ДИАГРАММЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА И ВЫСОКОПРОЧНОГО СТАЛЕФИБРОБЕТОНА ПРИ СЖАТИИ

СТЕПАНОВ М.В., МОЙСЕЕНКО Г.А.

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, Москва, Россия

Аннотация. Уникальные свойства высокопрочного сталефибробетона – снижение хрупкости, высокая трещиностойкость, повышенное сопротивление растяжению и другие – делают этот материал весьма привлекательным для использования в различных областях строительства. Однако, в настоящее время наши знания о свойствах этого материала еще не подкреплены достаточным количеством экспериментальных данных. Предлагаемая статья направлена на устранение этого пробела. В нашей работе проводится сравнение поведения сталефибробетона с рациональным содержанием фибры и его матрицы – мелкозернистого высокопрочного бетона при сжатии. Применяемая в описываемых экспериментах методика с включением в работу металлической трубы, выступающей как датчик силы и принимающей на себя часть нагрузки при напряжениях, близких к расчетному сопротивлению бетона, позволяет получить значения относительных деформаций, соответствующие призмочной прочности, что дает возможность построить полные диаграммы деформирования сталефибробетона. В результате испытаний подтвержден эффект «обоймы» при введении в матрицу бетона стальной фибры – снижение поперечных деформаций, повышение трещиностойкости. Характер разрушения также меняется и становится более плавным. В результате теоретической обработки данных откорректированы зависимости для расчета характеристик высокопрочного сталефибробетона при кратковременном действии сжимающей нагрузки.

Ключевые слова: мелкозернистый высокопрочный бетон, высокопрочный сталефибробетон, стальная фибра, дисперсное армирование, диаграммный метод расчета, полные диаграммы сжатия бетона

DEFORMATION DIAGRAMS OF FINE-GRAINED HIGH-STRENGTH CONCRETE AND HIGH-STRENGTH STEEL-FIBRO CONCRETE UNDER COMPRESSION

STEPANOV M. V., MOISEENKO G. A.

Research Institute of Construction Physics of RAACS, Moscow, Russia

Abstract. The unique properties of high-strength steel fiber concrete, such as reduced fragility, high crack resistance, increased tensile strength, and others, make this material quite attractive for using in various areas of construction. However, at present, our knowledge of the properties of this material is not yet supported by a sufficient amount of experimental data. The article aims to eliminate this gap. In our work is compared the behavior of the steel fiber concrete with rational fiber content and its matrix, fine-grained high-strength concrete under compression. The method used in the described experiments with the inclusion of a metal pipe acting as a force sensor and receiving a part of the load at stresses close to the design resistance of concrete allows to obtain the relative deformation values corresponding to prism strength. So, we get the opportunity to construct full strain diagrams of steel fiber concrete. As a result of the tests, the effect of a “clip” was confirmed: introduction of steel fiber into the concrete matrix causes a decrease in transverse deformations, increases crack resistance. The nature of the destruction also changes and becomes smoother. As a result of theoretical data processing, the dependences were corrected for calculating the characteristics of high-strength steel fiber concrete under the short-term action of a compressive load.

Keywords: fine-grained high-strength concrete, high-strength steel fiber concrete, steel fiber, dispersed reinforcement, diagram calculation method, full concrete compression diagrams

Введение

Высокопрочный сталефибробетон (ВСФБ) открывает широкие перспективы для ведения различных конструкций, работающих в сложных условиях, в том числе, для строительства высотных и мостовых сооружений. Однако, до настоящего времени данный материал не находит широкого применения в строительстве по двум причинам – из-за относительно высокой цены и из-за недостаточно глубокой изученности его свойств, как при кратковременной, так и при длительной работе. Естественно, поведение этого материала в различных условиях вызывает большой интерес у исследователей, как в России, так и за рубежом. Проводились исследования ВСФБ как с высоким содержанием фибры [1, 2], так и с пониженным [3]; написаны работы по теме принципа включения фибры в работу бетона [4], изучалось влияние повышенных температур на деформационные свойства сталефибробетона [5, 6, 7]; в работе [8] проведен анализ различных типов используемой фибры. В нашем материале речь идет о сравнении свойств ВСФБ с рациональным содержанием фибры 1,5% от объема и его «матрицы» - мелкозернистого высокопрочного бетона (МВБ) в возрасте 28 суток при кратковременном нагружении, а именно – исследуется вопрос о применимости существующих методов расчета бетона при сжатии для ВСФБ и МВБ.

Описание методики исследований

Для описания поведения сталефибробетона при сжатии использовались экспериментальные исследования [9], охватившие весь спектр физико-механических и реологических свойств МВБ и ВСФБ при кратковременном и длительном нагружении. Полные диаграммы деформирования изучались по двум сериям образцов-призм – одна из них изготавливалась без фибры, а во вторую вводилась прямая латунированная высокопрочная стальная фибра диаметром 0,3 мм длиной 13 мм в оптимальном соотношении 1,5% от объема смеси (120 кг/м^3) – согласно результатам исследований [9], такое содержание фибры является минимальным, при котором в полной мере проявляются положительные свойства сталефибробетона. Состав матрицы назначался в соответствии с [10, 11, 12]. Как для МВБ, так и для ВСФБ он принимался следующий:

• портландцемент марки ПЦ 500 ДОН	900 кг/м^3 ;
• суперпластификатор МБЗ-50К	360 кг/м^3 ;
• песок с $M_k = 2,5$	860 кг/м^3 ;
• вода	190 кг/м^3 .

Получение полных диаграмм деформирования образцов-призм при стандартном испытании на сжатие с применением индикаторов часового типа вызывает ряд трудностей. В настоящее время в российских и европейских нормах отсутствует единая методика получения предельных деформаций бетона, соответствующих призмочной прочности. Обычно при стандартном испытании нагрузку доводят до уровня $(0,7 \div 0,9)R_b$, после чего измерительные приборы снимают. Значение предельных деформаций в вершине диаграммы получают путем экстраполяции, что приводит порой к серьезным погрешностям. В нашем случае для исследования полных диаграмм деформирования МВБ и ВСФБ применялась методика, позволяющая получить полный закон изменения деформаций относительно уровня напряжений [13, 14]. Для этого использовалось устройство, которое изображено на рис. 1. Данное устройство состоит из трубы и двух крышек. Между трубой и верхней крышкой организуется зазор, равный $0,3 \div 0,5 \text{ мм}$, который позволяет проводить исследования физико-механических характеристик без участия трубы. На образец-призму наклеивается 8 тензорезисторов (5 продольных и 4 поперечных), концы которых выводятся с помощью колодок и проводов на внешнюю сторону трубы для подключения к регистрирующему прибору. Труба изготовлена из дуалюминия Д16Т, который обладает высоким уровнем упругой работы ($\sigma_r = 320 \text{ МПа}$) и низким модулем упругости ($E = 70000 \text{ МПа}$), что обуславливает его высокую чувствительность к деформации. Труба является датчиком силы, на который наклеены 4 продольных тензорезистора, соединенные последовательно, что позволяет регистрировать усилия в неза-

висимости от центровки трубы. Выбор толщины трубы зависит от разрушающей нагрузки образца. Разрушающая нагрузка не должна превышать предел упругой работы трубы. Перед испытанием проводится тарировка трубы, то есть определяется взаимосвязь между нагрузкой и изменением сопротивления тензорезисторов.

Методика испытания выглядит следующим образом. Выбирается ступень нагрузки, соответствующая 8-12 ступеням при обычных испытаниях. Выдержка на ступени принимается равной пяти минутам. На начальной стадии нагружения труба не участвует в процессе деформирования. Зазор между верхней крышкой и трубой позволяет отцентрировать образцы по физической оси и получить все физико-механические характеристики и, кроме того, сократить упругую деформацию трубы. После соприкосновения с трубой нагрузка распределяется между бетонным образцом и трубой. При падении напряжения в бетонном образце воспринимать возрастающую нагрузку будет труба, которая является датчиком силы. При приближении к пределу прочности в образце труба будет воспринимать все большую нагрузку и гасить энергию разрушения.

Рисунок 1 - Устройство, используемое при исследовании полных диаграмм деформирования МВБ и ВСФБ [13]

Методика обработки результатов экспериментальных данных состоит в следующем. После сопротивления трубы с верхней крышкой часть общей нагрузки передается на трубу. Чтобы определить нагрузку, действующую на образец, необходимо из общей нагрузки вычесть в соответствии с тарировочной зависимостью нагрузку, действующую на трубу. Затем полученная нагрузка делится на площадь образца и таким образом вычисляется соответствующее напряжение.

Результаты испытаний

Результаты испытаний представлены в табл. 1. и на рис. 2.

Таблица 1 - Результаты испытаний МВБ и ВСФБ

МВБ													
Продоль- ные	σ , МПа	10,7	21,4	32,1	42,8	53,5	64,2	74,9	85,6	90,95	96,30	101,65	107,0
	σ/R_b	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,85	0,9	0,95	1,0
	$\varepsilon_{b1} \times 10^5$	28	56	83	110	140	171	202	235	252	271	288	308
Попереч- ные	σ , МПа	10,7	21,4	32,1	42,8	53,5	64,2	74,4	85,6	90,95	96,30	101,65	107
	σ/R_b	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,85	0,9	0,95	1,0
	$\varepsilon_{b2} \times 10^5$	7	14	21	28	35	44	54	97	73	82	95	120
ВСФБ													
Продоль- ные	σ , МПа	12,19	24,4	36,6	48,8	60,0	73,1	85,3	97,5	103,6	109,7	115,8	121,9
	σ/R_b	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,85	0,9	0,95	1,0
	$\varepsilon_{b1} \times 10^5$	30	60	90	122	154	187	221	258	276	299	326	352
Попереч- ные	σ , МПа	12,19	24,4	36,6	48,8	60,0	73,1	85,3	97,5	103,6	109,7	115,8	121,9
	σ/R_b	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,85	0,9	0,95	1,0
	$\varepsilon_{b2} \times 10^5$	7	15	23	30	39	50	60	71	79	90	102	140

Рисунок 2 - Диаграммы деформирования ВСФБ и МВБ

Исследования на мелкозернистом высокопрочном бетоне и на ВСФБ показали, что характеры разрушения образцов различаются. Отличие заключается лишь в том, что разрушение МВБ происходит взрывоопасно с разлетанием кусков образца, а в случае с ВСФБ пластично, так как части образца связываются фиброй.

Сравнивая полные диаграммы деформирования МВБ и ВСФБ (рис. 2, табл. 1), а также характер изменения приращений модуля деформаций (ΔE_b), коэффициента поперечной деформации ($\Delta \mu_b$) и суммы объемных деформаций ($\sum \Delta Q$) на шагах нагружения для упругих и упругопластических деформаций (рис. 3 – 5, табл. 2 – 4), можно говорить о сдерживании стальной фиброй деформаций, которое на начальном этапе незначительно. В конце нагружения отмечается существенное сдерживание процесса разрушения, особенно у поперечных деформаций ВСФБ. Можно предположить, что по мере увеличения поперечных деформаций стальная фибра снимает часть нагрузки с матрицы за счет более высокого модуля упругости. Создается эффект обоймы, который сокращает поперечные деформации и повышает верхнюю границу трещинообразования. Надо полагать, что эффективность стальной фибры будет лучше проявляться при снижении класса бетона и повышении дозировки фибры.

Таблица 2 - Характер изменения приращений модуля деформаций (ΔE_b) на шагах нагружения для упругих и упругопластических деформаций

$\Delta E_b \text{ МПа} \times 10^{-3}$												
σ/R_b	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,85	0,9	0,95	1,0
МВБ	41,5	41,5	41,5	41,0	39,5	38	36	33	31	29	26,5	24
ВСФБ	42,5	42,5	42,5	42,5	41	39,5	35,5	33	31	28	25	18

Таблица 3 - Характер изменения коэффициента поперечной деформации ($\Delta \mu_b$) на шагах нагружения для упругих и упругопластических деформаций

$\Delta \mu_b$												
σ/R_b	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,85	0,9	0,95	1,0
МВБ	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,29	0,31	0,35	0,395	0,47	0,59	0,8
ВСФБ	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,28	0,3	0,33	0,37	0,43	0,51	0,7

Рисунок 3 - Характер изменения ΔE_b МПа $\times 10^{-3}$ ($\Delta E_b = \Delta \sigma_b / \Delta \varepsilon_{b1}$, где $\Delta \sigma_b$, $\Delta \varepsilon_{b1}$ - приращения напряжений и продольных деформаций на ступенях нагружения)

Рисунок 4 - Характер изменения $\Delta \mu_b$ ($\Delta \mu_b = \Delta \varepsilon_{b2} / \Delta \varepsilon_{b1}$, где $\Delta \varepsilon_{b2}$, $\Delta \varepsilon_{b1}$ - приращения поперечных и продольных деформаций на ступенях нагружения)

Таблица 4 - Характер изменения суммы объемных деформаций ($\sum \Delta Q$) на шагах нагружения для упругих и упругопластических деформаций

$\sum \Delta Q \times 10^5$												
σ/R_b	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,85	0,9	0,95	1,0
МВБ	16	29	43	56	71	83	94	105	110	110	103	80
ВСФБ	15	32	47	60	77	93	105	115	119	121	114	100

Рисунок 5 - Характер изменения объемных деформаций $\sum \Delta Q \times 10^5$ на ступенях нагружения

Теоретическая обработка результатов

Аналитическую зависимость описания диаграммы сжатия бетона « ϵ_b - σ_b » рекомендуется принимать в виде [15, 16]:

$$\epsilon_b = \frac{\sigma_b}{E_b \nu_b} \quad (1)$$

где E_b – начальный модуль упругости бетона (принимается при уровне напряжений $\sigma = 0,25R_b$);

ν_b – коэффициент изменения секущего модуля, который вычисляется по формуле

$$\nu_b = \hat{\nu}_b \pm (\nu_0 - \hat{\nu}_b) \sqrt{1 - \omega\eta - (1 - \omega)\eta^2} \quad (2)$$

(для восходящей ветви диаграммы применяется знак «плюс», а нисходящей – «минус»), где

η – уровень напряжений в бетоне (положительная величина),

$$\eta = \sigma_b / \hat{\sigma}_b \quad (3)$$

σ_b – текущее напряжение в бетоне,

$\hat{\sigma}_b$ – напряжение в вершине диаграммы, для нормативной диаграммы $\hat{\sigma}_b = -R_{b,ser}$,

$\hat{\nu}_b$ – коэффициент изменения секущего модуля в вершине диаграммы (положительная величина),

$$\hat{\nu}_b = \frac{\hat{\sigma}_b}{E_b \hat{\epsilon}_b} \quad (4)$$

$\hat{\epsilon}_b$ – деформация бетона в вершине диаграммы (для напряжений сжатия – отрицательная величина), согласно [16]:

$$\hat{\varepsilon}_b = -\frac{B}{E_b} \lambda \frac{1 + \left(0.8 - 0.15 \frac{B^2}{10000}\right) \lambda B / 60 + 0.2 \lambda / B}{0.12 + 1.03 B / 60} \quad (5)$$

Здесь λ – безразмерный коэффициент, зависящий от вида бетона, принимаемый равным 1 для тяжелого и мелкозернистого бетона;

B – условный класс бетона, принимается равным $1,4R_{b,ser}$;

v_0 – начальный коэффициент изменения секущего модуля,

ω – коэффициент, характеризующий кривизну диаграммы, для восходящей ветви диаграммы в зависимости (2)

$$v_0 = 1.0; \quad \omega = 2 - 2.5 \hat{v}_b, \quad (6)$$

для нисходящей ветви диаграммы в зависимости (2):

$$v_0 = 2.05 \hat{v}_b; \quad \omega = 1.95 \hat{v}_b - 0.138. \quad (7)$$

В процессе расчета выяснилось, что для вычисления деформаций в вершине диаграммы сжатия ВСФБ следует откорректировать формулу (5). Данная формула показывает хорошую сходимость с экспериментальными данными, если представить ее в виде:

$$\hat{\varepsilon}_b = -\frac{B}{E_b} \lambda \frac{k + \left(0.8 - 0.15 \frac{B^2}{10000}\right) \lambda B / 60 + 0.2 \lambda / B}{0.12 + 1.03 B / 60} \quad (5.1)$$

где k – безразмерный коэффициент,

для МВБ $k = 1$,

для ВСФБ $k = 1,3$.

Отметим также, что характеристику $\hat{\varepsilon}_b$ можно также вычислять по предложенной ниже формуле, показывающей удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными:

$$\hat{\varepsilon}_b = k \cdot 10^{-5} \left(\sqrt[4]{\frac{R_b}{R_0}} \right) \quad (8)$$

где k – безразмерный коэффициент,

для МВБ $k = 200$,

для ВСФБ $k = 220$;

R_0 – размерный коэффициент, принимаемый равным 20 МПа.

Результаты вычисления $\hat{\varepsilon}_b$ по формулам (5), (8) и сравнение полученных результатов с экспериментальными данными представлено в табл. 5.

Таблица 5 - Результаты вычисления $\hat{\varepsilon}_b$

Вид бетона	$\hat{\varepsilon}_b$ по формуле (5)	$\hat{\varepsilon}_b$ по формуле (8)	Экспериментальные значения $\hat{\varepsilon}_b$
МВБ	0,00312	0,00304	0,00308
ВСФБ	0,00355	0,00346	0,00352

Результаты вычисления продольных деформаций МВБ и ВСФБ в зависимости от уровня напряжений по формуле (1) с применением (8) представлены в табл. 6.

Таблица 6 - Результаты вычисления продольных деформаций МВБ и ВСФБ в зависимости от уровня напряжений по формуле (1)

МВБ													
Продольные	σ , МПа	10,7	21,4	32,1	42,8	53,5	64,2	74,9	85,6	90,95	96,30	101,65	107,0
	$\varepsilon_{bl} \times 10^5$	27,8	55,6	83,3	111,1	139,0	167,2	196,0	226,0	241,8	258,6	277,0	304,2
ВСФБ													
Продольные	σ , МПа	12,19	24,4	36,6	48,8	60,0	73,1	85,3	97,5	103,6	109,7	115,8	121,9
	$\varepsilon_{bl} \times 10^5$	30,0	60,1	90,1	120,2	148,0	181,1	213,0	246,8	265,1	284,8	307,5	345,7

Поперечные деформации бетона определяются соотношением:

$$\varepsilon_p = -\varepsilon_b \mu_b \quad (9)$$

где μ_b – коэффициент поперечных деформаций бетона, вычисляемый по формуле

$$\mu_b = \hat{\mu}_b + (\mu_b^0 - \hat{\mu}_b) \sqrt{1 - \eta^2} \quad (10)$$

μ_b^0 – начальное значение коэффициента поперечных деформаций (принимается при уровне напряжений $\sigma = 0,25R_b$);

$\hat{\mu}_b$ – значение коэффициента поперечных деформаций в вершине диаграммы, вычисляется по формуле

$$\hat{\mu}_b = \mu_b^0 + (1 - 0,9^3 \sqrt{\hat{\nu}_b}) \quad (11)$$

Результаты вычисления поперечных деформаций МВБ и ВСФБ в зависимости от уровня напряжений по формуле (9) представлены в табл. 7.

Таблица 7 - Результаты вычисления поперечных деформаций МВБ и ВСФБ в зависимости от уровня напряжений по формуле (9)

МВБ													
Поперечные	σ , МПа	10,7	21,4	32,1	42,8	53,5	64,2	74,9	85,6	90,95	96,30	101,65	107,0
	$\varepsilon_{b2} \times 10^5$	7,12	14,24	21,40	28,66	36,19	44,28	53,43	64,57	71,44	79,81	90,96	116,4 ₉
ВСФБ													
Поперечные	σ , МПа	12,19	24,4	36,6	48,8	60,0	73,1	85,3	97,5	103,6	109,7	115,8	121,9
	$\varepsilon_{b2} \times 10^5$	7,61	15,23	22,88	30,67	38,13	47,60	57,82	70,60	78,70	88,80	102,64	136,41

Наглядное сравнение теоретических и экспериментальных данных представлено на рис. 6. Можно говорить об удовлетворительной работе представленных зависимостей применительно к МВБ и ВСФБ.

Рисунок 6 - Сравнение теоретических и экспериментальных диаграмм сжатия МВБ и ВСФБ

Выводы

По результатам исследования можно сделать ряд выводов:

- введение стальной фибры в матрицу бетона незначительно сказывается на расчетном сопротивлении бетона сжатию, однако существенно изменяет характер разрушения образцов, делая его более плавным;
- при значительных уровнях сжимающей нагрузки стальная фибра создает эффект «обоймы», снижая поперечные деформации и повышая общую трещиностойкость бетона;
- расчет диаграмм деформирования высокопрочного сталефибробетона можно выполнять согласно предложенным зависимостям с получением результатов, показывающих хорошую сходимость с экспериментальными данными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпенко Н.И., Травуш В.И., Каприелов С.С., Безгодов И.М., Андрианов А.А., Мишина А.В. Результаты исследования конструкционных свойств высокопрочного сталефибробетона // Фундаментальные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2012 году. Москва. С. 351-354.
2. Мишина, А.В., Чилин И.А., Андрианов А.А. Физико-технические свойства сверхвысокопрочного сталефибробетона // Вестник МГСУ № 3. 2011. С.159-165.
3. W. Yao, L. Jie, K. Wu. Mechanical Properties of Hybrid Fiber Reinforced Concrete at Low Fiber Volume // Cement & Concrete Research No 33, 2003. P. 27-30.
4. Antonie, E. Naaman. Fiber Reinforced Cement and Concrete Composites. Sarasota, Techno Press 3000, 1st edition, 2018. 765 p.
5. Korsun, V., Korsun, A., Mashtaler, S. Determination of the Critical Duration of the First Heating of Heavy Concrete by the Criterion of the Maximum Strength Reduction // Applied Mechanics and Materials, 2015, Trans tech Publications, Switzerland, Vols. 725 – 726, pp. 566 – 571. [Электронный ресурс]. URL: [http : https://www.scientific.net/AMM.725-726.566](http://www.scientific.net/AMM.725-726.566)
6. 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 (SCOPUS), 2015. №117. P. 975 – 984.
7. Машталер С.Н., Корсун В.И. Влияние кратковременного нагрева на прочность и деформации высокопрочного сталефибробетона при осевом сжатии и растяжении // Сборник тезисов докладов по материалам №3 (83) 2019 (май-июнь)

конференции «Научно–технические достижения студентов, аспирантов, молодых ученых строительно–архитектурной отрасли». Макеевка, 2016. С.142.

8. Барсуку Н.Д., Мозалевский Д.А., Купенко И.В., Борщевский С.В., Макаренко С.Ю., Машталер С.Н. Лабораторные исследования фибробетона для подземного строительства // Проблемы недропользования: Сборник научных трудов. Часть I. Санкт–Петербургский горный университет. СПб, 2017. С. 149–153.

9. 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. // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2017 году, том 2. Москва. 2018. С. 237-246.

10. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С. Новые модифицированные бетоны // М., ООО «Типография Парадиз». 2010. С. 258.

11. Каприелов С.С., Чилин И.А. Сверхвысокопрочный самоуплотняющийся фибробетон для монолитных конструкций. // Строительные материалы, №7. 2013. С. 28-30.

12. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Дондуков В.Г. Модифицированные высокопрочные мелкозернистые бетоны с улучшенными деформативными характеристиками // Бетон и железобетон, № 2. 2006. С. 2-7.

13. Безгоднов И.М. К вопросу оценки предельной относительной деформации бетона при сжатии для разных классов бетона. // Бетон и железобетон, №5. 2015. С. 9-11.

14. Безгоднов И.М. Влияние стальной фибры на физико-механические и реологические свойства высокопрочного мелкозернистого бетона. // Бетон и железобетон, №1. 2015.

15. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. Стройиздат, Москва, 1996, стр. 97.

16. Карпенко Н.И., Травуш В.И. и др. Методическое пособие «Статически неопределимые железобетонные конструкции. Диаграммные методы автоматизированного расчета и проектирования». Федеральное автономное учреждение «Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве». Москва, 2017.

REFERENCES

1. Karpenko I.N., Travush V.I., Kapriyelov S.S., Bezgodov I.M., Andrianov A.A., Mishina A.V. Rezul'taty issledovaniya konstruktsionnykh svoystv vysokoprochnogo stalefibrobetona [The results of the study of the structural properties of high-strength steel fiber concrete]. Fundamental research of the RAABS on the scientific support of the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2012, p. 351-354.

2. Mishina, A.V., Chilin I.A., Andrianov A.A. Fiziko-tehnicheskiye svoystva sverkhvysokoprochnogo stalefibrobetona [Physics-technical properties of high-strength steel fiber reinforced concrete]. Vestnik MSBU. 2011. No. 3. Pp.159-165.

3. W. Yao, L. Jie, K. Wu, Mechanical Properties of Hybrid Fiber Reinforced Concrete at Low Fiber Volume. Cement & Concrete Research, No. 33. 2003. P. 27-30.

4. Antonie, E. Naaman. Fiber Reinforced Cement and Concrete Composites. Sarasota, Techno Press 3000; 1st edition, 2018. 765 p.

5. Korsun, V., Korsun, A., Mashtaler, S. Determination of the Critical Duration of the First Heating of Heavy Concrete by the Criterion of the Maximum Strength Reduction. Applied Mechanics and Materials. 2015 Vols. 725 – 726, Pp. 566 – 571. [http : https://www.scientific.net/AMM.725-726.566](http://www.scientific.net/AMM.725-726.566).

6. 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 (SCOPUS), 2015. No 117. Pp. 975 – 984.

7. S.N. Mashtaler, V.I. Korsun. Vliyaniye kratkovremennogo nagreva na prochnost' i deformatsii vysokoprochnogo stalefibrobetona pri oboym szhatii i rastyazhenii [The effect of short-term heating on strength and deformation of high-strength steel fiber concrete under axial compression and tension]. Collection of theses of reports on the materials of the conference "Scientific and technical achievements of students, graduate students, young scientists of the construction and architectural industry". Makeyevka, 2016. P.142.

8. N.D. Barsuk, D.A. Mozalevskiy, I.V. Kупenko, S.V. Borshchevskiy, S.YU. Makarenko, S.N. Mashtaler. Laboratornyye issledovaniya fibrobetona dlya podzemnogo stroitel'stva [Laboratory studies of fiber concrete for underground construction] . Subsoil use problems: Collection of scientific papers. Part I, St. Petersburg Mining University. SPb, 2017. Pp.149–153.

9. Karpenko N.I., Kapriyelov S.S., Petrov A.N., Bezgodov I.M., Moiseenko G.A., Stepanov M.V., Chilin I.A. Issledovaniye fiziko-mekhanicheskikh i reologicheskikh svoystv vysokoprochnykh stalefibrobetonov iz samouplotnyayushchikhsya smesey. [Investigation of the physico-mechanical and rheological properties of high-strength steel

fiber reinforced concrete from self-compacting mixtures]. Fundamental, search and applied research of the RAACS on the scientific support of the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2017, vol. 2. Moscow, 2018. Pp. 237-246.

10. Kapriylov S.S., Sheynfel'd A.V., Kardumyan G.S. Novyye modifitsirovannyye betony [New modified concretes]. Moscow: "Printing House Paradiz" LLC. 2010. 258 p.

11. Kapriylov S.S., Chilin I.A. Sverkhvysokoprochnyy samouplotnyayushchiysya fibrobeton dlya monolitnykh konstruktсий [Ultra-high-strength self-compacting fiber-reinforced concrete for monolithic structures]. *Construction Materials*. 2013. No 7. Pp. 28-30.

12. Kapriylov S.S., Sheynfel'd A.V., Kardumyan G.S., Dondukov V.G. Modifitsirovannyye vysokoprochnyye melkozemnistyye betony s uluchshennymi deformativnymi kharakteristikami [Modified high-strength fine-grained concretes with improved deformative characteristics]. *Concrete and reinforced concrete*. 2006. No 2. Pp. 2-7.

13. Bezgodov I.M. K voprosu otsenki predel'noy otnositel'noy deformatsii betona pri szhatii dlya raznykh klassov betona [To the question of estimating the ultimate relative deformation of concrete under compression for different classes of concrete]. *Concrete and reinforced concrete*. 2015, No 5. Pp. 9-11.

14. Bezgodov I.M. Vliyaniye stal'noy fibry na fiziko-mekhanicheskiye i reologicheskiye svoystva vysokoprochnogo melkozemnistogo betona. [The effect of steel fibers on the physico-mechanical and rheological properties of high-strength fine-grained concrete]. *Concrete and reinforced concrete*. 2015. No. 1.

15. Karpenko N.I. Obshchiye modeli mekhaniki zhelezobetona [General models of reinforced concrete mechanics]. Moscow: Stroyizdat, 1996. 97 p.

16. Karpenko N.I., Travush V.I. et al. Metodicheskoye posobiye «Staticheski neopredelimyye zhelezobetonnyye konstruktсий. Diagrammnyye metody avtomatizirovannogo rascheta i proyektirovaniya». [Methodical manual "Statically indefinable reinforced concrete structures. Diagrammatic methods of automated calculation and design"]. Federal Autonomous Institution "Federal Center for rationing, standardization and conformity assessment in construction." Moscow, 2017.

Информация об авторах:

Степанов М.В.

ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (НИИСФ РААСН)»,
г. Москва, Россия,
ведущий инженер
E-mail: niisf_lab9@mail.ru

Моисеенко Г.А.

ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (НИИСФ РААСН)»,
г. Москва, Россия,
ведущий инженер
E-mail: gecklock@yandex.ru

Information about authors:

Stepanov M.

Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences,
Moscow, Russia,
lead engineer
E-mail: niisf_lab9@mail.ru

Moiseenko G.

Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences,
Moscow, Russia,
lead engineer
E-mail: gecklock@yandex.ru