

УДК 693.9:699.841

**О ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ УРОВНЯХ
ОБЛАСТЕЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БЕТОНА
В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ (ДО -70°C) ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР**

**ON PARAMETRIC LEVELS
OF STRESS-STRAIN STATE AREAS OF CONCRETE
AT LOW (UP TO -70°C) NEGATIVE TEMPERATURES**

В.Н. ЯРМАКОВСКИЙ
V.N. YARMAKOVSKY

(Научно-исследовательский институт строительной физики
Российской академии архитектуры и строительных наук)
(Research Institute of Building Physics of the Russian
Academy of Architecture and Construction Sciences)
E-mail: yarmakovsky@yandex.ru

Приведены результаты исследований по влиянию воздействия низких отрицательных температур (до -70°C) на параметрические уровни областей напряженно-деформированного состояния при осевом сжатии тяжелого бетона классов по прочности на сжатие В30 и В40, в частности, нижней и верхней границ областей его микротрещинообразования. Выполнена оценка степени влияния на этот процесс структурно-технологических характеристик бетона. Определена значимость использования полученных

результатов в практике проектирования железобетонных конструкций, предназначенных для эксплуатации в суровых климатических условиях.

The results of studies on the effect of low negative temperatures (up to -70°C) on the parametric levels of the stress-strain state areas under axial compression of heavy concrete of the compression strength classes B30 and B40, in particular, on the lower and upper limits of its microcracking areas are presented. The degree of influence on this process of structural and technological characteristics of concrete is estimated. The importance of the results obtained in the design of reinforced concrete structures intended for operation in harsh climatic conditions is determined.

Ключевые слова: бетон, микротрещинообразование, параметрические уровни, напряжения, деформации, отрицательные температуры, прочность.

Keywords: concrete, microcracking, parametric levels, stress, strain, negative temperature, strength.

Анализ работ, посвященных решению проблемы обеспечения долговечности бетона в конструкциях инженерных сооружений, эксплуатирующихся в суровых климатических условиях [1], [2], показывает следующее: недостаточно ограничиться использованием в практике проектирования таких конструкций исследований по влиянию отрицательных температур на основные прочностные и деформативные характеристики бетонов, только нормируемые Сводом правил СП63.13330.2012 "Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01–2003".

Следует обратиться к работам отечественных исследователей научной школы О.Я. Берга [5], а также Е.А. Гузеева, С.Н. Леоновича [6], Ю.В. Зайцева [7] и других, к работам зарубежных исследователей [8], [9], развивающих теорию механики разрушения под нагрузкой конструкционных бетонов и, в частности, последовательного микротрещинообразования при поэтапном нагружении бетона осевым сжатием, а также к работам школы В.М. Москвина по механизму морозного разрушения бетона [2] и по влиянию напряженного состояния бетона на его морозостойкость [10].

Анализ результатов вышеперечисленных работ приводит к следующему выводу: при расчете и проектировании железобетонных конструкций, предназначенных для

эксплуатации в суровых климатических условиях, следует принимать во внимание особенности работы их в сложном напряженно-деформированном состоянии при одновременном воздействии отрицательных температур и силовых нагрузок. В связи с этим следует использовать в качестве расчетных характеристик бетона наряду с нормативными по СП прочностные характеристики поэтапного разрушения бетона под нагрузкой осевого сжатия, соответствующие параметрическим уровням областей напряженно-деформированного состояния бетона в условиях воздействия низких отрицательных температур.

В соответствии с изложенным в настоящей работе поставлена цель исследовать влияние низких отрицательных температур на следующие характеристики параметрических уровней областей напряженно-деформированного состояния бетона при нагружении его осевым сжатием, а именно:

- нижнюю границу области образования микротрещин $\sigma = R^0_T$, определяемую величиной напряжения сжатия, при которой начинается интенсивное развитие "микротрещин зоны сцепления" затвердевшей растворной части бетона с крупным заполнителем; эта граница определяет зону развития частично обратимых микротрещин и зону линейной ползучести бетона; из работы О.Я. Берга [5] следует, что эта граница соответствует пределу выносливости бе-

тона при действии многократно повторяющихся нагрузок осевого сжатия;

- верхнюю границу области образования микротрещин $\sigma = R^v_T$, определяемую величиной напряжения сжатия, при которой начинается процесс развития микротрещин в цементном камне, соединение их с так называемыми "трещинами сцепления" и образование таким образом непрерывных или "магистральных" (по Ю.В. Зайцеву [7]) трещин с развитием псевдопластических деформаций бетона, приводящих к его разрушению; из работы О.Я. Берга [5] следует, что эта граница соответствует пределу длительной прочности бетона при действии нагрузок осевого сжатия.

Рассмотрим методику и результаты исследований параметрических уровней напряжений, соответствующих нижней и верхней границам области микротрещинообразования бетона при действии низких отрицательных температур.

В настоящей работе параметрические точки уровней напряжений, соответствующих нижней $\sigma = R^0_T$ и верхней $\sigma = R^v_T$ границам области микротрещинообразования бетона, определяли при испытании образцов-призм размерами 15×15×60 см, изготовленных из тяжелого бетона классов по прочности на сжатие В30 и В40 при величинах соответственно В/Ц = 0,5 и В/Ц = 0,4. Бетонные образцы через 4 ч после формирования и тепловлажностной обработки выдерживали в камере нормально-влажностного твердения. Затем образцы разделяли на группы по влажности: от естественной влажности ($W_1 = 3,30\%$ при В/Ц = 0,5 и $3,12\%$ при В/Ц = 0,4) до промежуточной исходной влажности, полученной при насыщении бетонных образцов в емкости с водой ($W_2 = 4,38\%$ и $W_3 = 5,06\%$ при В/Ц = 0,5), и до максимальной влажности, полученной при водонасыщении бетонных образцов под вакуумом ($W_4 = 5,35\%$ при В/Ц = 0,5 и $W_5 = 5,20\%$ при В/Ц = 0,4).

Первую серию образцов-призм при различной исходной влажности испытывали на гидравлическом прессе, смонтированном в климатической термокамере, на осевое сжатие при обычных температурах (20 ± 2) °С, а вторая серия – в замороженном до температуры -70°С

состоянии. Образцы-призмы нагружали осевым сжатием поэтапно, через ступень в $0,1R_{пр}$, с выдержкой на каждой ступени 5 мин для выявления пластических деформаций бетона после ступени $0,2...0,3 R_{пр}$. На каждой ступени нагружения определяли продольные и поперечные деформации бетона и скорость прохождения ультразвуковых волн, по результатам обработки этих данных определяли параметрические уровни областей напряженно-деформированного состояния бетона. Образцы доводились до разрушения с измерением призмочной прочности бетона.

Результаты определения влияния отрицательных температур на параметрические уровни напряженно-деформированного состояния бетона, соответствующие нижней и верхней границам области микротрещинообразования получены следующим образом.

Параметрические уровни процесса деформирования бетона определяли:

- соответствующие нижней границе области микротрещинообразования – уровнем напряжений осевого сжатия ($\sigma/R_{пр} = R^0_T$), при котором скорость прохождения ультразвуковых волн через поперечное сечение образца достигала максимальной величины;

- соответствующие верхней границе области микротрещинообразования – уровнем напряжений осевого сжатия ($\sigma/R_{пр} = R^v_T$), при котором величина дифференциального коэффициента поперечной деформации бетона $\Delta v = \Delta \epsilon_{поп} / \Delta \epsilon_{прод}$ (где $\Delta \epsilon_{поп}$ – приращение поперечных деформаций бетонного образца, а $\Delta \epsilon_{прод}$ – продольных деформаций на каждой ступени нагружения осевым сжатием) достигала значения 0,5.

Результаты проведенных испытаний, представленные в табл. 1 (прочностные характеристики областей напряженно-деформированного состояния бетона при положительных и отрицательных температурах), свидетельствуют о том, что замораживание бетона исследуемых составов с определенным диапазоном его влажности приводит к увеличению исследуемых прочностных характеристик областей напряженно-деформированного состояния бетона.

В/Ц	W _i , %	Характеристики бетона					
		R _{пр} , МПа		R ⁰ _Т , МПа		R ^v _Т , МПа	
		Температура бетона, °С					
		+ 20	- 65	+ 20	- 65	+ 20	- 65
0,5	W ₁ = 3,30	24,12	28,64	8,92	10,69	18,44	22,07
	W ₂ = 4,38	22,07	35,5	8,63	14,12	17,26	28,44
	W ₃ = 5,06	20,7	41,19	8,04	16,67	16,57	34,62
	W ₄ = 5,35	20,2	38,80	8,24	15,3	15,98	29,22
0,4	W ₁ = 3,12	28,64	33,73	10,98	12,85	22,36	26,77
	W ₂ = 4,05	25,6	40,4	10,3	17,36	20,0	32,75
	W ₃ = 4,90	24,32	46,0	9,8	17,85	19,22	37,56
	W ₄ = 5,11	23,54	49,52	10,4	19,81	18,14	35,7
	W ₅ = 5,20	23,34	33,34	10,0	16,67	18,24	22,75

П р и м е ч а н и е. R_{пр}, R⁰_Т, R^v_Т – величины напряжений осевого сжатия, определяющие соответственно призменную прочность, нижнюю и верхнюю границы области микротрещинообразования бетона при указанной температуре испытания его под нагрузкой сжатия; W_i – массовое отношение влаги (влажность бетона) i-й группы водонасыщения.

Так, в бетоне, испытываемом под нагрузкой сжатия в замороженном состоянии, по сравнению с бетоном, испытываемом при положительных температурах, наблюдается следующее.

Увеличиваются напряжения, соответствующие нижней и верхней границам области микротрещинообразования бетона $\sigma_1 = R^0_T$ и $\sigma_2 = R^v_T$, причем в большей степени, чем выше его исходная (к началу испытаний под нагрузкой) влажность в диапазоне W₁-W₃ для В/Ц = 0,5 и в диапазоне W₁-W₄ для В/Ц = 0,4. При значениях влажности W₄ (для В/Ц = 0,5) и W₅ (для В/Ц = 0,4), которые превышают предельную величину W_{пр}, соответствующую предельной степени водонасыщения пор и капилляров бетона $\omega_v = 90\%$, наблюдается обратная картина: величины R⁰_Т и R^v_Т резко снижаются, особенно величина R^v_Т. Обусловлено это превышением степени водонасыщения бетона ω_v предельной величины ($\omega_v = 90\%$), когда при фазовом переходе воды в лед развивается избыточно высокое гидравлическое давление. При этом происходит образование микротрещин в стенках этих пор и капилляров, приводящих к их дальнейшему разрушению. Механизм такого типа морозного разрушения бетона описан в работе [10], в которой впервые предложен метод расчета железобетонных конструкций повышенной морозостойкости.

Если принять во внимание данные работ [2], [7...9], посвященных исследованию механизма разрушения бетона под нагрузкой, то наблюдаемое изменение при его замораживании прочностных характеристик областей напряженно-деформированного состояния бетона, в том числе в сравнении с изменением традиционной призменной прочности может свидетельствовать об отдалении в сторону более высоких напряжений сжатия:

- начала интенсивного развития микротрещин на поверхности раздела цементно-песчаного камня и крупного заполнителя ("микротрещин зоны сцепления" [2], [7], или "bond cracks" [8], [9]);

- в еще большей степени – начала развития микротрещин непосредственно в цементно-песчаном камне, соединения с последними "микротрещин зоны сцепления" и образования таким образом сети "непрерывных трещин" [2], или "continuous cracks" [8], [9], переходящих в магистральные (по Ю.В. Зайцеву [7]);

- того момента, когда сеть "непрерывных микротрещин" охватывает всю структуру бетона и происходит потеря его несущей способности.

Таким образом, последнее может означать, что условный путь от интенсивного развития "микротрещин зоны сцепления"

до соединения их с микротрещинами в цементно-песчаном камне и образования таким образом сети "непрерывных трещин" увеличивается.

Следует заметить, что увеличение указанных прочностных характеристик замораживаемого бетона наблюдается тем в большей степени, чем не только выше его влажность при условии $W < W_{пр}$, но и чем меньше величина $В/Ц$, способствующая образованию более благоприятной дифференциальной пористости цементного камня, а именно – с меньшим объемом пор-капилляров и соответственно с большим объемом замкнутых пор геля, причем меньшего диаметра в сравнении со структурой цементно-песчаного камня бетона с более высоким $В/Ц$.

Влияние фактора водоцементного отношения на изменение всех исследованных прочностных и деформативных характеристик замораживаемого бетона с влажностью больше предельной выражено в существенно меньшей степени, чем это наблюдается при замораживании бетона с влажностью меньше предельной.

ВЫВОДЫ

Использование в расчетах железобетонных конструкций по предельным состояниям полученных в результате проведенных исследований характеристик параметрических уровней областей напряженно-деформированного состояния бетона, в частности, нижней и верхней границ области микротрещинообразования бетона под нагрузкой осевого сжатия в условиях воздействия низких отрицательных температур, влияния при этом структурно-технологических факторов позволяет проектировать такие конструкции, предназначенные для строительства в суровых климатических условиях, с учетом необходимости обеспечения их долговечности и надежности при эксплуатации при таких условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Гузеев Е.А. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. – М.: Стройиздат, 1980.

2. Москвин В.М., Капкин М.М., Савицкий А.Н., Ярмаковский В.М. Бетоны для строительства в суровых климатических условиях. – Л.: Стройиздат, 1973.

3. Горчаков Г.И., Капкин М.М., Скрамтаев Б.Г. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений. – М.: Стройиздат, 1965.

4. Берг О.Я. О предельном состоянии железобетонных конструкций по долговечности бетона // Бетон и железобетон. – 1964. № 11. С.4...10.

5. Берг О.Я., Щербakov Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон. – М.: Стройиздат, 1971.

6. Гузеев Е.А., Леонович С.Н., Пирадов К.А. Механика разрушения бетона: вопросы теории и практики. – Брест: БПИ, 1999.

7. Зайцев Ю.В., Леонович С.Н. Прочность и долговечность конструкционных материалов с трещиной. – Минск, БНТУ, 2010.

8. Hsu T.C., Slate F.O., Sturman G.M., Winter G. Microcracking of Plain Concrete and the Shape of Stress-strain Curve // JACI. – V.60, № 2, 1963.

9. Shah S.P., Chandra S. Critical Stress, Volume Change and Microcracking of Concrete // JACI. – V. 65, № 9, 1968.

10. Ярмаковский В.Н. О методе расчета железобетонных конструкций повышенной морозостойкости // Сб. тр. НИИЖБ: Повышение стойкости бетона и железобетона при воздействии агрессивных сред. – М.: Стройиздат. 1975. С. 34...38.

REFERENCES

1. Moskvin V.M., Ivanov F.M., Alekseev S.N., Guzeev E.A. Korroziya betona i zhelezobetona, metody ih zashity. – M.: Strojizdat, 1980.

2. Moskvin V.M., Kapkin M.M., Savickij A.N., Yarmakovskij V.M. Betony dlya stroitelstva v surovyyh klimaticheskikh usloviyah. – L.: Strojizdat, 1973.

3. Gorchakov G.I., Kapkin M.M., Skramtaev B.G. Povyshenie morozostojkosti betona v konstrukciyah promyshlennyh i gidrotehnicheskikh sooruzhenij. – M.: Strojizdat, 1965.

4. Berg O.Ya. O predelnom sostoyanii zhelezobetonnnyh konstrukcij po dolgovechnosti betona // Beton i zhelezobeton. – 1964. № 11. S.4...10.

5. Berg O.Ya., Sherbakov E.N., Pisanko G.N. Vysokoprochnyj beton. – M.: Strojizdat, 1971.

6. Guzeev E.A., Leonovich S.N., Piradov K.A. Mehanika razrusheniya betona: voprosy teorii i praktiki. – Brest: BPI, 1999.

7. Zajcev Yu.V., Leonovich S.N. Prochnost i dolgovechnost konstrukcionnyh materialov s treshinoj. – Minsk, BNTU, 2010.

8. Hsu T.C., Slate F.O., Sturman G.M., Winter G. Microcracking of Plain Concrete and the Shape of Stress-strain Curve // JACI. – V.60, № 2, 1963.

9. Shah S.P., Chandra S. Critical Stress, Volume Change and Microcracking of Concrete // JACI. – V. 65, № 9, 1968.

10. Yarmakovskij V.N. O metode rascheta zhelezobetonnnyh konstrukcij povyshennoj morozostojkosti // Sb. tr. NIIZhB: Povyshenie stojkosti betona i zhelezobetona pri vozdejstvii agressivnyh sred. – M.: Strojizdat. 1975. S. 34...38.

Рекомендована Ученым советом. Поступила 22.06.18.