

ОЦЕНКА СТОЙКОСТИ БЕТОНА К ВОЗДЕЙСТВИЮ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР НА ОСНОВЕ ГОСТ 29167-2020

С. Н. Леонович¹, Д. А. Литвиновский², Н. А. Будревич³

¹ Д. т. н., профессор, декан строительного факультета БНТУ, Минск, Беларусь, e-mail: leonovichsn@tut.by

² Главный инженер ООО «ИнжСпецСтройПроект», Минск, Беларусь, e-mail: 7200743@gmail.com

³ Инженер научно-исследовательской лаборатории промышленного и гражданского строительства, аспирант кафедры «Строительные материалы и технология строительства» БНТУ, Минск, Беларусь, e-mail: nellibudrevich@yandex.by

Реферат

На основе анализа экспериментальных исследований предложены критерии хрупкости для высокопрочного бетона при высоких температурах и рекомендованы их пороговые значения, которые определяются по разработанной методике для бетона при $t = 20^\circ\text{C}$. Критерии хрупкости для высокопрочного бетона при высоких температурах для эксплуатируемых конструкций определяются на основе зависимости E и K_{IC} от поверхностной твердости H . На основании полученных экспериментальных данных предложено значение поверхностной твердости (при $t = 20^\circ\text{C}$) высокопрочного бетона $H > 450$ МПа, при нагреве которого будет происходить хрупкое разрушение.

Ключевые слова: высокопрочный бетон, хрупкость, трещиностойкость, предел прочности, вязкость разрушения, стойкость, высокие температуры.

ASSESSMENT OF CONCRETE RESISTANCE TO HIGH TEMPERATURES BASED ON STATE STANDARD 29167-2020

S. N. Leonovich, D. A. Litvinovsky, N. A. Budrevich

Abstract

On the basis of the analysis of experimental studies, brittleness criteria for high-strength concrete at high temperatures are proposed and their threshold values are recommended, which are determined by the developed method for concrete at $t = 20^\circ\text{C}$. The brittleness criteria for high-strength concrete at high temperatures for operating structures are determined on the basis of the dependence of E and K_{IC} on the surface hardness H . Based on the experimental data obtained, the value of the surface hardness (at) of high-strength concrete $H > 450$ MPa is proposed, when heated, brittle fracture will occur.

Keywords: high-strength concrete, fragility, crack resistance, ultimate strength, fracture toughness.

Для анализа хрупкости бетонов обычной прочности в настоящее время используют формулу Жукова В. В. для расчета хрупкого разрушения F :

$$F = \frac{\alpha_F \alpha_M \beta}{K_{IC} \lambda_k} \cdot \frac{E \rho_0 W_3}{n_p} \quad (1)$$

где α_F – коэффициент пропорциональности:

$$\alpha_F = 1,16 \cdot 10^{-2} Bm \cdot M^{5/2} \cdot K_2^{-1};$$

α_{ue} – коэффициент температурной деформации расширения

бетона, $^\circ\text{C}^{-1}$;

λ_k – коэффициент теплопроводности бетона, Вт/(м·°C);

β – коэффициент изменения модуля упругости бетона при нагреве;

E – модуль упругости бетона при нормальных условиях, МПа;

ρ_0 – плотность бетона в сухом состоянии, кг/м³;

n_p – общая пористость бетона, %;

K_{IC} – критический коэффициент интенсивности напряжения, МН/м^{3/2};

W_3 – объемная эксплуатационная влажность бетона, м³/м³;

□ – текущие значения Литвиновского Д. А., Леоновича С. Н.;

△ – параметры Жукова В. В. [1, 2].

Критерий хрупкости F на основе текущих (для температур 20, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 °C) значений K_{IC} , E , ρ_0 , W_3 , n_p , полученных автором экспериментально, графически представлен на рисунке 1.

На основе анализа экспериментальных исследований предложены критерии хрупкости для высокопрочного бетона при высоких температурах и рекомендованы их пороговые значения (таблица 1), которые определяются по разработанной методике для бетона при $t = 20^\circ\text{C}$.

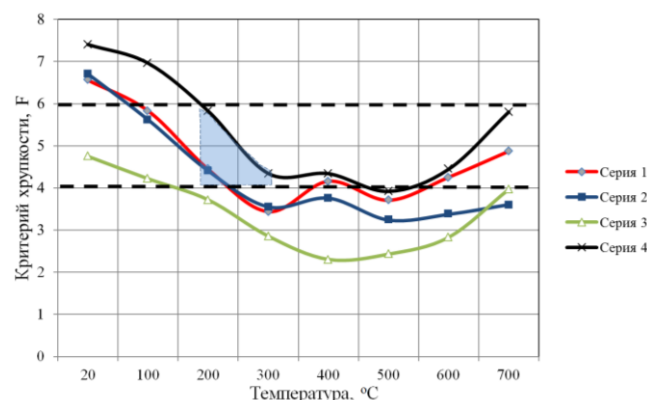


Рисунок 1 – Значения критерия хрупкости F для серий бетонных образцов 1, 2, 3, 4 [1, 2]

Таблица 1 – Рекомендуемые значения критериев хрупкости при нормальной температуре (при $t = 20^\circ\text{C}$)

K_{IC} , МН/м ^{3/2}	G_i , Н/м	l_{ch} , м
>0.8	>14	≈0.03

Значения критериев коэффициента интенсивности напряжения K_{IC} , энергия разрушения, критическая длина трещины определяются по формулам (2, 3, 4):

$$K_{IC} = \frac{F_c}{b \cdot h^{3/2}} \left[\begin{array}{l} 18,3 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^{1/2} - 430 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^{3/2} + 3445 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^{5/2} - \\ - 11076 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^{7/2} + 12967 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^{9/2} \end{array} \right], \quad (2)$$

$$G_i = \frac{K_{IC}^2}{E}, \quad (3)$$

$$l_c = \frac{G_i E}{f_{ctm}^2}, \quad (3)$$

где F_c – нагрузка, при которой происходит разрушение образца;
 E – модуль упругости,
 f_{ctm} – прочность бетона на растяжение.

Для эксплуатируемых конструкций разработана специальная комплексная многопараметричная методика на основе испытания бетона методом упругого отскока (прибор ИМ-1Б). Прибор ИМ-1Б внедрен автором на базе НИЛ ПГС БНТУ с лабораторией контактно-динамических методов контроля Института прикладной физики НАН Беларуси и внесен в реестр средств измерений.

Критерии хрупкости для высокопрочного бетона при высоких температурах для эксплуатируемых конструкций определяются на основе зависимости E и K_{IC} от поверхностной твердости H (рисунок 2) [1, 2].

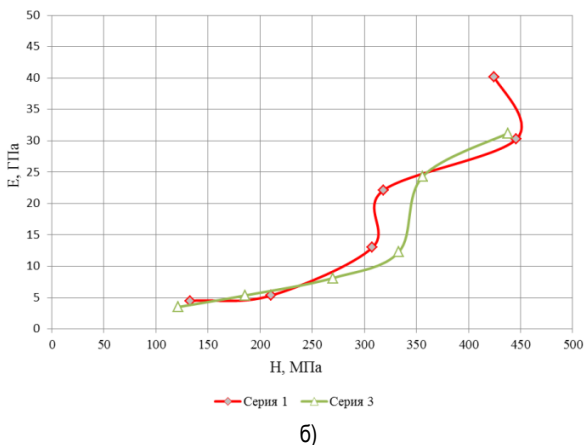
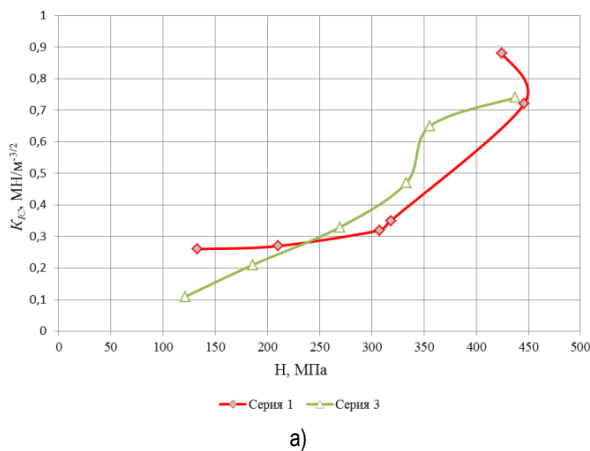


Рисунок 2 – Зависимость модуля упругости E (а) и K_{IC} от поверхностной твердости H (б)

На основании полученных экспериментальных данных предложено значение поверхностной твердости (при $t = 20^\circ\text{C}$) высокопрочного бетона $H > 450$ МПа, при нагреве которого будет происходить хрупкое разрушение.

Рассмотрены результаты экспериментальных исследований высокопрочного сталефибробетона, подвергнутого высокотемпературному нагреву. Дисперсное армирование в экспериментальных исследованиях существенно повлияло только на коэффициент интенсивности напряжений при поперечном сдвиге.

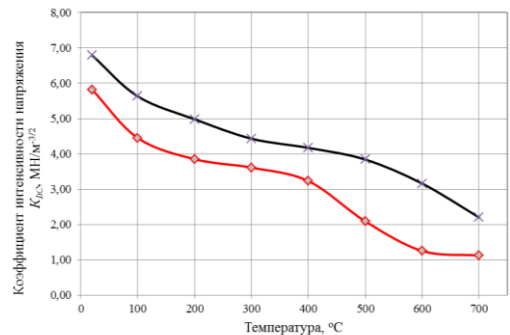
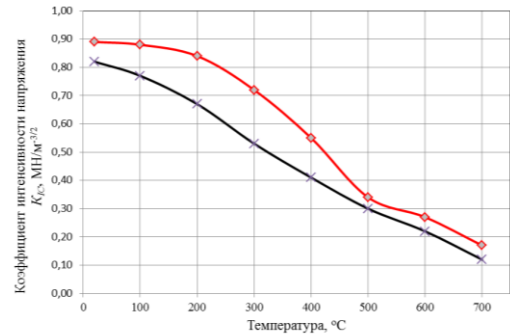


Рисунок 3 – Изменение коэффициентов интенсивности напряжения при нормальном отрыве K_{IC} (а) и поперечном сдвиге K_{IC} (б) высокопрочного бетона (серия 1) и сталефибробетона (серия 4)

Критерии хрупкости для высокопрочного бетона при высоких температурах для эксплуатируемых конструкций определяются на основе зависимости E и K_{IC} от поверхностной твердости H (рисунок 3) [1, 2].

Разработанный межгосударственный стандарт ГОСТ 29167-2020 «Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении» [7] распространяется на бетоны всех видов, применяемых в строительстве, и устанавливает методы их испытаний для определения силовых и энергетических характеристик трещиностойкости при статическом кратковременном нагружении.

Устанавливаются методы определения характеристик трещиностойкости путем равновесных и неравновесных механических испытаний.

Равновесные испытания на стадии локального деформирования образца характеризуются обеспечением адекватности изменения внешних сил внутренним усилиям сопротивляемости материала с соответствующим статическим развитием магистральной трещины.

Неравновесные испытания характеризуются потерей устойчивости процесса деформирования образца в момент локализации деформации по достижении максимальной нагрузки, с соответствующим динамическим развитием магистральной трещины.

Для определения характеристик трещиностойкости испытывают образцы с начальным надрезом. При равновесных испытаниях

записывают диаграмму $F - V$; при неравновесных испытаниях фиксируют значение F_c^* .

Допускается проведение равновесных испытаний с фиксацией текущих размеров развивающейся магистральной трещины (a_{ij}) и соответствующих значений прикладываемой нагрузки (F_{ij}).

По результатам испытаний определяют следующие основные силовые – в терминах коэффициентов интенсивности напряжений (K), энергетические – в терминах удельных энергозатрат (G) и джей-интеграла (J) характеристики трещиностойкости: K_C , K_C^* , K_i , G_F , G_i , G_{ce} , J_i , χ_F^c .

Новым в актуальной редакции ГОСТ 29167 является то, что определяемые по настоящему стандарту характеристики трещиностойкости (наряду с другими характеристиками механических свойств) применяют для оценки стойкости к воздействию высоких температур, используя силовые критерии механики разрушения – коэффициенты интенсивности напряжений при нормальном отрыве K_{IC} .

Предлагаемый подход состоит в следующем:

1. Определяется K_{IC} бетона призмы по равновесной схеме [6, 7].
2. Полученные в процессе равновесных исследований две половинки призмы надрезаются по середине и испытываются по неравновесной схеме (рис. 4) с расчетом K_{IC} [3, 4, 5].
3. Получившиеся при испытаниях 4 кубика 100x100x100 мм надрезаются с двух сторон. В результате испытаний на нормальный отрыв получаем четыре значения K_{IC} [6, 7].
4. Полученные при фрагментации 4 кубов 8 бетонных пластин 100x100x50 мм испытываются по схеме (рис. 5), производится расчет восьми значений K_{IC} [3, 4, 5].

Внесение в ГОСТ 29167-2020 метода отрыва со скалыванием (рис. 6) определять коэффициент интенсивности напряжений при нормальном отрыве бетона эксплуатируемых конструкций.

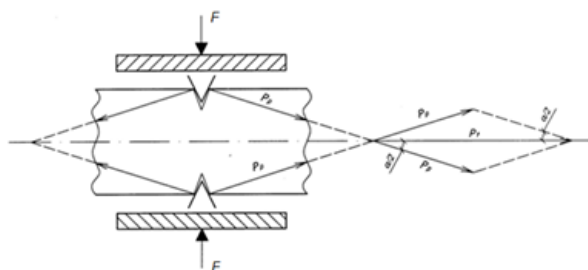


Рисунок 4 – Схема нагружения образца для расчета K_{IC}

$$K_{IC} = \frac{F_c}{b(h - 2\alpha_{cr})} \cdot \frac{(\cos \frac{\alpha}{2} - f \sin \frac{\alpha}{2})}{(\cos \frac{\alpha}{2} + f \sin \frac{\alpha}{2})} \cdot \sqrt{\frac{2\pi k d_{max}}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}}, \quad (5)$$

где F_c – разрушающая нагрузка, МН;

b – ширина образца, м;

h – высота образца, м;

a – глубина надреза (паза), м;

α – угол клиновидного паза, град.;

f – коэффициент трения между поверхностями паза и клина;

π – математическая константа, равная 3,14;

d_{max} – максимальный размер заполнителя, м, при

$$d_{max} \geq 0,02 \text{ м}, k = 1,2;$$

ν – коэффициент Пуассона.

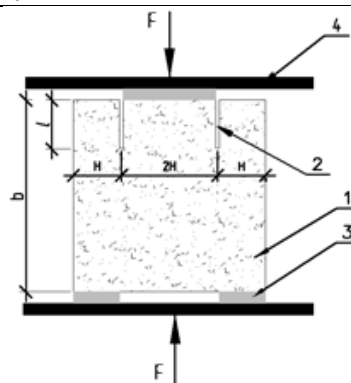


Рисунок 5 – Испытания на поперечный сдвиг

$$K_{IC} = \frac{F_c}{2tH} \sqrt{l \cdot Y(l, b)}, \quad (6)$$

где F_c – нагрузка, при которой происходит разрушение, Н;

t – толщина изделия, м;

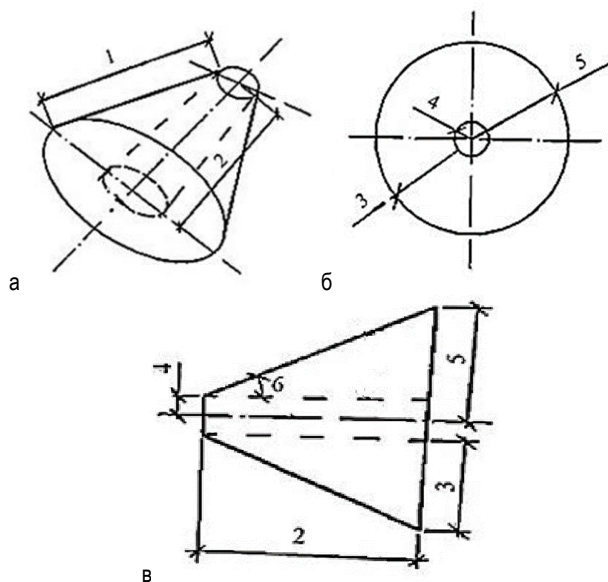
H – ширина плеча изделия, м;

l – глубина надреза, м;

$Y(l, b)$ – поправочный коэффициент (определяется по таблице 1).

Таблица 2 – Значения поправочного коэффициента $Y(l, b)$

l/b	H		
	0,037	0,025	0,012
0,1	1,2	1,1	1,07
0,2	1,26	0,99	0,9
0,3	1,3	0,95	0,76
0,4	1,32	0,95	0,65



а – в аксонометрии, б – вид спереди, в – вид сбоку

1 – длина образующей конуса разрушения l ; 2 – длина шнура h ; 3 – разница между максимальным радиусом конуса разрушения и радиусом шнура R ; 4 – радиус шнура r_0 ; 5 – максимальный радиус конуса разрушения r_{max} ; 6 – угол между образующей конуса разрушения и стороной шнура α .

Рисунок 6 – Схема усеченного конуса вырыва:

$$K_{IC} = \frac{3P[\cos^2(90-\alpha) - \sin^2(90-\alpha)]}{2\pi h^2 \left(1 + \frac{r_0}{r_0 + h \cdot \operatorname{tg}\alpha}\right)} \cdot \sqrt{2\pi l} \left[\frac{0.8}{\left(\frac{R}{l}\right)^3} + 0.7 \right], \quad (7)$$

где P – усилие вырыва, МН;

α – угол между образующей конуса разрушения и стороной

шпура; $\alpha = \operatorname{arctg}\left(\frac{R}{h}\right)$.

Преимуществом предложенной процедуры испытаний является то, что на одной бетонной призме (не на образцах-близнецах) мы получаем: K_{IC} в результате равновесных испытаний призмы 100x100x400 мм на 3-х точечный изгиб, два значения K_{IC} при раскалывании 2-х половинок призмы 100x100x200 мм, четыре значения K_{IC} при испытании 4-х кубов 100x100x100 мм с боковыми надрезами на сжатие, инициируя нормальный отрыв, и восемь значений K_{IC} , инициируя в бетонных пластинах 100x100x50 мм поперечный сдвиг. При этом мы сравниваем 1 значение K_{IC} равновесных испытаний, с 2-мя и 4-мя значениями K_{IC} по двум различным методикам неравновесных испытаний, и все это производится буквально на одном образце бетона, что также исключает погрешность от использования образцов-близнецов.

Восемь значений K_{IC} (рисунок 5) являются также хорошей статистической основой для достоверной оценки коэффициента интенсивности напряжений при поперечном сдвиге, а также надежной

базой для обоснования соотношения $\frac{K_{IC}}{K_{IC}}$.

Список цитированных источников

1. Леонович, С. Н. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при воздействии высоких температур / С. Н. Леонович, Д. А. Литвиновский, Л. В. Ким. – Владивосток : Дальневост. федер. ун-т, 2015. – 148 с.
2. Литвиновский, Д. А. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при воздействии высоких температур / Д. А. Литвиновский // Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях: в 2 ч. / С. Н. Леонович [и др.] ; под ред. С. Н. Леоновича. – Минск, 2016. – Ч. 1. – Гл. 1. – С. 12–160.

3. Способ определения критического коэффициента интенсивности напряжения высокопрочного бетона: пат. ВУ 16193 / С. Н. Леонович, Д. А. Литвиновский. – Оpubл. 30.08.2012.
4. Способ определения критического коэффициента интенсивности напряжения высокопрочного бетона: пат. ВУ 16194 / С. Н. Леонович, Д. А. Литвиновский. – Оpubл. 30.08.2012.
5. Способ определения критического коэффициента интенсивности напряжения высокопрочного бетона: пат. ВУ 19170 / С. Н. Леонович, Д. А. Литвиновский. – Оpubл. 30.06.2015.
6. Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении: ГОСТ 29167-91. – Москва : Научно-исследовательским, проектно-конструкторским и технологическим институтом бетона и железобетона (НИИЖБ), 1992. – 14 с.
7. Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении: ГОСТ 29167-2020.

References

1. Leonovich, S. N. Prochnost', treshchinostojkost' i dolgovechnost' konstrukcionnogo betona pri vozdeystvii vysokih temperatur / S. N. Leonovich, D. A. Litvinovskij, L. V. Kim. – Vladivostok : Dal'nevost. feder. un-t, 2015. – 148 s.
2. Litvinovskij, D. A. Prochnost', treshchinostojkost' i dolgovechnost' konstrukcionnogo betona pri vozdeystvii vysokih temperatur / D. A. Litvinovskij // Prochnost', treshchinostojkost' i dolgovechnost' konstrukcionnogo betona pri temperaturnyh i korrozionnyh vozdeystviah: v 2 ch. / S. N. Leonovich [i dr.] ; pod red. S. N. Leonovicha. – Minsk, 2016. – CH. 1. – Gl. 1. – S. 12–160.
3. Sposob opredeleniya kriticheskogo koeficienta intensivnosti napryazheniya vysokoprochnogo betona: pat. BY 16193 / S. N. Leonovich, D. A. Litvinovskij. – Opubl. 30.08.2012.
4. Sposob opredeleniya kriticheskogo koeficienta intensivnosti napryazheniya vysokoprochnogo betona: pat. BY 16194 / S. N. Leonovich, D. A. Litvinovskij. – Opubl. 30.08.2012.
5. Sposob opredeleniya kriticheskogo koeficienta intensivnosti napryazheniya vysokoprochnogo betona: pat. BY 19170 / S. N. Leonovich, D. A. Litvinovskij. – Opubl. 30.06.2015.
6. Betony. Metody opredeleniya harakteristik treshchinostojkosti (vyazkosti razrusheniya) pri staticheskom nagruzhении: GOST 29167-91. – Moskva : Nauchno-issledovatel'skim, proektno-konstruktorskim i tekhnologicheskim institutom betona i zhelezobetona (NIIZHB), 1992. – 14 s.
7. Betony. Metody opredeleniya harakteristik treshchinostojkosti (vyazkosti razrusheniya) pri staticheskom nagruzhении: GOST 29167-2020.

Материал поступил в редакцию 06.05.2021