidly than in the control to 1.4–1.5 times. Strange, at first glance, the observation of the samples with equal $W/(\text{C}+\text{МБ})$, can be explained by the state of water in cement systems – different volume ratio of chemically and physically bound (crystallization and adsorption) of moisture. For the same water demand in the modified concrete mixtures, in which the true W/C increased, the percentage of moisture adsorption greater, respectively, the potential for further hydration above. It explains the high degree of self-healing concrete structure with МБ.

According to [10] in the degree of hydration (α) less than 0.8 structure-forming processes prevail over the destructive, self-healing, and thereby increase the strength, with $\alpha \approx 0,8-0,9$ there is a balance, with $\alpha > 0,9$ dominated destructive processes. Therefore, self-healing does not occur, the increase of strength is observed.

Thus associated with an inevitable reduction in clinker fund self-healing and restoration of physical and technical properties of the concrete is damped.

Resume. Properties of high-strength concrete (strength, permeability, static and dynamic elastic modules), reduced under cyclic freezing and thawing, with subsequent storage in normal conditions, and especially in the aquatic environment can be partially restored.

Reduction of physical and technical characteristics is associated with destructive processes, and recovery – with

состава цементного камня и дисперсностью его структуры. Степень самозалечивания, напротив, выше, чем у обычного бетона, что связано с интенсивностью гидратации остаточного клинкерного фонда.

Явление самозалечивания бетона имеет затухающий характер. Его потенциал уменьшается по мере истощения остаточного клинкерного фонда и повышения степени гидратации, а также интенсификации деструктивных процессов.

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

Ключевые слова: долговечность, самозалечивание бетона, высокопрочный бетон, периодическое воздействие знакопеременных температур.

Список литературы

1. Каприелов 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.
2. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Гузеев Е.А. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. М.: Стройиздат, 1980. 536 с.
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. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Силина Е.С., Жигулев Н.Ф., Боргин С.Т. Высокопрочные бетоны повышенной морозостойкости с органоминеральным модификатором // Транспортное строительство. 2000. № 11. С. 24–27.
5. Кунцевич О.В. Бетоны высокой морозостойкости для сооружений Крайнего Севера. М.: Стройиздат, Ленинград. отд., 1983. 132 с.
6. Шейнфельд А.В., Батудаява 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. М.: Стройиздат, 1972.
8. Розенталь Н.К., Чехний Г.В. Коррозионно-стойкие бетоны особо малой проницаемости // Бетон и железобетон. 1998. № 1. С. 27–29.
9. Edvardsen C. Water permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete // ACI Materials Journal. 1994.
10. Бабков В.В., Мохов В.Н., Капитонов С.М., Комохов П.Г. Структурообразование и разрушение цементных бетонов. Уфа: Уфимский полиграфкомбинат, 2002. 376 с.
11. Mehta P.K., Monteiro P.J.M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. Concrete and the Environment. Prentice Hall, 1993. 548 p.
12. Гольденберг А.Л. Влияние периодического воздействия знакопеременных температур на структуру и эксплуатационные свойства высокопрочных бетонов // Вестник МГСУ. 2011. № 2. С. 93.

continuing in normal conditions hydration of cement, of residual clinker fund.

The degree of destruction of the modified by additive MB-30C concrete in frosty effects compared to conventional smaller, which is a consequence of increased strength associated with the features of the phase composition of cement and the dispersion of its structure. The degree of self-healing, however, is higher than that of conventional concrete, which is associated with the intensity of the residual clinker hydration fund.

The phenomenon of self-healing concrete has a damped character. Its potential is decreased as the exhaustion of residual clinker stock and increase the degree of hydration, and the intensification of destructive processes.

Identified trends indicate that the performance properties of concrete by organic modifier with the MB-30C, subjected to due to the climatic conditions of cyclic freeze-thaw cycles and aging in normal temperature and humidity conditions persist for much longer than that of conventional concrete. Actual durability of concrete with organic-modifier MB-30C in freezing action above the level, which is usually determined by grade of concrete frost resistance.

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

References

1. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V. New generation concrete with a high operating ability: Materials of the International conference «Working life and protection of designs against rust», Moscow, on May 25–27 1999. Pp. 191–196.
2. Moskvina V.M., Ivanov F.M., Alexeyev S.N., Guzeev E.A. Corrosion of concrete and steel concrete, methods of their protection. M.: Stroyizdat, 1980, 536 p.
3. Tolmachev S.N., Kondratyeva I.G., Matyash A.V. Features of frosty – salt impact on properties of an airfield-grade concrete // Stroitel'nye materialy (Construction materials). 2011. № 3. Pp. 107–109.
4. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Silina E.S., Zhigulev N.F., Borygin S.T. High-strength concretes of the high frost and salt resistance with the organ mineral modifier // Transport building. 2000. № 11. Pp. 24–27.
5. Kuntsevich O.V. Concrete of high frost resistance for constructions of the Far North. M.: Stroyizdat, Leningrad department, 1983. 132 p.
6. Sheinfeld A.V., Batudayeva A.V. Frost and salt resistance of high-strength betons from high-mobile mixes: Materials of the International conference «Working life of structural designs. Theory and practice of a corrosion protection», Volgograd, on October 7–9, 2002. Pp. 136–141.
7. Neville A. Properties of concrete. M.: Stroyizdat, 1972.
8. Rosental N.K., Chekhny G.V. Corrosion-resistant concretes of especially small penetrability // Concrete and steel concrete. 1998. № 1. Pp. 27–29.
9. Edvardsen C. Water permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete // ACI Materials Journal. 1994.
10. Babkov V.V., Mokhov V.N., Kapitonov S.M., Komokhov P.G. Structure and destruction of cement concretes. Ufa: Ufa poligrafkombinat, 2002. 376 p.
11. Mehta P.K., Monteiro P.J.M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. Concrete and the Environment. Prentice Hall, 1993. 548 p.
12. Goldenberg A.L. Agency of periodic impact of the sign-variable temperatures on structure and an operating ability of high-strength concretes//the Bulletin of MGSU. 2011. № 2. P. 93.