

Academia. Архитектура и строительство, № 4, стр. 117–123.

Academia. Architecture and Construction, no. 4, pp. 117–123.

Исследования и теория

Научная статья

УДК 691.3

DOI: 10.22337/2077-9038-2024-4-117-123

Критерий прочности бетона при объемном напряженном состоянии и действии повышенных температур

Карпенко Николай Иванович (Москва). Доктор технических наук, профессор, академик РААСН. Российская академия архитектуры и строительных наук (127025, Россия, Москва, ул. Новый Арбат, д. 19. РААСН); Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (Россия, 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21. НИИСФ РААСН). Эл. почта: niisf_lab9n@mail.ru

Карпенко Сергей Николаевич (Москва). Доктор технических наук. Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (Россия, 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21. НИИСФ РААСН). Эл. почта: niisf_lab9n@mail.ru

Моисеенко Георгий Александрович (Москва). Кандидат технических наук. Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (Россия, 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21. НИИСФ РААСН). Эл. почта: gecklock@yandex.ru

Аннотация. Строительство и проектирование массивных зданий и сооружений, работающих в условиях одновременного действия неоднородного силового нагружения и температурных воздействий, требует развития соответствующих методик расчёта. В данной статье рассматривается построение критериев прочности бетонных конструкций при объёмном напряжённом состоянии в случае совместного действия силовых напряжений и повышенных температур. Разработан полный спектр зависимостей для критериев прочности бетона в условиях повышенных температур – при трёхосном сжатии, сжатии-растяжении и трёхосном растяжении. Построены теоретические кривые критериев прочности для всех трёх случаев на примере бетона класса по прочности на сжатие B60.

Ключевые слова: объёмное напряжённое состояние, критерии прочности бетона, температурные воздействия, трёхосное сжатие, трёхосное растяжение, сжатие-растяжение

Для цитирования. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Моисеенко Г.А. Критерий прочности бетона при объёмном напряжённом состоянии и действии повышенных температур // Academia. Архитектура и строительство. – 2024. – № 4. – С. 117–123. – DOI: 10.22337/2077-9038-2024-4-117-123.

Criterion of Concrete Strength under Volumetric Stress State and Elevated Temperatures

Karpenko Nikolai I. (Moscow). Doctor of Sciences in Technology, Professor. The Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (21, Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russia. NIISF RAASN). E-mail: niisf_lab9n@mail.ru

Karpenko Sergey N. (Moscow). Doctor of Sciences in Technology. The Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (21, Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russia. NIISF RAASN). E-mail: niisf_lab9n@mail.ru

Moiseenko Georgiy A. (Moscow). Candidate of Sciences in Technology. The Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (21, Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russia. NIISF RAASN). E-mail: gecklock@yandex.ru

Abstract. The construction and design of massive buildings and structures operating under the simultaneous action of non-axial force loading and temperature effects require the development of appropriate calculation methods. The paper deals with the construction of strength criteria for concrete structures under a volumetric stressed state in the case of joint action of force stresses and elevated temperatures. A full range of dependencies for the strength criteria of concrete under elevated temperatures – in triaxial compression, compression-tension, and triaxial tension – has been developed. The theoretical curves of strength criteria for all three cases are constructed on the example of concrete of compressive strength class B60.

Keywords: volumetric stress state, concrete strength criteria, temperature effects, triaxial compression, triaxial tension, compression-tension

For citation. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Moiseenko G.A. Criterion of Concrete Strength under Volumetric Stress State and Elevated Temperatures. In: *Academia. Architecture and Construction*, 2024, no. 4, pp. 117–123, doi: 10.22337/2077-9038-2024-4-117-123.

В практике построения конструктивных решений отдельных сооружений всё большее значение приобретают массивные решения, работающие в условиях совместного действия нагрузок и повышенных температур. Критерии прочности таких бетонных конструкций при объёмном напряжённом состоянии в случае совместного действия силовых напряжений и повышенных температур ещё находятся в стадии разработки.

В статье дано развитие составного критерия прочности бетона при объёмном напряжённом состоянии на более общий случай действия напряжений и повышенных температур.

Выделяются три вида напряжённого состояния: трёхосное сжатие, сжатие-растяжение и трёхосное растяжение, которые стыкуются на границах напряжённого состояния.

Целью исследования является разработка критерия прочности бетона при действии различных режимов нагрева и силового нагружения объёмными напряжениями.

Общие критерии прочности бетона при объёмном напряжённом состоянии разрабатывались в работах многих исследователей. Подробный обзор работ представлен в [1–8]. Однако при общем подходе обычно не удаётся с одинаковой точностью описать критерии прочности при напряжённых состояниях сжатие–растяжение и трёхосного сжатия из-за большой разницы в прочности бетона при сжатии и растяжении. Для устранения этого недостатка принят для развития составной критерий прочности бетона, разработка которого

представлена в работах [4; 8], при этом для проверки составного критерия использовалась опыты [9–14], которые проводились при нормальной температуре.

При действии повышенных температур изменяются: прочность на сжатие (напряжения в вершине диаграммы сжатия)

$$\hat{\sigma}_{bT} = \hat{\sigma}_b \gamma_{bT}, \tag{1}$$

прочность на растяжение (напряжения в вершине диаграммы растяжения)

$$\hat{\sigma}_{btT} = \hat{\sigma}_{bt} \gamma_{btT}, \tag{2}$$

где γ_{bT} , γ_{btT} – соответствующие коэффициенты изменения прочности на сжатие и растяжение принимаемые по представленной ниже таблице 1 согласно СП 27.13330 2017¹ [15] в зависимости от трёх видов нагрева:

1Т – кратковременного, 2Т – длительного, 3Т – длительного с увлажнением.

При расчёте конструкций при нормальной температуре по первой группе предельных состояний

$$\hat{\sigma}_b = -R_b, \hat{\sigma}_{bt} = R_{bt} \tag{3}$$

¹ СП 27.13330.2017 «Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур» (<https://docs.cntd.ru/document/456081630>).

Таблица 1. Коэффициенты изменения прочности на сжатие и прочности на растяжение при нагреве

Коэффициенты	Вид нагрева	Значение коэффициентов γ_{bT} , γ_{btT} при температуре бетона в °С				
		50°С	70°С	100°С	200°С	300°С
γ_{bT}	1Т	1,0	0,85	0,9	0,8	0,65
	2Т	1,0	0,85	0,9	0,8	0,5
	3Т	1,0	0,65	0,4	0,6	-
γ_{btT}	1Т	1,0	0,7	0,7	0,6	0,4
	2Т	1,0	0,7	0,7	0,5	0,2
	3Т	1,0	0,5	0,3	0,4	-

Соответственно при расчёте по второй группе предельных состояний

$$\hat{\sigma}_b = -R_{bn} = -R_{bser}, \quad \hat{\sigma}_{bt} = R_{bntn} = R_{bt,ser} \quad (4)$$

При действии повышенных температур $\hat{\sigma}_b, \hat{\sigma}_{bt}$ заменяется на

$$\hat{\sigma}_{bT} = \hat{\sigma}_b \gamma_{bT}, \quad \hat{\sigma}_{btT} = \hat{\sigma}_{bt} \gamma_{btT}. \quad (5)$$

При анализе экспериментальных данных $\hat{\sigma}_b$ и $\hat{\sigma}_{bt}$, $\hat{\sigma}_{bT}$ и $\hat{\sigma}_{btT}$ – представляют напряжения в вершинах диаграмм одноосного сжатия и растяжения соответственно без учёта действия и с учётом действия повышенных температур.

Критерий прочности бетона при трёхосном сжатии

Следуя [4], критерий прочности для бетона при трёхосном сжатии записывается в следующем виде:

$$\hat{\sigma}_3 = k_c \cdot \hat{\sigma}_b \cdot \gamma_{bT} + \beta_{\Pi} \cdot \sigma_1, \quad (6)$$

где k_c – функция влияния промежуточного напряжения σ_2 на прочность, определяемая по зависимости:

$$-\frac{c\hat{\sigma}_{bt}\gamma_{btT}}{\hat{\sigma}_b\gamma_{bT}}[1 - d\mu_{\sigma} - (1 - d)\mu_{\sigma}^3 - e(1 - \mu_{\sigma})^2], \quad (7)$$

где μ_{σ} – параметр Лоде-Надаи:

$$\mu_{\sigma} = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}. \quad (8)$$

Коэффициенты c, e, d принимаются для обычных тяжёлых бетонов равными: $c \approx 5$; $e \approx 0,44$; $d \approx 0,8$.

Параметр β_{Π} не является постоянной величиной и описывается согласно [4; 8] дробной функцией следующего вида:

$$\beta_{\Pi} = \frac{1 + a' - a\frac{\sigma_1}{\sigma_3}}{b + (f_2 - b)\frac{\sigma_1}{\sigma_3}} = \frac{f_1 - a\frac{\sigma_1}{\sigma_3}}{b + (f_2 - b)\frac{\sigma_1}{\sigma_3}}, \quad (9)$$

где a, b, f_1, f_2 – параметры материала.

Параметр β_{Π} может быть представлен следующим образом:

$$\beta_{\Pi} = \frac{f_1 - a\frac{\sigma_1}{\sigma_3}}{b + (f_2 - b)\frac{\sigma_1}{\sigma_3}} = \frac{f_1\sigma_3 - a\sigma_1}{b\sigma_3 + (f_2 - b)\sigma_1}. \quad (10)$$

Расчётный критерий прочности бетона при трёхосном сжатии может быть получен путём подстановки выражения (10) в (6) при $\hat{\sigma}_3 = \sigma_3$:

$$\sigma_3^2 b + a\sigma_1^2 + \sigma_1\sigma_3[(f_2 - b) - f_1] - k_c\hat{\sigma}_b\gamma_{bT}b\sigma_3 - (f_2 - b)k_c\hat{\sigma}_b\gamma_{bT}\sigma_1 = 0. \quad (11)$$

Вводя для компонент критерия (11) обозначения в виде:

$$\lambda_1 = -k_c\hat{\sigma}_b\gamma_{bT}b + \sigma_1[(f_2 - b) - f_1], \quad \lambda_2 = a\sigma_1^2 - (f_2 - b)k_c\hat{\sigma}_b\gamma_{bT}\sigma_1, \quad (12)$$

получаем следующее решение квадратного уравнения (11):

$$\sigma_3 = \hat{\sigma}_3 = \frac{-\lambda_1 - \sqrt{\lambda_1^2 - 4b\lambda_2}}{2b}. \quad (13)$$

Для сопоставления с результатами экспериментальных исследований критерий (11) удобно представлять в относительных величинах напряжений относительно призменной прочности $\hat{\sigma}_b\gamma_{bT}$. В результате получаем:

$$\tilde{\sigma}_3^2 b + \tilde{\sigma}_1\tilde{\sigma}_3[(f_2 - b) - f_1] - k_c\tilde{\sigma}_3 b + a\tilde{\sigma}_1^2 - (f_2 - b)k_c\tilde{\sigma}_1 = 0, \quad (14)$$

где

$$\tilde{\sigma}_1 = \frac{\sigma_1}{\hat{\sigma}_b\gamma_{bT}}; \quad \tilde{\sigma}_3 = \frac{\sigma_3}{\hat{\sigma}_b\gamma_{bT}}. \quad (15)$$

При этом в условиях (12), (13):

$$\lambda_1 = -k_c b + \tilde{\sigma}_1[(f_2 - b) - f_1]; \quad \lambda_2 = a\tilde{\sigma}_1^2 - (f_2 - b)k_c\tilde{\sigma}_1. \quad (16)$$

Зависимости (14) – (16) могут быть использованы для подбора параметров a, b, f_1, f_2 с целью получения наилучшей сходимости с экспериментальными данными.

В основном использовались зависимости (11) без учёта влияния температурного нагрева.

Для случаев неравномерного трёхосного сжатия ($\sigma_3 < \sigma_2 < \sigma_1 < 0$) в условии (11) предлагаются следующие зависимости для параметров материала:

$$f_1 = f_2 = 0,5; \quad (17)$$

$$a = -0,16 \cdot \hat{\sigma}_b \cdot \gamma_{bT} + 0,63; \quad (18)$$

$$b = -0,001 \cdot \hat{\sigma}_b \cdot \gamma_{bT} + 0,195. \quad (19)$$

Для случаев трёхосного сжатия при равномерном боковом обжатии, когда $\sigma_3 \leq (\sigma_1 = \sigma_2) < 0$, наилучшая сходимость при отсутствии температурного нагрева достигается при следующих значениях параметров:

$$a = -0,2; \quad b = 0,07. \quad (20)$$

Плоское сжатие. В случае плоского сжатия (при $\sigma_1 = 0$) зависимость (8) записывается

$$\mu_{\sigma} = 1 - 2 \frac{\sigma_2}{\sigma_3} \quad (21)$$

При этом зависимости (6), (7) принимают вид:

$$\hat{\sigma}_3 = k_c \hat{\sigma}_b \gamma_{bT}, \quad (22)$$

$$k_c = 1 - \frac{c\hat{\sigma}_{bt}\gamma_{btT}}{\hat{\sigma}_b\gamma_{bT}} \varphi_k, \quad (23)$$

где

$$\varphi_k = \left[1 - d + 2d \frac{\sigma_2}{\sigma_3} - 4e \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_3} \right)^2 - (1 - d) \left(1 - 2 \frac{\sigma_2}{\sigma_3} \right)^3 \right], \quad (24)$$

$c = 5, e = 0,44, d = 0,8.$

Пример 1. Рассмотрим результаты определения предельных значений $\hat{\sigma}_3$ и $\hat{\sigma}_2$ для класса бетона В60 при плоском сжатии и температурах разогрева бетона: $t = 50^\circ\text{C}$, $t = 100^\circ\text{C}$, $t = 200^\circ\text{C}$, $t = 300^\circ\text{C}$ для отношений $\sigma_2/\sigma_3 = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$. Согласно СП 63.13330.2018², для В60:

$$\hat{\sigma}_{bt} = R_{btn} = 2,75 \text{ МПа}, \quad \hat{\sigma}_b = -R_{bn} = -43,0 \text{ МПа} \quad (25)$$

Пусть $\sigma_2 = 0$, $t = 50^\circ\text{C}$, тогда $\varphi_k = 0$, $k_c = 1$, $\gamma_b = 1$ согласно табл. 1, $\hat{\sigma}_3 = \hat{\sigma}_b = -R_{bn}$;

Примем $\sigma_2/\sigma_3 = 0,2$; $t = 50^\circ\text{C}$. При этом

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{btT} &= 1, \gamma_{bT} = 1, \\ \varphi_k &= [1 - 0,8 + 1,6 \cdot 0,2 - 4 \cdot 0,44 (0,2)^2 - (1 - 0,8)(1 - 2 \cdot 0,2)^3] = \\ &= [0,2 + 0,32 - 0,0704 - 0,0432] = 0,4064; \\ k_c &= 1 - \frac{5 \cdot 2,75}{-43,0} \cdot 0,4064 = 1 + 0,135 = 1,130 \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

$$\hat{\sigma}_{b3} = 1,130 \cdot (-43,0) \cdot 1 = -48,59 \text{ МПа}. \quad (27)$$

Далее полагая $\sigma_2/\sigma_3 = \hat{\sigma}_2/\hat{\sigma}_3$ и принимая $\sigma_2/\sigma_3 = 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$ определяем следующие значения $\hat{\sigma}_3$ по зависимости (22) при действии температур $t = 50^\circ\text{C}$, $t = 100^\circ\text{C}$, $t = 200^\circ\text{C}$, $t = 300^\circ\text{C}$.

² СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» (<https://docs.cntd.ru/document/554403082>).

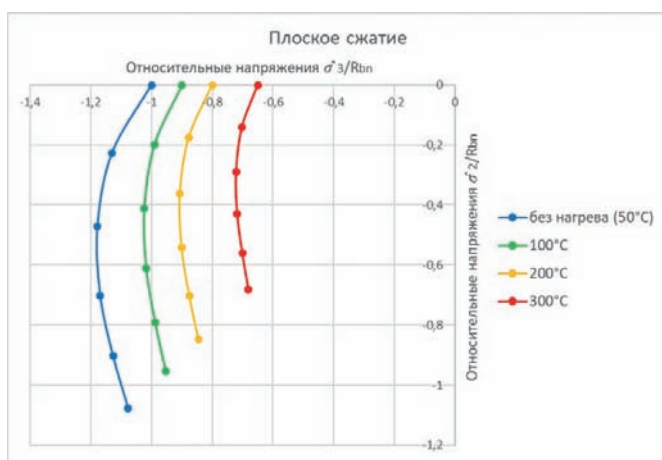


Рис. 1. Прочность бетона при плоском сжатии в условиях действия повышенных температур. График выполнен авторами статьи

Результаты расчетов представлены в таблице 2.

На рисунке 1 представлены зависимости относительных напряжений $\hat{\sigma}_3/R_{bn}$ от $\hat{\sigma}_2/R_{bn}$ в случае плоского сжатия при $t = 50^\circ\text{C}$, $t = 100^\circ\text{C}$, $t = 200^\circ\text{C}$, $t = 300^\circ\text{C}$.

Запись критерия прочности в случае двухосного сжатия с растяжением по третьему направлению ($\sigma_1 > 0$; $\sigma_2 \leq 0$; $\sigma_3 < 0$)

Критерий прочности бетона записывается в виде:

$$(\hat{\sigma}_1)^2 + 2a\hat{\sigma}_1\hat{\sigma}_2 + \left[\frac{(1-2c)\hat{\sigma}_3}{1-2c\hat{\sigma}_3} \right]^p \leq 1, \quad (28)$$

где p – степень ($p = 1 \div 2$), $\hat{\sigma}_1 = \sigma_1/\hat{\sigma}_{bt}\gamma_{btT}$, $\hat{\sigma}_2 = \sigma_2/\hat{\sigma}_b k_c \gamma_{bT}$, $\hat{\sigma}_3 = \sigma_3/k_c \hat{\sigma}_b \gamma_{bT}$, k_c , определяется по формуле (24), a, c – параметры, зависящие от прочности бетона, кроме этого параметр c зависит от степени p .

При $p=1$

$$c \approx 0,35 + \frac{\hat{\sigma}_b \gamma_{bT} + 20 \text{ МПа}}{75 \text{ МПа}} \quad \text{или} \quad c \approx 0,35 - \frac{B-30}{B100} \quad (29)$$

(с ограничением $0,35 \geq c \geq -0,15$).

При $p=2$

$$c \approx 0,2 + 1,5 \frac{\hat{\sigma}_b \gamma_{bT} + 20 \text{ МПа}}{75 \text{ МПа}} \quad \text{или} \quad c \approx 0,2 - 1,5 \frac{B-30}{B100} \quad (30)$$

(с ограничением $0,2 \geq c \geq -0,35$).

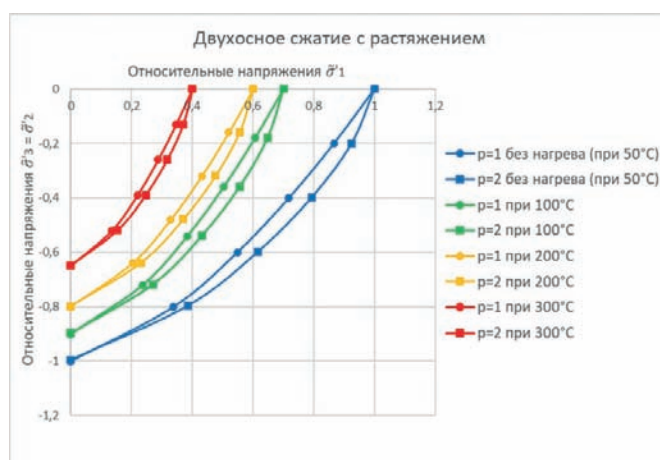


Рис. 2. Прочность бетона при двухосном сжатии с растяжением в условиях действия повышенных температур. График выполнен авторами статьи

Таблица 2. Результаты определения значений $\hat{\sigma}_3$ и $\hat{\sigma}_2$ при плоском сжатии и действии повышенных температур

$\sigma_2/(\sigma_3 = \hat{\sigma}_2/\hat{\sigma}_3)$	φ_k	$t=50^\circ\text{C}$	$t=100^\circ\text{C}$	$t=200^\circ\text{C}$	$t=300^\circ\text{C}$
		$\hat{\sigma}_3$ МПа	$\hat{\sigma}_3$ МПа	$\hat{\sigma}_3$ МПа	$\hat{\sigma}_3$ МПа
0	0	-43	-38,7000	-34,4000	-27,9500
0,2	0,4064	-48,588	-42,6116	-37,7528	-30,1852
0,4	0,5568	-50,656	-44,0592	-38,9936	-31,0124
0,6	0,5280	-50,260	-43,7820	-38,756	-30,854
0,8	0,3968	-48,456	-42,5192	-37,6736	-30,1324
1,0	0,2400	-46,300	-41,0100	-36,3800	-29,2700

Параметр a принимается равным:

$$a = 0,1 - 0,2 \frac{\sigma_{bt} \gamma_{bt} + 20 \text{ МПа}}{50 \text{ МПа}} \text{ или } a \approx 0,1 + 0,3 \frac{B-30}{B100}. \quad (31)$$

В случае, когда $\tilde{\sigma}_2 = \tilde{\sigma}_3 = \tilde{\sigma}$, из (28) следует:

$$\tilde{\sigma}_1 = -a\tilde{\sigma} + \sqrt{(a\tilde{\sigma})^2 - \left[\frac{(1-2c)\tilde{\sigma}}{1-2c\tilde{\sigma}} \right]^p} + 1. \quad (32)$$

Пример 2, построенный по критерию (32).

Вначале, полагая $\tilde{\sigma} = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$, определяются соответствующие значения $\tilde{\sigma}_1$. Затем, учитывая, что $\tilde{\sigma} = \tilde{\sigma}_3 = \frac{\sigma_3}{k_c \sigma_{bt} \gamma_{bt}}$, $-\frac{\tilde{\sigma}_3'}{k_c \gamma_{bt}}$; $\tilde{\sigma}_1 = \frac{\sigma_1}{\sigma_{bt} \gamma_{bt}} = \frac{\tilde{\sigma}_1'}{\gamma_{bt}}$, строится график $\tilde{\sigma}_1' - \tilde{\sigma}_3'$ при $\tilde{\sigma}_3' = \tilde{\sigma}_2'$, представленный на рисунке 2.

Запись критерия прочности в случае растяжения по двум направлениям и сжатия по третьему направлению ($\sigma_1 \geq 0$; $\sigma_2 \geq 0$; $\sigma_3 \leq 0$)

Критерий прочности записывается:

$$(\tilde{\sigma}_1)^2 + a[(\tilde{\sigma}_2)^2 + (\tilde{\sigma}_3)^2] \leq 1, \quad (33)$$

где $\tilde{\sigma}_1 = \sigma_1 / \sigma_{bt} \gamma_{bt} = \frac{\tilde{\sigma}_1'}{\gamma_{bt}}$; $\tilde{\sigma}_2 = \sigma_2 / \sigma_{bt} \gamma_{bt} = \frac{\tilde{\sigma}_2'}{\gamma_{bt}}$; $\tilde{\sigma}_3 = \sigma_3 / \sigma_{bt} \gamma_{bt} = -\frac{\tilde{\sigma}_3'}{\gamma_{bt}}$; параметры a и c определяются по формулам (29) ÷ (31).

В частном случае, когда $\tilde{\sigma}_1 = \tilde{\sigma}_2$, из формулы (33) следует:

$$\tilde{\sigma}_2 = \sqrt{\frac{1 - \left[\frac{(1-2c)\tilde{\sigma}_3}{1-2c\tilde{\sigma}_3} \right]^p}{(1+a)}} \quad (34)$$

Пример 3, по критерию (34).

При построениях графиков используются: $\tilde{\sigma}_1' = \tilde{\sigma}_1 \cdot \gamma_{bt}$; $\tilde{\sigma}_2' = \tilde{\sigma}_2 \cdot \gamma_{bt}$; $\tilde{\sigma}_3' = -\tilde{\sigma}_3 \cdot \gamma_{bt}$. Результаты построения представлены на рисунке 3.

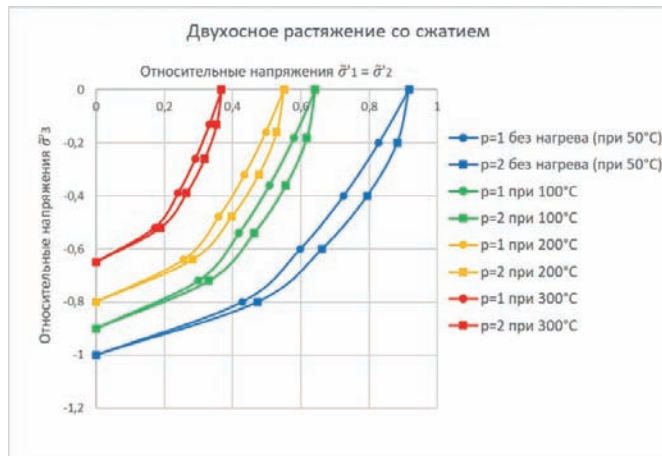


Рис. 3. Прочность бетона при двухосном растяжении со сжатием в условиях действия повышенных температур. График выполнен авторами статьи

В другом частном случае, когда $\sigma_2 = 0$; $\sigma_1 > 0$; $\sigma_3 < 0$ (случай сжатия–растяжения при плоском напряжённом состоянии), зависимость (33) преобразовывается к виду:

$$\tilde{\sigma}_1 = \sqrt{1 - \left[\frac{(1-2c)\tilde{\sigma}_3}{1-2c\tilde{\sigma}_3} \right]^p} \quad (35)$$

Запись критерия прочности бетона при трёхосном растяжении ($\sigma_1 > 0$; $\sigma_2 \geq 0$; $\sigma_3 \geq 0$).

Прочность обеспечивается, если выполняется условие:

$$(\tilde{\sigma}_1)^2 + a[(\tilde{\sigma}_2)^2 + (\tilde{\sigma}_3)^2] \leq 1, \quad (36)$$

где: $\sigma_1 / \sigma_{bt} \gamma_{bt} = \tilde{\sigma}_1' / \gamma_{bt}$; $\sigma_2 / \sigma_{bt} \gamma_{bt} = \tilde{\sigma}_2' / \gamma_{bt}$; $\sigma_3 / \sigma_{bt} \gamma_{bt} = \tilde{\sigma}_3' / \gamma_{bt}$.

Для железобетонных элементов критерии (28)–(36) выступают как критерии образования трещин в бетоне.

Пример 4. Рассматриваются графики критерия (36) при: 1) $\tilde{\sigma}_2' = \tilde{\sigma}_3'$ и 2) $\tilde{\sigma}_2' = 0$. Результаты построения представлены на рисунке 4.

Выводы

Таким образом, разработаны зависимости для построения критериев прочности бетона при действии повышенных температур при всех видах неодноосного силового нагружения – при трёхосном сжатии, сжатии–растяжении и трёхосном растяжении. Предложенные зависимости могут быть использованы при проектировании массивных бетонных и железобетонных конструкций, работающих в условиях неодноосного нагружения и повышенных температур.

Список источников

1. Гвоздев, А.А. Расчёт несущей способности конструкций по методу предельного равновесия / А.А. Гвоздев. – Москва : Стройиздат, 1949. – 280 с. – Текст : непосредственный.
2. Гениев, Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона / Г.А. Гениев, В.Н. Киссюк, Г.А. Тюпин. – Москва : Стройиздат, 1974. – 196 с. – Текст : непосредственный.

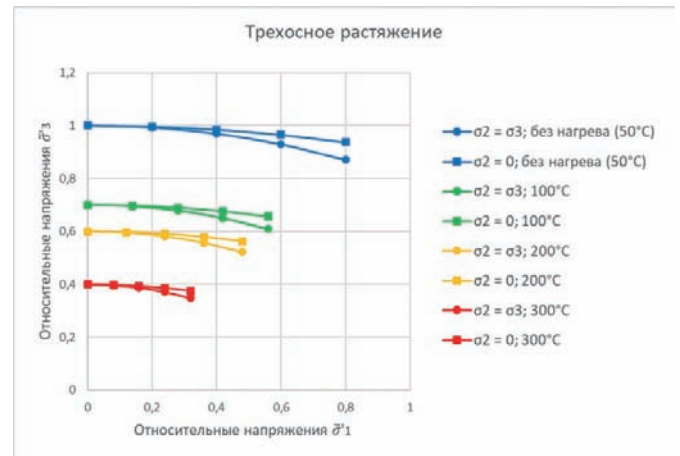


Рис. 4. Прочность бетона при трёхосном растяжении в условиях действия повышенных температур. График выполнен авторами статьи

3. Карпенко, Н.И. Об одной характерной функции прочности бетонов, при трёхосном сжатии / Н.И. Карпенко. – Текст : непосредственный // Строительная механика и расчёт сооружений. – 1982. – № 2 – С. 33–36.

4. Карпенко, С.Н. О разработке более совершенных трёхинвариантных критериев прочности бетонов / С.Н. Карпенко. – Текст : непосредственный // Известия Орловского государственного технического университета. «Строительство. Транспорт». – 2007. – № 2 (14). – С. 42–49.

5. Карпенко, Н.И. Общие модели механики железобетона / Н.И. Карпенко. – Москва : Стройиздат, 1996. – 412 с.

6. Карпенко, Н.И. К определению прочности бетона при трёхосном растяжении и смешанных напряжённых состояниях сжатие-растяжение / Н.И. Карпенко, С.Н. Карпенко, М.Л. Ухатский. – Текст : непосредственный // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2013. – Выпуск 31-2 (50). – С. 358–361.

7. Карпенко, Н.И. Составной критерий прочности бетона при объёмном напряжённом состоянии / Н.И. Карпенко, С.Н. Карпенко. – Текст : непосредственный // Бетон и железобетон – взгляд в будущее : Научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону : в 7 томах : Т. 4. – Москва : МГСУ, 2014. – С. 155–165.

8. Карпенко, Н.И. Определение прочности и ориентация площадок разрушения бетона при различных видах объёмного напряжённого состояния / Н.И. Карпенко, С.Н. Карпенко. – Текст : непосредственный // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2015. – Vol. 11, Issue 4. – P. 52–61.

9. Лукша Л.К. Прочности трубобетона / Л.К. Лукша – Минск : Вышэйшая школа, 1977. – 96 с.

10. Малашкин Ю.Н. О прочности бетона при трёхосном сжатии / Ю.Н. Малашкин, Б.В. Тябликов. – Текст : непосредственный // Свойства бетона, определяющие трещиностойкость : Труды XV координационного совещания по гидротехнике. – Ленинград, 1976. – Вып. 112.

11. Кудзис А.П. О погрешностях двухосных испытаний бетона / А.И. Ноткус, А.П. Кудзис. – Текст – непосредственный // Бетон и железобетон. – 1978. – № 6 (279). – С. 32–34.

12. Яшин, А.В. Критерии прочности и деформирования бетона при простом нагружении для различных видов напряжённого состояния / А.В. Яшин. – Текст : непосредственный // Расчёт и конструирование железобетонных конструкций / Под ред. А.А. Гвоздева. – Москва : НИИЖБ Госстроя СССР, 1977. – С. 48–57.

13. Яшин, А.В. Влияние неоднородных (сложных) напряжённых состояний на прочность и деформации бетона, включая область, близкую к разрушению / А.В. Яшин. – Текст : непосредственный // Прочность, жёсткость и трещиностойкость железобетонных конструкций / Под ред. А.А. Гвоздева. – Москва, 1981. – С. 3–9.

14. Hannaut D.S. Nomograms for the Failure of Plain Concrete Subjected to Short-Term Multiaxial Stresses // Strud. Eng. – 1974. – № 2, № 5. – P. 151–165.

References

1. Gvozdev A.A. Raschet nesushchei sposobnosti konstrukttsii po metodu predel'nogo ravnovesiya [Calculation of the Bearing Capacity of Structures Using the Limit Equilibrium Method]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1949, 280 p. (In Russ.)

2. Geniev G.A., Kissyuk V.N., Tyupin G.A. Teoriya plastichnosti betona i zhelezobetona [Theory of Plasticity of Concrete and Reinforced Concrete]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1974, 196 p. (In Russ.)

3. Karpenko N.I. Ob odnoi kharakternoi funktsii prochnosti betonov, pri trekhosnom szhatii [On One Characteristic Function of Concrete Strength under Triaxial Compression]. In: *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii* [Structural Mechanics and Analysis of Constructions], 1982, no.2 pp. 33–36. (In Russ.)

4. Karpenko S.N. O razrabotke bolee sovershennykh trekhinvariantnykh kriteriev prochnosti betonov [On the Development of more Advanced Tri-Invariant Criteria for Concrete Strength]. In: *Izvestiya Orlovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo i transport»* [Bulletin of the Oryol State Technical University. Series "Construction and Transport"], 2007, no. 2 (14), pp. 42–49. (In Russ., abstr.in Engl.)

5. Karpenko N.I. Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona [General models of reinforced concrete mechanics]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1996, pp. 60–91. (In Russ.)

6. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Ukhatskii M.L. K opredeleniyu prochnosti betona pri trekhosnom rastyazhenii i smeshannykh napryazhennykh sostoyaniyakh szhatie-rastyazhenie [Determination of Concrete Strength under Triaxial Tension and Combined Stressed State Shrinkage – Stretching]. In: *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of the Volgograd state architectural and Construction University. Series: Construction and Architecture], 2013, Iss. 31-2 (50), pp. 358–361. (In Russ., abstr. in Engl.)

7. Karpenko N.I., Karpenko S.N. Sostavnoi kriterii prochnosti betona pri ob"emnom napryazhennom sostoyanii [Composite Strength Criterion of Concrete under Volumetric Stress State]. In: *Beton i zhelezobeton – vzglyad v budushchee* [Concrete and Reinforced Concrete – a Look into the Future], Scientific works of the III All-Russian (II International) conference on concrete and reinforced concrete : in 7 volumes : Vol. 4. Moscow, MGSU Publ., 2014, pp.156–165. (In Russ., abstr. in Engl.)

8. Karpenko N.I., Karpenko S.N. Opredelenie prochnosti i orientatsiya ploshchadok razrusheniya betona pri razlichnykh vidakh ob"emnogo napryazhennogo sostoyaniya [Determination of the Strength and Orientation of Destruction Concretes Surfaces for Different Types of Bulk Stress State]. In: *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2015, Vol. 11, Iss. 4, pp. 52–61. (In Russ., in Engl.)

9. Luksha L.K. Prochnosti trubobetona [Strength of Pipe Concrete]. Minsk, Vysheishaya shkola Publ., 1977, 96 p. (In Russ.)

10. Malashkin Yu.N., Tyablikov B.V. O prochnosti betona pri trekhosnom szhatii [On the Strength of Concrete under Triaxial Compression]. In: *Svoistva betona, opredelyayushchie treshchinostoikost'* [Properties of Concrete That Determine Crack Resistance], Proceedings of the XV coordination conference on hydraulic engineering. Leningrad, 1976, Iss. 112. (In Russ.)

11. Kudzis A.P., Notkus A.-I. I. O pogreshnostyah dvuhosnyh ispytaniy betona [On the Errors of Biaxial Concrete Tests]. In: *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 1978, June, No. 6 (279), pp. 32–34. (In Russ.)

12. Yashin A.V. Kriterii prochnosti i deformirovaniya betona pri prostom nagruzhении dlya razlichnykh vidov napryazhennogo sostoyaniya [Criteria for the Strength and Deformation of Concrete under Simple Loading for Various Types of Stress State]. In A.A. Gvozdev (ed.): *Raschet i konstruirovaniye*

zhelezobetonnykh konstruksii [Calculation and Design of Reinforced Concrete Structures]. Moscow, NIIZhB Gosstroya SSSR Publ., 1977, pp. 48–57. (In Russ.)

13. Yashin A.V. Vliyanie neodnoosnykh (slozhnykh) napryazhennykh sostoyanii na prochnost' i deformatsii betona, vklyuchaya oblast', blizkuyu k razrusheniyu [Effect of Non-Uniaxial (Complex) Stress States on the Strength and Deformations of Concrete, Including the Region Close to Failure]. In A.A. Gvozdev (ed.): *Prochnost', zhestkost' i treshchinostoikost' zhelezobetonnykh konstruksii* [Strength, Stiffness and Crack Resistance of Reinforced Concrete Structures]. Moscow, 1981, pp. 3–29. (In Russ.)

14. Hannaut D.S. Nomograms for the Failure of Plain Concrete Subjected to Short-Term Multiaxial Stresses. In: *Strud. Eng.*, 1974, no. 2, no. 5, pp. 151–165. (In Engl.)