

На правах рукописи



Кхон Кхемарак

**ДЕФОРМАЦИИ И ПРОЧНОСТЬ ИЗГИБАЕМЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО
ЖЕЛЕЗОБЕТОНА ПРИ НЕСОВПАДЕНИИ
ПЛОСКОСТЕЙ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПЕРЕПАДА
И НАГРУЖЕНИЯ**

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

- Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Корсун Владимир Иванович
- Официальные оппоненты: **Демьянов Алексей Иванович**,
доктор технических наук,
ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, кафедра уникальных зданий и сооружений, профессор;
- Курлапов Дмитрий Валерьевич**,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», кафедра «Строительные конструкции, здания и сооружения», доцент;
- Ведущая организация: **ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», г. Москва.**

Защита состоится «16» апреля 2024 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.01 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория № 220 главного корпуса). Тел./Факс: (812) 316-58-73; E-mail: rector@spbgasu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/khon-khemarak>.

Автореферат разослан «04» марта 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



В. М. Попов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В последние годы существенно возросли объемы строительства различных зданий и сооружений из высокопрочного бетона (ВПБ) и железобетона в том числе в условиях жаркого климата. При проектировании и строительстве железобетонных конструкций для условий жаркого климата, а также для производственных зданий с повышенными тепловыделениями, необходимо учитывать влияние на физико-механические свойства бетона влажности, температуры и продолжительности нагрева, которые могут вызвать в конструкциях дополнительные усилия, дополнительные деформации, а также образование трещин в бетоне и их чрезмерное раскрытие.

Недостаточная изученность характеристик свойств высокопрочных бетонов в условиях температурно-влажностных воздействий, отсутствие обоснованных нормативных методов расчета не позволяют достоверно оценивать влияние повышенных температур на железобетонные конструкции в процессе их эксплуатации.

В специальной литературе имеются весьма ограниченные данные по влиянию кратковременного и длительного воздействия повышенных температур на температурные деформации, на механические и реологические характеристики свойств современных ВПБ, а также на напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкций из таких бетонов. Такое положение не позволяет в должной мере учесть влияние сезонных колебаний температуры и влажности, в том числе солнечной радиации на напряженно-деформированное состояние конструкций, что сдерживает применение конструкций из высокопрочного бетона. Поэтому задачи изучения зависимости основных характеристик деформационных и прочностных свойств высокопрочных бетонов от температуры и продолжительности нагрева, от уровня длительного обжата, а также экспериментально-теоретические исследования влияния на характеристики НДС изгибаемых железобетонных элементов из конструкционного ВПБ режимов воздействия температурных перепадов и нагружения в несовпадающих плоскостях являются актуальными.

Степень разработанности темы исследования.

Разработка и развитие методов расчета, а также обоснованное применение железобетонных конструкций из обычного тяжелого и высокопрочного бетона для работы в условиях воздействий повышенных температур стали возможными благодаря работам таких ученых, как С.В. Александровский, Б.А. Альтшулер, П.И. Васильев, В.В. Жуков, А.Ф. Милованов, В.И. Мурашев, А.П. Кричевский, В.И. Корсун, В.А. Косторниченко, Н.А. Невгень, В.Д. Передерей, В.Н. Самойленко, В.С. Федоров, С.Л. Фомин, В.И. Веретенников и др.

Экспериментально-теоретические исследования закономерностей изменения характеристик НДС железобетонных элементов конструкций при воздействиях неравномерного нагрева и нагружения выполнены в работах А.Ф. Милованова, К.Д. Некрасова, В.И. Корсуна, А.П. Кричевского, В.М. Милонова, В.Н. Самойленко, В.С. Федорова, С.Л. Фомина и др.

При несовпадении плоскостей теплового потока с главными осями сечений элементов балочного типа возможна сложная форма напряженного состояния – косой изгиб, которая в действующих нормах проектирования рассмотрена недостаточно полно. Исследованиям сложных форм изгиба железобетонных элементов посвящены работы А.С. Ажидинова, А.И. Демьянова, А.С. Залесова, Н.И. Карпенко, Вл.И. Колчунова, В.И. Корсуна, Ю.В. Чиненкова и др.

Цель исследований – изучение деформаций и прочности железобетонных изгибаемых элементов балочного типа из высокопрочного бетона при несовпадении плоскостей температурного перепада и нагружения с учетом влияния кратковременного и длительного нагрева на температурные деформации, характеристики механических и реологических свойств бетона, разработка рекомендаций по расчету таких конструкций.

Объект исследования: конструкции зданий и сооружений из высокопрочного бетона в условиях неравномерного нагрева.

Предмет исследования: температурные деформации, характеристики механических и реологических свойств высокопрочных бетонов, характеристики напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов железобетонных конструкций.

Задачи исследования:

1. Выполнить экспериментальные исследования закономерностей влияния возраста бетона до начала испытаний, продолжительности нагревания $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$ на прочностные и деформационные характеристики свойств высокопрочного бетона при осевом сжатии.

2. Выполнить экспериментальные исследования температурно-усадочных деформаций и ползучести высокопрочного бетона при нагревании до $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3. Выполнить экспериментальные и теоретические исследования температурных усилий и закономерностей их изменений в статически неопределимых изгибаемых железобетонных элементах конструкций из высокопрочного бетона при неравномерном нагреве до $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$ во взаимно перпендикулярных плоскостях.

4. Исследовать экспериментальными методами трещиностойкость, деформации и несущую способность элементов конструкций из высокопрочного бетона при действии неравномерного нагрева и изгибающих моментов в несовпадающих плоскостях.

5. Разработать предложения по учету влияния кратковременного и длительного нагрева до $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$ на основные прочностные и деформационные характеристики свойств высокопрочного бетона при осевом сжатии.

6. Разработать рекомендации по уточнению методик расчета деформаций и прочности изгибаемых железобетонных элементов из высокопрочного бетона при воздействии температурных перепадов и нагрузки в несовпадающих плоскостях.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Установлены зависимости влияния кратковременного и длительного нагрева до $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$ на величины температурно-усадочных деформаций, на прочность, начальный модуль упругости и предельные деформации высокопрочного бетона при кратковременном осевом сжатии, а также на его деформации ползучести, на прочность и характеристики деформационных свойств при повторных нагружениях осевым сжатием после длительного обжатия, которые использованы для развития метода расчета строительных конструкций из высокопрочного бетона.

2. Выявлены закономерности изменений температурных усилий и их релаксации в статически неопределимых железобетонных элементах-балках из высокопрочного бетона в зависимости от принятых режимов неравномерного нагрева.

3. Установлены зависимости характеристик трещиностойкости, деформаций и несущей способности элементов балочного типа из высокопрочного бетона от величин возрастающих изгибающих моментов и перепадов температуры в несовпадающих плоскостях.

4. Выявлены зависимости характеристик напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов из высокопрочного бетона от характерных режимов воздействий температурных перепадов и возрастающего нагружения в несовпадающих плоскостях.

Теоретическая значимость заключается в следующем: в подтверждении возможности применения известных аналитических методов расчета температурно-усадочных деформаций и деформаций ползучести для исследованных высокопрочных бетонов с модифицирующими добавками МБ10-50С; в верификации основных физических соотношений для железобетонных элементов из высокопрочного бетона и в обосновании применимости нелинейной деформационной модели для оценки напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов-балок при сложных режимах нагрева и нагружения; в получении данных о зависимостях температурных усилий, трещиностойкости, деформаций и несущей способности железобетонных элементов из высокопрочного бетона от величин перепадов температуры и изгибающих моментов в несовпадающих плоскостях.

Практическая значимость результатов работы заключается в разработке в развитие СП 27.13330.2017 рекомендаций по учету влияния кратковременного и длительного нагрева до + 90 °С на прочность и деформационные характеристики высокопрочных бетонов классов до В80 в части коэффициентов температурных деформаций, температурной усадки, коэффициентов ползучести, а также предложений по уточнению методик расчета температурных усилий и деформаций для изгибаемых элементов железобетонных конструкций из высокопрочного бетона при несовпадении плоскостей температурных перепадов и нагружения.

Методология и методы исследования:

1. Методы физического моделирования, теории подобия и методы механических испытаний материалов нагружением и измерения перемещений.
2. Теоретические методы математического моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Данные о влиянии кратковременного и длительного нагрева до +90 °С на деформационные характеристики и прочность высокопрочного бетона в условиях одноосного сжатия.

2. Результаты экспериментальных исследований влияния неравномерного нагрева на характеристики напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов конструкций из высокопрочного бетона.

3. Результаты экспериментальных и теоретических исследований деформаций и несущей способности железобетонных элементов из высокопрочного бетона при действии возрастающих изгибающих моментов и перепадах температуры.

4. Рекомендации по учету влияния кратковременного и длительного нагрева до 90 °С на температурно-усадочные деформации, прочность, предельную сжимаемость и ползучесть высокопрочного бетона при осевом сжатии.

Степень достоверности результатов достигается:

1. Применением общепринятых гипотез и соотношений сопротивления материалов, строительной механики, а также гипотез и методов современной нелинейной деформационной теории железобетона с трещинами.

2. Применением методов испытаний соответственно действующим стандартам, использованием метрологически поверенных испытательного оборудования и измерительных приборов.

3. Результатами выполненных экспериментальных исследований изгибаемых элементов из высокопрочного бетона при неравномерном нагреве с перепадами температур в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

4. Удовлетворительным соответствием теоретических результатов, полученных с применением нелинейной деформационной модели, опытным

данным, как полученным в данном исследовании, так и привлеченным для анализа данных других исследователей.

Экспериментальные исследования выполнены в лабораториях СПбПУ Петра Великого и СПбГАСУ.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности ВАК «2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения», и относится к пункту 3 «Развитие теории и методов оценки напряженного состояния, живучести, риска, надежности, остаточного ресурса и сроков службы строительных конструкций, зданий и сооружений, в том числе при чрезвычайных ситуациях, особых и запроектных воздействиях, обоснование критериев приемлемого уровня безопасности».

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы получили обсуждение по результатам докладов на шести всероссийских и международных научных конференциях: Всероссийской научной-технической конференции «Проблемы обеспечения функционирования и развития наземной инфраструктуры комплексов систем вооружения» (2019 год, ВКА имени А.Ф. Можайского); Всероссийской конференции «Неделя Науки ИСИ, 2019/2021 год»; International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering «Building Materials and Products» (2019/2020 год, EECE-2019/2020); International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies Civil and Structural Engineering» (2020 год, МРСРЕ-2020); LXXVI Региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (2023 год, СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург); LXXVII Международной научно-практической конференции «Архитектура – Строительство – Транспорт – Экономика» (2023 год, СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 9 научных статьях в рецензируемых изданиях, в том числе входящих в базы ВАК – 1 публикация, SCOPUS – 5 публикаций, в базу РИНЦ – 3 публикации.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 133 наименований, в том числе 23 зарубежных источников. Работа представлена на 152 страницах печатного текста, содержит 40 рисунков, 10 таблиц, 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлено описание проблемы и обоснование актуальности темы диссертационного исследования, изложены степень разработанности, цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования,

положения, выносимые на защиту, степень достоверности результатов и сведения об апробации работы.

В **первой главе** дан анализ основных результатов в области исследования физико-механических свойств высокопрочных бетонов на основе органико-минеральных модификаторов (ОМД), представлен обзор экспериментальных исследований закономерностей формирования микроструктуры бетонов, характеристик прочностных и деформационных свойств. Выполнен анализ результатов исследований характеристик НДС изгибаемых элементов железобетонных конструкций из обычного и высокопрочного бетона в условиях нормальной и воздействий повышенных температур.

В работах В.Г. Батракова, С.С. Каприелова, М.Г. Булгаковой, Н.М. Зайченко, Ф.М. Иванова, Ф.А. Иссерса, С.Н. Леоновича, А.В. Шейнфельда, А.А. Шишкина и других авторов получены достаточно полные данные о влиянии ОМД на формирование микроструктуры цементного камня, как неотъемлемого компонента современных высококачественных бетонов. Исследованы влияние и дозировки ОМД на характеристики бетонных смесей, степень гидратации вяжущего и формирование микроструктуры цементного камня модифицированных бетонов.

В работах В.Г. Батракова, В.Н. Вырвого, Н.М. Зайченко, Ф.А. Иссерса, С.С. Каприелова, Н.И. Карпенко, Е.Н. Кузнецова, А.В. Корсуна, А.С. Волкова, А.В. Шейнфельда, С. Galle, J. Sercombe, W.H. Dilger и др. представлены результаты исследований характеристик физико-механических свойств высокопрочных модифицированных бетонов (ВПМБ) на основе ОМД, а также деформаций усадки и ползучести при уровнях нагружения до уровня $\eta_1 = 0,3$. Отмечено, что ползучесть высокопрочных модифицированных бетонов недостаточно изучена для условий воздействий повышенных температур и длительных нагружений нагрузками эксплуатационных уровней, что сдерживает их широкое применение в строительстве.

В работах В.И. Веретенникова, В.И. Корсуна, А.П. Кричевского, А.Ф. Милованова, К.Д. Некрасова, Н.А. Невгения, В.Д. Передерея, В.Н. Самойленко, Н.И. Тупова, С.Л. Фомина и других исследователей получены не достаточно полные экспериментальные данные о влиянии воздействий повышенных температур на основные прочностные и деформационные характеристики свойств традиционных тяжелых бетонов средней прочности, а также на особенности формирования и изменения с течением времени НДС железобетонных конструкций в условиях неравномерного нагрева с учетом неоднородности свойств материалов. В исследованиях А.В. Корсуна и А.С. Волкова влияние кратковременного и длительного нагрева на температурные деформации, на прочность и основные характеристики деформационных свойств при осевом сжатии высокопрочных модифицированных бетонов изучены для диапазона температур от $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При этом влияние температурного диапазона от +20 °С до +90 °С на характеристики свойств ВПМБ изучено недостаточно.

Особенности формирования НДС изгибаемых элементов из традиционного тяжелого и высокопрочного бетонов при нагружении, в том числе в условиях неравномерного нагрева, а также методики расчета железобетонных конструкций с учетом неоднородности свойств материалов рассмотрены в работах С.В. Александровского, П.И. Васильева, А.А. Гвоздева, А.И. Демьянова, Н.И. Карпенко, С.Ф. Клованича, В.И. Корсуна, А.П. Кричевского, Д.В. Курлапова, А.Ф. Милованова, В.И. Мурашова, В.Н. Самойленко, В.С. Федорова, С.Л. Фомина и др. Показано, что НДС железобетонных конструкций в значительной мере определяется величинами температуры и продолжительности нагрева, неоднородностью по объему конструкции прочностных, деформационных и реологических свойств бетона.

На основании анализа результатов исследований, представленных в литературных источниках, сформулированы цель и задачи исследования.

Во **второй главе** представлены состав примененного высокопрочного модифицированного бетона, характеристики основных железобетонных и дополнительных бетонных опытных образцов, дано описание методик проведения экспериментальных и теоретических исследований, методов обработки полученных результатов.

В качестве основного материала для экспериментальных исследований принят высокопрочный бетон, модифицированный с помощью органоминерального модификатора (ОММ). Материалы: портландцемент марки ПЦ 500, песок кварцевый крупнозернистый ($M_{кр} = 2 \div 2,5$ мм), щебень гранитный фракции $5 \div 20$ мм и модифицирующая добавка МБ10-50С. Компоненты бетонной смеси приняты в пропорциях: Ц:П:Щ=1:1,61:1,73 при $V/Ц = 0,34$ и $V/(Ц + МБ) = 0,28$ с ОК = $18 \div 25$ см. Приготовление бетонной смеси – в бетоносмесителе принудительного действия, бетонирование – в горизонтальном положении, выдерживание в формах до распалубки – в течение 4-х суток.

Программа исследований включала две группы экспериментов:

- экспериментальные исследования влияния повышенных до +90 °С температур на температурные деформации высокопрочного бетона, на его начальный модуль упругости, прочность, предельную сжимаемость и деформации ползучести в условиях осевого сжатия;

- экспериментальные исследования влияния неравномерного нагрева до +90 °С и нагружения изгибающим моментом в несовпадающих плоскостях на трещиностойкость, прогибы и несущую способность железобетонных элементов из высокопрочного бетона.

Опытные образцы для исследований характеристик свойств бетона приняты в форме призм размерами $100 \times 100 \times 400$ (мм) с модулем открытой

поверхности $M_0 = 45 \text{ м}^{-1}$, а также в форме образцов-кубов с размерами ребер 100 мм. Количество серий бетонирования – 4. По результатам испытаний бетонных образцов-призм определялись: температурно-усадочные деформации и деформации ползучести, призмная прочность $R_b(t^o, T)$, начальный модуль упругости $E_b(t^o, T)$, предельные относительные деформации укорочения $\bar{\varepsilon}_b(t^o, T)$ бетона в их зависимости от температуры t^o и продолжительности нагрева T .

Основные опытные образцы – железобетонные балки из высокопрочного модифицированного бетона размерами $120 \times 240 \times 2400$ (мм), работающие по схеме однопролетной балки с двумя консолями, загружаемыми поперечными силами. Продольное армирование опытных балок выполнено в растянутой зоне двумя стержнями $\varnothing 12$ класса А500, в противоположной зоне – $2\varnothing 8$ класса А240 (рисунок 1). Поперечные стержни (хомуты) принимались из горячекатаной арматуры класса А240 диаметром 6 мм и устанавливались с шагом 100 мм на консольных участках балок и с шагом 150 мм в пролете.

Программа экспериментальных исследований включала два последовательных этапа испытания образцов-балок (таблица 1). На первом этапе балки подвергались одностороннему нагреву раздельно снизу, сбоку и одновременно сбоку до $60 \text{ }^\circ\text{C}$ и снизу до $90 \text{ }^\circ\text{C}$ при обеспечении неизгибаемости продольной оси. На втором этапе балки догружались изгибающим моментом M_x в вертикальной плоскости до разрушения.

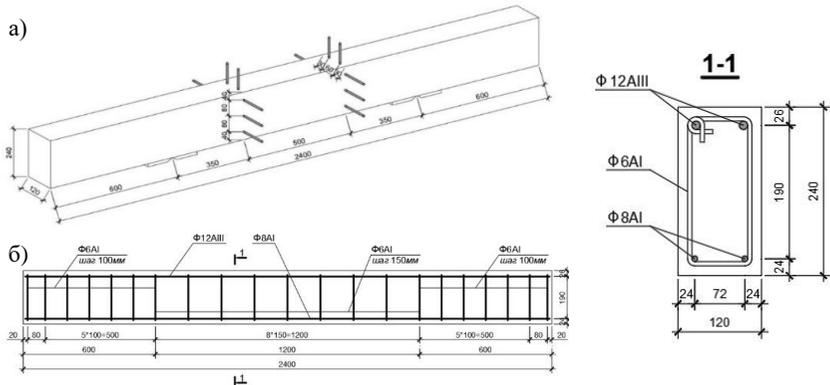
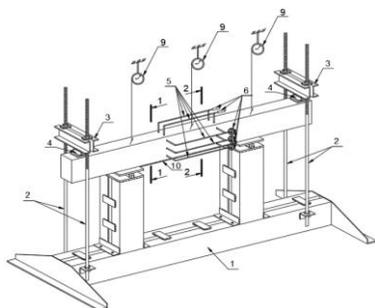


Рисунок 1 – Конструкция (а) и армирование (б) опытных образцов-балок

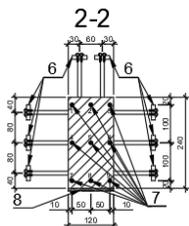
а)



б)



в)



г)

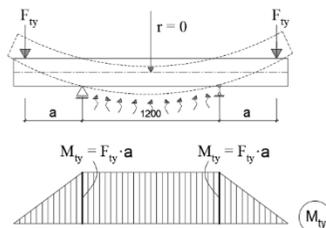


Рисунок 2 – Схема (а), иллюстрация (б) установки для испытаний балок при неравномерном нагреве и последующем догрузении: 1 – опорная конструкция; 2 – тяги с резьбой; 3 – траверса; 4 – динамометры сжатия; 5 – кварцевые удлинители; 6 – индикаторы часового типа; 7 – термопары (в); 8 – нагревательные элементы; 9 – прогибомеры; (г) – схема устранения температурной кривизны балки при одностороннем нагреве

Таблица 1 – Характеристика образцов-балок и условий испытания

№ п/п серии	Размеры образцов, мм	Шифр образцов	$M_0, \text{м}^{-1}$	Т, сут	Количество образцов (шт.)		
					Температура нагревания, °С		
					20	60	90
3	120×240×2400	Б-1	34,1	129	1	–	–
		Б-2		170	–	–	1
4		Б-3		56	–	1	–
		Б-4		77	–	1	–

Устранение кривизны продольной оси балок от неравномерного нагрева осуществлялось путем приложения поперечных сил к их консолям, чем создавались изгибающие моменты, устраняющие свободную температурную кривизну, что соответствовало условиям работы в статически неопределимых конструкциях (рисунок 2).

В экспериментальной части исследований испытано 34 образца-призмы, 4 железобетонные балки и 69 бетонных кубов.

Характеристики механических свойств арматуры определяли в испытаниях на растяжение в испытательной машине POWERTEST U-600 с постоянной скоростью прироста деформаций.

В **третьей главе** изложены результаты экспериментальных исследований и теоретического обобщения влияния кратковременного и длительного нагрева до $+90^{\circ}\text{C}$ на температурно-усадочные деформации высокопрочного модифицированного бетона, на его прочность и деформации при кратковременном и длительном осевом сжатии, а также данные о влиянии длительного предварительного обжатия уровнями $\eta_l = \sigma_l / R_b = 0,3$ на прочность и деформации бетона при последующем догрузении сжатием, предложения по учету влияния изученных факторов на характеристики механических и реологических свойств бетона.

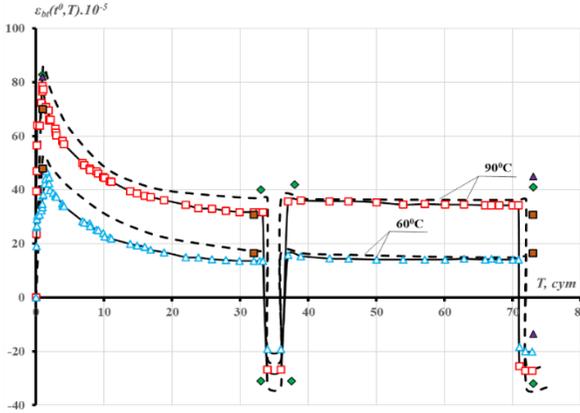
Относительные деформации усадки ВПМБ в условиях нормальной температуры на образцах-призмах размерами $100 \times 100 \times 400$ (мм) составили в продольном направлении через 110 суток наблюдения, в среднем, $48 \cdot 10^{-5}$. Стабилизация деформаций усадки бетона отмечена через 60 ± 80 суток после снятия опалубки.

Максимальные температурные деформации удлинения бетона для образцов размерами $100 \times 100 \times 400$ (мм) при первом кратковременном нагреве до температур $+60^{\circ}\text{C}$ и $+90^{\circ}\text{C}$ составили, в среднем, $46,9 \cdot 10^{-5}$ и $78,6 \cdot 10^{-5}$ соответственно (рисунок 3), что соответствует значениям коэффициентов линейной температурной деформации (КЛТД) бетона соответственно $\alpha_{bt} = 12,7 \cdot 10^{-6}$ и $\alpha_{bt} = 11,9 \cdot 10^{-6}$ (град $^{-1}$).

Относительные деформации температурной усадки ВПМБ за время длительного нагрева до их стабилизации при тех же температурах испытания составили соответственно $32,8 \cdot 10^{-5}$ и $44,3 \cdot 10^{-5}$ (рисунки 3, 4а). За этап последующего остывания до нормальной температуры после длительного нагрева обратимые температурные деформации бетона составили соответственно $34,3 \cdot 10^{-5}$ и $58,6 \cdot 10^{-5}$. При этом значения КЛТД составили соответственно $\alpha_{bt} = 7,8 \cdot 10^{-6}$ и $\alpha_{bt} = 8,4 \cdot 10^{-6}$ (град $^{-1}$) (рисунок 4б).

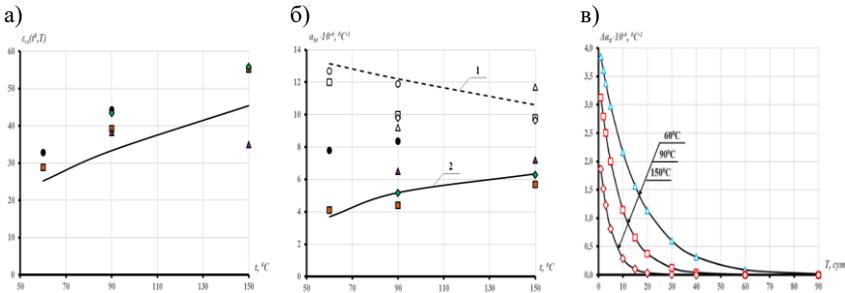
Аналитическое описание температурно-усадочных деформаций исследованного ВПМБ для произвольного момента времени T действия повышенных температур t° может быть осуществлено с достаточной точностью по методике В.И. Корсуна – А.О. Баранова, в которой полные температурные деформации $\varepsilon_{bt}(t^{\circ}, T)$ складываются из обратимых деформаций высушенного бетона $\varepsilon_{bt}^{\circ}(t^{\circ}, T \rightarrow \infty)$, приращения части обратимых деформаций $\Delta\varepsilon_{bt}^{\circ}(t^{\circ}, T)$ за счет начальной влажности бетона и деформаций температурной усадки $\varepsilon_{cs}(t^{\circ}, T)$:

$$\varepsilon_{bt}(t^0, T) = \varepsilon_{bt}(t^0, T \rightarrow \infty) + \Delta\varepsilon_{bt}^0(t^0, T) - \varepsilon_{cs}(t^0, T) = [\alpha_{bt}^0(t^0, T \rightarrow \infty) + \Delta\alpha_{bt}^0(t^0, T) - \alpha_{cs}(t^0, T)] \cdot \Delta t^0. \quad (1)$$



Опытные данные: ▲, ■ – автора; ▲, ◆ – А.В. Корсуна и А.С. Волкова;
 Расчеты по методикам: ■ – СП 27.13330.2017; - - - - В.И. Корсуна-А.О. Баранова

Рисунок 3 – Температурные деформации образцов-призм размерами 100×100×400 (мм) из ВПМБ при температурах нагрева +60 °С и +90 °С



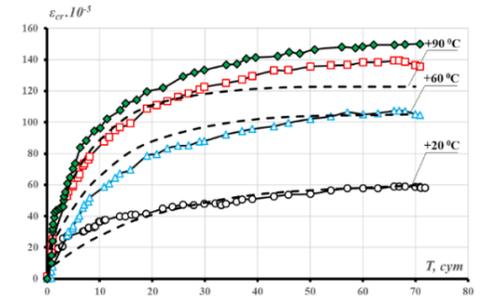
Опытные данные:
 ●, ▲, ◆ – автора, А.В. Корсуна и А.С. Волкова при кратковременном нагреве
 ●, ▲, ◆ – автора, А.В. Корсуна и А.С. Волкова при длительном нагреве
 ■, ■ – расчёт по методике СП 27.13330.2017 соответственно при кратковременном (1) и длительном (2) нагреве

Рисунок 4 – Влияние температуры нагрева на предельные значения деформаций температурной усадки (а), коэффициента линейной температурной деформации (б) ВПМБ и расчетные (в) по методике В.И. Корсуна значения приращений коэффициента линейных температурных деформаций за счет начальной влажности до нагрева бетона

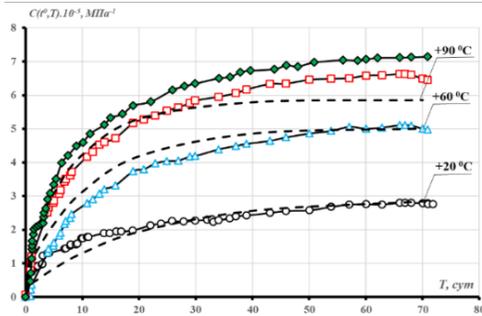
Для предельных деформаций температурного расширения бетона максимальное расхождение опытных величин с результатами расчета при температурах $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$ составило 10,7 % и 8,1 % соответственно. Отмечается достаточно близкое соответствие расчетных по СП 27.13330.2017 температурных деформаций для обычного тяжелого бетона опытным величинам для ВПМБ при первом кратковременном нагреве. При длительном нагреве до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$ наибольшие расхождения в величинах удлинений составляют 2,3 % и 10,9 %, а для величин температурной усадки – 12,2 % и 11,5 % соответственно.

Деформации ползучести бетона при температурах испытания $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$ и уровне длительного обжатия $\eta_l = \sigma_l/R_b = 0,3$ составили соответственно $59 \cdot 10^{-5}$, $107,3 \cdot 10^{-5}$ и $139,4 \cdot 10^{-5}$. Обратимые деформации ползучести для образцов при тех же температурах испытания составили соответственно $0,8 \cdot 10^{-5}$, $2,8 \cdot 10^{-5}$ и $3,8 \cdot 10^{-5}$ (рисунок 5а).

а)



б)



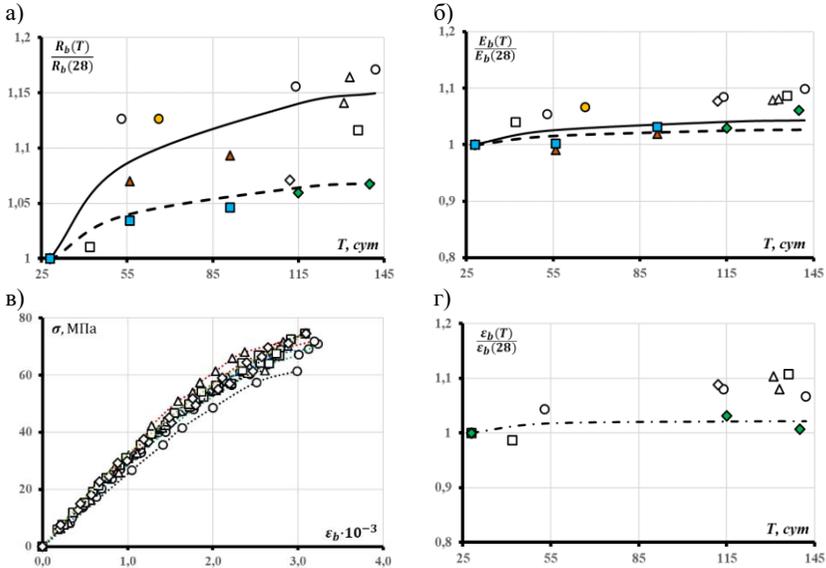
Опытные данные: \bullet , \blacktriangle , \blacksquare – автора; \blacklozenge – А.С. Волкова
 - - - - расчет по методике В.И. Корсуна-Г.А. Швеца

Рисунок 5 – Влияние температур нагрева до $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$ на изменение деформаций ползучести (а) и удельных деформаций ползучести (б) при уровне длительного нагружения $\eta_l = 0,3$

При уровне длительного нагружения $\eta_l = 0,3$ пропорции изменения предельных величин удельных деформаций ползучести $S(t^o, T)$ в зависимости от температуры нагрева соответствовали, в целом, пропорциям изменения относительных линейных деформаций ползучести. В среднем, их предельные величины при температурах испытания $+20\text{ }^\circ\text{C}$, $+60\text{ }^\circ\text{C}$ и $+90\text{ }^\circ\text{C}$ составили соответственно $2,8 \cdot 10^{-5}$, $5,1 \cdot 10^{-5}$ и $6,6 \cdot 10^{-5}$ (рисунок 5б).

Сопоставление опытных величин ползучести ВПМБ при воздействии повышенных температур с результатами расчета по методике В.И. Корсуна–Г.А. Швеца свидетельствует об их удовлетворительной сходимости (максимальные расхождения при температуре $+90\text{ }^\circ\text{C}$ – не более 11,8 %).

Характеристики механических свойств ВПМБ исследованного состава в условиях нормальной температуры возрастают с увеличением возраста бетона к моменту испытаний (рисунок 6).



Опытные данные:

○, ▲, ■, ◆ – автора для серий № 1, 2, 3 и 4 соответственно;

● – Д.С. Ромкина; ◆ – А.С. Волкова; ▲, ■ – M.F. Mohd Zain and S.S. Radin

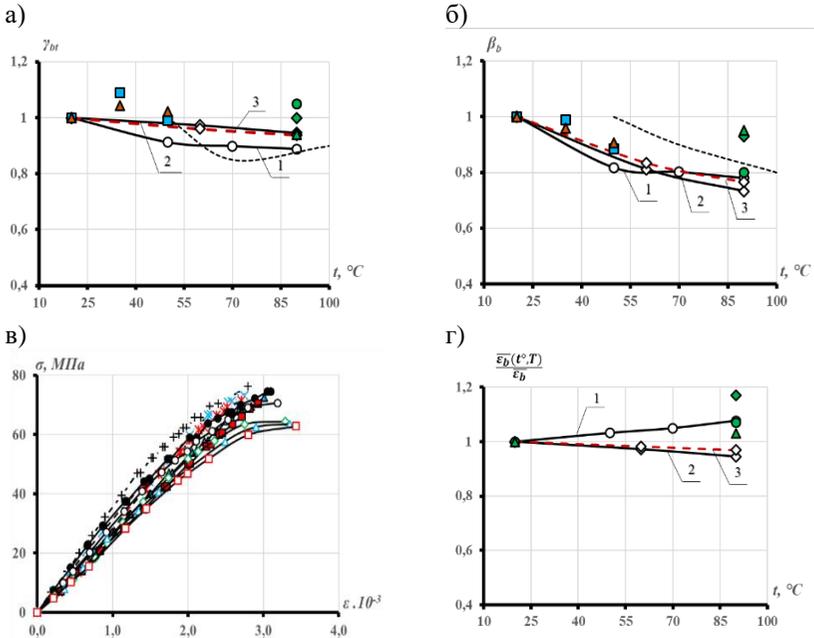
Расчетные значения по методикам авторов:

— – Е.Н.Щербакова; - - - - А.В.Мишиной; - · - · - Н.И.Карпенко-Д.С.Ромкина

Рисунок 6 – Влияние возраста высокопрочного бетона при нормальной температуре $+20\text{ }^\circ\text{C}$ на относительную прочность (а), начальный модуль упругости (б), диаграмму деформирования (в) и предельную сжимаемость (г)

При испытаниях на осевое сжатие в возрасте от 28 до 140 суток значения призмочной прочности находились в диапазоне $R_b = (62 \div 76)$ МПа, коэффициента призмочной прочности – $K_{пр} = 0,77 \div 0,85$, модуля упругости – $E_b = (37,5 \div 42,3) \cdot 10^3$ МПа, предельной сжимаемости – $\bar{\varepsilon}_b = (2,6 \div 3,2) \cdot 10^{-3}$.

При нагревании до $+90^\circ\text{C}$ снижение прочности высокопрочного бетона не превышало 11 % при кратковременном и 5 % при длительном нагреве. Длительное предварительное обжигание образцов бетона напряжениями уровня $\eta_l = \sigma_l/R_b = 0,3$ в условиях нагрева при температурах $+60^\circ\text{C}$ и $+90^\circ\text{C}$ обуславливает, при последующем догрузении сжатием, снижение прочности бетона не более, чем на 6 % (рисунки 7а, 8а) в сравнении со значением призмочной прочности предварительно не обжиганого и не нагретого бетона.



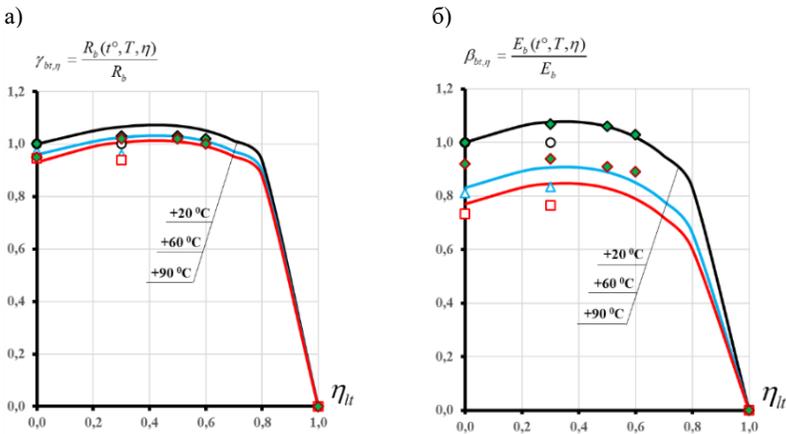
Опытные данные:

- , ▲, ■, ◆ – автора для серий №1 и № 4 соответственно; ◆ – А. С. Волкова;
- ▲, ■ – M.F. Mohd Zain and S.S. Radin; --- – расчет по СП 27.13330.2017
- 1 – нагрев кратковременный $\eta_l = 0$; 2 – нагрев длительный $\eta_l = 0$;
- 3 – длительное обжигание уровня $\eta_l = 0,3$

Рисунок 7 – Влияние кратковременного (1) и длительного (2) нагрева до $+90^\circ\text{C}$, предварительного длительного обжигания напряжениями $\sigma_l = 0,3 \cdot R_b$ на прочность (а), начальный модуль упругости (б), на диаграммы деформирования (в) и предельную сжимаемость (г) высокопрочного бетона при осевом сжатии

Значения начального модуля упругости ВПМБ в условиях кратковременного нагрева до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$ снижаются на 18 и 22 % соответственно, а в условиях длительного нагрева – на величины до 26 % в сравнении со значениями у не нагревавшегося бетона. Длительное предварительное обжатие напряжениями уровня $\eta_l = 0,3$ при тех же температурах нагрева обуславливает снижение начального модуля упругости на величину до 19 % по сравнению с идентичными образцами в условиях нормальной температуры без длительного предварительного обжатия (рисунки 7б, 8б).

Предельные относительные деформации укорочения высокопрочного модифицированного бетона при осевом сжатии в условиях кратковременного нагрева при температурах $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$ возрастают на 4 и 6 % соответственно, а в условиях длительного нагрева при тех же температурах снижаются на величину до 6 % в сравнении со значениями у не нагревавшегося бетона. Длительное предварительное обжатие напряжениями уровня $\eta_l = 0,3$ в условиях нагрева приводит к снижению предельной сжимаемости ВПМБ на величину до 13 % по сравнению с соответствующими значениями у предварительно не обжатого бетона (рисунок 7г).



Опытные данные:

- , ▲, □ – автора для серий № 1 - 4; ◆, ◇ – А.С. Волкова;
- – расчёт по методике В.И. Корсуна

Рисунок 8 – Зависимости величин прочности (а) и начального модуля упругости (б) ВПМБ от температуры, длительности нагрева и уровня предварительного длительного обжатия при повторном нагружении сжатием

Таблица 2 – Рекомендуемые параметры к характеристикам свойств высокопрочного бетона в условиях нагрева до 90 °С

Для тяжелых бетонов	$t^{\circ},$ °С	γ_{br}	β_b	Φ_b	$\bar{\varepsilon}_b$	$\alpha_{br} \cdot 10^{-6},$ град ⁻¹	$\alpha_{cs} \cdot 10^{-6},$ град ⁻¹
Классов до В60 по данным СП 27.13330.2017	60	0,73/0,73	0,92/0,92	0/ 2,10	2,64/3,60	12/4,10	0/7,20
	90	0,88/0,88	0,86/0,86	0/ 3,15	3,96/5,40	10/4,40	0/5,60
Для ВПБ классов В60÷В90 по результатам исследований	60	0,91/0,97	0,81/0,80	0/2,92	1,04/0,97	12,68/7,78	0/7,46
	90	0,89/0,95	0,78/0,73	0/3,74	1,07/0,95	11,90/8,36	0/6,33

Примечания: 1. Над чертой – для кратковременного нагрева, под чертой – для длительного нагрева. 2. Величины для промежуточных значений температур определять интерполяцией

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований влияния кратковременного и длительного одно- и двустороннего нагрева на характеристики НДС изгибаемых железобетонных элементов из ВПМБ с учетом неоднородности характеристик прочностных и деформационных свойств бетона и арматуры в направлениях температурных перепадов.

В экспериментальной части исследований испытания железобетонных балок проводились в два этапа, соответствовавших характерным стадиям работы конструкций: вначале – длительный неравномерный нагрев, затем – догружение возрастающим до разрушения изгибающим моментом M_x .

Величины реактивных моментов при неравномерном нагреве статически неопределимых элементов-балок определялись, главным образом, величиной температурного градиента, моментом трещинообразования, зависимостью физико-механических и реологических свойств высокопрочного бетона от температуры и продолжительности нагрева.

В теоретической части исследований определение характеристик НДС изгибаемых железобетонных элементов для всех режимов нагрева и нагружения выполнялось с помощью специально разработанной программы для ПЭВМ. В методике расчета учтены основные специфические свойства железобетона: физическая нелинейность деформирования, неравновесность длительных процессов, неоднородность свойств материалов, работа с трещинами.

Принята расчетная модель неоднородного железобетонного элемента с дискретным расположением арматуры. Распределение температуры по высоте и ширине сечения считается заданным. Рассматривается случай

неравномерного нагрева при направлении плоскости теплового потока перпендикулярно продольной оси элемента и с произвольной ориентацией относительно главных осей нормального сечения элемента. Полагается, что элемент может свободно деформироваться в поперечном направлении.

Механические характеристики бетона и арматуры принимаются функциями температуры. Сечение элемента с неоднородными свойствами представляется в виде системы элементарных участков площадью $dF = dx \times dy$ (рисунок 9).

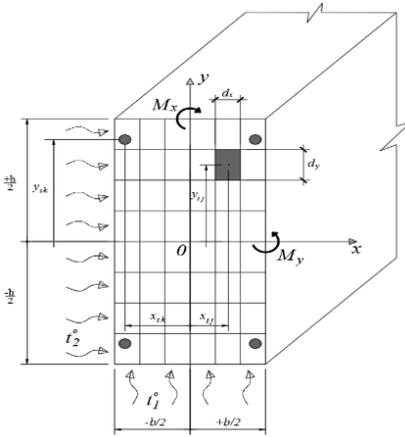


Рисунок 9 – Расчетная модель балочного элемента с неоднородными свойствами

Полагается, что в пределах элементарного участка напряжение $\sigma_{z,ji}$, температура бетона и его физико-механические свойства постоянны и равны их значениям в центре тяжести участка.

Физические соотношения, связывающие внутренние усилия и деформации на уровне срединной оси стержневого элемента конструкции, построены на основе раздельного учета физической нелинейности и длительных процессов в бетоне. Принимается справедливой гипотеза плоских сечений.

Полные деформации элементарного участка бетона $\varepsilon_{b,ji}$ и k -го стержня арматуры в направлении оси "Z" принимаются в виде суммы деформаций, обусловленных напряжениями соответственно $\sigma_{z,ji}$ и $\sigma_{s,k}$, температурным расширением, а для бетона – дополнительно деформациями усадки $\varepsilon_{cs,ji}$ и ползучести $\varepsilon_{c,ji}$:

$$\varepsilon_{b,ji} = \frac{\sigma_{z,ji}}{E'_{b,ji}} + \alpha_{bt,ji} \cdot \Delta t_{b,ji} + \varepsilon_{cs,ji} + \varepsilon_{c,ji}; \quad (2)$$

$$\varepsilon_{s,k} = \frac{\sigma_{s,k}}{E'_{s,k}} + \alpha_{st,k} \cdot \Delta t_{s,k}, \quad (3)$$

где $E'_{b,ji}$ и $E'_{s,k}$ – модули деформации ji -го участка бетона и k -го арматурного стержня:

$$E'_{b,ji} = E_{b,ji} \cdot \beta_{b,ji}; \quad E'_{s,k} = E_{s,k} \cdot \frac{\beta_{s,k}}{K_{s,k}}. \quad (4)$$

В выражениях (2)÷(4):

$\beta_{b,ji}$ и $\beta_{s,k}$ – коэффициенты учета изменений модулей упругости бетона $E_{b,ji}$ и арматуры $E_{s,k}$ соответственно температурам нагрева;

$K_{s,k}$ – коэффициент учета наличия трещин, пересекающих данный арматурный стержень ($K_{s,k} = 1$ при отсутствии и $K_{s,k} = \psi_s$ при наличии трещин);

Ψ_s – коэффициент учета работы растянутого бетона между трещинами.

Основные физические соотношения модели представлены в виде:

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ N_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \chi_x \\ \chi_y \\ \varepsilon_{oz} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} M_{ox} \\ M_{oy} \\ N_{oz} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где A_i , B_i , C_i – коэффициенты матрицы жесткости; ε_{oz} , χ_x , χ_y – соответственно продольные относительные деформации элемента на уровне срединной оси и кривизны относительно осей X и Y ; N_{oz} , M_{ox} , M_{oy} – элементы свободного вектора-столбца, связанные с деформациями температурного удлинения материалов, усадки и ползучести бетона.

Результаты расчетного определения изгибающих «температурных» моментов от неравномерного нагрева, деформаций продольной оси элементов при заданных значениях температурных перепадов представлены на рисунках 10÷12.

Результаты экспериментальных и численных исследований свидетельствуют, что кратковременное и длительное одностороннее нагревание образцов-балок до +90 °С не приводит к заметному снижению прочности конструкций при последующем нагружении изгибающим моментом.

Однако, высокий уровень сопротивления высокопрочного бетона в сжатой зоне изгибаемых элементов способствует развитию больших деформаций (прогибов) конструкций вследствие текучести арматуры в растянутой зоне, что является важным фактором обеспечения надежности работы таких конструкций в составе статически неопределимых систем.

Разрушение всех элементов конструкций в экспериментальных и численных исследованиях сопровождалось развитием значительных пластических деформаций арматуры в растянутой зоне вследствие достижения его состояния текучести и завершалось разрушением бетона в сжатой зоне.

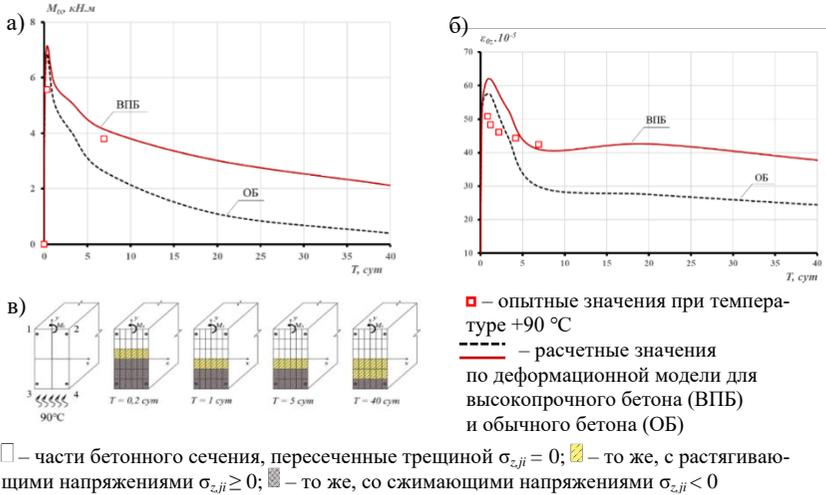


Рисунок 10 – Изменение температурных моментов M_{Tx} (а), деформации продольной оси ϵ_{oz} (б) и схем развития трещин и перемещений границ сжатой и растянутой частей бетонного сечения балки (в) при длительном одностороннем нагреве снизу до $+90^\circ\text{C}$ в течение 40 суток

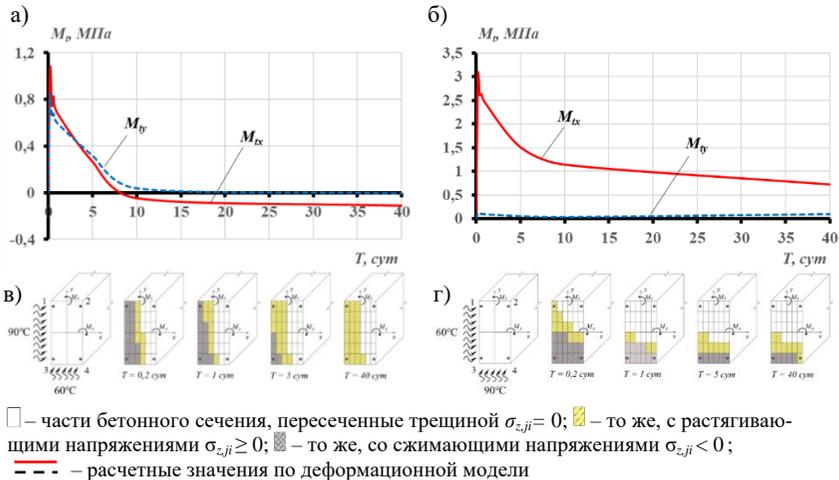
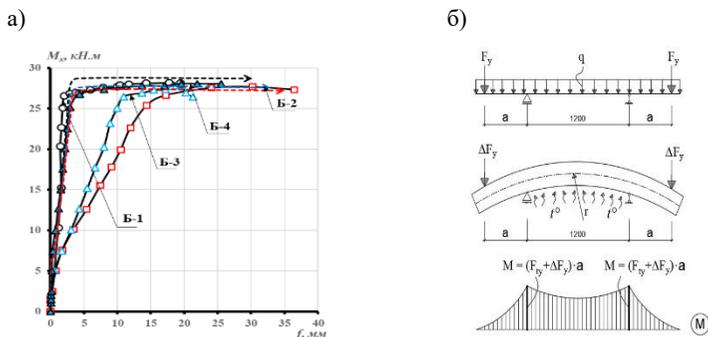


Рисунок 11 – Изменение температурных моментов M_{Tx} , M_{Ty} (а, б) и схемы развития трещин и перемещений границ сжатой и растянутой частей бетонного сечения балок (в, г) при длительном неравномерном нагреве в течение 40 суток:
 а, в) – при одновременном нагреве сбоку до $+90^\circ\text{C}$ и снизу до $+60^\circ\text{C}$;
 б, г) – при одновременном нагреве сбоку до $+60^\circ\text{C}$ и снизу до $+90^\circ\text{C}$



- , ▲, ■ – опытные значения при температурах 20 °С, 60 °С и 90 °С;
- – расчетные значения по деформационной модели для балок из ВПБ при температурах 20 °С, 60 °С и 90 °С

Рисунок 12 – Изменение прогибов балок из высокопрочного бетона при догрузении изгибающим моментом M_x

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований формулируются следующие основные выводы:

1. Разработана методика и выполнены экспериментально-теоретические исследования работы железобетонных изгибаемых балочных элементов на совместное действие температурного перепада и нагружения в несовпадающих плоскостях.

2. Получены данные экспериментальных исследований и установлены зависимости влияния кратковременного и длительного нагрева при температурах +50 °С, +60 °С, +70 °С и +90 °С на прочность и характеристики деформационных свойств высокопрочного бетона при осевом сжатии в части температурно-усадочных деформаций, предельной сжимаемости и деформаций ползучести.

3. Прочность предварительно не нагруженного высокопрочного бетона при температурах +50 °С, +70 °С и +90 °С снижается в условиях кратковременного нагрева на 9, 10 и 11 %, а после длительного нагрева – на 2, 3 и 5 % соответственно в сравнении с прочностью не нагревавшегося бетона. Предварительное длительное обжатие напряжениями уровня $\eta_l = \sigma_l / R_b = 0,3$ приводит, при последующем догрузении осевым сжатием, к снижению прочности высокопрочного бетона при тех же температурах нагрева не более, чем на 6 %.

4. Величины начального модуля упругости бетона с повышением температуры первого кратковременного нагрева до $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$ снизились на 22 %, а после длительного нагрева – на величину до 26 % по отношению к значениям у не нагревавшегося бетона. Длительное предварительное обжатие образцов бетона напряжениями уровня $\eta_l = 0,3$ при тех же температурах нагрева приводит к снижению начального модуля упругости бетона на величину до 19 % в сравнении с аналогичными характеристиками у образцов в условиях нормальной температуры без предварительного обжатия.

5. Предельная сжимаемость высокопрочного бетона с повышением температуры до $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$ возрастает на величину до 6 % при первом кратковременном нагреве и снижается на такую же величину при длительном нагреве в сравнении со значениями у бетона, не подвергавшегося нагреву. Длительное предварительное обжатие напряжениями уровня $\eta_l = 0,3$ при тех же температурах нагрева обуславливает снижение предельной сжимаемости до 13 % по отношению к соответствующим значениям у предварительно не обжатого бетона в условиях нормальной температуры.

6. Предельные значения меры ползучести бетона, нагруженного напряжениями сжатия уровня $\eta_l = 0,3$, при температурах нагрева $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$ увеличились в 1,8 и в 2,3 раза соответственно в сравнении с деформациями ползучести не нагретого бетона.

7. Разработаны и представлены в таблице 2 практические рекомендации по учету влияния кратковременного и длительного нагрева до $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$ и уровня длительного осевого сжатия до уровня $\eta_l = 0,3$ на характеристики прочностных, деформационных свойств, на деформации ползучести высокопрочных бетонов.

8. Выполнены экспериментально-теоретические исследования характеристик НДС изгибаемых железобетонных балочных элементов из ВПМБ в части температурных усилий, деформаций удлинений и прогибов, напряжений в бетоне и в стержнях арматуры, усилий трещинообразования и несущей способности при несовпадении плоскостей температурного перепада и нагружения.

Установлено влияние ряда значимых факторов (градиента температур, длительности нагрева, трещинообразования и др.) на температурные усилия, деформации и прочность железобетонных балочных элементов при совместном действии перепадов температур и нагрузки.

9. Температурные моменты достигают максимальных значений, равных усилиям трещинообразования, при первом кратковременном нагреве, затем, при длительном нагреве, снижаются вследствие неоднородных по высоте и ширине сечения температурно-усадочных и пластических деформаций бетона.

10. Установлено, что кратковременное и длительное одностороннее нагревание образцов-балок до +90 °С не приводит к заметному снижению прочности конструкций при последующем нагружении изгибающим моментом. Относительно высокий уровень сопротивления высокопрочного бетона в сжатой зоне изгибаемых элементов способствует развитию больших деформаций (прогибов) конструкций вследствие текучести арматуры в растянутой зоне, что является важным фактором обеспечения надежности работы таких конструкций в составе статически неопределимых систем.

Разрушение всех опытных элементов конструкций происходило в результате разрушения бетона сжатой зоны вследствие сокращения ее площади из-за предшествующих значительных пластических деформаций арматуры в растянутой зоне при достижении состояния текучести.

11. Разработаны предложения по уточнению методик СП 27.13330.2017 в части расчетов деформаций и прочности изгибаемых элементов из высокопрочного железобетона при неравномерном нагреве.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных в перечень ВАК

1. Korsun, V.I.; Khon K. Strains and strength of reinforced concrete beams manufacturing by high-strength concrete for non-coincident planes of temperature gradient and loading; 2023; Construction of Unique Buildings and Structures; 109 Article No 10914. doi: 10.4123/CUBS.109.14 (0,75 п.л., авторский вклад 50%).

Публикации в изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus

2. Khon, K. Strength and deformations of high-strength concrete under short-term heating conditions up to +90 °C / V. I. Korsun, K. Khon, V. Q. Ha, A. O. Baranov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – № 896. – 012035 (0,44 п.л., авторский вклад 25 %).

3. Khon, K. Effect of Short-Term Heating up to +90°C on Deformation and Strength of High-Strength Concrete / K. Khemarak, V. Korsun, Q. Ha, A. Volkov // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2020. – № 70. – P. 585–592 (0,5 п.л., авторский вклад 25 %).

4. Khon, K. The Influence of Temperature and Duration of Heating on the Properties of High-Strength Concrete Modified by Organo-Mineral Components / V. Korsun, A. Baranov, K. Khon, Q. Ha // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – № 150 LNCE. – P. 515–524 (0,625 п.л., авторский вклад 25 %).

5. Khon, K. Damage constitutive model of coal gangue concrete under freeze-thaw cycles / J. Qiu, Y. Zhou, N. I. Vatin, X. Guan, Sh. Sultanov, K. Khon // Construction and Building Materials. – 2020. – № 264. – 120720 (0,81 п.л., авторский вклад 20 %).

6. Khon, K. Effect of Physical and Chemical Properties of Coal Gangue Under Different Geological Conditions on Mechanical Properties of Concrete / J. Qiu, Y. Zhou,

B. Hou, Sh. Sultanov, K. Khon // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2020. – № 70. – P. 777–791 (0,94 п.л., авторский вклад 25 %).

Публикации в изданиях, входящих в РИНЦ

7. Кхон, К. Влияние органоминерального модификатора на характеристики механических свойств высокопрочного бетона / В. И. Корсун, К. Кхон, В. К. Ха // В сборнике: Неделя Науки ИСИ: Материалы научной конференции с международным участием, Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Ч. 2. – СПб.: СПбПУ, 2019. – С. 108–110 (0,19 п.л., авторский вклад 35 %).

8. Кхон, К. Влияние климатических условий Юго-Восточной Азии на прочность и модуль упругости бетона / В. И. Корсун, К. Кхон, В. К. Ха // В сборнике: Неделя науки ИСИ: Материалы всероссийской конференции. Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Ч. 2. – СПб.: СПбПУ, 2021. – С. 379–381 (0,19 п.л., авторский вклад 35 %).

9. Кхон, К. Температурные моменты в статически неопределимых балках из высокопрочного бетона при одностороннем нагреве / В. И. Корсун, К. Кхон, В. К. Ха // В сборнике: Неделя науки ИСИ. Материалы всероссийской конференции. Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Ч. 2. – СПб.: СПбПУ, 2021. – С. 382–384 (0,19 п.л., авторский вклад 35 %).

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 13.02.2024. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 120 экз. Заказ 15.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А