

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2023, Том 15, № 6 / 2023, Vol. 15, Iss. 6 <https://esj.today/issue-6-2023.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/76SAVN623.pdf>

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Корсун, В. И. Влияние повышенных температур на прочность и деформации высокопрочного сталефибробетона при осевом сжатии и растяжении / В. И. Корсун, С. Н. Машталер // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № 6. — URL: <https://esj.today/PDF/76SAVN623.pdf>

For citation:

Korsun V.I., Mashtaler S.N. The influence of short-term heating on the strength and strain of high-strength steel fiber reinforced concrete under axial compression and tension. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023; 15(6): 76SAVN623. Available at: <https://esj.today/PDF/76SAVN623.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

УДК 691.328

Корсун Владимир Иванович

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»,
Санкт-Петербург, Россия

Профессор кафедры «Железобетонных и каменных конструкций»

Доктор технических наук, профессор

E-mail: korsun_vi@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9445-5027>

РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=758915

WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/C-6381-2019>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=56226922300>

Машталер Сергей Николаевич

ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», Макеевка, Россия
Доцент кафедры «Железобетонные конструкции»

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: mashtaler_serгей@mail.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=787062

WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/ABC-6575-2021>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=56825932200>

Влияние повышенных температур на прочность и деформации высокопрочного сталефибробетона при осевом сжатии и растяжении

Аннотация. Высокие темпы строительства жилых и промышленных зданий со сложными архитектурными формами, возведение специальных конструкций большепролетных мостов, небоскребов, морских нефтяных платформ, резервуаров для хранения жидкостей и газов и др., требуют разработки новых эффективных бетонов. К числу таких материалов относится дисперсно армированный высокопрочный бетон. Дисперсно армированные бетоны получают все большее распространение в современном строительстве, проектировании и расчете конструкций. Фибровое армирование позволяет снизить влияние основных недостатков бетона — относительно низкой прочности на растяжение и растяжение при изгибе, хрупкости разрушения, деформаций усадки и ползучести.

Фибровое армирование является эффективным средством повышения прочности и деформативности бетона при сжатии и растяжении, трещиностойкости и жесткости железобетонных конструкций, что особенно важно для сильно нагруженных конструкций

высотных зданий и сооружений, а также для конструкций, подвергающихся переменным температурно-влажностным воздействиям.

Применение высокопрочного сталефибробетона для конструкций, подвергающихся температурным воздействиям, сдерживается недостаточной изученностью влияния повышенных температур и продолжительности их действия на основные характеристики физико-механических свойств высокопрочного сталефибробетона, на формирование напряженно-деформированного состояния сталефибробетонных конструкций. В статье представлены результаты экспериментальных исследований влияния процента стального дисперсного армирования на диаграммы деформирования и характеристики физико-механических свойств высокопрочного сталефибробетона при осевом сжатии и растяжении в условиях воздействия повышенных до 200°C температур. Установлено влияние процента фибрового армирования, кратковременного и длительного нагрева на диаграммы деформирования, на характеристики прочности, начального модуля упругости, предельные значения деформаций укорочения и удлинения.

Ключевые слова: высокопрочный сталефибробетон; кратковременный и длительный нагрев; осевое сжатие и растяжение; деформации; прочность; напряженно-деформированное состояние; предельная сжимаемость

Введение

Применение в современном строительстве высокопрочных (высококачественных) бетонов позволяет снижать материалоемкость конструкций и получать значительный долговременный экономический эффект. К недостаткам высокопрочных бетонов обычно относят близкий к упругому характер деформирования и склонность к хрупкому разрушению. Введение в бетон фибрового (дисперсного) армирования повышает его прочность на сжатие и растяжение, сдерживает процессы микротрещинообразования в структуре, увеличивает предельные значения сжимаемости и растяжимости. Применение фибрового армирования [6÷8] является действенным способом повышения несущей способности сильно нагруженных колонн, а также участков конструкций при местном приложении нагрузки.

В исследованиях [1; 4; 5; 9–25] установлены показатели изменения прочности высокопрочного бетона в зависимости от количества и вида фибрового армирования. В работе [3] представлены результаты исследования характеристик основных физико-механических свойств высокопрочного сталефибробетона в различном возрасте.

Применительно к высокопрочному сталефибробетону вопрос влияния температурных воздействий на прочность и деформации при сжатии и растяжении является недостаточно изученным. Это особенно важно для конструкций производственных зданий и сооружений, эксплуатирующихся в условиях воздействия повышенных технологических температур. Целью данного экспериментального исследования является изучение влияния процента фибрового армирования, кратковременного и длительного нагрева до 200°C на основные характеристики прочностных и деформационных свойств высокопрочного сталефибробетона.

Материалы, методы и конструкции опытных образцов

Состав сталефибробетона и конструкции опытных образцов

Состав высокопрочного бетона — портландцемент М500 — 545 кг/м³; песок кварцевый (M_к = 1,9) — 660 кг/м³; щебень гранитный фракции 5–20 мм — 870 кг/м³; органоминеральный модификатор (ОММ) — 190 кг; вода — 153 л/м³.

Органоминеральный модификатор получен с использованием вторичного сырья промышленности Донбасса и представлен в виде сухой смеси, содержащей следующие составляющие (в % от общего веса): микрокремнезем в составе *Sica Fume* (20 %); тонкомолотую золошлаковую смесь Углегорской ТЭС (30 %); суперпластификатор С-3 (2 %); золу-унос Зуевской ТЭС (48 %).

На сжатие испытано 3 серии образцов с весовым содержанием фибры на 1 м^3 бетона (в % от объема) соответственно: серия I — 0 кг ($\mu_{sfb} = 0 \%$); серия II — 50 кг/ м^3 ($\mu_{sfb} = 0,6 \%$); серия III — 200 кг/ м^3 ($\mu_{sfb} = 2,5 \%$). На растяжение испытана серия образцов с весовым содержанием фибры 200 кг/ м^3 ($\mu_{sfb} = 2,5 \%$). Фибра стальная с загнутыми концами производства Харцызского филиала ЧАО «Производственное объединение «СТАЛЬКАНАТ-СИЛУР» со следующими характеристиками: длина $l = 60,0 \pm 6,0$ мм, диаметр $d = 0,75 \pm 0,07$ мм; длина и высота загнутого конца соответственно $l_1 = 5,0 \pm 1,0$ мм, $h_1 = 2,9 \pm 0,5$ мм; временное сопротивление разрыву — $1160 \div 1290$ МПа.

Основные опытные образцы для испытаний на сжатие и растяжение — призмы размерами $150 \times 150 \times 600$ мм и $100 \times 100 \times 400$ мм соответственно. Дополнительные контрольные образцы — кубы с ребром 150 мм. Возраст бетона к моменту начала кратковременного нагрева и механических испытаний — 28–30 суток.

Методика испытаний

Основные изучаемые характеристики процессов деформирования высокопрочного бетона и сталефибробетона: диаграммы «напряжение — деформация», начальный модуль упругости $E_{b,sfb}$, прочность при осевом сжатии $R_{b,sfb}$ и растяжении $R_{bt,sfb}$, предельные значения деформаций в вершинах диаграмм деформирования, соответственно предельная сжимаемость $\epsilon_{ub,sfb}$ и предельная растяжимость $\epsilon_{ubt,sfb}$. Исследованные факторы влияния: процент объемного фибрового армирования $\mu_{sfb} = 0; 0,6; 2,5 \%$, температуры испытания — $t^\circ = 20^\circ, 90^\circ, 150^\circ$ и 200°C .

Измерение продольных и поперечных деформаций опытных образцов при нагружении осевым сжатием и растяжением осуществлялось с помощью индикаторов часового типа с точностью порядка $1 \cdot 10^{-5}$. Нагрев опытных образцов-призм осуществлялся с помощью электронагревательных элементов специальной конструкции. Скорость повышения температуры на этапе нагрева — $12^\circ \div 15^\circ\text{C}/\text{час}$. Продолжительность кратковременного нагрева до прессовых испытаний при температурах $+90^\circ, +150^\circ\text{C}$ и $+200^\circ\text{C}$ принималась равной 15, 13 и 12 часов соответственно, что отвечает времени достижения минимальной прочности у обычных тяжелых бетонов при тех же температурах нагрева [3]. Продолжительность длительного нагрева при температурах $+90^\circ\text{C}$, $+150^\circ\text{C}$ и $+200^\circ\text{C}$ до начала прессовых испытаний образцов составляла 85, 45 и 32 суток соответственно.

Результаты

Результаты экспериментальных исследований

Графики зависимости призмной прочности, начального модуля упругости, предельной сжимаемости и растяжимости образцов из высокопрочного сталефибробетона от процента фибрового армирования и температуры нагрева представлены на рисунке 1, диаграммы деформирования — на рисунках 2–4. Значения коэффициента линейной температурной деформации высокопрочного бетона на этапах первого кратковременного и длительного нагрева до температур $+90^\circ\text{C}$, $+150^\circ\text{C}$ и $+200^\circ\text{C}$ представлены в таблице 1.

Снижение значений коэффициентов линейной температурной деформации α_{bt} с повышением температуры нагрева объясняется относительно большим влиянием составляющей деформаций от усадки цементного камня на этапе разогрева конструкции. При остывании до нормальной температуры после длительного нагрева значения коэффициентов обратимой линейной температурной деформации α_{bt} высушенного бетона в исследованном диапазоне температур снизились, в среднем, на 9 % в сравнении с соответствующими значениями при первом кратковременном нагреве.

Отмечается, что определенные экспериментально значения коэффициента линейной температурной деформации α_{bt} для высокопрочного сталефибробетона превышают соответствующие значения, нормируемые в СП 27.13330.2011¹ для обычных тяжелых бетонов, на величину до 20 % при первом кратковременном нагреве. Недоучет деформаций температурного удлинения сталефибробетона при первом нагреве может приводить к соответствующей недооценке усилий от температурных воздействий на конструкции.

Таблица 1

Значения коэффициентов линейной температурной деформации высокопрочного сталефибробетона

№ п/п	Процент армирования, μ_{sfb} , %	Коэффициент линейной температурной деформации $\alpha_{bt} \cdot 10^6$ при температуре и продолжительности нагрева					
		+90°C		+150°C		+200°C	
		кратковр.	длит.	кратковр.	длит.	кратковр.	длит.
1	0	11,8	5,7	10,6	6,2	10,1	6,6
2	0,6	12,1	4,9	10,2	6,2	9,5	6,1
3	2,5	12,1	4,8	11,2	6,4	9,9	5,6
4	Бетон состава 1 по СП 27.13330.2011 [2]	10	4,5	9,8	5,9	9,5	7,2

Составлено автором

Характеристики механических свойств высокопрочного сталефибробетона в условиях нормальной температуры

Средние значения прочности R_{sfb} кубов с размером ребра 150 мм и процентами фибрового армирования $\mu_{sfb} = 0\%$, $0,6\%$ и $2,5\%$ в возрасте 7 суток в условиях нормальной температуры составили 74,1, 76,9 и 86,4 МПа, а в возрасте 28 суток — 98,8, 101,2 и 110,8 МПа соответственно.

Прирост прочности в возрасте 90 суток в сравнении с прочностью в 28-суточном возрасте составил, в среднем, 5 %. Средние значения призмной прочности $R_{b,sfb}$ на осевое сжатие стандартных образцов-призм размерами $150 \times 150 \times 600$ (мм) с процентами фибрового армирования $\mu_{sfb} = 0\%$, $0,6\%$ и $2,5\%$ составили соответственно 83,2, 92 и 100,7 МПа, а для образцов-призм с размерами $250 \times 250 \times 650$ (мм) в возрасте 28 суток — 92,8, 99,2 и 108,8 МПа соответственно (прирост, в среднем, около 9 %). Эти результаты свидетельствуют о четкой зависимости прочности высокопрочных модифицированных бетонов и сталефибробетона от размеров (масштаба) образцов: крупноразмерным образцам соответствуют более высокие значения призмной прочности. Введение фибрового армирования в высокопрочный бетон в количестве до $\mu_{sfb} = 2,5\%$ обеспечило прирост прочности на сжатие до 21 %. Среднее значение коэффициента призмной прочности как отношения величин призмной прочности $R_{b,sfb}$ к

¹ СП 27.13330.2011 Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур — М.2011. — 114 с.

значениям кубиковой прочности R_{sfb} высокопрочного сталефибробетона составило порядка $K_{nn} = R_{b,sfb}/R_{sfb} \approx 0,9$.

Значения начального модуля упругости сталефибробетона при осевом сжатии у образцов-призм размерами $150 \times 150 \times 600$ (мм) с увеличением фибрового армирования до $\mu_{sfb} = 0,6\%$ и $2,5\%$ возросли на 9 и 27 % соответственно в сравнении с бетоном без армирования. Для крупноразмерных призм размерами $250 \times 250 \times 650$ (мм) значения модуля упругости высокопрочного сталефибробетона превысили соответствующие значения для призм стандартных размеров в среднем на 3 %.

Предельные деформации укорочения сталефибробетона при осевом сжатии образцов-призм размерами $150 \times 150 \times 600$ (мм) с увеличением фибрового армирования до $\mu_{sfb} = 0,6\%$ и $2,5\%$ возросли на 8 и 18 % соответственно, а у образцов размерами $250 \times 250 \times 650$ (мм) — соответственно на 20 и 30 % в сравнении со значениями предельной сжимаемости неармированного бетона у образцов стандартных размеров.

В испытаниях на осевое растяжение средние значения прочности $R_{bt,sfb}$ образцов-призм с процентами армирования $\mu_{sfb} = 0\%$ и $2,5\%$ составили 3,54 и 4,4 МПа соответственно (прирост — 24 %). Средние величины предельных деформаций удлинения для тех же образцов составили соответственно $\varepsilon_{bt0} = 0,121 \times 10^{-3}$ и $0,133 \times 10^{-3}$.

Влияние температуры и продолжительности нагрева на характеристики механических свойств высокопрочного сталефибробетона

Воздействие повышенных до $+200^\circ\text{C}$ температур на высокопрочный сталефибробетон приводит, как и у обычных тяжелых бетонов [3; 6], к снижению прочности на сжатие и растяжение, к снижению начального модуля упругости и к увеличению предельных значений сжимаемости и растяжимости (табл. 2, рис. 3).

Прочность неармированного ($\mu_{sfb} = 0\%$) высокопрочного бетона R_b при сжатии в условиях кратковременного нагрева при температурах $+90^\circ$, $+150^\circ$ и $+200^\circ\text{C}$ составила 0,9, 0,99 и 0,95, а в условиях длительного нагрева до указанных температур — 0,95, 1,05, 0,97 соответственно от значений прочности бетона при температуре 20°C (рис. 1 а).

Прочность образцов-призм размерами $150 \times 150 \times 600$ (мм) из высокопрочного сталефибробетона $R_{b,sfb}$ с $\mu_{sfb} = 0,6\%$ при первом кратковременном нагреве до температур $+90^\circ\text{C}$, $+150^\circ\text{C}$ и $+200^\circ\text{C}$ составила 92 %, 104 % и 98 %, а в условиях длительного нагрева при тех же температурах — 98 %, 118 % и 121 % соответственно по отношению к прочности контрольных образцов при $t^\circ = 20^\circ\text{C}$. Прочность образцов из высокопрочного сталефибробетона $R_{b,sfb}$ с $\mu_{sfb} = 2,5\%$ при первом кратковременном нагреве до температур $+90^\circ\text{C}$, и $+200^\circ\text{C}$ составила 98 % и 108 % соответственно, при длительном нагреве при температурах $+90^\circ\text{C}$, $+150^\circ\text{C}$ и $+200^\circ\text{C}$ — соответственно 103 %, 117 % и 117 % относительно прочности контрольных образцов при $t^\circ = 20^\circ\text{C}$ (рис. 1, 3).

Для образцов размерами $250 \times 250 \times 650$ (мм) из высокопрочного сталефибробетона с $\mu_{sfb} = 0,6\%$ и $2,5\%$ при кратковременном нагревании до $+90^\circ\text{C}$ призмная прочность $R_{b,sfb}$ составила 1,0 и 1,15, а при кратковременном нагревании до $+200^\circ\text{C}$ — соответственно 1,13 и 1,21 от прочности ненагревавшихся неармированных образцов ($\mu_{sfb} = 0\%$) стандартных размеров $150 \times 150 \times 600$ (мм) (рис. 1 а, 4).

Таблица 2

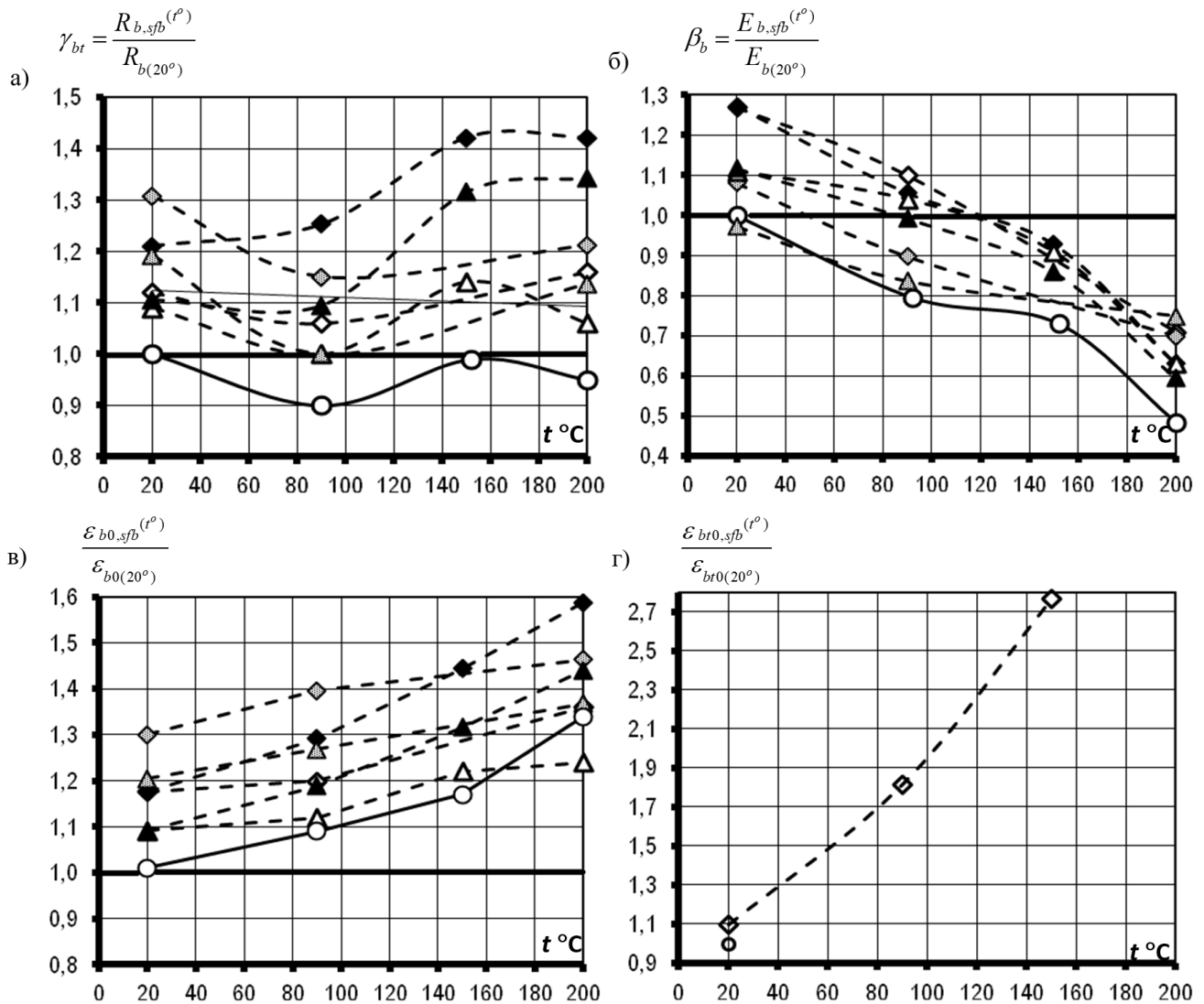
Характеристики прочностных и деформационных свойств сталефибробетона в условиях повышенных температур

№ п/п	Характеристики механических свойств	Процент армирования, μ_{sfb} , %	Значения характеристик механических свойств высокопрочного сталефибробетона при температурах нагрева						
			+20°C	+90°C		+150°C		+200°C	
				кратковр.	длит.	кратковр.	длит.	кратковр.	длит.
1	Прочность на сжатие R_{sfb} , МПа	0	<u>83,2</u> 1,00	<u>74,9</u> 0,9	<u>79,1</u> 0,95	<u>82,4</u> 0,99	<u>87,4</u> 1,05	<u>79,0</u> 0,95	<u>80,7</u> 0,97
		0,6	<u>92</u> 1,11	<u>83,2</u> 1,00	<u>90,7</u> 1,09	<u>94,8</u> 1,14	<u>109</u> 1,31	<u>88,2</u> 1,06	<u>111,5</u> 1,34
		2,5	<u>100,7</u> 1,21	<u>88,2</u> 1,06	<u>104</u> 1,25	-	<u>118,1</u> 1,42	<u>96,5</u> 1,16	<u>118,1</u> 1,42
2	Начальный модуль упругости $E_{sfb} \cdot 10^{-3}$, МПа	0	<u>56,5</u> 1,00	<u>44,6</u> 0,79	<u>42,4</u> 0,75	<u>41,2</u> 0,73	<u>35,6</u> 0,63	<u>27,1</u> 0,48	<u>23,7</u> 0,42
		0,6	<u>61,6</u> 1,09	<u>58,2</u> 1,03	<u>55,9</u> 0,99	<u>50,9</u> 0,90	<u>48,6</u> 0,86	<u>35,0</u> 0,62	<u>32,8</u> 0,58
		2,5	<u>71,8</u> 1,27	<u>62,2</u> 1,10	<u>59,9</u> 1,06	-	<u>52,5</u> 0,93	<u>40,1</u> 0,71	<u>39,6</u> 0,70
3	Предельная сжимаемость $\bar{\varepsilon} \cdot 10^3$	0	<u>2,5</u> 1,00	<u>2,73</u> 1,09	<u>3,02</u> 1,21	<u>2,92</u> 1,17	<u>3,45</u> 1,38	<u>3,35</u> 1,34	<u>3,8</u> 1,52
		0,6	<u>2,70</u> 1,08	<u>2,80</u> 1,12	<u>3,00</u> 1,19	<u>3,05</u> 1,22	<u>3,30</u> 1,32	<u>3,10</u> 1,24	<u>3,58</u> 1,43
		2,5	<u>2,94</u> 1,18	<u>3,00</u> 1,2	<u>3,23</u> 1,29	-	<u>3,60</u> 1,44	<u>3,40</u> 1,36	<u>4,00</u> 1,59
4	Коэффициент поперечных деформаций μ	0	<u>0,17</u> 1,00	<u>0,14</u> 0,79	<u>0,14</u> 0,8	<u>0,13</u> 0,76	<u>0,12</u> 0,68	<u>0,13</u> 0,78	<u>0,11</u> 0,62
		0,6	<u>0,18</u> 1,08	<u>0,14</u> 0,83	<u>0,16</u> 0,91	<u>0,14</u> 0,79	<u>0,17</u> 0,99	<u>0,15</u> 0,84	<u>0,17</u> 1,00
		2,5	<u>0,24</u> 1,40	<u>0,18</u> 1,06	<u>0,20</u> 1,17	-	<u>0,22</u> 1,27	<u>0,19</u> 1,11	<u>0,23</u> 1,32

Примечание: под чертой — значения в относительных величинах. Составлено автором

Наибольшее снижение прочности армированного и неармированного высокопрочного бетона соответствует температуре кратковременного нагрева +90°C, что объясняется [4] влиянием деструктивных факторов, главным из которых являются дополнительные растягивающие напряжения в контактной зоне «цементный камень — заполнитель» вследствие неоднородных температурных и влажностных деформаций компонентов сталефибробетона. Некоторое увеличение прочности образцов при нагреве до более высокой температуры +200°C объясняется влиянием процессов дополнительного структурообразования вследствие дополнительной гидратации частиц цемента [3].

Значения начального модуля упругости высокопрочного сталефибробетона при осевом сжатии с увеличением процента фибрового армирования μ_{sfb} имеют тенденцию к повышению при всех температурах нагрева до +200°C в сравнении с неармированным бетоном. С повышением температуры до +200°C и продолжительности нагрева значения начального модуля упругости сталефибробетона снижаются, в среднем, в 1,9 раза. Для образцов размерами 250×250×650 (мм) с $\mu_{sfb} = 0,6$ % при кратковременном нагревании до +90°C и +200°C отмечено снижение значений начального модуля упругости при осевом сжатии на 16,5 % и 25,2 % соответственно в сравнении со значениями на образцах стандартных размеров при тех же температурах испытания (рис. 2 б, рис. 1 б).



Условные обозначения соответственно:

○ △ ◇ — нагрев кратковременный, $\mu_{sfb} = 0, 0,6, 2,5\%$

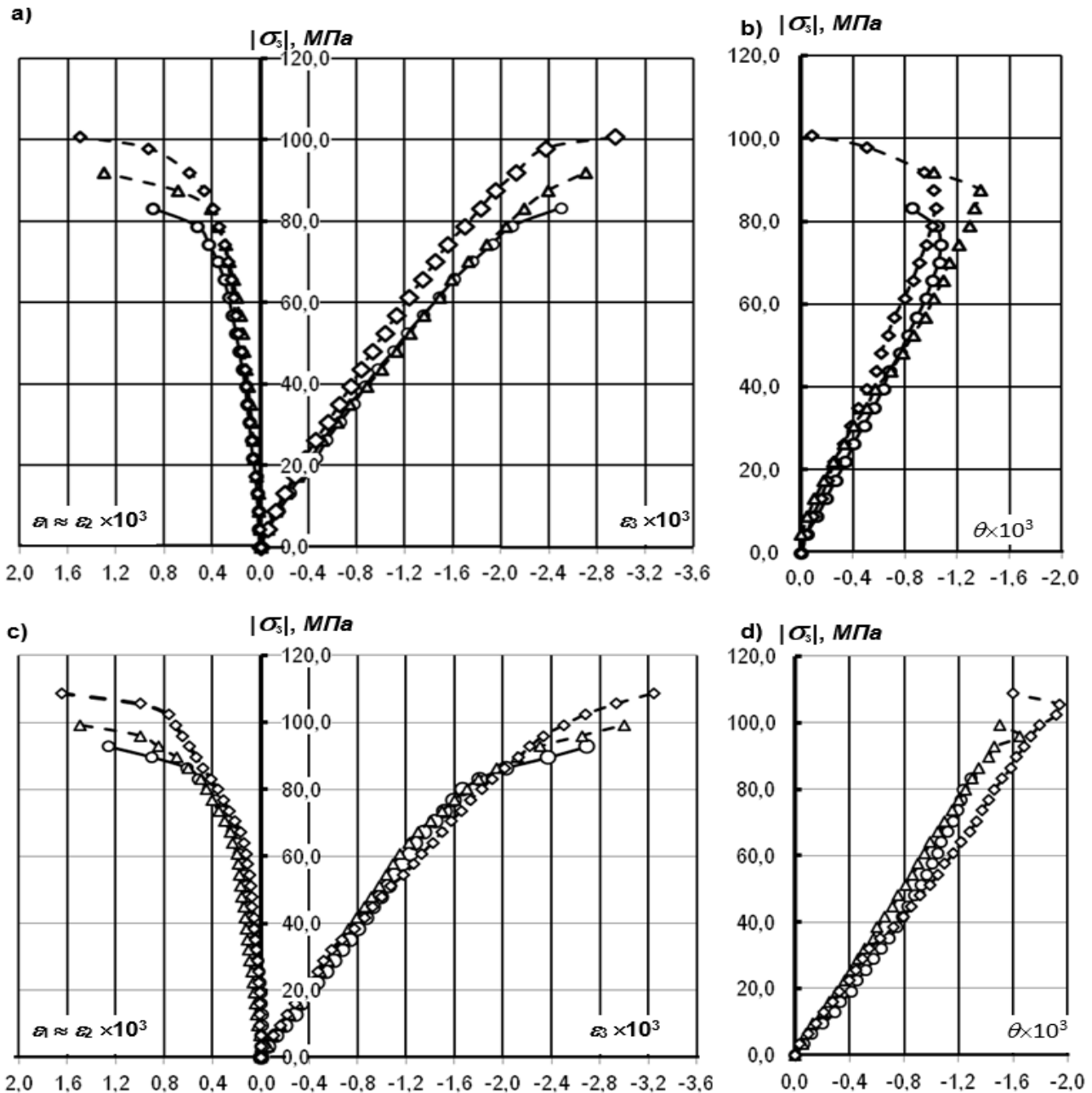
▲ ◆ — нагрев длительный, $\mu_{sfb} = 0,6, 2,5\%$

△ ◇ — нагрев кратковременный, призмы размерами $250 \times 250 \times 650$ мм, $\mu_{sfb} = 0,6, 2,5\%$

Рисунок 1. Влияние процента фибрового армирования μ_{sfb} на прочность (а), начальный модуль упругости (б), предельную сжимаемость (с) и предельную растяжимость (д) высокопрочного сталефибробетона в условиях кратковременного и длительного нагрева при температуре t° (составлено автором)

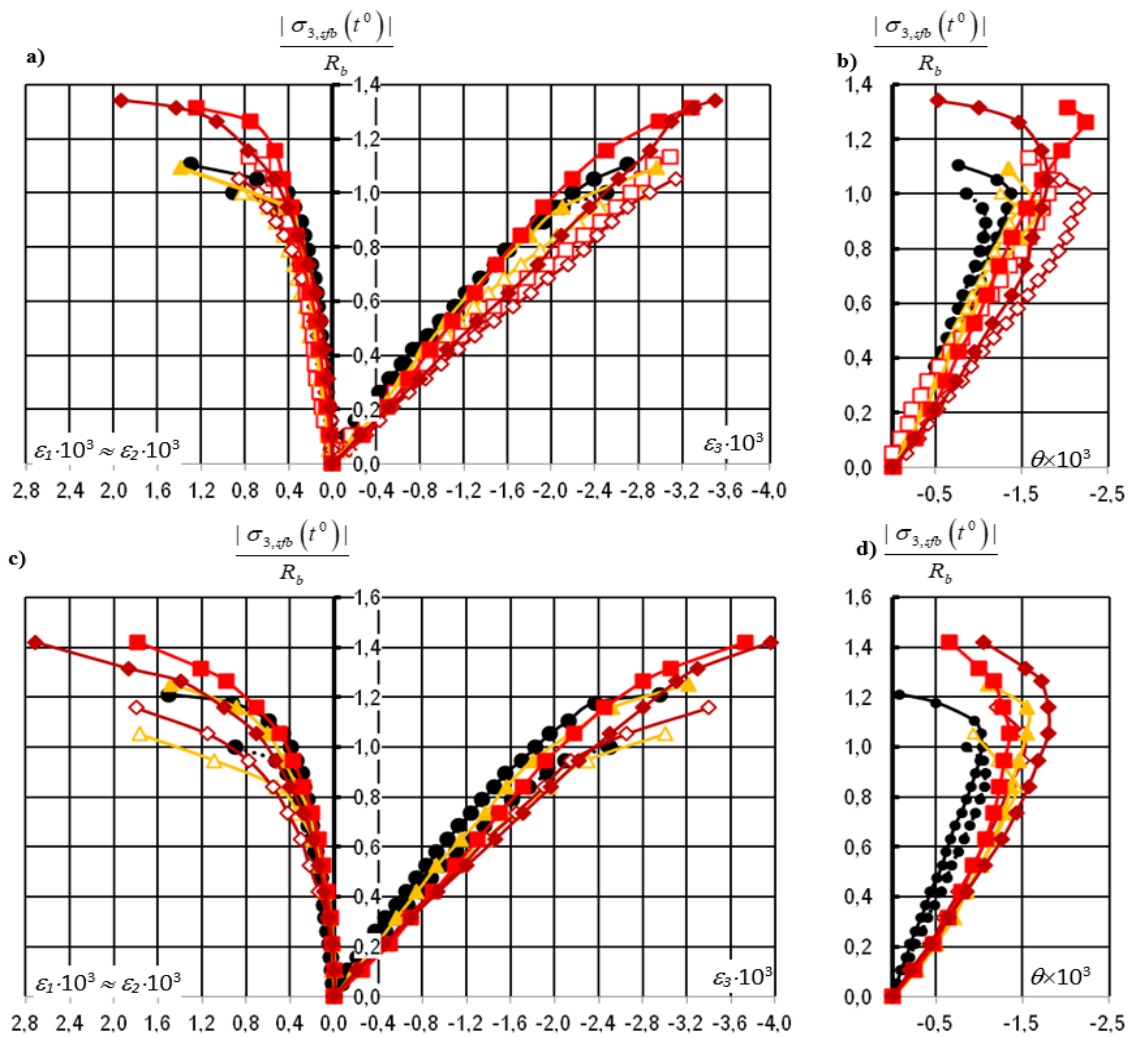
Предельная сжимаемость высокопрочного сталефибробетона для образцов-призм размерами $150 \times 150 \times 600$ (мм) с $\mu_{sfb} = 0,6\%$ при кратковременном нагреве до $+90^\circ\text{C}$, $+150^\circ\text{C}$ и $+200^\circ\text{C}$ увеличилась на 12 %, 22 % и 24 % соответственно, по сравнению со значениями при нормальной температуре, а для образцов с $\mu_{sfb} = 2,5\%$ при кратковременном нагреве до $+90^\circ\text{C}$ и $+200^\circ\text{C}$ — соответственно на 20 % и 36 %. Для образцов размерами $250 \times 250 \times 650$ (мм) из высокопрочного сталефибробетона с $\mu_{sfb} = 0,6\%$ при кратковременном нагреве до $+90^\circ\text{C}$ и $+200^\circ\text{C}$ предельная сжимаемость увеличилась на 26,8 % и 36,8 % (рис. 2 в, 5 а), а для образцов с $\mu_{sfb} = 2,5\%$ при тех же температурах нагрева — на 39,6 % и 46,4 % соответственно (рис. 2 в, 5 в) в сравнении со значениями на не нагреваемых образцах стандартных размеров (рис. 1 с).

Прочность при осевом растяжении образцов из высокопрочного сталефибробетона с $\mu_{sfb} = 2,5 \%$ при температурах кратковременного нагрева $+90^\circ$ и $+150^\circ\text{C}$ снизилась в большей степени, чем при осевом сжатии, и составила соответственно 0,73 и 0,82 от прочности контрольных образцов в условиях нормальной температуры (рис. 1 е). Для сравнения, снижение прочности обычного тяжелого бетона средней прочности при $t^\circ = 90^\circ\text{C}$ достигало 32 % [3].



Условные обозначения: \circ — $\mu_{sfb} = 0 \%$; \triangle — $\mu_{sfb} = 0,6 \%$; \diamond — $\mu_{sfb} = 2,5 \%$

Рисунок 2. Диаграммы деформирования « σ - ε » (а, с) и деформаций относительного изменения объема $\theta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ (b, d) образцов-призм из высокопрочного сталефибробетона размерами $150 \times 150 \times 600$ мм с процентами фибрового армирования $\mu_{sfb} = 0 \%$, $0,6 \%$ и $2,5 \%$ при осевом сжатии в условиях нормальной температуры (составлено автором)



Условные обозначения: $\bullet\bullet\bullet$ — $t^0 = 20^\circ\text{C}$ (при $\mu_{sfb} = 0\%$); $\bullet\bullet$ — $t^0 = 20^\circ\text{C}$

Кратковременный нагрев: \triangle — $t^0 = 90^\circ\text{C}$; \square — $t^0 = 150^\circ\text{C}$; \diamond — $t^0 = 200^\circ\text{C}$

Длительный нагрев: \blacktriangle — $t^0 = 90^\circ\text{C}$; \blacksquare — $t^0 = 150^\circ\text{C}$; \blacklozenge — $t^0 = 200^\circ\text{C}$

Рисунок 3. Влияние кратковременного и длительного нагрева при температурах $+90^\circ$, $+150^\circ$ и $+200^\circ\text{C}$ на диаграммы деформирования образцов-призм размерами $150 \times 150 \times 600$ мм из высокопрочного сталефибробетона с процентами армирования: $\mu_{sfb} = 0,6\%$ (a, b) и $\mu_{sfb} = 2,5\%$ (c, d) при осевом сжатии: (a, c) — компоненты линейных деформаций; (b, d) — деформации относительного изменения объема $\theta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ (составлено автором)

Анализ диаграмм деформирования высокопрочного сталефибробетона свидетельствует о наличии общих закономерностей в изменении показателей механических свойств в зависимости от температуры нагрева. Уровни нагружения, соответствующие практически упругому деформированию бетона, оказались примерно одинаковыми для всех температур и находились в диапазоне $0,8 \div 0,9$ от значений призмной прочности. Процесс упругого сокращения объема образцов из высокопрочного модифицированного бетона и сталефибробетона сменялся его увеличением (проявление эффекта дилатации) при уровнях нагружения выше $0,8 * R_{b,sfb}(t^0)$.

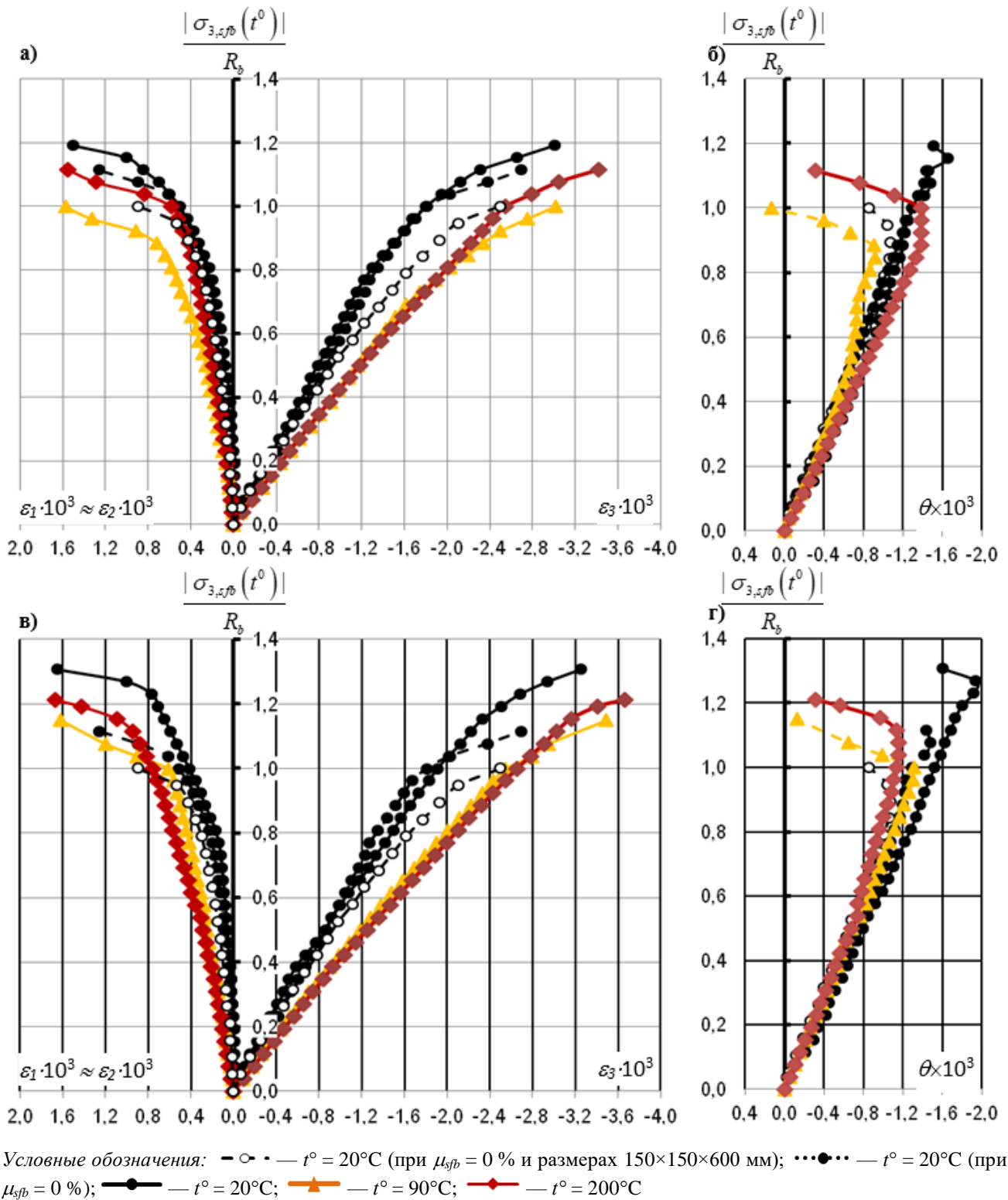


Рисунок 4. Влияние кратковременного нагрева при температурах $+90^{\circ}$, $+150^{\circ}$ и $+200^{\circ}\text{C}$ на диаграммы деформирования образцов-призм размерами $250 \times 250 \times 650$ мм из высокопрочного сталефибробетона с процентами армирования $\mu_{\text{сfb}} = 0,6\%$ (а, б) и $\mu_{\text{сfb}} = 2,5\%$ (в, г) при осевом сжатии: (а, в) — компоненты линейных деформаций, (б, г) — деформации относительного изменения объема $\theta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ (составлено автором)

Выводы

1. Введение фибрового стального армирования в количестве $\mu_{sfb} \leq 2,5$ % . повышает характеристики свойств высокопрочного сталефибробетона в условиях нормальной температуры: по прочности на сжатие — на величину до 21 %; на растяжение — до 24 %; начального модуля упругости — на 27 %; предельной сжимаемости — на 18 %; предельной растяжимости — до 10 %.

2. Кратковременный нагрев образцов стандартных размеров из высокопрочного сталефибробетона с $\mu_{sfb} \leq 2,5$ % . приводит в диапазоне температур до +200°C к наибольшему снижению прочности на сжатие на величину до 10 %, на растяжение — до 27 %, к снижению начального модуля упругости, в среднем, на 38 %, к повышению предельной сжимаемости в 1,3 и предельной растяжимости — в 2,7 раза. При этом для крупноразмерных образцов-призм при тех же температурах нагрева характерно повышение прочности на сжатие до 21 %, повышение начального модуля упругости на 9 %, повышение предельной сжимаемости до 15 % по отношению к образцам эталонных размеров из бетона с $\mu_{sfb} = 0$ %.

3. Длительный нагрев стандартных образцов из высокопрочного сталефибробетона приводит в исследованном диапазоне температур к повышению прочности на сжатие на величину до 40 %, к снижению значений начального модуля упругости до 50 %, к повышению предельной сжимаемости на 59 % по сравнению с кратковременным нагревом при соответствующих температурах.

4. В относительных величинах снижение прочностных и жесткостных характеристик у высокопрочного сталефибробетона в условиях нагревания до 200°C проявляется в гораздо меньшей степени, чем у обычного тяжелого неармированного бетона средней прочности, что связано со сдерживающим влиянием фибрового армирования на развитие деструктивных процессов в бетоне в процессе нагружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. B. Mobasher, M. Bakhshi, C. Barsby, Backcalculation of residual tensile strength of regular and high performance fiber reinforced concrete from flexural tests. *Construction and Building Materials*. 70, 243–253 (2014).
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.037>.
2. Мишина А.В. Изменение физико-механических свойств характеристик высокопрочного сталефибробетона во времени. // Научно-технический журнал «Строительство и реконструкция», № 6(38), г. Орел, 2011 г., с. 70–74.
3. Корсун В.И. Напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций в условиях температурных воздействий — Макеевка: ДонГАСА, 2003. — 153 с. ISBN: 966-7477-38-X URL: <https://www.academia.edu/12420694> (date of application: 03.02.2021).
4. Мишина А.В., Чилин И.А., Андрианов А.А. Физико-технические свойства сверхвысокопрочного сталефибробетона // Научно-технический журнал Вестник МГСУ. — 2011. — С. 159.
5. Korsun, V. Characteristics of mechanical and rheological properties of concrete under heating conditions up to 200°C / Korsun, V., Korsun, A., Volkov, A. // *Concrete Spalling due to Fire Exposure: Proceedings of the 3rd International Workshop, MATEC Web of Conferences*. — 2013. — № 6. — P. 1–8.
<https://doi.org/10.1051/matecconf/20130607002>.

6. Korsun, V.I., Korsun, A.V. The Influence of the Scale Effect and High Temperatures on the Strength and Strains of High Performance Concrete (2014) Vestnik MGSU, 3, pp. 179–188.
7. Korsun, V. The Strength and Strain of High-Strength Concrete Elements with Confinement and Steel Fiber Reinforcement including the Conditions of the Effect of Elevated Temperatures / Korsun, V., Vatin, N., Franchi, A., Korsun, A., Crespi, P., Mashtaler, S. // International Scientific Conference Urban Civil Engineering and Municipal Facilities, SPbUCEME-2015. — Procedia Engineering, 2015. — № 117. — P. 975 — 984. <https://www.researchgate.net/publication/281591964> The Strength and Strain of High-strength Concrete Elements with Confinement and Steel Fiber Reinforcement Including the Conditions of the Effect of Elevated Temperatures doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.192.
8. Корсун В.И., Корсун А.В., Машталер С.Н. Влияние косвенного и фибрового армирования на прочность и деформации элементов из высокопрочного модифицированного бетона // Механика разрушения строительных материалов и конструкций: Материалы VIII Академических чтений РААСН. — Казань: КГАСУ, 2014. — С. 132–137.
9. V. Afroughsabet, L. Biolzi, T. Ozbakkaloglu, High-performance fiber-reinforced concrete: a review. Journal of Materials Science. 51 (2016), pp. 6517–6551. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-9917-4>.
10. A.K. Azad, S. Ahmad, I. Hakeem, Effect of cyclic exposure and fibre content on tensile properties of ultra-highperformance concrete. Advances in Cement Research. 25, 273–280 (2013). <https://doi.org/10.1680/adcr.12.00039>.
11. S.A.S. Akash, Compressive strength and modulus of elasticity of steel fiber reinforced concrete (SFRC) under different temperature conditions (2014).
12. Y.A. Al-Salloum, H.M. Elsanadedy, A.A. Abadel, Behavior of FRP-confined concrete after high temperature exposure. Construction and Building Materials. 25, 838–850 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.103>.
13. Journal, I., Engineering, O.F., Experimental, A.N., Of, A., Properties, S., High, O.F., Concrete, S., Steel, U. International journal of engineering sciences & research technology an experimental analysis of strength properties of high strength concrete using steel fibers. 2017. 6(12). Pp. 308–316.
14. Islam, M.M; Sayeed, M.A, Hossain, E.A; Ahmed, S.S; Chowdhury, M.A and Siddique, A. 2014. Investigation of Direct Tension Capacity of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC): Finite Element (FE) Analyses of Experimental Outcomes. Proceedings of the 2nd International Conference on Civil Engineering for Sustainable Development (ICCESD-2014), KUET, Khulna, Bangladesh. Pp. 374–379.
15. D. Guleria, J. Kamboj, Study of mechanical properties of high strength concrete by using steel fiber — A review. International Journal of Civil Engineering and Technology. 7 (2016), pp. 63–71.
16. Bangi M.R., Horiguchi T. Effect of fibre type and geometry on maximum pore pressures in fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures // Cement and Concrete Research. — 2012. — Vol. 42. — No. 2. — Pp. 459–466.

17. S. Guler, E. Lale, M. Aydogan, Non-linear analysis of steel fibre reinforced concrete-filled steel tube columns. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*. 166, 298–306 (2013). <https://doi.org/10.1680/stbu.11.00070>.
18. Morozov, V.I. The numerical investigations of double-span concrete beams strengthened with fiber reinforced plastics across the oblique section / V.I. Morozov, Yu.V. Pukharensko, A.V. Yushin // *Materials Physics and Mechanics*. — 2017. — Т. 31. — № 1-2. — С. 40–43.
19. Evdokimova, T. Experimental diagrams of fiber concrete straining under tension and compression and their implementation in calculation of bearing capacity of fiber-reinforced concrete flexural elements / T. Evdokimova, V. Morozov, E. Opubl, A. Khagai // *Materials Science Forum* 871. — 2016. — Pp. 160–165. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.871.160.
20. Rodsin, K, Sappakittipakorn, M., Sukontasukkul, P. Seismic Performance Enhancement of Non-Ductile RC Columns Using Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) (2013) *Advanced Materials Research*, Vol. 747, pp. 773–776.
21. Карпенко Н.И., Травуш В.И., Каприелов С.С., Безгоднов И.М., Мишина А.В. Исследование физико-механических и реологических свойств высокопрочного сталефибробетона. *Архитектура и строительство*, 1, с. 106–113.
22. Li, X. The Research of SFRC Column Reinforced by FRP Applied (2013) *Mechanics and Materials*, Vols. 351-352, pp. 1381–1384.
23. Klyuyev, S.V. High-strength fiber concrete for industrial and civil construction (2012) *Magazine of Civil Engineering*, 8, pp. 61–66.
24. Barabanshchikov Y.G., Komarinskiy M.V. Influence of superplasticizer S-3 on the technological properties of concrete mixtures // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 941-944. Pp. 780-785.
25. Y. Ding, C. Azevedo, J.B. Aguiar, S. Jalali, Study on residual behaviour and flexural toughness of fibre cocktail reinforced self compacting high performance concrete after exposure to high temperature. *Construction and Building Materials*. 26, 21–31 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.058>.

Korsun Vladimir Ivanovich

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia
E-mail: korsun_vi@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9445-5027>

RSCI: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=758915

WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/C-6381-2019>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=56226922300>

Mashtaler Sergei Nikolaevich

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeyevka, Russia
E-mail: mashtaler_sergey@mail.ru

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=787062

WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/ABC-6575-2021>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=56825932200>

The influence of short-term heating on the strength and strain of high-strength steel fiber reinforced concrete under axial compression and tension

Abstract. The high pace of construction of residential and industrial buildings with complex architectural forms, the construction of special structures of long-span bridges, skyscrapers, offshore oil platforms, tanks for storing liquids and gases, etc., require the development of new effective concretes. These materials include dispersedly reinforced high-strength concrete. Dispersed reinforced concrete is becoming increasingly common in modern construction, design and calculation of structures. Fiber reinforcement makes it possible to reduce the influence of the main disadvantages of concrete — relatively low tensile and flexural strength, brittleness of fracture, shrinkage and creep deformations.

Fiber reinforcement is an effective means of increasing the strength and deformability of concrete in compression and tension, crack resistance and rigidity of reinforced concrete structures, which is especially important for heavily loaded structures of high-rise buildings and structures, as well as for structures exposed to variable temperature and humidity influences.

The use of high-strength steel fiber-reinforced concrete for structures exposed to temperature influences is hampered by insufficient knowledge of the influence of elevated temperatures and the duration of their action on the main characteristics of the physical and mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete, on the formation of the stress-strain state of steel fiber-reinforced concrete structures. The article presents the results of experimental studies of the influence of the percentage of steel dispersed reinforcement on the strain diagrams and characteristics of the physical and mechanical properties of high-strength steel fiber concrete under axial compression and tension under conditions of exposure to temperatures elevated to 200°C. The influence of the percentage of fiber reinforcement, short-term and long-term heating on strain diagrams, strength characteristics, initial elastic modulus, and limiting values of shortening and elongation strains has been established.

Keywords: high-strength steel fiber reinforced concrete; short-term heating; axial compression and tension; strain; strength; stress-strain state; ultimate compressibility