

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.042.5:539.3

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.373-388

Исследование напряженно-деформированного состояния конструкции фундамента с учетом влияния повышенных температур на механические характеристики высокопрочного сталефибробетона

Сергей Николаевич Машталер, Виктор Николаевич Левченко,
Кирилл Александрович Казак

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры — филиал Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (ДОННАСА — филиал НИУ МГСУ); г. Макеевка, Донецкая Народная Республика, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Анализ исследований показывает, что повышенные температуры существенно изменяют физико-механические свойства бетонов, включая высокопрочный сталефибробетон, что снижает достоверность расчетных моделей термически нагруженных конструкций. Совместное действие тепловых и силовых факторов обуславливает вариацию прочностных и деформационных характеристик материала. В этом контексте особый практический интерес представляют сооружения, эксплуатируемые в условиях длительного теплового воздействия. Машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) — основной металлургический агрегат для разлива стали, требует массивных фундаментов, работающих в условиях длительного теплового воздействия, что делает исследование их механических характеристик актуальным.

Материалы и методы. Приведены результаты испытаний образцов из высокопрочного сталефибробетона с содержанием фибры $\mu_{sfb} = 0$ и 2,5 %. Проведена оценка влияния процента фибрового армирования и повышенных температур на основные механические характеристики материала. На основе полученных данных выполнено численное моделирование фундамента МНЛЗ методом конечных элементов с применением диаграммного расчетного метода, учетом физической нелинейности (по кусочно-линейному закону деформирования), реальных условий эксплуатации и температурного режима. Для моделирования использован программный комплекс «Лира-САПР 2020», обеспечивающий учет неоднородности температурно-усадочных деформаций и фактических диаграмм деформирования материала.

Результаты. Получены параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) и значения механических свойств высокопрочного сталефибробетона с учетом продолжительности нагрева до +200 °С. Численное моделирование показало, что неоднородное распределение температуры по объему конструкции существенно влияет на НДС элементов. Применение сталефибробетона в качестве вариативного материала позволило уменьшить растягивающие усилия и напряжения, а также повысить трещиностойкость конструкции.

Выводы. Введение до 2,5 % стальной фибры улучшает механические свойства при нормальной температуре. Кратковременный нагрев снижает прочность и модуль упругости, а длительное воздействие изменяет комплекс физико-механических характеристик. Анализ НДС фундаментов подтвердил эффективность применения сталефибробетона в условиях теплового воздействия.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: высокопрочный сталефибробетон, кратковременный нагрев, длительный нагрев, прочность, деформации, столбчатые фундаменты, напряженно-деформированное состояние

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00637 (URL: <https://rscf.ru/project/25-19-00637/>). Авторы выражают благодарность рецензентам (редакторской коллегии) журнала «Вестник МГСУ» за подробное рассмотрение и достойную оценку выполненных научных исследований.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Машталер С.Н., Левченко В.Н., Казак К.А. Исследование напряженно-деформированного состояния конструкции фундамента с учетом влияния повышенных температур на механические характеристики высокопрочного сталефибробетона // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 3. С. 373–388. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.373-388

Автор, ответственный за переписку: Кирилл Александрович Казак, k.a.kazak@donnasa.ru.

Investigation of the stress-strain state of the foundation structure, taking into account the influence of elevated temperatures on the mechanical characteristics of high-strength steel fibre concrete

Sergey N. Mashtaler, Viktor N. Levchenko, Kirill A. Kazak

Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture — branch of Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU) (DonNACEA — branch of National Research University MGSU); Makeyevka, Donetsk People's Republic, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The analysis of existing studies shows that elevated temperatures significantly alter the physical and mechanical properties of concrete, including high-strength steel fibre reinforced concrete, which reduces the reliability of calculation models for thermally loaded structures. The combined action of thermal and mechanical factors leads to variations in the strength and deformation characteristics of the material. In this context, structures operating under long-term thermal exposure are of particular practical interest. Continuous casting machines (CCM), which are the main metallurgical units for steel casting, require massive foundations operating under prolonged thermal effects, making the study of their mechanical characteristics highly relevant.

Materials and methods. The paper presents the test results of specimens made of high-strength steel fibre concrete with a fibre content of $\mu_{sf} = 0$ and 2.5 %. The influence of the percentage of fibre reinforcement and elevated temperatures on the basic mechanical characteristics of the material is estimated. Based on the data obtained, numerical modelling of the CCM foundation using the finite element method was performed using the diagrammatic calculation method, taking into account physical nonlinearity, real-world operating conditions and temperature conditions. The Lira-CAD 2020 software package was used for modelling, which takes into account the heterogeneity of temperature and shrinkage deformations and the actual deformation diagrams of the material.

Results. The parameters of the stress-strain state and the values of mechanical properties for high-strength steel fibre concrete are obtained, taking into account the duration of heating up to +200 °C. Numerical modelling has shown the influence of the heterogeneity of the temperature distribution over the volume of the structure on the stress-strain state of the studied elements. The use of high-strength steel-fibre concrete as a variable material made it possible to reduce the magnitude of tensile forces and stresses, as well as increase the crack resistance of the structure in question.

Conclusions. The introduction of up to 2.5 % steel fibre into the composition of high-strength concrete significantly increases its mechanical properties at normal temperatures. Experiments have shown that short-term heating reduces the strength and elastic characteristics, and prolonged temperature exposure changes the complex of physical and mechanical properties of the material. The analysis of the stress-strain state of the foundations confirmed the effectiveness of the use of high-strength steel-fibre concrete in conditions of thermal exposure.

KEYWORDS: high-strength steel fibre reinforced concrete, short-term heating, long-term heating, strength, deformation, column-type foundations, stress–strain state

Acknowledgements. This work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 25-19-00637 (URL: <https://rscf.ru/project/25-19-00637/>). The team of authors expresses its gratitude to the reviewers (editorial board) of the journal "Vestnik MGSU" for a detailed review and a worthy assessment of the scientific research carried out.

FOR CITATION: Mashtaler S.N., Levchenko V.N., Kazak K.A. Investigation of the stress-strain state of the foundation structure, taking into account the influence of elevated temperatures on the mechanical characteristics of high-strength steel fibre concrete. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(3):373-388. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.373-388 (rus.).

Corresponding author: Kirill A. Kazak, k.a.kazak@donnasa.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие промышленного и гражданского строительства обуславливает увеличение производства конструкций, испытывающих различное напряженное состояние. К таким конструкциям можно отнести колонны, балки (ригели), плиты покрытий или перекрытий, фундаменты и т.д. Одним из немаловажных факторов современного строительства является снижение материалоемкости, повышение эффективности применения новых строительных материалов. Высокопрочные бетоны наряду с очевидными преимуществами их использования характеризуются значительной плотностью, преимущественно упругим характером деформирования и повышенной склонностью к хрупкому разрушению.

Использование фибры в качестве дисперсного армирования бетонной смеси позволяет повысить вязкость разрушения бетона, увеличить способность материала перейти от хрупкого характера разрушения к пластичному. Один из основных факторов при-

менения фибрового армирования — качественное повышение прочностных и деформационных характеристик бетона, увеличение трещиностойкости и способности сопротивляться образованию микротрещин. Увеличение значений предельных деформаций сжимаемости и растяжимости также служит преимуществом при эксплуатации конструкций. Согласно данным экспериментальных исследований [1–3], сталефибробетон демонстрирует максимальную эффективность в конструкциях, подверженных комбинированному воздействию силовых и температурных нагрузок¹. Эта особенность делает его перспективным материалом для применения в условиях интенсивных термических воздействий.

Исследования различных авторов [4–21] свидетельствуют о зависимости параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) сталефибро-

¹ ACI 544.1R–96: State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete. Farmington Hills, MI : ACI, 1996. 66 p. (Reapproved 2002).

бетонных конструкций от количества и типа фибрового армирования. В работе [22] показано, что процент армирования существенно влияет на прочность, пластичность и НДС высокопрочного бетона. Кратковременный нагрев значительно меняет поведение бетона, повышая раннюю прочность, пластичность и энергоемкость материала, что подчеркивает актуальность изучения совместного влияния армирования и температурных воздействий на механические характеристики высокопрочного бетона [23].

Обзор научной литературы показывает, что влияние температурных условий на прочность и деформационные свойства сталефибробетона изучено недостаточно, что представляет особую актуальность для промышленных сооружений с высоким тепловыделением. Цель работы состоит в исследовании влияния нагрева до 200 °С и длительности его воздействия на прочностные и деформационные показатели высокопрочного сталефибробетона и в использовании экспериментально полученных диаграмм деформирования, а также в оценке их применимости для моделирования и расчета конструкций столбчатого фундамента машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) на Енакиевском металлургическом заводе (ЕМЗ) ООО «Южный горно-металлургический комплекс» (ООО «ЮГМК») для повышения надежности фундаментов. Метод диаграммного расчета, реализованный через ПК «Лира-САПР 2020», позволил учесть реальные температурные воздействия и определить критические зоны деформаций конструкции.

Численные расчеты столбов фундаментов МНЛЗ продемонстрировали, что неоднородные температурно-усадочные деформации напрямую влияют на НДС конструкции. Данные результаты дают возможность аргументированно рассматривать сталефибробетон как предпочтительный материал для таких условий.

Состав высокопрочного бетона (расход на 1 м³ бетонной смеси)

The composition of high-strength concrete (consumption per 1 m³ of concrete mix)

Составляющие бетонной смеси, кг/м ³ Components of the concrete mix, kg/m ³						Объемный вес, кг/м ³ Volume weight, kg/m ³	В/Ц W/C	В/В W/B	Щ/общ. CA/t	ФМ + ОММ/Ц SP + ОММ/С
Ц* С*	ОММ** ОММ**	П*** S***	В**** W****	ФМ***** SP*****	Щ***** СА*****					
545	190	660	153	16,8	870	2435	0,28	0,2	0,33	0,38

Примечание: * — цемент – портландцемент марки М500; ** — органоминеральный модификатор в виде сухой смеси, состоящий (в % от общего веса) из микрокремнезема в составе Sica Fume (20 %), тонкомолотой золошлаковой смеси Углегорской ТЭС (30 %), суперпластификатора С-3 (2 %), золы-уноса Зуевской ТЭС (48 %); *** — песок кварцевый с модулем крупности 1,9 мм; **** — вода водопроводная; ***** — суперпластификатор ФМ794 (Sica Viscocrete5-600); ***** — щебень гранитный фракции 5–20 мм.

Note: * — cement is M500 grade Portland cement; ** — organomineral modifier in the form of a dry mixture, consisting (in % of total weight): silica in Sica Fume (20 %), finely ground ash and slag mixture from Uglegorsk thermal Power plant (30 %), superplasticizer C-3 (2 %), fly ash from Zuyevskaya thermal Power plant (48 %); *** — quartz sand with a grain size of 1.9 mm; **** — water – tap water; ***** — superplasticizer FM794 (Sica Viscocrete5-600); ***** — crushed stone granite fractions of 5–20 mm.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Состав сталефибробетона и конструкции опытных образцов

В качестве базового варианта для выполнения экспериментальных исследований подобран состав высокопрочного бетона, представленный в таблице.

В программу испытаний включены две серии призмических образцов для определения прочности при осевом сжатии и растяжении, различающиеся объемным содержанием стальной фибры: первая серия ($\mu_{fib} = 0$) не содержала фибрового армирования, вторая ($\mu_{fib} = 2,5$ %) была армирована фиброй в количестве 200 кг/м³. Во всех армированных сериях применялась стальная анкерная фибра с загнутыми концами.

Основные испытания проведены на призмических образцах размерами 150 × 150 × 600 мм. Контрольные испытания выполнены на кубических образцах с размером ребра 150 мм. Все тепловые и механические воздействия приложены к бетону в возрасте 28–30 сут.

Для анализа и оценки НДС элементов столбчатого фундамента, а также проверки целесообразности применения высокопрочного сталефибробетона осуществлены сравнительные расчеты конструкции в двух вариантах исполнения:

- с использованием тяжелого бетона проектного класса по прочности В40 (базовый вариант), принят на основании натурного обследования столбчатых фундаментов МНЛЗ ЕМЗ ООО «ЮГМК» (г. Енакиево) [24];
- с применением высокопрочного сталефибробетона с процентом фибрового армирования $\mu_{fib} = 2,5$ % (модифицированный вариант).

Объект исследования — столбчатый фундамент МНЛЗ ЕМЗ ООО «ЮГМК» (г. Енакиево) на различных этапах технологического процесса.

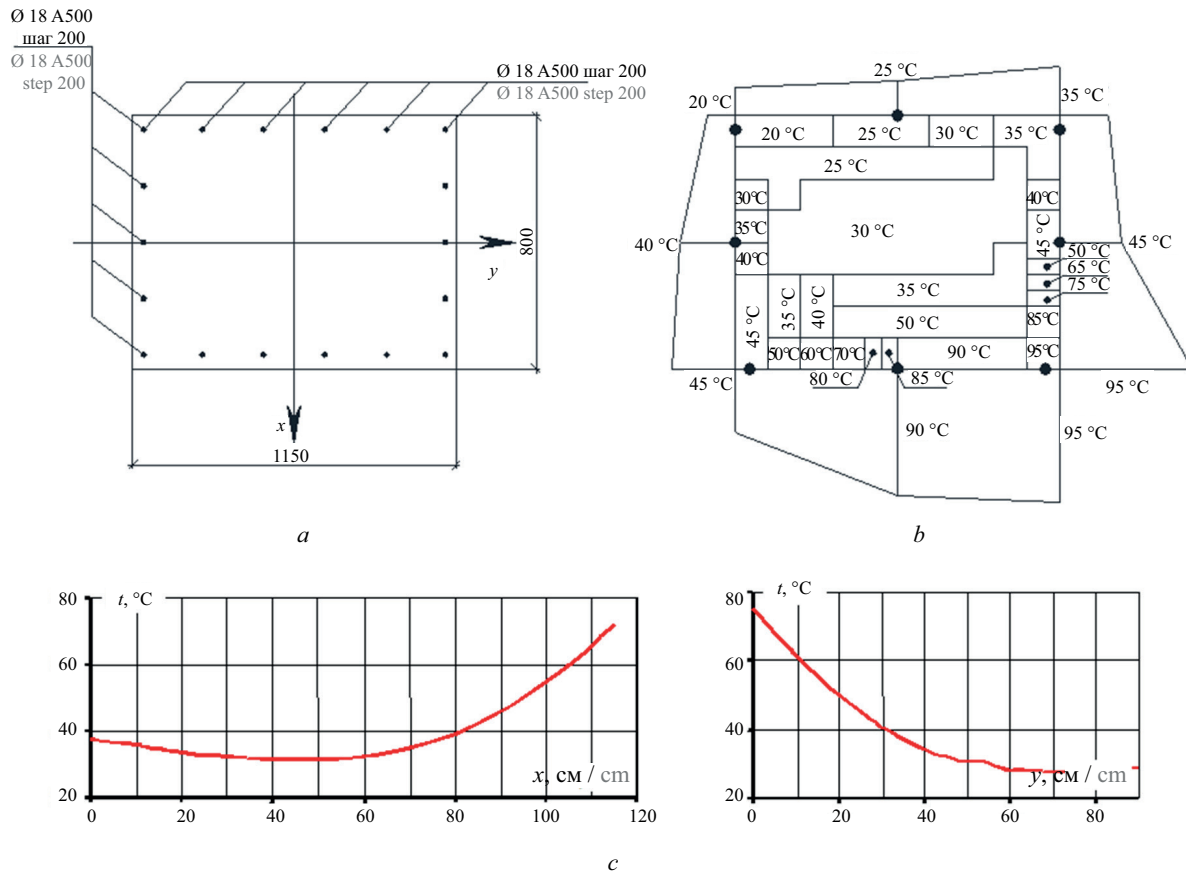


Рис. 1. Схема армирования (а); распределение температуры (b, c) в сечениях конструкции фундамента МНЛЗ
 Fig. 1. Reinforcement layout (a) and temperature distribution (b, c) in the cross-sections of the CCM foundation structure

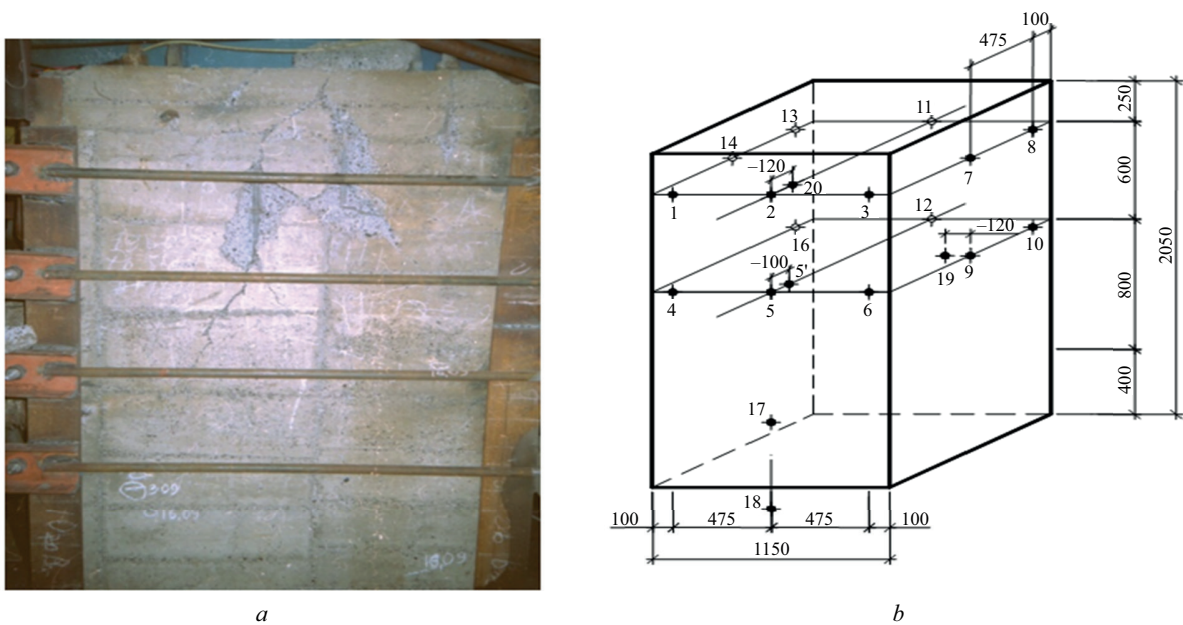


Рис. 2. Конструкция столбчатого фундамента с повреждениями (а) и схема расположения ХК-термопар (b) МНЛЗ ЕМЗ ООО «ЮГМК» г. Енакиево

Fig. 2. Damage to the column foundation structure (a) and layout of CC-thermocouples (b) of the CCM YISW LLC “SMMC” at the Yenakiieve

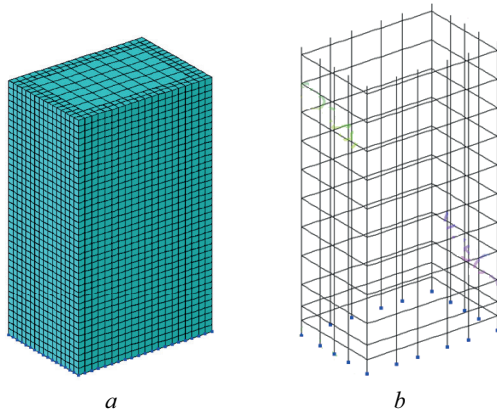


Рис. 3. Общий вид (а) и схема армирования (б) расчетной модели столбчатого фундамента МНЛЗ

Fig. 3. General view (a) and reinforcement layout (b) of the computational model of the column foundation of the CCM

Фундаменты передают нагрузку от вышележащих главных балок и имеют жесткую заделку в нижней части. Сечение фундаментного столба и расположение арматуры представлены на рис. 1, а.

В расчетной модели учтено влияние температурных воздействий и выполняется анализ при совместном действии силовых и тепловых нагрузок. Распределение температуры представлено на рис. 1, б в соответствии с расположением ХК-термопар на рис. 2, б, что позволяет моделировать тепловое поле, приближенное к экспериментальным условиям.

При создании расчетной модели использовались параметры НДС столбов фундаментов МНЛЗ ЕМЗ ООО «ЮГМК», полученные на основании натурных исследований [24] температурных деформаций и фактического распределения температурных полей в объеме конструкций (рис. 1, б, с; рис. 2, б).

В качестве расчетных критериев прочности принят стандартный закон деформирования, используемый в ПК «Лира-САПР 2020», для базового варианта. Для модифицированного варианта применяется фактическая диаграмма деформирования сталефибробетона.

Расчет совместного воздействия температурных и силовых факторов на фундамент выполнялся методом конечных элементов (МКЭ) с использованием ПК «Лира-САПР 2020», при этом учитывалась физическая нелинейность материалов, по кусочно-линейному закону деформирования.

Нелинейные свойства бетона и арматуры учитывались с помощью кусочно-линейного закона деформирования (тип 14). Диаграмма для высокопрочного сталефибробетона с $\mu_{sfb} = 2,5\%$ при $t = 90\text{ }^\circ\text{C}$ приведена в разделе «Результаты экспериментальных исследований». Моделирование столбчатого фундамента осуществлялось объемными универсальными пространственными КЭ (тип 236); продольная арматура учитывалась физически нелинейными шаговыми

элементами (тип 204), поперечная — универсальными стержневыми КЭ (тип 10). Параметры диаграммы бетона взяты из исследования [25] и приведены в идеализированном виде на рис. 3.

Методика испытаний

При проведении экспериментальных исследований для анализа и контроля использовались следующие параметры НДС элемента: прочность на осевое сжатие $R_{b,sfb}$, начальный модуль упругости $E_{b,sfb}$, величины предельных деформаций сжимаемости и растяжимости ($\epsilon_{ub,sfb}$ и $\epsilon_{ubr,sfb}$) и коэффициент поперечных деформаций μ_{sfb} . Исследуемые факторы влияния: процент объемного фибрового армирования ($\mu_{sfb} = 0$ и $2,5\%$), температура испытаний (20, 90, 150 и $200\text{ }^\circ\text{C}$), режим нагрева — кратковременный и длительный.

В процессе проведения экспериментальных исследований было испытано 24 куба и 16 образцов-призм, по 3 куба и 2 образца-призмы, на каждый исследуемый диапазон температур ($+20$, $+90$, $+150$ и $+200\text{ }^\circ\text{C}$).

В процессе выполнения эксперимента для измерения деформаций призм применялись индикаторы часового типа. Осуществление температурного нагрева образцов происходило при помощи разработанных электронагревательных элементов (температурных «рубашек»). Скорость набора температуры — $15\text{ }^\circ\text{C/ч}$. Кратковременный нагрев до температур $+90$, $+150$ и $+200\text{ }^\circ\text{C}$ проводился на протяжении 15, 13 и 12 ч. Длительный нагрев производился в течение 20–90 сут, что соответствует установленным экспериментальным значениям критического снижения прочности тяжелого бетона в аналогичных температурных условиях [26].

В качестве аналитического описания диаграмм деформирования образцов из высокопрочного и сталефибробетона использованы зависимости Европейского комитета по железобетону (ЕКБ – ФИП)², зависящие от значений прочности R_b , начального модуля упругости E_b и предельной сжимаемости $\bar{\epsilon}_b$ бетона:

$$\sigma = \epsilon_b \cdot E_b \cdot \left[\frac{1 - \eta/k}{1 + (k - 2)} \right], \quad (1)$$

$$\text{где } \eta = \frac{\epsilon_b}{\bar{\epsilon}_b}; k = \frac{1}{\nu} = \frac{E_b \cdot \bar{\epsilon}_b}{R_b} \approx 1,4. \quad (2)$$

Для случая осевого растяжения, согласно ЕКБ², коэффициент k в формуле (1) определяется из выражения:

$$k = \frac{2}{3} = \frac{E_{bt} \cdot \bar{\epsilon}_{bt}}{R_{bt}}. \quad (3)$$

² Кодекс-образец ЕКБ – ФИП для норм по железобетонным конструкциям. М.: НИИЖБ, 1984. Т. II. 284 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты экспериментальных исследований

На рис. 4 представлены графики зависимости, характеризующие процесс деформирования и относительное изменение объема образцов-призм из высокопрочного сталефибробетона.

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 $\bar{\epsilon}_{bt0} = 0,121 \cdot 10^{-3}$ и $0,133 \cdot 10^{-3}$ (рис. 5).

Графики влияния продолжительности нагрева и процента фибрового армирования на диаграммы деформирования образцов-призм из высокопрочного сталефибробетона при температурах 90–200 °С приведены на рис. 6, 7.

Значения характеристик механических свойств контрольных образцов из высокопрочного сталефибробетона в условиях нормальной температуры

Для определения базовых прочностных характеристик в условиях нормальной температуры ис-

пытаны образцы-кубы с ребром 150 мм в возрасте 7 и 28 сут. Значения прочности кубов R_{sfb} с процентами фибрового армирования $\mu_{sfb} = 0$ и 2,5 % на 7 сут составили 74,2 и 86,6 МПа, а на 28 сут — 99 и 111 МПа соответственно.

В ходе испытаний призм стандартных размеров 150 × 150 × 600 мм средние значения прочности $R_{b,sf}$ при $\mu_{sfb} = 0$ и 2,5 % составили 83,5 и 101 МПа. Применение в бетонной смеси фибрового армирования с процентом $\mu_{sfb} = 2,5$ % привело к увеличению прочности на сжатие до 10–21 %.

Для образцов-призм с размерами 150 × 150 × 600 мм с процентами фибрового армирования $\mu_{sfb} = 0$ и 2,5 % значения $E_{b,sfb}$ составили в среднем $56,7 \cdot 10^3$ и $71,9 \cdot 10^3$ МПа соответственно.

Величины деформаций предельной сжимаемости для образцов размерами 150 × 150 × 600 (процент фибрового армирования $\mu_{sfb} = 0$ и 2,5 %) составили в среднем $\bar{\epsilon}_b = 2,6 \cdot 10^{-3}$ и $2,9 \cdot 10^{-3}$ соответственно. Поперечные деформации — $0,96 \cdot 10^{-3}$ и $1,48 \cdot 10^{-3}$ соответственно.

Для образцов-призм 150 × 150 × 600 мм коэффициент поперечной деформации при нормальной температуре составил $\mu = 0,17$ и $0,24$ для $\mu_{sfb} = 0$ и 2,5 % соответственно.

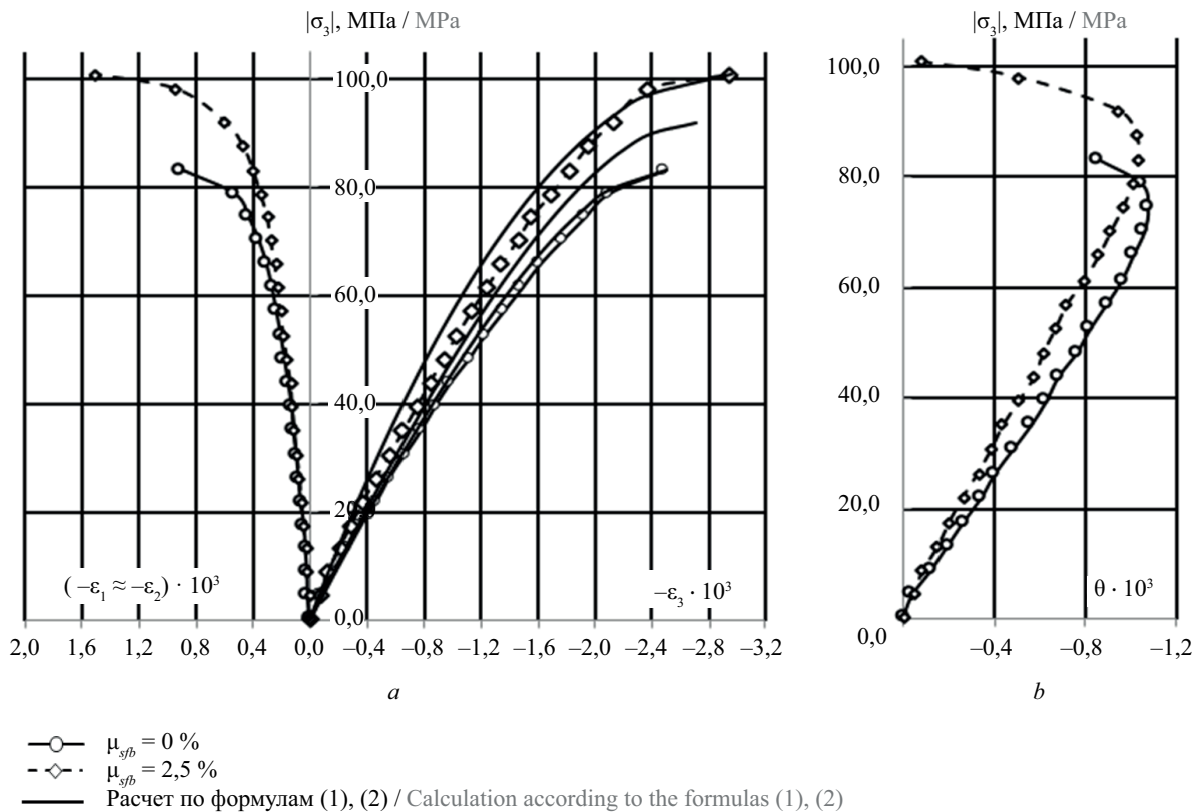


Рис. 4. Экспериментальные диаграммы «σ–ε» (a) и относительного изменения объема $\theta = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3$ (b) образцов-призм с размерами 150 × 150 × 600 мм с процентами фибрового армирования $\mu_{sfb} = 0$ и 2,5 % при осевом сжатии в условиях нормальной температуры

Fig. 4. Experimental diagrams “σ–ε” (a) and relative volume variation $\theta = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3$ (b) of prism specimens with dimensions 150 × 150 × 600 mm with percentages of fibre reinforcement $\mu_{sfb} = 0$ and 2.5 % under axial compression at normal temperature

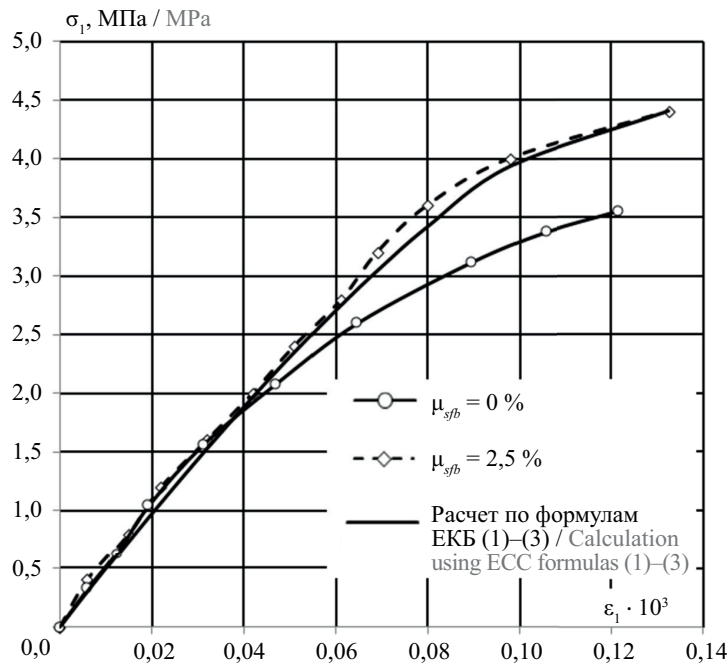


Рис. 5. Диаграмма деформирования « $\sigma - \epsilon$ » высокопрочного сталефибробетона образцов-призм с размерами $100 \times 100 \times 400$ мм с процентами фибрового армирования $\mu_{sfb} = 0$ и $2,5$ % при осевом растяжении

Fig. 5. Stress-strain diagrams « $\sigma - \epsilon$ » of high-strength steel fibre reinforced concrete prism specimens ($100 \times 100 \times 400$ mm) with fibre reinforcement ratios of $\mu_{sfb} = 0$ and 2.5 % under axial tension

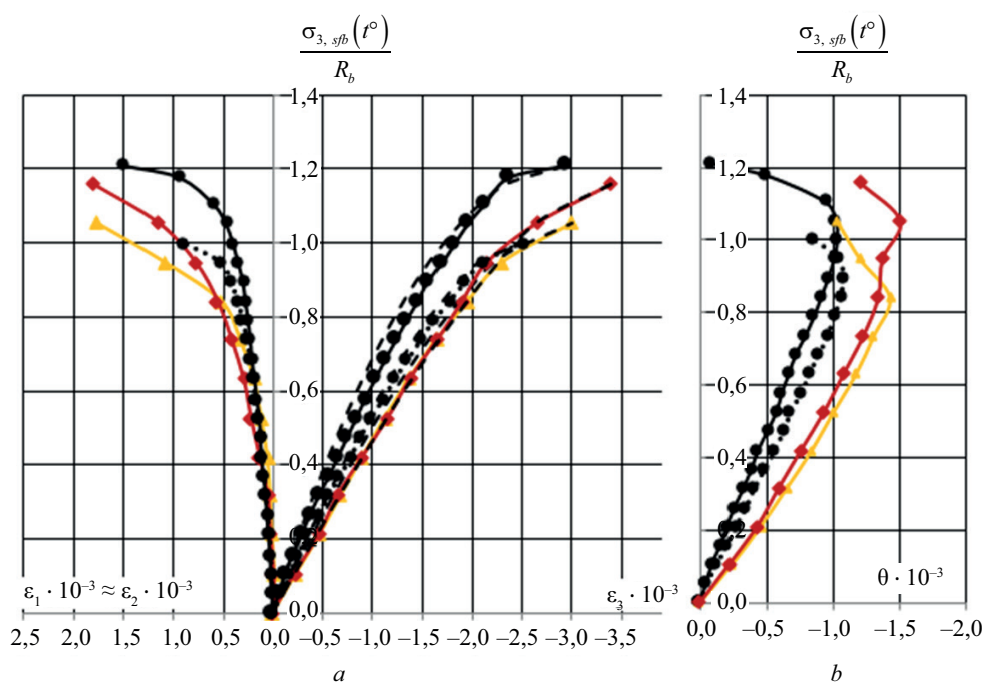
Влияние повышенных температур +90, +150 и +200 °С на характеристики механических свойств высокопрочного сталефибробетона

1. Прочность сталефибробетона.

Кратковременный нагрев образцов из высокопрочного бетона с $\mu_{sfb} = 0$ % до температур +90, +150 и +200 °С привел к снижению прочности на осевое сжатие. Прочность R_b составила 0,9, 0,99 и 0,95

от прочности образцов, испытанных при условиях нормальной температуры.

Кратковременный нагрев образцов размерами $150 \times 150 \times 600$ мм с фибровым армированием $\mu_{sfb} = 2,5$ % до температур +90 и +200 °С вызвал увеличение значений прочности $R_{b,sfb}$ на 6 и 16 % соответственно по сравнению с контрольными образцами, испытанными при нормальной температуре (рис. 6).



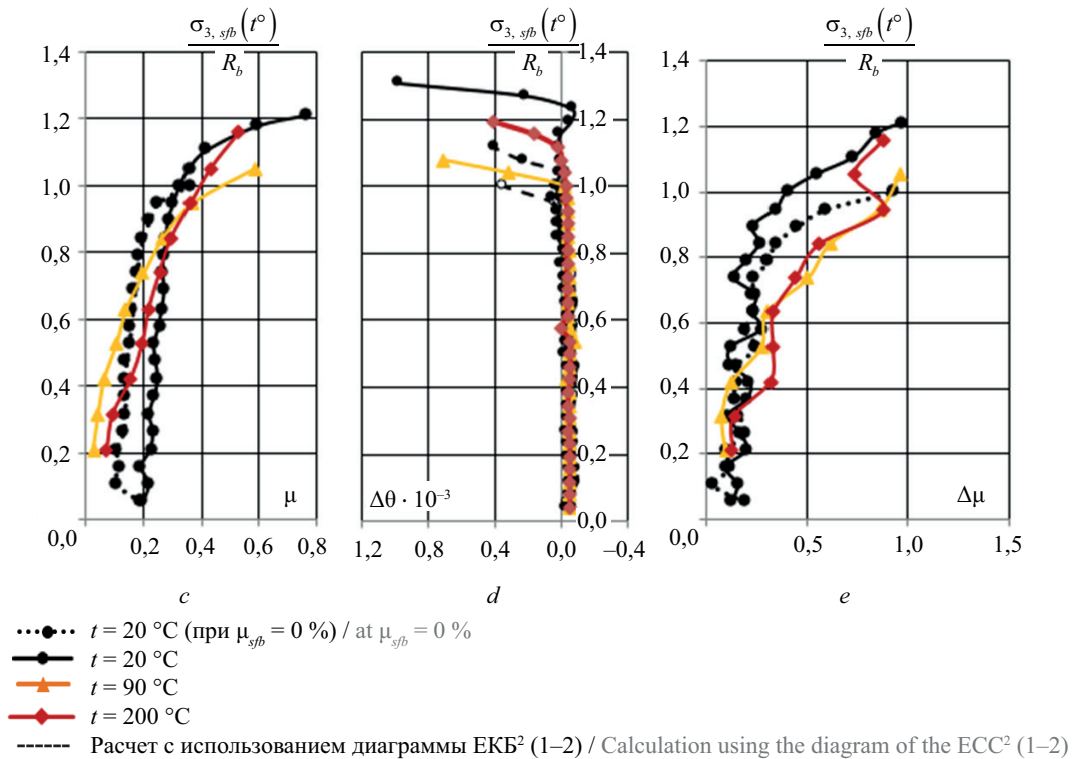
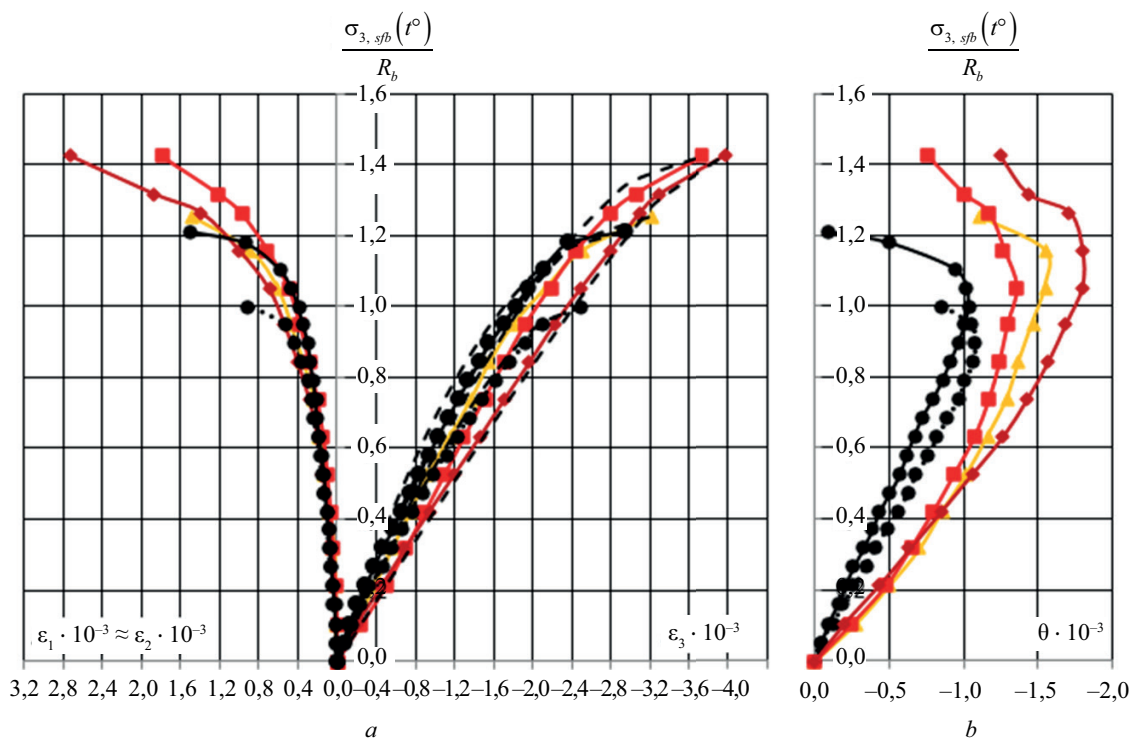


Рис. 6. Диаграммы деформирования образцов-призм размерами $150 \times 150 \times 600$ мм из высокопрочного сталефибробетона с $\mu_{sfb} = 2,5 \%$ при осевом сжатии при воздействии кратковременного нагрева до температур $+90$ и $+200$ $^\circ\text{C}$: осевые деформации (a); деформации относительного изменения объема $\theta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ (b); коэффициенты Пуассона (c); приращение объема (d); приращение коэффициента Пуассона (e)

Fig. 6. Diagrams of deformation of prism specimens measuring $150 \times 150 \times 600$ mm made of high-strength steel fibre concrete with $\mu_{sfb} = 2.5 \%$ under axial compression when exposed to short-term heating to temperatures of $+90$ and $+200$ $^\circ\text{C}$: axial deformations (a); relative volume change deformations $\theta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ (b); Poisson coefficients (c); volume increment (d); Poisson coefficient increment (e)



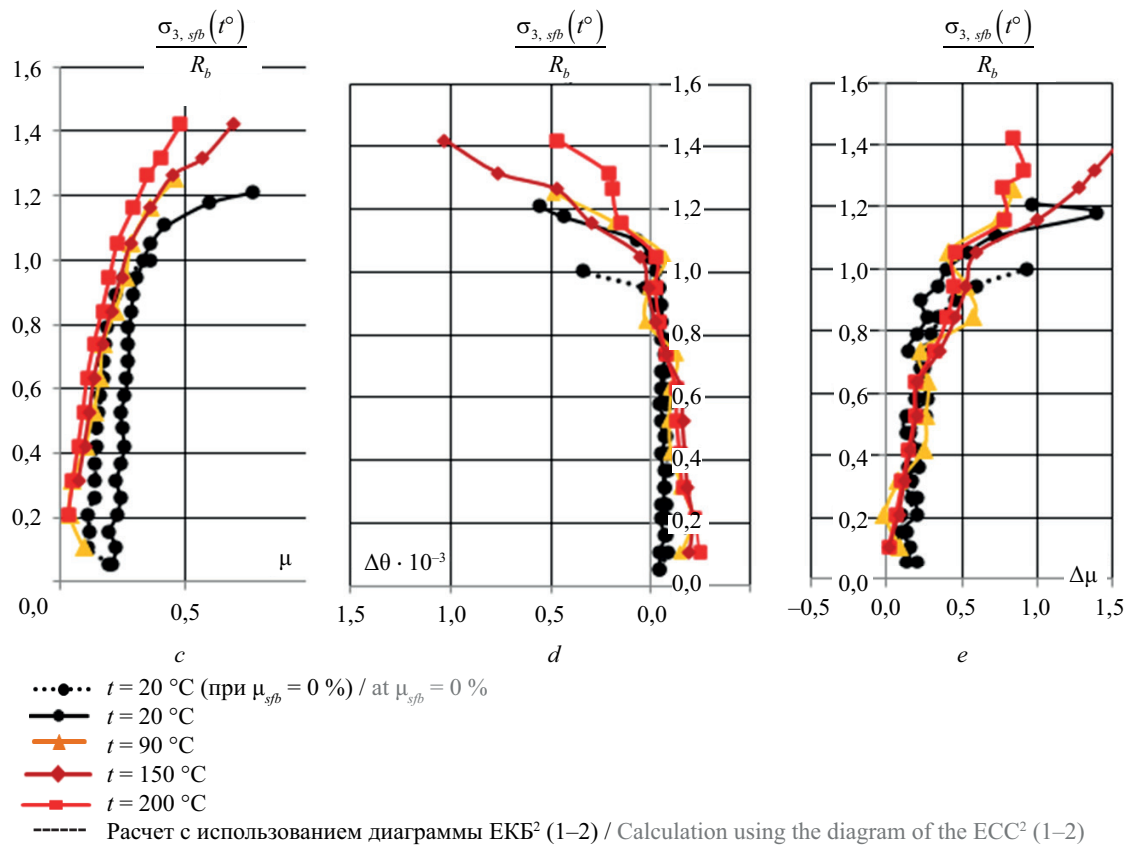


Рис. 7. Диаграммы деформирования образцов-призм размерами $150 \times 150 \times 600$ мм из высокопрочного сталефибробетона с $\mu_{sfb} = 2,5\%$ при осевом сжатии при воздействии длительного нагрева до температур $+90$, $+150$ и $+200$ °C: осевые деформации (a); деформации относительного изменения объема $\theta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ (b); коэффициенты Пуассона (c); приращение объема (d); приращение коэффициента Пуассона (e)

Fig. 7. Deformation diagrams of $150 \times 150 \times 600$ mm prism specimens made of high-strength steel fibre concrete with $\mu_{sfb} = 2.5\%$ under axial compression when exposed to prolonged heating to temperatures of $+90$, $+150$ and $+200$ °C: axial deformations (a); relative volume change deformations $\theta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ (b); Poisson coefficients (c); volume increment (d); Poisson coefficient increment (e)

Длительный нагрев приводит к значительному приросту прочности на сжатие — на 25, 42 и 42 % относительно базовых показателей при температуре 20 °C (рис. 7). Наибольшее снижение прочности образцов происходит при температуре $+90$ °C вследствие возникновения неравномерных деформаций по причине нарушения структурных связей в системе «цементный камень – заполнитель». Температурный нагрев до $+200$ °C способствует некоторому увеличению прочности (7–10 %) благодаря процессам дополнительной гидратации цементного клинкера.

Длительный прогрев образцов в диапазоне температур $+90$ – 200 °C обеспечивает стабилизацию напряжений от температурных воздействий и создает условия эксплуатации конструкций в режиме повышенных температур.

2. Модуль упругости.

Кратковременный нагрев образцов $150 \times 150 \times 600$ мм из высокопрочного сталефибробетона с $\mu_{sfb} = 2,5\%$ до $+90$ °C повышает начальный модуль упругости $E_{b,sfb}$ при осевом сжатии на 10 %, при на-

греве до $+200$ °C наблюдается снижение на 29 % относительно значений при условиях нормальной температуры.

Длительный нагрев приводит к увеличению значения модуля упругости на 5 % при $+90$ °C и снижению на 9 и 37 % при температурах $+150$ и $+200$ °C соответственно.


3. Предельная сжимаемость.

Кратковременный нагрев призм размерами $150 \times 150 \times 600$ мм с $\mu_{sfb} = 2,5\%$ до $+90$ и $+200$ °C приводил к увеличению значений предельной сжимаемости на 20 и 36 % относительно образцов, испытанных при условиях нормальной температуры (рис. 6, a).

Длительный нагрев до температур $+90$, $+150$ и $+200$ °C для образцов $150 \times 150 \times 600$ мм с $\mu_{sfb} = 2,5\%$ обуславливает увеличение предельной сжимаемости на 29, 44 и 59 % соответственно (рис. 7, a).

4. Коэффициент поперечных деформаций.

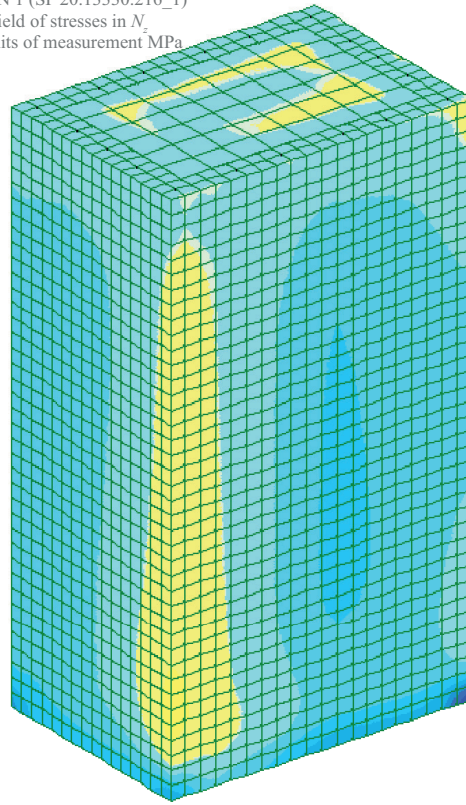
Кратковременный нагрев призм $150 \times 150 \times 600$ мм с $\mu_{sfb} = 2,5\%$ до $+90$ и $+200$ °C приводил к увеличению μ на 6 и 11 % по сравнению с образ-




 РСН 1 (СП 20.13330.216_1) / RSN 1 (SP 20.13330.216_1)

 Изополю напряжений по N_z / Isofield of stresses in N_z

 Единица измерения — МПа / Units of measurement MPa



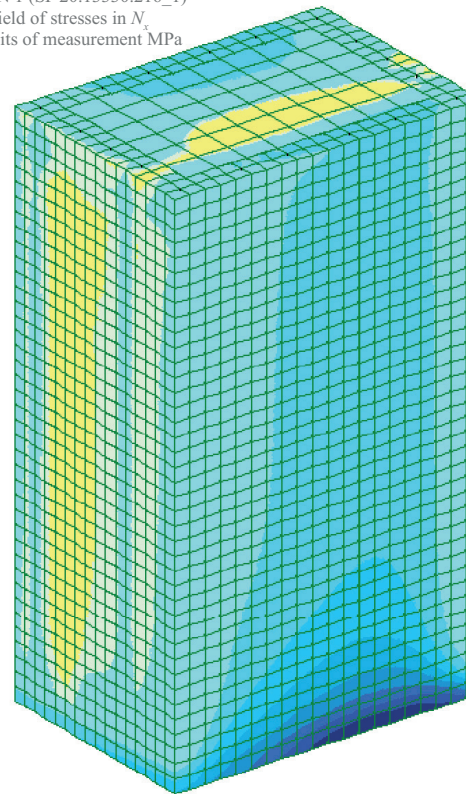
a



 РСН 1 (СП 20.13330.216_1) / RSN 1 (SP 20.13330.216_1)

 Изополю напряжений по N_x / Isofield of stresses in N_x

 Единица измерения — МПа / Units of measurement MPa



b



Рис. 8. Параметры НДС столбчатого фундамента (бетон класса В40): изополя напряжений N_z (a); N_x (b)

Fig. 8. Stress-strain state parameters of a columnar foundation (concrete of class B40): stress fields N_z (a); N_x (b)

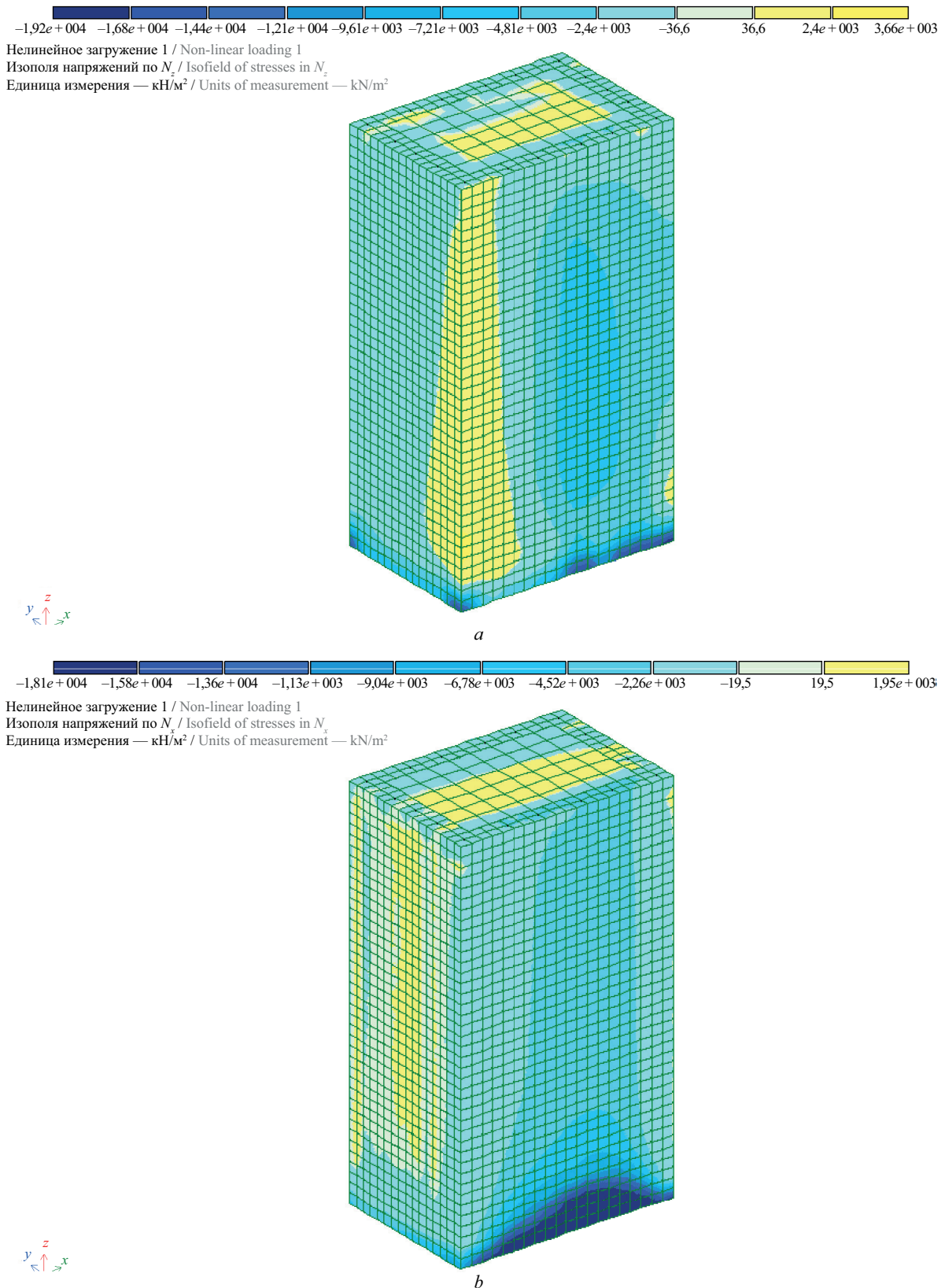


Рис. 9. Параметры НДС столбчатого фундамента с учетом неоднородного распределения температуры и деформаций усадки (высокопрочный сталефибробетон с процентом фибрового армирования $\mu_{sfb} = 2,5\%$): изополя напряжений N_z (a); N_x (b)

Fig. 9. Parameters of the stress-strain state of the columnar foundation, taking into account the heterogeneous temperature distribution and shrinkage deformations (high-strength steel-fibre concrete with a percentage of fibre reinforcement $\mu_{sfb} = 2.5\%$): stress isofields N_z (a); N_x (b)

цами, испытанными при условиях нормальной температуры (рис. 6, с).

Длительный нагрев призм $150 \times 150 \times 600$ мм с $\mu_{sfb} = 2,5\%$ до $+90$, $+150$ и $+200$ °С приводил к повышению μ на 16,8, 27,3 и 32 % по сравнению с образцами, испытанными при условиях нормальной температуры (рис. 7, с).

Анализ диаграмм деформирования высокопрочного сталефибробетона, полученных в результате экспериментальных исследований, выявил зависимость механических характеристик от длительности нагрева и геометрических параметров образцов. Для данного материала характерно сохранение упругих свойств в диапазоне 0,8–0,9 от призмной прочности. На финальной стадии нагружения при достижении напряжений свыше $0,8R_{b,sfb}(f^o)$ наблюдалось объемное расширение (дилатация), обусловленное сдерживающим действием фибровой арматуры против развития растягивающих деформаций.

К конструкциям, работающим в условиях длительного неравномерного нагрева, относят балки, плиты, колонны, оболочки, стеновые панели и массивные блоки. Такие элементы характерны для котельных установок, теплотехнических цехов, дымовых и вентиляционных каналов, технологических платформ и опор оборудования. Продолжительное тепловое воздействие вызывает неравномерные температурные деформации, перераспределение внутренних усилий, появление трещин и снижение жесткости. Для оценки их надежности выполняют анализ НДС с учетом реальных температурных полей, используя нелинейные термомеханические модели, отражающие ползучесть, релаксацию напряжений и термоупругие эффекты.

Выполненные натурные исследования [24] показали, что в ходе эксплуатации конструкции столбчатых фундаментов получили характерные повреждения в виде трещин шириной раскрытия до $a_{crc} = 1,5$ мм и локальных участков повреждения защитного слоя бетона (рис. 2, а). Неравномерность теплового воздействия на грани конструкции приводит к возникновению различных по сечению температурных градиентов. При совместном действии температурно-силовых воздействий, не совпадающих с осями симметрии поперечного сечения, в конструкции фиксируется возникновение сложной формы напряженного состояния — косоое внецентренное сжатие (рис. 1, б).

Полученные величины продольной силы и изгибающего момента, рассчитанные от силовых воздействий на основе статического расчета, составили соответственно $N_z = 1,1$ МН и $M_x = 0,008$ МН·м [24].

Согласно результатам статического расчета фундамента с использованием бетона класса В40 (базовый вариант) средние продольные напряжения N_z (рис. 8, а) составили 27 МПа, что превышает сопротивление бетона на сжатие $R_b = 22$ МПа. Величина максимальных растягивающих напряже-

ний составила 10 МПа, что значительно превышает расчетное сопротивление бетона растяжению $R_{bt} = 1,4$ МПа, что говорит об образовании и раскрытии трещин до $a_{crc} = 2,0$ мм. Сопоставление с данными натурных исследований (рис. 2, а) свидетельствует о наличии III категории технического состояния конструкции (ограниченно работоспособное) и ее непригодности для нормальной эксплуатации.

С целью возможного ограничения раскрытия трещин a_{crc} и снижения растягивающих напряжений в качестве вариантного проектирования использовался высокопрочный сталефибробетон с процентом фибрового армирования $\mu_{sfb} = 2,5\%$.

Моделирование столбчатого фундамента с учетом совместного действия температурно-усадочных воздействий свидетельствует, что использование сталефибробетона с $\mu_{sfb} = 2,5\%$ снижает величины средних продольных напряжений N_z до 19,2 МПа, а максимальные растягивающие напряжения не превышают 3,6 МПа (рис. 9). Данные значения превышают экспериментально определенное сопротивление растяжению для высокопрочного бетона с $\mu_{sfb} = 2,5\%$ $R_{bt} = 3,2$ МПа, что позволяет прогнозировать возникновение трещин. Полученные величины ширины раскрытия трещин $a_{crc} = 0,19$ мм, что не превышает нормативного значения $a_{crc,ul} = 0,3$ мм.

Анализ НДС элементов столбчатого фундамента показал, что применение высокопрочного стеклофибробетона оправдано для конструкций, эксплуатируемых в условиях комбинированного температурно-влажностного воздействия.

Численные исследования столбов МНЛЗ предоставили достоверные сведения о влиянии неоднородности температурно-усадочных напряжений на поведение конструкции. Распределение этих напряжений проиллюстрировано на рис. 8, 9.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование стальной фибры в объеме до 2,5 % при производстве высокопрочного бетона обеспечивает улучшение его механических свойств при нормальной температуре. Опытные данные свидетельствуют об увеличении прочности при осевом сжатии на величину до 21 %, на растяжение — до 24 %. Значения начального модуля упругости увеличиваются до 27 %, предельной сжимаемости — на 18 %, предельной растяжимости — до 10 %, а коэффициент поперечной деформации возрастает до 41 % по сравнению с неармированным высокопрочным бетоном.

Экспериментальные данные показали разнонаправленное влияние кратковременного нагрева на механические характеристики сталефибробетона. В диапазоне исследованных температур стандартные образцы демонстрировали снижение прочности при сжатии до 10 %, при растяжении до 27 %, модуля упругости до 37 % и коэффициента поперечной деформации до 20 %, в то время как для образцов

с фибровым армированием ($\mu_{sfb} = 2,5\%$) при температурах $+90$ и $+200$ °С зафиксировано увеличение прочности при сжатии на 6 и 16 % соответственно. Деформационные характеристики материала увеличивались: сжимаемость на 36 %, растяжимость — в 2,7 раза по сравнению с контрольными образцами без армирования ($\mu_{sfb} = 0\%$) при температуре 20 °С.

Длительное температурное воздействие на образцы из высокопрочного сталефибробетона способствует изменению комплекса его физико-механических характеристик. В исследуемых температурах предел прочности при сжатии увеличивается до 41 %, в то время как модуль упругости снижается настолько же, а предел сжимаемости и коэффициент поперечной деформации увеличиваются на 59 и 32 % соответственно.

Статический расчет столбчатых фундаментов МНЛЗ, выполненный для сооружений ЕМЗ ООО «ЮГМК» (г. Енакиеве), показал, что фактические значения напряжений достигают 27 МПа, превышая расчетное сопротивление бетона класса В40 ($R_b = 22$ МПа), а величина максимальных растяги-

вающих напряжений достигает 10 МПа, так же превышая расчетное сопротивление бетона указанного класса ($R_{bt} = 1,4$ МПа). Анализ полученных изополей напряжений подтвердил выявленные при обследовании дефекты и зоны концентрации напряжений.

Применение высокопрочного сталефибробетона с $\mu_{sfb} = 2,5\%$ в качестве материала для столбчатых фундаментов МНЛЗ вместо бетона базового класса прочности В40 позволяет снизить величины средних продольных напряжений N_z до 19,2 МПа, а максимальные растягивающие напряжения не превышают 3,6 МПа. Ширина раскрытия трещин не превышает 0,19 мм, что не выходит за рамки нормативного значения $a_{cr,ul} = 0,3$ мм.

Результаты анализа НДС элементов МНЛЗ подтверждают возможность эффективного использования высокопрочного сталефибробетона в конструкциях, подвергающихся термовлажностным воздействиям. Примененный расчетный подход, учитывающий физическую нелинейность материала, обеспечил получение надежных оценок влияния температурно-усадочной неоднородности на поведение конструкции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мишина А.В., Чилин И.А., Андрианов А.А. Физико-технические свойства сверхвысокопрочного сталефибробетона // Вестник МГСУ. 2011. № 3–2. С. 159. EDN OWCDNF.
2. Korsun V., Korsun A., Volkov A. Characteristics of mechanical and rheological properties of concrete under heating conditions up to 200 °C // MATEC Web of Conferences. 2013. Vol. 6. P. 07002. DOI: 10.1051/mateconf/20130607002
3. Li P., Feng J., Gu J., Duan S. Coupled Effects of High Temperature and Steel Fiber Content on Energy Absorption Properties of Concrete // Materials. 2024. Vol. 17. Issue 14. P. 3440. DOI: 10.3390/ma17143440
4. Агапов В.П., Маркович А.С., Дхар П., Голишевская Д.А. Напряженно-деформированное состояние сталефибробетона при сжатии с учетом разгрузки из области неупругих деформаций // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2024. Т. 20. № 2. С. 170–181. DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-2-170-181. EDN XTFTZA.
5. Денисов А.В., Зайцев Д.В. Прогнозирование стойкости сталефибробетонов к термическому воздействию при различных параметрах дисперсного армирования // Инженерный вестник Дона. 2022. № 5 (89). С. 433–472. EDN JQDVWK.
6. Дьячук Е.В. Оценка напряженно-деформированного состояния железобетонной колонны при армировании сталефибробетоном // Бутаковские чтения : сб. ст. III Всеросс. с междунар. участием молодежной конф. 2023. С. 269–270. EDN QWDVDI.
7. Дьячук Е.В. Характеристики и основные показатели сталефибробетона промышленного применения // Энергетика и энергосбережение: теория и практика : сб. мат. VIII Междунар. науч.-практ. конф. в рамках десятилетия науки и технологий в Российской Федерации. 2024. С. 133.1–133.3. EDN XTIXGG.
8. Капустин Д.Е. Зависимость полных диаграмм деформирования сталефибробетонов при осевом растяжении от параметров фибрового армирования // Инженерный вестник Дона. 2021. № 7 (79). С. 473–485. EDN ZAQEAR.
9. Корсаков Н.В., Корсакова Т.И. Анализ долговечности сталефибробетонных конструкций в условиях знакопеременных температур // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2023. № 6–3 (81). С. 122–126. DOI: 10.24412/2500-1000-2023-6-3-122-126. EDN IWWKWE.
10. Мишина А.В. Изменение физико-механических характеристик высокопрочного сталефибробетона во времени // Строительство и реконструкция. 2011. № 6 (38). С. 70–74. EDN PAJHRV.
11. Агапов В.П., Маркович А.С., Дхар П., Голишевская Д.А. Напряженно-деформированное состояние сталефибробетона при сжатии с учетом разгрузки из области неупругих деформаций // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2024. Т. 20. № 2. С. 170–181. DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-2-170-181. EDN XTFTZA.
12. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Развитие метода испытания трещиностой-

кости сталефибробетона // Экономика строительства. 2023. № 9. С. 132–137. EDN AABQ GK.

13. Руднов В.С., Герасимова Е.С. Влияние эффективности дисперсного армирования на призмную прочность тяжелых бетонов // Инженерный вестник Дона. 2020. № 8 (68). С. 223–231. EDN RIOZ XJ.

14. Хегай А.О., Кирилин Н.М., Хегай Т.С., Хегай О.Н. Экспериментальные исследования деформативных свойств сталефибробетона повышенных классов // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 6 (83). С. 77–82. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-6-77-82. EDN NTWMLK.

15. Abadel A. Residual compressive strength of plain and fiber reinforced concrete after high-temperature exposure // International Journal of Concrete Structures and Materials. 2022. Vol. 16. P. 48.

16. Abdi Moghadam M., Izadifard R.A. Prediction of the Tensile Strength of Normal and Steel Fiber Reinforced Concrete Exposed to High Temperatures // International Journal of Concrete Structures and Materials. 2021. Vol. 15. Issue 1. DOI: 10.1186/s40069-021-00485-6

17. He F., Biolzi L., Carvelli V., Feng X. A review on the mechanical characteristics of thermally damaged steel and polypropylene hybrid fiber-reinforced concretes // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2024. Vol. 24. Issue 2. DOI: 10.1007/s43452-024-00880-2

18. He X., Xiang W., Peng X., Dan Y. Axial Compression Performance and Residual Strength Calculation of Concrete-Encased CFST Composite Columns Exposure to High Temperature // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Issue 1. P. 480. DOI: 10.3390/app12010480

19. Khalil W.I. Influence of High Temperature on Steel Fiber Reinforced Concrete // Journal of Engineering and Development. 2006. Vol. 10. Issue 2. Pp. 139–144.

20. Liang J., Liu K., Wang C., Wang X., Liu J. Mechanical properties of steel fiber-reinforced rubber con-

crete after elevated temperature // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Issue 1. DOI: 10.1038/s41598-024-80458-3

21. Zhang P., Kang L., Wang J., Guo J., Hu S., Ling Y. Mechanical Properties and Explosive Spalling Behavior of Steel-Fiber-Reinforced Concrete Exposed to High Temperature : a Review // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. Issue 7. P. 2324. DOI: 10.3390/app10072324

22. Тамразян А.Г. Анализ поведения спирально армированных железобетонных колонн из высокопрочного бетона при центральном сжатии // Железобетонные конструкции. 2025. Т. 11. № 3. С. 3–20. DOI: 10.22227/2949-1622.2025.3.3-20. EDN CECGTG.

23. Kharun M., Klyuev S., Koroteev D., Chidighikaobi P.C., Fediuk R., Olisov A. et al. Heat Treatment of Basalt Fiber Reinforced Expanded Clay Concrete with Increased Strength for Cast-In-Situ Construction // Fibers. 2020. Vol. 8. Issue 11. P. 67. DOI: 10.3390/fib8110067

24. Калмыков Ю.Ю. Напряженно-деформированное состояние элемента железобетонного фундамента при неоднородном нагреве // Современное промышленное и гражданское строительство. 2007. Т. 3. № 1. С. 37–44. EDN LALBHT.

25. Корсун В.И., Мауталер С.Н. Влияние повышенных до 200 °С температур на характеристики физико-механических свойств высокопрочного сталефибробетона // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2017 году : сб. науч. тр. Российской академии архитектуры и строительных наук. 2018. Т. 2. С. 265–274. DOI: 10.22337/9785432302663-265-274. EDN ODYUFO.

26. Корсун В.И. Напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций в условиях температурных воздействий. Макеевка : ДонГАСА, 2003. 153 с.

Поступила в редакцию 14 ноября 2025 г.

Принята в доработанном виде 3 февраля 2026 г.

Одобрена для публикации 3 февраля 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Сергей Николаевич Машталер — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры железобетонных конструкций; Донбасская национальная академия строительства и архитектуры — филиал Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (ДОННАСА — филиал НИУ МГСУ); 286123, г. Макеевка, Донецкая Народная Республика, ул. Державина, д. 2; SPIN-код: 9239-8100, РИНЦ ID: 787062; s.n.mashtaler@donnasa.ru;

Виктор Николаевич Левченко — кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой железобетонных конструкций; Донбасская национальная академия строительства и архитектуры — филиал Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (ДОННАСА — филиал НИУ МГСУ); 286123, г. Макеевка, Донецкая Народная Республика, ул. Державина, д. 2; SPIN-код: 4962-6958, РИНЦ ID: 582467; v.n.levchenko@donnasa.ru;

Кирилл Александрович Казак — аспирант, ассистент кафедры железобетонных конструкций; Донбасская национальная академия строительства и архитектуры — филиал Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (ДОННАСА — филиал НИУ МГСУ); 286123, г. Макеевка, Донецкая Народная Республика, ул. Державина, д. 2; SPIN-код: 4473-3378, РИНЦ ID: 1311436; k.a.kazak@donnasa.ru.

Вклад авторов:

Маиталер С.Н. — научное руководство, идея, научное редактирование текста, итоговые выводы.

Левченко В.Н. — научное руководство, идея, научное редактирование текста, итоговые выводы.

Казак К.А. — написание исходного текста статьи, обработка результатов исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Mishina A.V., Chilin I.A., Andrianov A.A. Physico-technical properties of high performance steel fiber reinforced concrete. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011; 3-2:159. EDN OWCDNF. (rus.).
2. Korsun V., Korsun A., Volkov A. Characteristics of mechanical and rheological properties of concrete under heating conditions up to 200 °C. *MATEC Web of Conferences*. 2013; 6:07002. DOI: 10.1051/matec-conf/20130607002
3. Li P., Feng J., Gu J., Duan S. Coupled Effects of High Temperature and Steel Fiber Content on Energy Absorption Properties of Concrete. *Materials*. 2024; 17(14):3440. DOI: 10.3390/ma17143440
4. Agapov V.P., Markovich A.S., Dkhar P., Golishevskaya D.A. Stress-strain state of steel fiber-reinforced concrete under compression taking into account unloading from inelastic region. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2024; 20(2):170-181. DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-2-170-181. EDN XTFTZA. (rus.).
5. Denisov A.V., Zaitsev D.V. Prediction of the resistance of steel fiber concrete to thermal effects at various parameters of dispersed reinforcement. *Engineering Journal of Don*. 2022; 5(89):433-472. EDN JQDVWK. (rus.).
6. Dyachuk E.V. Assessment of stress-strain state of reinforced concrete column with steel fiber reinforcement. *Butakov Readings : collection of papers of the III All-Russian Youth Conference with international participation*. 2023; 269-270. EDN QWDVDI. (rus.).
7. Dyachuk E.V. Characteristics and key indicators of steel fiber reinforced concrete for industrial applications. *Power Engineering and Energy Saving: Theory and Practice : collection of Materials of the VIII International Scientific and Practical Conference within the framework of the Decade of Science and Technology in the Russian Federation*. 2024; 133.1-133.3. EDN XTIXGG. (rus.).
8. Kapustin D.E. Dependence of the complete diagrams of deformation of steel fiber reinforced concrete under axial tension from the parameters of fiber reinforcement. *Engineering Journal of Don*. 2021; 7(79):473-485. EDN ZAQEAR. (rus.).
9. Korsakov N.V., Korsakova T.I. Analysis of durability of steel-fiber concrete structures under conditions of sign-variable temperatures. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2023; 6-3(81):122-126. DOI: 10.24412/2500-1000-2023-6-3-122-126. EDN IWWKWE. (rus.).
10. Mishina A.V. Change in the physical and mechanical properties of high-strength steel fibro concrete in the course of time. *Building and Reconstruction*. 2011; 6(38):70-74. EDN PAJHRV. (rus.).
11. Agapov V.P., Markovich A.S., Dkhar P., Golishevskaya D.A. Stress-strain state of steel fiber-reinforced concrete under compression taking into account unloading from inelastic region. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2024; 20(2):170-181. DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-2-170-181. EDN XTFTZA. (rus.).
12. Pukharensko Yu.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Development of a method for testing the crack resistance of steel fiber reinforced concrete. *Construction Economics*. 2023; 9:132-137. EDN AABQ GK. (rus.).
13. Rudnov V.S., Gerasimova E.S. Effect of the efficiency of dispersed reinforcement on the prismatic strength of heavy concretes. *Engineering Journal of Don*. 2020; 8(68):223-231. EDN RIOZXJ. (rus.).
14. Khagai A.O., Kirilin N.M., Khagai T.S., Khagai O.N. Experimental investigation of stress-strain properties of steel fiber reinforced concrete of the higher classes. *Bulletin of Civil Engineers*. 2020; 6(83):77-82. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-6-77-82. EDN NTWMLK. (rus.).
15. Abadel A. Residual compressive strength of plain and fiber reinforced concrete after high-temperature exposure. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2022; 16:48.
16. Abdi Moghadam M., Izadifard R.A. Prediction of the Tensile Strength of Normal and Steel Fiber Reinforced Concrete Exposed to High Temperatures. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2021; 15(1). DOI: 10.1186/s40069-021-00485-6
17. He F., Biolzi L., Carvelli V., Feng X. A review on the mechanical characteristics of thermally damaged steel and polypropylene hybrid fiber-reinforced concretes. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2024; 24(2). DOI: 10.1007/s43452-024-00880-2
18. He X., Xiang W., Peng X., Dan Y. Axial Compression Performance and Residual Strength Calculation of Concrete-Encased CFST Composite Columns Exposure to High Temperature. *Applied Sciences*. 2022; 12(1):480. DOI: 10.3390/app12010480

19. Khalil W.I. Influence of High Temperature on Steel Fiber Reinforced Concrete. *Journal of Engineering and Development*. 2006; 10(2):139-144.
20. Liang J., Liu K., Wang C., Wang X., Liu J. Mechanical properties of steel fiber-reinforced rubber concrete after elevated temperature. *Scientific Reports*. 2025; 15(1). DOI: 10.1038/s41598-024-80458-3
21. Zhang P., Kang L., Wang J., Guo J., Hu S., Ling Y. Mechanical Properties and Explosive Spalling Behavior of Steel-Fiber-Reinforced Concrete Exposed to High Temperature : a Review. *Applied Sciences*. 2020; 10(7):2324. DOI: 10.3390/app10072324
22. Tamrazyan A.G. Analysis of the behavior of spirally reinforced high-strength concrete columns under central compression. *Reinforced Concrete Structures*. 2025; 11(3):3-20. DOI: 10.22227/2949-1622.2025.3.3-20. EDN CECGTG. (rus.).
23. Kharun M., Klyuev S., Koroteev D., Chiadighikaobi P.C., Fediuk R., Olisov A. et al. Heat Treatment of Basalt Fiber Reinforced Expanded Clay Concrete with Increased Strength for Cast-In-Situ Construction. *Fibers*. 2020; 8(11):67. DOI: 10.3390/fib8110067
24. Kalmykov Yu.Yu. Stressed-deformed state of a reinforced foundation element at uneven heating. *Modern Industrial and Civil Construction*. 2007; 3(1):37-44. EDN LALBHT. (rus.).
25. Korsun V., Mashtaler S. The influence of high temperatures up to 200 °C characteristics of physical and mechanical properties of high-strength steel fiber reinforced concrete. *Fundamental, exploratory and applied research of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2017 : collection of scientific papers of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences*. 2018; 2:265-274. DOI: 10.22337/9785432302663-265-274. EDN ODYUFO. (rus.).
26. Korsun V.I. *Stress-strain state of reinforced concrete structures under thermal exposure*. Makeyevka, DonGASA, 2003; 153. (rus.).

Received November 14, 2025.

Adopted in revised form on February 3, 2026.

Approved for publication on February 3, 2026.

B I O N O T E S : **Sergey N. Mashtaler** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete Structures; **Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture — branch of Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU) (DonNACEA — branch of National Research University MGSU)**; 2 Derzhavina st., Makeevka, 286123, Donetsk People's Republic, Russian Federation; SPIN-code: 9239-8100, ID RSCI: 787062; s.n.mashtaler@donnasa.ru;

Viktor N. Levchenko — Candidate of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Reinforced Concrete Structures; **Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture — branch of Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU) (DonNACEA — branch of National Research University MGSU)**; 2 Derzhavina st., Makeevka, 286123, Donetsk People's Republic, Russian Federation; SPIN-code: 4962-6958, ID RSCI: 582467; v.n.levchenko@donnasa.ru;

Kirill A. Kazak — postgraduate student, assistant of the Department of Reinforced Concrete Structures; **Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture — branch of Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU) (DonNACEA — branch of National Research University MGSU)**; 2 Derzhavina st., Makeevka, 286123, Donetsk People's Republic, Russian Federation; SPIN-code: 4473-3378, ID RSCI: 1311436; k.a.kazak@donnasa.ru.

Authors' contribution:

Sergey N. Mashtaler — scientific guidance, idea, scientific text editing, final conclusions.

Viktor N. Levchenko — scientific guidance, idea, scientific text editing, final conclusions.

Kirill A. Kazak — writing the source text of the article, processing the research results.

The authors declare no conflict of interest.