

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

на правах рукописи

БАРАНОВ АЛЕКСЕЙ ОЛЕГОВИЧ

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ВНЕЦЕНТРЕННО
СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО
БЕТОНА В УСЛОВИЯХ НАГРЕВА ДО 400°С**

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Направление подготовки 08.06.01 - Техника и технологии строительства

Специальность 05.23.01 - Строительные конструкции, здания и сооружения

Санкт-Петербург

2021

Научно-квалификационная работа выполнена в Высшей школе промышленно-гражданского и дорожного строительства. Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ: *Лазарев Юрий Георгиевич*
д.т.н, профессор ВШПГиДС

Научный руководитель: *Корсун Владимир Иванович*
д.т.н, профессор ВШПГиДС

Ватин Николай Иванович
д.т.н, профессор ВШПГиДС

Рецензенты: *Семенов Кирилл Владимирович*
к.т.н, доцент ВШПГиДС

Морозов Валерий Иванович
д.т.н, профессор СПбГАСУ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В строительной практике, основываясь на многолетних экспериментальных и теоретических исследованиях, увеличивается общий (по стране) объем применения высокопрочного бетона в гражданском строительстве и значительно меньше в промышленном. Такая тенденция связана с долгосрочным экономическим эффектом от применения в конструкциях «высокоэффективных или высококачественных бетонов», которые обеспечивают не только высокую прочность на сжатие, но и высокие эксплуатационные характеристики: повышенная коррозионная стойкость, высокие марки по водонепроницаемости и морозостойкости и др.

Наиболее эффективной на сегодняшний день является технология получения высокопрочных бетонов с помощью введение добавок в состав бетонов. Среди них можно выделить производство бетонов с применением полифункциональных модификаторов серии МБ (тонкодисперсный порошок), который содержит микрокремнезем, золу уноса и суперпластификатор.

Применение высокопрочных бетонов в промышленном и энергетическом строительстве, где большая группа железобетонных конструкций и элементов эксплуатируется при систематическом воздействии технологических температур, является хорошей перспективой. Необходимость исследований, направленных на изучение и оценку влияния воздействия повышенных и высоких температур на основные свойства высокопрочного бетона, связана с недостаточной изученностью данной темы.

Развитие методов расчета железобетонных конструкций на основе более полного учета особенностей формирования их напряженно-деформированного состояния (НДС), характеристик прочностных и деформационных свойств материалов является актуальной задачей. Значительный интерес для теории железобетона представляет построение уточненного метода расчета железобетонных конструкций с учетом физической нелинейности бетона на основе диаграмм-изохрон.

Исследования выполнены в рамках гранта ФНИ Минстроя России и РААСН по теме 7.4.15-18 «Фундаментальные научные исследования влияния повышенных до 200°C температур на характеристики физико-механических и реологических свойств высокопрочных модифицированных бетонов классов В70 ÷ В90» (гос. рег. № АААА-А19-119060690056–5).

Целью диссертационного исследования является экспериментально-теоретические исследования влияния длительного нагружения в условиях неравномерного нагрева до 400°C на напряженно-деформированное состояние железобетонных элементов балочного типа из высокопрочного бетона и разработка рекомендаций по уточнению метода расчета по прочности и деформациям на основе нелинейной деформационной модели

Задачи исследования

1. Экспериментальные исследования кратковременного и длительного нагрева до 400°C на характеристики физико-механических свойств высокопрочного бетона при кратковременном осевом сжатии и растяжении.
2. Экспериментальные и теоретические исследования температурно-усадочных деформаций высокопрочного бетона в диапазонах температур от 20 до 400°C.
3. Экспериментальные исследования влияние уровня длительного нагружения и температуры нагрева на удельные деформации ползучести высокопрочного бетона.

4. Экспериментальные и теоретические исследования напряженно-деформированного состояния изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных стержневых элементов при длительном нагружении в условиях неравномерного нагрева.

5. Разработка рекомендаций по учёту влияния длительного нагружения и температурных воздействий на характеристики прочностных и деформационных свойств высокопрочного бетона.

6. Развитие нелинейной деформационной модели железобетона применительно в условиях температурных воздействий на основе диаграмм-изохрон

Объект исследования: железобетонные элементы конструкций балочного типа, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных температур и длительного нагружения.

Предмет исследования: физико-механические и реологические характеристики свойств высокопрочного бетона в условиях повышенных температур, характеристики напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов при длительном нагружении и в условиях неравномерного нагрева.

Ожидаемая научная новизна

Экспериментальные данные о влиянии повышенных и высоких технологических температур до 400°C на прочность и деформации высокопрочного бетона при кратковременном и длительном нагружении.

Данные экспериментальных и теоретических исследований влияния длительного нагружения и одностороннего нагрева на напряженно-деформированное состояние внецентренно сжатых железобетонных элементов балочного типа.

Практическая значимость

Аналитическое описание закономерностей изменения прочностных и деформационных характеристик высокопрочного бетона в зависимости от температуры нагрева и длительности нагружения.

Предложения по уточнению инженерного метода расчета температурно-усадочных деформаций высокопрочного бетона в условиях нагрева.

Предложения по уточнению нелинейной деформационной модели железобетона применительно в условиях температурных воздействий на основе диаграмм-изохрон

Рекомендации по уточнению методики расчёта внецентренно сжатых железобетонных элементов конструкций в условиях нагрева из высокопрочного бетона при различных режимах длительного нагружения.

Методы исследования:

- методы физического и математического моделирования;
- механические методы испытаний материалов нагружением и измерения перемещений.

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории Санкт-Петербургского Политехнического университета Петра Великого в соответствии с апробированными методиками с использованием сертифицированного оборудования.

Апробация диссертационной работы. Основные результаты диссертации докладывались:

1. Международной научно-практической конференции «International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering» EECE 2020.
2. Международной научно-практической конференции «Digital technologies and innovative materials in road and bridge construction» DigTechIMC-2020 24-25 September 2020.
3. III Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы обеспечения функционирования и развития наземной инфраструктуры комплексов систем вооружения» Санкт-Петербург, 25–26 сентября 2019 года.

Публикации. По теме диссертации опубликовано три печатные работы, две из которых входят в перечень Scopus-индексируемых изданий.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлена общая характеристика диссертационной работы, дано обоснование актуальности темы, изложены цель и задачи исследований, научная новизна и практическое значение результатов, представлены сведения об апробации результатов и публикациях.

В первом разделе выполнен анализ работ, посвященных исследованию влияния длительного нагружения и повышенных температур на основные характеристики механических и реологических свойств высокопрочного бетона. Из-за важности поведения бетона в условиях нагрева (или воздействия огня), было проведено множество исследований обычного бетона в условиях повышенных и высоких температур следующими учеными В.В.Жуков, К.Д. Некрасов, А.Ф. Милованов, А.П. Кричевский, Корсун В.И., G.A. Houry, U. Schneider, W.P.S Dias, V.K.R. Kodur, а также определены и исследованы наиболее важные характеристики свойств. Сегодня же основной интерес для многих ученых сосредоточен на исследовании бетонов со специфическими свойствами, например: высокопрочный и сверхпрочный бетоны, самоуплотняющиеся бетоны и т. п.

На основе краткого литературного обзора исследований представлено текущее состояние вопроса. Очевидно, что эффект минеральных добавок в условиях нагрева бетона проявляется по-разному и зависит от типа, пуццолановой активности, дисперсности, расхода, способа введения. Стоит также отметить, что начальная прочность бетона, его влажность и структурные характеристики оказывают существенное влияние на свойства бетона в условиях воздействия повышенных и высоких температур.

В работе (Chi Sun Poon et al. 2001) авторы исследовали влияние непродолжительного нагрева в интервале температур от 200 до 800°C на физико-механические характеристики бетонов нормальной (B35-B60) и высокой прочности (B80-B100) с активными минеральными добавками. В качестве добавок к бетону применяли микрокремнезем, золу уноса (класс F согласно стандарту ASTM C618), молотый гранулированный доменный шлак. Было исследовано 14 различных составов бетона. Нагрев до исследуемых температур осуществлялся в электропечах со скоростью 2,5°C / мин с последующей выдержкой 1 час, охлаждение до комнатной температуры производилось на воздухе. Интересными представляются данные об остаточной прочности на сжатие образцов бетона. При 200°C составы с золой и шлаком показали прирост прочности на сжатие, при этом наибольшее увеличение остаточной прочности после нагрева было у состава содержащим 40% золы уноса - 122% от первоначальной прочности при 20°C. Незначительная потеря прочности наблюдалась в бетонах без добавок и содержащих микрокремнезем. При 400°C большинство составов высокопрочного бетона сохраняют свою первоначальную прочность (снижение 2–4%), исключение бетоны с микрокремнеземом – снижение 7–13%. В бетонах

нормальной прочности наблюдалось значительное снижение, которое составляло 19–26% от первоначальной прочности. При 600°C средняя потеря прочности составила 44% и 60% для образцов из высокопрочного и нормально бетонов соответственно. Авторы делают вывод, что бетоны, содержащие золу уноса и молотый гранулированный доменный шлак, дают наилучшие эксплуатационные характеристики, особенно при температуре ниже 600°C по сравнению с чисто цементными бетонами.

Близкие результаты были получены в (Kim, Kim, and Lee 2009). Основная идея эксперимента заключалась в сравнении механических характеристик составов бетона различных классов по прочности (B40, B60 и B80) после нагрева до 700°C. Образцы нагревались со скоростью 0,77°C / мин, в период нагрева до требуемых величин к образцу была приложена нагрузка 25% от предполагаемой пиковой нагрузки. Необходимо добавить, что образцы были испытаны в горячем состоянии. Авторы утверждают, что чем выше прочность бетона до нагрева, тем больше потеря прочности от воздействия температур. При температуре 100°C образцы всех составов имели прочность на сжатие равную 80% от первоначальной. Однако в интервале температур от 200 до 300°C образцы восстановили часть этой прочности, которая составляла от 90% до 110% первоначальной. Согласно экспериментальным данным авторов, восстановление тем больше, чем ниже класс по прочности на сжатие бетона. Модуль упругости при 100°C снижается на 10–20%. Дальнейшее повышение температуры до 200°C образцов восстанавливают потерю модуля упругости и составляют 85–100% от значений модуля упругости при 20°C. При 400°C модуль упругости уменьшался примерно на 20–35% относительно первоначальных значений.

Результаты испытаний (Aydin and Baradan 2007) показали, что раствор, содержащий 60% золы уноса (класс C по ASTM C618) и пемзу в качестве мелкого заполнителя, не показал потери прочности на сжатие при всех температурах испытаний. При 900°C был прирост прочности на сжатие на 19% по сравнению с первоначальной.

Авторы (Kirchhof et al. 2020) пишут, что для бетона нормальной прочности свойственно постепенное снижение прочности с повышением температуры нагрева, в то время как для высокопрочных значительное снижение прочности наступает после 400°C. Однако, в работе (Kodur and Phan 2007), обобщая свои исследования, авторы пишут, что высокопрочный бетон имеет более высокую скорость потери прочности на сжатие в диапазоне температур от 100°C до 400°C по сравнению с нормальным.

В исследованиях авторов (Ghandehari, Behnood, and Khanzadi 2010; Behnood and Ziari 2008) представлены экспериментальные данные о влиянии нагрева в диапазоне температур от 100 до 600°C на остаточную прочность на сжатие и растяжение при раскалывании высокопрочного бетона (B80) с содержанием микрокремнезема взамен портландцемента в составе 6 и 10% от массы цемента. Образцы нагревали со скоростью 3°C / мин с последующей выдержкой 3 часа с последующим охлаждением до комнатной температуры производилось на воздухе. Нагрев при 100°C снизил прочность на сжатие в среднем на 15% для всех составов (с добавкой и без). При 200°C наблюдалось небольшой увеличение прочности на сжатие по сравнению с остаточной прочностью после нагрева при 100°C. При 300°C снижение составило для всех составов в среднем 25%, при 600°C - 75%. Прочность на растяжение при раскалывании имеет ту же тенденцию что и при сжатии. Авторы утверждают, что добавление микрокремнезема увеличило прочность на сжатие и растяжение при раскалывании образцов бетона, которые не подвергались нагреву. Однако, после воздействия повышенных и высоких температур в исследуемых диапазонах остаточная прочность была незначительно ниже, чем для образцов без добавки (чисто цементные). Содержание микрокремнезема в составе бетонов при воздействии повышенных и высоких температур оказывает неблагоприятное воздействие.

Несколько другой результат был получен в работе (Phan, Lawson, and Davis 2001), там образцы бетона с микрокремнеземом имели остаточную прочность больше, чем образцы без добавки. Например, при 300°C снижение прочности на сжатие для образцов с

микрокремнеземом составило в среднем на 15%, без – на 25%. При этом тенденции, представленные в работах выше, аналогичны полученным. Авторы (Saad et al. 1996) пишут, что добавление 10% микрокремнезема в замен цемента повышает термостойкость бетона до 350°C.

Аналогичные исследования проводились в работе (Khaliq and Taimur 2018), авторы заменили часть цемента (10% от массы) на золу рисовой шелухи и золу багассы (зола после сжигания отжатых стеблей сахарного тростника). Образцы бетона (B60-B70) нагревали в интервале 100-800°C со скоростью 3°C / мин с последующей выдержкой 2 часа, остывание производили на воздухе. Нагрев до 800° образцов с золой багассы существенных изменений по отношению к составу без добавок не вызвал. Авторы также пишут, что зола рисовой шелухи наиболее эффективна при нагреве бетона до 200°C, что подтверждается и в статье (Khaliq and Mujeeb 2019). Прочность на растяжение при раскалывании имеет схожую тенденцию к снижению при нагреве аналогично прочности на сжатие. Начальный модуль упругости снижается практически линейно на всем интервале исследуемых температур. В среднем для всех составов бетона снижение начального модуля упругости составляет: при 100°C – 10%; при 200°C – 15%; при 400°C – 40%; при 600°C – 70%. В работе (Setayesh Gar, Suresh, and Bindiganavile 2017) авторы отмечают, что замена части цемента (5 и 10% от массы) на золу багассы дает незначительную прирост к остаточной прочности на сжатие (от 4 до 10%), по сравнению с составом без добавки, при нагреве до 500°C.

В работе (Demirel and Keleştemur 2010) также исследовали составы бетона (~B45) с молотой пемзой. Результаты показали, что добавление пемзы увеличивает величину остаточной прочности на сжатие после нагрева. Оптимальное содержание добавки 10% взамен части цемента, остаточная прочность составила: при 400°C – 117% от первоначальной, при 600°C – 94%. В работе также исследовался состав с пемзой и микрокремнеземом, оптимальное содержание 5 и 10% соответственно. Для этого состава остаточная прочность на сжатие при температуре нагрева 400°C составила 120%, дальнейшее увеличение температуры приводит к резкому падению прочности.

Исследовательская работа (Nadeem, Memon, and Lo 2014) была проведена для оценки прочности на сжатие составов высокопрочного бетона с различным содержанием золы уноса и метаксаолина взамен цемента после нагрева в интервале температур от 200-800°C. Наибольшая прочность на сжатие при 20°C была у состава с содержанием метаксаолина 20% (прирост прочности около 20% по сравнению с составом без добавок), а также у состава с золой – прирост 15%. После нагрева при 200°C все составы потеряли 10% своей первоначальной прочности, за исключением для составов без добавок и с 60% золы уноса – прирост 5 и 10% соответственно. При 400°C остаточная прочность составляет 80% для образцов с метаксаолином и для состава без добавки, а для составов с золой уноса 85–95%. При 600°C в целом для всех составов снижение прочности составило 40–45%, а при 800°C - 70–80%. Авторы отмечают, что составы с золой сохраняли значительную часть прочности до 400°C по сравнению с метаксаолином. Соответствующие результаты также были получены в (C. S. Poon, Shui, and Lam 2004), бетон с метаксаолином значительно снизил прочность на сжатие по сравнению с чисто цементным составом.

Несмотря на большое количество научных работ, посвящённых огнестойкости бетона, значительно меньше изучены вопросы, связанные с длительным воздействием повышенных и высоких температур на характеристики свойств бетона. Для эффективного использования высокопрочного бетона в условиях теплового воздействия в течение длительного времени необходимо знать, как изменяются во времени его свойства.

В работе (Корсун В.И., Машталер С.Н. 2018) исследовалось влияние длительного нагрева на свойства высокопрочного бетона, в состав которого входили микрокремнезем, смесь золошлаковая тепловых электростанций, зола уноса и суперпластификатор. Нагрев в течение 3 месяцев при температуре 90°C снизил прочность на сжатие на 5%, а при 200°C в течение месяца на 3%. Наибольшая прочность на сжатие была у образца после длительного

нагрева при 150°C – 105% от первоначальной. Начальный модуль упругости снизился на 25, 37 и 58% соответственно при температурах нагрева 90, 150 и 200°C. Похожие экспериментальные данные были получены в работе (Корсун В.И. и Корсун А.В. 2014), авторы отмечают незначительное влияние температур до 200°C на прочность бетона на сжатие. При этом характеристики деформационных свойств (начальный модуль упругости и предельные деформации) изменяются значительно. Относительные предельные продольные деформации после нагрева при 200°C увеличились на 41% относительно значений контрольных образцов, которые не подвергались нагреву.

Во втором разделе представлены состав высокопрочного бетона и характеристики свойств бетонной смеси, характеристики опытных образцов, изложены методы проведения экспериментальных и теоретических исследований, методы обработки полученных результатов.

Следующие компоненты использовались для производства высокопрочного бетона: портландцемент ЦЕМ I 42,5Н по ГОСТ 31108–2016, природный песок, гранитный щебень, водопроводная вода и многокомпонентный модификатор для бетона МБ10-50С. Модификатор содержит микрокремнезем, золу уноса и суперпластификатор в процентном соотношении 45:45:10 от общей массы добавки. Данные о составе и свойствах бетонной смеси приведены в таблице 1.

Таблица 1. Расход материалов на 1 м³ и свойства бетонной смеси

Компоненты бетонной смеси, кг/м ³					В/Ц	В/(Ц+МБ)	ОК, см
Цемент	Песок ¹	Щебень ²	Вода	МБ ³			
490	790	850	170	100	0,35	0,29	19

Примечание: ¹ – модуль крупности песка $M_{кр}=2,3$; ² – щебень гранитный фракции 5–10 мм (70%) и 10–20 мм (30%); ³ – МБ10-50С, содержание модификатора 20% от массы цемента

Приготовление бетонной смеси осуществлялось в бетоносмесителе принудительного действия. Укладка бетонной смеси в металлические формы образцов кубов и призм производилась в горизонтальном положении с последующим вибрированием. Образцы распалубливали через 1 сутки и затем выдерживались в течение 27 дней в камере нормального хранения при температуре воздуха 20°C ± 2°C и относительной влажности воздуха 95±5% согласно ГОСТ 10180–2012.

Программа исследований включает четыре группы экспериментов:

1. Исследование физико-механических характеристик бетона при кратковременном и длительном нагружении в условиях нормальной, повышенных (90 и 200°C) и высоких (300 и 400°C) температур.
2. Исследование температурно-усадочных деформаций высокопрочного бетона и в условиях нагрева до 400°C.
3. Исследование удельных деформаций ползучести высокопрочного бетона при длительном осевом сжатии в условиях нагрева.
4. Исследование напряженно-деформированного состояния изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных элементов из высокопрочного бетона в условиях длительного нагружения и неравномерного нагрева.

Прочность на осевое сжатие (**R**) и на растяжение при раскалывании (**R_н**) определялись на образцах кубах с размерами 100x100x100 мм согласно ГОСТ 10180–2012 (Методы

определения прочности по контрольным образцам). Модуль упругости (E_b), коэффициент Пуассона (ν), призмная прочность (R_b) определялись согласно ГОСТ 24452–80 на образцах призмах с размерами 100x100x400 мм путем постепенного (ступенями по 10%) нагружения образцов осевой сжимающей нагрузкой до разрушения при определении R_b и до уровня 30% от разрушающей нагрузки с измерением в процессе нагружения образцов их деформаций при определении E_b и ν . Итоговые значения параметров определялось как среднее по двум образцам.

По графикам, построенным в координатах « θ - σ_1/R_b », « $\Delta\theta$ - σ_1/R_b » и « $\Delta\mu$ - σ_1/R_b », определяли нижнюю $R_{crс}^0$ и верхнюю $R_{crс}^v$ границы микротрещинообразования, а также характер изменения состояния структуры высокопрочного бетона под действием внешней нагрузки. Для этого вычисляли объемную деформацию (θ), приращение объемной деформации ($\Delta\theta$) и дифференциальный коэффициент поперечных деформаций ($\Delta\mu$).

Испытания на осевое сжатие бетонных призм и кубов проводились на жестком гидравлическом прессе П-250, испытания на растяжение при раскалывании на ПСУ-50А с помощью специальной установки. Измерение продольных и поперечных деформаций при нагружении сжатием осуществлялось с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,001 мм. Индикаторы крепились на съемные металлические рамки (см. рис. 3).

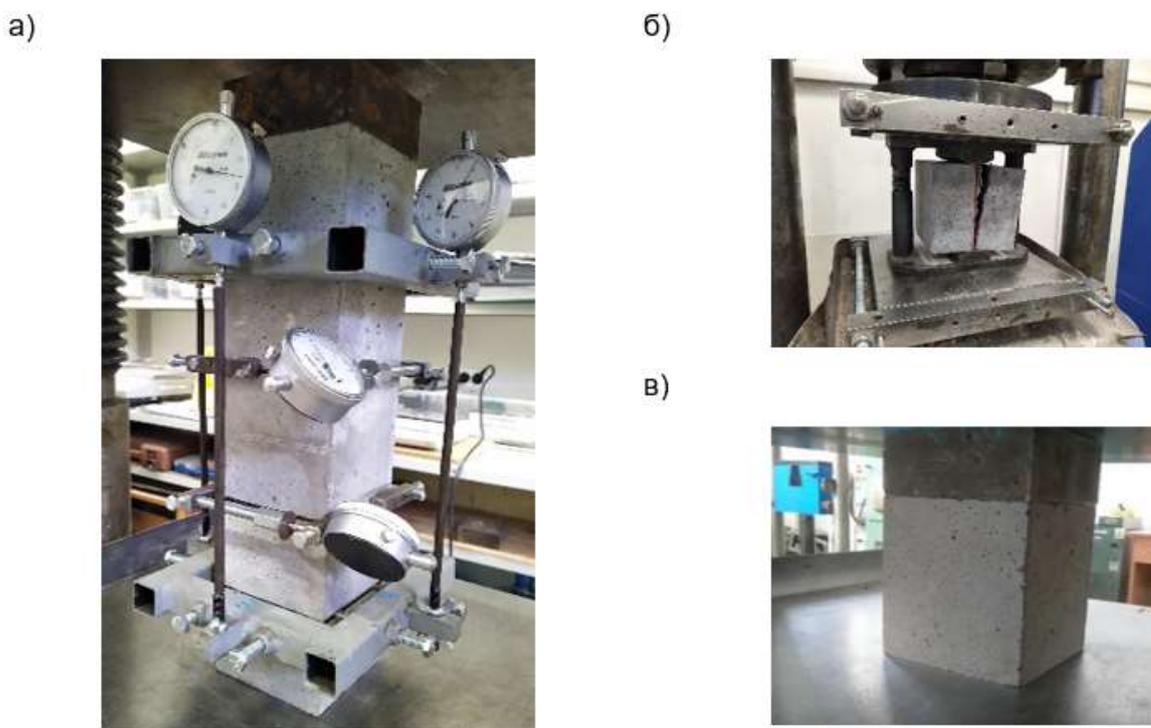


Рис. 1 Общий вид образцов при испытании призм на осевое сжатие (а), кубов на растяжение при раскалывании (б), кубов на осевое сжатие (в)

Температурно-усадочные деформации и ползучесть бетона исследовались на образцах-призмах размерами 100×100×400 по ГОСТ 24544–81. Нагрев бетонных призм осуществлялся с помощью специального нагревательного элемента, выполненного из трех слоев асбестовой ткани с размещением между ними электронагревательной спирали типа "зигзаг" из нихромовой проволоки (рис.2). Исследование ползучести бетона проводилось на специальных установках. (рис. 3).

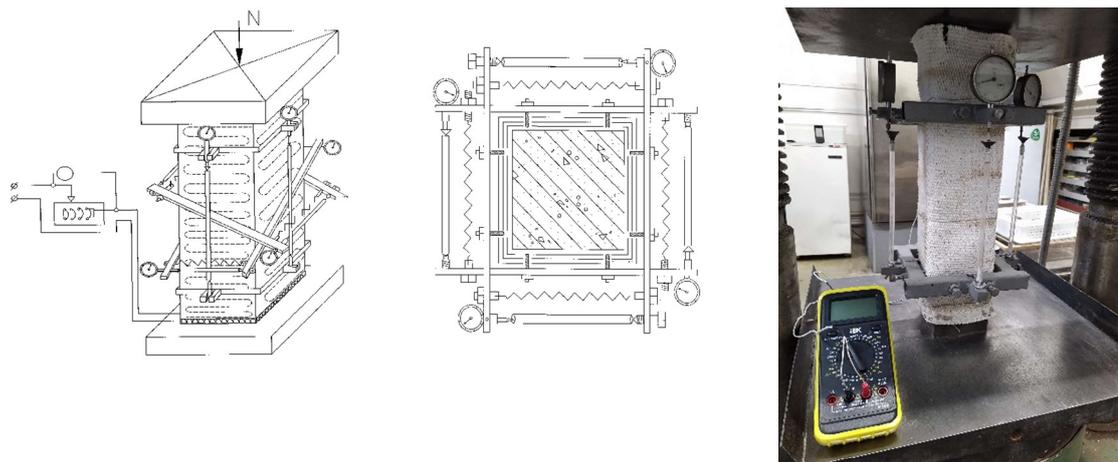


Рис. 2 Схема нагрева и измерения продольных и поперечных деформаций

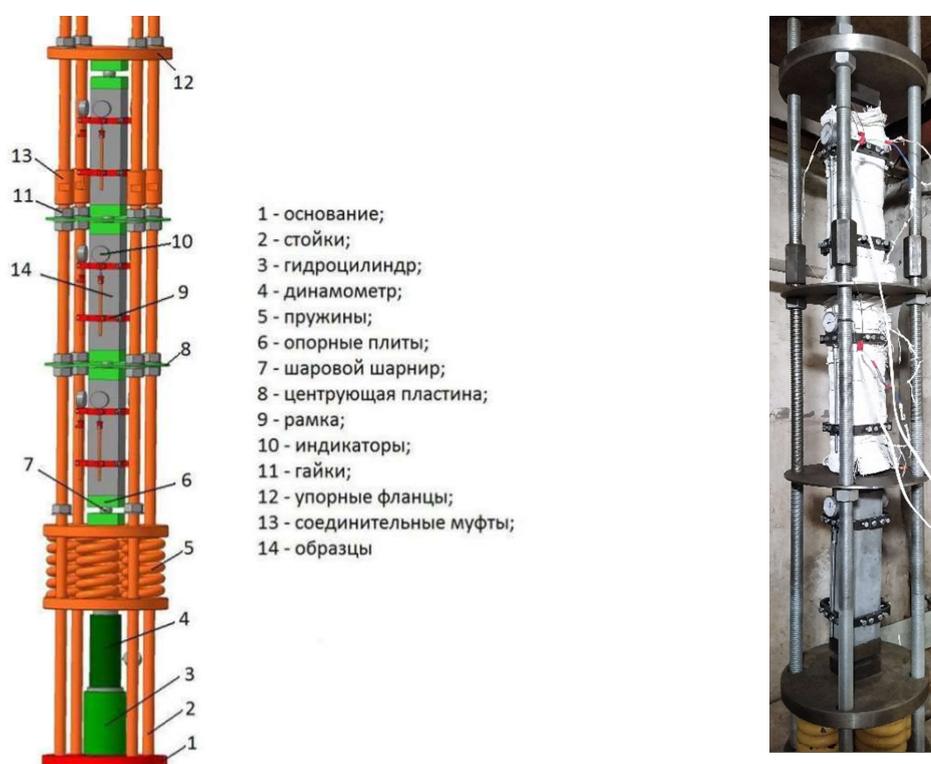


Рис. 3 Установка для испытаний на ползучесть при осевом сжатии

В третьем разделе представлены результаты экспериментальных исследований влияния кратковременного и длительного нагрева до 400°C на температурно-усадочные деформации, характеристики прочностных и деформационных свойств высокопрочного модифицированного бетона при осевом сжатии, предложения по учету влияния изученных факторов на характеристики реологических и механических свойств бетона.

Прочность на сжатие

Прочность на сжатие контрольных образцов из высокопрочного бетона естественной влажности в возрасте 28 суток составляла в среднем соответственно для кубов 82 МПа, призм – 60,5 МПа.

На рис. представлены графики изменения относительных величин остаточной прочности на сжатие высокопрочного бетона после воздействия повышенных и высоких температур в условиях свободного высыхания от температуры и продолжительности нагрева.

Увеличение остаточной прочности после нагрева высокопрочного бетона при температурах до 200°C, вероятно, было связано с упрочнением структуры бетона за счет преобразования геля С-S-H в более прочные кристаллические фазы. Можно сделать вывод, что температура 200°C является критической для данного состава высокопрочного бетона, т.е. преобладают деструктивные процессы на структурообразующими.

Уменьшение прочности при нагревании объясняется тем, что наряду с упрочнением структуры бетона наблюдаются деструктивные процессы, обусловленные разностью коэффициентов температурного расширения цементного камня и заполнителя, гелевой составляющей и непрореагировавших зерен цемента, цементного камня и воды. Очевидно, при температурах нагрева более 200°C этот фактор оказывает существенное влияние на структуру бетона, что объясняется снижением прочности на сжатие.

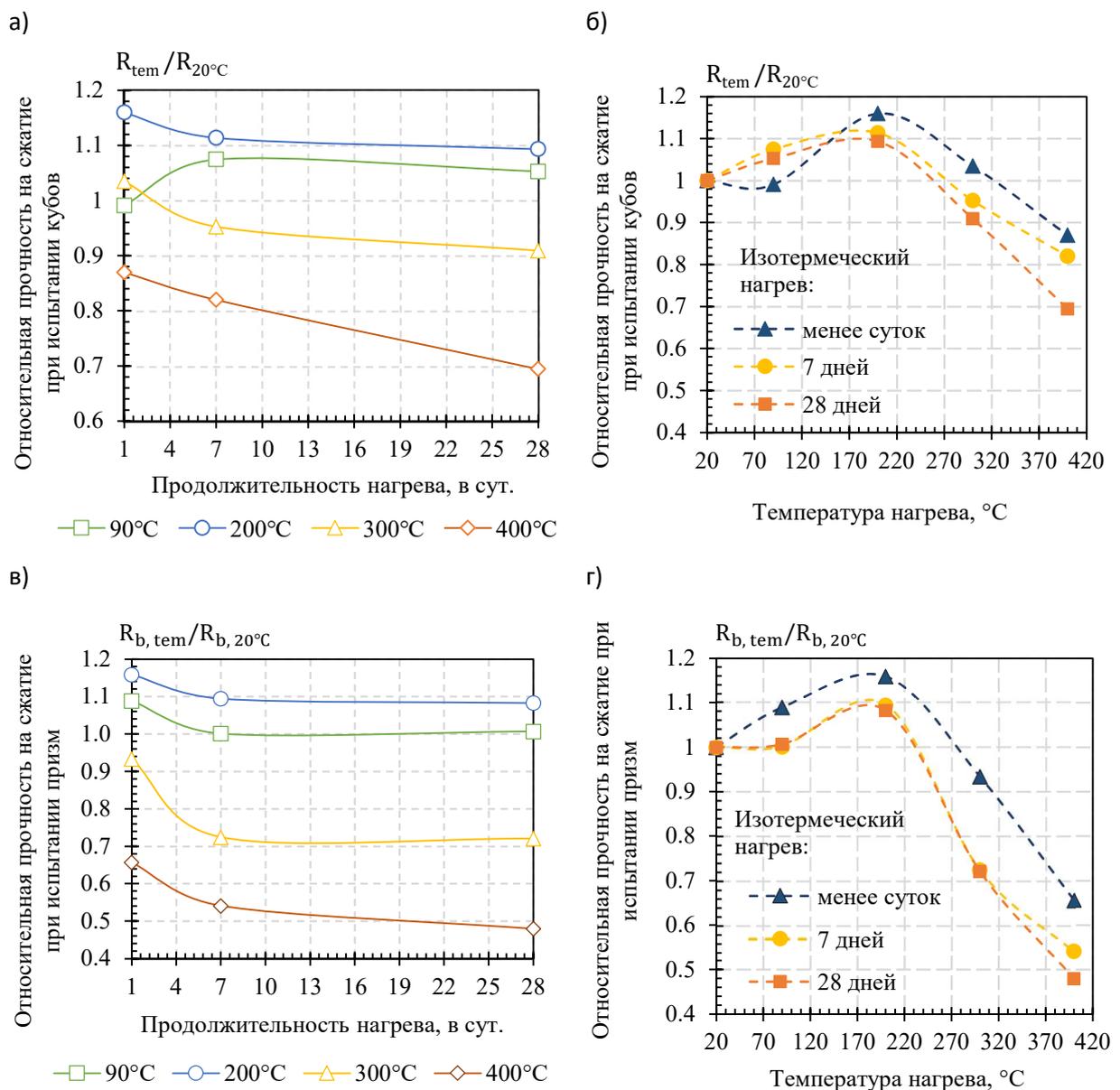


Рис. 4 – Зависимость остаточной прочности на сжатие высокопрочного бетона от продолжительности нагрева (а), (в) и температуры испытания (б), (г)

Кратковременный нагрев образцов призм при температурах 90 и 200°C вызвал увеличение остаточной прочности на сжатие на 10–15% по сравнению с прочностью контрольных образцов. При температурах нагрева 300 и 400°C остаточная прочность на сжатие образцов призм составляет 93% и 65% от прочности контрольных образцов (рис. г).

Длительный нагрев приводит к снижению остаточной прочности на сжатие при исследуемых диапазонах температур 200–400°C по сравнению с прочностью после кратковременного нагрева, что вызвано деструктивными процессами. Наибольшее значение остаточной прочности наблюдалось у образцов после длительного нагрева при температуре 200°C и составило в среднем 110% от прочности контрольного образца. С увеличением длительности нагрева при 90°C возрастает прочность на сжатие образцов кубов за счет уменьшения влажностных градиентов и дополнительной гидратации минералов цемента, а также перехода связей между минералами цементного камня из вторичных (ван-дер-ваальсовы силы) в первичные (силы химического взаимодействия) из-за удаления абсорбированной влаги.

Некоторое отличие в изменении прочности на сжатие образцов кубов и призм, можно объяснить влиянием масштабного фактора на процессы массопереноса влаги. Например, потери в весе образцов кубов при кратковременном нагреве до 90°C составили в среднем около 0,6% от первоначальной массы, для призм около 0,4%. Это говорит о том, что образцы кубы высыхали быстрее, чем призмы. Возможно, более длительное высыхание при 90°C призм сказалось на процессах дополнительной гидратации минералов цемента и приросту прочности на сжатие, а при дальнейшем нагреве привело к большому влажностным градиентом и снижению прочности на сжатие.

Прочность на растяжение при испытании кубов на раскалывание

Прочность на растяжение при раскалывании контрольных образцов из высокопрочного бетона естественной влажности в возрасте 28 суток составляла в среднем 3,7 МПа.

Прочность на растяжение при раскалывании высокопрочного бетона уменьшалась с увеличением длительности выдержки и с повышением температуры нагрева (см. рис.). Тенденции изменения прочности на растяжение при раскалывании аналогичны зависимостям, полученных при испытании на сжатие.

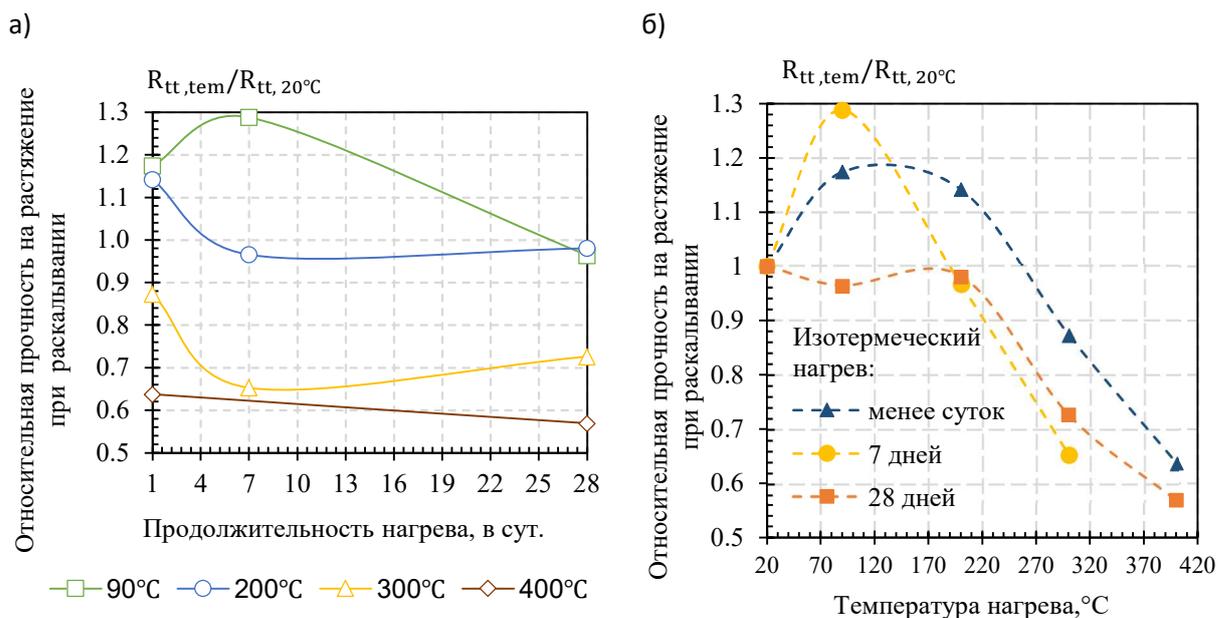


Рис. 5. Зависимость остаточной прочности на растяжение при раскалывании высокопрочного бетона от продолжительности (а) и температуры (б) нагрева

Кратковременный нагрев при 90°C повысил прочность на растяжение при раскалывании на 17% в сравнение с контрольным образцом. Автор пишет, что бетон на цементе, содержащего минеральную добавку (трепел и гранулированный доменный шлак), при непродолжительном нагреве (24 часа) имел прирост прочности на растяжение около 11%, в отличие от состава на чистом портландцементе (снижение на 20% от первоначальной прочности).

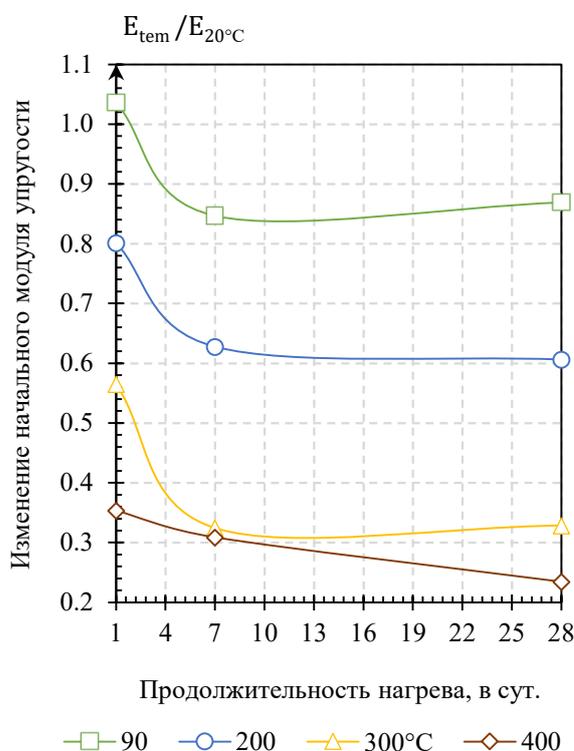
Дальнейшее увеличение прочности при температуре нагрева 90°C связано с процессами упрочнения структуры бетона и уменьшения влажностных градиентов по толщине образцов. После 7 суток прочность на растяжение снижается и составляет 96% от первоначальной, снижение прочности происходит, вероятно, за счет высушивания бетона и начала развития деструктивных процессов (из-за разницы температурных деформаций составляющих бетона).

Начальный модуль упругости и коэффициент Пуассона

Среднее значение начального модуля упругости высокопрочного бетона естественной влажности в возрасте 28 суток для контрольных образцов составило 34,5 ГПа, а для коэффициента Пуассона 0,2.

Увеличение температуры и продолжительности нагрева высокопрочного бетона при исследуемых температурах приводит к снижению начального модуля упругости и коэффициента Пуассона (рис. и рис.). Наибольшее снижение начального модуля упругости наблюдалось в течение 7 суток: при 90°C – на 15%, при 200°C – на 37%, при 300 и 400 °C – на 70%. Дальнейшее увеличение продолжительности нагрева существенно не изменило его значений при исследуемых температурах.

а)



б)

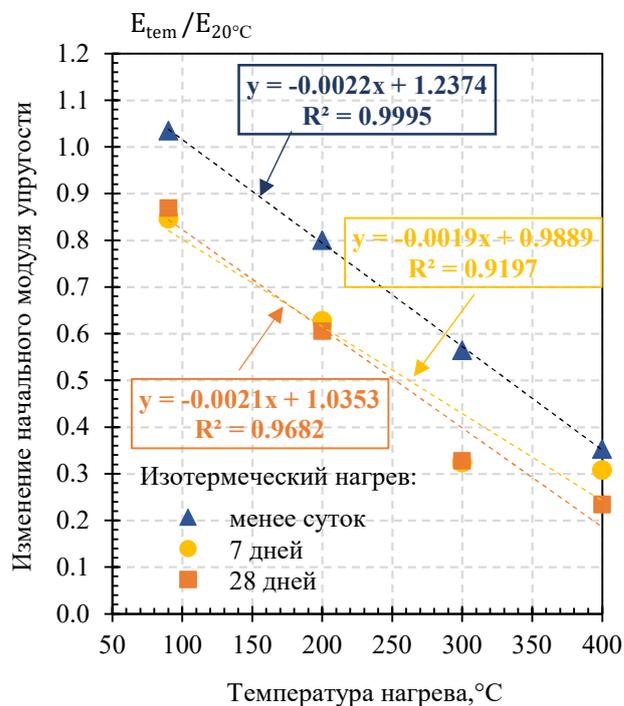


Рис. 6 – Изменение относительной величины начального модуля упругости в зависимости от продолжительности нагрева (а) и температуры нагрева (б)

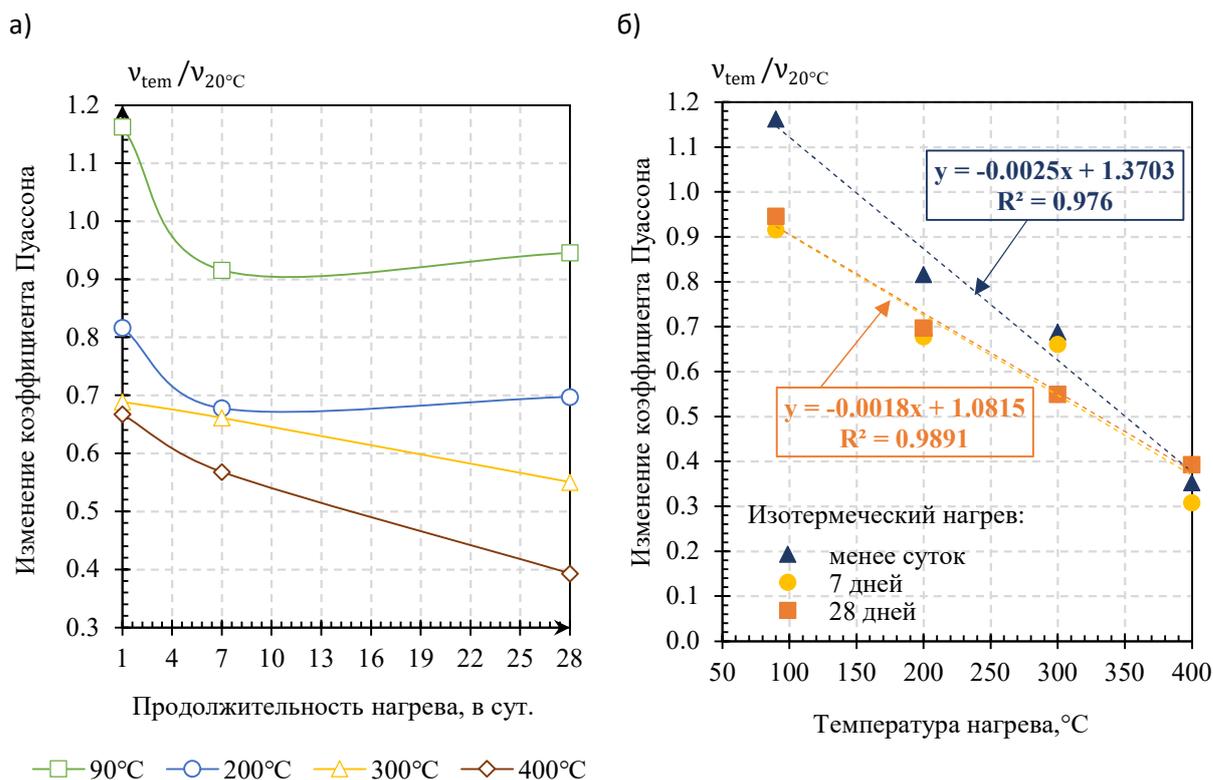


Рис. 7 – Изменение относительной величины коэффициента Пуассона в зависимости от продолжительности нагрева (а) и температуры нагрева (б)

Изменение значений коэффициента Пуассона высокопрочного бетона с увеличением длительности нагрева имеет схожую тенденцию, что и для начального модуля упругости. Нагрев в течение 28 дней привел к снижению коэффициента Пуассона высокопрочного на 5% при 90°C, на 30% при 200°C, на 45% при 300°C, на 60% при 400°C.

На основании опытных данных, полученных в исследовании, можно сказать, что зависимость начального модуля упругости и коэффициента Пуассона от температуры нагрева в интервале 90-400°C имеет линейный характер. Важно отметить, что тенденции к снижению относительного начального модуля упругости с повышением температуры как для обычного бетона, так и для высокопрочного бетона, содержащего минеральные добавки, близки.

Относительные деформации при пиковой нагрузке

Предельные значения (при пиковой нагрузке) полных продольных и поперечных деформации при испытании на осевое сжатие контрольных образцов из высокопрочного бетона в возрасте 28 суток соответственно составили в среднем $242,9 \cdot 10^{-5}$ и $91,2 \cdot 10^{-5}$.

На рис. и рис. представлены графики изменения значений относительных продольных и поперечных деформаций при пиковой нагрузке в зависимости от температуры и длительности нагрева. Анализируя графики, можно сказать следующие, что с увеличением температуры и продолжительности нагрева значения относительных деформаций при пиковой нагрузке возрастали. При этом зависимость относительных деформаций от температуры нагрева имеет линейный характер.

Средние значения относительных продольных деформаций при пиковой нагрузке высокопрочного бетона после кратковременного нагрева (менее суток) увеличились соответственно на 13–14% при температурах 200 и 300°C, на 50% при 400°C по сравнению с значениями контрольных образцов, которые не подвергались нагреву. Аналогично

относительные поперечные деформации увеличились на 40% при 200°C, на 74% при 300°C, а при 400°C увеличились более чем в три раза.

Длительный нагрев высокопрочного бетона при температурах 200-400°C привел к большому увеличению значений относительных деформаций. После нагрева в течение 28 дней относительная продольная деформация высокопрочного бетона увеличилась на 31% при 200°C, на 49 и 60% соответственно при температурах нагрева 300 и 400°C. Относительные поперечные деформации увеличились в 1,9 раза при 200°C, в 2,9 и 3,7 раза соответственно при 300 и 400°C.

При нагреве высокопрочного бетона при температуре 90°C значения относительных продольных и поперечных деформаций при пиковой нагрузке существенно не изменились по сравнению значениями контрольных образцов.

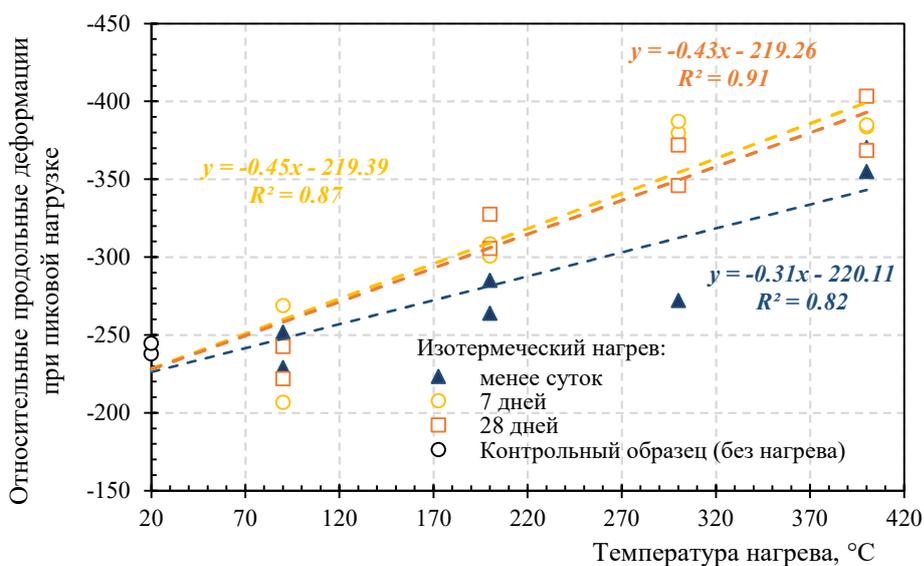


Рис. 8. Изменение относительных продольных деформаций при пиковой нагрузке от температуры и продолжительности нагрева

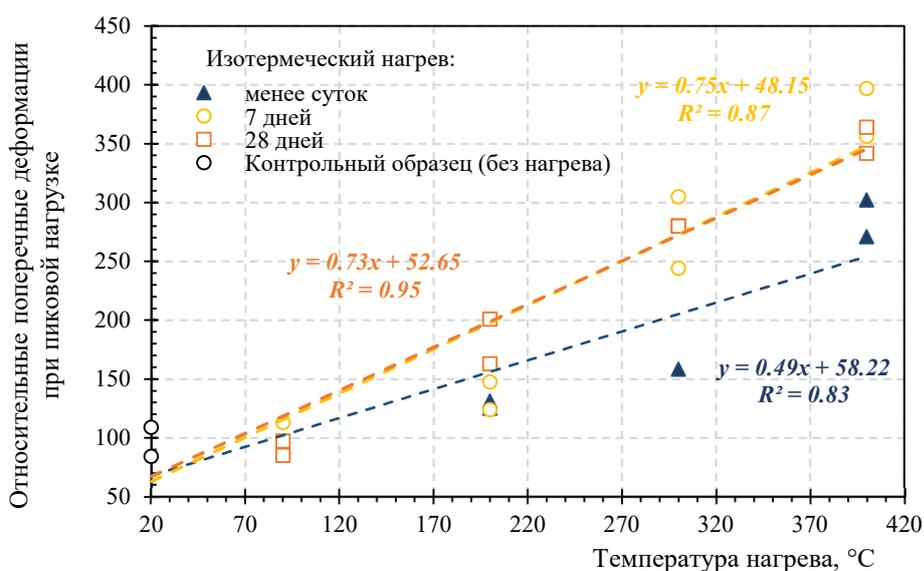


Рис. 9. Изменение относительных поперечных деформаций при пиковой нагрузке от температуры и продолжительности нагрева

Упругие и пластические относительные деформации

На рис. – 12 представлены графики изменения упругих и пластических относительных деформаций высокопрочного бетона после кратковременного и длительного нагрева до относительного уровня напряжений 0,9 от значения пиковой нагрузки, полученной при испытании образцов.

Кратковременный нагрева при 90°C увеличил значения упругих относительных продольных и поперечных деформации, при этом пластические относительные деформации практически не изменились либо незначительно уменьшились. Длительный нагрев при 90°C не оказал существенного влияния на дальнейшие изменение относительных деформаций высокопрочного бетона. Снижение пластических деформаций при температуре нагрева 90°C можно объяснить уменьшением вязкости геля С-S-H цементного камня из-за испарения влаги.

Кратковременный нагрев при температуре 300°C увеличил в значительной степени упругие относительные деформации: продольные на 28% и поперечные в 3 раза. Дальнейший нагрев в течение 7 суток приводит к существенному увеличению пластических относительных деформаций по сравнению с кратковременным нагревом, ввиду развития дефектов в структуре бетона.

Длительный нагрев в течение 28 дней высокопрочного бетона при температурах от 200 до 400°C привел к увеличению упругих относительных продольных деформаций на 44–62%. Пластические относительные продольные деформации изменялись в больше диапазоне: при 200°C увеличение составило 28%, а при 300 и 400°C пластические деформации возросли в 2 и 2,4 раза соответственно.

Экспериментальные данные об относительных упругих и пластических деформациях высокопрочного бетона свидетельствуют, что с повышением температуры и продолжительности нагрева доля упругих деформаций от полных уменьшается, а пластических увеличивается в результате развивающейся дефектности структуры бетона (см. рис.13).

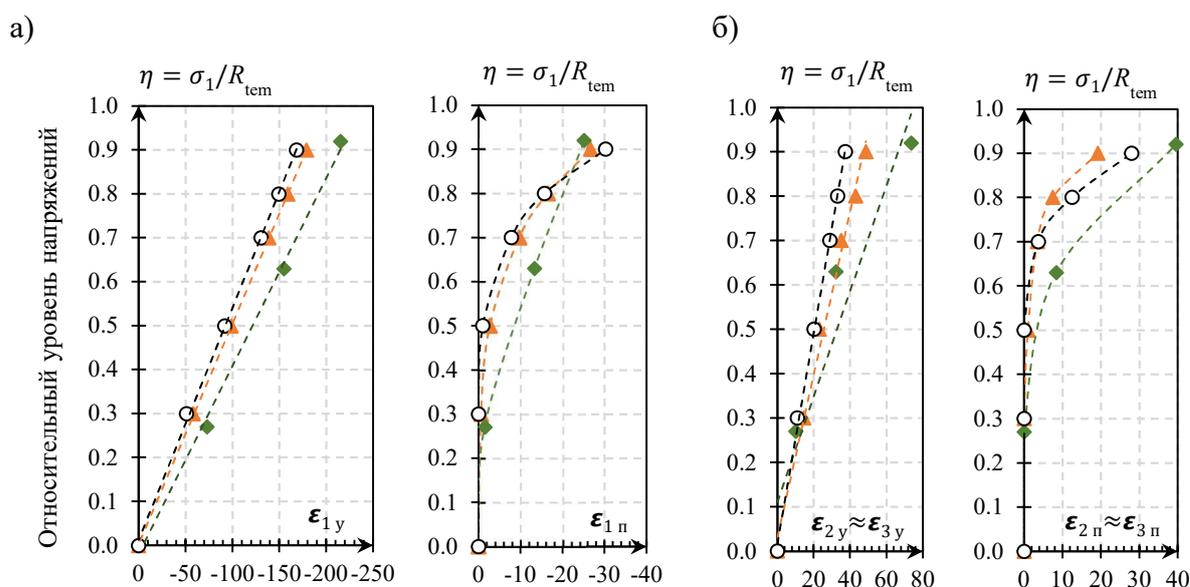


Рис. 10. Упругие и пластические относительные деформации бетона при кратковременном нагреве (менее суток): а – продольные; б – поперечные

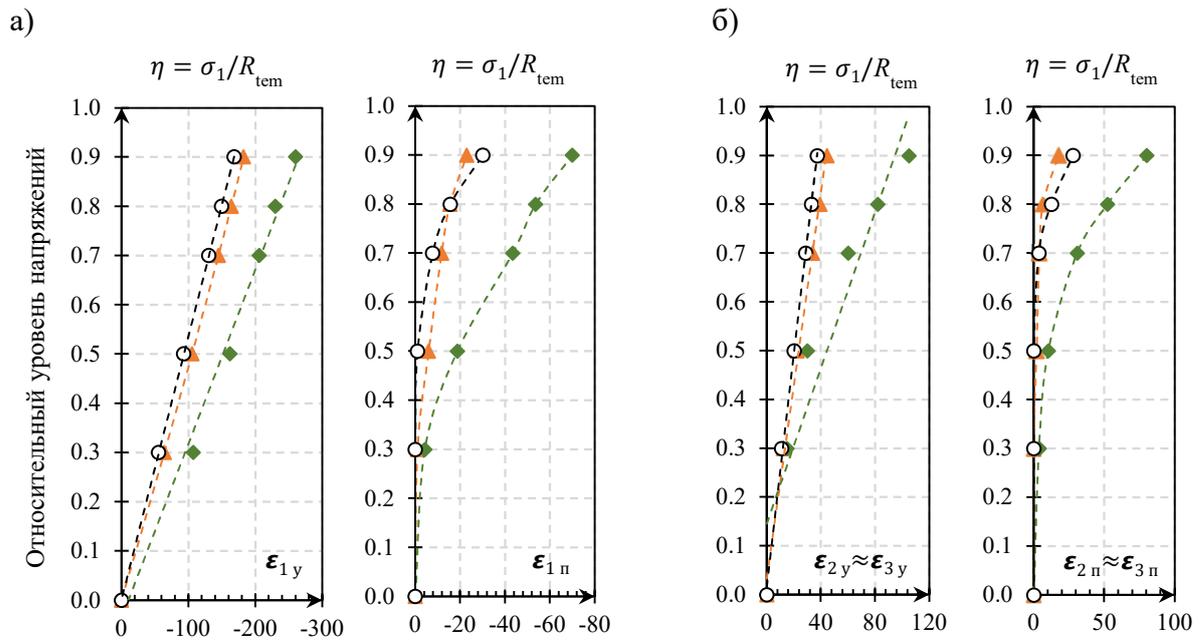


Рис. 11. Упругие и пластические относительные деформации бетона при изотермическом нагреве в течение 7 дней: а – продольные; б – поперечные

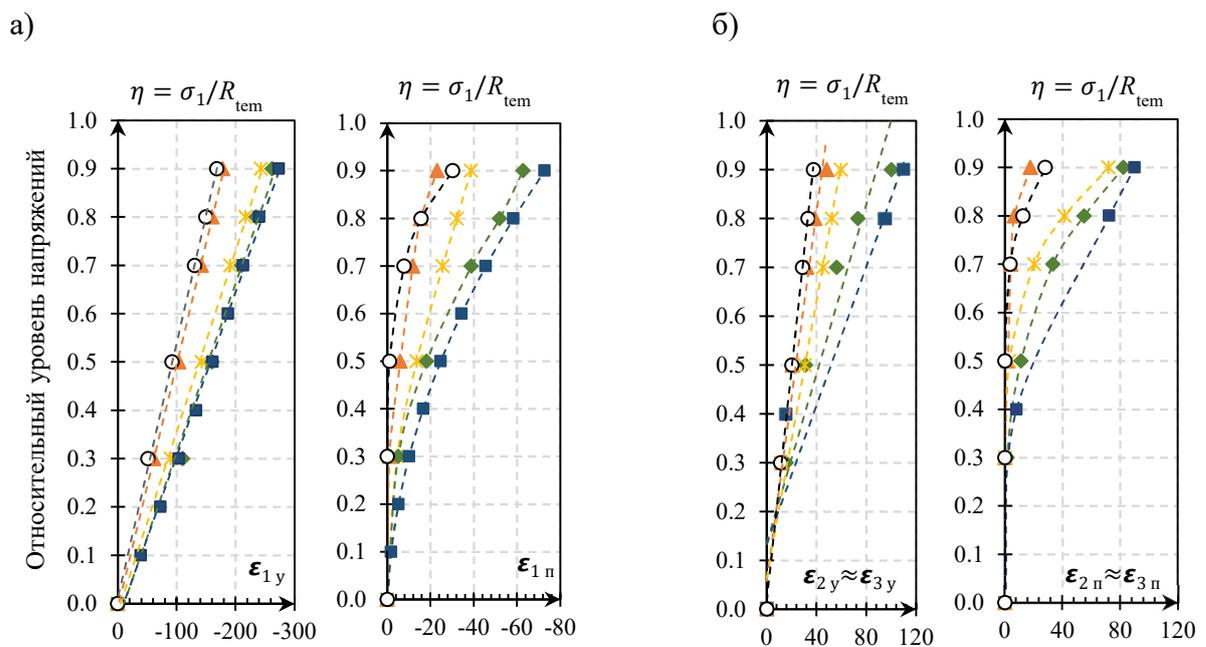


Рис. 12. Упругие и пластические относительные деформации бетона при изотермическом нагреве в течение 28 дней: а – продольные; б – поперечные

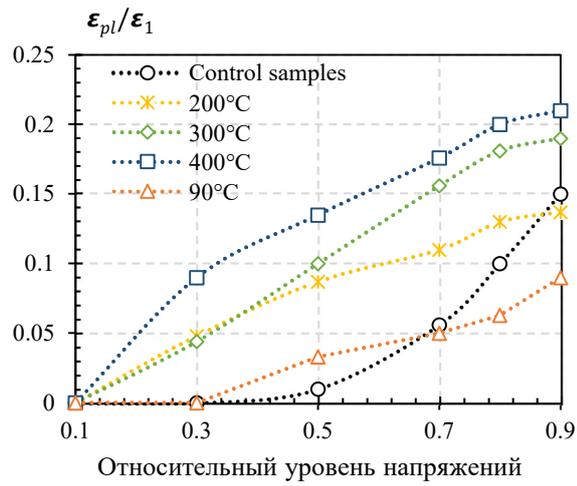


Рис. 13 Кривые изменения доли пластических относительных продольных деформаций от полных после нагрева высокопрочного бетона до 400°C в течение 28 дней

3.1.1. Диаграммы деформирования

Диаграммы деформирования высокопрочного бетона при сжатии в условиях воздействия нормальной и повышенных температур представлены на рис.

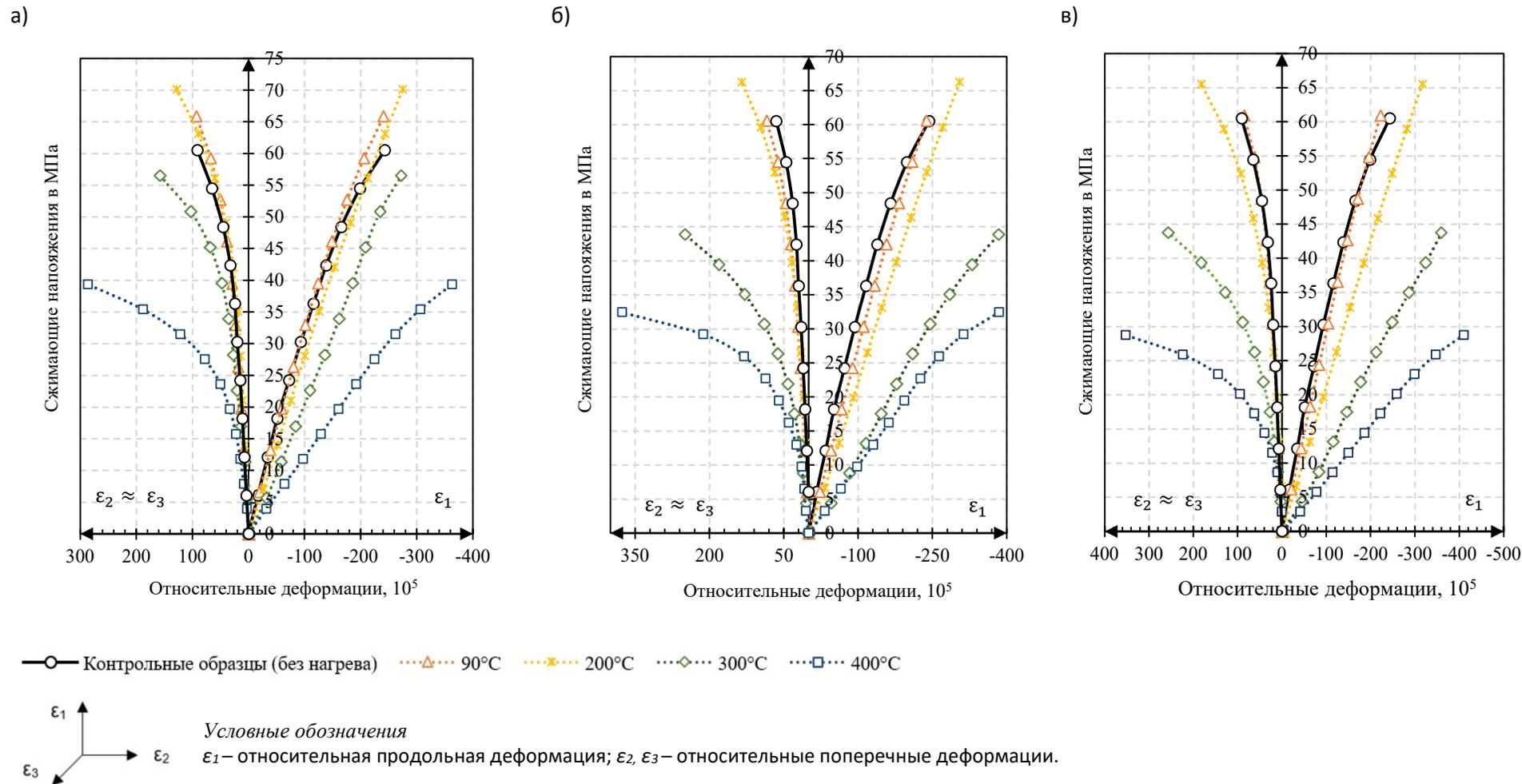
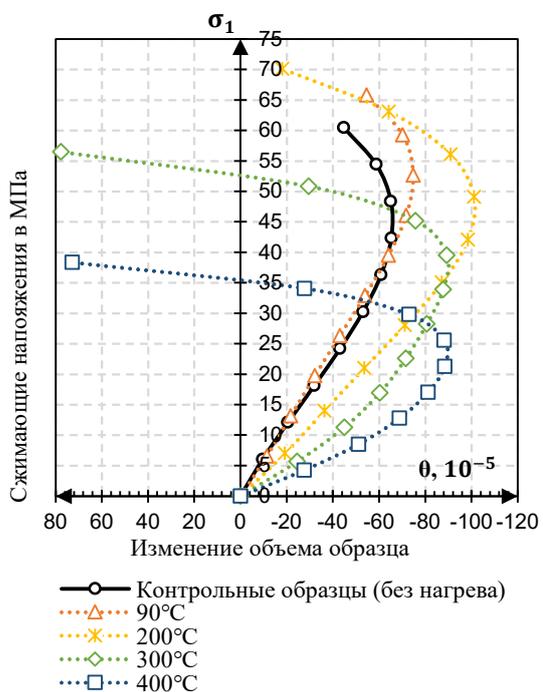


Рис. 14 – Диаграммы деформирования высокопрочного бетона при осевом сжатии после кратковременного (а), длительного в течение 7 дней (б), длительного в течение 28 дней нагрева (в)

Параметры микротрещинообразования

а)



б)

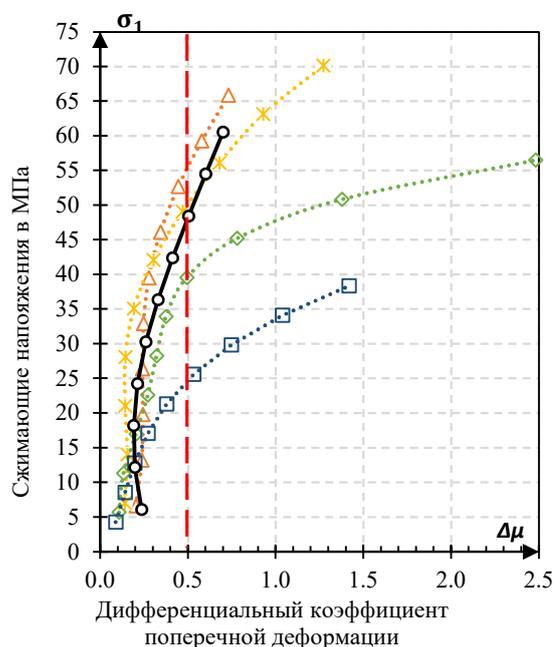
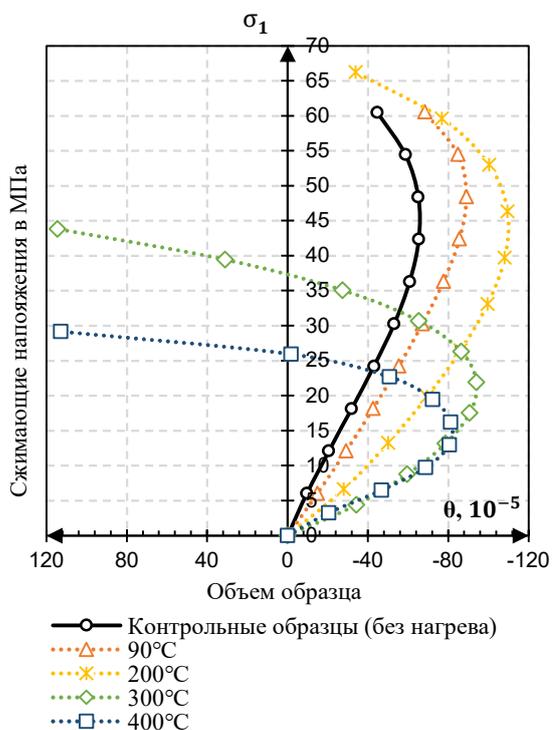


Рис. 15 Изменение объема образца (а), дифференциального коэффициента поперечной деформации (б) при нагружении осевым сжатием после кратковременного нагрева (менее суток)

а)



б)

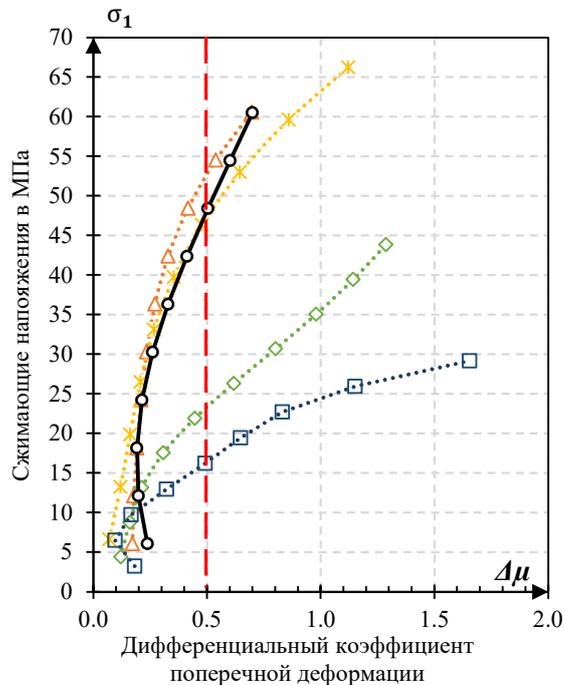
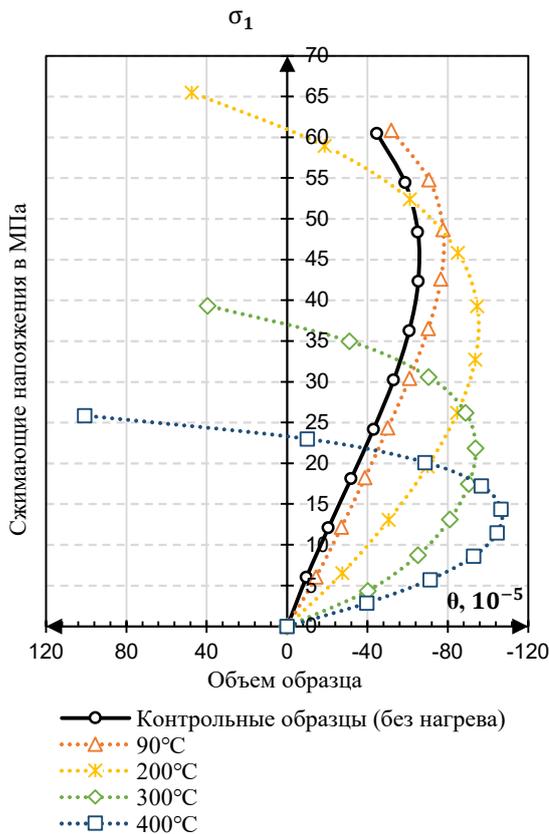


Рис. 16. Изменение объема образца (а), дифференциального коэффициента поперечной деформации (б) при нагружении осевым сжатием после нагрева в течение 7 дней

а)



б)

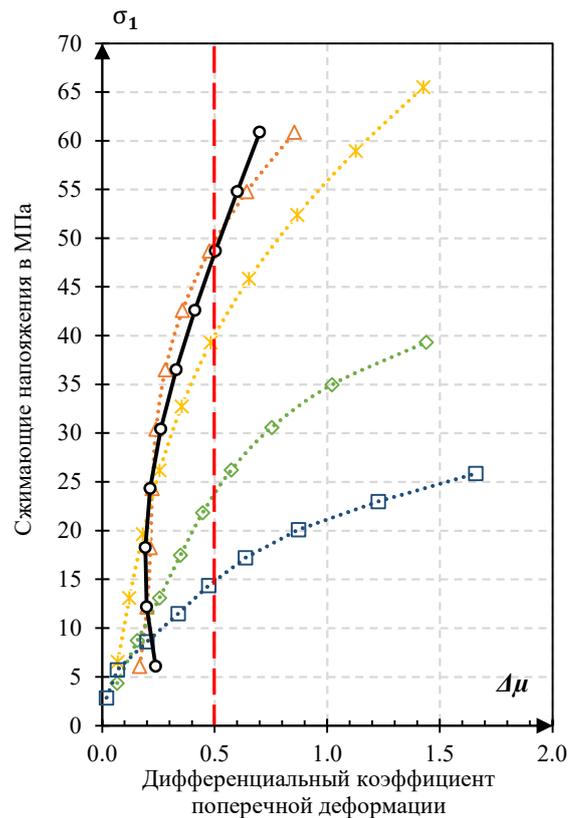


Рис. 17 Изменение объема образца (а), дифференциального коэффициента поперечной деформации (б) при нагружении осевым сжатием после нагрева в течение 28 дней

В четвертом разделе представлен уточненный инженерный метод расчета температурно-усадочных деформаций высыхающего высокопрочного бетона в условиях нагрева до 200°C. Сопоставление расчетных температурных деформаций бетона, определенных по формулам (1)-(8), с опытными значениями свидетельствуют об их удовлетворительной сходимости (рис. 13).

Построение методики расчета температурно-усадочных деформаций

В исследованиях (Кричевский А. П., 1984) для конструкций средней массивности с модулем открытой поверхности M_0 от 40 до 10 м⁻¹ предложена методика аналитического описания температурно-усадочных деформаций обычного тяжелого бетона средней прочности при повышенных температурах для произвольного момента времени от начала нагрева. Важным достоинством методики является зависимость основных расчетных характеристик только от двух параметров – температуры и продолжительности нагрева бетона. Методика (Кричевский А. П., 1984) принята в качестве исходной при разработке аналитических выражений для описания температурно-усадочных деформаций высокопрочных модифицированных бетонов с гораздо более низкими значениями водоцементного отношения при их изготовлении ($B/C \approx 0,25 \div 0,27$).

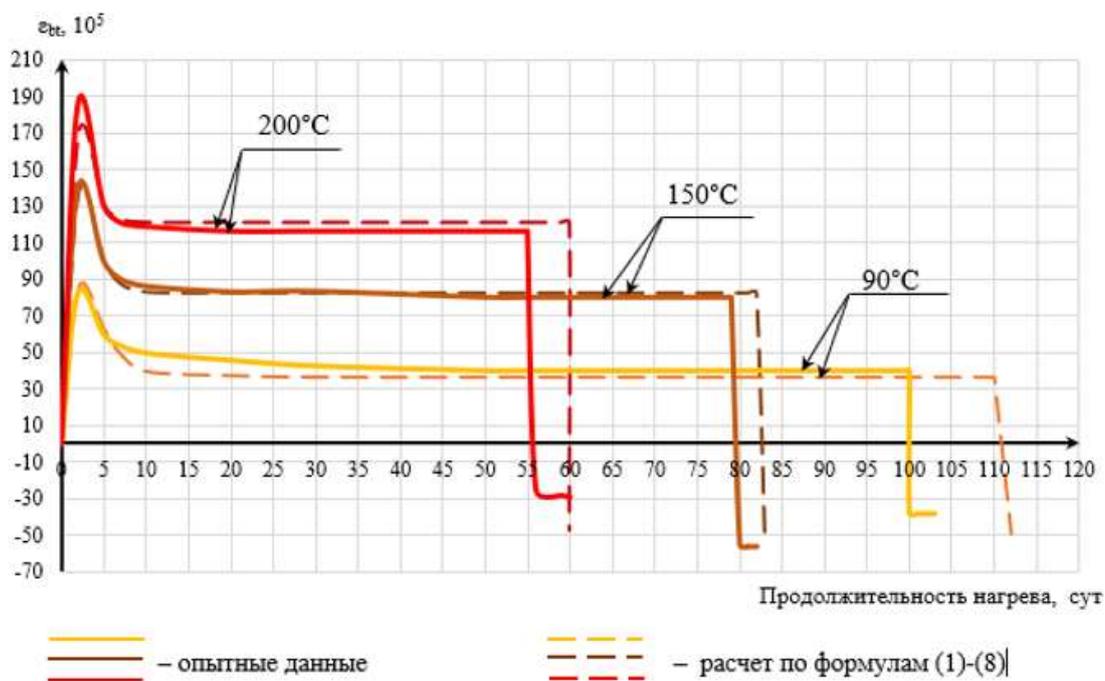


Рис 18. Температурные деформации высокопрочного бетона в условиях нагрева до 200°C

Общая формула расчет температурно-усадочных деформаций высокопрочного бетона принята в виде:

$$\varepsilon_{bt}(t^{\circ}, T) = (\alpha_{tt}(t^{\circ}) + \Delta\alpha_{tt}(t^{\circ}, T)) \cdot \Delta t^{\circ} - \varepsilon_{cs}(t^{\circ}, T) = \alpha_{bt}(t^{\circ}, T) \Delta t^{\circ} \quad (1)$$

$$\Delta t^{\circ} = t^{\circ} - t_0, \quad (2)$$

где $\alpha_{tt}(t^{\circ})$ - коэффициент линейного температурного расширения бетона после длительного нагрева при температуре t° .

$\Delta\alpha_{tt}(t^{\circ}, T)$ - приращение значения коэффициента линейного температурного расширения бетона при влажности, превышающую равновесную со средой.

$\alpha_{bt}(t^{\circ}, T)$ - коэффициент полных температурных деформаций бетона;

t° и t_0 - значения расчетной температуры нагрева и исходной нормальной температуры. При этом должно соблюдаться условие $t^{\circ} > t_0$.

$\varepsilon_{cs}(t^{\circ}, T)$ - деформации усадки бетона к моменту времени T при температуре нагрева t° .

Полные обратимые температурные деформации ε_{tt}^0 определяются через сумму коэффициентов α_{tt}^0 и $\Delta\alpha_{tt}^0$. Коэффициент α_{tt}^0 характеризует линейную обратимую деформацию бетона, имеющего равновесную влажность с окружающей средой при повышенной температуре.

Значения коэффициента α_{tt}^0 возрастают с температурой нагрева и незначительно зависят от модуля открытой поверхности M_o испытанного образца. Коэффициент $\Delta\alpha_{tt}^0(t, T)$ характеризует приращение линейной обратимой деформации бетона, влажность которого превышает равновесную при повышенной температуре.

Деформации усадки ε_{cs} в основном обусловлены интенсивным удалением адсорбционно связанной.

Для описания величин, входящих в формулу (Кричевский А. П., 1984), предложены следующие аппроксимирующие выражения:

$$\alpha_{tt}(t^\circ) = [10 - 0,00001 \cdot \Delta t^\circ{}^2] \cdot 10^{-6} \quad (3)$$

Выражения для функции $\Delta\alpha_{tt}(t^\circ, T)$ и для деформаций температурной усадки $\varepsilon_{cs}(t^\circ, T)$ построены путем модификации аналогичных выражений в методике А.П. Кричевского (Кричевский 1984):

$$\Delta\alpha_{tt}(t^\circ, T) = [(4,9 - 0,02\Delta t^\circ) \cdot e^{-0,0016 \cdot T \cdot \Delta t^\circ}] \cdot 10^{-6} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{cs}(t^\circ, T) = \varepsilon_{cs}(t^\circ, T \rightarrow \infty) \cdot (1 - e^{-c}) \cdot (1 - e^{-0,29 \cdot \Delta t^\circ \cdot T \cdot 10^{-2}}) \quad (5)$$

где коэффициент $c = 0,005 \cdot \Delta t^\circ - 6,15$;

$\varepsilon_{cs}(t^\circ, T \rightarrow \infty)$ - предельное значение относительной деформации усадки бетона при температуре t° :

$$\varepsilon_{cs}(t^\circ, T \rightarrow \infty) = [4 \cdot \Delta t^\circ{}^{0,5}] \cdot 10^{-5}, \quad (5)$$

Обратимые деформации температурного расширения бетона при нагреве к моменту времени T определяются по выражению:

$$\varepsilon_{tt}(t^\circ, T) = [\alpha_{tt}(t^\circ) + \Delta\alpha_{tt}(t^\circ, T)] \cdot \Delta t^\circ \quad (6)$$

Деформации бетона после остывания:

$$\varepsilon_{bt}^{\text{ост}}(t^\circ, T) = \varepsilon_{bt}(t^\circ, T) - \varepsilon_{tt}(t^\circ, T) \quad (7)$$

Построение диаграмм деформирования бетона в условиях нагрева с учетом длительности нагружения (метод диаграмм-изохрон)

Графическая связь напряжения-деформации для диаграммы-изохроны представляет собой кривую деформирования, все точки которой получены за одинаковый промежуток времени натекания деформаций от момента нагружения до рассматриваемого момента времени. Последовательно изменяя время, можно получить веер кривых изохрон.

Деформация бетона в способе изохрон после приложения температуры вычисляется по формуле

$$\varepsilon_{cs}({}^\circ t) = \frac{\sigma_b({}^\circ t)}{{}^\circ E_b \cdot \nu_b(t^*, \tau^*)}, \quad (9)$$

где $\sigma_b({}^\circ t)$ – напряжения в момент времени ${}^\circ t$;

${}^\circ t$ – рассматриваемое время в условиях действия температуры.

${}^\circ E_b$ – модуль деформаций, определяется по формуле:

$${}^\circ E_b = E_b({}^\circ t_0) \cdot \beta_b$$

здесь β_b – коэффициент изменения модуля $E_b({}^\circ t_0)$ в зависимости от температуры нагрева

бетона; ${}^{\circ}t_0$ – возраст бетона к началу нагрева;

$\nu_b(t^*, \tau^*)$ – коэффициент изменения секущего модуля в диаграмме-изохроне (находиться в пределах от 0 до 1), определяется по формуле:

$$\nu_b(t^*, \tau^*) = \widehat{\nu}_b(t^*, \tau^*) + (\nu_0(t^*, \tau^*) - \widehat{\nu}_b(t^*, \tau^*)) \cdot \sqrt{1 - \omega_1 \cdot {}^{\circ}\eta - \omega_2 \cdot {}^{\circ}\eta^2}, \quad (10)$$

здесь $\widehat{\nu}_b(t^*, \tau^*)$ и $\nu_0(t^*, \tau^*)$ значение коэффициента изменения секущего модуля в вершине и в начале диаграммы; ${}^{\circ}\eta$ – уровень напряжений ($0 \leq {}^{\circ}\eta \leq 1$); ω_1, ω_2 – параметры кривизны диаграммы.

Параметры $\widehat{\nu}_b(t^*, \tau^*)$ и $\nu_0(t^*, \tau^*)$ вычисляются по формулам:

$$\nu_0(t^*, \tau^*) = \frac{1}{1 + \beta \cdot \varphi(t^*, \tau^*)}, \quad (11)$$

где β – учитывает влияние режима нагружения, для жесткого режима $\beta = 1$.

$$\widehat{\nu}_b(t^*, \tau^*) = \frac{{}^{\circ}\widehat{\nu}_b}{1 + {}^{\circ}\widehat{\nu}_b \cdot \beta \cdot \widehat{f}_{ct} \cdot \varphi(t^*, \tau^*)}. \quad (12)$$

Следуя предложениям Кричевского А.П. (Кричевский 1984), можно записать

$$\varphi(t^*, \tau^*) = C(t^*, \tau^*) \cdot {}^{\circ}E_b \quad (13)$$

$C(t^*, \tau^*)$ - мера ползучести в условиях действия повышенной температуры.

$$C(t^*, \tau^*) = C_{t^0}(t^*, \tau^*) - \Delta C(t^*, t_0) \quad (14)$$

В формуле (14) $C_{t^0}(t^*, \tau^*)$ - линейная мера ползучести при одноступенчатом режиме нагрева (повышение температуры до некоторого величины плюс длительная выдержка при постоянной температуре – изотермический режим нагрева).

$$C_{t^0}(t^*, \tau^*) = C_{t^0}(t^* \rightarrow \infty, \tau^* = 0) \cdot \Omega_{t^0}(\tau^*) \cdot f_{t^0}(t^* - \tau^*), \quad (14)$$

где $C_{t^0}(t^* \rightarrow \infty, \tau^* = 0)$ – предельное значение меры ползучести бетона при изотермическом нагреве

$$C_{t^0}(t^* \rightarrow \infty, \tau^* = 0) = \left[12,7 + D \cdot (\widetilde{t}^0 - 1) - 9,3 \cdot e^{-0,2 \cdot (\widetilde{t}^0 - 1)} \right] \cdot 10^5, \quad (15)$$

здесь $D = 50 / (M_0^2 + 50)$ – для высыхающего бетона (M_0 – модуль открытой поверхности); $D = 3$ – для невысыхающего (гидроизолированного) бетона; $\widetilde{t}^0 = t^0 / 20^\circ\text{C}$; t^0 – полная температура нагрева.

Функция температурного старения $\Omega_{t^0}(\tau^*)$, которая для высыхающего бетона

определяется по формуле

$$\Omega_{t^0}(\tau^*) = a + (1 - a) \cdot e^{-(0,08+0,012 \cdot \tilde{t}^0) \cdot \tau^*}, \quad (16)$$

здесь $a = 0,07 + 0,02 \cdot \tilde{t}^0$.

Функция $f_{t^0}(t^* - \tau^*)$ учитывает развитие деформаций ползучести во времени, определяется по формуле

$$f_{t^0}(t^* - \tau^*) = [1 - \beta(t^0) \cdot e^{-0,05(t^* - \tau^*)}] \cdot [1 - e^{-2(t^* - \tau^*)}], \quad (17)$$

здесь $\beta(t^0)$ – коэффициент, характеризующий быстроснатекающую деформацию ползучести во времени, определяется по выражению

$$\beta(t^0) = 0,85 \cdot [1 - 0,054(\tilde{t}^0 - 1)]$$

Определение удельных деформаций ползучести, предшествующих нагреву бетона (если напряжения прикладываются до нагрева), рекомендуется определять по формуле

$$\Delta C(t^*, t_0) = C(^{\circ}t_0, t_0) \cdot \left[1 - f_{t^{\circ}}(t^*, \tau^* = 0) \cdot e^{-0,72(\tilde{t}^0 - 1)^2} \right], \quad (18)$$

где $C(^{\circ}t_0, t_0)$ – удельные деформации линейной ползучести, натекающей к $^{\circ}t_0$ в условиях нормальной температуры.

Максимальное значение функции нелинейности

$$\widehat{f}_{ct} = 1 + \frac{(k \cdot v_c + k_{t^{\circ}})}{\sqrt{f_{t^{\circ}}(t^*, \tau^*)}}, \quad (19)$$

где $k_{t^{\circ}} = 0,26(\tilde{t}^0 - 1) \cdot \eta^{[(5-0,07 \cdot R_b)+0,02(\tilde{t}^0-1)]}$

здесь η – уровень напряжений для нормальной температуры; $k = 0,65$ – для жесткого режима нагружения.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Длительный нагрев высокопрочного бетона при температурах 90 и 200°C вызвал увеличение остаточной прочности на сжатие в среднем на 5 и 10% соответственно. Прочность на сжатие после длительного нагрева при 300 и 400°C снизилась и составляла соответственно 90 и 70% от первоначальных значений. Следовательно, можно сказать, что структурообразующие процессы преобладали над деструктивными до температуры нагрева 200°C.
2. Длительный нагрев до 200°C не привел к существенным изменениям прочности на растяжение при раскалывании, однако при температурах нагрева 300 и 400°C снижение составило около 30 и 70% соответственно.
3. Увеличение температуры и продолжительности нагрева высокопрочного бетона приводит к снижению начального модуля упругости и коэффициента Пуассона. При этом

зависимость характеристик от величины температуры нагрева имеет линейный характер. Наибольшее снижение начального модуля упругости происходит после нагрева в течение 7 суток для всех исследуемых температур. Это связано с полным высушиванием цементного камня.

4. Нагрев высокопрочного бетона при температурах 200-400°C увеличил относительные предельные продольные деформации в 1.25–1.69 раза, а относительные предельные поперечные деформации в 2–3.87 раза. Нагрев при 90°C не оказал существенных изменений на предельные значения относительных деформаций.

5. Уточнены аналитические выражения инженерного метода расчета температурно-усадочных деформаций высыхающего высокопрочного бетона в условиях нагрева до 200°C. Сопоставление расчетных температурных деформаций бетона с опытными значениями, свидетельствуют об их удовлетворительной сходимости.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Korsun V., Baranov A. (2021) Mechanical Properties of High-Strength Concrete After Heating at Temperatures up to 400 °C. In: Vatin N., Borodinecs A., Teltayev B. (eds) Proceedings of EECE 2020. EECE 2020. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 150. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72404-7_44
2. Korsun V., Baranov A., Khon K., Ha Q. (2021) The Influence of Temperature and Duration of Heating on the Properties of High-Strength Concrete Modified by Organo-Mineral Components. In: Vatin N., Borodinecs A., Teltayev B. (eds) Proceedings of EECE 2020. EECE 2020. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 150. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72404-7_50
3. Корсун В.И., Баранов А.О. Расчет температурно-усадочных деформаций высокопрочных бетонов применительно к условиям воздействия повышенных температур // В сборнике: Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2019 году. Сборник научных трудов РААСН. Российская академия архитектуры и строительных наук. Москва, 2020. С. 314-321.