



УДК 691.328.620.191.33

ДЕФОРМАЦИИ НАПРЯГАЮЩЕГО БЕТОНА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ЗАМОРАЖИВАНИИ И ОТТАИВАНИИ

Тур В.В.

Брестский государственный технический университет

Кардунян Г.С., Леонович С.Н., Аль – Факих Омар

Белорусская государственная политехническая академия

ВВЕДЕНИЕ

Для бетонов — композиционных материалов с разномодульными компонентами, многообразными формами микроконтактов в цементирующей матрице и макроконтактов с песком и щебнем, технологически возможно управляемое количественное формирование макроструктур с регулируемым уровнем конструктивных и капиллярно — поровых элементов — носителей физико — механических и физико — химических свойств. Такой структурный подход в бетоноведении создает условия для получения бетонов с заданными свойствами сопротивления силовым, тепловым и коррозионным воздействиям широкого диапазона. Переход в инженерной практике строительства на оценку физико — механических свойств бетона на основе структурных параметров, определяемых методами механики разрушения: G — энергии разрушения; K — структурного коэффициента интенсивности напряжений; J — джей — интеграла и т.п. воплощается в реальность. Наступает этап создания технических возможностей экспериментальных работ для стати-

Тур В.В. — д.т.н., профессор, зав. каф. ТБИСМ БГТУ

Кардунян Г.С. — к.т.н., доцент, докторант БГПА

Леонович С.Н. — д.т.н., доцент, зав. каф. ТСП БГПА

Аль-Факих Омар — аспирант БГПА

стического обоснования расчетных параметров G, K, J и разработки на этой основе методики проектирования составов бетона по инвариантным структурным параметрам его трещиностойкости как альтернативы подбору состава бетона по вариантной характеристике свойств прочности куба на сжатие [1,2,3].

При выборе методики климатических испытаний прежде всего должны учитываться типичные условия замораживания – оттаивания:

- замораживание на воздухе и оттаивание в воде бетона, имеющего различную исходную степень водонасыщения;
- замораживание и оттаивание при непрерывном капиллярном подсосе воды;
- замораживание при полном погружении в воду (вмерзание в лед) и оттаивание в воде [1,4].

Процессы замораживания и оттаивания бетона, обуславливающие его постепенное разрушение – снижение прочности – весьма многообразны. При нагревании и охлаждении компоненты бетона – цементный камень, заполнители и вода в его порах изменяют объем в соответствии с присущими каждому материалу коэффициентами температурной деформации. Различия в этих коэффициентах может служить одной из причин появления напряжений на поверхности контакта материалов. Однако основной причиной разрушения бетона принимается давление льда, образующегося с увеличением объема воды при фазовом переходе ее в лед или гидравлическое давление незамерзшей воды, отжимаемой льдом. Основанием для этого служит явная и твердо установленная зависимость степени разрушения от степени водонасыщения бетона [1,5,6,7,8].

Исследования процессов, происходящих при замораживании и оттаивании традиционных бетонов, механизмов их разрушения имеют уже более, чем вековую историю [2]. При этом выделено четыре основных вида процессов, протекающих при замораживании [1]:

- быстрое замораживание и оттаивание на воздухе разрушением бетона вследствие различий в коэффициентах температурного расширения; степень водонасыщения при этом недостаточна для проявления влияния фазового перехода воды в лед. В этих условиях правильнее говорить о термостойкости бетона;
- медленное односторонне замораживание бетона массивного сооружения и ограждающей конструкции: (при положительной температуре внутреннего помещения) с постепенным продвижением фронта вглубь бетона. В этих условиях основная причина разрушения – увеличение степени во-

донасыщения бетона вследствие миграции влаги к фронту промерзания и разрушение давлением льда или гидравлическим давлением воды, отжимаемой льдом;

– быстрое всестороннее замораживание бетона тонкостенных конструкций с образованием льда в поверхностных слоях, что приводит к «закупорке» воды внутри конструкции и при достаточно высокой степени водонасыщения – к разрушению бетона, проявляющемуся в шелушении поверхностных его слоев;

– одностороннее замораживание пористого материала, в котором возможна миграция в парообразном состоянии к холодной поверхности образование линз льда – аналогично процессу пучения грунтов.

В то же самое время исследования стойкости напрягающего бетона при воздействии циклического замораживания – оттаивания выполнялись в последние два десятилетия. Наиболее представительные исследования проведены А.И. Панченко [9]. Было испытано двенадцать различных типов бетона при варьировании прочности на сжатие от 20 до 55 МПа, расхода цемента от 230 до 500 кг/м³, водоцементного отношения от 0.72 до 0.38, а также при использовании трех видов цемента (портландцемент, пуццолановый портландцемент и шлакопортландцемент) и добавок (воздухововлекающей и расширяющей) в некоторые композиции. В диапазоне экспериментально определенной морозостойкости бетона (от F75 до F500) получена зависимость ее от коэффициента интенсивности напряжений, после первого цикла замораживания до -50°C и оттаивания:

$$F = 624.0 (\Delta Kc)^{-0.61}$$

которая напоминает формулу П. Париса.

Масштабные исследования морозостойкости напрягающего бетона, в том числе, с различными типами заполнителей выполнены Г.В. Несветаевым [10].

Стойкость бетона на напрягающем цементе с малой энергией самонапряжения (бетона с компенсированной усадкой) при знакопеременных температурных воздействиях, в том числе с позиций механики разрушения, всесторонне исследована А.И.Звездовым [11].

Тем не менее, теория морозостойкости напрягающего бетона должна содержать количественное описание возникновения и развития внутреннего разрушающего давления, соотнеся его с характеристиками трещиностойкости и прочности, опираясь на данные о структуре порового пространства.

1. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ НОРМАЛЬНОМ ОТРЫВЕ И ПОПЕРЕЧНОМ СДВИГЕ

В настоящей работе используется методика неравновесных испытаний для оценки коэффициентов интенсивности напряжений. Опытными образцами для определения K_{Ic} являются бетонные кубы с длиной ребра 150 мм с двумя надрезами-инициаторами трещины. Испытание указанных опытных образцов производится по схеме внецентренного сжатия в прессе с помощью двух опор из металлических брусков размером поперечного сечения 6 x 6 мм. Разрушение куба происходит неустойчиво по плоскости движущейся трещины между двумя надрезами.

Для определения трещиностойкости бетона при поперечном сдвиге принят образец в виде плиты с двумя параллельными искусственными трещинами, который испытывается на срез с помощью опор из металлических прокладок.

2. СОСТАВЫ БЕТОНА. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Испытания напрягающего бетона выполнялось в три этапа. На первом этапе производилось испытание лабораторных образцов кубов и пластин с надрезами для определения коэффициентов интенсивности напряжений при нормальном отрыве и поперечном сдвиге в обычных условиях и при циклическом замораживании и оттаивании (Состав 0). На втором этапе морозной деструкции подвергались лабораторные призмы из напрягающего бетона трех составов (составы 1,2,3), которые вначале испытывали на четырехточечный изгиб с получением характеристик бетона на растяжение. Затем полученные половинки призмы опиливали до кубов, устраивали необходимые надрезы и выполняли неравновесные испытания для расчета коэффициентов интенсивности напряжений при нормальном отрыве и поперечном сдвиге. Таким образом, на одном образце при механических испытаниях одновременно определялись прочностные, деформативные характеристики и параметры трещиностойкости (коэффициенты интенсивности напряжений). На третьем этапе комплексно исследовалась деструкция при знакопеременных температурных воздействиях напрягающего бетона, отобранного из различных конструкций на объектах внедрения.

Составы бетонов для изготовления опытных образцов приведены в табл.

1.

Составы бетонных смесей

Номер состава	Расход составляющих, кг на 1 м ³ бет. смеси				тол. стержня, см	R, МПа, в возрасте 1 сутки
	НЦ	П	Щ	В/Ц		
Состав 0	455	680	1120	0.4		
Состав 0	440	695	1130	0.4		
Состав 1	400	669	1214	0.38	1.0	20.1
Состав 2	500	620	1125	0.35	1.7	20.5
Состав 3	550	598	1085	0.35	2.0	23.7

Составы бетонных смесей для опытных образцов подобраны в Лаборатории самоупроченных конструкций БГТУ к.т.н. Кардумян Г.С.

В качестве сырьевых материалов для изготовления опытных образцов применяли:

Вяжущее – напрягающий цемент НЦ-20 и НЦ-40 Волковысского завода.

Мелкий заполнитель – песок кварцевый с $M_k=2,51$ Заславльского карьера.

Крупный заполнитель – щебень гранитный фр. 5-20 мм карьера Микашевичи.

Напрягающий цемент соответствовал ТУ РБ 02071613.183 –99 и характеризовался следующими параметрами:

– Линейное расширение (%) – 0.14;

– Самонапряжение (МПа) – 3.4;

– Прочность в возрасте 1 сутки (МПа) – 11.4 (при сжатии); 2.9 (при изгибе);

– Прочность в возрасте 28 суток (МПа) – 49 (при сжатии); 7.8 (при изгибе);

– Сроки схватывания (мин.) – начало – 55; конец – 125;

– Удельная поверхность – 3600 см²/г;

– Кнг – 0.25.

Образцы изготавливали в лабораторных условиях. Перемешивание осуществляли в лабораторной бетономешалке принудительного действия. Уплотнение образцов производили на лабораторной виброплощадке.

Перед испытаниями образцы выдерживались в течении 28 сут. в камере нормально-влажностного твердения.

3. МЕТОДИКА ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Испытания на стойкость при циклическом замораживании и оттаивании производятся в термобаровлагокамере. Опытные образцы перед низкотемпературными испытаниями в течение 96 часов насыщались в воде. Замораживание производится до достижения в центре образца температуры -50°C , оттаивание осуществляется на воздухе и в воде до температуры $+20^{\circ}\text{C}$. Для определения температуры в бетоне на различных этапах знакопеременных температурных испытаний установлены хромелькопелевые термопары, показания с которых снимаются автоматически потенциометром КСП-4.

Ускоренное разрушение достигалось замораживанием водонасыщенного бетона до температуры -50°C . Для оценки деструкции бетона при ЦЗО применяются ультразвуковой импульсный метод путем сквозного прозвучивания бетонных призм $100 \times 100 \times 400$ прибором «Бетон-12» и опытных образцов-кубов $100 \times 100 \times 100$ комплексом «Оса». Для оценки динамического модуля упругости бетона в процессе испытаний применялся резонансный метод.

4. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ БЕТОНА

Капиллярно-пористая структура бетона всех серий (контрольных и подвергнутых циклическому замораживанию-оттаиванию) исследуется по кинетике водопоглощения, в оптическом и сканирующем электронном микроскопах. Кроме того, применяется методика определения коэффициента диффузии хлор-ионов, основанной на взаимосвязи электропроводности бетона с характеристиками пористости и градиентами химического потенциала вещества.

На основе анализов структуры бетона получены исчерпывающие экспериментальные данные по интегральной и дифференциальной пористости бетона различных серий, что позволит представить ее в виде пятиуровневой соподчиненной системы, пригодной для расчета – прогноза долговечности бетона в соответствии с подходом [3].

5. МЕТОД ОЦЕНКИ МОРОЗНОЙ ДЕСТРУКЦИИ

ПО НАКОПЛЕНИЮ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Для оценки морозной деструкции по накоплению остаточных деформаций в стенку призмы со всех четырех граней замоноличивались специальные

репера. Показания фиксировались после каждого цикла замораживания – оттаивания, переносной мессурой на базе 300 мм с ценой деления 0.01мм.

Кроме того производился замер деформаций напрягающего бетона в замороженном состоянии.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

6.1. Кинетика водопоглощения

В процессе испытаний после каждого цикла замораживания – оттаивания производилось взвешивание образцов для оценки изменения водопоглощения в процессе испытаний. Данные по водопоглощению образцов сведены в табл. 2. Характер водонасыщения образцов напрягающего бетона отличается от других видов бетона. Степень его водонасыщения после 20 ускоренных циклов замораживания – оттаивания составляла 2.56 %, что выше, чем у бетона на портландцементе без добавок и с добавкой суперпластификатора С-3 (1.26 и 1.04 %), но ниже, чем у бетона, модифицированного воздухововлекающей добавкой (4.91 %).

Таблица 2

Водопоглощение образцов серии 0, скорость распространения ультразвукового импульса, динамический модуль упругости

Количество циклов	Водопоглощение % по массе	Скорость УЗИ, м/с	Ед, МПа
0	0.00	3289	35900
5	1.83	3413	37600
10	1.93	3484	39900
15	2.21	3448	38500
20	2.56	3509	39800
25	3.07	3484	28100
27	3.12	3448	22300

6.2. Скорость распространения ультразвука, динамический модуль упругости

Оценку морозной деструкции бетонов всех составов производили двояко: – образцов – кубов 100×100×100мм прибором ОСА, где контактной средой между датчиком и образцом была вода;

образцов – призм 100×100×400 мм методом сквозного продольного прозвучивания ультразвуковым прибором «Бетон – 12» с техническим вазелином в качестве контактной среды между датчиком и телом бетона.

За 20 ускоренных циклов замораживания-оттаивания скорость ультразвука, измеренная комплексом ОСА в бетонных образцах – кубах состава 0 изменилась с 3040 до 2850 м/с (снизилась на 6.3 %). Скорость ультразвука на тот же момент, определенная ультразвуковым прибором «Бетон – 12» на бетонных призмах 100×100×400 мм, возросла с 3831 до 4032 м/с (на 5.2 %), что соответствовало росту динамического модуля упругости бетона с 35900 до 39800 МПа. Далее динамический модуль упругости незначительно рос до 23 цикла, после чего начал резко снижаться (табл. 2).

6.3. Изменение прочности бетона в процессе циклического замораживания и оттаивания

В процессе циклического замораживания – оттаивания через определенное количество циклов производилась выемка опытных образцов серии 0, которые затем испытывались в прессе на осевое сжатие до разрушения для оценки прочности бетона на сжатие.

Таблица 3

Изменение прочности напрягающего бетона на сжатие при циклическом замораживании - оттаивании

Количество циклов замораживания-оттаивания	Прочность бетона на сжатие, МПа
0	49.7 / 1
10	49.75 / 1
15	60.5 / 1.22
20	56.0 / 1.13
25	51.2 / 1.03
27	47.4 / 0.96

Образцы – призмы серий 1, 2, 3 после определенного количества циклов испытывались на трехточечный изгиб с последующим расчетом прочности бетона на растяжение при изгибе R_{bt} .

Таблица 4

Количество циклов замораживания – оттаивания	Серия 1, R_{bf} , МПа	Серия 2, R_{bf} , МПа	Серия 3, R_{bf} , МПа
0	2.76/1	3.12/1	3.18/1
15	2.16/0.78	3.0/0.96	2.28/0.72
20	2.436/0.88	2.4/0.77	2.64/0.83
35	1.38/0.5	2.04/0.65	2.70/0.85
45	1.38/0.5	1.62/0.52	2.28/0.72

Характер изменения прочности бетона на сжатие при циклическом замораживании – оттаивании бетона на напрягающем цементе существенно отличается от бетонов на портландцементе, в том числе модифицированных суперпластификатором и воздухововлекающей добавкой [12]. После 15 ускоренных циклов замораживания – оттаивания прочность возросла с 49.7 до 60.5 МПа (на 22 %). После 25 циклов прочность на сжатие превышала начальную на 3 %, и только после 27 циклов произошло снижение прочности на 4 %.

Параметры прочности бетонов на растяжение при испытании на морозостойкость являются более чувствительными, чем прочность бетона на сжатие. Начальная прочность бетона серий 2 и 3 была выше прочности бетона серии 1 соответственно на 13 и 15.2 %, что связано с увеличением расхода цемента от 400 до 500 и 550 кг/м³ и снижением В/Ц с 0.38 до 0.35. Прочность бетона на растяжение при ЦЗО серий 1, 2, 3 снижается примерно одинаково, таким образом, что увеличение расхода цемента практически не сказалось на увеличении морозостойкости.

6.4. Коэффициенты интенсивности напряжений при нормальном отрыве и поперечном сдвиге при циклическом замораживании-оттаивании

В соответствии с вышеизложенной методикой через определенное количество циклов замораживания – оттаивания выполнялись механические испытания с последующим расчетом коэффициентов интенсивности напряжений при нормальном отрыве (K_I) и поперечном сдвиге (K_{II}).

Таблица 5

Коэффициенты интенсивности напряжений при нормальном отрыве и поперечном сдвиге различных бетонов при циклическом замораживании – оттаивании

Количество циклов	Серия 0 P_1/K_1 , МПа√м	Серия 0 P_{11}/K_{11} , МПа√м
0	32.13 1.03	137.3 16.75
10	36.88 1.18	134.2 16.4
15	35.32 1.13	131.0 15.98
20	37.2 1.19	132.5 16.16
25	34.4 1.10	124.0 15.12
27	33.2 1.06	110.0 13.42

Для расчета коэффициента интенсивности напряжений при нормальном отрыве по результатам неравновесных испытаний воспользуемся формулой, приведенной в ГОСТ 29167 – 91:

$$K_{Ic} = P/V\sqrt{d} [18.3 \lambda^{1/2} - 430\lambda^{3/2} + 3445\lambda^{5/2} - 11076\lambda^{7/2} + 12967\lambda^{9/2}] \quad (1)$$

где P – нагрузка, соответствующая динамическому началу движения магистральной трещины при неравновесных испытаниях, МН; V, d – размеры образцов; λ – относительная длина начального надреза.

Для расчета критического коэффициента интенсивности напряжений при поперечном сдвиге воспользовались предложением J. Watkins [8]

к Mode II:

$$K_{IIc} = 5 \times 11 P\sqrt{a} / 2Vd \quad (2)$$

где P – нагрузка, соответствующая началу движения магистральной трещины из иницирующей трещины при неравновесных испытаниях, МН; b – высота образца под иницирующей трещиной, м; V – толщина образца, м; a – длина иницирующей трещины в образце, м.

Характер изменения параметров трещиностойкости в ходе циклического замораживания – оттаивания представлен на рис. 1

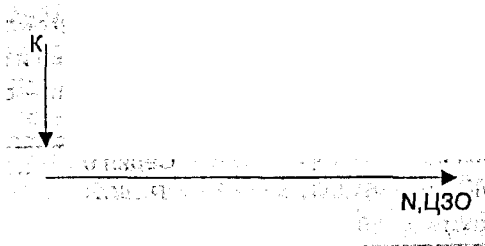


Рис. 1. Характер изменения коэффициентов интенсивности напряжений при нормальном отрыве и поперечном сдвиге в зависимости от количества циклов замораживания-оттаивания.

6.5. Характеристики поровой структуры бетонов и ее влияние на долговечность при циклическом замораживании-оттаивании

Капиллярно-пористая структура бетона всех серий (контрольных и подвергнутых циклическому замораживанию-оттаиванию) исследована по кинетике водопоглощения, в оптическом и сканирующем электронном микроскопах, по коэффициенту диффузии хлор-ионов. На основе анализов структуры бетона получены исчерпывающие экспериментальные данные по интегральной и дифференциальной пористости бетона различных серий.

6.6. Остаточные деформации и деформации напрягающего бетона при отрицательных температурах

Остаточные деформации деструктивного расширения интегрально характеризуют степень накопления повреждений при циклическом замораживании - оттаивании. Все составы (1, 2, 3) имеют значительный конструктивный период (от 25 до 47 ускоренных циклов), что свидетельствует о значительной потенции к сопротивлению морозному воздействию этих бетонов (рис. 2).

Приняв во внимание более ранние исследования морозостойкости бетона по накоплению остаточных деформаций [1, 4, 6] и предлагаемый количественный деформационный критерий 100×10^{-5} , соответствующий примерно 15 %-ному снижению прочности на сжатие, можем заключить, что исчерпание стойкости при цзо для составов 1 и 2 произойдет после 50-ти ускоренных циклов, в то время как бетон составав 3 находится еще в конструктивном периоде. Вероятно, это связано с формированием структуры бетона состава 3 с более высоким уровнем активных сил, созданных физическими, химическими и адгезионными процессами в результате гидратации вяжуще-

го (НЦ), расход которого был выше, чем в составах 2 и 1. Анализ деформаций замороженных образцов свидетельствует о напряженно-деформированной состоянии бетона при ЦЗО (рис.3).

ВЫВОДЫ

Комплексные экспериментальные исследования позволили установить многопараметричную (по прочности на сжатие и растяжение, динамическому модулю упругости, остаточным и криогенным деформациям, критическим коэффициентам интенсивности напряжений при нормальном отрыве и поперечном сдвиге) картину криогенной деструкции напрягающего бетона. Произведена экспериментальная проверка теоретических расчетов-прогнозов долговечности бетонов различной структуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.М. МОСКВИН, Ф.М. ИВАНОВ, С.Н. АЛЕКСЕЕВ, Е.А. ГУЗЕЕВ. – М.: Стройиздат, 1980. – 536с.
2. ГУЗЕЕВ Е.А., ПИРАДОВ К.А., ЛЕОНОВИЧ С.Н. Механика разрушения и эволюция взглядов на проблему термовлагодостойкости бетона. // Механика разрушения материалов и прочность конструкций (выпуск 2) / Под общ. Ред. Панасюка В.В. – Львов: Каменяр, 1999. – Т.3.- с.206 – 208.
3. ГУЗЕЕВ Е.А., ЛЕОНОВИЧ С.Н., ПИРАДОВ К.А. Механика разрушения бетона: вопросы теории и практики. Брест: БПИ, 1999.-216с.
4. ЛЕОНОВИЧ С.Н. Долговечность центрифугированных железобетонных конструкций при циклическом замораживании и оттаивании // Бетон и железобетон. – № 10, 1988, с.40 – 42.
5. ПОДВАЛЬНЫЙ А.М. О собственных напряжениях, возникающих в замораживаемом бетоне // Инженерно – физический журнал. – 1973.- т.15. № 2.
6. ИВАНОВ Ф.М., ЗИКЕЕВ Л.Н., ЛЕОНОВИЧ С.Н. Структура и морозостойкость центрифугированного бетона с добавками // Исследование и применение химических добавок в бетонах: Сб. Тр. /Под ред. В.Г. Батракова, В.Р. Фаликмана. – М.: НИИЖБ, 1989. – с.59 – 66.
7. ЛЕОНОВИЧ С.Н. Трещиностойкость и долговечность бетонных и железобетонных элементов в терминах силовых и энергетических критериев механики разрушения.-Минск: Тьдзень, 1999.-266с.

8. ЛЕОНОВИЧ С.Н. Гипотезы морозной деструкции и механика разрушения бетона // Эффективные железобетонные конструкции: Сб. Тр. Юбилейной конференции ПГУ. ПГУ:Новополоцк
9. Panchenko A.I. Frost Failure and Rapid Method of Concrete Frost Resistance. Frost Resistance of Concrete, edited by M.J. Setzer and
10. R. Auberg, E & FN Spon. – London, 1997. – P. 299 – 306.
11. Несветаев Г. В. Закономерности деформирования и прогнозирование стойкости бетонов при силовых и температурных воздействиях // Диссертация на соискание степени д. т. н. Спец. 05.23.05. – Ростов-на-Дону, 1998. – 347 с.
12. Zvezdov A.I., Budagiants I.I., Krylov B.A. New Generation of Concretes with Stressing Cement of Low Expansion Energy // Concrete for Infrastructure and Utilities, Edited by R K Dhir and N A Henderson, E @ FN Spon. – London, 1996. – P. 297 – 304.
13. ЛЕОНОВИЧ С.Н., АЛЬ – ФАКИХ ОМАР, ПОЛЕЙКО Н.Л., КОВШАР С.Н. Особенности морозной деструкции бетонов различной структуры // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: Сб. Тр./ Под ред. Блещика Н.П., Борисевича А.А., Пецольда Т.М.- Мн.: Технопринт, 2001. – с. 504 – 520.