

# **КРИТЕРИИ ХРУПКОСТИ ВЫСОКОПРОЧНОГО КОНСТРУКЦИОННОГО БЕТОНА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР: КОНСТРУКЦИИ ИЗГОТОВЛЯЕМЫЕ И ЭКСПЛУАТИРУЕМЫЕ**

ЛИТВИНОВСКИЙ Д.А., ЛЕОНОВИЧ С.Н.

*Белорусский национальный технический университет*

Для качественного расчета несущей способности железобетонных конструкций и их элементов, кроме оценки прочности не менее важной является информация об упруго-деформативных характеристиках бетона: ползучести, вязкости, хрупкости разрушения и др.

Актуальность этого вопроса возрастает в связи с расширением использования в практике строительства высокопрочных бетонов, обладающих малой деформативностью и имеющих склонность к хрупкому разрушению. Не менее востребованной такая информация будет и при определении перспективы безопасной эксплуатации конструкций и сооружений, оказавшихся в условиях экстремальных термических воздействий, что может привести к радикальным изменениям физико-механических свойств бетона [1].

По этой причине оценка хрупкости и трещиностойкости высокопрочных бетонов представляет практическую ценность, так как вопросы высокой прочности с повышенной хрупкостью, весьма слабо освещены в литературе и поэтому приобретают особую значимость при оценке надежности и долговечности бетонов нового поколения в условиях воздействия высоких температур. Хрупкое разрушение бетона является следствием действия на него напряжений, вызванных нагревом и внешней нагрузкой и приводящих к переходу трещины из равновесного в неравновесное состояние. Выяснению природы механического поведения композиционных материалов способствует разработка новой комплексной многопараметричной методики, в основе которой лежит детальное изучение самого процесса разрушения с позиции механики разрушения. С пониманием этого процесса повышаются достоверность описания свойств по характерным признакам и возможность их представления в количественной форме в виде параметров, определяющих выбор материалов для какой-либо цели.

В качестве основы расчета возможности хрупкого разрушения бетона при пожаре для тяжелых бетонов обычной прочности принята формула по В.В. Жукову оцениваемая значением критерия хрупкого разрушения  $F$  [3]:

$$F = \frac{\alpha_F \alpha_{bt} \beta}{K_{IC} \lambda_k} \cdot \frac{E_c \rho_0 W_3}{n_p}, \quad (1)$$

где  $\alpha_F$  – коэффициент пропорциональности:

$$\alpha_F = 1,16 \cdot 10^{-2} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{5/2} \cdot \text{кг}^{-1};$$

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

$E_c$  – модуль упругости бетона при нормальных условиях, МПа;

$\beta$  – коэффициент изменения модуля упругости бетона при пожаре;  $\rho_0$  – плотность бетона в сухом состоянии,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

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

$n_p$  – общая пористость бетона, %;

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

$W_3$  – объемная эксплуатационная влажность бетона,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;

При  $F \leq 4$  в бетоне хрупкое разрушение не происходит.

При  $F > 6$  в бетоне происходит хрупкое разрушение, интервал критерия от 4 до 6 является потенциально опасным.

На сегодняшний день данная формула является актуальной и принята во многих действующих нормативных и методических документах. Большинство элементов формулы (1) являются значениями, предложенными В.В. Жуковым на основе экспериментальных данных. Единственными элементами, которые всегда являются исходными для расчета – это плотность, масса заполнителей и воды. Значения элементов формулы В.В. Жукова для высокопрочного бетона в действительности отличаются от обычных бетонов [2], а значит критерий хрупкости будет отличаться. При выполнении программы эксперимента авторами по определению параметров трещиностойкости и других характеристик высокопрочного бетона после воздействия высоких температур были получены следующие результаты [3].

Таблица 1 – Состав 1

Температура нагрева, °С	fc.cube, МПа	Rbt, МН/м <sup>2</sup>	Eb x 10 <sup>3</sup> , МН/м <sup>2</sup>	Gf, Н/М	K/C, МН/м <sup>3/2</sup>	K/IC, МН/м <sup>3/2</sup>	lcr, м
20	85,7	4,61	55,45	14,28	0,89	5,82	0,037
100	83,6	4,50	50,38	15,37	0,88	4,45	0,038
200	99,5	5,36	37,72	18,71	0,84	3,85	0,025
300	102,2	5,50	28,43	18,23	0,72	3,61	0,017
400	88,7	4,77	22,83	13,25	0,55	3,23	0,013
500	81,0	4,36	10,95	10,56	0,34	2,09	0,006
600	68,3	3,68	8,70	8,38	0,27	1,25	0,005
700	46,5	2,50	5,59	5,17	0,17	1,12	0,005

Таблица 2 – Состав 2

Температура нагрева, °С	fc.cube, МПа	Rbt, МН/м <sup>2</sup>	Eb x 10 <sup>3</sup> , МН/м <sup>2</sup>	Gf, Н/М	K/C, МН/м <sup>3/2</sup>	K/IC, МН/м <sup>3/2</sup>	lcr, м
20	87,50	4,65	49,33	13,97	0,83	4,62	0,032
100	85,3	4,53	44,26	16,71	0,86	5,03	0,036
200	100,35	5,33	39,69	21,79	0,93	6,32	0,030
300	110,60	5,88	32,62	21,12	0,83	5,90	0,020
400	92,10	4,89	22,00	17,47	0,62	4,77	0,016
500	58,55	3,11	10,00	13,69	0,37	3,76	0,014
600	47	2,50	5,93	9,71	0,24	2,70	0,009
700	35,7	1,90	3,80	6,74	0,16	1,20	0,007

Таблица 3 – Состав 3

Температура нагрева, °С	fc.cube, МПа	Rbt, МН/м <sup>2</sup>	Eb x 10 <sup>3</sup> , МН/м <sup>2</sup>	Gf, Н/М	K/C, МН/м <sup>3/2</sup>	K/IC, МН/м <sup>3/2</sup>	lcr, м
20	75,6	4,41	38,96	15,22	0,77	2,43	0,030
100	70,3	4,10	35,44	16,30	0,76	2,86	0,034
200	64,8	3,78	31,20	17,55	0,74	3,05	0,038
300	55,5	3,24	24,28	17,40	0,65	2,55	0,040
400	41,4	2,42	12,30	17,96	0,47	1,93	0,038
500	31,4	1,83	8,12	13,41	0,33	1,12	0,032
600	22,5	1,31	5,35	8,24	0,21	0,82	0,026
700	16,3	0,95	3,51	3,45	0,11	0,65	0,013

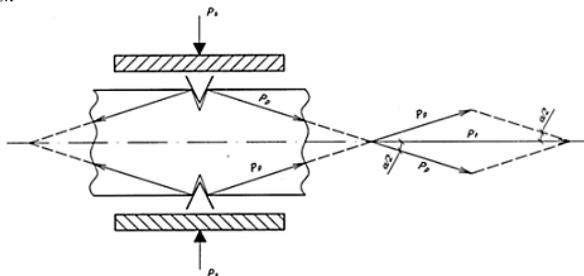
Таблица 4 – Состав 4

Температура нагрева, °С	fc.cube, МПа	Rbt, МН/м <sup>2</sup>	Eb x 10 <sup>3</sup> , МН/м <sup>2</sup>	Gf, Н/М	K/C, МН/м <sup>3/2</sup>	K/IC, МН/м <sup>3/2</sup>	lcr, м
20	80,1	4,50	51,86	12,97	0,82	6,79	0,033
100	79,6	4,47	47,43	12,50	0,77	5,63	0,030
200	82,6	4,64	35,80	12,54	0,67	4,98	0,021
300	84,05	4,72	24,57	11,43	0,53	4,43	0,013
400	71,55	4,02	16,06	10,47	0,41	4,17	0,010
500	66,25	3,72	9,31	9,67	0,3	3,84	0,006
600	54,43	3,06	6,78	7,14	0,22	3,16	0,005
700	41,7	2,34	4,35	3,31	0,12	2,20	0,003

Разработанная и представленная ниже методика применима на изготавливаемых конструкциях и положительным моментом является, то, что все значения получены на одном бетонном образце, а не на образцах-близнецах.

Параметры трещиностойкости, представленные в таблицах 1–4, получены экспериментально следующим образом:

1. На образце-призме из высокопрочного бетона с надрезами (Патент ВУ 19170) определяют значения критического коэффициента интенсивности напряжения  $K_{IC}$  и характеристическую длину трещины  $l_{ch}$



$$K_{IC} = \frac{P_s}{b_s(h_s - 2a_{cr})} \cdot \frac{(\cos \alpha/2 - f \sin \alpha/2)}{(\sin \alpha/2 + f \cos \alpha/2)} \cdot \sqrt{\frac{2\pi \cdot kd_{max}}{(1+\nu)(1-2\nu)}}; \quad (2)$$

$$l_{ch} = \frac{K_{IC}^2}{R_{bt}^2} = \frac{2b_s(h_s - 2a_{cr})}{P_s} \cdot \frac{\pi kd_{max}}{(1+\nu)(1-2\nu)} \cdot \left( \frac{\cos \alpha/2 - f \sin \alpha/2}{\sin \alpha/2 + f \cos \alpha/2} \right)^2. \quad (3)$$

2. Из полученных элементов от первого испытания готовят образцы-кубы с надрезами (Патент №16194) для определения значения критического коэффициента интенсивности напряжения  $K_{IC}$  [4]:

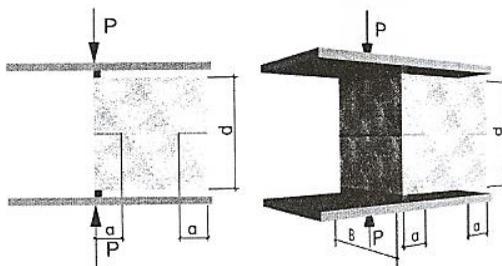
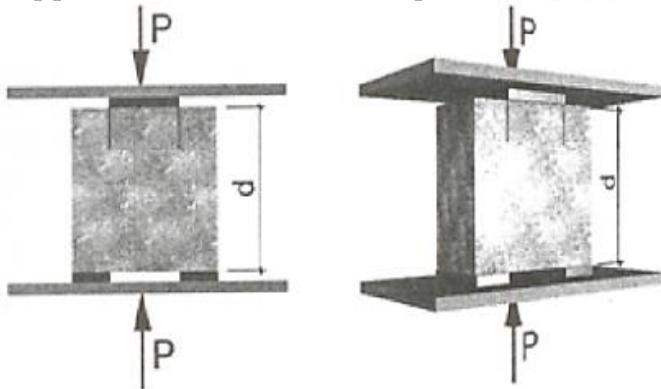


Рис. 1. Схема испытания

$$K_{IC} = \frac{P}{Bd^{1/2}} \left[ 18,3 \left( \frac{a}{d} \right)^{1/2} - 430 \left( \frac{a}{d} \right)^{3/2} + 3445 \left( \frac{a}{d} \right)^{5/2} - 11076 \left( \frac{a}{d} \right)^{7/2} + 12967 \left( \frac{a}{d} \right)^{9/2} \right]. \quad (4)$$

Из полученных элементов от второго испытания подготавливают образцы-пластины с надзорами для определения значения критического коэффициента интенсивности напряжения  $K_{IC}$  [5]:



$$K_{IC} = \frac{P}{2tH} \sqrt{IY(l, b)} \quad (5)$$

На основе полученных значений по представленной выше методике можно вычислить энергию разрушения  $G_i$  и критическую длину трещины  $l_{cr}$

$$G_i = \frac{K_{IC}^2}{E_b}; \quad (6)$$

$$l_{cr} = \frac{G_i E_b}{f_t^2}, \quad (7)$$

где  $E_b$  – модуль упругости,  $f_t$  – прочность бетона на растяжение.

На основе полученных экспериментальных данных и состава смесей бетона [1] можно рассчитать критерий хрупкости, подставив значения из таблиц 1-4 в формулу (1).

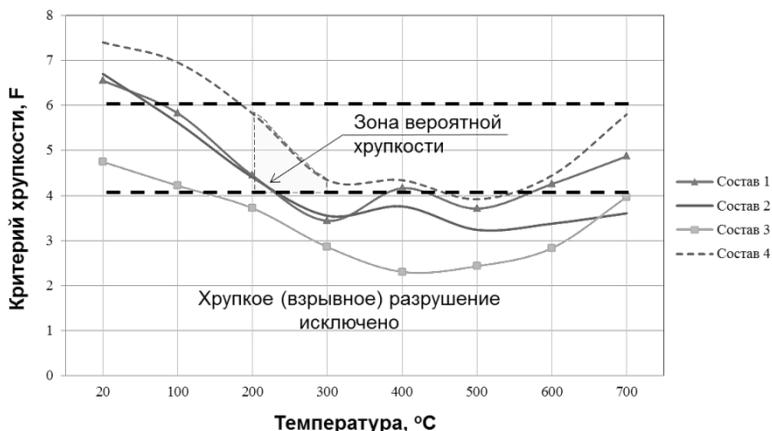


Рис. 1. Изменение критерия хрупкости

Как видно из рисунка 1, не все составы высокопрочного бетона находятся в зоне хрупкого разрушения, а состав 3 находится вне зоны возможного хрупкого разрушения.

Для эксплуатируемых конструкций разработана соответствующая комплексная многопараметричная методика на основе испытания бетона методом упругого отскока (прибор ИПМ-1Б) и ультразвуковым поверхностным прозвучиванием с замером времени прохождения импульса (прибор Пульсар 1.0).

Прибор ИПМ-1Б разрабатывается в лаборатории контактно-динамических методов контроля Института прикладной физики НАН Беларуси и внесен в реестр средств измерений Республики Беларусь. Выпускается по ТУ ВУ 100289280.021 – 2010.



Рис. 2. Внешний вид прибора ИПМ-1Б

Он заключается в нанесении локального удара жестким индентором по испытываемому материалу и регистрации всей кривой текущей скорости перемещения индентора, которая и представляет собой исходную информацию о материале.

Скорость индентора в каждый момент времени фиксируется с помощью магнитоиндукционного датчика, состоящего из смонтированного на инденторе постоянного магнита и катушки индуктивности, закрепленной на корпусе прибора.

На рисунке представлена зависимость поверхностной твердости  $H$ , полученная динамическим индентированием методом упругого отскока от модуля упругости  $E_b$  двух составов высокопрочного бетона.

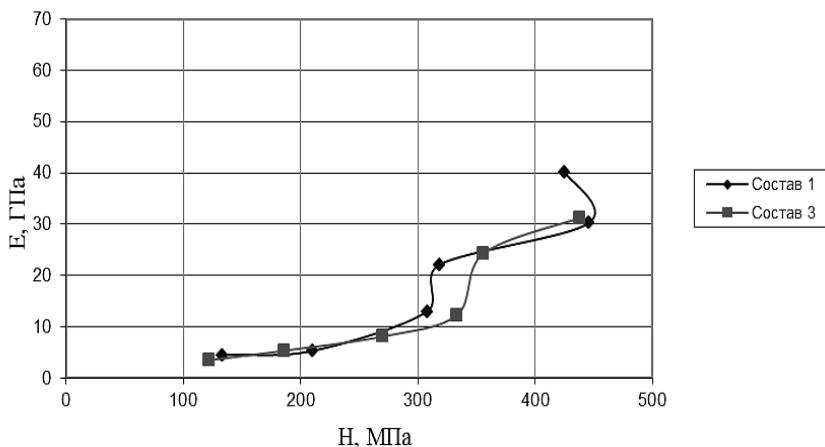


Рис. 3. Зависимость модуля упругости от поверхностной твердости.

На рисунке представлена зависимость критического коэффициента интенсивности напряжения от поверхностной твердости.

Зависимости, представленные на рисунках, указывают на относительно универсальную возможность применения динамического индентирования методом упругого отскока.

На основе полученных результатов по расчету хрупкости и критериев трещиностойкости (вязкости разрушения) разработана методика экспериментального определения трещиностойкости (вязкости разрушения) высокопрочного бетона после воздействия высоких

температур (до 700°C) на базе НИИ ПБ МЧС Республики Беларусь, а также Стандарт предприятия «Правила по определению трещиностойкости высокопрочного бетона при воздействии высоких температур».

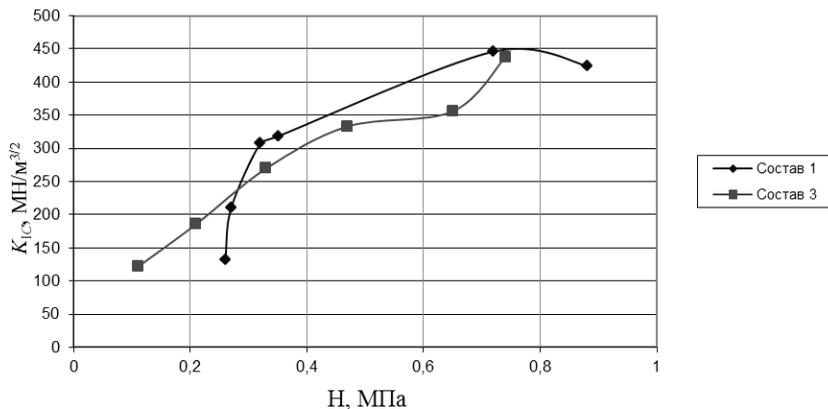


Рис. 4. Зависимость критического коэффициента интенсивности напряжения от динамической твердости

#### Выводы:

1. Расчет критерия хрупкости по формуле В.В. Жукова ограничено применим для высокопрочных бетонов при высоких температурах.
2. Предложены новые с ясным физическим смыслом критерии возникновения взрывного разрушения высокопрочного бетона (для изготавливаемых конструкций) в терминах силовых и энергетических параметров механики разрушения значения которых соответствуют  $G_i > 14 \text{ Н/м}$ ;  $K_{Ic} > 0,8 \text{ МН/м}^{-3/2}$ ;  $l_{cr} \approx 0,03 \text{ м}$  при нормальной температуре.
3. Для эксплуатируемых конструкций специально разработана уникальная методика неразрушающего контроля, позволяющая определить поверхностную твердость бетон  $H$ , а через нее по оригинальным экспериментальным зависимостям рассчитать требуемые критерии  $E$  и  $K_{Ic}$ .
4. Предлагаемая авторами многопараметричная методика позволяет определять деформативные, силовые и энергетические характеристики трещиностойкости (вязкости разрушения) высокопроч-

ного бетона до и после воздействия высоких температур как для изготавливаемых так и для эксплуатируемых конструкций.

5. Для практических расчетов разработаны Методические рекомендации и Стандарт предприятия по определению трещиностойкости высокопрочного бетона после воздействия высоких температур (до 700°C).

## Литература

1. Леонович С.Н., Литвиновский Д.А., Ким Л.В. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при воздействии высоких температур: монография / Инженерная школа ДВФУ. - Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2015.- 148 с.

2. Леонович С.Н. Механика разрушения термически поврежденного бетона / С.Н. Леонович, Д.А. Литвиновский // Сборник научных трудов Института строительства и архитектуры. - Москва, 2009. - С.26-30.

3. Критерии хрупкого разрушения высокопрочного бетона/ С.Н. Леонович, В.Ф Зверев БНТУ, Д.А. Литвиновский // Механика разрушения строительных материалов и конструкций. Материалы VIII Академических чтений РААСН - Международной научно-технической конференции. – Мн. : 2014. - С.169-173.

4. Способ определения критического коэффициента интенсивности напряжения высокопрочного бетона : пат. ВУ 19170 / С.Н. Леонович, Д.А. Литвиновский / заявитель Белорусский нац. тех. ун-т. - № а 20111762 ; заявл. 2011.12.19 ; Афіцыйны бюл. / Нач. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2015. - №3(104) – С.104.

5. Способ определения критического коэффициента интенсивности напряжения высокопрочного бетона : пат. ВУ 16194 / С.Н. Леонович, Д.А. Литвиновский / заявитель Белорусский нац. тех. ун-т. - № а 20100495 ; заявл. 2010.03.30 ; Афіцыйны бюл. / Нач. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. - №4(87) – С.133.

6. Леонович С. Н. Аналитические зависимости прочностных, деформативных, силовых и энергетических параметров высокопрочного бетона при нагреве / С. Н. Леонович, Д. А. Литвиновский // Вестник Белорусского национального технического университета : научно-технический журнал. - Мн. : 2011. - N 4. - С. 30-34.