

**Морозо- и солестойкость бетона,  
подверженного механическим нагрузкам**

Насенник Д.А., Приходько В.В.

Научный руководитель – Бондарович А.И.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

В процессе эксплуатации на территории Беларуси бетон дорожных и аэродромных покрытий, тротуаров и других зон благоустройства городов и поселений подвергается за зимний период года переходам через нулевую отметку около 100 и более раз, то есть воспринимает порядка 50 циклов попеременного замораживания-оттаивания. Применение в качестве противоморозных реагентов солей хлора формирует эксплуатационную среду, характеризующуюся комплексным агрессивным воздействием на бетон. Последнее «накладывается» на и без того сложный механизм разрушительного действия знакопеременных температур и усиливает его деструктивный эффект.

Развитие теории морозостойкости бетона характеризуется множеством гипотез о причинах и механизме разрушения бетона при совместном действии на него воды и мороза, начиная с классического физического воздействия давления воды, замерзающей в его порах. Роль расширения воды при замерзании учитывается и в современных гипотезах, но само по себе это физическое явление не может полностью объяснить процесс разрушения бетона. В этой связи большое значение для развития теории морозостойкости бетона имеют выполненные в период 30-60-х годов XX века работы, по существу сформировавшие современные представления о причинах и механизме морозной деструкции бетона и технологических мероприятиях для повышения его долговечности.

Обобщая разнообразные гипотезы, включая основы теории миграции влаги в пористых телах, констатируем, что механизм нарушения структуры бетона, подвергаемого попеременному замораживанию и оттаиванию в насыщенном водой состоянии, чрезвычайно сложен. Он представляет собой сочетание деструктивных факторов,

включая давление льда при кристаллизации свободной воды; гидродинамику ее перемещения (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 (на макро- и микроуровне в контактных зонах); 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 гидрокристаллов (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 или испытательных солевых растворов действие означенных факторов на бетон дополняется следующим. Во-первых, кристаллизационным давлением накопившейся соли, образовавшейся после пересыщения ее раствора в малых по объемам дефектах структуры цементного камня, в зоне контакта составляющих бетона и микротрещинах зерен заполнителя. При этом механизм образования и увеличения дефектов структуры может проявиться как за счет роста кристаллов соли, так и за счет «обжатия» их, например, прослойкой (оболочкой) цементного камня при «отрицательных» деформациях в период охлаждения бетона. Возникающие при этом растягивающие усилия в цементном камне, вызывают появление в нем трещин. Во-вторых, усилением процесса миграции воды и ростом влагоемкости бетона, в объеме пор которого накапливается соль. Соответственно возрастает, в сравнении с водой, эффект раскливающего действия в устье трещин (дефектов) тонких пленок жидкости-раствора. В-третьих, возникает напряженное состояние на уровне микроструктуры цементного камня из-за локальных микроэффектов градиента температур (эндокринный эффект), сопровождающих процесс «очагового» растворения – кристаллизации соли.

Цель экспериментов заключалась в выявлении закономерностей изменения свойств бетона под комплексным воздействием циклического замораживания-оттаивания (насыщения в растворе NaCl –

высушивания) и механических нагрузок (статических и динамических). С учетом того, что продолжительное воздействие этих агрессивных по отношению к бетону факторов должно в какой-то момент привести к нарушениям его структуры, отслеживали изменение скорости прохождения ультразвукового импульса во взаимосвязи с изменяющимися свойствами бетона: прочностью, изменениями массы, проницаемостью.

Исследования осуществили на трех партиях образцов. Для первой партии циклическое замораживание-оттаивание вели по 3-му методу ГОСТ 10060 как для дорожного бетона с охлаждением образцов (70x70x70 мм) до  $-(50...55)^{\circ}\text{C}$  и оттаивание при  $18\pm 2^{\circ}\text{C}$  в жидкости, но вместо 5% водного раствора  $\text{NaCl}$  в емкостях использовали водопроводную воду. На этом этапе исследований исключили влияние солевого воздействия на бетон.

Вторую партию образцов циклически насыщали в 5 % растворе  $\text{NaCl}$  (температура  $\sim 15...18^{\circ}\text{C}$ ) в течение 16 ч с последующим высушиванием в сушильном шкафу при температуре  $\sim 60^{\circ}\text{C}$  в течение 7...8 ч. Условия эксперимента были ужесточены тем, что разогретые при высушивании образцы бетона помещали в раствор соли без предварительного охлаждения на воздухе.

Третью партию образцов бетона подвергали стандартным испытаниям замораживанием-оттаиванием по 3-му методу ГОСТ 10060-95 при температуре  $-(50...55)^{\circ}\text{C}$  в 5 % - ом растворе  $\text{NaCl}$ .

Статическую механическую нагрузку на образцы бетона имитировали загрузением их после оттаивания (через каждые 5 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 солестойкость – с такой же периодичностью и усилиями, но после насыщения в растворе соли.

Динамическую (ударную, сосредоточенную) механическую нагрузку на оттаявшие (насыщенные в растворе соли) образцы бетона имитировали 10-ю ударами копра – плотномера динамического (СТБ 1242; масса груза  $\sim 2,5$  кг; высота падения – 300 мм; точка касания – острое конуса с углом при вершине 60 град.) по одной из их поверхностей через каждые 5 циклов замораживания-оттаивания (насыщения-высушивания).

Для получения сравнительных характеристик в каждой партии образцов бетона имелись контрольные, которые подвергали циклическому замораживанию-оттаиванию (насыщению-высушиванию) без дополнительного воздействия механических нагрузок.

По результатам испытаний были построены графики (рис. 1, 2), которые отражают тенденция изменения прочности и скорости ультразвука контрольных и основных образцов бетона

Анализ данных испытаний бетона на морозостойкость в «среде-воде» и в растворе свидетельствует, что для контрольных образцов (отсутствует механическая нагрузка) сохраняется общая закономерность некоторого роста прочности бетона на начальном этапе испытаний до 30...35 циклов в воде и до 10...20 циклов в растворе соли. Затем прочность бетона закономерно снижается при более высоком темпе для испытаний в солевом растворе. Если оценить эти изменения по количеству циклов, то получается, что влияние солевого раствора проявляется, примерно, в 2...3-х кратном ускорении процесса деструкции (по началу снижения прочности) бетона.

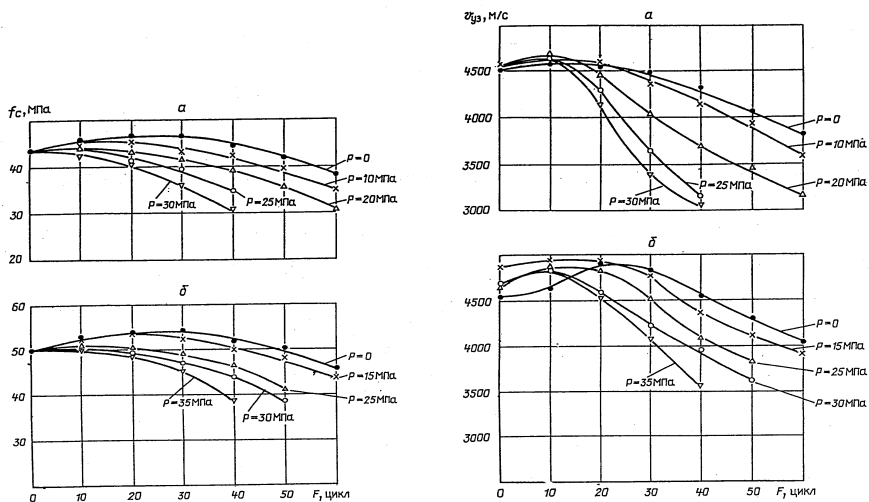


Рис 1. Тенденция изменения прочности и скорости ультразвука контрольных ( $P=0$ ) и основных образцов мелкозернистого бетона (а) и бетона со щебнем (б) под воздействием циклического замораживания-оттаивания в «среде-воде» при  $t = -(50...55)^\circ\text{C}$  и статической механической нагрузки

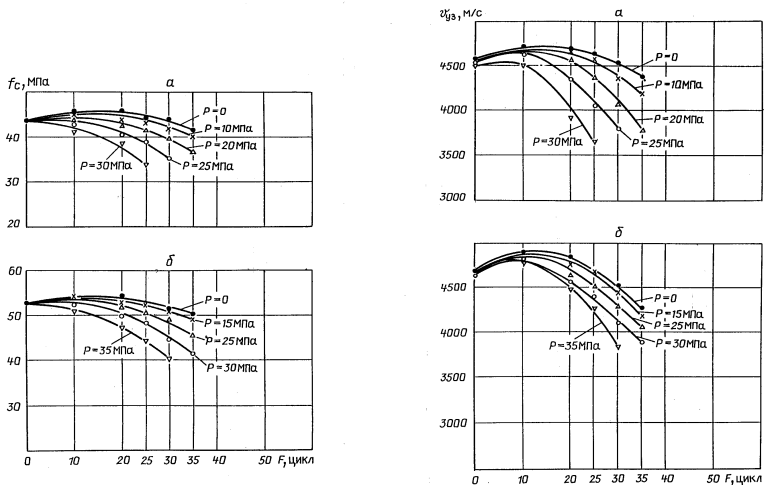


Рис 2. Тенденция изменения прочности и скорости ультразвука контрольных ( $P=0$ ) и основных образцов мелкозернистого бетона (а) и бетона со щебнем (б) под воздействием циклического замораживания-оттаивания в растворе соли при  $t = -(50...55) ^\circ\text{C}$  и статической механической нагрузки

Сопоставление данных воздействия на бетон эффектов «размораживания» и солевой коррозии в сочетании с механическими нагрузками показывает следующее.

Если статически приложенная нагрузка не превышает 40 % от проектной прочности бетона (уровень нижней границы трещинообразования), то при циклических испытаниях на морозостойкость (как в «среде-воде», так и в растворе соли) изменения в прочности бетона практически одинаковы для контрольных и нагружаемых образцов.

С ростом нагрузки до 50...60 % от проектной (в экспериментах до 20...25 МПа для мелкозернистого и до 25...30 МПа для бетона со щебнем), процесс его деструкции при циклических испытаниях на морозостойкость активизируется. В случае, когда механические нагрузки достигают уровня 65...75 % от проектной прочности бетона, т.е. соответствующего или превышающего верхнюю границу его трещинообразования (в экспериментах равнялась  $\sim 30$  МПа для

мелкозернистого и ~ 35 МПа для бетона со щебнем), процесс деструкции и снижения прочности бетона прогрессирует уже после 10...20 циклов замораживания-оттаивания (при ускоренном развитии процесса в растворе соли). Это связано с тем, что означенный уровень нагрузки приводит к образованию в объеме бетона «необратимо» раскрытых трещин, не исчезающих после снятия нагрузки. Они проницаемы для воды и растворенной в ней соли, что (в сочетании с разрушающими факторами циклического замораживания-оттаивания) приводит к ускоренной деструкции бетона и резкому снижению его прочности.

При испытаниях в солевом растворе подтверждено, что отрицательный эффект от ударных сосредоточенных динамических нагрузок соответствует уровню воздействия на бетон статических нагрузок, превышающих верхнюю границу его трещинообразования, включая снижение в 2...3 раза износостойчивости образцов бетона.

Выявленные по результатам исследований закономерности позволяют понять причины ускоренной деструкции бетона, подверженного в процессе эксплуатации комплексному воздействию среды, усиленному механическими нагрузками. Обобщение полученных данных дает основание для назначения предельных уровней нагрузок на бетон разнообразных покрытий, а также для установления требований к прочности бетона при их проектировании с учетом условий эксплуатации. Взаимосвязь изменений скорости ультразвука, отражающих изменения структуры бетона в процессе эксплуатации, создает необходимые предпосылки для разработки методики оперативного контроля (оценки) состояния и прогнозирования долговечности бетона покрытий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Горчаков Г.И., Капкин М.М., Скрамтаев Б.Г. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений. – М.: Стройиздат, 1965.- 195 с.
2. Дементьев Г.К. Условие долговечности бетона и железобетона. – Куйбышев: Куйбышевское книгоиздат, 1955.- 120 с.