

В.И. КОЛЧУНОВ^{1,2}, К. КУЗНЕЦОВА², С.С. ФЕДОРОВ²¹Юго-западный государственный университет, г. Курск, Россия²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

МОДЕЛЬ КРИТЕРИЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ И ПРОЧНОСТИ ПЛОСКОНАПРЯЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ФИБРОБЕТОНА И ФИБРОЖЕЛЕЗОБЕТОНА

Аннотация. Предложен вариант критерия трещиностойкости и критерия прочности плосконапряженных конструкций из высокопрочного фибробетона, фиброжелезобетона. Критерии построены на основе теории пластичности бетона и железобетона Г.А. Гениева. В общем виде условие трещиностойкости плосконапряженного фибробетонного элемента представлено в виде эллипса со скачками на координатных осях главных приведенных напряжений. Условие прочности фиброжелезобетонного элемента описывается сложной фигурой, учитывающей трещинообразование в элементе при плоском напряженном состоянии. Характерные точки на координатных осях вычислены по физико-механическим характеристикам прочности бетона, полученным в результате испытаний высокопрочного фибробетона на одноосное сжатие и одноосное растяжение с «растворенной» фиброй в теле бетона и арматурой, приведенной к бетону. Даны результаты сравнительного анализа критериев трещиностойкости и прочности высокопрочного бетона и высокопрочного фибробетона в зависимости от процентного содержания волокна в теле бетона и типа применяемой фибры. Предложенные аналитические зависимости могут быть использованы для анализа трещиностойкости и прочности плосконапряженных железобетонных балок-стенок, армированных фиброй, угловых зон пологих оболочек и других плосконапряженных конструкций из высокопрочного фибробетона и фиброжелезобетона.

Ключевые слова: фибробетон, фиброжелезобетон, трещиностойкость, плосконапряженные конструкции, численным анализ.

V.I. KOLCHUNOV^{1,2}, K. KUZNETSOVA², S.S. FEDOROV²¹ South West State University, Kursk, Russia² Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

CRACK RESISTANCE OF PRESTRESSED REINFORCED CONCRETE FRAME STRUCTURE SYSTEMS UNDER SPECIAL IMPACT

Abstract. A variant of the crack resistance criterion and the strength criterion of plane-stressed structures made of high-strength fiber-reinforced concrete, fiber-reinforced concrete is proposed. The criteria are based on the theory of plasticity of concrete and reinforced concrete G.A. Genieva. In general, the condition for crack resistance of a plane-stressed fiber-reinforced concrete element is presented in the form of an ellipse with jumps on the coordinate axes of the main reduced stresses. The strength condition of a fiber-reinforced concrete element is described by a complex figure that takes into account cracking in the element under a plane stress state. The characteristic points on the coordinate axes are calculated from the physical and mechanical characteristics of concrete strength, obtained as a result of testing high-strength fiber-reinforced concrete for uniaxial compression and uniaxial tension with “dissolved” fiber in the concrete body and reinforcement reduced to concrete. The results of a comparative analysis of the criteria for crack resistance and strength of high-strength concrete and high-strength fiber-reinforced concrete are given, depending on the percentage of fiber in the concrete body and the type of fiber used. The proposed analytical dependences can be used to analyze the crack resistance and strength of plane-stressed reinforced

concrete beams-walls reinforced with fiber, corner zones of shallow shells and other plane-stressed structures made of high-strength fiber-reinforced concrete and fiber-reinforced concrete.

Keywords: *fiber-reinforced concrete, fiber-reinforced concrete, crack resistance, plane-stressed structures, numerical analysis.*

Введение

Изучению вопросов трещиностойкости и прочности плосконапряженных железобетонных конструкций посвящено значительное количество отечественных и зарубежных научных исследований, среди которых можно назвать публикации [1-5]. В этих и других работах приведены методики и результаты исследований плосконапряженных конструкций из обычных бетонов и фибробетона. Результаты исследований физико-механических свойств высокопрочного бетона и высокопрочного фибробетона [6-7] пока не получили отражения при решении задач силового сопротивления сложнапряженных железобетонных конструкций. Известны лишь отдельные исследования, например [8-10], в которых даны предложения по расчету плосконапряженных конструкций с учетом действительных свойств высокопрочных бетонов. В последние годы в связи с развитием технологий производства высокопрочного фибробетона все больше конструкций стало выполняться с применением таких материалов, в том числе конструкций, где особенно эффективен высокопрочный фиброжелезобетон. В то же время для увеличения объема применения таких материалов в ответственных сложнапряженных конструкциях совершенно недостаточно изучения лишь физико-механических свойств и технологии изготовления [11-18]. Как справедливо отмечено в работах [19-20] необходимы исследования особенностей деформирования таких конструкций при различных видах воздействий и, соответственно, различных напряженных состояниях, опираясь на отмеченные результаты исследований последних лет по изучению результатов одноосных испытаний образцов из высокопрочного бетона и фибробетона. Более того необходимо продолжить испытания этих материалов и при сложных напряженных состояниях. В связи с этим целью рассматриваемой работы явилось построение варианта критерия трещиностойкости и критерия прочности конструкций из высокопрочного фибробетона и фиброжелезобетона с учетом действительных свойств этих материалов при плоском напряженном состоянии.

Критерий трещиностойкости фибробетона и фиброжелезобетона

Для решения рассматриваемой задачи использована общая деформационная модель теории пластичности бетона и железобетона Г.А. Гениева [21]. В общем виде условие трещиностойкости на основе этой модели применительно к фибробетону может быть записано в координатах $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$:

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) - (R_{fb} - R_{fbt})(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) - R_{fb}R_{fbt} = 0 \quad (1)$$

Здесь R_{fb} – предел прочности при одноосном сжатии (призменная прочность высокопрочного фибробетона) и R_{fbt} – предел прочности при одноосном растяжении (предел прочности высокопрочного фибробетона на одноосный отрыв) являются основными расчетными параметрами.

Применительно к плоскому напряженному состоянию данное уравнение примет вид:

$$\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 - (R_{fb} - R_{fbt})(\sigma_1 + \sigma_2) - R_{fb}R_{fbt} = 0 \quad (2)$$

Рассмотрим характерные частные случаи такого напряженного состояния:

1. При $\sigma_2 = 0$:

$$\sigma_1^2 - (R_{fb} - R_{fbt})\sigma_1 - R_{fb}R_{fbt} = 0; \quad (3)$$

$(\sigma_1)_1 = R_{fb}$ - одноосное сжатие;

$(\sigma_1)_2 = -R_{fbt}$ - одноосное растяжение.

2. При $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma''$:

$$(\sigma'')^2 - (R_{fb} - R_{fbt})(2\sigma'') - R_{fb}R_{fbt} = 0; \quad (4)$$

$\sigma_1'' = (R_{fb} - R_{fbt}) + \sqrt{R_{fb}^2 - R_{fb}R_{fbt} + R_{fbt}^2}$ - двухосное равномерное сжатие;

$\sigma_2'' = (R_{fb} - R_{fbt}) - \sqrt{R_{fb}^2 - R_{fb}R_{fbt} + R_{fbt}^2}$ - двухосное равномерное растяжение.

3. При $\sigma_1 = -\sigma_2$ - чистый сдвиг:

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + (-\sigma_1)^2 - R_{fb}R_{fbt} = 0; \quad (5)$$

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{R_{fb}R_{fbt}}{3}}; \quad \sigma_2 = -\sqrt{\frac{R_{fb}R_{fbt}}{3}}.$$

4. При условии, что $\frac{d\sigma_1}{d\sigma_2} = 0$ получим экстремальные значения σ_1 и σ_2 :

$$-\sigma_1 + 2\sigma_2 - (R_{fb} - R_{fbt}) = 0; \quad (6)$$

$$\sigma_1 = (R_{fb} - R_{fbt}) \pm 2\sqrt{\frac{R_{fb}^2 - R_{fb}R_{fbt} + R_{fbt}^2}{3}};$$

$$\sigma_2 = (R_{fb} - R_{fbt}) \pm \sqrt{\frac{R_{fb}^2 - R_{fb}R_{fbt} + R_{fbt}^2}{3}}.$$

Для высокопрочного фибробетона, условно, «растворяем» фибру в теле бетона и для графического представления критерия трещиностойкости примем физико-механические характеристики по данным экспериментальных исследований [7] (таблица 1). Согласно этим данным, значение призмочной прочности фибробетона класса В120 $R_{fb} = 128,6$ МПа, а предел прочности при одноосном растяжении $-R_{fbt} = 7$ МПа. Пользуясь этими характеристиками прочности и переводя их в относительные прочностные характеристики $\eta_1 = \sigma_1/R_{b,max}$ и $\eta_2 = \sigma_2/R_{b,max}$ в соответствии с зависимостями, (3)-(6), построена область трещиностойкости и область прочности для высокопрочного бетона (рисунок 1, кривая 1) и высокопрочного фибробетона (рисунок 1, кривая 2). При вычислении критерия трещиностойкости в областях «растяжение-сжатие» и «растяжение-растяжение» (заштрихованные участки) использованы нормативные характеристики бетона и фибробетона, а при вычислении критерия прочности высокопрочного бетона (рисунок 1, кривая 3) и высокопрочного фибробетона (рисунок 1, кривая 4) в области «сжатие-сжатие» использованы расчетные характеристики материалов.

Таблица 1 - Характеристики высокопрочного бетона и фибробетона класса В120[7]

	$R_{b,n}; R_{fb,n}, \text{МПа}$ $\gamma_b = 1$	$R_b; R_{fb}, \text{МПа}$ $\gamma_b = 1,3$	$R_{bt,n}; R_{fbt,n}, \text{МПа}$ $\gamma_{bt} = 1$	$R_{bt}; R_{fbt}, \text{МПа}$ $\gamma_{bt} = 1,3$
Бетон	85	52	4,2	2,25
Фибробетон	128,6	98,9	7	5,4

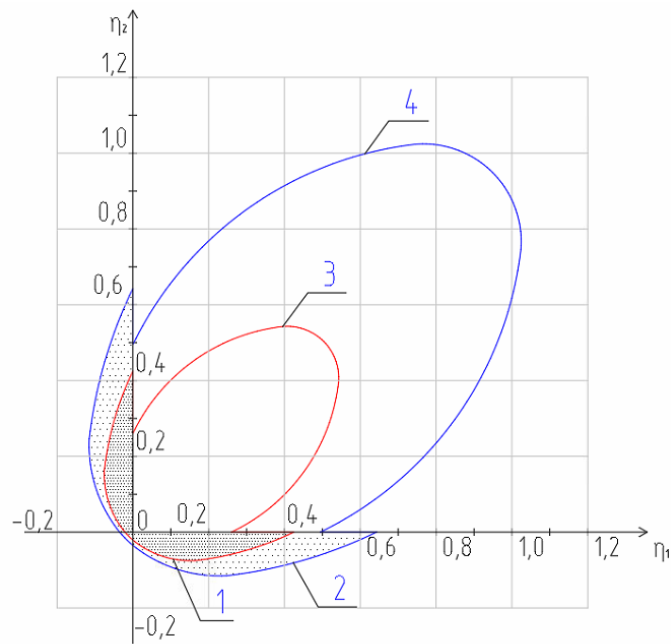


Рисунок 1 - Критерий трещиностойкости (1, 2) и критерий прочности (3, 4) высокопрочного бетона (1, 3) и высокопрочного фибробетона (2, 4) при плоском напряженном состоянии.

Из графика рисунка 1 можно видно, что при приложении сжимающих напряжений происходит заметное увеличение предельного растягивающего напряжения в сравнении с R_{fbt} , что соответствует опытным данным полученным в исследованиях [22].

Анализируя графики критерия прочности трещиностойкости (см. рисунок 1) видим, что относительные значения главных напряжений максимальны при сжатии: $\sigma_b = 108,54$ МПа, $\sigma_{bt} = 15,02$ МПа – при растяжении для высокопрочного бетона, а для высокопрочного фибробетона максимальные напряжения сжатия составляют $\sigma_{fb} = 204,71$ МПа, а растяжения - $\sigma_{fbt} = 23,02$ МПа. Введение фибры в высокопрочный бетон значительно увеличивает область трещиностойкости такого материала.

Приведенный в виде (2) критерий трещиностойкости высокопрочного фибробетона при плоском напряженном состоянии может быть обобщен и на высокопрочный фиброжелезобетон. Для этого, следуя, [21] примем некоторые дополнительные условия:

- армирование элементов выполняется ортогональными стержнями сонаправленными с осями координат:

- будем полагать, что в арматурных стержнях возникают только продольные нормальные напряжения (т.к. без бетона арматурная сетка является изменяемой системой при действии касательных напряжений).

Условие трещиностойкости по аналогии с (2) будет иметь вид:

$$\bar{\sigma}_x^2 - \bar{\sigma}_x \bar{\sigma}_y + \bar{\sigma}_y^2 - (R_{fb} - R_{fbt})(\bar{\sigma}_x + \bar{\sigma}_y) + 3\bar{\tau}_{xy} - \mu_x \sigma_{s0}(2\bar{\sigma}_x - \bar{\sigma}_y) - \mu_y \sigma_{s0}(2\bar{\sigma}_y - \bar{\sigma}_x) + (\mu_x^2 - \mu_x \mu_y + \mu_y^2) \sigma_{s0}^2 + (R_{fb} - R_{fbt})(\mu_x + \mu_y) \sigma_{s0} - R_{fb} R_{fbt} = 0 \quad (7)$$

Здесь, R_{fb} –предел прочности при одноосном сжатии (призменная прочность высокопрочного фибробетона), R_{fbt} –предел прочности при одноосном растяжении (предел прочности на одноосный отрыв высокопрочного фибробетона), $\bar{\sigma}_x$, $\bar{\sigma}_y$ –нормальные напряжения в бетоне приведенного сечения в направлении x и y, соответственно, $\bar{\tau}_{xy}$ –касательные напряжения в бетоне приведенного сечения, σ_{s0} –расчетное сопротивление арматуры растяжению, μ_x , μ_y –коэффициент армирования в направлении x и y, соответственно.

Нормальные и касательные напряжения в бетоне приведенного сечения $\bar{\sigma}_x, \bar{\sigma}_y, \bar{\tau}_{xy}$ можно записать через главные напряжения в этом сечении σ_1, σ_2 .

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_x &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\beta \\ \bar{\sigma}_y &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\beta \\ \bar{\tau}_{xy} &= \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\beta \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

В уравнении (8) угол β — угол между направлением большего главного нормального напряжения и положительным направлением оси x (рисунок 2).

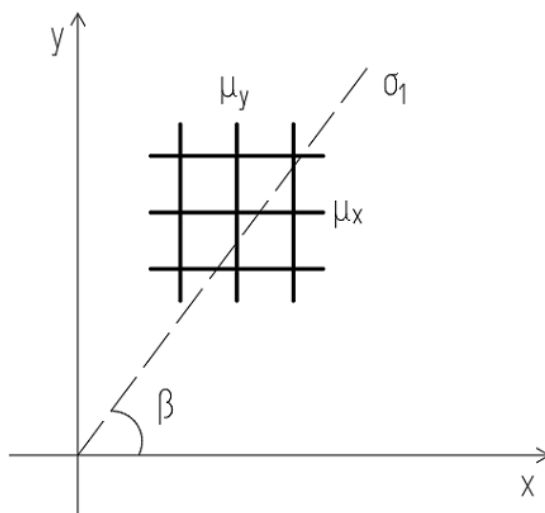


Рисунок 2 - Схема угла β между направлением большего главного нормального напряжения и положительным направлением оси x

Тогда условие прочности и трещиностойкости для фиброжелезобетонного элемента при плоском напряженном состоянии будет иметь вид:

$$\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2 - \left[(R_{fb} - R_{fbt}) + \left(\frac{\mu_x + \mu_y}{2} \sigma_T \right) \right] (\sigma_1 + \sigma_2) - 3 \frac{\mu_x - \mu_y}{2} \sigma_{s0} (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\beta (\mu_x^2 - \mu_x \mu_y + \mu_y^2) \sigma_{s0}^2 + (R_{fb} - R_{fbt}) (\mu_x + \mu_y) \sigma_{s0} - R_{fb} R_{fbt} = 0 \quad (9)$$

Будем полагать, что армирование элемента выполняется ортогонально расположенными стержнями, сонаправленными с осями координат, в которых возникают только продольные нормальные напряжения.

Рассмотрим частные случаи:

1. При $\sigma_2 = 0, \beta = 0, \mu_y = 0$ — одноосное напряженное состояние и одноосное армирование состояние:

$$\sigma_1^2 - (R_{fb} - R_{fbt} + 2\mu_x \sigma_{s0}) \sigma_1 + \mu_x^2 \sigma_{s0}^2 + (R_{fb} - R_{fbt}) \mu_x \sigma_{s0} - R_{fb} R_{fbt} = 0; \quad (10)$$

В случае сжатия $\mu_x = \mu > 0$: $\sigma_1 = R_{fb} + \mu \sigma_{s0}$;

В области сжатия σ_{s0} — расчетное сопротивление арматуры сжатию.

В случае растяжения ($\mu_x = -\mu$) после образования трещин растянутое сечение сопротивляется арматурой и для этого случая уравнение (10) принимает вид:

$$\sigma_2^2 + 2\mu_x \sigma_{s0} \sigma_2 + \mu_x^2 \sigma_{s0}^2 = 0; \quad (11)$$

$$\sigma_2 = -\mu \sigma_{s0}$$

В области сжатия σ_{s0} — расчетное сопротивление арматуры растяжению.

2. $\sigma_1 = \sigma_2$, $\mu_x = \mu_y$ – двухосное напряженное состояние:

$$\sigma_1^2 - 2(R_{fb} - R_{fbt} + \mu_x \sigma_{s0})\sigma_1 + \mu_x^2 \sigma_{s0}^2 + 2(R_{fb} - R_{fbt})\mu_x \sigma_{s0} - R_{fb} R_{fbt} = 0; \quad (12)$$

В случае двухосного сжатия $\mu_x = \mu > 0$ из уравнения (12) получим

$$\sigma_1 = \sqrt{R_{fb}^2 - R_{fb} R_{fbt} + R_{fbt}^2 + (R_{fb} - R_{fbt}) + \mu_x \sigma_{s0}};$$

В случае двухосного растяжения ($\mu_x = -\mu$) бетон после образования ортогонально пересекающихся трещин выключается из работы и все усилия воспринимает арматура. В этом случае уравнение (12) принимает вид:

$$\sigma_2^2 + 2\mu_x \sigma_{s0} \sigma_2 + \mu_x^2 \sigma_{s0}^2 = 0; \quad (13)$$

$$\sigma_2 = -\mu \sigma_{s0}.$$

3. При $\sigma_1 = -\sigma_2$, $\mu_x = -\mu_y$, $\beta = 0$ – чистый сдвиг с рационально расположенной арматурой:

$$\sigma_1^2 - 2\mu_x \sigma_{s0} \sigma_1 + \mu_x^2 \sigma_{s0}^2 - \frac{R_{fb} R_{fbt}}{3} = 0; \quad (14)$$

$$\sigma_1 = \zeta \cdot \sqrt{\frac{R_{fb} R_{fbt}}{3}} + \mu_x \sigma_{s0}.$$

При чистом сдвиге железобетонного элемента с трещинами учет нагельного эффекта и сил зацепления предполагается учитывать введением коэффициента ζ . Количественное значение этого коэффициента может быть получено экспериментально. До получения таких данных в первом приближении согласно анализа исследований [1, 22] значение ζ можно принять равным 0,1.

Коэффициент армирования μ определяем, используя известные формулы [24].

Для графического построения критерия прочности фиброжелезобетонного элемента принимаем по данным исследований Н.И. Карпенко [7] приведенным в таблице 1: призмная прочность высокопрочного фибробетона В120 $R_{fb} = 128,6$ МПа, а предел прочности при одноосном растяжении $R_{fbt} = 7$ МПа. Характеристики арматуры А500 и коэффициент армирования элемента ортогонально расположенной принимаем $\mu = 0,1\%$ примем по данным СП 63.13330.2018. Значения расчетного сопротивления арматуры растяжению равно значения расчетного сопротивления арматуры сжатию и составляет $R_s = 435$ МПа.

Для сопоставления критериев прочности характеристики высокопрочного железобетона приняты по СП 311.1325800.2017 (таблица 1).

Результаты графического сопоставления относительных критериев прочности высокопрочного железобетона и высокопрочного фиброжелезобетона при плоском напряженном состоянии приведены на рисунке 3.

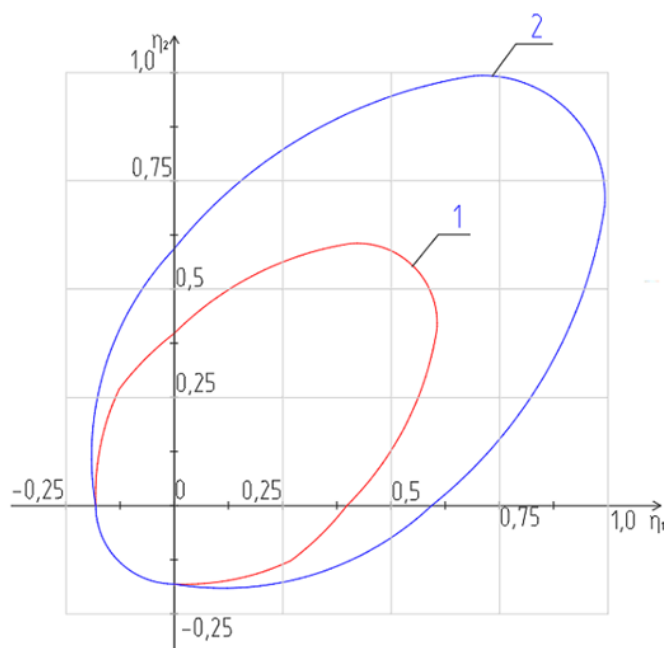


Рисунок 3 - Относительный критерий прочности высокопрочного железобетона (кривая 1) и высокопрочного фиброжелезобетона (кривая 2) при плоском напряженном состоянии.

Анализ результатов

Анализируя полученные критерии прочности, можно видеть, что учет разной сопротивляемости армированного элемента до и после образования трещин приводит к некоторому качественному изменению критерия прочности бетона при плоском напряженном состоянии (кривая 1) по сравнению с критерием трещиностойкости (см. рисунок 1). Критерий прочности высокопрочного железобетона и фиброжелезобетона с учетом наличия трещин в плосконапряженном элементе (кривая 2) остается «замкнутым» во всех четырех квадрантах. Арматура в обоих направлениях работает на растяжение до наступления в ней текучести. Уместно также отметить, что разная сопротивляемость сложнапряженного элемента в зависимости от вида напряженного состояния «сжатие-сжатие», «растяжение-сжатие», «растяжение-растяжение» и необходимости ее учета была отмечена еще в исследованиях Колчунова Вл.И., Заздравных Э.И. [22], Шапиро Г.И., Шапиро А.Г. [23] для плосконапряженных элементов платформенного стыка с односторонними связями.

Анализируя графики относительного критерия прочности (рисунок 3) видим, что количественные значения главных напряжений максимальны при двухосном сжатии и составляют для высокопрочного бетона: $\sigma_b = 145,28$ МПа, $\sigma_{bt} = 43,5$ МПа, а для высокопрочного фибробетона - $\sigma_{fb} = 238,21$ МПа. Максимальные напряжения в зоне двухосного растяжения, где на растяжение работает только арматура с принятым процентом армирования составляют $\sigma_{fbt} = 43,5$ МПа. Из графика 3 можно видеть, что прочность конструкции зависит не только от характеристик материала, но также от структуры сечения и односторонней работы бетона на растяжение после трещинообразования.

Был выполнен также анализ количественного изменения границ критерия трещиностойкости и критерия прочности высокопрочного фибробетона с различным процентом содержания фиброволокна (рисунок 4,а). При этом физико-механические характеристики фибробетона с различным процентом (по объему) содержания фиброволокна приняты по данным работы [6] (таблица 2).

Таблица 2 - Прочностные характеристики высокопрочного фибробетона с различным содержанием фибры [6]

Кол-во фибры, %	1,0 (80 кг/м ³)	1,5 (120 кг/м ³)	2,0 (150 кг/м ³)
$R_{fb,n}$, МПа	86,3	115,4	114,4
$R_{fbt,n}$, МПа	3,77	4,8	5,98
R_{fb} , МПа	66,39	88,77	88,0
R_{fbt} , МПа	2,9	3,69	4,6

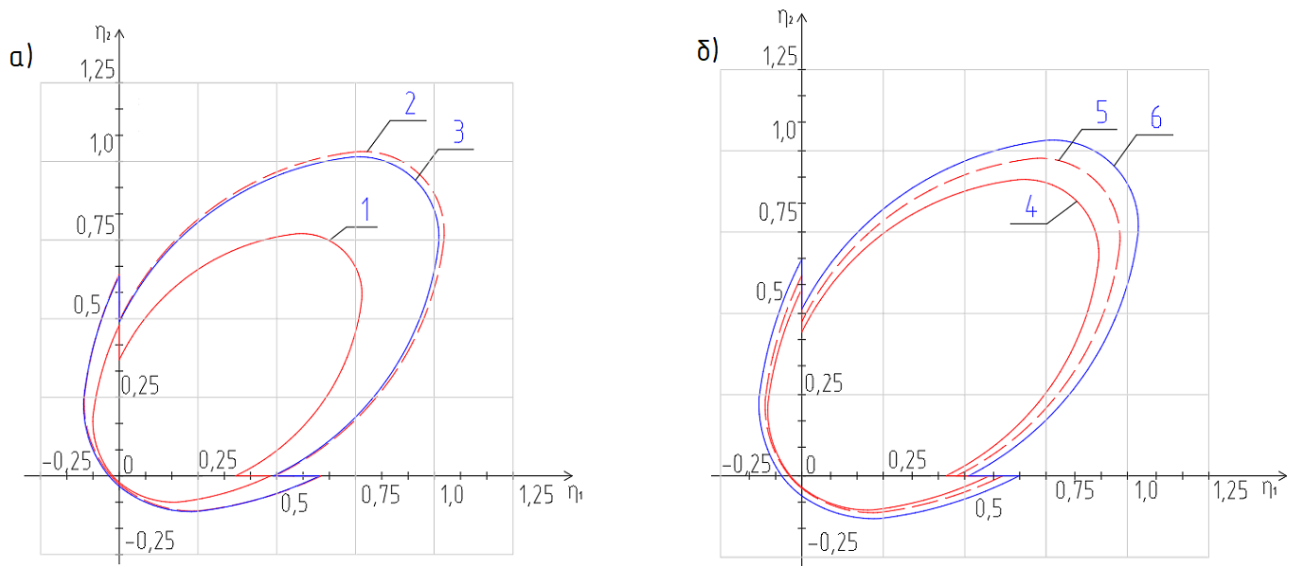


Рисунок 4 - Критерий трещиностойкости (квадранты 1, 3, 4) и критерий прочности (квадрант 2) высокопрочного фибробетона при плоском напряженном

а) с различным процентным содержанием фиброволокна: 1—1%; 2— 1,5%; 3— 2%;

б) с различным типом фибры: 4— фибробетон с анкерной фиброй со сжатыми концами; 5— фибробетон с анкерной фиброй с загнутыми концами; 6— фибробетон с волнообразной фиброй

Из рисунка можно видеть, что область трещиностойкости количественно существенно меняется при изменении процентного содержания фибры. Так, максимальные значения трещиностойкости при растяжении для высокопрочного фибробетона (1%) составляет $R_{fbt} = 15,02$ МПа. При увеличении количества волокон в составе бетона значения трещиностойкости растут до значений: $R_{fbt} = 19,97$ МПа, $R_{fbt} = 20,97$ МПа для 1,5% и 2,0%, соответственно. Таким образом, видим, что существует некоторое оптимальное содержание фибры в составе бетона (1,5-2,0%), дальнейшее превышение которого незначительно влияет на увеличение области трещиностойкости фибробетона. Скачок на эпюре критерия прочности и критерия трещиностойкости обусловлен учетом различных значений прочностных свойств для первой (критерий прочности) и второй (критерий трещиностойкости) групп предельных состояний.

Анализ влияния вида стальных фибр на область трещиностойкости приведен на рисунке 4,б. Данные о физиео-механических характеристиках фибробетона из фибровых волокон разных типов приняты по работе [24] и приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Прочностные характеристики высокопрочного фибробетона с различными видами фибры [24]

	Анкерная фибра со сжатыми концами	Анкерная фибра с загнутыми концами	Волнообразная фибра
$R_{fb,n}$, МПа	69,0	74,0	80,0
$R_{fbt,n}$, МПа	4,2	4,6	7,4
R_{fb} , МПа	53,08	56,92	61,54
R_{fbt} , МПа	3,23	3,54	5,69

Из рисунка 4,б можно видеть, что максимальное значение прочности при растяжении плосконапряжённого фибробетонного элемента $R_{fbt} = 15,81$ МПа достигается при армировании бетона волнообразной фиброй, а минимальные значения $R_{fbt} = 12,56$ МПа у фибробетонабетона с фиброй со сжатыми концами. Таким образом область трещиностойкости фибробетона зависит от сил сцепления фибры с бетоном и является максимальной при использовании фибры волнообразного вида.

Выводы

1. На основе теории пластичности бетона и железобетона Г.А. Гениева построен вариант критерия трещиностойкости и критерия прочности плосконапряженных конструкций из высокопрочного фибробетона фиброжелезобетона. Характерные точки на координатных осях при графическом отображении критерия получены с учетом требований к физико-механическим характеристикам материала для предельных состояний первой и второй групп и с учетом различного характера сопротивления сечения элементов до и после образования трещин.

2. Численным анализом критерия прочности фиброжелезобетонного элемента установлено, что даже при «растворении» арматуры в теле бетона область предельной прочности фибробетонного и фиброжелезобетонного элемента качественно отличны между собой. Область прочности фиброжелезобетонного элемента после образования трещин подобна области прочности плосконапряженной конструкции с односторонними связями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпенко Н. И. Теория деформирования железобетона с трещинами. М.: Стройиздат, 1976. 202 с.
2. Тесля В.А. Анализ напряженно-деформированного состояния балок-стенок // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2003. № 5 (36). С. 105-109.
3. Narayanan R., Darwish I. Y. S. Fiber Concrete Deep Beams in Shear // ACI Structural Journal. V.85. No. 2. Mar.-Apr. 1988. Pp. 141-149.
4. Smith K.N., Vantsiotis A.S. Shear Strength of Deep Beams // ACI Structural Journal. 1982. Vol.79. No.22. Pp. 201-213.
5. Yousef A.M., Agag Y.I.Y. Shear Behavior of High-Strength Fiber Reinforced Concrete Deep Beams.(Dept.C) // MEJ. Mansoura Engineering Journal. Article 3. Volume 26. Issue 2. Spring 2001. P. 28-42.
6. Карпенко Н.И., Каприелов С.С., Петров А.Н., Безгоднов И.М., Моисеенко Г.А., Степанов М.В., Чилин И.А. Исследование физико-механических и реологических свойств высокопрочных сталефибробетонов из самоуплотняющихся смесей // В сборнике: Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2017 году. Сборник научных трудов Российской академии архитектуры и строительных наук. Москва, 2018. С. 237-246.
7. Карпенко Н.И., Травуш В.И., Каприелов С.С., Мишина А.В., Андрианов А.А., Безгоднов И.М. Исследование физико-механических и реологических свойств высокопрочного сталефибробетона // Academia. Архитектура и строительство. №1. 2013. 148 с.
8. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Петров А.Н. Совершенствование методов расчета плоскостных железобетонных конструкций с учетом действительных свойств высокопрочных бетонов // Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. 2018. Т. 14. № 2. С. 78-89.
9. Dere Y., Koroglu M.A. Nonlinear FE modeling of reinforced concrete // International Journal of Structural and Civil Engineering Research. 2017. Т. 6. №. 1. С. 71-74.

10. Kamonna H. H. H. Nonlinear analysis of steel fiber reinforced concrete deep beams by ANSYS // Kufa Journal of Engineering. 2010. T. 2. №. 1.
11. Каприелов С.С., Чилин И.А. Сверхвысокопрочный самоуплотняющийся фибробетон для монолитных конструкций // Строительные материалы. 2013. № 7. С. 28-30.
12. Степанов М.В., Моисеенко Г.А. Диаграммы деформирования мелкозернистого высокопрочного бетона и высокопрочного сталефибробетона при сжатии // Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции. 2019. №3(83). С.11-21.
13. Хегай А.О., Кирилин Н.М., Хегай Т.С. Экспериментальные исследования деформативных свойств сталефибробетона повышенных классов // Вестник гражданских инженеров. 2020. №6 (83). С. 77-82.
14. Antonie E. Naaman. Fiber Reinforced Cement and Concrete Composites. Sarasota, Techno Press 3000; 1st edition, 2018. 765 p.
15. Iqbal S., Ali A., Holschemacher K., Bier T.A. Effect of change in micro steel fiber content on properties of High strength Steel fiber reinforced Lightweight Self-Compacting Concrete (HSLSCC) // Procedia Eng., 122. 2015. Pp. 88-94.
16. Korsun V., Vatin N., Franchi A., Korsun A., Crespi P., Mashtaler S. The Strength and Strain of High-Strength Concrete Elements with Confinement and Steel Fiber Reinforcement including the Conditions of the Effect of Elevated Temperatures. // International Scientific Conference Urban Civil Engineering and Municipal Facilities, SPbUCEME, 2015. Procedia Engineering, 2015. No. 117. P. 975 – 984.
17. Sivakumar V. et al. Experimental investigation on strength properties of hybrid fibre reinforced high strength concrete // Materials Today: Proceedings. 2021.
18. Wafa A.L. Fibre Reinforced Cement Composites // Cement Based Materials. 2018. Pp. 31-48.
19. Колчунов В.И., Колчунов В.И., Федорова Н.В. Деформационные модели железобетона при особых воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2018. №8. С. 54-60.
20. Колчунов В.И., Федоров В.С. Понятийная иерархия моделей в теории сопротивления строительных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 8. С. 16-23. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.08.16-23.
21. Гениев Г.А., Киссюк В.Н., Тюпин Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона. М.: Стройиздат, 1974. 316 с.
22. Колчунов В.И., Заздравных Э.И. Расчетная модель «нагельного эффекта» // Известия вузов. Строительство. 1996. № 10. С. 18-25.
23. Шапиро Г.И., Шапиро А.Г. Расчет прочности платформенных стыков панельных зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2008. № 1. С. 55–57.
24. Байков В.Н., Сигалов Э. Е. "Железобетонные конструкции. Общий курс." Учебник для вузов. -5-е изд., перераб. и доп.-М.: Стройиздат, 1991. 767 с.
25. Дворкин Л.И., Житковский В.В., Степасюк Ю.А., Ковальчук Т.В. Проектирование составов фибробетона с использованием экспериментально-статистических моделей // Технологии бетонов. 2016. № 11-12 (124-125). С. 29-35.

REFERENCES

1. Karpenko N.I. Teoriya deformirovaniya zhelezobetona s treshchinami. M.: Strojizdat, 1976. 202 s.
2. Teslya V.A. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya balok-stenok // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2003. № 5 (36). S. 105-109.
3. Narayanan R., Darwish I. Y. S. Fiber Concrete Deep Beams in Shear // ACI Structural Journal. V.85. No. 2. Mar.-Apr. 1988. Pp. 141-149.
4. Smith K.N., Vantsiotis A.S. Shear Strength of Deep Beams // ACI Structural Journal. 1982. Vol.79. No.22. Pp. 201-213.
5. Yousef A.M., Agag Y.I.Y. Shear Behavior of High-Strength Fiber Reinforced Concrete Deep Beams.(Dept.C) // MEJ. Mansoura Engineering Journal. Article 3. Volume 26. Issue 2. Spring 2001. P. 28-42.
6. Karpenko N.I., Kaprielov S.S., Petrov A.N., Bezgodov I.M., Moiseenko G.A., Stepanov M.V., CHilin I.A. Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh i reologicheskikh svoystv vysokoprochnykh stalefibrobetonov iz samouplotnyayushchihsya smesey // V sbornike: Fundamental'nye, poiskovye i prikladnye issledovaniya RAASN po nauchnomu obespecheniyu razvitiya arhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'noj otrasli Rossijskoj Federacii v 2017 godu. Sbornik nauchnykh trudov Rossijskoj akademii arhitektury i stroitel'nykh nauk. Moskva, 2018. S. 237-246.
7. Karpenko N.I., Travush V.I., Kaprielov S.S., Mishina A.V., Andrianov A.A., Bezgodov I.M. Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh i reologicheskikh svoystv vysokoprochnogo stalefibrobetona // Academia. Arhitektura i stroitel'stvo. 2013. №1. 148 s.
8. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Petrov A.N. Sovershenstvovanie metodov rascheta ploskostnykh zhelezobetonnykh konstrukcij s uchetom dejstvitel'nykh svoystv vysokoprochnykh betonov // Mezhdunarodnyj zhurnal po raschetu grazhdanskih i stroitel'nykh konstrukcij. 2018. T. 14. № 2. S. 78-89.

9. Dere Y., Koroglu M. A. Nonlinear FE modeling of reinforced concrete // International Journal of Structural and Civil Engineering Research. 2017. T. 6. №. 1. S. 71-74.
10. Kamonna H. H. H. Nonlinear analysis of steel fiber reinforced concrete deep beams by ANSYS // Kufa Journal of Engineering. 2010. T. 2. №. 1.
11. Kaprielov S.S., CHilin I.A. Sverhвысокопрочный самоуплотняющийся фибробетон для монолитных конструкций // Строительные материалы. 2013. № 7. S. 28-30.
12. Stepanov M.V., Moiseenko G.A. Diagrammy deformirovaniya melkozernistogo vysokoprochnogo betona i vysokoprochnogo stalefibrobetona pri szhatii//Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции. 2019. №3(83). S.11-21.
13. Hegaj A.O., Kirilin N.M., Hegaj T.S. Eksperimental'nye issledovaniya deformativnykh svoystv stalefibrobetona povyshennykh klassov // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2020. №6 (83). S. 77-82.
14. Antonie E. Naaman. Fiber Reinforced Cement and Concrete Composites. Sarasota, Techno Press 3000; 1st edition, 2018. 765 p.
15. Iqbal S., Ali A., Holschemacher K., Bier T.A. Effect of change in micro steel fiber content on properties of High strength Steel fiber reinforced Lightweight Self-Compacting Concrete (HSLSCC) // Procedia Eng., 122. 2015. Pp. 88-94.
16. Korsun V., Vatin N., Franchi A., Korsun A., Crespi P., Mashtaler S. The Strength and Strain of High-Strength Concrete Elements with Confinement and Steel Fiber Reinforcement including the Conditions of the Effect of Elevated Temperatures. // International Scientific Conference Urban Civil Engineering and Municipal Facilities, SPbUCEME, 2015. ProcediaEngineering, 2015. No. 117. P. 975 – 984.
17. Sivakumar V. et al. Experimental investigation on strength properties of hybrid fibre reinforced high strength concrete // Materials Today: Proceedings. 2021.
18. Wafa A.L. Fibre Reinforced Cement Composites // Cement Based Materials. 2018. Pp. 31-48.
19. Kolchunov V.I., Kolchunov V.I., Fedorova N.V. Deformatsionnye modeli zhelezobetona pri osobykh vozdeystviyakh // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2018. №8. S. 54-60.
20. Kolchunov V.I., Fedorov V.S. Ponyatijnaya ierarhiya modelej v teorii soprotivleniya stroitel'nykh konstrukcij // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2020. № 8. S. 16-23. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.08.16-23.
21. Geniev G.A., Kissyuk V.N., Tyupin G.A. Teoriya plastichnosti betona i zhelezobetona. M.: Strojizdat, 1974. 316 s.
22. Kolchunov V.I., Zazdravnyh E.I. Raschetnaya model' «nagel'nogo effekta» // Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. 1996. No 10. S.18-25.
23. SHapiro G.I., SHapiro A.G. Raschet prochnosti platformennykh stykov panel'nykh zdaniy // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2008. № 1. S. 55–57.
24. Bajkov V.N., Sigalov E. E. "Zhelezobetonnye konstrukcii. Obshchij kurs." Uchebnik dlya vuzov. -5-e izd., pererab. i dop.-M.: Strojizdat, 1991. 767 s.
25. Dvorkin L.I., ZHitkovskij V.V., Stepasyuk YU.A., Koval'chuk T.V. Proektirovanie sostavov fibrobetona s ispol'zovaniem eksperimental'no-statisticheskikh modelej // Tekhnologii betonov. 2016. № 11-12 (124-125). S. 29-35.

Информация об авторах:

Колчунов Виталий Иванович

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия,
Академик РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой уникальных зданий и сооружений,
ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет"
(НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций.
E-mail: asiorel@mail.ru

Кузнецова Карина Юрьевна

ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет"
(НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
магистр кафедры железобетонных и каменных конструкций.
E-mail: kerry.1998@list.ru

Федоров Сергей Сергеевич

ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет"
(НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве.
E-mail: FedorovSS@mgsu.ru

Information about authors:

Kolchunov Vitaliy Iv.

South-West State University, Kursk, Russia,
academician of RAACS, Doctor of Engineering, professor, head of the department of unique building and structures,
National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
professor of the department of reinforced concrete and stone structures.
E-mail: asiorel@mail.ru

Kuznetsova Karina Yu.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
master of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures.
E-mail: kerry.1998@list.ru

Fedorov Sergey S.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
candidate of technical sciences, Department of Information Systems, Technology and Automation in Construction.
E-mail: FedorovSS@mgsu.ru