

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батяновский, Э.И. Особенности технологии бетона прочностью 100-150 МПа с углеродными наноматериалами / Э.И. Батяновский, В.Д. Якимович, П.В. Рябчиков // Строительная наука и техника. – 2012. – № 2. – С. 59–67
2. Батяновский, Э.И. Особенности технологии высокопрочного бетона на отечественных материалах, включая нанокремнеземные добавки / Э.И. Батяновский, В.Д. Якимович, П.В. Рябчиков // Сборник научных трудов «Проблемы современного бетона и железобетона». Выпуск 3: в 2 т. – Минск, РУП «БелНИИС», 2011 Т. 2. – С. 53–68.
3. Holland T.C. Working with Silica Fume in Ready-Mixed Concrete - USA Experience. CANMET/ACI Third International Conference. Trondheim, Norway, 1989, Proceedings, V.2, p.p. 763-781.
4. Radjy F.F., Bogen T., Sellevold E.J., Loeland K.E. A Review of Experiences with Condensed Silica-Fume Concretes and Products. CANMET/ACI Second International Conference. Madrid, Spain, 1986, Proceedings, V.2, p.p.1135-1152.
5. Method of Producing Stabilized aqueous dispersions of Silica Fume. US Patent <sup>1</sup> 4321243 C04B, 33/141.

УДК 666.97; 693.54

### ТЕОРЕТИКО-ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОВЫШЕНИЯ МОРОЗОСТОЙКОСТИ ЦЕМЕНТНОГО БЕТОНА

*КОРСУН А. М., БАТЯНОВСКИЙ Э. И*

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

**Теоретические аспекты морозной деструкции бетона.** Морозостойкость – один из основных показателей, по которому оценивают ожидаемую долговечность бетонных и железобетонных изделий и конструкций. В особой мере это относится к наружным ограждающим здания и сооружения конструкциям, эксплуатируемым в условиях попеременного замораживания – оттаивания, увлажнения – высушивания. Наиболее «жесткие» условия эксплуатации при этом

создаются, если в жидкости присутствуют соли, способствующие ускорению процесса деструкции бетона. В современном строительстве автомобильных дорог Беларуси все более широко применяют цементный бетон. Эксплуатационная надежность и долговечность покрытий из него непосредственно зависит от морозостойкости материала, которую в наибольшей мере связывают с расширением замерзающей в порах «свободной» воды, возникающем при этом давлении на стенки пор с постепенной деструкцией бетона. С целью повышения морозостойкости на основании гипотезы Т. Пауэрса «об интервале пор» [1, 2] 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 2-3 марки повысить морозостойкость бетона с относительно высокой степенью пористости, особенно низких классов по прочности.

Так, обобщение разнообразных гипотез, включая основы теории миграции влаги в пористых телах, позволяет констатировать, 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 тепла 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 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.

В случае использования хлористых солей-антиобледенителей (как это имеет место при эксплуатации дорожных покрытий и мостостроительных конструкций) или испытательных солевых растворов (в процессе испытаний бетона на морозостойкость в 5%-ом растворе NaCl) действие означенных факторов на бетон дополняется [14–21] следующим. Во-первых, 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. При этом механизм образования и увеличения дефектов структуры может проявиться как за счет роста кристаллов соли, так и за счет возникновения трещин при «обжати» последних прослойками (оболочками) цементного камня при «отрицательных» деформациях в период охлаждения бетона. Возникающие в обоих случаях растягивающие усилия в цементном камне, вызывают появление в нем трещин. Во-вторых, усилением процесса миграции жидкой фазы и ростом влагоемкости бетона. Соответственно под нагрузкой в нем возрастает, в сравнении с водой, проявление «эффекта Ребиндера», т. е. расклинивающего действия тонких пленок жидкости-раствора в устье трещин (дефектов структуры). В-третьих, возникает напряженное состояние на уровне микроструктуры цементного камня из-за локально проявляющегося эффекта от перепада (градиента) температур (эндокринный эффект), сопровождающего процесс «очагового» растворения – кристаллизации соли. Кроме отмеченного, понижение температуры замерзания раствора соли, в сравнении с водой, 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 отрицательное (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 – кристаллизации попавшей в его поры соли с образованием кристаллогидратов, увеличивающихся в объеме, а также эндокринного эффекта, то есть, сопровождается постоянным деструктивным воздействием на бетон.

Кроме физико-химической агрессии среды в процессе эксплуатации бетон 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 [22]. Успешно сопротивляться такому комплексному химико-физическому воздействию способен только бетон высокой плотности, непроницаемости и прочности.

**Результаты экспериментальной оценки морозостойкости бетона.** Далее в тексте приведены результаты испытаний на морозостойкость бетона различной плотности и прочности, в состав которого входят воздухововлекающие добавки и без них. Частично представлены данные, которые получены в период с 1975 г. по настоящее время.

В табл. 1 приведены результаты оценки морозостойкости бетона «сухого формования» (цемент марки «М400» –  $360 \text{ кг/м}^3$ ;  $(В/Ц)_6 \sim 0,27\text{--}0,28$ ; средняя плотность  $2550\text{--}2600 \text{ кг/м}^3$ ;  $W_m \leq 2 \%$ ) с повторным вибрированием после водонасыщения сухой смеси и без него, полученные в период 1975–1978 гг.

Испытания выполнены по первому методу ГОСТ 10060, как для бетона общестроительного назначения. Из результатов испытаний следует, что прочность особо плотного ( $W_m \leq 2 \%$ ; водонепроницаемость «W20») бетона после 1000 циклов (87,0 МПа) превышала на 6,4 % ее значение, установленное в начале испытаний (75,0 МПа), длившихся более 3 лет (1 цикл в сутки).

Таблица 1

## Результаты испытания бетона «сухого формирования»

| Количество циклов замораживания-оттаивания | Прочность бетона на сжатие, $f_{cm}$ , МПа |           |                           |           | Изменение $f_{cm}$ , %, относительно: |           |                         |           |
|--|--|-----------|---------------------------|-----------|---------------------------------------|-----------|-------------------------|-----------|
|  | Основные образцы                           |           | Нормально-влажн. тверден. |           | Контрольных образцов                  |           | Нормально-влажн. тверд. |           |
|  | Разовое                                    | Повторное | Разовое                   | Повторное | Разовое                               | Повторное | Разовое                 | Повторное |
| 0  | 60,0                                       | 75,0      | 60,0                      | 75,0      | –                                     | –         | –                       | –         |
| 200  | 61,5                                       | –         | 64,0                      | –         | +2,5                                  | –         | –5,7                    | –         |
| 300  | 60,0                                       | 84,5      | 66,0                      | 80,0      | 0                                     | +12,7     | –9,1                    | +5,3      |
| 400  | 57,5                                       | 85,7      | 68,0                      | 82,0      | –4,2                                  | +14,3     | –15,5                   | +4,4      |
| 500  | –  | 82,5      | –                         | 83,5      | –                                     | +10,0     | –                       | –1,2      |
| 600  | –  | 82,5      | –                         | 84,5      | –                                     | +10,0     | –                       | –2,4      |
| 750  | –  | 82,0      | –                         | 85,5      | –                                     | +9,3      | –                       | –4,1      |
| 1000                                       | –  | 79,5      | –                         | 87,0      | –                                     | +6,4      | –                       | –8,6      |

Позднее (в 80–90-е годы XX в.) бетон этого качества трижды испытывали на морозостойкость в солевой среде по 2-му методу ГОСТ 10060 (при  $-(55 \pm 5)^\circ\text{C}$ ) до показателя марки «F500», после чего испытания прекращали по причине достаточности полученных данных об уровне морозостойкости бетона. По состоянию испытанных образцов они могли быть продолжены. Здесь следует отметить, что бетон, полученный по технологии «сухого формирования» с повторным вибрированием после водонасыщения, характеризуется «минимально необходимым» объемом цементного камня (при расходе цемента 350–370 килограмм на  $1 \text{ м}^3$ ) и высокой степенью «насыщения» объема твердофазными заполнителями (щебня гранитного  $\sim 1250 \text{ кг}$  и песка природного  $\sim 850 \text{ кг}$ ) при высокой прочности ( $f_{cm} \geq 75 \text{ МПа}$ ). То есть, структурно этот бетон представляет собой жесткую, малодеформируемую систему твердой фазы, в которой наиболее деформативная составляющая – цементный камень, занимает минимальный объем. С учетом высокой степени его непроницаемости в таком материале к минимуму сведена деформативность как под влиянием замерзающей воды, так и под действием

знакопеременных деформаций при циклических испытаниях, включая накопление усталостных дефектов структуры, солевое воздействие и влияние всей совокупности деструктивных факторов в целом. Следствием является рост морозостойкости бетона.

В таблице 2 приведены данные испытаний бетона для мостостроительных «Т»-образных балок (приведенных в примечании к таблице 2 составов) по заявке завода «ЖБМК» (г. Фаниполь) бетона после пропаривания по режиму 4+5+8+5 при температуре изотермической выдержки 60°С. Эти данные были получены в 1995 году.

Таблица 2

Результаты испытания бетона мостовых балок

| № п/п | Вид и дозировка добавки | Прочность бетона контрольных образцов, МПа | Прочность бетона после циклов |      | Потеря прочности % к окончанию испытаний | Марка по морозостойкости |
|-------|-------------------------|--|-------------------------------|------|--|--------------------------|
|       |                         |  | 20                            | 35   |  |                          |
| 1*    | С-3 0,6 %               | 48,3                                       | 56,0                          | 47,6 | 1,4                                      | F300                     |
| 2**   | С-3 0,6 %               | 39,2                                       | 54,0                          | 38,5 | 1,8                                      | F300                     |
| 3**   | С-3+СНВ<br>0,4 +0,005   | 29,6                                       | 30,5                          | 28,6 | 3,5                                      | F300                     |
| 4**   | С-3+СНВ<br>0,6 +0,015   | 32,2                                       | 37,0                          | 30,6 | 4,5                                      | F300                     |
| 5***  | С-3 0,6 %               | 43,9                                       | 50,6                          | 43,8 | 0,2                                      | F300                     |

\* – мытый щебень (в остальных случаях – без промывки); \*\* – ОК ~ 3 см при Ц = 418 кг/м<sup>3</sup> и (В/Ц)<sub>6</sub> ~ 0,34; \*\*\* – Ц = 500 кг/м<sup>3</sup> и ОК ~ 5 см при (В/Ц)<sub>6</sub> ~ 0,27.

При продолжении испытаний сверх количества циклов, соответствовавших марке «F300», образцы с добавкой «СНВ» резко снизили прочность; образцы состава № 5, т. е. бетона без воздухововлекающих добавок, но с повышением плотности за счет снижения до В/Ц ~ 0,27 водоцементного отношения при увеличении до 500 кг на 1м<sup>3</sup> расхода цемента, выдержали испытания до F400, после чего они были прекращены.

В табл. 3 и 4 приведен состав (предложенный для данного случая БНТУ) и результаты испытаний бетона, осуществленных производственной лабораторией филиала ЗЖБМК ОАО «Дорстройиндустрия» г. Фаниполя в октябре-декабре 2013 г. (второй метод по ГОСТ 10060.2-95).

Таблица 3

## Состав бетона на БСЦ (подбор БНТУ):

| Наименование                    | Наименование состава и содержание компонентов, кг/м <sup>3</sup> |
|---------------------------------|--|
| ПЦ 500-Д0                       | 490  |
| Песок                           | 685  |
| Щебень фракц. 5-20 мм, 10-20 мм | 1077(431+646)  |
| Вода, л                         | 128  |
| Стахемент 2000, кг(2 % от Ц)    | 9,8  |
| Подвижность, см                 | 17   |
| Объем вовлеченного воздуха, %   | 5  |
| Время перемешивания, сек        | 540  |
| Микрокремнезем, кг              | 49   |
| УНМ, %                          | 0,0005   |

Таблица 4

## Результаты испытаний после 47 циклов

| № п/п               | Дата испытаний | Прочность на сжатие, МПа |      |      |      |      |      |      | Изменение |
|---------------------|----------------|--------------------------|------|------|------|------|------|------|-----------|
| Контрольные образцы |                |                          |      |      |      |      |      |      |           |
| 1                   | 8.10.13        | 72,7                     | 74,8 | 74,4 | 72,3 | 73,4 | 73,9 | 73,6 | –         |
| Основные образцы    |                |                          |      |      |      |      |      |      |           |
| 2                   | 23.12.13       | 75,9                     | 72,6 | 74,8 | 73,0 | 69,1 | 71,1 | 72,7 | –1,22 %   |

В этом случае (под заказ из Российской Федерации на изделия с требуемой маркой по морозостойкости «F300» в солевой среде) при требуемых для испытаний на марку «F300» (как для бетонов дорожных и аэродромных покрытий) 37 циклах попеременного замораживания и оттаивания образцов было проведено 47 циклов.

При этом признаков морозной деструкции в виде шелушения, трещин и разрушения бетона не наблюдалось; эксперимент прерван по техническим причинам.

В табл. 5 частично приведены данные (эксперименты продолжают) испытаний бетона составов, аналогичных примененным при строительстве 2-й кольцевой минской дороги. В исследованиях использовали материалы для бетона, аналогичные применявшимся при ее строительстве. Особенностью эксперимента было сопоставление примененного при этом состава (№ 1) бетона (цемента – 430 кг, песка – 697 кг, щебня (фр. 5–20 мм) – 1117 кг, подвижность смеси марки «П1»), включающего пластификатор и воздухововлекающую добавку (см. табл. 5) и составов № 2 и № 3, включающих пластифицирующую добавку без введения воздухововлекающей, при прочих равных условиях: расходу твердофазных материалов и консистенции (подвижности) смеси. Основное отличие было в формирующейся структуре бетона – с созданием дополнительной пористости за счет введения воздухововлекающей добавки и без нее.

Таблица 5

Составы бетона и данные испытаний

| № состава бетона | Введенная добавка, % от МЦ*                 | В/Ц, доли ед. | Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup> | Прочность бетона, МПа после циклов испытаний |      |      |      |
|------------------|---|---------------|--------------------------------------|--|------|------|------|
|                  |   |               |                                      | 0  | 10   | 20   | 30   |
| 1                | Стахемент 2010 (0,5%)<br>Микропоран (0,07%) | 0,37          | 2423                                 | 47,5   | 47,8 | 47,7 | 31,3 |
| 2                | Реламикс ПК (1,5%)                          | 0,27          | 2590                                 | 80,0   | 83,0 | 91,5 | 72,1 |
| 3                | Стахемент 2000М (1%)                        | 0,3           | 2515                                 | 69,0   | 69,7 | 69,0 | 63,5 |

\* – в процентах от массы цемента при дозировке в виде раствора.

Из данных табл. 2 и 5 очевидно существенное снижение прочности бетона (как в начале, так и после 30 циклов (на  $\geq 34\%$ )) при введении в состав воздухововлекающей добавки (в частности, «СНВ» (см. табл. 2) и микропорана. Кроме этого, водопоглощение (по массе) бетона составило в обоих случаях  $\sim 4\%$  и более, а для составов



без этих добавок до (2–2,5) %. Здесь следует отметить, что снижение прочности бетона с поризующей добавкой до ~ 31 МПа означает полную потерю эксплуатационной надежности. Уровень прочности бетона составов №2 и №3 в 60–70 МПа способен обеспечивать ее длительный период. Этот вывод подтверждает визуальная оценка состояния структуры бетона испытанных образцов. Структура бетона с поризующей добавкой (состав №1) рыхлая, очевидна ее деструкция по всему объему образцов. Нарушения структуры образцов составов № 2 и № 3 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.

Кроме отмеченного, очевиден прирост прочности образцов бетона в процессе испытаний как повторно вибрированного особо плотного «сухого формования» (см. табл. 1), так и состава № 2 с высокоэффективным пластификатором («Реламикс ПК», см. табл. 5). Необходимо отметить, что в этих обоих случаях  $(В/Ц)_6 \sim 0,27$ , средняя плотность близка к 2600 кг/м<sup>3</sup> и водопоглощение по массе  $\leq 2$  %, т. е. высока непроницаемость бетона.

**Заключение.** Введение в состав бетона воздухововлекающих добавок безусловно способно обеспечивать рост его морозостойкости вплоть до марок «F200»–«F300» при испытаниях в солевой среде. С целью дальнейшего повышения морозостойкости бетона рационально добиваться одновременного повышения его плотности и непроницаемости наряду с высокой прочностью. Оптимальное сочетание этих факторов способно обеспечить устойчивость цементного бетона к комплексному воздействию деструктивных эксплуатационных факторов, в том числе с учетом их усиления за счет постоянно действующих механических нагрузок, которые должен выдерживать, например, бетон дорожных покрытий.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Powers T. A. Working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete. - J. Am. Coner. Inst., 1945, № 4. - V. 16.
2. Powers T., Helmut R. Theory of volume changes in hardened portland – Cement paste during freezing / Proceedings Hig way Research Board, 1953: - V. 32.
3. Горчаков Г.И., Капкин М.М., Скрамтаев Б.Г. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений. – М.: Стройиздат, 1965.- 195 с.
4. Шестоперов С.В. и др. Цементный бетон в дорожном строительстве. – М.: Дориздат, 1950. – 132 с.
5. Стольников В.В. Исследования по гидротехническому бетону. – М.: - Л.: Госэнергоиздат. 1953. – 330 с.

УДК 691.311

### **ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИТЫХ И ПРЕССОВАННЫХ ГИПСОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПЕРВЫЕ СУТКИ ТВЕРДЕНИЯ**

*КРАСУЛИНА Л. В.*

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

Изделия на основе гипсовых вяжущих обладают рядом положительных свойств: быстрое и безусадочное твердение, низкая плотность и теплопроводность, химическая нейтральность, биологическая стойкость, высокая огнестойкость, декоративность, гигиеничность, относительно низкий экономический показатель, экологическая безопасность. Но наряду с положительными свойствами имеется и ряд недостатков, основные из которых – низкие прочность и водостойкость, обусловленные макропористой структурой и плохо развитыми контактами. Причина формирования такой структуры заключается в избытке воды затворения для обеспечения удобоукладываемости смеси. В такой системе не происходит упрочнение сформировавшейся на начальной стадии твердения низкопрочной