

УДК 691.32-539.3/5(043.3)

ОЦЕНКА СТОЙКОСТИ БЕТОНА ВНОВЬ ВОЗВОДИМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

С.Н. Леонович¹, Д.А. Литвиновский², Н.А. Будревич¹

¹Белорусский национальный технический университет, Республика Беларусь

²ООО «ИнжСпецСтройПроект»

e-mail: ¹ leonovichsn@tut.by

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 $t=20^\circ\text{C}$. Новым в актуальной редакции ГОСТ 29167 является то, что определяемые по настоящему стандарту характеристики трещиностойкости применяют для оценки стойкости к воздействию высоких температур, используя силовые критерии механики разрушения – коэффициенты интенсивности напряжений при нормальном отрыве K_{IC} .

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

ASSESSMENT OF CONCRETE RESISTANCE OF RESTORED REINFORCED CONCRETE STRUCTURES TO EXPOSURE TO HIGH TEMPERATURES

S. Leonovich¹, D. Litvinovsky², N. Budrevich¹

¹Belarusian National Technical University, Republic of Belarus

²"InzhSpetsStroyProekt"

e-mail: ¹ leonovichsn@tut.by

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 $t=20^\circ\text{C}$. New in the current version of GOST 29167 is that the fracture toughness characteristics determined according to this standard are used to assess the resistance to high temperatures using the force criteria of fracture mechanics - stress intensity factors for normal separation K_{IC} .

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

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

$$F = \frac{\alpha_F \alpha_{bt} \beta}{K_{IC} \lambda_k} \cdot \frac{E_c \rho_i W_\Omega}{n_p} \quad (1)$$

где α_F – коэффициент пропорциональности: $\alpha_F = 1,16 \cdot 10^{-2} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{5/2} \cdot \text{кг}^{-1}$;

α_{ue} – коэффициент температурной деформации расширения бетона, $^\circ\text{C}^{-1}$;

λ_k – коэффициент теплопроводности бетона, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$;

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};

$W_э$ – 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 °С) значений K_{IC} , E , ρ_0 , $W_э$, 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 $t=20$ °С.

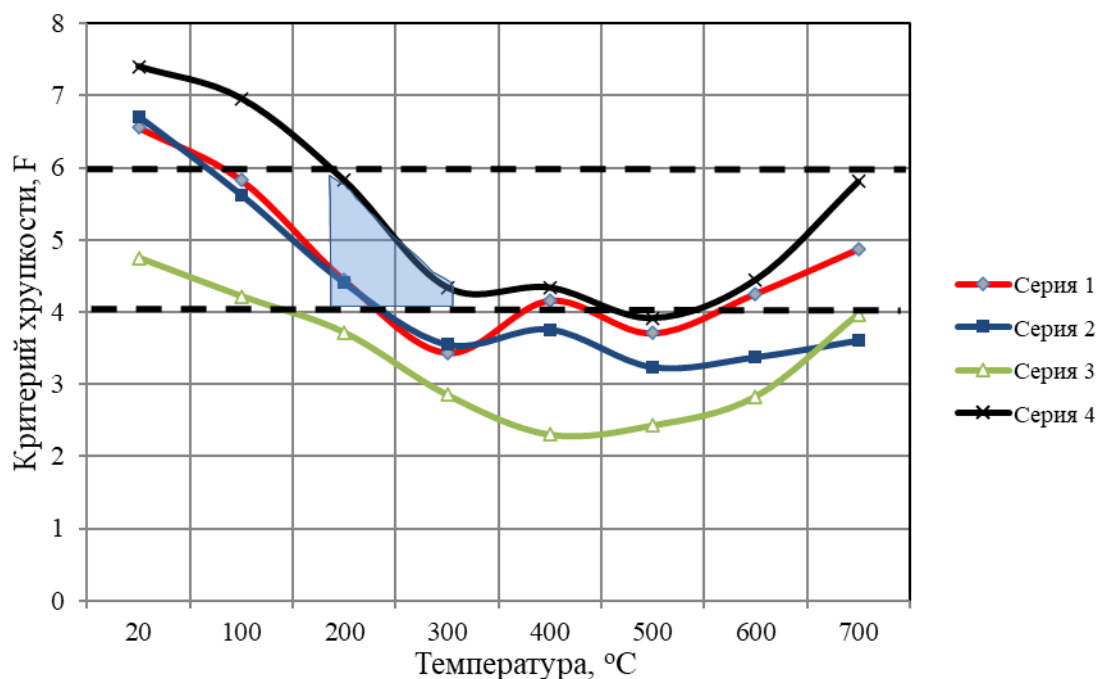


Рисунок 1. – Значения критерия хрупкости F для серий бетонных образцов 1, 2, 3,4 [1, 2]

Таблица 1. – Рекомендуемые значения критериев хрупкости при нормальной температуре (при $t=20$ °С)

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):

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

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

$$l_c = \frac{G_i E}{f_{ctm}^2} \quad (4)$$

где F_c - нагрузка, при которой происходит разрушение образца;

E - модуль упругости,

f_{ctm} - прочность бетона на растяжение.

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 прилагаемой 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: $K_C, K_C^*, K_i, G_F, G_i, G_{ce}, J_i, \chi_F^c$.

Новым в актуальной редакции ГОСТ 29167 является то, что определяемые по настоящему стандарту характеристики трещиностойкости 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 (рисунок 2) 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 (рисунок 3), производится расчет восьми значений K_{IC} [3, 4, 5].

Значения K_{IC}

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

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 $d_{\max} \geq 0,02$ м, $k = 1,2$;
 ν – коэффициент Пуассона.

Значения K_{IIC}

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

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).

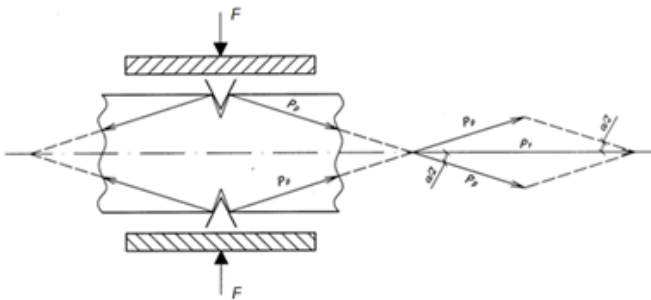


Рисунок 2. – Схема нагружения образца для расчета K_{IC}

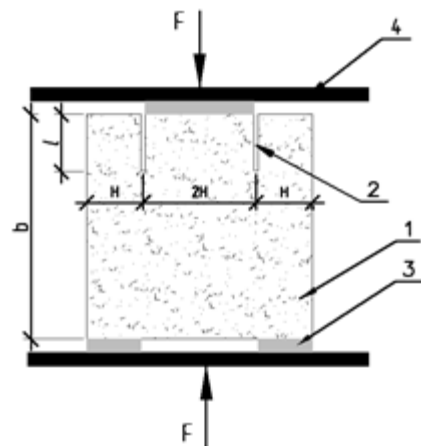


Рисунок 3. – Испытания на поперечный сдвиг

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

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 3) являются также хорошей статистической основой для достоверной оценки коэффициента интенсивности напряжений при поперечном сдвиге, а также надежной базой для обоснования соотношения $\frac{K_{IC}}{K_{IC}}$.

ЛИТЕРАТУРА

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

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС:
ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

ЭЛЕКТРОННЫЙ СБОРНИК СТАТЕЙ
III МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

(Новополоцк, 29–30 апреля 2021 г.)

Текстовое электронное издание

Новополоцк
Полоцкий государственный университет
2021

1 – дополнительный экран – сведения об издании

УДК 72:624/628+69(082)

Одобрено и рекомендовано в качестве электронного издания
Советом инженерно-строительного факультета (протокол № 8 от 27.10.2021 г.)

Редакционная коллегия:

Д. Н. Лазовский (председатель), А. А. Бакатович, Е. Д. Лазовский,
Л. М. Парфенова, Ю. В. Вишнякова, Р. М. Платонова, А. М. Хаткевич

АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС: ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ
[Электронный ресурс] : электрон. сб. ст. III междунар. науч. конф., Новополоцк, 29–30 апр.
2021 г. / Полоц. гос. ун-т ; Редкол.: Д. Н. Лазовский (председ.) [и др.]. – Новополоцк :
Полоц. гос. ун-т, 2021. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
ISBN 978-985-531-779-2.

Рассмотрены вопросы архитектуры и градостроительства в современных условиях, прогрессивные методы проведения инженерных изысканий и расчета строительных конструкций. Приведены результаты исследований ресурсо- и энергосберегающих строительных материалов и технологий, энергоресурсосберегающие и природоохранные инновационные решения в инженерных системах зданий и сооружений. Проанализированы организационные аспекты строительства и управления недвижимостью, проблемы высшего архитектурного и строительного образования.

Для научных и инженерно-технических работников исследовательских, проектных и производственных организаций, а также преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов строительных специальностей учреждений образования.

*Сборник включен в Государственный регистр информационного ресурса.
Регистрационное свидетельство № 3671815379 от 26.04.2018 г.*

211440, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, Беларусь
тел. 8 (0214) 53 53 92, e-mail: a.bakatovich@psu.by; l.parfenova@psu.by

№ госрегистрации 3671815379
ISBN 978-985-531-779-2

©Полоцкий государственный университет, 2021

2 – дополнительный титульный экран – производственно-технические сведения

Для создания текстового электронного издания «Архитектурно-строительный комплекс: Проблемы, перспективы, инновации» использованы текстовый процессор Microsoft Word и программа Adobe Acrobat XI Pro для создания и просмотра электронных публикаций в формате PDF.

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС:
ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

ЭЛЕКТРОННЫЙ СБОРНИК СТАТЕЙ
III МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

(Новополоцк, 29–30 апреля 2021 г.)

Технический редактор *И. Н. Чапкевич.*

Компьютерная верстка *А. А. Прадидовой, С.Е. Рясовой.*

Компьютерный дизайн обложки *Е. А. Балабуевой.*

Подписано к использованию 09.11.2021.

Объем издания: 21,05 Мб. Тираж 3 диска. Заказ 420.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

Свидетельство о государственной регистрации
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 08.05.2014.

211440, ул. Блохина, 29,
г. Новополоцк,
Тел. 8 (0214) 59-95-41, 59-95-44
<http://www.psu.by>