

С.Н. ЛЕОНОВИЧ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, иностранный академик РААСН (sleonovich@mail.ru);  
Д.А. ЛИТВИНОВСКИЙ<sup>2</sup>, главный инженер (7200743@gmail.com)

<sup>1</sup> Белорусский национальный технический университет (220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 65)

<sup>2</sup> ООО «ИнжСпецСтройПроект» (220114, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Л. Мстиславца, 22, пом. 210)

## Вязкость разрушения высокопрочного бетона после воздействия высокой температуры

Воздействие высокой температуры на высокопрочный бетон приводит к проявлению хрупкого разрушения взрывного характера, которое необходимо прогнозировать и регулировать. С этой целью разработана методика на основе механики разрушения и предложены критерии оценки вязкости и хрупкости высокопрочного бетона и сталефибробетона для исключения взрывного разрушения при воздействии высокой температуры. Выполнена экспериментальная многопараметричная оценка остаточных свойств прочностных, деформативных, силовых и энергетических параметров высокопрочного бетона в диапазоне температуры от 100 до 700°C. Предложены критерии возникновения взрывного разрушения высокопрочного бетона для изготавливаемых и эксплуатируемых конструкций в терминах силовых и энергетических параметров механики разрушения при нормальной температуре.

**Ключевые слова:** высокопрочный бетон, сталефибробетон, взрывное разрушение, вязкость разрушения, трещиностойкость, энергия разрушения.

**Для цитирования:** Леонович С.Н., Литвиновский Д.А. Вязкость разрушения высокопрочного бетона после воздействия высокой температуры // *Строительные материалы*. 2017. № 11. С. 12–17.

S.N. LEONOVICH<sup>1</sup>, Doctor of Sciences (Engineering), Foreign Member of RAACS; D.A. LITVINOVSKIY<sup>2</sup>, Head Engineer (7200743@gmail.com)

<sup>1</sup> Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Avenue, Minsk, 220013, Belarus)

<sup>2</sup> «InzhSpecStroyProekt» ООО (Rom 210, 22, L. Mstislavca Street, Minsk, 220114, Belarus)

### Destruction Viscosity of High-Strength Concrete after High Temperature Impact

The impact of high temperature on high-strength concrete leads to the appearance of brittle fracture of an explosive character which is necessary to predict and regulate. For this purpose, the methodology on the basis of destruction mechanics has been developed, and criteria of the evaluation of viscosity and brittleness of high-strength concrete and steel-fiber concrete has been proposed to exclude the explosive fracture under the high temperature impact. The experimental multi-parametric evaluation of residual properties of strength, deformation, force, and energetic parameters of high-strength concrete has been made in the temperature range of 100–700°C. Criteria of the appearance of explosive destruction of high-strength concrete for produced and operated structures are proposed in terms of force and energetic parameters of fracture mechanics at a normal temperature.

**Keywords:** high-strength concrete, steel-fiber concrete, explosive fracture, viscosity of destruction, crack resistance, destruction energy.

**For citation:** Leonovich S.N., Litvinovskiy D.A. Destruction viscosity of high-strength concrete after high temperature impact. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 11, pp. 12–17. (In Russian).

Температурное воздействие зачастую приводит к взрывному разрушению высокопрочного бетона. Несмотря на целый ряд достоинств, высокопрочный бетон имеет существенный недостаток – хрупкое разрушение бетона с эффектом взрыва.

Установлено, что количества испытаний трещиностойкости высокопрочного бетона после воздействия высокой температуры недостаточно, а существующие методики сложны и трудоемки и не имеют комплексных показателей по оценке хрупкости.

На основе выполненного аналитического обзора сформулированы предпосылки методики экспериментальных исследований:

- прочность бетона, подвергнутого высокотемпературному нагреву и затем охлажденного до комнатной температуры, т. е. остаточная прочность не выше прочности нагретого;
- неравновесные испытания дают вполне достоверную оценку трещиностойкости (вязкости разрушения);
- прочность бетона под нагрузкой при воздействии высокой температуры выше ненагруженного.

В экспериментальном исследовании использовались четыре состава модифицированного бетона класса С50/60 (П-4) (табл. 1).

Для определения характеристик высокопрочного бетона изготавливались образцы-кубы размерами 100×100×100 мм и образцы-призмы размерами 100×100×400 мм в количестве не менее 24 шт. на каждый состав.

Скорость нагрева контролировалась термомпарами по толщине образцов и составляла 2°C/мин с последующим изотермическим прогревом в течение 4 ч после достижения заданного уровня нагрева: 100, 200, 300, 400, 500, 600 и 700°C.

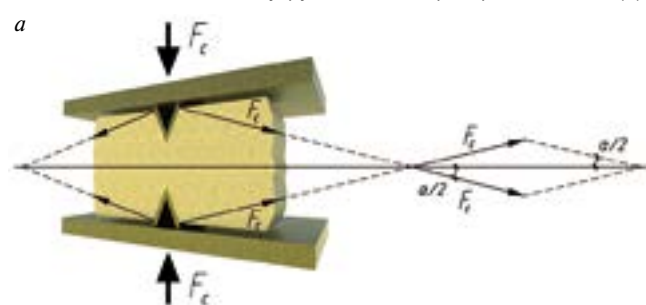
После каждого цикла нагрева образцов и полного остывания проводился неразрушающий контроль мето-

Таблица 1

Бетонная смесь	Расход компонентов, кг/м <sup>3</sup>			
	Состав I	Состав II	Состав III	Состав IV
Цемент ПЦ500 Д0	580	520	600	580
Щебень гранитный фракции 5–20 мм	1180	1180	1120	1120
Песок	620	570	620	620
Пластифицирующая добавка «ГП-1»	6,76	11,58	–	5,79
Микрокремнезем	–	60	–	–
Пластифицирующая добавка «С-3»	–	–	17,98	–
Фибра стальная	–	–	–	46,5
Вода	150	150	170	184
Водоцементное отношение	0,25	0,28	0,28	0,31



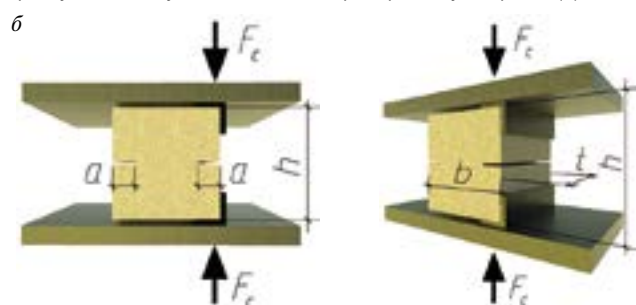
Рис. 1. Испытание методом упругого отскока прибором «ИПМ-1Б» (а) и ультразвуковым импульсным методом прибором «Пультар 1.0» (б)



Патент ВУ 19170 [3]

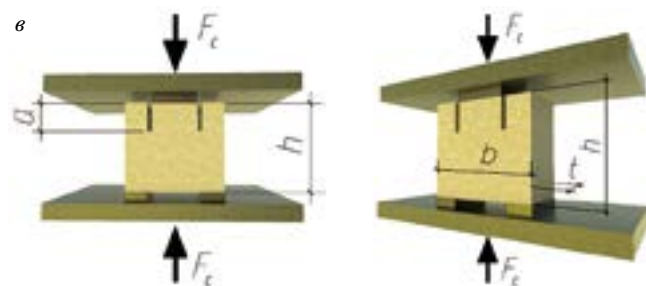
$$K_{IC} = \frac{P_s}{b_s(h_s - 2a_{cr})} \cdot \frac{(\cos \alpha/2 - f \sin \alpha/2)}{(\sin \alpha/2 - f \cos \alpha/2)} \cdot \sqrt{\frac{2\pi k d_{max}}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1)$$

$$l_c = \frac{K_{IC}^2}{f_{cm}} \quad (2)$$



Патент ВУ 16193 [1]  
Патент ВУ 16194 [2]

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



Патент RU 2621618 [4]  
Патент RU 2621623 [5]

$$K_{IIc} = \frac{P}{2tH} \sqrt{IY(l,b)} \quad (4)$$



$K_{IC}$



$K_{IIc}$

Характер излома образцов

Рис. 2. Способы экспериментального определения коэффициентов интенсивности напряжений высокопрочного бетона, подтвержденные авторскими патентами на изобретение Республики Беларусь и Российской Федерации, при нормальном отрыве (а, б, в) и поперечном сдвиге (г, д)

дами упругого отскока и ультразвуковым импульсом с расчетом твердости и модуля упругости (рис. 1).

Для оценки вязкости разрушения высокопрочного бетона при воздействии высокой температуры разработана методика для изготавливаемых конструкций на одном бетонном образце, а не на образцах-близнецах, защищенная патентами Республики Беларусь [1–3] и Российской Федерации [4, 5] (рис. 2). Эта методика позволяет по величине усилия, соответствующего старту

магистральной трещины в образце с надрезами, произвести расчет коэффициентов интенсивности напряжений при нормальном отрыве  $K_{IC}$  (1), (3) и  $l_{ch}$  (2) коэффициентов интенсивности напряжений при поперечном сдвиге  $K_{IIc}$  (4).

Изменение прочности высокопрочного бетона при нагреве происходило следующим образом (рис. 3, а) [6]: при температуре нагрева в 100°C прочность снижалась до 93–98%; при нагреве до 300°C прочность восстанавли-

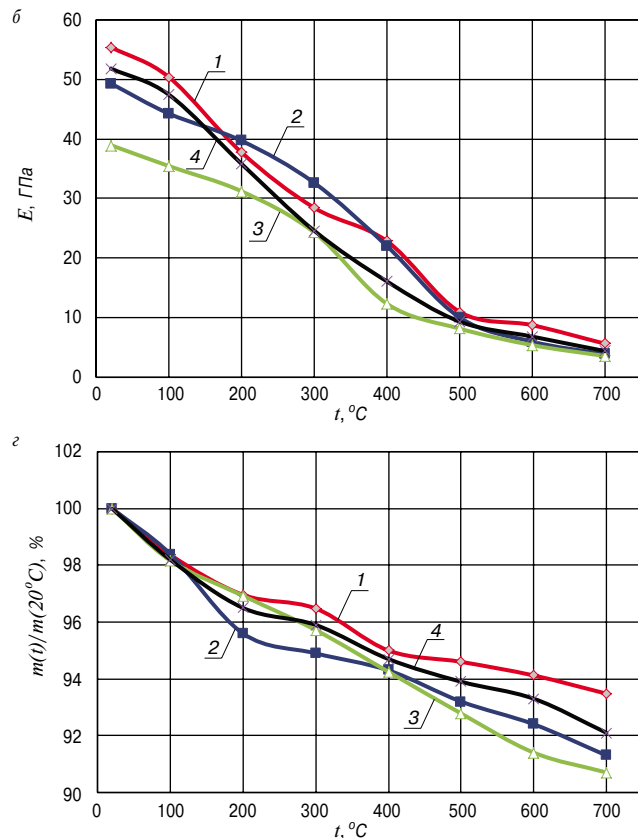
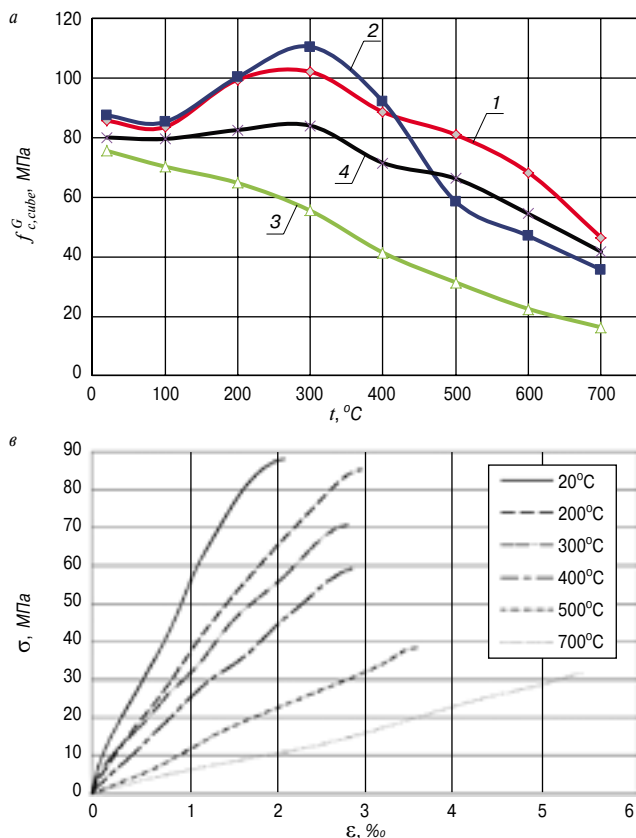


Рис. 3. Изменение прочности на сжатие  $f_c$  (а), модуля упругости  $E$  (б); диаграмма деформирования бетона серии 1 после нагрева (в), массы образцов после нагрева (з): 1 – серия 1; 2 – серия 2; 3 – серия 3; 4 – серия 4

ливалась до первоначальной и составляла для составов I, II и IV 105–126%; при нагреве от 400 до 700°C прочность резко падала и составляла для составов I, II и IV до 41%; для образцов состава III с начала процесса нагрева отмечалось постоянное уменьшение прочности и составило 22% от первоначальной прочности при 700°C.

Масса образцов уменьшалась с ростом температуры и составляла к 700°C до 90% от первоначальной (рис. 3, в). Процесс потери влаги протекает в три характерных этапа: вначале интенсивная потеря с ростом  $t$  до 200°C ввиду испарения капиллярной воды в бетоне; при изменении  $t$  между 200 и 400°C скорость испарения значительно ниже ввиду трудного выделения гелевой воды; на третьем этапе (выше 400°C) потеря массы была вызвана разложением цементного камня и заполнителей (высвобождение микрохимически связанной воды).

С постоянным ростом температуры значение модуля упругости линейно уменьшается и при 700°C составляет менее 10% от первоначального значения (рис. 3, б).

Предельные деформации сжатия высокопрочного бетона после нагрева до температуры 200, 400 и 600°C соответственно равны 2,3; 2,9 и 5,3‰ [7]. Модуль деформации при сжатии уменьшается при температуре 200°C на 20–30%; при 400°C – на 40–70%; при 600°C – на 70–90%.

Установлено, что значительное снижение деформативных свойств бетона происходит в интервале температуры 600–650°C, что объясняется распадом гидроксида кальция цементного камня [8].

Масса образцов  $m$  уменьшалась с ростом температуры (700°C) до 90% от первоначальной (рис. 3, з) в три характерных этапа: интенсивная потеря с ростом  $t$  до 200°C ввиду испарения капиллярной воды в бетоне; при изменении  $t$  в интервале 200–400°C происходит потеря массы по причине испарения гелевой воды, причем интенсивность испарения снижалась (гелевая вода встречает сопротивление при выделении из пор геля из-за их

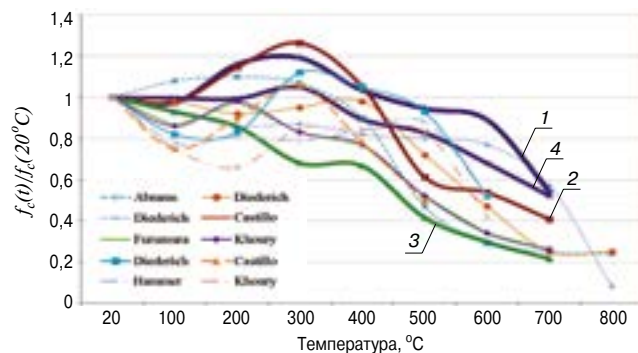


Рис. 4. Сравнительный анализ авторских данных изменения относительной прочности бетона при сжатии после нагрева и наиболее авторитетных зарубежных исследований: 1 – серия 1; 2 – серия 2; 3 – серия 3; 4 – серия 4

меньшего размера); при  $t$  выше 400°C потеря массы была вызвана разложением цементного камня и заполнителей (высвобождение химически связанной воды).

Принципиально важно, что результаты приведенных экспериментов совпадают с данными ведущих зарубежных ученых и институтов в области исследований высокопрочного бетона при высокотемпературном нагреве (рис. 4). Поэтому обоснованным является заключение, что комплекс исследований хрупкости высокопрочного бетона при воздействии высокой температуры методами механики разрушения на образцах серий 1–4, выполненный авторами, достаточно представительен для распространения рекомендаций на широкий спектр высокопрочных бетонов.

Анализ результатов, приведенных на рис. 5, показал, что коэффициенты интенсивности напряжений при нормальном отрыве и поперечном сдвиге для серий 1 и 4 начинают снижаться в начале нагрева, а для серий 2

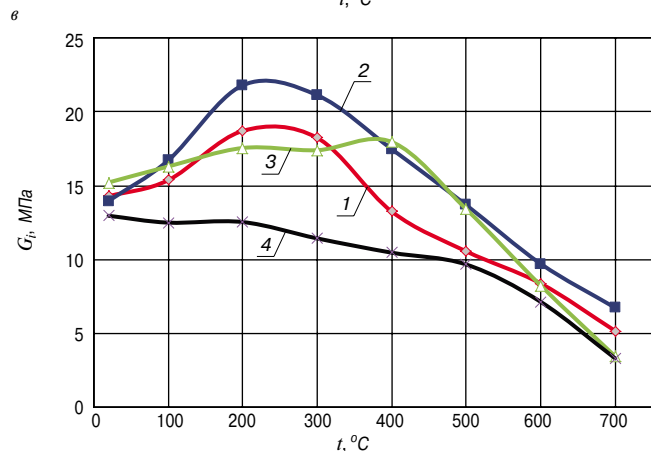
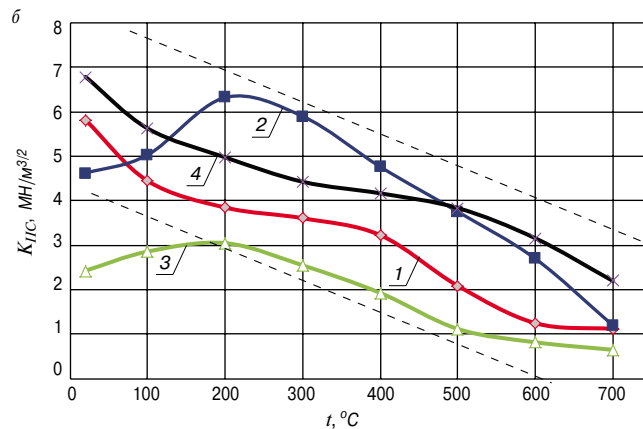
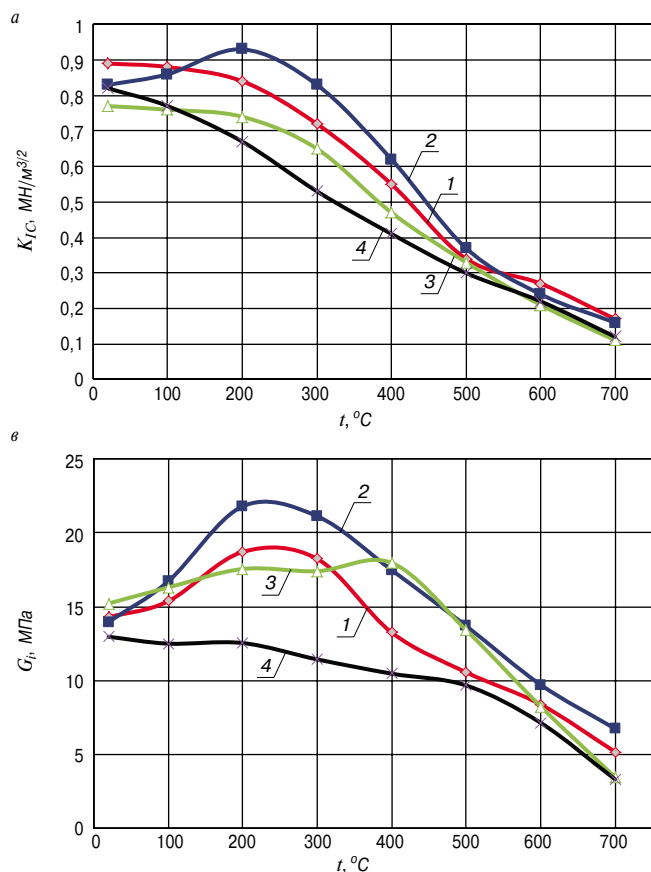


Рис. 5. Изменение коэффициентов интенсивности напряжений при нормальном отрыве  $K_{IC}$  (а), поперечном сдвиге  $K_{IIC}$  (б), удельных энергозатратах разрушения  $G_i$  (в)

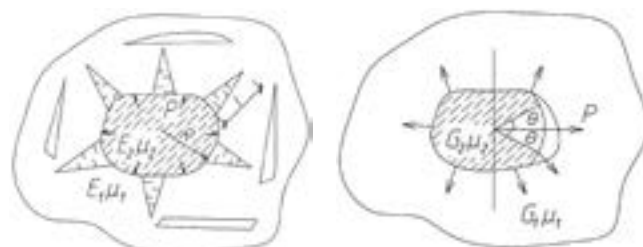


Рис. 6. Радиальные трещины возле заполнителя при нагреве  
Рис. 7. Контактные трещины на границе зерно заполнителя – матрицы цементно-песчаного раствора при нагреве

и 3 – увеличиваться до температуры 200°C. Таким образом, введение микрокремнезема и С-3 приводит к повышению сопротивления образованию и развитию трещин при нагреве [9].

При температуре 100–150°C происходит химическое взаимодействие высвобождающейся воды с цементом, благодаря чему имеет место ускоренное схватывание последнего.

При температуре свыше 300°C вода из межзернового пространства постепенно проникает через оболочку новообразований к негидратированной части цементного зерна. Появляющиеся новообразования большего объема по сравнению с исходными материалами давят изнутри на оболочку, приводя к ее разрушению. Это приводит к формированию трещиноватой структуры, поэтому такой бетон характеризуется низкими прочностными свойствами и долговечностью.

Рабочая гипотеза локального возрастания прочности, коэффициента интенсивности напряжения при нормальном отрыве и энергии разрушения состоит в процессе самопаривания бетона (по А.Ф. Милованову, В.М. Прядко), в результате чего происходит уплотнение и гидратация цементного камня вследствие удаления воды из геля двухвалентного силиката и усиленной кристаллизации гидроксида кальция. Вероятно, влияющими факторами будут вид и тонкость помола добавки [10].

Феномен хрупкого разрушения логично рассмотреть с позиции следующих деструктивных процессов:

1. Разрушающее поровое давление. Разрушение происходит при накоплении пара в порах от нагретого бетона, где влияющими факторами являются проницаемость бетона, влагосодержание и скорость нагрева.

2. Растрескивание от термического нагрева. Разрушение происходит от термического воздействия, когда температурный градиент в бетоне создает сжимающее напряжение у поверхности бетона и растягивающее в

более холодном участке элемента, где влияющими факторами являются расширение заполнителя, скорость нагрева и прочность бетона при растяжении.

3. Совместное действие порового давления и термического нагрева. Хрупкое разрушение происходит при комбинации порового давления и термического нагрева у поверхности с образованием внутренних трещин, их развитием параллельно поверхности при высоких растягивающих напряжениях. Это сопровождается внезапным высвобождением энергии и сильным разрушением в зоне нагретой поверхности.

Механика разрушения в терминах коэффициентов интенсивности напряжений позволяет численно исследовать хрупкое разрушение, представляющее собой процесс, при котором происходила усадка бетона одновременно с расширением заполнителя. Решена задача образования радиальных трещин (нормального отрыва), возникновение которых связано с разницей модулей упругости и коэффициентов линейного расширения зерен заполнителя и цементно-песчаного раствора (рис. 6). Вклад радиальных и тангенциальных растягивающих напряжений в бетоне при нагреве оценен с использованием аналитических решений А. Перлмана и Дж. Си.

Коэффициент интенсивности напряжений определяется из выражения:

$$K_{I,t} = p \sqrt{\pi l} \frac{[1 - \alpha(r)] f(l/R)(M - R)^2}{(M - R)^2 - r^2} (1 + g), \quad (5)$$

где  $p$  – давление, МПа;  $\pi$  – математическая константа, равная 3,14;  $l$  – длина радиальной трещины, м;

$$\alpha(r) = 2(1 - \mu_1)r / (r^2 + (1 - 2\mu_1)(M - R)^2 + [(M - R)^2 - r^2](1 - \mu_2)(M - R)E_1 / [(1 + \mu_1)(M - R - l)E_2]);$$

$f(l/R) = 2,26 - (l/R) \cdot 0,15$ ;  $M$  – расстояние между зернами, м;  $R$  – средний радиус зерна заполнителя, м;  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – коэффициенты Пуассона цементного камня и заполни-

Таблица 2

$K_{IC}$ , МН/м <sup>3/2</sup>	$G_p$ , Н/м	$l_c$ , м
>0,8	>14	≥0,03

Причинами хрупкого разрушения в высокопрочном бетоне при нагреве являются его влагосодержание, состав и структура, напряженно-деформированное состояние, вызванное давлением пара в замкнутых порах бетона, а также скорость нагрева.

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

$$F = \frac{\alpha_F \alpha_{br} \beta}{K_{IC} \lambda_{\kappa}} \cdot \frac{E \rho_0 W_3}{n_p}, \quad (8)$$

где  $\alpha_F$  – коэффициент пропорциональности,  $1,16 \cdot 10^{-2}$  Вт·м<sup>5/2</sup>·кг<sup>-1</sup>;  $\alpha_{br}$  – коэффициент температурной деформации расширения бетона, °С<sup>-1</sup>;  $\beta$  – коэффициент изменения модуля упругости бетона при нагреве;  $K_{IC}$  – критический коэффициент интенсивности напряжения, МН/м<sup>3/2</sup>;  $\lambda_{\kappa}$  – коэффициент теплопроводности бетона, Вт/(м·°С);  $E$  – модуль упругости бетона при нормальных условиях, МПа;  $\rho_0$  – плотность бетона в сухом состоянии, кг/м<sup>3</sup>;  $W_3$  – объемная эксплуатационная влажность бетона, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $n_p$  – общая пористость бетона, %.

При  $F \leq 4$  в бетоне хрупкое разрушение не происходит. При  $F > 6$  происходит хрупкое разрушение, интервал критерия от 4 до 6 является потенциально опасным. Параметры формулы (9) определяются для температуры бетона 200–300°С.

Критерий хрупкости  $F$  на основе текущих (для температуры 20, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700°С) значений  $K_{IC}$ ,  $E$ ,  $\rho_0$ ,  $W_3$ ,  $n_p$ , полученных авторами экспериментально, графически представлен на рис. 8.

На основе анализа экспериментальных исследований предложены критерии хрупкости для высокопрочного бетона при высокой температуре и рекомендованы их пороговые значения (табл. 2), которые определяются по разработанной методике для бетона при  $t = 20$ °С.

Для эксплуатируемых конструкций разработана специальная методика на основе испытания бетона методом упругого отскока прибором «ИПМ-1Б» (рис. 1, а). Он внедрен в научно-исследовательской лаборатории «Промышленное и гражданское строительство» БНТУ совместно с Лабораторией контактно-динамических методов контроля Института прикладной физики НАН Беларуси (внесен в реестр средств измерений Республики Беларусь).

Критерии хрупкости для высокопрочного бетона при высокой температуре для эксплуатируемых кон-



Рис. 8. Расчетные значения критерия хрупкости  $F$  при нагреве (формула 8)

теля соответственно;  $r = l + R$ ;  $g = (1,7 + 14\alpha_0)l / (M - 2R)$ ;  $\alpha_0 = G_1 / G_2$ ;  $G_1$  – модуль сдвига матрицы, МПа;  $G_2$  – модуль сдвига заполнителя, МПа.

В контактной трещине на границе крупного заполнителя и цементно-песчаного раствора при нагреве (рис. 7)  $K_I$  и  $K_{II}$  рассчитываются по формулам:

$$K_{I,r} = 2p(1-\alpha)^{-1} \sqrt{\pi R \sin \theta} \{ G_1(1+\chi_2)[G_1(1+\chi_2) + G_2(1+\chi_1)] \varepsilon^{\beta(\theta+\pi)} / \{ (G_1+G_2\chi_1)[G_2(1+\chi_1)+2G_1(1+\chi_2)] - G_2(1+\chi_1)(G_2+G_1\chi_2)(\cos \theta - 2\beta \sin \theta) \varepsilon^{-2\beta\theta} \}; \quad (6)$$

$$K_{I,r} = 2pR^\beta(1+\alpha)^{-1} \sqrt{\pi R \sin \theta} \{ G_1(1+\chi_2)[G_1(1+\chi_2) + G_2(1+\chi_1)(1-2\beta) \varepsilon^{\beta(\theta+\pi)} \varepsilon^{-\beta \ln 2 \sin \theta}] / \{ (G_1+G_2\chi_1)[G_2(1+\chi_1) + 2G_1(1+\chi_2)] - G_2(1+\chi_1)(G_2+G_1\chi_2)(\cos \theta - 2\beta \sin \theta) \varepsilon^{-2\beta\theta} \}; \quad (7)$$

где  $\alpha = (G_2 + G_1\chi_2) / (G_1 + G_2\chi_1)$ ;  $\chi_1 = (3 - \mu_1) / (1 + \mu_1)$ ;

$$\chi_2 = (3 - \mu_2) / (1 + \mu_2); \quad \beta = (1/2\pi) \ln \alpha.$$

Бетон с микрокремнеземом более плотный, и закупоривание пара в порах и высокое давление пара, соизмеримое с прочностью при растяжении, вызывают раскрекивание.

Хрупкое разрушение является взрывным, сложно прогнозируемым, носит катастрофический характер при температуре свыше 300°С, оголяет защитный слой железобетонных конструкций, вследствие чего прямое воздействие высокой температуры на арматуру ускоряет процесс деструкции.

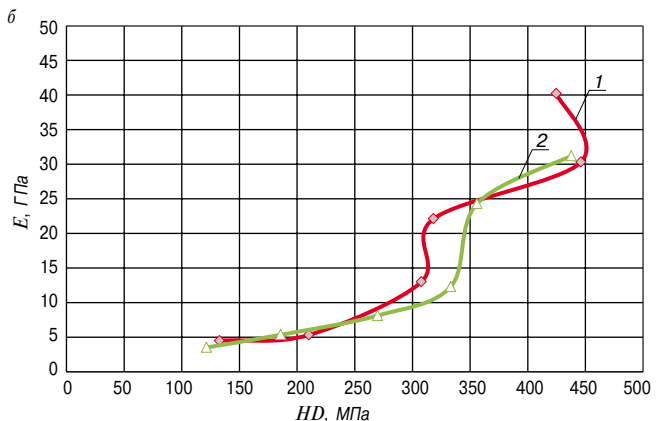
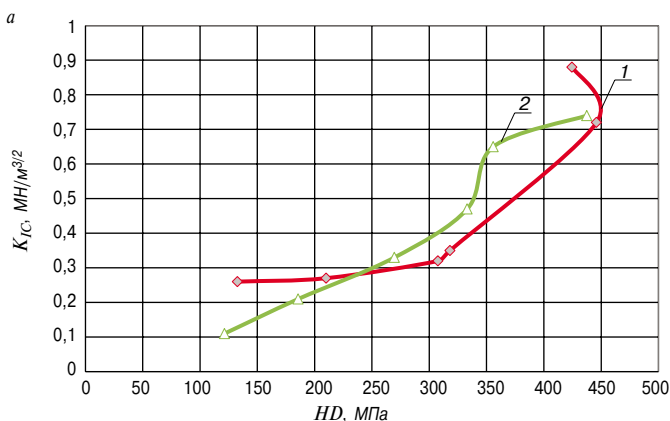


Рис. 9. Зависимость поверхностной твердости  $HD$  от коэффициента интенсивности напряжения при нормальном отрыве  $K_{IC}$  (а) и от динамического модуля упругости  $E_d$  (б)

струкций определяются на основе зависимости  $E_d$  и  $K_{IC}$  от поверхностной твердости  $HD$  (рис. 9).

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

#### Выводы.

1. Предложены критерии возникновения взрывного разрушения высокопрочного бетона (для изготавливаемых конструкций) в терминах силовых и энергетических параметров механики разрушения, значения которых соответствуют  $K_{IC}>0,8$  МН/м<sup>3/2</sup>;  $G_i>14$  Н/м;  $l_c\geq 0,03$  м, при нормальной температуре имеющие физический смысл и научно обоснованные методики.
2. Выполнена экспериментальная многопараметрическая оценка прочностных, деформативных свойств, силовых и энергетических характеристик высокопрочного бетона в диапазоне температуры от 100 до 700<sup>o</sup>C.
3. Разработаны методы экспериментального определения коэффициентов интенсивности напряжения при нормальном отрыве и поперечном сдвиге высокопрочного бетона, подвергнутого воздействию высоких температур, подтвержденные патентами на изобретение Республики Беларусь и Российской Федерации.
4. Для эксплуатируемых конструкций разработана и апробирована методика неразрушающего контроля, позволяющая определить поверхностную твердость бетона  $HD$ , а через нее по экспериментальным зависимостям рассчитать требуемые пороговые значения  $K_{IC}$ .

#### Список литературы

1. Патент ВУ 16193. *Способ определения критического коэффициента интенсивности напряжения высокопрочного бетона* / Леонович С.Н., Литвиновский Д.А. Заявл. 30.03.2010. Опубл. 30.08.2012.
2. Патент ВУ 16194. *Способ определения критического коэффициента интенсивности напряжения высокопрочного бетона* / Леонович С.Н., Литвиновский Д.А. Заявл. 30.03.2010. Опубл. 30.08.2012.
3. Патент ВУ 19170. *Способ определения критического коэффициента интенсивности напряжения высокопрочного бетона* / Леонович С.Н., Литвиновский Д.А. Опубл. 30.06.2015.
4. Патент RU 2621618. *Способ определения критического коэффициента интенсивности напряжения высокопрочного бетона* / Леонович С.Н., Литвиновский Д.А., Ким Л.В. Опубл. 06.06.2017.
5. Патент RU 2621623. *Способ определения критического коэффициента интенсивности напряжения высокопрочного бетона* / Леонович С.Н., Литвиновский Д.А., Ким Л.В. Опубл. 06.06.2017.
6. Литвиновский Д.А., Зверев В.Ф., Леонович С.Н. Исследования механических свойств высококачественного бетона в условиях высокотемпературного нагрева // *Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов Европейского союза в области строительства: Сб. науч.-техн. ст. (материалы науч.-метод. семинара)*. Минск. 29 мая 2012 г. Ч. 2. С. 84–91.
7. Леонович С.Н., Литвиновский Д.А. Аналитические зависимости прочностных, деформативных, силовых и энергетических параметров высокопрочного бетона при нагреве // *Вестник Белорусского национального технического университета*. 2011. № 4. С. 30–34.
8. Литвиновский Д.А. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при воздействии высоких температур. В кн.: Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях: В 2 ч. Минск, 2016. Ч. 1. Гл. 1. С. 12–160.
9. Леонович С.Н., Зверев В.Ф., Литвиновский Д.А. Критерии хрупкого разрушения высокопрочного бе-

тона. *Механика разрушения строительных материалов и конструкций: Материалы VIII Академических чтений РААСН*. Казань. 2014. С. 169–173.

10. Литвиновский, Д.А., Леонович С.Н. Критерии хрупкости высокопрочного конструкционного бетона при воздействии высоких температур: конструкции изготавливаемые и эксплуатируемые. Технология строительства и реконструкции: Сб. трудов БНТУ. Минск, 2017. С. 293–301.

#### References

1. Patent BY 16193. *Sposob opredeleniya kriticheskogo koefitsienta intensivnosti napryazheniya vysokoprochnogo betona* [The method of determining the critical stress intensity factor of high strength concrete]. Leonovich S.N., Litvinovsky D.A. Declared 30.03.2010. Published 30.08.2012. (In Russian).
2. Patent BY 16194. *Sposob opredeleniya kriticheskogo koefitsienta intensivnosti napryazheniya vysokoprochnogo betona* [The method of determining the critical stress intensity factor of high strength concrete]. Leonovich S.N., Litvinovsky D.A. Declared 30.03.2010. Published 30.08.2012. (In Russian).
3. Patent BY 19170. *Sposob opredeleniya kriticheskogo koefitsienta intensivnosti napryazheniya vysokoprochnogo betona* [The method of determining the critical stress intensity factor of high strength concrete]. Leonovich S.N., Litvinovsky D.A. Published 30.06.2015. (In Russian).
4. Patent RU 2621618. *Sposob opredeleniya kriticheskogo koefitsienta intensivnosti napryazheniya vysokoprochnogo betona* [The method of determining the critical stress intensity factor of high strength concrete]. Leonovich S.N., Litvinovsky D.A., Kim L.V. Published 06.06.2017. (In Russian).
5. Patent RU 2621623. *Sposob opredeleniya kriticheskogo koefitsienta intensivnosti napryazheniya vysokoprochnogo betona* [The method of determining the critical stress intensity factor of high strength concrete]. Leonovich S.N., Litvinovsky D.A., Kim L.V. Published 06.06.2017. (In Russian).
6. Litvinovsky D.A., Zverev V.F., Leonovich S.N. Studies of mechanical properties of high-quality concrete in conditions of high-temperature heating. *Problems of implementation of design standards and European Union standards in construction: collection of scientific works.-tech. article (scientific and method. seminar)*. Minsk. 29 may 2012. Part 2, pp. 84–91. (In Russian).
7. Leonovich S.N., Litvinovsky D.A. Analytical dependences of strength, deformation, force and energy parameters of heated high-strength concrete. *Vestnik Belorusskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011. No. 4, pp. 30–34. (In Russian).
8. Litvinovsky D.A. Prochnost', treshchinostoykost' i dolgovechnost' konstruksionnogo betona pri vozddeistvii vysokikh temperatur. V kn. Prochnost', treshchinostoykost' i dolgovechnost' konstruksionnogo betona pri temperaturnykh i korrozionnykh vozddeistviyakh: v 2 ch [Strength, crack resistance and durability of structural concrete at high temperatures. In book Strength, crack resistance and durability of structural concrete under temperature and corrosive effects. In 2 parts]. Minsk. 2016. Part 1. Ch. 1, pp. 12–160. (In Russian).
9. Leonovich S.N., Zverev V.F., Litvinovsky D.A. Criteria of brittle fracture of high-strength concrete. *Fracture Mechanics of materials and structures: proceedings of the VIII Academic readings RAACS*. Kazan. 2014, pp. 169–173. (In Russian).
10. Litvinovsky D.A., Leonovich S.N. Criteria of brittle strength of structural concrete at high temperatures: design manufactured and operated. Technology of construction and reconstruction: a collection of works BNTU. Minsk. 2017, pp. 293–301. (In Russian).