

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-19-27>

УДК 666.97; 693.54

Структура, непроницаемость и долговечность цементного бетона

Докт. техн. наук, проф. Э. И. Батяновский¹⁾, канд. техн. наук Н. С. Гуриненко¹⁾,
магистр А. М. Корсун¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. В статье представлены основные гипотезы морозной деструкции цементного бетона. Рассмотрено влияние циклических изменений температуры и воздействия на бетон статической и динамической (ударной) нагрузок на изменения в структуре и прочности бетона. Приведены результаты сравнительных испытаний морозостойкости бетона, содержащего поризующую добавку и пластификатор, способствующий повышению плотности и непроницаемости его структуры. Экспериментально показано, что введение воздухововлекающих добавок, обладающих дополнительным эффектом гидрофобизации, продуктивно с позиций обеспечения морозостойкости бетонов относительно низких классов (до С30/37), прочностью на сжатие до 50 МПа и водопоглощением по массе более 4,0 %. Морозостойкость бетона большей непроницаемости и прочности целесообразно повышать, наращивая эти показатели, в частности, за счет максимального уменьшения начального водосодержания и качественного уплотнения. Этот вывод экспериментально подтверждают приведенные в статье данные, так как «механизм» морозной деструкции цементного бетона многофакторный, а рост его плотности (непроницаемости) и прочности обеспечивает более высокую способность сопротивляться силовым воздействиям, связанным с многократно повторяющимися знакопеременными деформациями бетона, а также с действием внешних нагрузок, накоплением усталостных явлений, гидродинамики фильтрации жидкости под влиянием изменяющихся температурных полей и проч. С использованием стандартизированных и авторских методик проведена сравнительная оценка морозостойкости бетона, содержащего поризующую (воздухововлекающую) добавку, а также пластифицирующие и минеральную добавки аморфного микрокремнезема, вводимые в бетон с целью увеличения его плотности, непроницаемости и прочности, а на этой основе – повышения морозостойкости. Приведены экспериментальные данные, отражающие взаимосвязь и закономерности снижения морозостойкости бетона, подверженного одновременному воздействию статической (на сжатие – разного уровня от соответствующего показателя прочности бетона) и ударной, сосредоточенно приложенной динамической нагрузок. Подтверждена закономерность взаимосвязи ускоренной морозной деструкции бетона с действием механических нагрузок, вызывающих трещинообразование в его структуре.

Ключевые слова: бетон, добавка, пористость, плотность, непроницаемость, прочность, морозостойкость, долговечность

Для цитирования: Батяновский, Э. И. Структура, непроницаемость и долговечность цементного бетона / Э. И. Батяновский, Н. С. Гуриненко, А. М. Корсун // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 1. С. 19–27. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-19-27>

Structure, Impermeability and Durability of Cement Concrete

E. I. Batyanovskiy¹⁾, N. S. Gurinenko¹⁾, A. M. Korsun¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper presents the main hypotheses of frost destruction of cement concrete. The influence of cyclic temperature changes and the effect of static and dynamic (shock) loads on concrete on changes in the structure and strength of concrete

Адрес для переписки

Батяновский Эдуард Иванович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-96-73
bat47@mail.ru

Address for correspondence

Batyanovskiy Eduard I.
Belarusian National Technical University
12, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-96-73
bat47@mail.ru

is considered. The paper provides results of comparative tests of frost resistance of concrete containing a porous additive and a plasticizer, which contribute to an increase in the density and impermeability of its structure. It has been shown experimentally that the introduction of air-entraining additives with an additional effect of hydrophobization is productive from the standpoint of ensuring frost resistance of concrete of relatively low classes (up to C30/37), compressive strength up to 50 MPa and water absorption by mass more than 4.0 %. It is advisable to increase the frost resistance of concrete with greater impermeability and strength by increasing these indicators, in particular, due to the maximum decrease in the initial water content and high-quality compaction. This conclusion is experimentally confirmed by the data presented in the paper, since the “mechanism” of frost destruction of cement concrete is multifactorial, and the growth of its density (impermeability) and strength provide a higher ability to resist “force” effects associated with repeated alternating deformations of concrete, as well as the action of external loads, accumulation of fatigue phenomena, hydrodynamics of liquid filtration under the influence of changing temperature fields, etc. A comparative assessment of concrete frost resistance has been carried out using standardized and patented techniques containing a porous (air-entraining) additive, as well as plasticizing and mineral additives of amorphous micro-silica, introduced into concrete in order to increase its density, impermeability and strength and on this basis – increasing frost resistance. Experimental data are presented, reflecting the relationship and patterns of decrease in frost resistance of concrete subjected to the simultaneous action of static (for compression – different levels from the corresponding indicator of concrete strength) and shock, concentratedly applied dynamic loads. The regularity of the relationship between the accelerated frost destruction of concrete and the action of mechanical loads that cause cracking in its structure has been confirmed.

Keywords: concrete, additive, porosity, density, impermeability, strength, frost resistance, durability

For citation: Batyanovskiy E. I., Gurinenko N. S., Korsun A. M. (2022) Structure, Impermeability and Durability of Cement Concrete. *Science and Technique*. 21 (1), 19–27. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-19-27> (in Russian)

Введение.

Гипотезы морозной деструкции бетона

В процессе развития теории морозостойкости цементного бетона представлено множество гипотез о причинах и механизме его постепенного разрушения при периодическом замерзании-оттаивании в насыщенном жидкостью состоянии, обобщенно изложенных в [1]. Основным и наиболее простым объяснением разрушения бетона в таких условиях считали давление воды, замерзающей в его порах, что учитывается и в современных гипотезах. Но только это физическое явление не может полностью объяснить процесс разрушения бетона. Накопление результатов исследований с 30-х гг. XX в., когда Ю. А. Нилендер дал научную классификацию пустот и трещин в бетоне, выделив пустоты, образовавшиеся при укладке (каверны, воздушные поры, водные поры), и трещины, возникшие в результате силовых воздействий, и их развитие Н. А. Поповым [2], С. В. Шестоперовым [3], В. В. Стольниковым [4], Г. И. Горчаковым [5] и многими другими исследователями выявили влияние на морозостойкость и долговечность бетона не только абсолютной величины пористости, но и физического характера пор – разобщенные они (замкнутые) или сообщающиеся.

Развитием теории влияния на морозостойкость бетона характера его пористости явилась гипотеза Т. Пауэрса «об интервале пор» [6, 7], на основании которой с целью повышения морозостойкости в бетоне создают искусственную

замкнутую пористость (добавками СНВ, СДО, кремнийорганических жидкостей и современных поризаторов, которые фактически получают на основе этих веществ). Действительно, такие добавки за счет эффекта замкнутой (компрессионной) пористости, эффекта пересечения (уменьшения длины) капилляров, а соответственно уменьшения капиллярного подсоса и способности бетона сорбировать жидкость, а также за счет гидрофобизации стенок пор и капилляров в бетоне веществом этих добавок способны на две-три марки повысить морозостойкость бетона с относительно высокой степенью пористости, особенно низких классов по прочности. Однако механизм морозной деструкции бетона гораздо более сложен.

Обобщая различные гипотезы, можно предположить, что механизм постепенного разрушения структуры бетона, подвергаемого попеременному замораживанию и оттаиванию в насыщенном водой состоянии, представляет собой комплексное сочетание деструктивных факторов, включая: давление льда при кристаллизации свободной воды; гидродинамические воздействия при ее перемещении (миграции) под влиянием градиента теплоты и влагосодержания (термовлагопроводности); гидростатическое давление защемленной в тупиковых порах и дефектах структуры жидкости; напряжения, возникающие от разницы температурных деформаций составляющих бетона и цементного камня (т. е. на макро- и микроуровне, в зонах контакта как цементного камня с заполнителями, так и между кристаллогидратными

ми новообразованиями в цементном камне); усталостные (постепенно увеличивающиеся) дефекты структуры от многократно повторяющихся знакопеременных деформаций; понижение со временем концентрации растворенных в поровой жидкости продуктов гидролиза цемента – как за счет образования нерастворимых в воде кристаллогидратов (отражение продолжающейся реакции цемента с водой), так и из-за подсоса жидкости развивающимися дефектами структуры в период оттаивания образцов, что увеличивает содержание свободной воды в объеме бетона, и др.

При использовании хлористых солей-антиобледенителей (при эксплуатации дорожных покрытий и мостостроительных конструкций) или испытательных солевых растворов (в процессе испытаний бетона на морозостойкость в 5%-м растворе NaCl) действие указанных факторов на бетон дополняется [8–12]: кристаллизационным давлением накопившейся соли, образовавшейся в результате перенасыщения ее раствора в малых по объемам дефектах структуры цементного камня, а также в зонах его контакта с заполнителями в бетоне и в порах (трещинах) зерен заполнителя; усилением процесса миграции жидкой фазы и ростом влагоемкости бетона; возникающим напряженным состоянием на уровне микроструктуры цементного камня из-за локально проявляющегося эффекта от перепада (градиента) температур, сопровождающего процесс очагового растворения-кристаллизации соли; понижением температуры замерзания раствора соли, в сравнении с водой, что способствует глубокому проникновению жидкой фазы в дефекты структуры все меньшего сечения, углубляет развитие процесса массопереноса соли и усиливает эффект деструкции бетона в целом.

В реальных условиях эксплуатации (например, дорожных покрытий) разрушающее воздействие солей-антиобледенителей не прекращается и при положительной температуре окружающей среды. Попеременное увлажнение-высушивание, изменение температуры (даже в пределах суток) вызывают соответствующие многократно повторяющиеся деформации бетона, побуждают проявление процессов растворения и кристаллизации попавшей в его поры соли с образованием кристаллогидратов, увеличивающихся в объеме, а также эндокринного эффекта, т. е. сопровождается постоянным деструктивным воздействием на бетон. Оно дополняется тем, что бетон разнообразных дорожных покрытий подвергается интенсивному

механическому воздействию: истирающим, сжимающим, изгибающим, ударным нагрузкам различной интенсивности и значений, которые многократно повторяются во времени, приводят к ускоренной морозной деструкции бетона [13]. Успешно сопротивляться такому комплексному химико-физическому воздействию способен только бетон высокой плотности, непроницаемости и прочности.

Материалы для бетона и общая методика исследований

В исследованиях использовали материалы со следующими характеристиками:

- вяжущее вещество – портландцемент марки ПЦ 500 по ГОСТ 10178–85, соответствующий классу СЕМ I 42,5 N по СТБ EN 197-1–2015;
- крупный заполнитель для бетона – гранитный щебень (Микашевичи) фракций 5–10 и 5–20 мм прочностью (по дробимости) ≥ 110 МПа, насыпной плотностью $\rho_0 \sim 1380$ кг/м³ и 1410 кг/м³, плотностью зерен $\rho_z \sim 2700$ кг/м³, соответствующий требованиям ГОСТ 8267–93; кубовидный щебень фракций 2–4 и 4–6 мм прочностью (по дробимости) ≥ 110 МПа, насыпной плотностью $\rho_0 \sim 1400$ –1420 кг/м³, плотностью зерен $\rho_z \sim 2700$ кг/м³, соответствующий требованиям СТБ 1311–2002;
- мелкий заполнитель – природный (мытый) песок с модулем крупности $M_k \sim 2,6$ –2,8, насыпной плотностью $\rho_0 = 1550$ кг/м³, плотностью зерен $\rho_z \sim 2650$ кг/м³, соответствующий требованиям ГОСТ 8736–93;
- сульфат натрия (Na₂SO₄; СН) кристаллизационный по ГОСТ 21458–75 – белое порошкообразное кристаллическое вещество без запаха;
- сульфат алюминия (Al₂(SO₄)₃; СА) по ГОСТ 12966–85 – твердое белое кристаллическое вещество без запаха;
- добавку-гиперпластификатор «Стахемент 2000-М Ж 30» (Ст) – пластифицирующую добавку для бетонных смесей и растворов. По эффективности пластифицирующего действия относится к пластифицирующим добавкам I группы согласно СТБ 1112–98 (сертификат соответствия требованиям СТБ 1112 № ВУ/112 03.1.3 ГА 1764). Добавка выпускается по ТУ ВУ 800013176.004–2011 в виде раствора 30%-й концентрации;
- добавку-гиперпластификатор «Релакс ПК» (ТУ ВУ 190679156.002–2013) – поликарбоксилатный суперпластификатор, отно-

сится к пластифицирующим добавкам I группы согласно СТБ 1112;

- микрокремнезем (МК) – в соответствии с требованиями СТБ EN 197-1–2015 с содержанием аморфного диоксида кремния не менее 85 % по массе; удельная поверхность $S_{уд}^{МК} \geq 3,0 \text{ м}^2/\text{г}$;

- ультрадисперсный микрокремнезем (УДМК) – диоксид кремния осажденный, соответствующий ТУ 2168-002-14344269–2009 «Ковелос 35/05т» с содержанием аморфного диоксида кремния не менее 98 % по массе; удельная поверхность $S_{уд}^{МК} \geq 350 \text{ м}^2/\text{г}$ (данные фирмы-производителя);

- воду для затворения и последующего твердения бетона, удовлетворяющую требованиям СТБ 1114–98.

Результаты экспериментальной оценки морозостойкости бетона

Морозостойкость «рядового» по прочности бетона. Оценивали (рис. 1) на составах, представленных в табл. 1, при замораживании ($t = 50-55 \text{ }^\circ\text{C}$) в 5%-м растворе NaCl по ГОСТ 10060–95.

Особенностью эксперимента было сопоставление состава бетона № 1 (цемента – 430 кг, песка – 697 кг, щебня (фракций 5–20 мм) – 1117 кг, подвижность смеси марки П1), включающего пластификатор и воздухововлекающую добавку (табл. 1), и составов № 2 и 3, включающих пластифицирующую добавку без введения воздухововлекающей, при прочих равных условиях – расход твердофазных материалов и консистенция (подвижность) смеси. Основное отличие заключалось в формирующейся структуре бетона – с созданием дополнительной пористости за счет введения воздухововлекающей добавки и без нее. В составах № 4 и 5 с исследовательской целью на 5 и 10 % был снижен расход цемента, взамен ввели равное количество микрокремнезема.

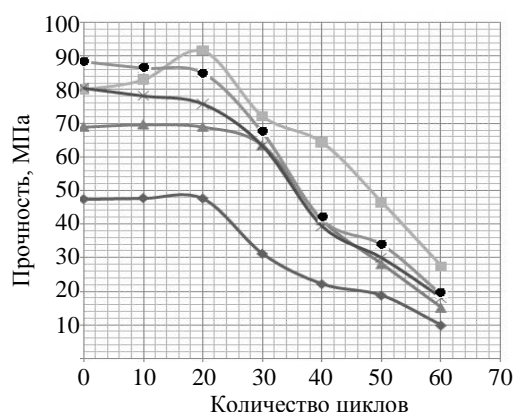


Рис. 1. Результаты испытаний:
 —◆— № 1 – контрольный; —■— № 2 – «Реламикс ПК»;
 —▲— № 3 – «Стахемент 2000-М»;
 —×— № 4 – «Реламикс ПК» + 5 % МК;
 —●— № 5 – «Реламикс ПК» + 10 % МК

Fig. 1. Test results: —◆— No 1 – control;
 —■— No 2 – Relamix PC;
 —▲— No 3 – Stachement 2000-M;
 —×— No 4 – Relamix PC + 5 % MSi;
 —●— No 5 – Relamix PC + 10 % MSi

На рис. 1 видно снижение прочности бетона (как исходной в начале испытаний, так и после 30 циклов (на $\geq 34 \%$)) при введении в состав воздухововлекающей добавки в виде микропорана. Кроме этого, водопоглощение (по массе) бетона с микропораном составило примерно 5 %, а для составов без этой добавки – до 2,0–2,5 %. Следует отметить, что снижение после 30 циклов прочности бетона с поризующей добавкой до $\sim 31 \text{ МПа}$ означает полную потерю эксплуатационной надежности. Уровень прочности бетона остальных составов в 60–70 МПа способен обеспечивать ее длительный период. Этот вывод подтверждает визуальная оценка состояния структуры бетона испытанных образцов. К 30 циклам испытаний структура бетона с поризующей добавкой (состав № 1) рыхлая, очевидна ее деструкция по всему объему образцов.

Таблица 1

Составы «рядового» бетона
 Compositions of “ordinary” concrete

| Состав | Цемент, кг/м ³ | Песок, кг/м ³ | Щебень, кг/м ³ | Вода, кг/м ³ | Пластификатор, кг/м ³ | Микрокремнезем, кг/м ³ | Микропоран, кг/м ³ | Плотность смеси, кг/м ³ |
|--|---------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| 1. Контрольный (микропоран + «Стахемент 2010») | 430,0 | 697 | 1117 | 162 | 2,15 | 0 | 0,301 | 2423 |
| 2. «Реламикс ПК» | 430,0 | 697 | 1117 | 120 | 6,45 | 0 | 0 | 2590 |
| 3. «Стахемент 2000-М» | 430,0 | 697 | 1117 | 130 | 4,30 | 0 | 0 | 2515 |
| 4. «Реламикс ПК» + 5 % МК | 408,5 | 697 | 1117 | 120 | 6,45 | 21,5 | 0 | 2627 |
| 5. «Реламикс ПК» + 10 % МК | 387,0 | 697 | 1117 | 140 | 2,15 | 43,0 | 0 | 2644 |

Нарушения структуры образцов составов № 2–5 имеются только в поверхностных слоях бетона, т. е. деструкция плотного непроницаемого материала проявляется в частичных нарушениях цементного камня внешнего контура образцов при сохранении исходной (плотной) структуры в объеме бетона после 30, а для состава № 2 – после 50 циклов испытаний.

Кроме отмеченного, очевиден прирост прочности образцов бетона в процессе испытаний состава с высокоэффективным пластификатором «Реламикс ПК». В этом случае начальное водосодержание бетона составляло $(В/Ц)_6 \sim 0,27$, средняя плотность была близка к 2600 кг/м^3 , водопоглощение по массе $\leq 2 \%$, т. е. непроницаемость бетона высока.

Согласно результатам исследований, введение в состав бетона добавки-поризатора едва ли не в два раза (с 80–90 до 45–50 МПа) снизило прочность бетона проектного возраста (28 сут.) при проведении экспериментов с соблюдением правила равноподвижности бетонной смеси и прочих равных условий по режиму твердения бетона.

Также очевидно, что состав бетона с воздухововлекающей добавкой обеспечил расчетный уровень морозостойкости, соответствующий марке F200 и установленным по действующим для бетона дорожного назначения правилам.

Одновременно экспериментальные данные свидетельствуют о том, что бетон без воздухововлекающей добавки, но с использованием эффективного пластификатора (в частности, «Реламикса ПК»), обеспечившего существенный рост плотности, непроницаемости и прочности, только после 50–55 циклов снизил прочность до уровня 40–45 МПа. Можно ожидать, что в эксплуатационных условиях дорожного полотна или иных с воздействием переменного замораживания-оттаивания материал с таким уровнем структурных характеристик и прочности обеспечит существенный рост эксплуатационной надежности и долговечности в сравнении с бетоном, содержащим поризующие добавки.

Морозостойкость бетона, подверженного действию механических нагрузок. Исследования выполняли на двух партиях образцов [13]. Для первой партии циклическое замораживание-оттаивание вели по третьему методу ГОСТ 10060–95 как для дорожного бетона с охлаждением образцов размерами $70 \times 70 \times 70 \text{ мм}$ до минус $(50–55)^\circ\text{C}$ и оттаиванием при $(18 \pm 2)^\circ\text{C}$ в жидкости. Но вместо 5%-го водного раствора NaCl в емкостях использовали водопроводную воду. На этом этапе исследований исключи-

ли влияние солевого воздействия на бетон. Вторую партию образцов бетона подвергали стандартным испытаниям замораживания-оттаивания по третьему методу ГОСТ 10060–95 при температуре минус $(50–55)^\circ\text{C}$ в 5%-м растворе NaCl.

Статическую механическую нагрузку на образцы бетона имитировали однократным нагружением их после оттаивания (через каждые пять циклов замораживания-оттаивания) под прессом с усилием примерно до 20, 30, 50 и 70 % от прочности бетона в проектном возрасте (28 сут.), а при испытаниях на солеустойкость – с такими же периодичностью и усилиями, но после насыщения в растворе соли. Уровень нагрузки для образцов мелкозернистого ($f_{cm,28} \sim 44 \text{ МПа}$) бетона соответствовал 10, 20, 25 и 30 МПа; для образцов бетона со щебнем ($f_{cm,28} \sim 53 \text{ МПа}$) – 15, 25, 30 и 35 МПа.

Динамическую (ударную, сосредоточенную) механическую нагрузку на оттаявшие (насыщенные жидкостью) образцы бетона имитировали 10 ударами копра – динамического плотномера (СТБ 1242–2000, масса груза $\sim 2,5 \text{ кг}$, высота падения 300 мм, точка касания – острие конуса с углом при вершине 60°) – по одной из их поверхностей (верхняя грань при последующем определении прочности на сжатие) через каждые пять циклов замораживания-оттаивания (насыщения-высушивания).

На рис. 2, 3 приведены графические зависимости, отражающие выявленную тенденцию изменений прочности бетона на сжатие и построенные (здесь и далее) по средним значениям результатов испытаний серий из трех-шести образцов при коэффициенте вариации прочности $\leq 8 \%$. Следует отметить, что после первых 10–20 циклов замораживания-оттаивания в растворе соли или в воде и до 10 циклов испытаний на солеустойкость (циклы насыщения-высушивания в статье не приведены) прочность образцов бетона (до уровня статической нагрузки 10–20 МПа для мелкозернистого бетона и 15–25 МПа для бетона со щебнем) несколько возрастает. Причем это явление имеет место (особенно при глубоком охлаждении) только в бетонах с достаточно высокой плотностью структуры. При циклическом замораживании-оттаивании бетона (например, достигшего проектной прочности и характеризующегося степенью гидратации цемента в 60–70 % при водопоглощении по массе 3–4 %, как в рассматриваемом случае) все же продолжают развиваться (хотя и медленно) реакции гидратации цемента.

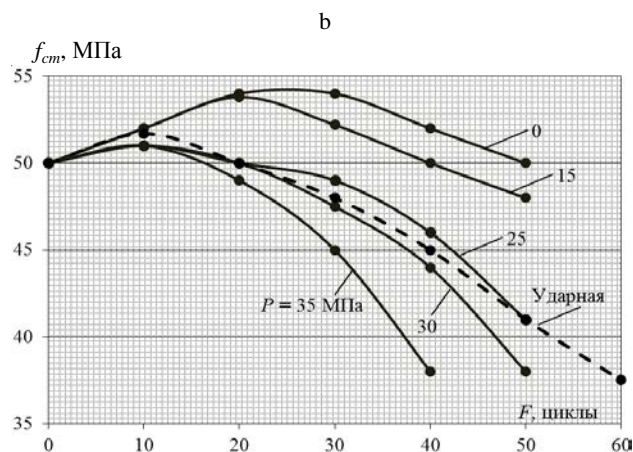
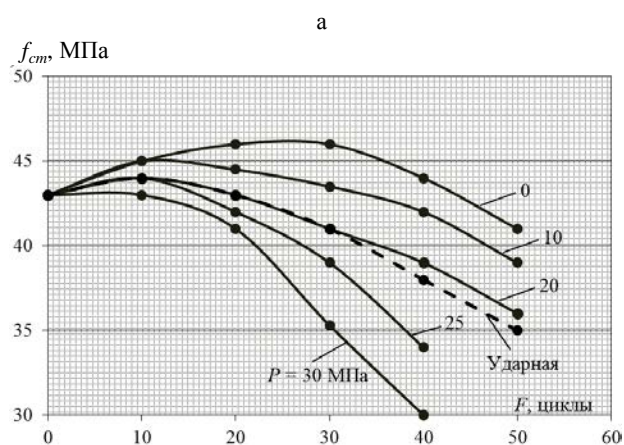


Рис. 2. Тенденция изменения прочности контрольных ($P = 0$) и основных образцов бетона естественного (под пленкой) твердения под воздействием циклического замораживания-оттаивания в среде-воде при $t = -(50-55)^\circ\text{C}$ и механической нагрузки: а – мелкозернистый бетон; б – бетон со щебнем

Fig. 2. Tendency of changes in the strength of control ($P = 0$) and basic samples of natural concrete (under the film) hardening under the influence of cyclic freezing-thawing in medium-water at $t = -(50-55)^\circ\text{C}$ and mechanical load: а – fine-grained concrete; б – concrete with crushed stone

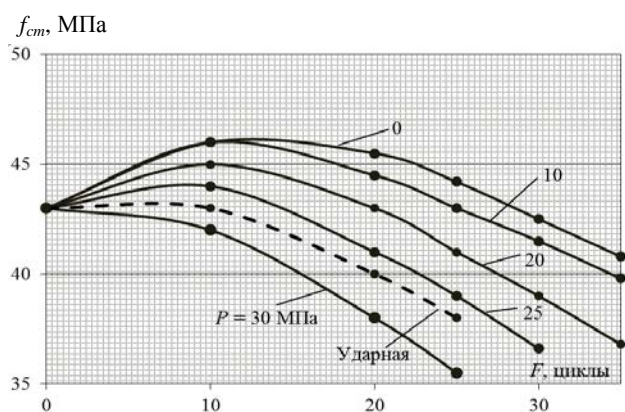


Рис. 3. Тенденция изменения прочности контрольных ($P = 0$) и основных образцов мелкозернистого бетона естественного (под пленкой) твердения под воздействием циклического замораживания-оттаивания в растворе соли при $t = -(50-55)^\circ\text{C}$ и механической нагрузки

Fig. 3. Tendency of changes in the strength of control ($P = 0$) and main samples of fine-grained concrete of natural (under the film) hardening under the influence of cyclic freezing-thawing in a salt solution at $t = -(50-55)^\circ\text{C}$ and mechanical load

Одновременно с этим явлением знакопеременные температурные воздействия вызывают деструктивные процессы. В результате на начальном этапе испытаний превалирует эффект побуждения гидратационного процесса, выражающийся в росте прочности бетона. С течением времени начинают преобладать деструктивные явления, которые в рассматриваемых экспериментах усилены за счет механического воздействия периодически прикладываемой к образцам нагрузки. Под ее воздействием возникают напряжения в объеме цементного камня (особенно в зонах контакта его с заполнителями), приводящие к микротрещинообразованию и снижению прочности бетона. В случае использования при замораживании-оттаивании раствора соли эффект начального роста прочности бетона в процессе испытаний имеет место, но менее значителен и кратковременен, так как на более раннем

этапе проявляется деструктивное воздействие соли.

Сопоставление данных о влиянии на изменение прочности бетона статически приложенной и ударной нагрузок свидетельствует, что отрицательное воздействие динамической ударной нагрузки примерно соответствует (по фактическим данным снижения прочности бетона) уровню статической нагрузки более 60 % (т. е. ее уровню, соответствующему верхней границе трещинообразования бетона [14]). На наш взгляд, это связано с тем, что и в первом, и во втором вариантах воздействия на бетон механическими нагрузками в его структуре появляются микротрещины, развитие которых усугубляется действием знакопеременных температур и деформаций, а также других ранее упоминавшихся факторов при замораживании-оттаивании бетона. При этом точно приложенные динамические нагрузки даже более

опасны (с позиций обеспечения долговечности бетона), чем статические.

Высокопрочный бетон. Эксплуатационные характеристики высокопрочного бетона ($f_{cm,28} \sim (100-110)$ МПа, коэффициент вариации прочности на сжатие $\leq 6\%$) с полифункциональной добавкой – водопоглощение по массе, водонепроницаемость (по воздухопроницаемости), морозостойкость (третий метод испытаний в солевой среде) – определяли по методикам действующих нормативных документов (табл. 2).

Состав бетона с полифункциональной добавкой номинально был одинаков, но при равноподвижной бетонной смеси характеризовался В/Ц = 0,34 долей ед., а также на $\sim 5\%$ большим расходом твердофазных компонентов, так как его средняя плотность была большей ($\rho_{cm} \sim 2530$ кг/м³), чем у бетона без добавки ($\rho_{cm} \sim 2420$ кг/м³). Водонепроницаемость оценивали по воздухопроницаемости с помощью прибора типа «Агама-2Р» по ГОСТ 12730.5–84 на сериях образцов-кубов (6 шт.) с ребром 150 мм, а морозостойкость – на сериях образцов-кубов с ребром 100 мм.

В процессе испытаний на морозостойкость высокопрочного особо плотного бетона был подтвержден факт достаточно продолжительного по времени (рис. 4) роста прочности образцов под влиянием попеременного замораживания-оттаивания.

Объяснение этому явлению было дано в исследованиях одного из авторов [15] по установленному факту роста прочности образцов особо плотного бетона сухого формирования при циклическом замораживании-оттаивании с использованием среды-воды (первый метод по ГОСТ 10060.0–95). Причиной роста прочности бетона является своеобразное разви-

тие (углубление) процесса гидратации цемента в таких условиях, сопровождающееся медленным ростом количества новообразований, дополнительным уплотнением и упрочнением реакционных каемок вокруг непрогидратировавших частиц цемента.

«Механизм» процесса связан с двумя факторами. Во-первых, структура особо плотного высокопрочного бетона к проектному возрасту (к началу стандартных испытаний на морозостойкость) характеризуется наличием тонкодисперсной пористости. А, как известно [16–18], жидкость, заполняющая поры сечением менее 0,1 мкм, находится в адсорбционно-связанном состоянии, т. е. испытывает огромное давление от притяжения к поверхности твердой фазы и при переходе в кристаллическое состояние при очень глубоких отрицательных температурах не увеличивается в объеме, образуя лед плотностью более 1 г/см³. То есть не оказывает давления на стенки ограничивающего ее объем капилляра. Во-вторых, наличествующая в более крупных порах бетона жидкость представляет собой насыщенный продуктами гидролиза-гидратации цемента раствор. При замерзании его в первую очередь замерзает растворитель, т. е. вода. И при этом продукты гидратации «отжимаются» к ограничивающим эти объемы кромкам реакционных каемок прогидратировавшего цемента. Поскольку образующиеся при этом кристаллогидраты не растворимы в воде, они постепенно (с повтором циклов замораживания-оттаивания бетона) увеличивают объем реакционных каемок и площадь их взаимных контактов в цементном камне бетона, что отражается в росте его прочности в процессе циклических испытаний как на морозо-, так и на солестойкость (при насыщении бетона в растворе солей – высушивании).

Таблица 2

Результаты оценки эксплуатационных свойств высокопрочного бетона
Results of evaluating performance properties of high-strength concrete

| Характеристика состава бетона | Водопоглощение по массе, % | Водонепроницаемость (по воздухопроницаемости) | | Морозостойкость | |
|--|----------------------------|---|-------|--|----------|
| | | a_i , см ³ /с | Марка | Количество циклов насыщения в 5%-м растворе NaCl (1-й метод) | Марка*** |
| Высокопрочный бетон* | 2,4 | 0,0094 | W20 | 37** (1000) | F1000 |
| Высокопрочный бетон с полифункциональной добавкой* | 2,0 | 0,0066 | W20 | 37** (1000) | F1000 |

* Состав № 1 – с 1 % пластификатора (Ст) и 10 % традиционного микрокремнезема, состав № 2 – с полифункциональной добавкой 1 % Ст + 0,5 % СН + 0,25 % СА + 1 % УДМК.
 ** Эксперимент прекращен, но образцы бетона не имеют дефектов и их прочность практически на уровне исходной (т. е. контрольных образцов до начала испытаний).
 *** Марка по морозостойкости приведена для бетона общестроительного назначения.

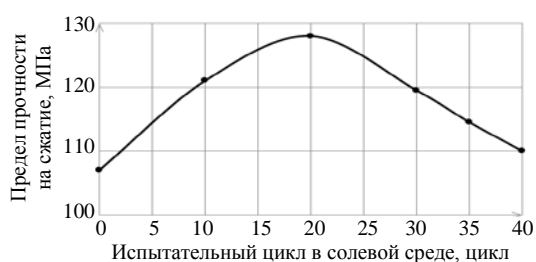


Рис. 4. Изменение прочности на сжатие высокопрочного бетона в процессе испытаний на морозостойкость

Fig. 4. Change in compressive strength of high-strength concrete during frost resistance tests

Одновременно с развитием этого процесса на структуру бетона оказывает влияние совокупность ранее приведенных деструктивных факторов. Превалирование воздействия продолжающейся гидратации цемента отражается в росте прочности бетона (рис. 1–4), а превалирование деструктивных факторов – в ее снижении. Для бетона высокой плотности, непроницаемости и прочности начало и развитие процесса деструкции значительно отодвигаются во времени (рис. 1), что обеспечивает рост эксплуатационной надежности и долговечности строительных конструкций на его основе.

В [15] период роста прочности бетона при испытаниях в среде-воде составил 400–600 циклов замораживания-оттаивания, затем началось медленное снижение прочности, но и через 1000 циклов она превышала начальную на ~6,0 %. В анализируемом случае, несмотря на используемую среду – 5%-й раствор NaCl и замораживание при $t \sim (-55)^\circ\text{C}$, эта тенденция в целом повторяется. Особенно, если соотнести результаты испытаний с таковыми для среды-воды (т. е. по первому методу оценки морозостойкости марка бетона в обоих случаях соответствует F1000). На наш взгляд, общность отмеченной тенденции изменения прочности особо плотного бетона в процессе испытаний на морозостойкость и показателя морозостойкости базируется на примерном соответствии параметров его структуры. В рассмотренных случаях при имеющейся разнице в условиях и особенно во времени проведения испытаний бетон характеризовался практически равенством величины водопоглощения по массе (~2,0 %) и водонепроницаемостью марки W20. То есть структурное строение (соответственно пористость и проницаемость) цементного камня в бетоне и бетона в целом было примерно на одном уровне, что и отрази-

лось в практическом равенстве результатов испытаний.

ВЫВОДЫ

1. Введение в состав бетона воздухововлекающих добавок, безусловно, способно обеспечить его морозостойкость на уровне марки F200 и даже F300 при испытаниях в солевой среде. С целью дальнейшего повышения морозостойкости бетона рационально добиваться одновременного увеличения его плотности и непроницаемости наряду с высокой прочностью. Оптимальное сочетание этих факторов способно обеспечить устойчивость цементного бетона к комплексному воздействию деструктивных эксплуатационных факторов.

2. Установленные закономерности влияния механических нагрузок позволяют понять причины ускоренной деструкции бетона, подверженного в процессе эксплуатации комплексному воздействию среды, усиленному их действием.

3. Следует отметить, что оценка морозостойкости цементного бетона по снижению прочности на 5 % от исходной для высокопрочного бетона не рациональна. Очевидно, что снижение прочности от 80–90 МПа и более на 5 % (т. е. на 4,0–4,5 МПа) при практически полном сохранении структуры и целостности материала, а также прочности на уровне 75–85 МПа не соотносится с потерей эксплуатационной надежности. Понятно, что такой бетон будет обеспечивать ее длительный период. В этой связи представляется необходимым критически переоценить требования действующих нормативов об обязательном введении в состав бетона (например, дорожного назначения) воздухововлекающих добавок. Естественно, для этого нужно провести многоплановые и объемные исследования проблемы повышения морозостойкости бетона с учетом возможностей, которые обеспечивают современные химические и минеральные добавки в части роста его плотности, непроницаемости и прочности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батяновский, Э. И. Оценка эксплуатационной долговечности тяжелого бетона по критерию «остаточной» морозостойкости / Э. И. Батяновский, А. И. Бондарович // Автомобильные дороги и мосты. 2010. Т. 6, № 2. С. 49–59.
2. Попов, Н. Д. К вопросу об усталости бетона при многократных циклах чередующихся воздействий окружающей среды / Н. Д. Попов, В. А. Невский // Сборник / Мос-

- ковский инженерно-строительный институт имени В. В. Куйбышева. М., 1957. № 15. С. 73–90.
3. Шестоперов, С. В. Цементный бетон в дорожном строительстве / С. В. Шестоперов. М.: Дориздат, 1950. 132 с.
 4. Стольников, В. В. Исследования по гидротехническому бетону / В. В. Стольников. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1953. 330 с.
 5. Горчаков, Г. И. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений / Г. И. Горчаков, М. М. Капкин, Б. Г. Скрамтаев. М.: Стройиздат, 1965. 195 с.
 6. Powers, T. C. Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete / T. C. Powers // Journal Proceedings. 1945. Vol. 41, No 1. P. 245–272.
 7. Powers, T. C. Theory of Volume Changes in Hardened Portland Cement Paste During Freezing / T. C. Powers, R. A. Helmuth // Proceedings Highway Research Board. 1953. Vol. 32. P. 285–297.
 8. Батыновский, Э. И. Особо плотный бетон сухого формования / Э. И. Батыновский. М.: НП ООО «Стринко», 2002. С. 103–108.
 9. Москвин, В. М. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В. М. Москвин, Ф. М. Иванов, С. Н. Алексеев. М.: Стройиздат, 1980. 536 с.
 10. Ахвердов, И. Н. Механизм разрушения пористых материалов при насыщении их солями / И. Н. Ахвердов, И. В. Станишевская // ДАН БССР. 1967. Т. 11, № 4. С. 320–323.
 11. Иванов, Ф. М. Защита железобетонных транспортных сооружений от коррозии / Ф. М. Иванов. М.: Транспорт, 1968. 175 с.
 12. Шалимо, М. А. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии / М. А. Шалимо. Минск: Выш. шк., 1986. 200 с.
 13. Батыновский, Э. И. Морозо- и солестойкость бетона, подверженного механическим нагрузкам / Э. И. Батыновский, А. И. Бондарович // Вестник БНТУ. 2008. № 4. С. 5–16.
 14. Берг, О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О. Я. Берг. М.: Госстройиздат, 1962. 96 с.
 15. Батыновский, Э. И. Основы технологии изготовления бетонных и железобетонных изделий и конструкций с применением сухих бетонных смесей / Э. И. Батыновский. Минск, 2002. 351 с.
 16. Бриджмен, П. В. Новейшие работы в области высоких давлений / П. В. Бриджмен. М.: Гос. изд-во иностр. лит., 1948. 300 с.
 17. Конопленко, А. И. К вопросу теории морозостойкости бетона / А. И. Конопленко // Сб. тр. Ростовского инженерно-строительного института. Ростов н/Д, 1958. Вып. XII. С. 105–120.
 18. Зацепина, Г. Н. Свойства и структура воды / Г. Н. Зацепина. М.: Из-во Москов. ун-та, 1974. С. 48–80.
 19. Поступила 14.10.2021
Подписана в печать 21.12.2021
Опубликована онлайн 28.01.2022
 20. Popov N. D., Nevsky V. A. (1957) To the Question of Concrete Fatigue in Multiple Cycles of Alternating Environmental Influences. *Moscow State University of Civil Engineering named after V. V. Kuibyshev. Collection No 15*. Moscow, 73–90 (in Russian).
 21. Shestoporov S. V. (1950) *Cement Concrete in Road Construction*. Moscow, Dorizdat Publ. 132 (in Russian).
 22. Stolnikov V. V. (1953) *Research on Hydraulic Concrete*. Moscow–Leningrad, Gosenergoizdat Publ. 330 (in Russian).
 23. Gorchakov G. I., Kapkine M. M., Skramtaev B. G. (1965) *Increasing the Frost Resistance of Concrete in the Structures of Industrial and Hydraulic Facilities*. Moscow, Stroyizdat Publ. 195 (in Russian).
 24. Powers T. C. (1945) Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete. *Journal Proceedings*, 41 (1), 245–272.
 25. Powers, T. C., Helmuth R. A. (1953) Theory of Volume Changes in Hardened Portland Cement Paste During Freezing. *Proceedings Highway Research Board*, 32, 285–297.
 26. Batlanovskii E. I. (2002) *Extra Dense Dry-Formed Concrete*. Moscow, Publishing House of Scientific Production Enterprise with Limited Liability “Strinko”, 103–108.
 27. Moskvin V. M., Ivanov F. M., Alekseev S. N. (1980) *Corrosion of Concrete and Reinforced Concrete, Methods for their Protection*. Moscow, Stroyizdat Publ. 536 (in Russian).
 28. Akhverdov I. N., Stanishevskaya I. V. (1967) Mechanism of Destruction of Porous Materials when Saturated with Salts. *Doklady Akademii Nauk Belorusskoi SSR* [Reports of Academy of Sciences of Belarussian Soviet Socialist Republic], 11 (4), 320–323 (in Russian).
 29. Ivanov F. M. (1968) *Corrosion Protection of Reinforced Concrete Transport Structures*. Moscow, Transport Publ. 175 (in Russian).
 30. Shalimo M. A. (1986) *Corrosion Protection of Concrete and Reinforced Concrete Structures*. Minsk, Vysheyshaya Shkola Publ. 200 (in Russian).
 31. Batlanovsky E. I., Bondarovich A. I. (2008) Frost and Salt Resistance of Concrete Subjected to Mechanical Stress. *Vestnik BNTU* [Bulletin of Belarusian National Technical University], (4), 5–16 (in Russian).
 32. Berg O. Ya. (1962) *Physical Foundations of the Theory of Concrete and Reinforced Concrete Strength*. Moscow, Gosstroyizdat Publ. 96 (in Russian).
 33. Batlanovsky E. I. (2002) *Fundamentals of Technology for Manufacture of Concrete and Reinforced Concrete Products and Structures Using Dry Concrete Mixes*. Minsk. 351 (in Russian).
 34. Bridgman P. W. (1948) *Recent Work in the Field of High Pressures*. Moscow, State Publishing House of Foreign Literature. 300 (in Russian).
 35. Konoplenko A. I. (1958) To the Question of the Theory of Concrete Frost Resistance. *Sb. tr. Rostovskogo Inzhenerno-Stroitel'nogo Instituta* [Proceedings of Rostov Civil Engineering Institutes]. Rostov-on-Don, XII, 105–120 (in Russian).
 36. Zatsepina G. N. (1974) *Properties and Structure of Water*. Moscow, Publishing House of Moscow University, 48–80 (in Russian).

REFERENCES

1. Batlanovskii E. I., Bondarovich A. I. (2010) Evaluation of Operational Durability of Heavy Concrete by the Criterion of “Residual” Frost Resistance. *Avtomobilnye Dorogi i Mosty* [Highways and Bridges], 6 (2), 49–59 (in Russian).

Received: 14.10.2021

Accepted: 21.12.2021

Published online: 28.01.2022