

Р
18.07.2019г

На правах рукописи

Машталер Сергей Николаевич



**ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ
ВЫСОКОПРОЧНОГО СТАЛЕФИБРОБЕТОНА
ПРИ СЖАТИИ В УСЛОВИЯХ НАГРЕВА ДО +200°C**

05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Макеевка – 2019

Работа выполнена на кафедре железобетонных конструкций Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка.

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Корсун Владимир Иванович,
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», профессор кафедры железобетонных конструкций

Официальные оппоненты:

Морозов Валерий Иванович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций, г. Санкт-Петербург

Давиденко Михаил Александрович,
кандидат технических наук, доцент
ГОУ ЛНР «Луганский национальный аграрный университет», доцент кафедры архитектуры и строительных конструкций, г. Луганск

Ведущая организация:

ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк

Защита состоится «27» марта 2019 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 01.006.02 при ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, зал заседаний ученого совета. Тел. факс: +38 (062) 343-7033, e-mail: d01.006.02@donnasa.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2 (<http://donnasa.ru>).

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 01.006.02



Радионов Тимур Валерьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. 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, защитных оболочек АЭС и др., требуют разработки новых эффективных бетонов. К числу таких материалов относится дисперсно армированный высокопрочный бетон. 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 (ВПСФБ) для конструкций, подвергающихся температурным воздействиям, сдерживается недостаточной изученностью влияния повышенных температур и продолжительности их действия на основные характеристики физико-механических свойств ВПСФБ, на формирование напряженно-деформированного состояния (НДС) сталефибробетонных конструкций.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Диссертационная работа выполнялась в соответствии с государственными программами Д-2-04-11 «Разработка новых высококачественных композиционных материалов в виде стойких к коррозии и высокопрочных бетонов и исследование особенностей их работы в условиях объемного напряженно-деформированного состояния и повышенных температур» №0111U001805 (2011-2015 гг.), Д-2-03-13 «Исследование характеристик физико-механических и реологических свойств высокопрочных модифицированных бетонов с фибровым армированием в диапазоне температур от +20° до +300°С» №0113U001921 (02.01.2013 г. – 31.12.2013 г.), а также с кафедральной научно-исследовательской работой К-02-04-16 «Экспериментальные исследования и разработка методов расчета железобетонных конструкций зданий и сооружений на температурно-влажностные воздействия с учетом сложных режимов нагружения и нагрева» №0117D000260 (2016 – 2020 гг.).

Целью исследования является изучение влияния повышенных до +200°С температур на характеристики физико-механических свойств высокопрочного сталефибробетона и развитие методов расчета сжатых сталефибробетонных элементов на основе экспериментального и теоретического исследования закономерностей их деформирования и разрушения.

Задачи исследования:

1. Исследование влияния интенсивности фибрового армирования на характеристики физико-механических свойств высокопрочного сталефибробетона в условиях нормальной температуры.

2. Изучение влияния повышенных до $+200^{\circ}\text{C}$ температур, продолжительности нагрева и интенсивности фибрового армирования на прочность и деформации высокопрочного сталефибробетона при осевом сжатии и растяжении.

3. Разработка рекомендаций по учету влияния масштабного фактора, температуры и продолжительности нагрева на характеристики прочностных и деформационных свойств высокопрочного сталефибробетона, в том числе в условиях воздействия повышенных до $+200^{\circ}\text{C}$ температур.

4. Выполнение теоретических и экспериментальных исследований НДС железобетонных элементов, в том числе с косвенным сетчатым и фибровым армированием, при воздействиях повышенных температур и нагрузки.

5. Исследование НДС конструкций фундаментов из высокопрочного сталефибробетона, работающих в условиях силовых и температурно-влажностных воздействий, определить показатели эффективности применения высокопрочного сталефибробетона для их возведения и эксплуатации.

6. Внедрение результатов исследований в практику проектирования и возведения конструкций зданий и сооружений из высокопрочных сталефибробетонов.

Объект исследования – элементы конструкций из высокопрочного сталефибробетона, работающие при сжатии и растяжении в условиях силовых и температурно-влажностных воздействий.

Предмет исследования – характеристики физико-механических свойств высокопрочного сталефибробетона и характеристики НДС элементов конструкций с фибровым и косвенным сетчатым армированием в условиях совместных силовых и температурно-влажностных воздействий.

Научную новизну полученных результатов составляют:

- результаты экспериментальных исследований о влиянии интенсивности фибрового армирования, кратковременного и длительного нагрева до $+200^{\circ}\text{C}$ на характеристики физико-механических свойств высокопрочного сталефибробетона в условиях осевого сжатия и растяжения;

- результаты экспериментальных исследований о влиянии масштабного фактора на температурно-усадочные деформации, характеристики прочностных и деформационных свойств высокопрочного сталефибробетона;

- результаты экспериментальных исследований о влиянии фибрового и косвенного сетчатого армирования на прочность и деформации железобетонных элементов из высокопрочного бетона при нагружении сжатием в условиях нормальной температуры;

- результаты экспериментальных и теоретических исследований закономерностей изменения НДС железобетонных элементов конструкций из высокопрочного сталефибробетона при нагружении сжатием, в том числе с учетом масштабного фактора и воздействия повышенных температур.

Практическое значение полученных результатов состоит в разработке рекомендаций по нормированию характеристик температурно-усадочных деформаций, прочностных и деформационных свойств высокопрочного сталефибробетона применительно к условиям воздействия повышенных до +200°C температур, в том числе с учетом масштабного фактора, а также в развитии методик расчета по СП 63.13330.2012, СП 27.13330.2017, СП 360.1325800.2017 в части расчетов сжатых элементов из высокопрочных бетонов с косвенным сетчатым и фибровым армированием по прочности и деформациям.

Методика исследования:

- механические методы испытания материалов нагружением и измерения перемещений;
- методы физического и математического моделирования;
- фундаментальные методы строительной механики.

Положения, выносимые на защиту:

1. Характеристики физико-механических свойств высокопрочного сталефибробетона в условиях осевого сжатия, кратковременного и длительного действия повышенных температур;
2. Результаты экспериментальных исследований влияния масштабного фактора на температурно-усадочные деформации и характеристики физико-механических свойств сталефибробетона при кратковременном осевом сжатии и растяжении;
3. Рекомендации по учету влияния повышенных температур и масштабного фактора на характеристики прочностных и деформационных свойств высокопрочных сталефибробетонов;
4. Результаты теоретических исследований НДС железобетонных элементов конструкций при осевом сжатии с учетом физической нелинейности деформирования бетона;
5. Предложения по уточнению методик СП 63.13330.2012, СП 27.13330.2017 и СП 360.1325800.2017 в части нормирования характеристик физико-механических свойств высокопрочного сталефибробетона, а также расчетов прочности и деформаций элементов из высокопрочных бетонов с дисперсным и косвенным сетчатым армированием при кратковременных нагружениях сжатием.

Личный вклад соискателя заключается в выполнении экспериментальных исследований, обработке и интерпретации полученных данных, внедрении результатов исследований. Представленные в диссертационной работе результаты получены автором самостоятельно. Отдельные составляющие теоретических и экспериментальных исследований, а также внедрение результатов диссертационной работы выполнены с соавторами научных работ, которые изложены в списке публикаций.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов подтверждается результатами экспериментальных исследований, выполненных с применением современных методов, приборов и оборудования

в лабораторных условиях, а также удовлетворительной сходимостью результатов расчетов с данными опытов и натурных исследований.

Апробация диссертационной работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на восьми международных научно-практических конференциях: «Международная конференция молодых ученых, аспирантов, студентов» (г. Макеевка, 2013 г., 2014 г., 2017 г., 2018 г.); VIII Академические чтения РААСН – Международная научно-техническая конференция «Механика разрушения строительных материалов и конструкций» (г. Казань, РФ, 2014 г.); IX Международная научная конференция «Долговечность, прочность и механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов» (г. Санкт-Петербург, РФ, 2016 г.); 1-я международная конференция «Fibromix – композиционные материалы и конструкции в современном строительстве» (г. Санкт-Петербург, РФ, 2018 г.); Международная научно-практическая конференция «Лолейтовские чтения – 150» «Современные методы расчета железобетонных и каменных конструкций по предельным состояниям» (г. Москва, РФ, 2018 г.).

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в соавторстве в 8 научных изданиях, в том числе 2 публикации – в рецензируемых научных изданиях: 1 работа опубликована в издании, входящем в перечень рецензируемых научных журналов; 1 – в зарубежных изданиях, индексируемых международной реферативной базой цитирования SCOPUS, 4 – публикации по материалам научных конференций, 2 – публикации в других изданиях.

Общий объем публикаций – 2,5 п.л., из которых 1,16 п.л. принадлежат лично автору.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, выводов, списка использованных источников (215 наименований) и приложений. Общий объем работы составляет 206 страниц, в том числе 115 страниц основного текста, 53 полных страницы с рисунками и таблицами, 23 страницы списка использованных источников, 15 страниц приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во **введении** изложена общая характеристика работы, приведено обоснование актуальности темы, определены цель, задачи исследования, дана характеристика объекта и предмета исследования, сформулирована научная новизна и практическая значимость результатов работы.

В первом разделе представлен анализ состояния вопроса. Рассмотрены опыт и перспективы применения фибробетонных конструкций, приведен обзор физико-механических свойств высокопрочных бетонов и фибробетонов, а также влияние повышенных температур и дисперсного армирования на указанные характеристики.

В работах В.Б. Арончика, А.Я. Барашикова, О.Я. Берга, В.В. Билозира, В.П. Вылекжанина, А.А. Гвоздева, Г.В. Гетуна, С.С. Каприелова, А.П. Кричевского, Л.Г. Курбатова, И.А. Лобанова, В.И. Морозова, Ю.В. Пухаренко, Ф.П. Рабиновича, А.Е. Саргсяна, К.В. Талантовой, А. Kelly, E. Vu, G. Holister, D. Kuper, V.F. Chen и др. авторов рассмотрены вопросы создания дисперсно

армированных бетонов и конструкций на их основе, представлены исследования свойств сталефибробетона, методов расчета и проектирования фибробетонных конструкций, представлены рациональные предложения по использованию высокопрочных фибробетонов в промышленности.

Изучению влияния органоминеральных добавок на формирование микроструктуры цементного камня посвящены работы В.Г. Батракова, Н.М. Зайченко, Ф.А. Иссерса, С.С. Каприелова, Н.И. Карпенко, Ю.А. Климова, В.И. Корсуна, В.И. Морозова, Ю.В. Пухаренко, А.В. Шейнфельда, M. Collepardi, C. Galle, J. Sercombe, W.H. Dilger, T.C. Holland, V.M. Malhotra и др.

В работах В.И. Веретенникова, В.В. Жукова, И.Н. Заславского, М.А.Иванова, В.И. Корсуна, В.А. Косторниченко, А.П. Кричевского, А.Ф. Милованова, В.И. Мурашева, Н.А. Невгения, К.Д. Некрасова, В.Д. Передерея, В.Н. Самойленко, Н.И. Тупова, С.Л. Фомина, C. Galle, S.P. Shah и других исследователей получены достаточно полные экспериментальные данные о влиянии повышенных до $+200^{\circ}\text{C}$ температур на основные характеристики прочностных и деформационных свойств тяжелых бетонов средней прочности, а также на особенности формирования НДС железобетонных конструкций в условиях неравномерного нагрева. На основании исследований названных авторов были определены факторы, влияющие на свойства бетона при повышенных температурах и на напряженно-деформированное состояние конструкций. Установлено, что достоверная оценка НДС конструкций возможна только на основе учета физической нелинейности деформирования материалов.

Исследование влияния повышенных до $+200^{\circ}\text{C}$ температур и масштабного фактора на характеристики физико-механических свойств высокопрочных модифицированных бетонов выполнены в работах А.В. Корсуна, А.С. Волкова. Результаты исследований реализованы в виде практических рекомендаций и аналитических выражений для учета влияния изученных факторов на характеристики прочностных и деформационных свойств бетона. Свойства сталефибробетона при воздействии повышенных температур определяются свойствами бетонной матрицы, характеристиками армирующих волокон и контактных зон. Влияние повышенных температур на характеристики свойств высокопрочного сталефибробетона изучено недостаточно.

На основании выполненного анализа сформулированы объект, предмет, цель, методы и задачи исследования.

Во втором разделе представлены составы примененных высокопрочных модифицированных бетона и сталефибробетона, характеристики опытных образцов, изложены общая методика исследований и методики проведения конкретных экспериментальных и теоретических исследований.

Экспериментальные исследования физико-механических свойств высокопрочного сталефибробетона выполнены на образцах, изготовленных из бетона, модифицированного с помощью органоминерального модификатора (ОММ), и с добавлением стальной фибры, Состав высокопрочного бетона: портландцемент М500 – 545 кг/м^3 ; песок кварцевый ($M_k = 1.9$) – 660 кг/м^3 ;

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 Угледгорской ТЭС (30%); золу-унос Зуевской ТЭС (48%); суперпластификатор С-3 (2%).

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÷1290 МПа.

Испытывались 3 серии образцов с весовым содержанием фибры на 1 м³ бетона (в % от объема) соответственно: серия I – 0 кг (0%); серия II – 50 кг/м³ (0,6%); серия III – 200 кг/м³ (2,5%).

Программа исследований включала три группы экспериментов:

- исследование температурных и усадочных деформаций высокопрочного сталефибробетона, характеристик их прочностных и деформационных свойств в условиях осевого сжатия и растяжения, в том числе в диапазоне температур от +20° до +200°С;

- исследование зависимости деформаций усадки, характеристик прочностных и деформационных свойств модифицированных бетонов от размеров (масштаба) опытных образцов;

- исследование влияния косвенного сетчатого и дисперсного армирования на прочность и деформации образцов-призм из модифицированного бетона при осевом сжатии.

Основные опытные образцы для испытаний на осевое сжатие и растяжение – призмы размерами 150×150×600 (мм) и 100×100×400 (мм) соответственно. Дополнительные контрольные образцы - кубы с ребром 150 мм, а также крупноразмерные призмы размерами 250×250×650 (мм). Возраст бетона к началу нагрева и испытаний механическим нагружением – 28÷30 сут.

По результатам испытаний бетонных образцов-призм определялись: деформации температурного удлинения и усадки, призмочная прочность R_b , начальный модуль упругости E_b , предельные деформации укорочения $\bar{\varepsilon}_b$, коэффициенты поперечных деформаций бетона μ .

Для исследования влияния косвенного сетчатого и фибрового армирования в сопоставимых показателях интенсивности на прочность и деформации коротких железобетонных элементов при кратковременном сжатии были изготовлены 3 серии основных образцов. В 1-ой серии представлены образцы без продольной арматуры с процентами фибрового армирования $\mu = 0$; 1 и 2,5%. Во 2-ой и 3-ей сериях представлены образцы, моделирующие конструкции коротких колонн с продольным, поперечным сетчатым и дисперсным армированием в виде железобетонных призм размерами 150×150×600 мм. Проценты косвенного

сетчатого и фибрового армирования во 2-ой и 3-ей сериях образцов составили соответственно 1%, и 2,5%.

В образцах с косвенным армированием с $\mu_{xy} = 1\%$ устанавливались сетки из арматуры $\varnothing 6,5$ А-400 с ячейкой 60 мм, шаг сеток – 138 мм, а в образцах с $\mu_{xy} = 2,5\%$ – сетки из арматуры $\varnothing 8$ А-400 с ячейкой 60 мм, шаг сеток – 80 мм. Продольная арматура – 4 $\varnothing 12$ А-500.

В экспериментальных исследованиях скорость повышения температуры при первом нагреве принималась $12^\circ \div 15^\circ \text{C}/\text{час}$. Продолжительность кратковременного нагрева до начала прессовых испытаний при температурах $+90^\circ$, $+150^\circ$ и $+200^\circ \text{C}$ составляла 15, 12 и 13 часов соответственно, что к моменту разрушения отвечало времени достижения минимальной прочности у обычных тяжелых бетонов при аналогичных температурах испытания. Продолжительность длительного нагрева при тех же температурах составляла 90, 45 и 30 сут., что соответствовало времени затухания температурно-усадочных деформаций бетона.

В экспериментальных исследованиях испытано 172 куба и 74 образца-призмы разных размеров, в том числе 8 армированных, и 33 призмы в условиях нагрева.

Методика расчетной оценки характеристик механических свойств бетона при повышенных температурах построена на условии учета основных значимых факторов: температуры t° , продолжительности нагрева T , коэффициентов фибрового и сетчатого армирования μ_{sfb} , масштабного фактора, учитываемых функциями $\gamma_{b,i}$, $\gamma_{t,i}$, $\beta_{b,i}$ ($i = t^\circ, T, \mu_{sfb}, m$):

$$R_{b,tem}(t^\circ, T, \mu_{sfb}, m) = R_b \cdot \gamma_{bt} \cdot \gamma_{b, \mu_{sfb}} \cdot \gamma_{bm}; \quad (1)$$

$$E_{b,tem}(t^\circ, T, \mu_{sfb}, m) = E_b \cdot \beta_b \cdot \beta_{\mu_{sfb}} \cdot \beta_m. \quad (2)$$

Аналитические выражения для функций $\gamma_{b,i}$, $\gamma_{t,i}$, $\beta_{b,i}$ разрабатывались на основе анализа результатов специально поставленных экспериментов.

В **третьем разделе** представлены результаты экспериментальных исследований влияния размеров опытных образцов, кратковременного и длительного нагрева до $+200^\circ \text{C}$ на температурно-усадочные деформации, на характеристики прочностных и деформационных свойств высокопрочного сталефибробетона с $\mu_{sfb} = 0\%$, $0,6\%$ и $2,5\%$ при осевом сжатии, разработаны предложения по учету влияния изученных факторов на характеристики физико-механических свойств бетона.

Деформации усадки высокопрочного модифицированного сталефибробетона в условиях нормальной температуры, измеренные на образцах-призмах разных размеров, имеют различный период стабилизации, развиваются в количественном отношении неодинаково в продольном и поперечном направлениях, их конечные величины зависят от размеров опытных образцов (табл. 1, рис. 1, 2).

Степень различия в величинах деформаций усадки в различных частях крупноразмерных образцов-призм из высокопрочного модифицированного бетона с процентами фибрового армирования $\mu_{sfb} = 0\%$, $0,6\%$ и $2,5\%$ исследовалась путем измерения продольных и поперечных деформаций в

угловых и средних зонах образцов. Результаты измерений свидетельствуют о том, что деформации усадки в поперечном направлении образцов-призм развиваются более интенсивно и превышают продольные деформации в средних зонах образцов, в среднем, в 2,5 раза, в угловых – в 3,2 раза.

Средние значения **призменной прочности $R_{b,sfb}$** на осевое сжатие стандартных образцов-призм размерами 150×150×600 (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 250×250×650 (мм) в возрасте 28 суток – 92,8, 99,2 и 108,8 МПа соответственно (прирост в среднем - около 9%). Введение фибрового армирования в высокопрочный бетон в количестве до $\mu_{sfb} = 2,5\%$ обеспечило прирост прочности на сжатие до 21%. Среднее значение коэффициента призменной прочности составило около $K_{nn} = R_{b,sfb}/R_{sfb} \approx 0.9$.

Таблица 1

Деформации усадки высокопрочного бетона в условиях нормальной температуры

Процент армирования, $\mu_{sfb}, \%$	Величины линейных относительных деформаций усадки образцов из высокопрочного бетона размерами, мм:					
	150x150x600			250x250x650		
	$T, \text{сут}$	$\varepsilon_{cs,z}$	$\varepsilon_{cs,x} = \varepsilon_{cs,y}$	$T, \text{сут}$	$\varepsilon_{cs,z}$	$\varepsilon_{cs,x} = \varepsilon_{cs,y}$
0	110	$42,3 \times 10^{-5}$	73×10^{-5}	167	$38,4 \times 10^{-5}$	$69,6 \times 10^{-5}$
0,6	115	$31,3 \times 10^{-5}$	$58,4 \times 10^{-5}$	167	$30,7 \times 10^{-5}$	$55,3 \times 10^{-5}$
2,5	115	$18,5 \times 10^{-5}$	$47,5 \times 10^{-5}$	167	$23,8 \times 10^{-5}$	$43,15 \times 10^{-5}$

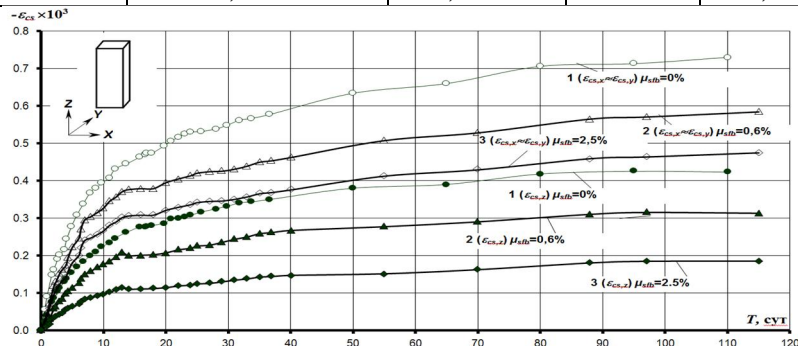


Рис. 1. Относительные деформации усадки образцов размерами 150×150×600 мм из высокопрочного модифицированного бетона с процентами фибрового армирования $\mu_{sfb} = 0\%$, 0,6% и 2,5% в условиях нормальной температуры: 1 – образцы с $\mu_{sfb} = 0\%$; 2 – образцы с $\mu_{sfb} = 0,6\%$; 3 – образцы с $\mu_{sfb} = 2,5\%$.

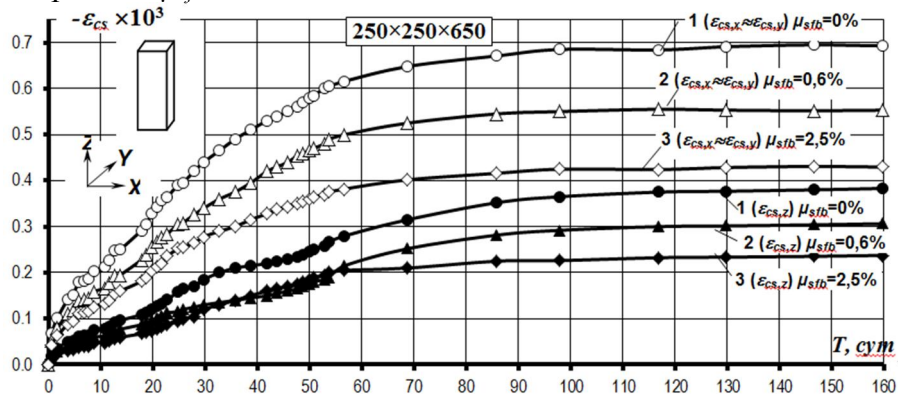


Рис. 2. Относительные деформации усадки образцов размерами 250×250×650 мм из высокопрочного модифицированного бетона с процентами фибрового армирования $\mu_{sfb} = 0\%$, 0,6% и 2,5% в условиях нормальной температуры: 1 – образцы с $\mu_{sfb} = 0\%$; 2 – образцы с $\mu_{sfb} = 0,6\%$; 3 – образцы с $\mu_{sfb} = 2,5\%$.

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 (табл.2). 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 (рис.3).

Значения коэффициента поперечной деформации в условиях нормальной температуры для образцов-призм размерами $150 \times 150 \times 600$ (мм) с процентами фибрового армирования $\mu_{sfb} = 0\%$, $0,6\%$ и $2,5\%$ составили, в среднем, $\mu = 0,17$, $0,18$ и $0,24$, а для образцов-призм размерами $250 \times 250 \times 650$ (мм) с процентами фибрового армирования $\mu_{sfb} = 0,6\%$ и $2,5\%$ – $\mu = 0,17$ и $0,23$ соответственно.

Средние значения прочности на осевое растяжение $R_{bt,sfb}$ образцов-призм с процентами армирования $\mu_{sfb} = 0\%$ и $2,5\%$ составили 3,54 и 4.4 МПа соответственно (прирост за счет армирования – 24%). Средние величины предельных деформаций удлинения для тех же образцов составили соответственно $\varepsilon_{bt0} = 12.1 \times 10^{-5}$ и 13.3×10^{-5} (рис. 4д).

Воздействие повышенных температур на высокопрочный сталефибробетон приводит, как и у обычных тяжелых бетонов, к снижению прочности на сжатие и растяжение, к снижению начального модуля упругости и к увеличению предельных значений сжимаемости и растяжимости (табл. 2, рис. 3÷6).

Величины наибольших линейных деформаций температурного удлинения образцов стандартных размеров $150 \times 150 \times 600$ (мм) из высокопрочного неармированного бетона ($\mu_{sfb} = 0$) составили при первом кратковременном нагреве до температур $+90^\circ$, $+150^\circ$ и $+200^\circ$ соответственно 8.3×10^{-5} , 13.8×10^{-5} и 18.2×10^{-5} . При последующем длительном нагреве снижение деформаций температурного удлинения опытных образцов за счет деформаций усадки бетона составило соответственно температурам нагрева 52, 42 и 35%, стабилизация деформаций наблюдалась соответственно через 85, 45 и 30 суток от начала нагрева.

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 (табл. 3).

Наибольшее снижение **прочности и начального модуля упругости** армированного и неармированного высокопрочного бетона соответствует температуре кратковременного нагрева $+90^\circ\text{C}$, что объясняется большим

влиянием деструктивных факторов в контактной зоне «цементный камень – заполнитель» вследствие неоднородных температурных и влажностных деформаций компонентов структуры. Последующий некоторый прирост прочности и начального модуля упругости сталефибробетона при нагреве до более высокой температуры $+200^{\circ}\text{C}$ объясняется влиянием процессов дополнительного структурообразования вследствие дополнительной гидратации клинкерных материалов при испарении воды в бетоне.

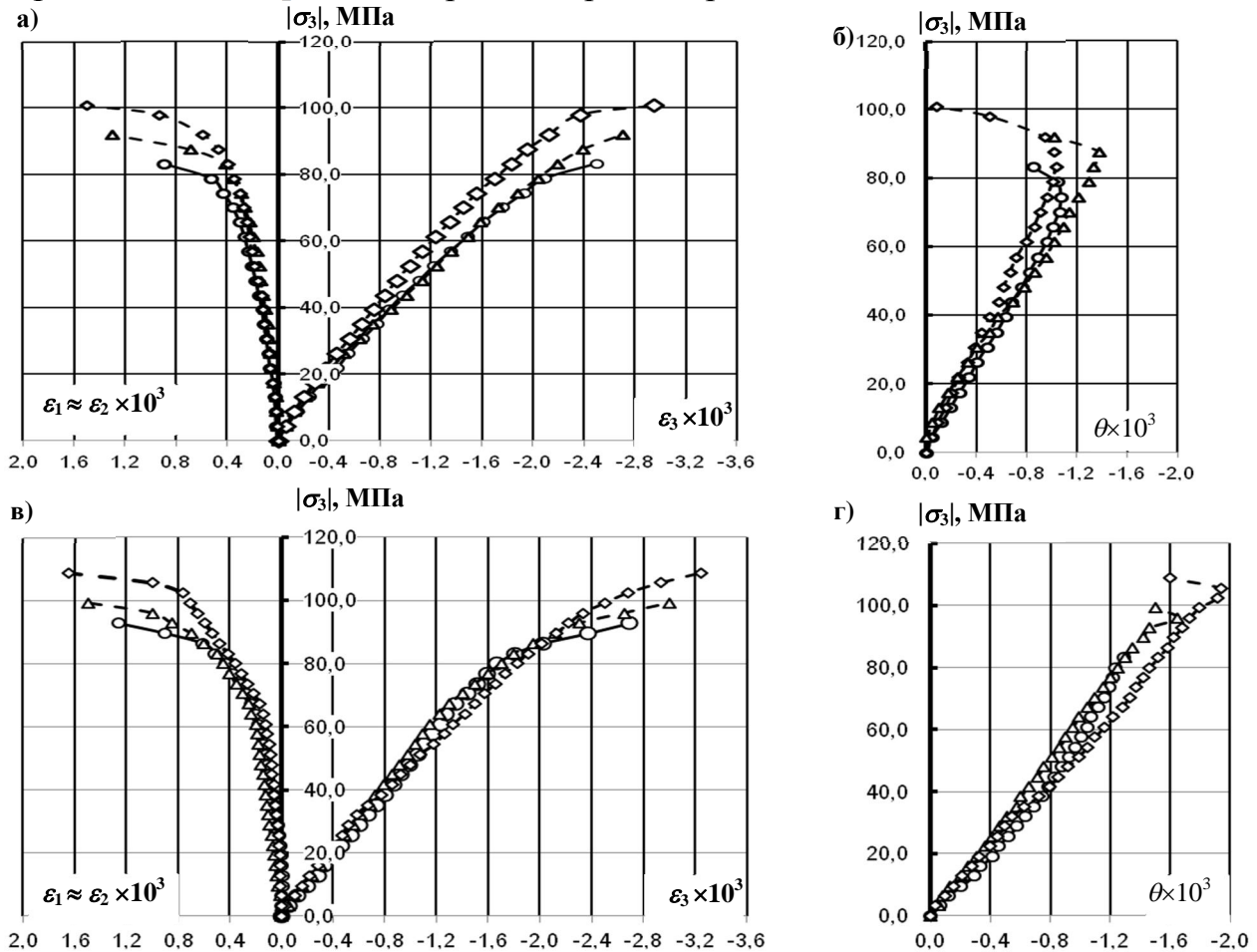


Рис. 3. Диаграммы « σ - ε » (а, в) и деформаций относительного изменения объема $\theta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ (б, г) при осевом сжатии образцов-призм из высокопрочного сталефибробетона размерами $150 \times 150 \times 600$ мм с процентами фибрового армирования $\mu_{sfb} = 0\%$, $0,6\%$ и $2,5\%$ в условиях нормальной температуры.

Условные обозначения: —○— $\mu_{sfb} = 0\%$; —△— $\mu_{sfb} = 0,6\%$; —◇— $\mu_{sfb} = 2,5\%$

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 не нагревавшихся неармированных образцов ($\mu_{sfb} = 0\%$) стандартных размеров $150 \times 150 \times 600$ (мм) (рис. 4а, б).

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 на растяжение контрольных

образцов в условиях нормальной температуры. Для сравнения, снижение прочности обычного тяжелого бетона средней прочности при $t^o = 90^oC$ достигало 35%.

Таблица 2

Характеристики прочностных и деформационных свойств сталефибробетона в условиях повышенных температур

№ п/ п	Характеристики механических свойств	Процент арм-ния, μ_{sfb} , %	Значения характеристик механических свойств высоко- прочного 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,</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 $\varepsilon \cdot 10^3$	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 к эталонным образцам.

Значения **начального модуля упругости** высокопрочного сталефибробетона при кратковременном 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 250x250x650 (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. 4б).

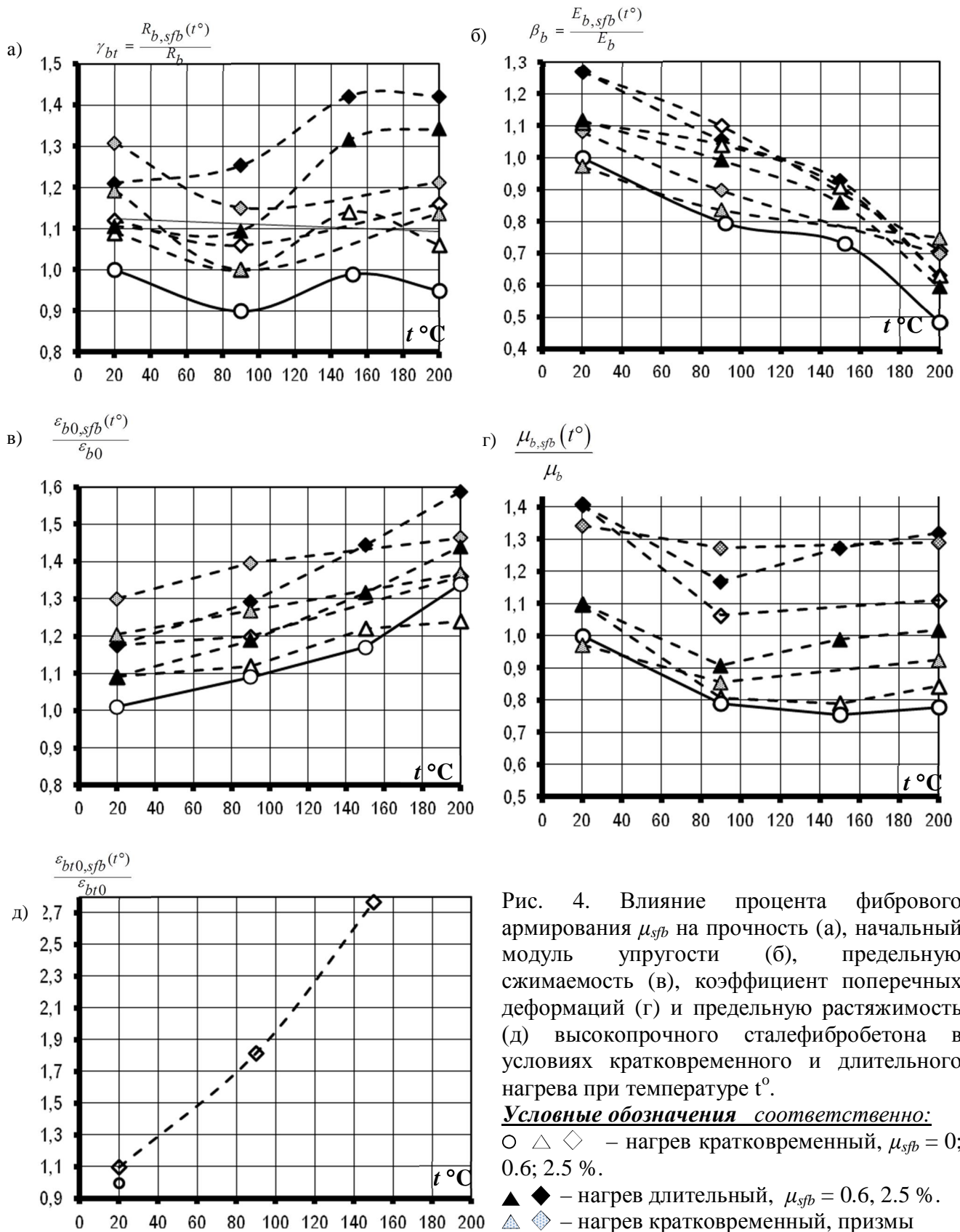


Рис. 4. Влияние процента фибрового армирования μ_{sfb} на прочность (а), начальный модуль упругости (б), предельную сжимаемость (в), коэффициент поперечных деформаций (г) и предельную растяжимость (д) высокопрочного сталефибробетона в условиях кратковременного и длительного нагрева при температуре t° .

Условные обозначения соответственно:

○ △ ◇ – нагрев кратковременный, $\mu_{sfb} = 0; 0.6; 2.5 \%$.

▲ ◆ – нагрев длительный, $\mu_{sfb} = 0.6, 2.5 \%$.

△ ◇ – нагрев кратковременный, призмы размерами 250x250x650 мм, $\mu_{sfb} = 0.6; 2.5 \%$.

Предельная сжимаемость высокопрочного сталефибробетона для образцов-призм размерами 150×150×600 (мм) с $\mu_{sfb} = 0.6\%$ при кратковременном нагреве до +90°C, +150°C и +200°C увеличилась на 12%, 22% и 24% соответственно, по сравнению со значениями при нормальной

температуре (рис. 4в, 5а), 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% (рис. 4в, 5в, табл.2).

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. 4в, 6а), а для образцов с $\mu_{sfb} = 2.5\%$ при тех же температурах нагрева – на 39,6% и 46,4% соответственно (рис. 4в, 6в) в сравнении со значениями на не нагреваемых образцах стандартных размеров.

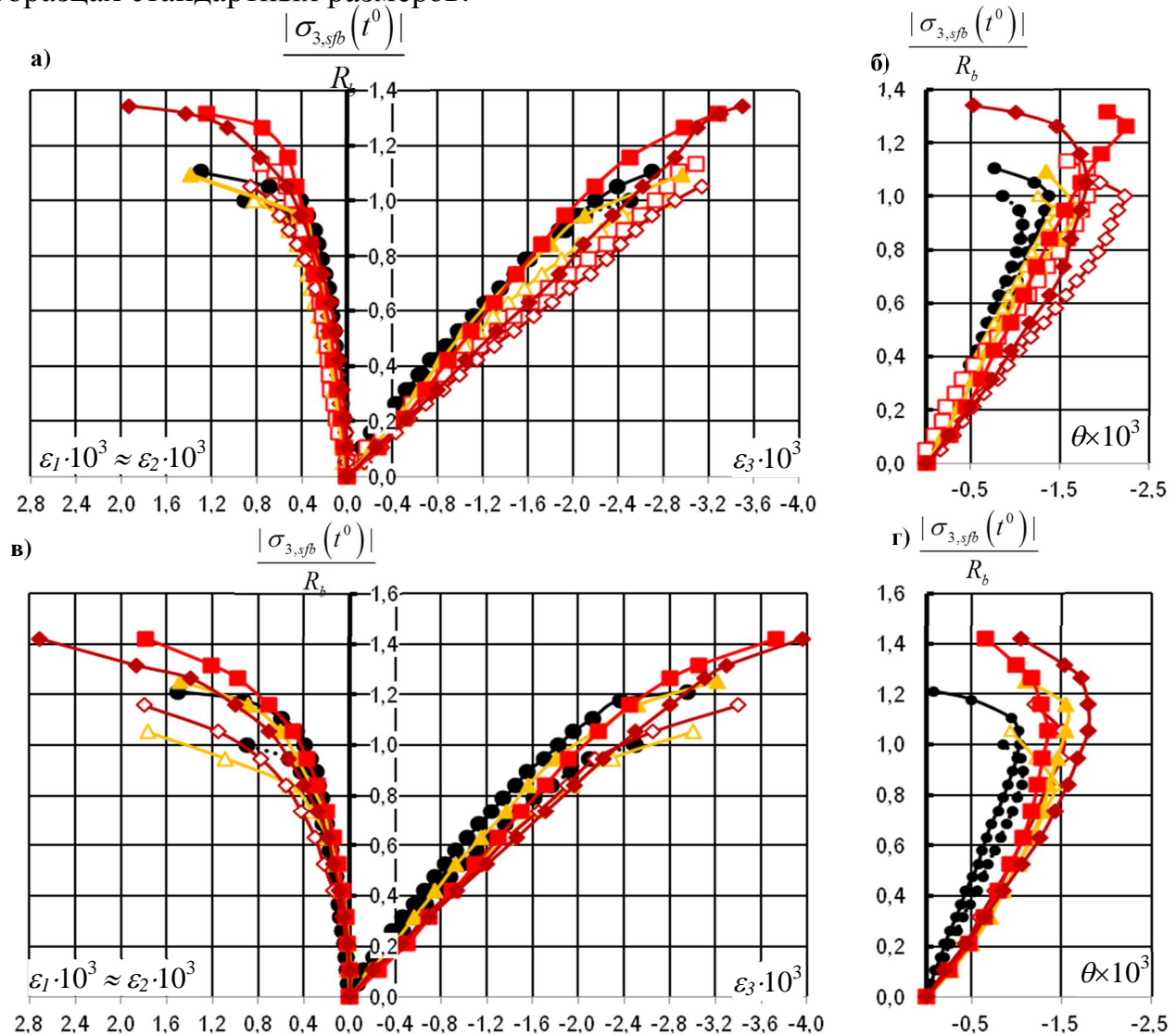


Рис. 5. Влияние кратковременного и длительного нагрева при температурах $+90^\circ$, $+150^\circ$ и $+200^\circ\text{C}$ на диаграммы деформирования образцов-призм размерами $150 \times 150 \times 600$ мм из высокопрочного сталефибробетона с процентами армирования: $\mu_{sfb} = 0.6\%$ (а, б) и $\mu_{sfb} = 2.5\%$ (в, г) при осевом сжатии: а, в) – компоненты линейных деформаций, б, г) – деформации относительного изменения объема $\theta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$

Условные обозначения: \bullet - $t = 20^\circ\text{C}$ (при $\mu_{sfb} = 0\%$);
 Кратковременный нагрев: \triangle - $t = 90^\circ\text{C}$; \square - $t = 150^\circ\text{C}$; \diamond - $t = 200^\circ\text{C}$.
 Длительный нагрев: \blacktriangle - $t = 90^\circ\text{C}$; \blacksquare - $t = 150^\circ\text{C}$; \blacklozenge - $t = 200^\circ\text{C}$

Анализ диаграмм деформирования высокопрочного сталефибробетона в условиях повышенных температур свидетельствует о наличии определенных общих закономерностей. Уровни нагружения, соответствующие практически упругому деформированию бетона, оказались примерно одинаковыми для всех

температур и находились в диапазоне $0.7 \div 0.8$ от значений призмной прочности. Процесс упругого сокращения объема образцов бетона и сталефибробетона сменялся его увеличением (проявление эффекта дилатации) при уровнях нагружения выше $0.8R_{b,sfb}(t^0)$.

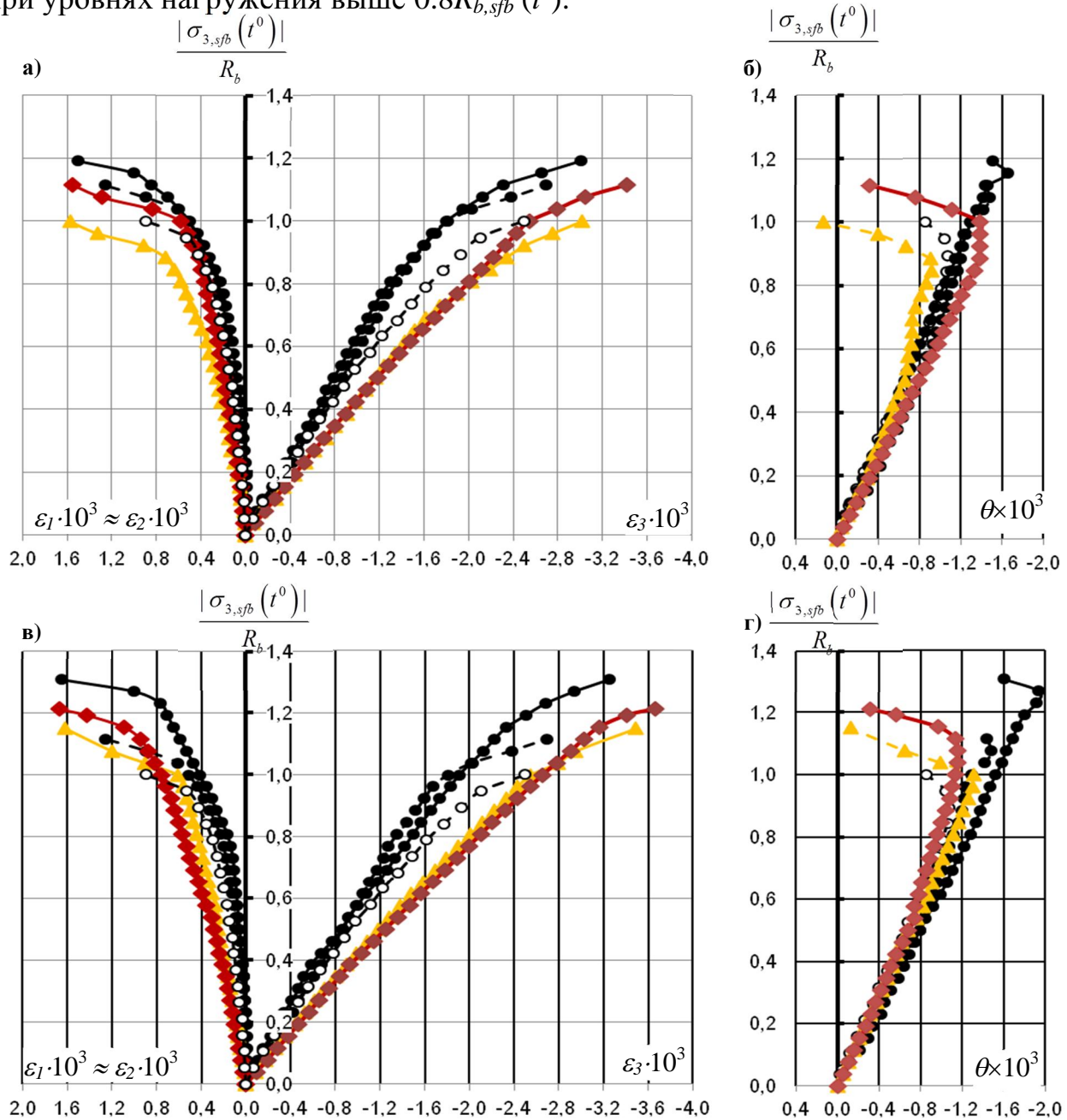


Рис. 6. Влияние кратковременного нагрева при температурах $+90^\circ$, $+150^\circ$ и $+200^\circ\text{C}$ на диаграммы деформирования образцов-призм размерами $250 \times 250 \times 650 \text{ мм}$ из высокопрочного сталефибробетона с процентами армирования $\mu_{sfb} = 0.6\%$ (а, б) и $\mu_{sfb} = 2.5\%$ (в, г) при осевом сжатии:

а, в) – компоненты линейных деформаций,

б, г) - деформации относительного изменения объема $\theta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$

Условные обозначения:

—○— - $t = 20^\circ\text{C}$ (при $\mu_{sfb} = 0\%$ и размерах $150 \times 150 \times 600 \text{ мм}$);
 ⋯⋯⋯ - $t = 20^\circ\text{C}$ (при $\mu_{sfb} = 0\%$); —●— - $t = 20^\circ\text{C}$; —▲— - $t = 90^\circ\text{C}$; —◆— - $t = 200^\circ\text{C}$

Рекомендуемые значения корректирующих функций для определения физико-механических свойств высокопрочных сталефибробетонов применительно к диапазону повышенных температур от $+20^\circ$ до $+200^\circ\text{C}$ представлены в табл. 4.

Оценка характеристик механических свойств бетона при повышенных температурах. Функции $\gamma_{b,tem}$, $\beta_{b,tem}$ влияния температуры t , продолжительности нагрева T , масштабного фактора M_0 и коэффициента фибрового армирования μ_{sfb} на величины прочности и модуля упругости высокопрочного бетона представлены в виде однотипных выражений, в которых учет обозначенных факторов на искомую характеристику осуществляется умножением ее исходного значения на корректирующие функции:

$$\gamma_{b,tem} = \frac{R_{sfb}}{R_b} = \gamma_t \gamma_{M_0} \gamma_\mu, \quad \beta_{b,tem} = \frac{E_{sfb}}{E_b} = \beta_t \beta_{M_0} \beta_\mu, \quad (3)$$

$$\gamma_t = e^{a_t \left(\frac{t}{20}\right)^3 + b_t \left(\frac{t}{20}\right)^2 + c_t \frac{t}{20} + d_t}, \quad \gamma_\mu = e^{a_\mu \mu^2 + b_\mu \mu + c_\mu}, \quad \gamma_{M_0} = e^{a_{M_0} \frac{M_0}{30} + b_{M_0}}, \quad (4)$$

Функции $\gamma_{b,tem}$, $\beta_{b,tem}$ приняты аналогичными формулам Корсуна В.И. в части выражений влияния температуры и продолжительности нагрева на характеристики прочности обычного тяжелого бетона в условиях воздействия повышенных температур, которые отражают влияние преимущественно деструктивных процессов в структуре бетона при кратковременном нагреве и преимущественно конструктивных процессов при длительном нагреве:

$$\gamma_{b,tem} = 1 - F_1 + F_2; \quad \beta_{b,tem} = 1 - F_3 + F_4; \quad (5)$$

$$F_i = e^{a_i \left(\frac{t}{20}\right)^3 + b_i \left(\frac{t}{20}\right)^2 + c_i \frac{t}{20} + a_2 \mu^2 + b_2 \mu + a_3 \frac{M_0}{30} + d} \quad (i=1,2..4) \quad (6)$$

Предельные деформации бетона при сжатии $\varepsilon_{u,tem}$ в условиях нагрева с достаточной степенью точности могут определяться в зависимости от характеристик ε_u в условиях нормальной температуры из следующих соотношений:

$$\varepsilon_{u,tem} = \varepsilon_u \cdot \frac{\gamma_{b,tem}}{\beta_{b,tem}} \quad (7)$$

Для стандартных испытаний при $t = +20^\circ\text{C}$ неармированного бетона ($\mu_{sfb} = 0$) в возрасте $T = 28$ сут значения функций $\gamma_{b,tem}$, $\beta_{b,tem}$ автоматически принимают значения, равные единице.

Таблица 3

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

Таблица 4

Корректирующие функции для определения физико-механических свойств для высокопрочного сталефибробетона в диапазоне повышенных температур

Коэффициент	μ_{sfb}	M_0	Температура нагрева, °C:
-------------	-------------	-------	--------------------------

			+20	+90	+150	+200
$\gamma_{b,tem} = \frac{R_{sfb}(T, t, \mu, M_0)}{R_b}$	0%	30	1,00	0,9 / 0,95	1,00 / 1,05	0,95 / 0,97
		16	1,11	- / 0,95	- / 1,00	- / 1,10
	0,6%	30	1,11	1,00 / 1,09	1,14 / 1,31	1,06 / 1,34
		16	1,19	1,00 / -	- / -	1,11 / -
	2,5%	30	1,21	1,06 / 1,25	- / 1,42	1,16 / 1,42
		16	1,3	1,15 / -	- / -	1,21 / -
$\beta_{b,tem} = \frac{E_{sfb}(T, t, \mu, M_0)}{E_b}$	0%	30	1,00	0,79 / 0,75	0,73 / 0,63	0,48 / 0,42
		16	0,88	- / 0,75	- / 0,7	- / 1,10
	0,6%	30	1,09	0,83 / 0,9	0,8 / 0,96	0,83 / 0,96
		16	0,97	0,84 / -	- / -	0,75 / -
	2,5%	30	1,27	1,06 / 1,16	- / 1,26	1,10 / 1,32
		16	1,08	0,9 / -	- / -	0,7 / -
$\frac{\varepsilon_{b0,sfb}(T, t^\circ, \mu, M_0)}{\varepsilon_{b0}}$	0%	30	1,00	1,09 / 1,21	1,17 / 1,38	1,34 / 1,52
		16	1,08	-	-	-
	0,6%	30	1,08	1,12 / 1,19	1,22 / 1,32	1,24 / 1,43
		16	1,20	1,27 / -	- / -	1,37 / -
	2,5%	30	1,18	1,20 / 1,29	- / 1,44	1,36 / 1,59
		16	1,30	1,40 / -	- / -	1,47 / -
$\frac{\mu_{sfb}(T, t^\circ, \mu, M_0)}{\mu}$	0%	30	1,00	0,79 / 0,8	0,76 / 0,68	0,78 / 0,62
		16	0,92	-	-	-
	0,6%	30	1,08	0,83 / 0,91	0,79 / 0,99	0,84 / 1,00
		16	0,98	0,85 / -	- / -	0,92 / -
	2,5%	30	1,40	1,06 / 1,17	- / 1,27	1,11 / 1,32
		16	1,35	1,27 / -	- / -	1,29 / -

Примечания: 1. Над чертой – кратковременный нагрев, под чертой – длительный нагрев. 2. Для промежуточных значений температур коэффициенты определяются по линейной интерполяции. 3. В качестве базовых приняты значения при $\mu_{sfb} = 0\%$ и $t = 20^\circ\text{C}$.

В четвертом разделе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований прочности и деформаций коротких железобетонных элементов-колонн с косвенным сетчатым и дисперсным армированием при нагружении центральным сжатием, результаты расчета НДС конструкций рамного фундамента под машину непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) ООО «Электросталь» (г. Курахово) и НДС колонн-столбов фундаментов рамного типа МНЛЗ СП «Метален».

Для образцов-призм с ребром 150 мм ($\mu_{xy} = 1\%$ и 2,5%) с косвенным сетчатым и дисперсным армированием (рис. 7) величины приведенной прочности $R_{b,loc}$ и $R_{sfb,loc}$ увеличились, в среднем, соответственно в 1,15 и 1,32 раза по сравнению с неармированным бетоном (рис. 8 а), а предельная сжимаемость $\overline{\varepsilon}_{sb}$ – в 1,2 и 1,52 раза для образцов с косвенным армированием и в 1,12 и 1,33 для образцов с дисперсным армированием соответственно (рис. 8 б).

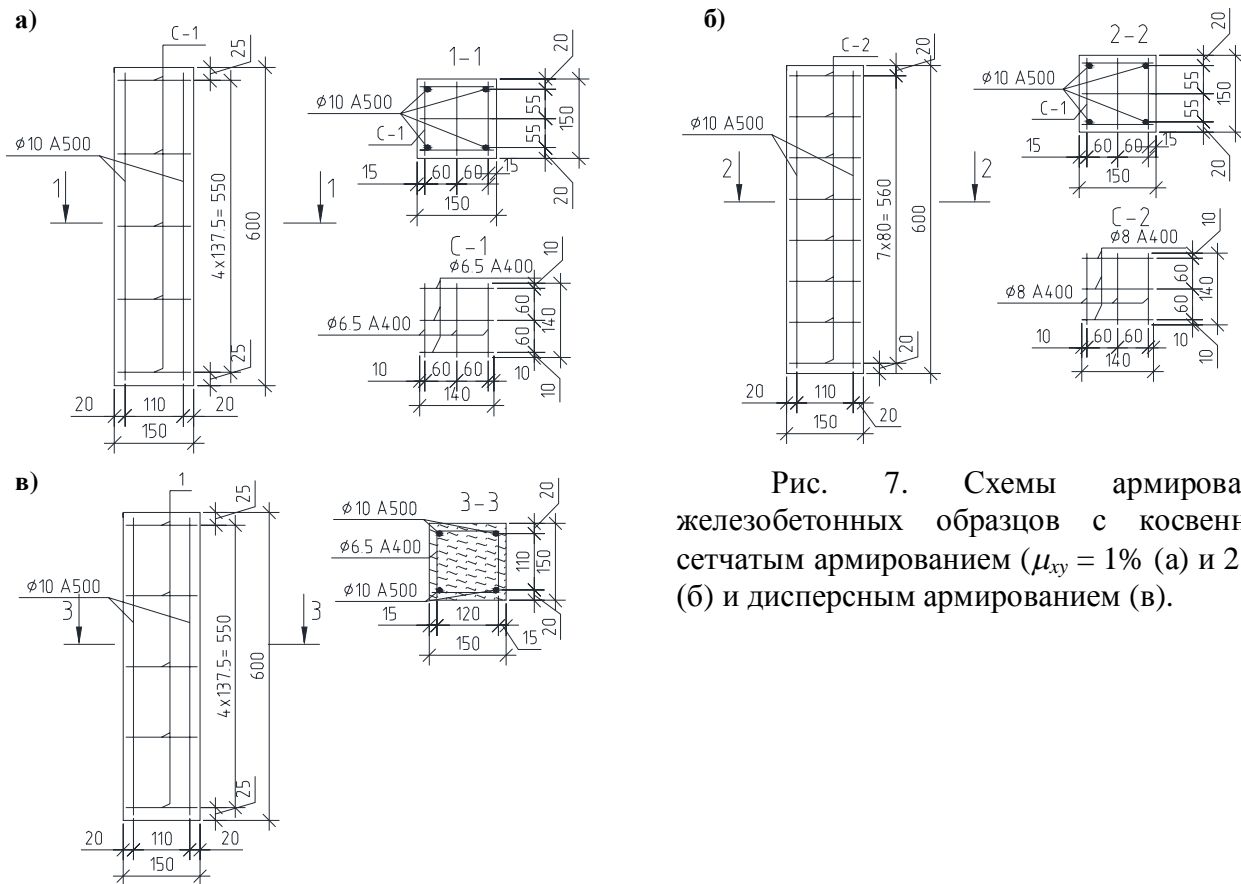


Рис. 7. Схемы армирования железобетонных образцов с косвенным сетчатым армированием ($\mu_{xy} = 1\%$ (а) и $2,5\%$ (б) и дисперсным армированием (в).

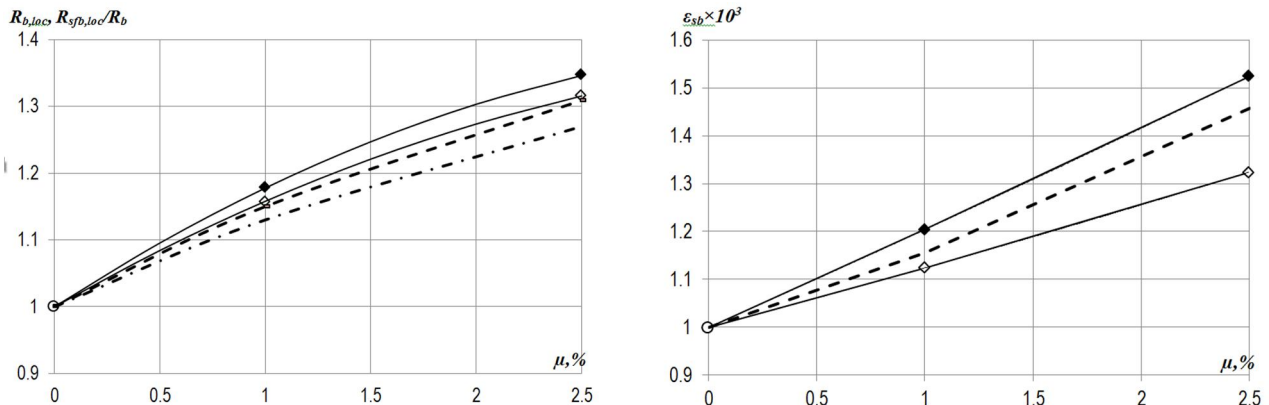


Рис. 8. Влияние косвенного и дисперсного армирования на приведенную прочность (а) и предельные деформации укорочения высокопрочного бетона (б)

Условные обозначения соответственно видам армирования:

- – неармированный бетон ($\mu = 0\%$; $\mu_{xy} = 0\%$);
- ◆ – косвенное армирование, $\mu_{xy} = 1\%$; 2.5% ;
- ◇ – дисперсное армирование, $\mu_{sfb} = 1\%$; 2.5% ;
- - полиномиальная зависимость в виде $ax^2 + bx + c$

Полученные экспериментальные данные о влиянии косвенного сетчатого и дисперсного армирования на прочность и предельные деформации железобетонных элементов представлены на рис. 8 а, б. Установлена возможность применения формул (6.84 и 6.85) СП 360.1325800.2017 и формулы (8.81) СП 63.13330.2012 к расчету прочности элементов с косвенным и дисперсным армированием из высокопрочных бетонов классов В60÷В80 (рис. 9). Предложено модифицированное выражение формулы Е.А. Чистякова

для определения предельных деформаций $\overline{\varepsilon}_{sb}$ элементов из высокопрочного бетона в зависимости от интенсивности косвенного армирования:

$$|\overline{\varepsilon}_{sb}| = (|\overline{\varepsilon}_b| + 18 \cdot \psi) \times 10^{-3}, \quad (8)$$

а также модифицированное выражение для описания диаграммы « σ - ε » элементов с косвенным армированием в виде полинома 3-ей степени:

$$\eta_\sigma = a_1 \cdot \eta_\varepsilon + a_2 \cdot \eta_\varepsilon^2 + a_3 \cdot \eta_\varepsilon^3, \quad (9)$$

где $\eta_\sigma = \frac{|\sigma_{b,loc}|}{R_{b,loc}}$ - для случая с применением косвенного армирования;

где $\eta_\sigma = \frac{|\sigma_{fb,loc}|}{R_{fb,loc}}$ - для случая с применением дисперсного армирования;

$$\eta_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{sb}}{\varepsilon_{sb}}; \quad a_1 = 3; \quad a_2 = -3; \quad a_3 = 1;$$

$R_{b,loc}$ – приведенная призмная прочность по формуле (8.81) СП 63.13330.2012;
 $R_{fb,loc}$ – расчетное сопротивление сталефибробетона сжатию при местном действии сжимающей силы по формуле (6.80) СП 52.104.2006.

Выражения (8) ÷ (9) позволяют достоверно описывать диаграммы деформирования железобетонных элементов с косвенным сетчатым и фибровым армированием различной интенсивности (рис – схемы образцов) .

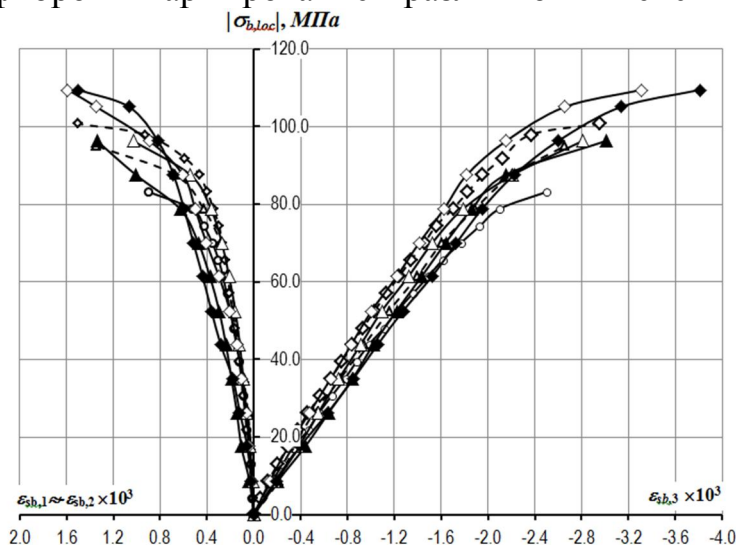


Рис. 9. Диаграммы « σ - ε » железобетонных образцов-призм из высокопрочного бетона с косвенным сетчатым и дисперсным армированием
Условные обозначения – соответственно видам армирования:

○ – неармированный бетон ($\mu = 0\%$; $\mu_{xy} = 0\%$);
 ▲ ◆ – косвенное сетчатое армирование, $\mu_{xy} = 1\%$; $2,5\%$;
 △ ◇ – фибровое армирование, $\mu_{sfb} = 1\%$; $2,5\%$

Теоретически и экспериментально исследовалась работа сжатых железобетонных образцов с косвенным сетчатым и дисперсным армированием. Численный анализ выполнен методом конечных элементов (МКЭ) с помощью ПК «ANSYS Workbench 14.5». Сопоставление результатов расчета и опыта осуществлялось по величинам деформаций бетона, продольной и поперечной арматуры, а также по величинам разрушающих нагрузок. Результаты сопоставления (рис. 10) свидетельствуют об их удовлетворительной сходимости.

Для оценки эффективности применения высокопрочных сталефибробетонов выполнены сопоставительные расчеты элементов реальных конструкций, работающих в условиях неравномерного нагрева, в двух вариантах исполнения: из обычного тяжелого бетона класса В20 и

высокопрочного сталефибробетона с процентом фибрового армирования $\mu_{sfb} = 2.5 \%$ для условий рамного фундамента под машину непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) электросталеплавильного цеха ООО «ЭЛЕКТРОСТАЛЬ» в г. Курахово (стены камеры вторичного охлаждения).

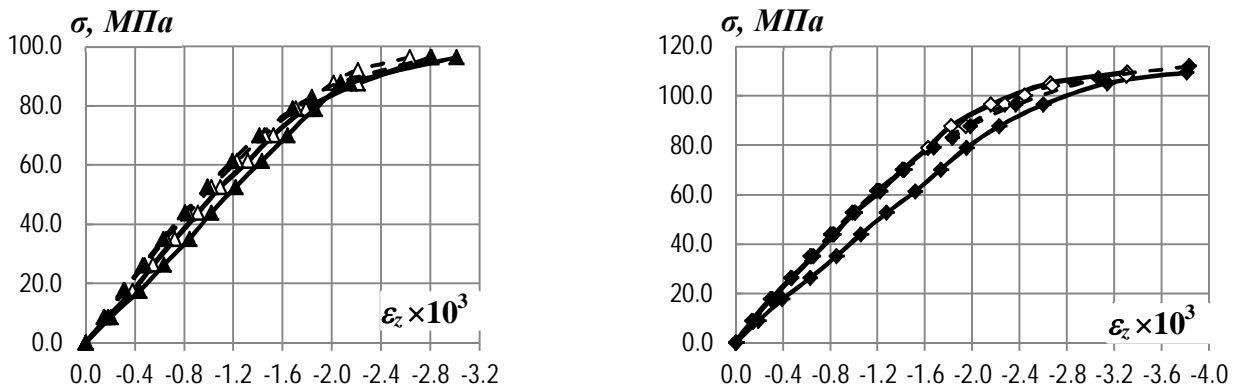


Рис. 10. Диаграммы деформирования железобетонных элементов с косвенным сетчатым и дисперсным армированием.

Условные обозначения соответственно видам армирования:

----- результаты расчета с помощью ПК «ANSYS Workbench 14.5»;

———— эксперимент;

▲ ◆ – косвенное сетчатое армирование, $\mu_{xy} = 1\%$; 2.5% ;

△ ◇ – дисперсное армирование, $\mu_{sfb} = 1\%$; 2.5%

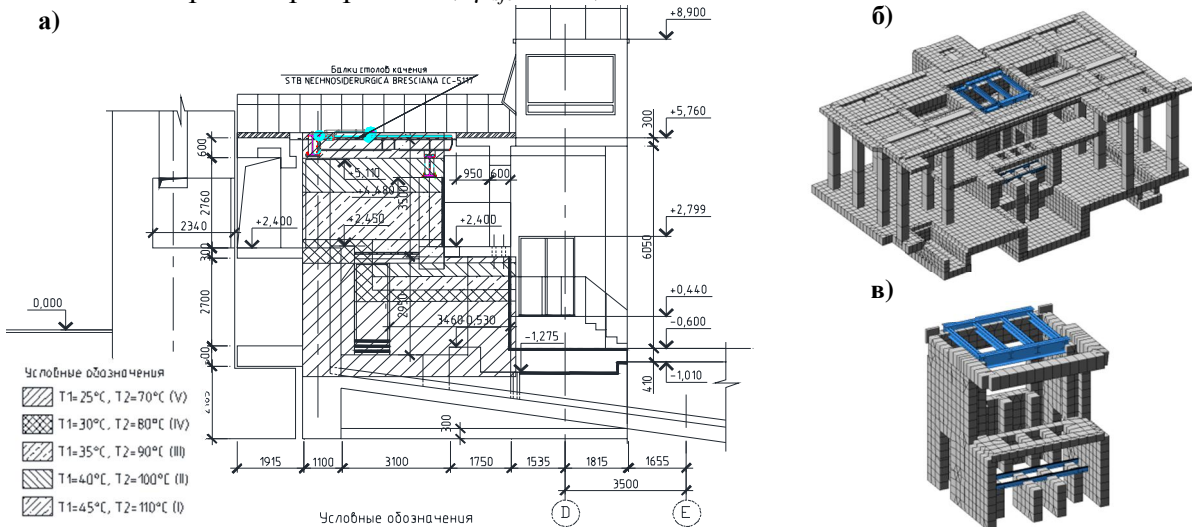


Рис. 11. Зоны температурных воздействий по высоте на конструкцию стен (а), общий вид конечно-элементной модели рамного фундамента (б) и модель конструкций стен (в) камеры вторичного охлаждения МНЛЗ.

Анализ напряженно-деформированного состояния конструкций стен с применением высокопрочного сталефибробетона с $\mu_{sfb} = 2,5\%$ и учетом физической нелинейности материалов позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Расчетные значения нормальных напряжений вдоль осей ОУ и ОХ меньше, чем соответствующие значения для схемы с упругой работой материала на **7,5%** и **11%** соответственно.

2. Значения изгибающих моментов в плоскости осей X и Y меньше, чем соответствующие значения для схемы с упругой работой материала на **42,3%** и **33,8%** соответственно.

3. Расчетные приведенные величины вертикальных деформаций удлинения с учетом физической нелинейности выше на +4,8%, а горизонтальные по направлениям осей X и Y – выше на +18,2% и +14% соответственно, чем соответствующие значения для схемы с упругой работой материала.

4. Результаты расчетов свидетельствуют, что учет физической нелинейности позволяет оценить явление релаксации главных напряжений в стенах камеры вторичного охлаждения и их снижение до 11%, а также существенное снижение изгибающих моментов от температурного градиента до 42,3%.

Применение высокопрочного сталефибробетона позволяет уменьшить толщину стенок сооружения с 700 мм до 400 мм, снизить температурные и влажностные градиенты и, соответственно, снизить напряжения в конструкциях.

Расчетное определение НДС колонн-столбов фундаментов рамного типа МНЛЗ СП «Метален» выполнено на основе данных натурных измерений деформаций и неоднородного распределения температуры по объему массивных конструкций в разные технологические периоды эксплуатации. Внешние грани столбов подвержены неравномерному нагреву. Конструкции столбов испытывают при этом косое внецентренное сжатие (рис. 12).

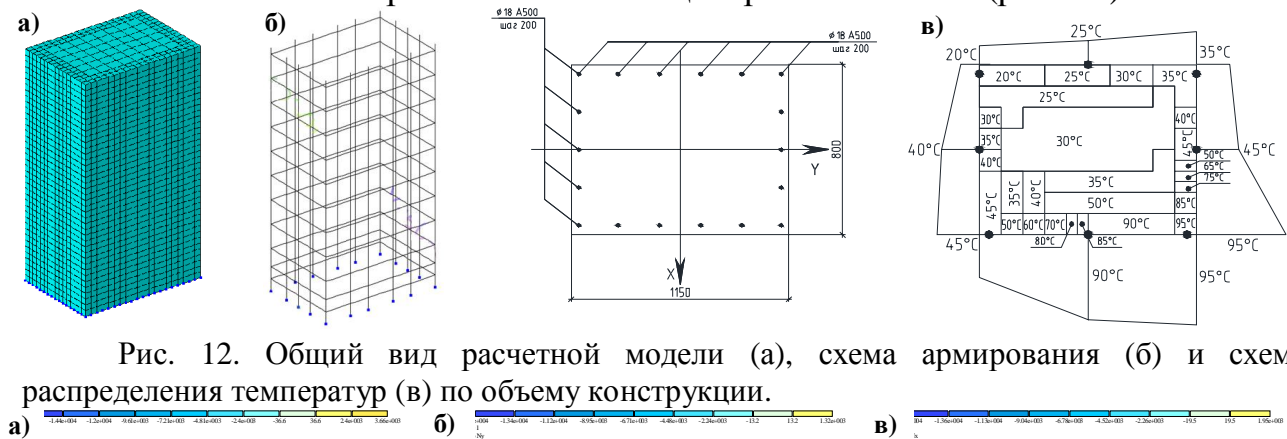


Рис. 12. Общий вид расчетной модели (а), схема армирования (б) и схема распределения температур (в) по объему конструкции.

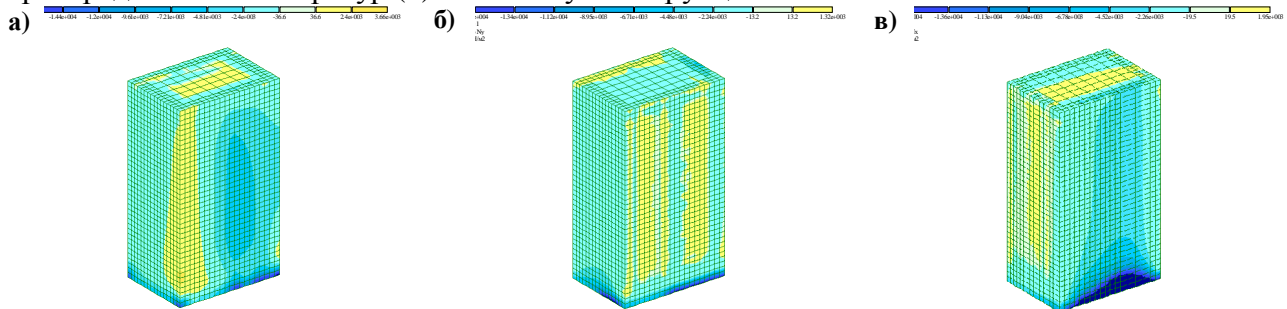


Рис. 13. Параметры НДС столбчатого фундамента с учетом неоднородного распределения температуры и деформаций усадки (высокопрочный сталефибробетон с процентом фибрового армирования $\mu_{sfb} = 2,5\%$): изополя напряжений N_z (а), N_y (б), N_x (в).

Результаты, представленные на рис. 13, свидетельствуют о том, что применение высокопрочного сталефибробетона с процентом фибрового армирования $\mu_{sfb} = 2,5\%$, а также учет физической нелинейности материалов позволяет снизить величины продольных напряжений N_z , в среднем, до 19 МПа, при этом максимальные растягивающие напряжения достигали 3,66 МПа. Расчетные значения ширины раскрытия трещин не превышали предельно

допустимого значения a_{crc} при продолжительном действии температуры и нагрузки $a_{crc,ult}$ и хорошо соответствовали опытным величинам.

ВЫВОДЫ

В диссертации представлены результаты экспериментального исследования влияния повышенных температур в диапазоне от $+20^{\circ}\text{C}$ до $+200^{\circ}\text{C}$ на характеристики физико-механических свойств высокопрочного сталефибробетона, влияния интенсивности фибрового и косвенного сетчатого армирования на деформации и прочность сталефибробетонных элементов конструкций, а также предложения по развитию их методов расчета.

1. Получены экспериментальные данные о влиянии интенсивности фибрового армирования в пределах $\mu_{sfb} = 0\%$, $0,6\%$ и $2,5\%$ на прочность и характеристики деформационных свойств высокопрочного сталефибробетона при осевом сжатии и растяжении в условиях нормальной температуры. Введение фибрового стального армирования в количестве $\mu_{sfb} \leq 2,5\%$ способствует повышению характеристик 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 23% .

2. Выполнены экспериментальные исследования и получены данные о характере влияния повышенных до $+200^{\circ}\text{C}$ температур, продолжительности нагрева и интенсивности дисперсного армирования на прочность и деформации высокопрочного сталефибробетона при осевом сжатии и растяжении. Кратковременный нагрев образцов стандартных размеров из высокопрочного сталефибробетона с $\mu_{sfb} \leq 2,5\%$ приводит в диапазоне температур $20^{\circ} \div 200^{\circ}\text{C}$ к снижению прочности на сжатие на 10% , на растяжение – до 27% , начального модуля упругости – на 38% , к повышению предельной сжимаемости в $1,3$, предельной растяжимости – в $2,7$ раза. Длительный нагрев до $+200^{\circ}\text{C}$ приводит 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 тех же температурах.

3. Разработаны аналитические выражения для учета влияния температуры и продолжительности нагрева, а также масштабного фактора на прочность, характеристики деформационных свойств высокопрочного сталефибробетона, в том числе в условиях воздействия повышенных до $+200^{\circ}\text{C}$ температур.

4. Получены результаты экспериментальных и теоретических исследований НДС сжатых железобетонных элементов, в том числе с косвенным сетчатым и дисперсным армированием. Установлена возможность применения формул (6.84 и 6.85) СП 360.1325800.2017 и формулы (8.81) СП 63.13330.2012 для определения приведенной призматической прочности и предельной сжимаемости элементов из ВПСФБ.

5. Выполнены теоретические исследования напряженно-деформированного состояния конструкций фундаментов под машины непрерывного литья заготовок в двух вариантах исполнения, с учетом физической нелинейности материалов. В результате исследований установлено, что основными значимыми факторами при расчете этих конструкций являются температурные воздействия, неоднородность распределения механических свойств материалов и их склонность к пластическому деформированию. Показано, что применение высокопрочного сталефибробетона с $\mu_{sfb} = 2,5\%$

приводит к снижению напряжений и к повышению трещиностойкости конструкции.

6. Результаты исследований внедрены:

– при выполнении обследования строительных конструкций действующего башенного копра клетьевого ствола №4 шахты им. В.И. Ленина ГП «Макеевуголь и разработке рекомендаций по их усилению;

- при разработке лекционных курсов дисциплин «Физические модели бетона и железобетона. Основы построения диаграммных методов расчета строительных конструкций», «Действительная работа железобетонных конструкций в условиях совместных силовых, температурных и влажностных воздействий».

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

– публикации в рецензируемых научных изданиях:

1. Волков, А.С. Влияние возраста высокопрочного модифицированного бетона на его физико-механические свойства при осевом сжатии [Текст] / А.С. Волков, **С.Н. Машталер**, К.В. Полянский // Вісник ДонНАБА : Будівлі та конструкції із застосуванням нових матеріалів та технологій : зб. наукових праць. – Макіївка, 2014. – № 4(108). – С. 42 – 45. *(Исследованы прочностные и деформационные свойства высокопрочного бетона, проанализированы полученные результаты).*

2. 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 (включено в SCOPUS), 2015. – №117. – P. 975 - 984. *(Исследовано влияние повышенных температур на физико-механические свойства высокопрочного сталефибробетона, выполнен анализ полученных результатов).*

– публикации по материалам конференций:

3. Корсун, В.И. Влияние косвенного и фибрового армирования на прочность и деформации элементов из высокопрочного модифицированного бетона [Текст] / В.И. Корсун, А.В. Корсун, **С.Н. Машталер** // Механика разрушения строительных материалов и конструкций: Материалы VIII Академических чтений РААСН. – Казань: КГАСУ, 2014. – С. 132-137. *(Исследованы деформационные характеристики высокопрочного сталефибробетона, выполнен анализ полученных результатов)*

4. **Машталер, С.Н.** Влияние кратковременного нагрева на прочность и деформации высокопрочного сталефибробетона при осевом сжатии и растяжении [Текст] / **С.Н. Машталер**, В.И. Корсун // Збірник тез доповідей за матеріалами конференції «Науково-технічні досягнення студентів, аспірантів, молодих вчених будівельно-архітектурній галузі». – Макеевка, 2016. – С.142. *(Исследованы деформационные свойства высокопрочного сталефибробетона).*

5. Корсун, В.И. Влияние косвенного и фибрового армирования на прочность и деформации элементов из высокопрочного модифицированного бетона [Текст] / В.И. Корсун, **С.Н. Машталер**, А.В. Корсун // Збірник тез доповідей за матеріалами конференції «Науково-технічні досягнення студентів, аспірантів, молодих вчених будівельно-архітектурній галузі». – Макеевка, 2016.

– С.20. *(Исследованы деформационные свойства высокопрочного сталефибробетона, проанализированы полученные результаты).*

6. Барсук, Н.Д. Лабораторные исследования фибробетона для подземного строительства [Текст] / Н.Д. Барсук, Д.А. Мозалевский, И.В. Купенко, С.В. Борщевский, С.Ю. Макаренко, **С.Н. Машталер** // Проблемы недропользования: Сборник научных трудов. Часть I / Санкт-Петербургский горный университет. СПб, 2017.– С.149-153. *(Выполнен анализ используемых типов фибры).*

– публикации в других изданиях:

7. Korsun, V., Determination of the Critical Duration of the First Heating of Heavy Concrete by the Criterion of the Maximum Strength Reduction / Korsun, V., Korsun, A., **Mashtaler, S.** // [Текст] Applied Mechanics and Materials, 2015 Trans tech Publications, Switerland, Vols. 725 - 726, pp. 566 - 571. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http : https://www.scientific.net/AMM.725-726.566](http://www.scientific.net/AMM.725-726.566) *(Исследовано влияние повышенных температур на физико-механические свойства высокопрочного сталефибробетона).*

8. Корсун, В.И. Влияние повышенных до 200°C температур на характеристики физико-механических свойств высокопрочного сталефибробетона [Текст] / В.И. Корсун, **С.Н. Машталер**. // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2017 году: Сб. науч. тр. РААСН. Т. 2. – М.: Издательство АСВ, 2018. – С. 265 – 275. *(Исследованы данные о влиянии повышенных температур на физико-механические свойства высокопрочного сталефибробетона)*

АННОТАЦИЯ

Машталер Сергей Николаевич. Прочность и деформации элементов из высокопрочного сталефибробетона при сжатии в условиях нагрева до +200°C. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения. – ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». – Макеевка, 2018 г.

Диссертация посвящена экспериментальным и теоретическим исследованиям НДС, прочности и деформаций элементов с фибровым армированием, в том числе в условиях кратковременного и длительного нагрева до +200°C, в зависимости от размеров опытных образцов, интенсивности косвенного и дисперсного армирования.

Во **введении** обоснована актуальность, сформулированы цель, задачи, научная новизна, практическая ценность работы, дана ее общая характеристика.

В **первом разделе** представлен анализ состояния вопроса. Рассмотрены опыт и перспективы применения фибробетонных конструкций, приведен обзор исследований физико-механических свойств высокопрочных бетонов и фибробетонов, а также влияние повышенных температур и дисперсного армирования на указанные характеристики.

Во **втором разделе** представлены состав бетона, характеристика опытных образцов, изложены методики проведения экспериментальных и теоретических исследований, методы обработки полученных результатов.

В **третьем разделе** представлены результаты экспериментальных исследований влияния размеров опытных образцов, кратковременного и длительного нагрева до +200°C на температурно-усадочные деформации, на

характеристики прочностных и деформационных свойств высокопрочного сталефибробетона с $\mu_{sfb} = 0\%$, $0,6\%$ и $2,5\%$ при осевом сжатии и растяжении, предложения по учету влияния изученных факторов на характеристики физико-механических свойств бетона.

В четвертом разделе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований прочности и деформаций железобетонных элементов с косвенным и дисперсным армированием при нагружении центральным сжатием, результаты расчета НДС конструкций рамного фундамента под машину непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) ООО «Электросталь» (г. Курахово) и колонны фундамента МНЛЗ СП «Метален» (г. Енакиево).

Ключевые слова: высокопрочный сталефибробетон, прочность, деформации, нагрев кратковременный и длительный, косвенное и дисперсное армирование, напряженно-деформированное состояние.

ABSTRACT

Mashtaler Sergei. Strength and deformations of elements from high-strength steel fiber reinforced concrete under compression under heating conditions up to + 200 ° C. – Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.23.01 - Building structures, buildings and structures. - GOU VPO "Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture." - Makeevka, 2018

The thesis is devoted to experimental and theoretical studies of the VAT, strength and deformations of elements with fiber reinforcement, including under conditions of short-term and long-term heating to + 200 ° C, depending on the size of the prototypes, the intensity of indirect and dispersed reinforcement.

In the introduction, the relevance is substantiated, the scientific novelty, the practical value of the work are formulated, its general characteristics are given.

The first section presents an analysis of the state of the question. The experience and prospects for the use of fiber-reinforced concrete structures are reviewed, an overview of the physical and mechanical properties of high-strength concrete and fiber-reinforced concrete, as well as the effect of elevated temperatures and dispersion reinforcement on these characteristics are given.

The second section presents the composition of concrete, the characteristics of prototypes, outlines the methodologies for conducting experimental and theoretical studies, methods for processing the results obtained.

The third section presents the results of experimental studies of the effect of the sizes of test samples, short-term and long-term heating to + 2000C on temperature-shrinkage deformations, on the characteristics of the strength and deformation properties of high-strength steel fiber concrete with $\mu_{sfb} = 0\%$, 0.6% and 2.5% with axial compression and tension, proposals for taking into account the influence of the studied factors on the characteristics of the physicomechanical properties of concrete.

The fourth section presents the results of experimental and theoretical studies of the strength and deformations of reinforced concrete elements with indirect and dispersed reinforcement during loading with central compression, the results of calculating the VAT of the frame foundation structures for the continuous casting machine (CCM) of Electrostal LLC (Kurakhovo) and the foundation column The caster joint venture "Metalen" (Yenakiyevo).

Keywords: high-strength steel fiber concrete, strength, deformation, short-term and long-term heating, indirect and dispersed reinforcement, stress-strain state.