




# Mechanical Characteristics of High-Strength Concrete with Fly Ash and Silica Fume at Elevated Temperatures: The Influence of Heating Duration

Baranov, Aleksey Olegovich<sup>1\*</sup> 

Zorina, Evgeniya Alekseevna<sup>1</sup> 

Kirian, Ivan Valerevich<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

Correspondence: \* email [aleksey.o.baranov@yandex.ru](mailto:aleksey.o.baranov@yandex.ru); contact phone 89158117529

## Keywords:

High strength concrete; High temperature; Compressive strength; Tensile strength; Elastic modulus; Stress-strain curves; Fly ash; Silica fume

## Abstract:

**The object of research.** High-strength concrete containing a multicomponent additive MB10-50C. The mineral part of the additive is represented by industrial by-products - silica fume and fly ash, and the organic part includes a superplasticizer of the C-3 grade. The subject of the study is the characteristics of the mechanical properties (compressive and splitting tensile strength, modulus of elasticity, Poisson's ratio, limiting deformations) of high-strength concrete after a short- and long-term exposure to elevated temperatures up to 400°C. **Method.** The high-strength concrete was heated in electric furnaces, and the properties were evaluated based on the residual characteristics after the samples cooled down. The characteristics of the properties of concrete are determined according to the national standards of the Russian Federation. **Results.** The long-term heating of high-strength concrete at temperatures of 90 and 200°C caused an increase in the residual compressive strength by an average of 5 and 10%, respectively. Compressive strength after long-term heating at 300 and 400°C decreased and accounted for 90 and 70% of the initial values, respectively. Long-term heating up to 200°C did not lead to significant changes in the splitting tensile strength, but the splitting tensile strength decrease by about 30 and 70% at heating up to 300°C and 400°C, respectively. Values of the initial elastic modulus and Poisson's ratio after heating at 90-400°C only decreased, while the dependence of the characteristics on the value of the heating temperature is linear. The heating of high-strength concrete at 200-400°C increased the ultimate longitudinal strain by 1,25-1,69 times and the ultimate transverse strain by 2-3,87 times.

## 1 Introduction

Бетоны с активными минеральными добавками (летучая зола, микрокремнезем, шлак, природные пуццоланы и др.) стали привлекательной альтернативой обычному бетону (чисто цементному) по долговечности, прочности и экономичности.

Существует большая группа железобетонных конструкций производственных зданий и инженерных сооружений, которая эксплуатируется при систематическом воздействии повышенных и высоких температур [1]. Кроме того, промышленное и гражданское строительство сталкивается с огромной опасностью пожарных повреждений во время строительства и эксплуатации в результате чрезвычайных и аварийных ситуаций [2], [3].

Из-за важности поведения бетона в условиях нагрева (или воздействия огня), было проведено множество исследований обычного тяжелого бетона в условиях повышенных и высоких температур [4]–[12], а также определены и исследованы наиболее важные характеристики. Сегодня же основной интерес для многих исследователей сосредоточен на бетонах со специфическими свойствами, например: высокопрочный и сверхпрочный бетоны, самоуплотняющиеся бетоны и т. п.

Необходимость исследований, направленных на изучение и оценку влияния воздействия повышенных и высоких температур на основные свойства бетона, связана, как уже говорилось, с применением составов бетона с минеральными добавками в строительной практике. Ниже представлен краткий литературный обзор исследований, характеризующий текущее состояние вопроса. Очевидно, что эффект минеральных добавок в условиях нагрева бетона проявляется по-разному и зависит от их 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 [13] 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 высокопрочного бетона 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%. Составы бетона нормальной прочности, с содержанием золы уноса 30 и 40% взамен цемента, после нагрева при 200°C показали прирост прочности на сжатие 2–6%, а при 400°C снижение в среднем на 15% от первоначальной прочности. 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. Кроме того, высокопрочный бетон показал большую стойкость к воздействию температур, чем бетон нормальной прочности.

Другие результаты были получены в [14]. 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. Данные автора согласуются с экспериментальными данными представленными в [15].

Результаты испытаний [16] 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 от 300 до 900°C. При 900°C был прирост прочности на сжатие на 19% по сравнению с первоначальной.

Авторы [17] 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 [18], 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 [19], [20] 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  $3^{\circ}\text{C} / \text{мин}$  с последующей выдержкой 3 часа и охлаждением до комнатной температуры на воздухе. Нагрев при  $100^{\circ}\text{C}$  снизил прочность на сжатие в среднем на 15% для всех составов (с добавкой и без). При  $200^{\circ}\text{C}$  наблюдалось небольшое увеличение прочности на сжатие по сравнению с остаточной прочностью после нагрева при  $100^{\circ}\text{C}$ . При  $300^{\circ}\text{C}$  снижение составило для всех составов в среднем 25%, при  $600^{\circ}\text{C}$  - 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 [21], там образцы бетона с микрокремнеземом имели остаточную прочность больше, чем образцы без добавки. Например, при  $300^{\circ}\text{C}$  снижение прочности на сжатие для образцов с микрокремнеземом составило в среднем на 15%, без – на 25%. Авторы [22] пишут, что добавление 10% микрокремнезема в замен цемента повышает термостойкость бетона до  $350^{\circ}\text{C}$ .

В работе [23] часть портландцемента в интервале от 5 до 20% замещалась золой кокосовой шелухи. Образцы бетона (B25) нагревали при температурах от 200 до  $800^{\circ}\text{C}$ , остывание образцов происходило на воздухе. Авторы отмечают, что с увеличением дозировки кокосовой шелухи до 20% снижение остаточной прочности при нагреве уменьшается. Например, при  $200^{\circ}\text{C}$  для состава с содержанием золы 5% снижение составляет 8%, для состава с 20% - около 4%. Аналогично при  $400^{\circ}\text{C}$  соответственно снижение 28 и 16%.

Аналогичные исследования проводились в работе [24], 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  $100-800^{\circ}\text{C}$  со скоростью  $3^{\circ}\text{C} / \text{мин}$  с последующей выдержкой 2 часа, остывание производили на воздухе. Нагрев до  $800^{\circ}$  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  $200^{\circ}\text{C}$ , что подтверждается и в статье [25]. 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  $100^{\circ}\text{C}$  – 10%; при  $200^{\circ}\text{C}$  – 15%; при  $400^{\circ}\text{C}$  – 40%; при  $600^{\circ}\text{C}$  – 70%. В работе [26] 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  $500^{\circ}\text{C}$ .

Авторы статьи [27] исследовали остаточную прочность на сжатие, растяжение при изгибе и раскалывании бетона (B50) с природными активными минеральными добавками (молотая пемза и метакраин) после нагрева при 250, 500 и  $750^{\circ}\text{C}$ . Рассматривается 12 составов бетона с различным содержанием добавок в замен портландцемента. Стоит сказать, что авторы перед испытанием на воздействие высоких температурах предварительно высушивали образцы в течение недели в лабораторных условиях и дополнительно 24 часа в электропечи при  $105^{\circ}\text{C}$ . Авторы пишут, что добавление молотой пемзы и метакраина взамен цемента не оказало существенного эффекта на остаточные прочностные характеристики бетона. В среднем для всех составов прочность на сжатие при  $250^{\circ}\text{C}$  снизилась на 4% (исключение составы с молотой пемзой, которые имели небольшой прирост). При  $500^{\circ}\text{C}$  – снижение прочности до 15%, после нагрева образцов при  $750^{\circ}\text{C}$  остаточная прочность составила около 40% от первоначальной для всех испытываемых составов. Однако стоит отметить, что молотая пемза снизила прочность образцов, которые не подвергались нагреву до 15%, а для состава содержащий 5% пемзы и 5% метакраина наблюдался небольшой прирост – 9%. Остаточная прочность на растяжение при изгибе и раскалывании для всех составов с увеличением температуры только снижалась: при  $250^{\circ}\text{C}$  до 10%, при  $500^{\circ}\text{C}$  до 25% и при  $750^{\circ}\text{C}$  на 75%.

В работе [28] 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  $400^{\circ}\text{C}$  – 117% от первоначальной, при  $600^{\circ}\text{C}$  – 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 [29] 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 [30], бетон с метаксаолином значительно снизил прочность на сжатие по сравнению с чисто цементным составом.

Несмотря на большое количество научных работ, посвящённых огнестойкости бетона (кратковременному нагреву 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 [31] исследовалось влияние длительного нагрева на свойства высокопрочного бетона, в состав которого входили микрокремнезем, смесь золошлаковых отходов 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 [32], 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.

Подводя итоги исследования состояния вопроса, можно сказать следующие, что характеристики бетона с минеральными добавками в условиях нагрева исследованы недостаточно. Экспериментальные данные разных авторов зачастую сильно отличаются друг от друга. В большей степени это связано с различиями в методах экспериментальных исследований, например: скорость нагрева, выдержка при требуемой температуре, способ испытания образцов бетона (в холодном или горячем состоянии) и т. п.

В данном исследовании рассматривается влияние температур до 400°C и длительности нагрева на характеристики механических свойств высокопрочного бетона, содержащего в составе многокомпонентную добавку МБ10-50С. Минеральная часть добавки представлена побочными продуктами промышленности – микрокремнеземом и золой уноса, а органическая включает суперпластификатор марки С-3.

## 2 Materials and Methods

Следующие компоненты использовались для производства высокопрочного бетона: портландцемент ЦЕМ I 42,5Н по ГОСТ 31108–2016 (The national standards of the Russian Federation GOST 31108–2016 “Common cements. Specifications”), 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 м<sup>3</sup> и свойства бетонной смеси  
Table 1. Mixture proportions and properties of fresh concrete

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

Примечание: <sup>1</sup> – модуль крупности песка  $M_{кр}=2,3$ ; <sup>2</sup> – щебень гранитный фракции 5–10 мм (70%) и 10–20 мм (30%); <sup>3</sup> – 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 распалубивались через 1 сутки и затем выдерживались в течение 27 дней в камере нормального хранения при температуре воздуха  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  и относительной влажности воздуха  $95 \pm 5\%$  согласно ГОСТ 10180–2012 (GOST 10180–2012 “Concretes. Methods for strength determination using reference specimens”).

В возрасте бетона 28 суток часть кубов и призм (контрольные образцы) испытывались при кратковременном осевом сжатии (см. рис. 3 а, в) и на растяжение при раскалывании (см. рис. 3 б). Другая часть образцов нагревалась в электрических печах и после окончания программы нагрева также подвергалась кратковременным испытаниям.

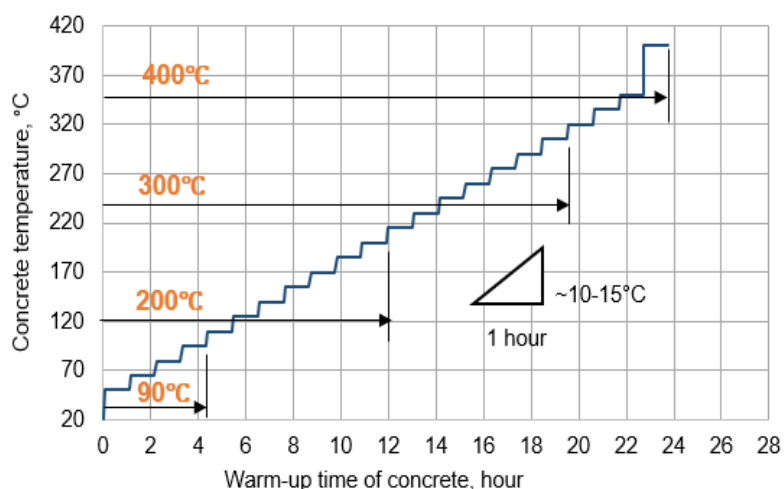


Рис. 1. – Схема разогрева бетона до исследуемых температур  
Fig. 1. – Scheme of concrete heating up to the investigated temperatures

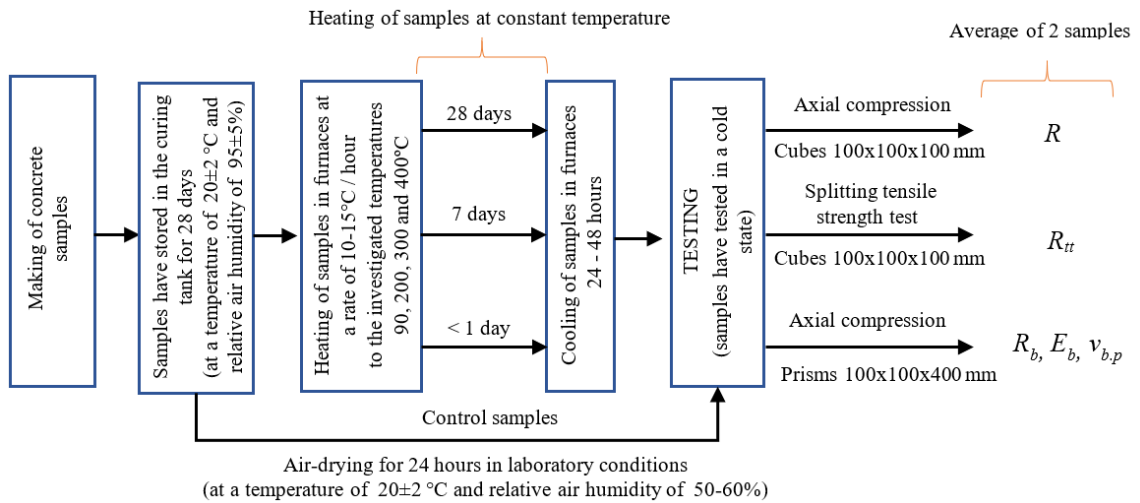
Разогрев до заданных температур (90, 200, 300 и 400°C) образцов высокопрочного бетона осуществлялся ступенчатым образом (см. на рис. 1). Чтобы снизить влияние влажностных и температурных градиентов на структуру бетона, скорость подъема температуры в период разогрева составляла 10-15°C в час. После этапа разогрева образцы выдерживались в электропечах в течение определенного времени (выдержка): 4 часов при 90°C, 2 часов при 200°C и 1-го часа при 300 и 400°C (кратковременный нагрев); 7 и 28 дней для всех исследуемых температур (длительный нагрев). Образцы медленно остывали в печах и испытывались в холодном состоянии. На рис. 2 схематично изображена экспериментальная программа исследования.

Прочность на осевое сжатие ( $R$ ) и на растяжение при раскалывании ( $R_{tt}$ ) определялись на образцах кубах с размерами 100x100x100 мм согласно ГОСТ 10180–2012 (GOST 10180–2012 “Concretes. Methods for strength determination using reference specimens”). Модуль упругости ( $E_b$ ), коэффициент Пуассона ( $\nu$ ), призмочная прочность ( $R_b$ ) определялись согласно ГОСТ 24452–80 (GOST 24452–80 “Concretes. Methods of prismatic, compressive strength, modulus of elasticity and Poisson's ratio determination”) на образцах призмах с размерами 100x100x400 мм путем постепенного (ступенями по 10%) нагружения образцов осевой сжимающей нагрузкой до

Baranov, A.O.; Zorina, E.A.; Kirian, I.V.

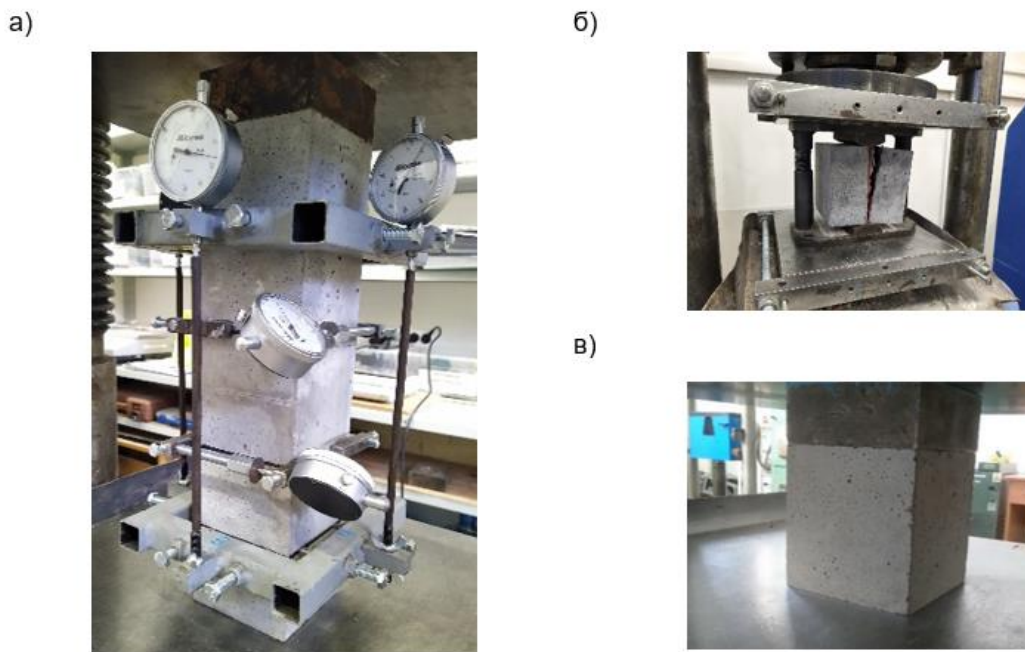
Mechanical Characteristics of High-Strength Concrete with Fly Ash and Silica Fume at Elevated Temperatures: The Influence of Heating Duration 2021; Construction of Unique Buildings and Structures; 96 Article No 9601. doi: 10.4123/CUBS.96.1

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  $\nu$ . Итоговые значения параметров определялось как среднее по двум образцам.



**Рис. 2 – Схема экспериментальной программы исследования**  
**Fig. 2 – Experimental research program**

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. 3– Общий вид образцов при испытании призм на осевое сжатие (а), кубов на растяжение при раскалывании (б), кубов на осевое сжатие (в)**  
**Fig. 3 – General appearance of prism samples at the axial compression test (a), cubes at splitting tensile test (б), cubes at the axial compression test (в)**

### 3 Results and Discussion

#### 3.1 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.

Прочность бетона на осевое сжатие при повышенных температурах в условиях свободного высыхания зависит от величины температуры и длительности действия нагрева (см. рис. 4). При испытаниях остаточная прочность на сжатие образцов кубов из высокопрочного бетона после кратковременного нагрева (менее суток) при температурах 200 и 300°C увеличилась соответственно на 16 и 4% по сравнению с прочностью контрольных образцов, которые не нагревались (см. рис. 4 а). Это согласуется с тем, что наблюдали другие исследователи [13], [14], [19], [20]. Кратковременный нагрев при 400°C снизил остаточную прочность на 13%. При температуре 90°C остаточная прочность на сжатие образцов кубов практически не изменилась.

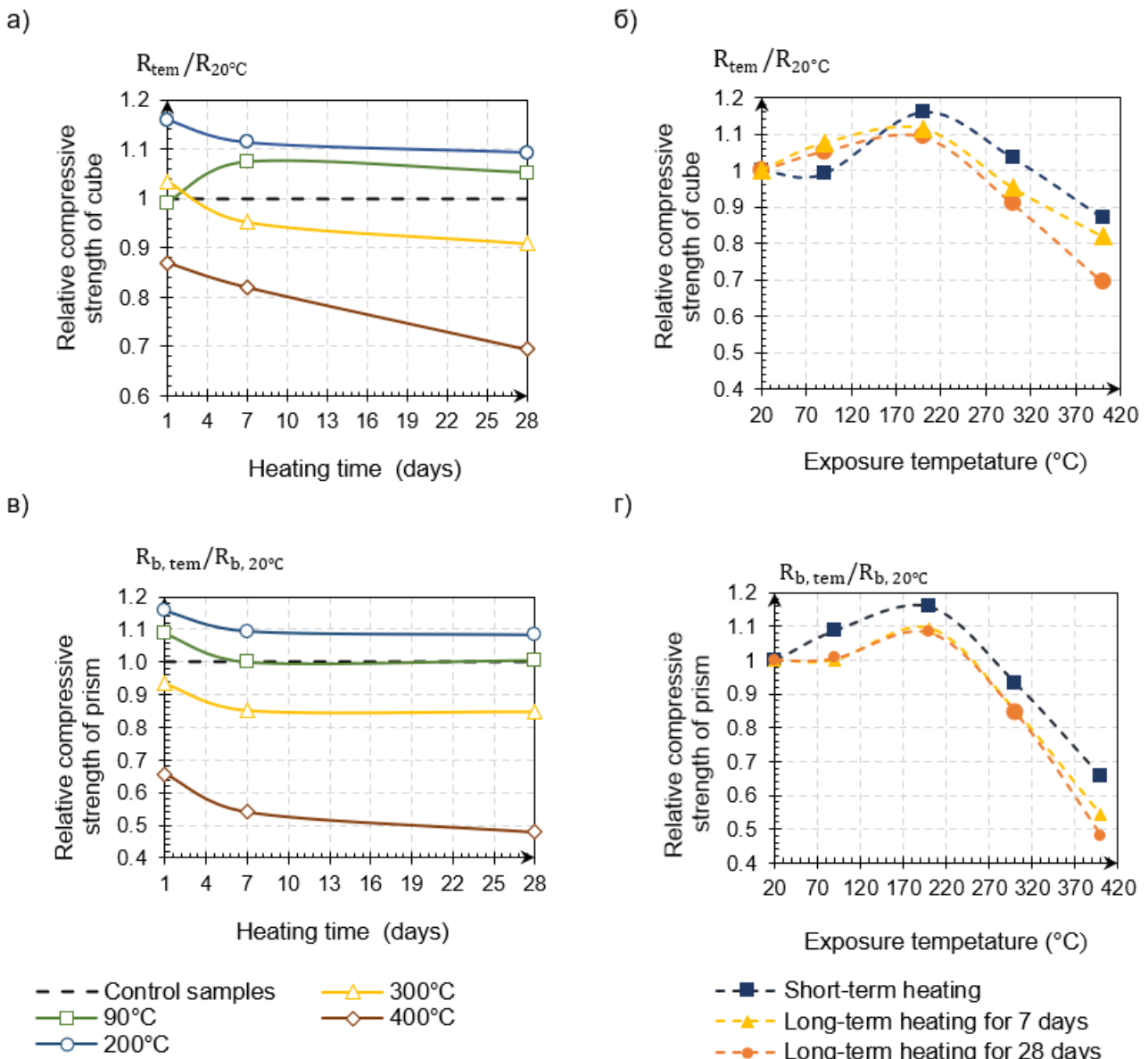


Рис. 4 – Зависимость остаточной прочности на сжатие высокопрочного бетона от продолжительности нагрева (а), (в) и температуры испытания (б), (г)

Fig. 4 – Dependence of residual compressive strength of high-strength concrete on heating duration (а), (б) and test temperature (в), (г)

Увеличение прочности при температуре до 200°C, вероятно, было связано с упрочнением структуры бетона за счет преобразования геля C-S-H в более прочные кристаллические фазы и дополнительной гидратации минералов портландцемента (см. рис 4 б). Это согласуется с выводами сделанными в [11], [33], [34]. Исследование составов бетона с содержанием золы уноса в [35] показало, что в интервале 121-149°C прочность на сжатие бетона возросла, наибольшее увеличение составило 152%. Авторы связывают увеличение прочности бетона с образованием тоберморита. Аналогичным образом в работе [36], повышение прочности на сжатие при нагреве до 400°C бетона с золой от производства пальмового масла объясняется преобразованием фазы C-S-H в фазу ксонотлита, которая в 1,5–2,25 раза прочнее, чем C-S-H. Авторы работы [37] исследовали влияние высоких температур на свойства и структуру самоуплотняющихся бетонов. Анализ данных позволил заключить следующее, что увеличение прочности на сжатие в интервале температур 150-300°C происходит в результате гидратации непрореагировавших зерен цемента из-за движения влаги в бетоне, что приводит к образованию дополнительных продуктов гидратации.

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.

Стоит отметить, что 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. 4 в, 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-ваальсовыи 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, а при дальнейшем нагреве привело к большому влажностным градиентом и снижению прочности на сжатие.

### 3.2 Прочность на растяжение при испытании кубов на раскалывание

Прочность на растяжение при раскалывании высокопрочного бетона уменьшалась с увеличением длительности выдержки и повышением температуры нагрева (см. рис. 5 а, б). Тенденции изменения прочности на растяжение при раскалывании аналогичны зависимостям, полученных при испытании на сжатие.

Кратковременный нагрев при 90°C повысил прочность на растяжение при раскалывании на 20% в сравнение с контрольным образцом. Подобный результат был получен в работе [11]. 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).

Исследование высокопрочного бетона с микрокремнеземом в [17] показало, что прочность при осевом растяжении после непродолжительного нагрева до 200°C снизилась на 2-5%, а при 400 на 20%. В работе [38] исследовали состав бетона (В70) с содержанием золы уноса при кратковременном воздействии температур в интервале от 200 до 1000°C. Результаты показывают, что прочность на растяжение при раскалывании уменьшается с увеличением температуры. При этом в диапазоне температур 200-400°C наблюдалось наименьшее снижение прочности (около 5%). В [39] были получены похожие результаты, после кратковременного нагрева высокопрочного бетона с 10% микрокремнезема взамен цемента при температуре 200°C прочность на растяжение при изгибе снизилась в среднем на 35%, при 400°C прочность составляла 73% от первоначального значения (т. е. в диапазоне 200-400°C наблюдался прирост).

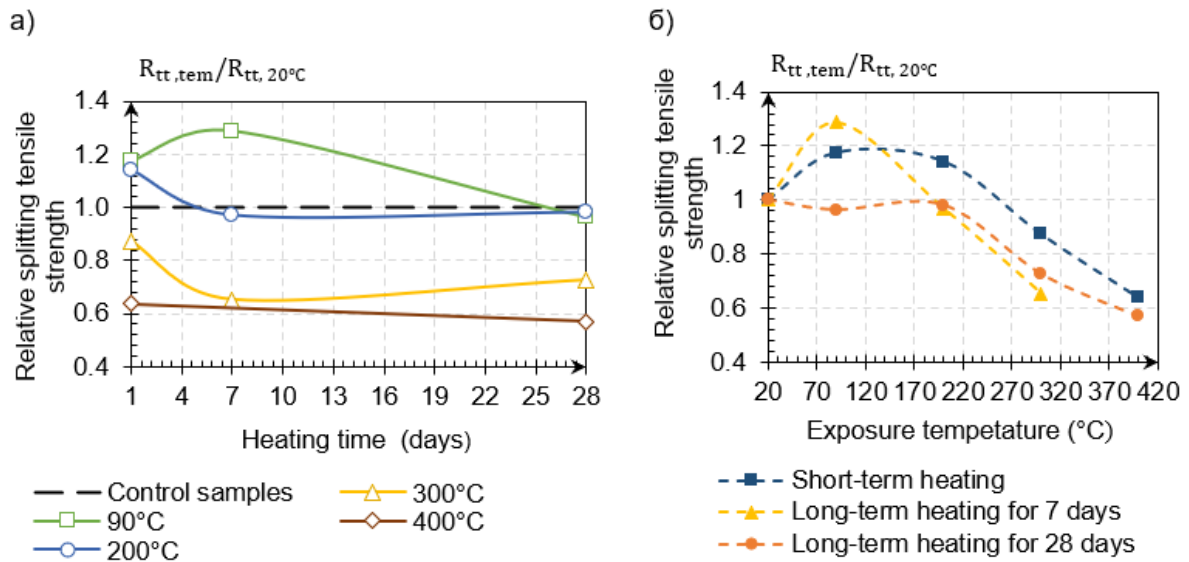


Рис. 5 – Зависимость остаточной прочности на растяжение при раскалывании высокопрочного бетона от продолжительности (а) и температуры (б) нагрева

Fig. 5 – Dependence of the residual splitting tensile strength of high-strength concrete on heating duration (a) and test temperature (b)

### 3.3 Потеря в весе после нагрева образцов высокопрочного бетона

Как следует из рис. 6, полное высыхание цементного камня при температуре нагрева 200 и 300 °C происходит в течение 7 дней. В течение 28 дней изотермической выдержки потеря в весе образцов составляет 5.6 и 6.3% соответственно. Образцы, нагреваемые при 400°C, в период разогрева и изотермической выдержки теряют в среднем 6,5% от первоначального веса. При температуре 90°C потеря весе составляет 4,1%.

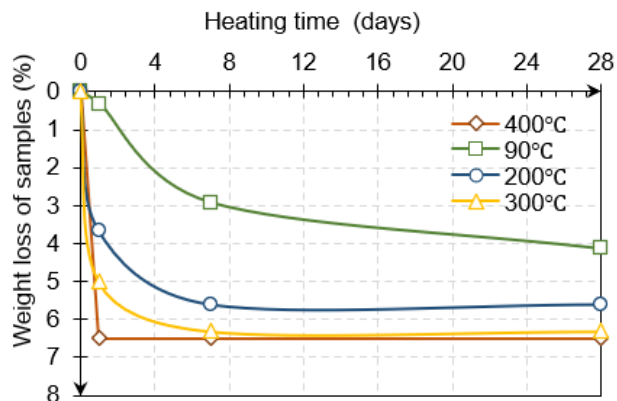


Рис. 5 – Изменение веса образцов кубов из высокопрочного бетона после нагрева

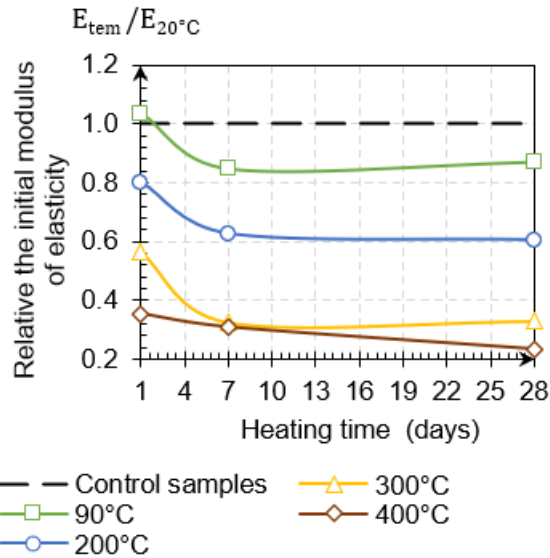
Fig. 6 – Weight loss of samples after heating

### 3.4 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. 7 и 8). 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 времени нагрева существенно не изменило его значений для исследуемых температур.

а)



б)

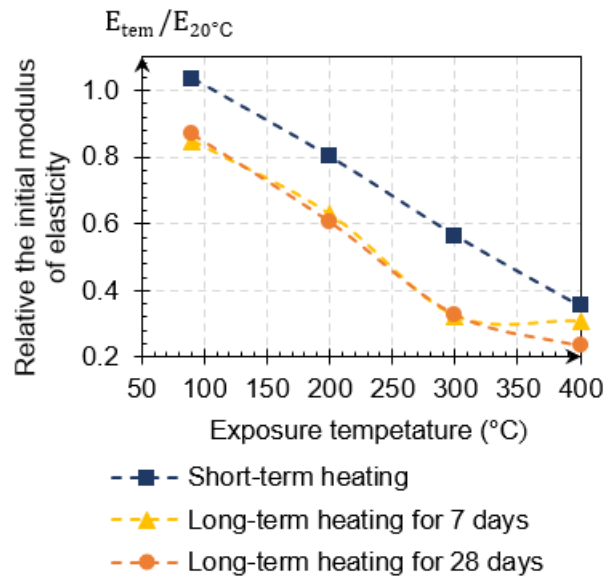
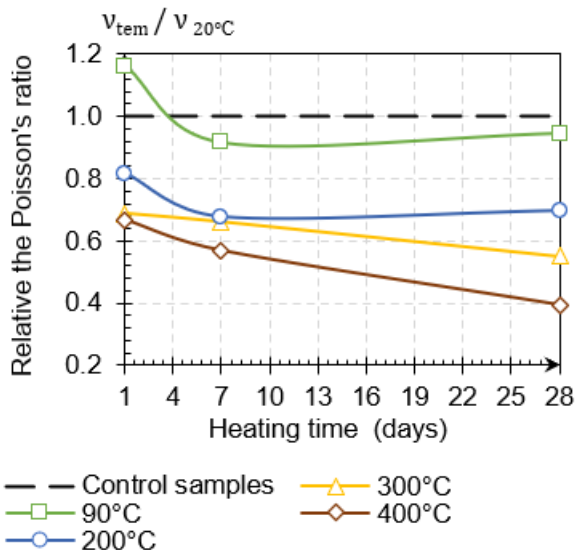


Рис. 6 – Изменение относительной величины начального модуля упругости в зависимости от продолжительности нагрева (а) и температуры нагрева (б)

Fig. 7 – Change in the relative value of the initial elastic modulus depending on the heating duration (а) and test temperature (б)

а)



б)

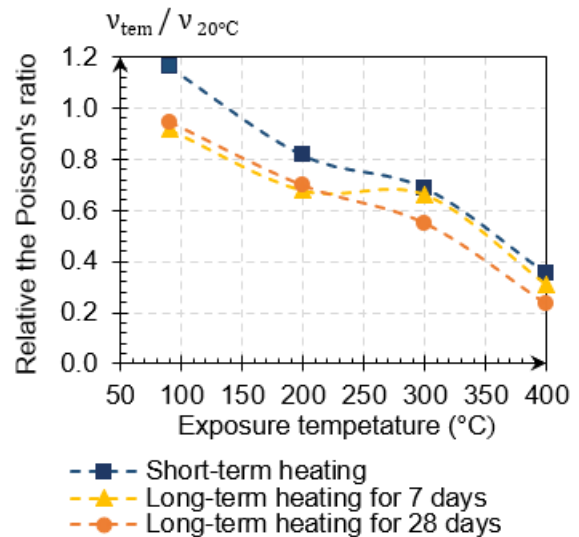


Рис. 7 – Изменение относительной величины коэффициента Пуассона в зависимости от продолжительности нагрева (а) и температуры нагрева (б)

Fig. 8. Change in the relative value of the Poisson's ratio depending on the heating duration (а) and test temperature (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, аналогичны.

### 3.5 Диаграммы деформирования. Предельные деформации

Диаграммы деформирования высокопрочного бетона при сжатии в условиях воздействия нормальной и повышенных температур представлены на рис. 9. Предельные значения 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  $91,2 \cdot 10^{-5}$

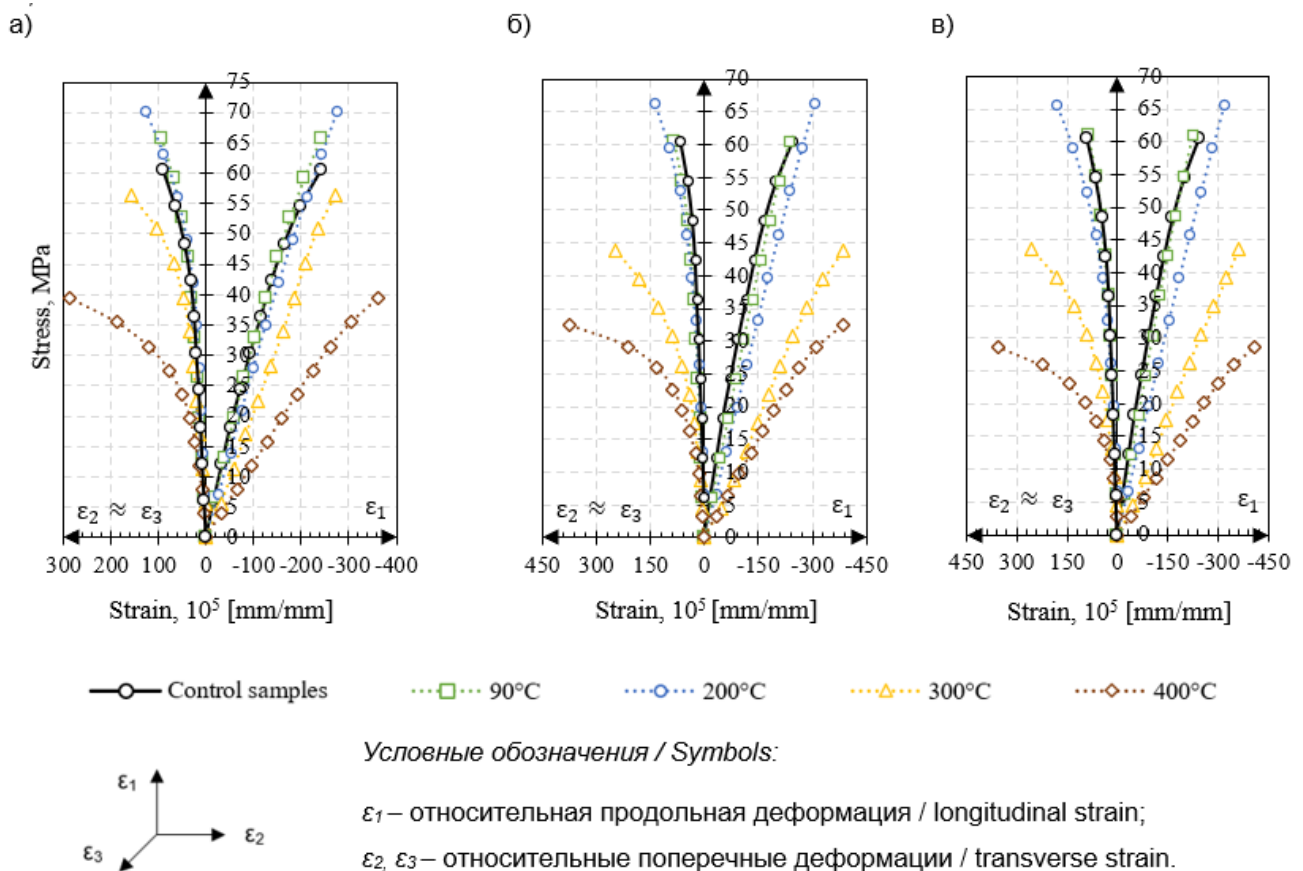


Рис. 8 – Диаграммы деформирования высокопрочного бетона при осевом сжатии после кратковременного (а), длительного в течение 7 дней (б), длительного в течение 28 дней нагрева (в)

Fig. 9 – Stress-strain curves of high-strength concrete for axial compression after short-term heating (a), long-term heating for 7 days (б), long-term heating for 28 days (v)

С увеличением температуры и продолжительности нагрева возрастали предельные значения относительных деформаций. Кратковременный нагрев увеличил относительные предельные продольные и поперечные деформации при осевом сжатии по сравнению с контрольными образцами соответственно в 1,13 и 1,41 раза – при 200°C, в 1,12 и 1,74 раза – при 300°C, в 1,5 и 3,14 раза – при 400°C. Нагрев высокопрочного бетона в течение 28 суток 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. При нагреве высокопрочного бетона при 90°C относительные предельные деформации существенно не изменились (см. рис 10).

Baranov, A.O.; Zorina, E.A.; Kirian, I.V.

Mechanical Characteristics of High-Strength Concrete with Fly Ash and Silica Fume at Elevated Temperatures: The Influence of Heating Duration 2021; Construction of Unique Buildings and Structures; 96 Article No 9601. doi: 10.4123/CUBS.96.1

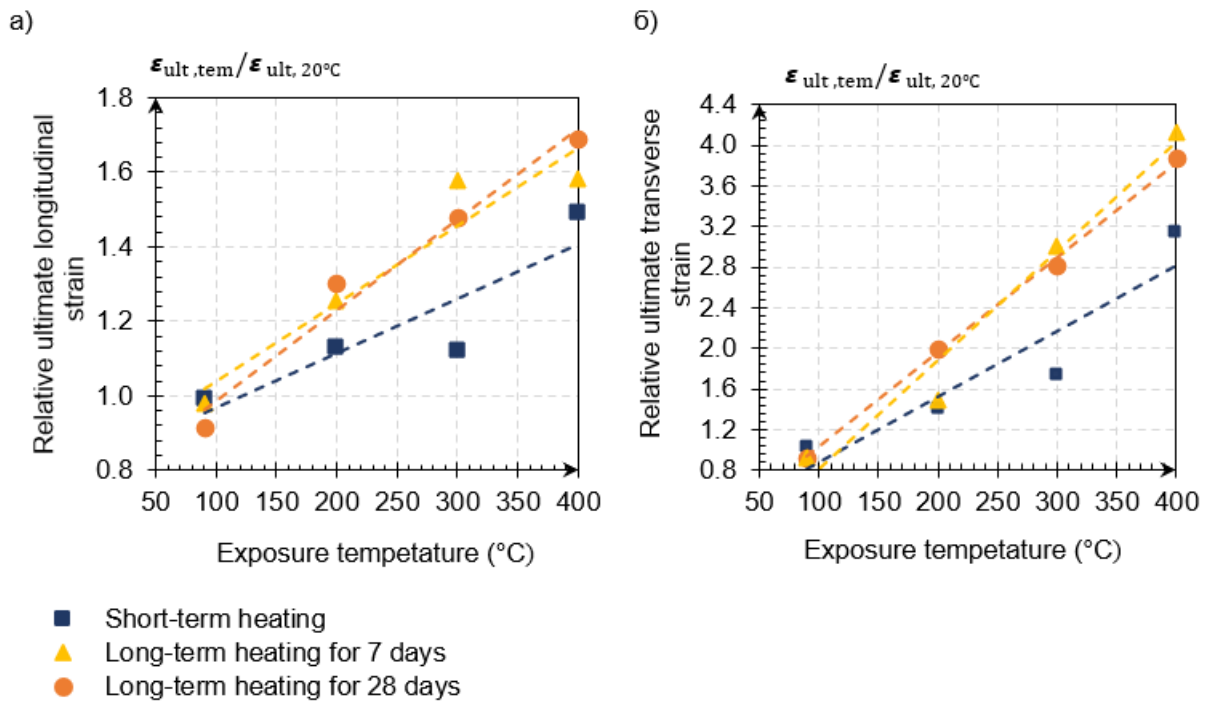


Рис. 9 – Изменение предельных значений относительных продольных (а), поперечных (б) деформаций высокопрочного бетона после нагрева

Fig. 10 – Change in the ultimate values of the longitudinal (a) and transverse (b) strain of high-strength concrete after heating

## 4 Conclusions

В данном исследовании рассматривается влияние повышенных и высоких температур до 400°C и длительности нагрева на механические характеристики свойств высокопрочного бетона, содержащего в составе многокомпонентную добавку МБ10-50С (микрокремнезем, зола уноса, суперпластификатор С-3). Нагрев осуществлялся в электропечах, оценка свойств бетона производилась по остаточным характеристикам после остывания образцов. Полученные в данном исследовании результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Остаточная прочность на сжатие высокопрочного бетона при испытании образцов кубов после кратковременного нагрева при 200 и 300°C увеличилась на 15 и 4% по сравнению с первоначальным значением.
2. Остаточная прочность с увеличением длительности нагрева снижалась и составила от первоначальных значений при температурах: 90°C – 105%; 200°C – 110%; 300°C – 72%; 400°C – 48%. Структурообразующие процессы преобладали над деструктивными до температуры нагрева 200°C.
3. Нагрев кубов при температуре 90°C не оказал существенного значения на остаточную прочность на сжатие.
4. Длительный нагрев до 200°C не привел к существенному изменению остаточной прочности на растяжение при испытании образцов кубов на раскалывание, однако при температурах нагрева 300 и 400°C снижение составило около 30 и 70% соответственно.
5. 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.
6. 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.

## References

1. Korsun, V.I. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie zhelezobetonnykh konstruksiy v usloviyakh temperaturnykh vozdeystviy [Stress and strain state of reinforced concrete structures under thermal impacts]. Makeevka, DonNACEA, 2003. 153 p. ISBN:966-7477-38-X URL:<https://www.academia.edu/12420694> (date of application: 03.02.2021).
2. Gravit, M., Nedviga, E., Vinogradova, N., Teplova, Z. Fire resistance of prefabricated monolithic slab. MATEC Web of Conferences. 2017. 106. DOI:10.1051/mateconf/201710602025.
3. Gravit, M., Mikhailov, E., Svintsov, S., Kolobzarov, A., Popovych, I. Fire and explosion protection of high-rise buildings by means of plaster compositions. Solid State Phenomena. 2016. 871. Pp. 138–145. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.871.138.
4. Anupama Krishna, D., Priyadarsini, R.S., Narayanan, S. Effect of elevated temperatures on the mechanical properties of concrete. Procedia Structural Integrity. 2019. 14. Pp. 384–394. DOI:10.1016/j.prostr.2019.05.047. URL: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.05.047>.
5. Khoury, G.A. Effect of fire on concrete and concrete structures. Progress in Structural Engineering and Materials. 2000. 2(4). Pp. 429–447. DOI:10.1002/pse.51. URL: <http://doi.wiley.com/10.1002/pse.51> (date of application: 21.03.2021).
6. Khoury, G.A., Majorana, C.E., Pesavento, F., Schrefler, B.A. Modelling of heated concrete. Magazine of Concrete Research. 2002. 54(2). Pp. 77–101. DOI:10.1680/macr.2002.54.2.77.
7. Kodur, V. Properties of concrete at elevated temperatures. ISRN Civil Engineering. 2014. 2014. DOI:10.1155/2014/468510.
8. Schneider, U. Concrete at high temperatures - A general review. Fire Safety Journal. 1988. 13(1). Pp. 55–68. DOI:10.1016/0379-7112(88)90033-1.
9. Hefni, Y., Zaher, Y.A. El, Wahab, M.A. Influence of activation of fly ash on the mechanical properties of concrete. Construction and Building Materials. 2018. 172. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.04.021.
10. Thanaraj, D.P., Anand, N., Arulraj, P. Experimental investigation of mechanical properties and physical characteristics of concrete under standard fire exposure. Journal of Engineering, Design and Technology. 2019. 17(5). DOI:10.1108/JEDT-09-2018-0159.
11. Nekrasov, K.D., Zhukov, V.V., Gulyaeva, V.F. Tyazhelyj beton v usloviyakh povyshennykh temperatur [Heavy concrete at elevated temperatures]. Moscow, Stroyizdat, 1972. 128 p. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007183810> (date of application: 03.02.2021).
12. Milovanov, A. Stojkost' zhelezobetonnykh konstrukcij pri pozhare [Resistance of reinforced concrete structures in case of fire]. Moscow, Stroyizdat, 1998. 304 p. ISBN:5-274-01695-2 URL:<https://search.rsl.ru/ru/record/01000576565> (date of application: 03.02.2021).
13. Poon, C.S., Azhar, S., Anson, M., Wong, Y.L. Comparison of the strength and durability performance of normal- and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures. Cement and Concrete Research. 2001. 31(9). Pp. 1291–1300. DOI:10.1016/S0008-8846(01)00580-4.
14. Kim, G.Y., Kim, Y.S., Lee, T.G. Mechanical properties of high-strength concrete subjected to high temperature by stressed test. Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition). 2009. 19(SUPPL. 1). DOI:10.1016/S1003-6326(10)60260-9.
15. Korsun, V.I., Khon, K., Ha, V.Q., Baranov, A.O. Strength and deformations of high-strength concrete under short-term heating conditions up to + 90°C. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 896(1). Pp. 012035. DOI:10.1088/1757-899X/896/1/012035. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/896/1/012035> (date of application: 18.08.2020).
16. Aydin, S., Baradan, B. Effect of pumice and fly ash incorporation on high temperature resistance of cement based mortars. Cement and Concrete Research. 2007. 37(6). Pp. 988–995. DOI:10.1016/j.cemconres.2007.02.005.
17. Kirchhof, L.D., Lima, R.C.A. De, Neto, A.B. da S.S., Quispe, A.C., Filho, L.C.P. da S. Effect of moisture content on the behavior of high strength concrete at high temperatures. Revista Materia. 2020. 25(1). DOI:10.1590/s1517-707620200001.0898.
18. Kodur, V.K.R., Phan, L. Critical factors governing the fire performance of high strength concrete systems. Fire Safety Journal. 2007. 42(6–7). Pp. 482–488. DOI:10.1016/j.firesaf.2006.10.006.
19. Ghandehari, M., Behnood, A., Khanzadi, M. Residual Mechanical Properties of High-Strength Concretes after Exposure to Elevated Temperatures. Journal of Materials in Civil Engineering. 2010. 22(1). Pp. 59–64. DOI:10.1061/(asce)0899-1561(2010)22:1(59). URL:

<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290899-1561%282010%2922%3A1%2859%29>  
(date of application: 16.03.2021).

20. Behnood, A., Ziari, H. Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures. *Cement and Concrete Composites*. 2008. 30(2). Pp. 106–112. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2007.06.003.
21. Phan, L.T., Lawson, J.R., Davis, F.L. Effects of elevated temperature exposure on heating characteristics, spalling, and residual properties of high performance concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*. 2001. 34(2). Pp. 83–91. DOI:10.1007/bf02481556. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02481556> (date of application: 23.03.2021).
22. Saad, M., Abo-El-Eneinf, S.A., Hanna, G.B., Kotkata, M.F. Effect of temperature on physical and mechanical properties of concrete containing silica fume. *Cement and Concrete Research*. 1996. 26(5). Pp. 669–675. DOI:10.1016/S0008-8846(96)85002-2.
23. Balagopal, V., Viswanathan, T.S. Effect of elevated temperature on performance of concrete containing supplementary cementitious material derived from coir industry. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. 2020. 8(8). Pp. 4496–4501. DOI:10.30534/ijeter/2020/73882020.
24. Khaliq, W., Taimur. Mechanical and physical response of recycled aggregates high-strength concrete at elevated temperatures. *Fire Safety Journal*. 2018. 96. Pp. 203–214. DOI:10.1016/j.firesaf.2018.01.009.
25. Khaliq, W., Mujeeb, A. Effect of processed pozzolans on residual mechanical properties and macrostructure of high-strength concrete at elevated temperatures. *Structural Concrete*. 2019. 20(1). Pp. 307–317. DOI:10.1002/suco.201800074.
26. Setayesh Gar, P., Suresh, N., Bindiganavile, V. Sugar cane bagasse ash as a pozzolanic admixture in concrete for resistance to sustained elevated temperatures. *Construction and Building Materials*. 2017. 153. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2017.07.107.
27. Saridemir, M., Severcan, M.H., Ciflikli, M., Celikten, S., Ozcan, F., Atis, C.D. The influence of elevated temperature on strength and microstructure of high strength concrete containing ground pumice and metakaolin. *Construction and Building Materials*. 2016. 124. Pp. 244–257. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2016.07.109.
28. Demirel, B., Keleştemur, O. Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume. *Fire Safety Journal*. 2010. 45(6–8). Pp. 385–391. DOI:10.1016/j.firesaf.2010.08.002.
29. Nadeem, A., Memon, S.A., Lo, T.Y. The performance of Fly ash and Metakaolin concrete at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*. 2014. 62. Pp. 67–76. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.02.073.
30. Poon, C.S., Shui, Z.H., Lam, L. Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*. 2004. 34(12). Pp. 2215–2222. DOI:10.1016/j.cemconres.2004.02.011.
31. Korsun, V.I., Mashtaler, S.N. The Influence of High Temperatures Up to 200 on Characteristics of Physical and Mechanical Properties of High-Strength Steel Fiber Reinforced Concrete. *Fundamental'nye, poiskovye i prikladnye issledovaniya RAASN po nauchnomu obespecheniyu razvitiya arhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'noj otrasli Rossijskoj Federacii v 2017 godu. Sbornik nauchnyh trudov Rossijskoj akademii arhitektury i stroitel'ny*. 2018. Pp. 265–274. DOI:10.22337/9785432302663-265-274.
32. Korsun, V., Vatin, N., Franchi, A., Korsun, A., Crespi, P., Mashtaler, S. The strength and strain of high-strength concrete elements with confinement and steel fiber reinforcement including the conditions of the effect of elevated temperatures. *Procedia Engineering*. 2015. 117(1). Pp. 970–979. DOI:10.1016/j.proeng.2015.08.192.
33. Khoury, G.A. Compressive strength of concrete at high temperatures: A reassessment. *Magazine of Concrete Research*. 1992. 44(161). Pp. 291–309. DOI:10.1680/mac.1992.44.161.291.
34. Eilers, L.H., Nelson, E.B., Moran, L.K. HIGH-TEMPERATURE CEMENT COMPOSITIONS - PECTOLITE, SCAWTITE, TRUSCOTTITE, OR XONOTLITE: WHICH DO YOU WANT? *JPT, Journal of Petroleum Technology*. 1983. 35(8). Pp. 1373–1377. DOI:10.2118/9286-pa.
35. Nasser, K.W., Marzouk, H.M. PROPERTIES OF MASS CONCRETE CONTAINING FLY ASH AT HIGH TEMPERATURES. *J Am Concr Inst*. 1979. 76(4). Pp. 537–550. DOI:10.14359/6958.
36. Mujedu, K.A., Ab-Kadir, M.A., Sarbini, N.N., Ismail, M. Microstructure and compressive strength of self-compacting concrete incorporating palm oil fuel ash exposed to elevated temperatures.

Baranov, A.O.; Zorina, E.A.; Kirian, I.V.

Mechanical Characteristics of High-Strength Concrete with Fly Ash and Silica Fume at Elevated Temperatures: The Influence of Heating Duration 2021; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 96 Article No 9601. doi: 10.4123/CUBS.96.1

Construction and Building Materials. 2021. 274. Pp. 122025.  
DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.122025.

37. Fares, H., Remond, S., Noumowe, A., Cousture, A. High temperature behaviour of self-consolidating concrete. Microstructure and physicochemical properties. *Cement and Concrete Research*. 2010. 40(3). Pp. 488–496. DOI:10.1016/j.cemconres.2009.10.006.
38. Li, M., Qian, C.X., Sun, W. Mechanical properties of high-strength concrete after fire. *Cement and Concrete Research*. 2004. 34(6). Pp. 1001–1005. DOI:10.1016/j.cemconres.2003.11.007.
39. Husem, M. The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete. *Fire Safety Journal*. 2006. 41(2). Pp. 155–163. DOI:10.1016/j.firesaf.2005.12.002.