

УДК 691.327

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-118-130](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-118-130)

EDN: TXZVPH

ВЛИЯНИЕ ВИДА ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ПРОЧНОСТНЫЕ И ДЕФОРМАТИВНЫЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНЫХ БЕТОНОВ ПРИ НАГРЕВЕ

И.С. КУЗНЕЦОВА✉, канд. техн. наук
Я.В. ЗУБОВА

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 5, г. Москва, 109428, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Высокопрочный бетон широко используется в современном строительстве. С расширением внедрения высокопрочного бетона возникает необходимость изучения его поведения при высоких температурах (при пожаре) для обеспечения требуемой огнестойкости несущих железобетонных конструкций из высокопрочного бетона в части пожарной безопасности зданий и сооружений.

Цель: определение влияния вида заполнителя на прочностные и деформативные характеристики высокопрочного бетона класса В100 при нагреве до температур от 100 до 800 °С с шагом 100 °С.

Материалы и методы. Лабораторные испытания призмочной прочности и модуля упругости высокопрочного бетона на базальте и граните производили на образцах-призмах в нагретом состоянии по стандартным методикам при помощи специального нагревательного оборудования, совмещенного с лабораторным прессовым оборудованием.

Результаты. Определены коэффициенты условий работы при нагреве высокопрочного бетона на граните и базальте, характеризующие снижение прочности на сжатие и модуля упругости. Построены диаграммы деформирования при осевом сжатии высокопрочных бетонов на граните и базальте при нагреве.

Выводы. Динамика снижения прочностных и деформативных свойств высокопрочного бетона на граните и базальте при нагреве аналогична и характерна для бетонов на силикатных заполнителях. Модули упругости высокопрочного бетона на базальте выше, чем у высокопрочного бетона на граните, как при 20 °С, так и при нагреве, что обуславливает зависимость деформативных свойств высокопрочного бетона от видов заполнителей. Диаграммы деформирования при осевом сжатии высокопрочного бетона на граните и базальте проявили специфический характер: однолинейный – при нагреве до температуры порядка 300–400 °С, двухлинейный – при более высоких температурах нагрева, что отличается от традиционных представлений и теоретических рекомендаций.

Ключевые слова: высокопрочный бетон, заполнители, базальт, гранит, температура, нагрев, модуль упругости, призмочная прочность, диаграммы деформирования, напряжения, деформации

Для цитирования: Кузнецова И.С., Зубова Я.В. Влияние вида заполнителей на прочностные и деформативные свойства высокопрочных бетонов при нагреве. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;41(2):118–130. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-118-130](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-118-130)

Вклад авторов

Авторы внесли равный вклад в постановку задачи, проведение исследований и оценку результатов.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 28.02.2024

Поступила после рецензирования 22.03.2024

Принята к публикации 28.03.2024

EFFECT OF AGGREGATE TYPE ON STRENGTH AND DEFORMATION PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH CONCRETE DURING HEATING

I.S. KUZNETSOVA✉, Cand. Sci. (Engineering)

I.V. ZUBOVA

Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 5, Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract

Introduction. High-strength concrete is widely used in contemporary construction. Expanded introduction of high-strength concrete necessitates the need for studying its behavior at high temperatures (in case of fire) in order to ensure the required fire resistance of load-bearing reinforced concrete structures made of high-strength concrete in terms of fire safety of buildings and structures.

Aim. To determine the effect of aggregate types on strength and deformation characteristics of high-strength B100 concrete when heated to temperatures from 100 °C to 800 °C with a step of 100 °C.

Materials and methods. Laboratory tests of prism strength and elastic modulus of basalt and granite high-strength concrete were carried out on prism samples in a heated state according to standard methods using special heating equipment combined with laboratory pressure equipment.

Results. The authors determined structure behavior factors of basalt and granite high-strength concrete during heating, specifying the decrease in compressive strength and elastic modulus. Deformation diagrams during axial compression of high-strength granite and basalt concretes under heating were drawn.

Conclusions. The dynamics of reduction in strength and deformation properties is similar for granite and basalt high-strength concrete under heating and is specific for silicate aggregate concretes. The elastic moduli of basalt high-strength concrete are higher than those of granite high-strength concrete, both at 20 °C and when heated, thereby determining the dependence of high-strength concrete deformation properties on the types of aggregates. Deformation diagrams during the axial compression of high-strength granite and basalt concretes showed specific character: unilinear – when heated to temperatures of about 300–400 °C, bilinear – at higher heating temperatures, therefore differing from traditional ideas and theoretical recommendations.

Keywords: high-strength concrete, aggregates, basalt, granite, temperature, heating, elastic modulus, prism strength, deformation diagrams, stress, deformation

For citation: Kuznetsova I.S., Zubova I.V. Effect of aggregate type on strength and deformation properties of high-strength concrete during heating. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;41(2):118–130. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-118-130](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-118-130)

Authors contribution statement

All authors made equal contributions to problem statement, research development and evaluation of results.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 28.02.2024

Revised 22.03.2024

Accepted 28.03.2024

Современное массовое строительство в России, строительство высотных зданий, мостов, дорог, туннелей, очистных сооружений, потребует применения в больших объемах строительных материалов, в наибольшей степени подходящих по своим технико-экономическим показателям. В целом ряде случаев таким материалом может быть высокопрочный бетон (ВБ). Высокая механическая прочность, газо- и водонепроницаемость, коррозионная стойкость и стойкость к воздействию агрессивной среды, истиранию ставят этот материал в целом ряде случаев вне конкуренции при сравнении с традиционными строительными материалами.

Поведение обычного тяжелого бетона при высокотемпературном нагреве изучено достаточно широко. Результаты множественных исследований [1–3] систематизированы и приведены в СП 468.1325800.2019 [4] в виде значений коэффициентов условий работы при нагреве для расчета огнестойкости и в охлажденном состоянии после нагрева для расчета огнесохранности для бетонов класса по прочности на сжатие не выше В55. Такое ограничение класса прочности неслучайно.

Исследованиями многих российских и зарубежных авторов доказано, что изменчивость прочностных и деформативных свойств ВБ отличается от обычных тяжелых бетонов. При этом наблюдается достаточно большой разброс значений снижения прочности ВБ при пожаре (рис. 1), а отклонения от условного среднего значения достигают 50%. Экспериментально установлено, что прочность ВБ при нагреве в меньшей степени зависит от первоначального значения прочности до нагрева. Такой разброс значений, как правило, связывают с различиями вещественно-количественных составов ВБ, типа заполнителей, минеральных добавок, методик приложения силовой и температурной нагрузки.

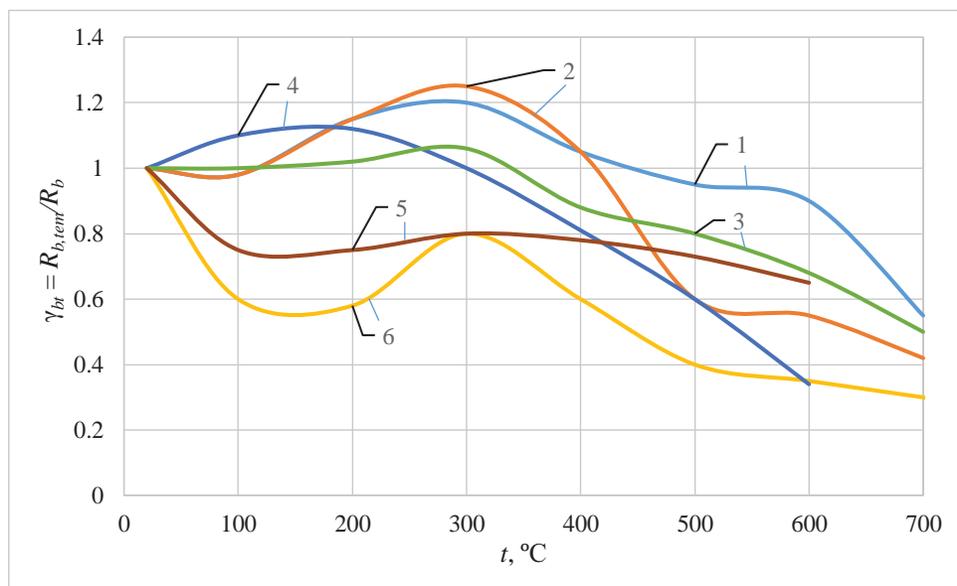


Рис. 1. Изменение прочности на сжатие высокопрочного бетона после кратковременного нагрева: 1 – Леонович С. Н. (с добавлением 10% микрокремнезема) [5]; 2 – Леонович С. Н. (без микрокремнезема) [5]; 3 – Леонович С. Н. (с добавлением стальной фибры) [6]; 4 – состав Kirchhof L. D. [7]; 5 – состав Phan L. T. [8]; 6 – состав Yoon M. [9]

Fig. 1. Change in compressive strength of high-strength concrete after short-term heating: 1 – Leonovich S. N. (with 10% of microsilica) [5]; 2 – Leonovich S. N. (without microsilica) [5]; 3 – Leonovich S. N. (with steel fiber) [6]; 4 – Kirchhof L. D., composition [7]; 5 – Phan L. T., composition [8]; 6 – Yoon M., composition [9]

Анализ исследований разных авторов показал, что наибольшее внимание уделяется влиянию модифицирующих тонкомолотых добавок на свойства высокопрочного бетона при нагреве. Влияние вида крупного заполнителя на изменчивость свойств ВБ при нагреве недостаточно изучено.

В некоторых работах авторы исследовали высокопрочные бетоны с модифицирующими тонкомолотыми добавками на гранитном и известняковом заполнителях. Исследований высокопрочных бетонов на базальтовом заполнителе не обнаружено.

В работе [10] авторами приведены результаты испытаний при нагреве в интервале температур 20–900 °С высокопрочных бетонов классов В75–В100 на гранитном заполнителе с тонкомолотыми модифицирующими добавками в виде микрокремнезема, золы-уноса, гранулированного доменного шлака. По результатам исследований установлено, что все три вида исследуемых высокопрочных бетонов имеют схожую динамику снижения прочности на сжатие при нагреве. При сравнении прочностных характеристик при нагреве обычных тяжелых бетонов и исследуемых высокопрочных бетонов отмечено резкое снижение прочности высокопрочных бетонов на 30 % при 150 °С, в то время как обычные тяжелые бетоны не теряют прочностные свойства до 350 °С.

Авторы работы [11] изучали влияние температуры нагрева до 400 °С высокопрочного бетона, содержащего добавку МБ 10-50С, состоящую из микрокремнезема, золы-уноса и суперпластификатора С-3, на гранитном заполнителе. В результате работы авторами отмечено увеличение прочности на сжатие при кратковременном нагреве до 200 и 300 °С по сравнению с прочностью при 20 °С на 15 и 4 % соответственно. Схожие результаты получены для высокопрочного бетона аналогичного состава авторами статьи из Бразилии [7], которые исследовали влияние влажности и температуры нагрева на прочностные характеристики и вероятность взрывообразного разрушения обычного тяжелого и высокопрочного бетонов. Похожее явление также наблюдали авторы [12], которые исследовали высокопрочные бетоны на гранитном заполнителе с активными добавками в виде микрокремнезема, золы-уноса и тонкомолотого гранулированного доменного шлака.

В статьях коллег из Республики Беларусь [5, 6] приведены результаты исследований прочностных и деформативных характеристик высокопрочных бетонов на гранитном заполнителе с учетом влияния различных пластифицирующих добавок, микрокремнезема и стальной фибры на прочность при сжатии, модуль упругости и вязкость разрушения при нагреве до 800 °С. Авторами исследований отмечено, что при нагреве до 350–400 °С в 30 % случаев происходит взрывообразное разрушение образцов во время испытания. Зависимости снижения прочности высокопрочных бетонов при нагреве имеют разную тенденцию (рис. 1).

Авторами настоящей статьи приведены результаты исследований прочностных и деформативных характеристик высокопрочных бетонов класса В100 на гранитном и базальтовом заполнителях при кратковременном нагреве от 100 до 800 °С с шагом 100 °С.

Методы испытания. Вещественный состав бетонных смесей исследованных высокопрочных бетонов приведен в табл. 1.

Изготовление бетонных образцов осуществлялось по ГОСТ 10180-2012 [13] с последующей выдержкой в камере нормального твердения в течение 28 суток. На образцах-кубах размерами 100 × 100 × 100 мм контролировался класс по прочности на сжатие ВБ.

Исследования призмочной прочности R_b и модуля упругости E_b высокопрочных бетонов класса В100 на граните и базальте при нагреве проводили по методике ГОСТ 24452-80 [14]

Таблица 1

Вещественный состав бетонных смесей

Table 1

Material composition of concrete mixtures

В100 на граните	В100 на базальте
Портландцемент ЦЕМ 052,5Н	Портландцемент ЦЕМ 052,5Н
Микрокремнезем уплотненный МКУ-85	Микрокремнезем уплотненный МКУ-85
Тонкомолотый гранулированный доменный шлак	Тонкомолотый гранулированный доменный шлак
Песок природный	Песок природный
Щебень фр. 4–8 мм (гранит)	Щебень фр. 5–10 мм (базальт)
Вода	Вода
Хим. добавка – суперпластификатор	Хим. добавка – суперпластификатор
В/Вяж = 0,24	В/Вяж = 0,25

Примечание. Содержание микрокремнезема в составе бетонной смеси не более 10 % от массы вяжущего.

на образцах-призмах размерами 70 × 70 × 280 мм. Перед испытаниями на осевое сжатие производился кратковременный нагрев образцов-призм в муфельной печи до заданной температуры с изотермической выдержкой в течение одного часа (рис. 2).

Следует отметить, что предварительный нагрев опытных бетонных образцов подтвердил склонность высокопрочных бетонов к взрывообразному разрушению и обусловил необходимость снижения скорости нагрева образцов (не более 50 °С/час) в процессе испытаний.

Диапазон исследованных температур находился в интервале от 100 до 800 °С с шагом 100 °С. Нагружение образцов-призм в нагретом состоянии производили ступенчато (прибавляя 10 % от разрушающей нагрузки на каждой ступени) до уровня 40 % от разрушающей нагрузки – для определения модуля упругости и до разрушения – для определения призмочной прочности.



Рис. 2. Общий вид установки для испытаний бетонов при кратковременном нагреве

Fig. 2. General view of the concrete test unit for short-term heating

По результатам испытаний построены графические зависимости коэффициентов условий работы γ_{bt} и β_{b^*} , характеризующих динамику изменчивости призмочной прочности (рис. 3) и модуля упругости (рис. 4) высокопрочных бетонов на граните и базальте, от температуры кратковременного нагрева.

Анализ результатов испытаний призмочной прочности при кратковременном нагреве высокопрочных бетонов класса В100 на гранитном и базальтовом заполнителях показал следующее (рис. 3). Кратковременный нагрев до температуры 100 °С приводит к снижению призмочной прочности исследуемых высокопрочных бетонов класса В100 на 20 % независимо от вида заполнителя. Снижение призмочной прочности высокопрочных

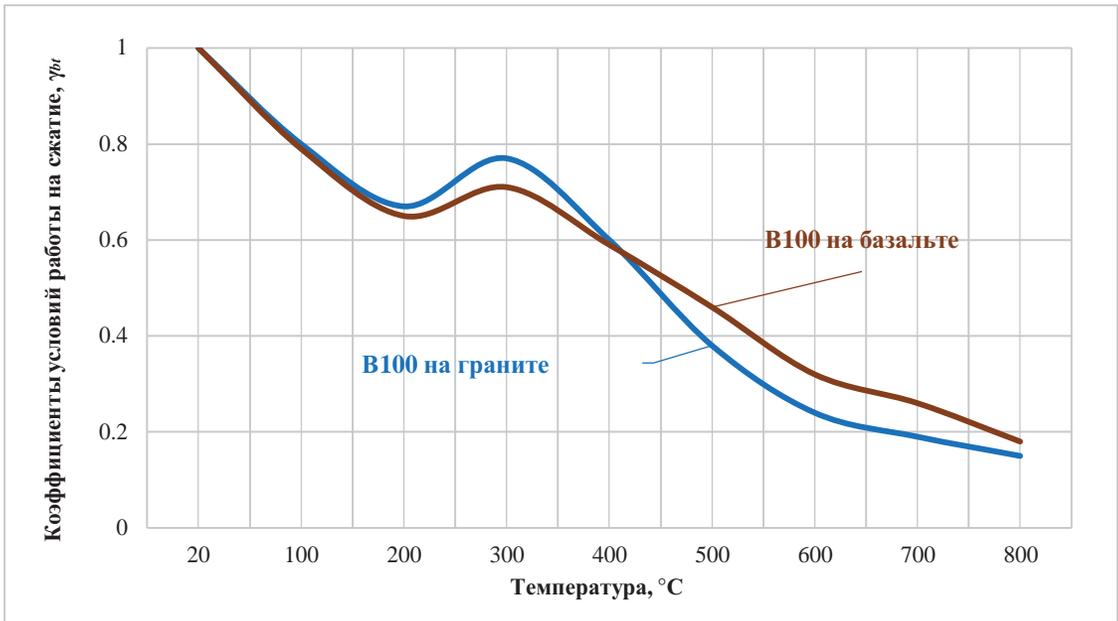


Рис. 3. Динамика изменения прочности на сжатие высокопрочных бетонов на граните и базальте при нагреве
Fig. 3. Dynamics of changes in compressive strength of high-strength granite and basalt concretes under heating

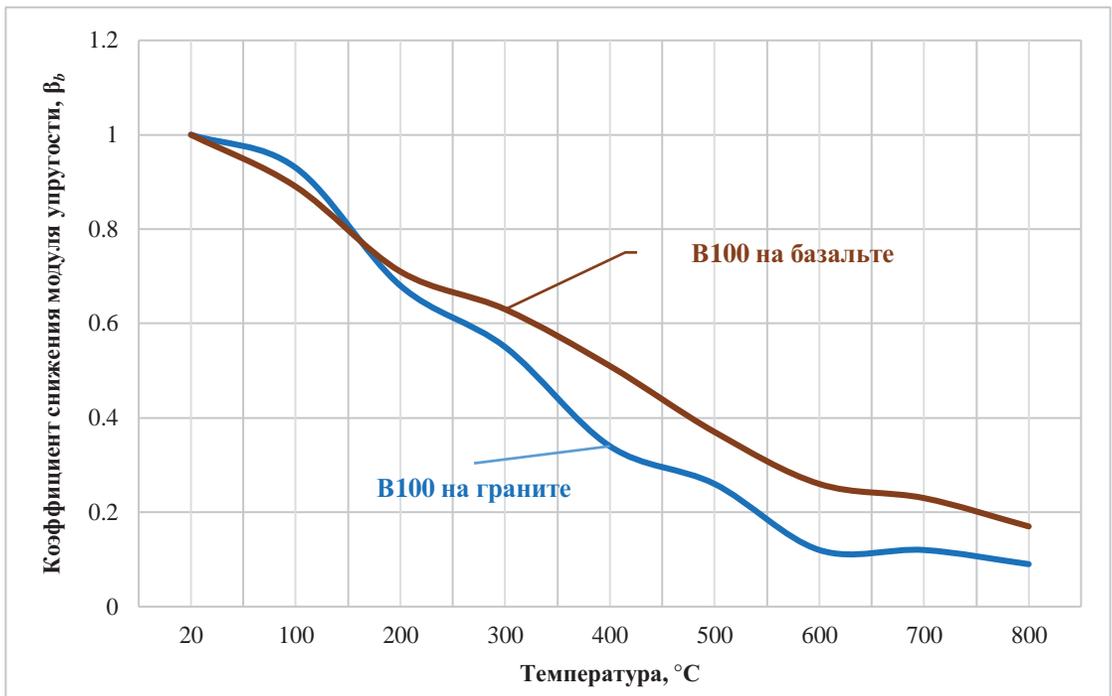


Рис. 4. Динамика изменения модуля упругости высокопрочных бетонов на граните и базальте при нагреве
Fig. 4. Dynamics of changes in elastic modulus of high-strength granite and basalt concretes under heating

бетонов при нагреве порядка 100 °С можно объяснить адсорбционным снижением прочности цементного камня. При нагревании бетона происходит более глубокое проникновение воды в микротрещины и микропоры структуры цементного камня, вследствие чего увеличивается истинная поверхность цементного камня, покрытая адсорбционным слоем воды, следовательно, уменьшается поверхностная энергия кристаллов цементного камня, способствуя возникновению и развитию существующих микротрещин при действии на бетон внешней нагрузки.

Дальнейший нагрев до температуры 200 °С также снижает призмную прочность ВБ на 35 % от первоначальной до нагрева.

В процессе испытаний была отмечена специфика поведения высокопрочных бетонов при кратковременном нагреве. Во всех опытах после нагрева до порядка 100–200 °С при открытии двери печи отмечалось интенсивное выделение в окружающую среду парогазовой смеси сизого цвета с едким запахом, характерным для сгорания органических соединений. При испытаниях контрольных образцов из обычного тяжелого бетона на портландцементе подобное явление не наблюдалось. Следовательно, можно предположить, что в диапазоне температур нагрева от 100 до 200 °С происходит выгорание компонентов химических добавок, используемых при изготовлении бетонной смеси высокопрочных бетонов. Данная особенность вызывает дополнительное нарушение межкристаллических связей в цементном камне за счет этого выгорания и приводит к дополнительному снижению призмной прочности бетона.

При последующем нагреве в интервале температур от 200 до 300 °С выявлено некоторое упрочнение высокопрочных бетонов. При 300 °С фактическая призмная прочность высокопрочных бетонов (от первоначальной до нагрева) составила: на граните – 75 %, на базальте – 70 %. Упрочнение высокопрочных бетонов в интервале температур 200–300 °С объясняется повышением прочности цементного камня за счет уплотнения его структуры вследствие удаления воды, адсорбированной гелем двухкальциевого силиката, а также усиленной кристаллизацией $\text{Ca}(\text{OH})_2$, упрочняющей цементный камень.

При нагреве свыше 300 °С наблюдалась устойчивая тенденция к снижению призмной прочности высокопрочных бетонов, что связано с нарушением структуры затвердевшего портландцемента из-за усиливающейся разнозначности деформаций гелеобразной части цементного камня и неразложившихся зерен цементного клинкера, а также из-за дегидратации $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Кроме того, одной из основных причин снижения прочности ВБ является возникновение дополнительных напряжений, обуславливающих нарушение связей между заполнителем и цементным камнем вследствие того, что затвердевший цемент, обезвоживаясь, дает усадку, а зерна заполнителя расширяются.

Интенсивность снижения призмной прочности вполне сопоставима для высокопрочных бетонов на граните и базальте. При этом призмная прочность на сжатие высокопрочных бетонов на базальтовом заполнителе при нагреве в интервале температур 500–700 °С на 20–25 % выше, чем у высокопрочного бетона на гранитном заполнителе, что связано с большей устойчивостью базальтового заполнителя к высоким температурам. При нагреве в указанном диапазоне температур базальтовый заполнитель практически не меняет свойства, в то время как гранитный заполнитель претерпевает полиморфные превращения структуры при температуре 573 °С с увеличением объема и растрескиванием.

При температуре нагрева 800 °С призмная прочность высокопрочного бетона на гранитном заполнителе составила 15%, на базальтовом заполнителе – 20% от призмной прочности до нагрева. Преимущество базальтового заполнителя связано с его высокой термостойкостью и первоначально более высокой прочностью базальтового заполнителя по отношению к гранитному заполнителю.

Результаты испытаний модуля упругости высокопрочных бетонов при нагреве приведены в табл. 2 и 3 и на рис. 5.

Анализ результатов испытаний модуля упругости при кратковременном нагреве высокопрочных бетонов класса В100 на гранитном и базальтовом заполнителях показал следующее (рис. 4). Начальный модуль упругости при сжатии в возрасте 28 суток высокопрочного бетона класса В100 на гранитном заполнителе меньше начального модуля упругости высокопрочного бетона класса В100 на базальтовом заполнителе на 12%, что связано с наибольшей начальной прочностью базальтового заполнителя.

При кратковременном нагреве модули упругости при сжатии исследованных видов высокопрочных бетонов снижаются. Интенсивность снижения модулей упругости высокопрочных бетонов на граните и базальте близка по динамике, но при этом значения модулей упругости высокопрочного бетона на базальтовом заполнителе значительно выше, чем на гранитном.

При нагреве до температуры 100 °С модули упругости при сжатии E_{bt} высокопрочных бетонов на гранитном и на базальтовом заполнителях снизились примерно на 7 и 11% от начального значения до нагрева соответственно. При нагреве до температуры 300 °С отмечено снижение на 45 и 37% от начального значения до нагрева соответственно, а при нагреве до 500 °С модули упругости снизились на 74 и 63% от начального значения до нагрева соответственно.

При нагреве в интервале температур от 300 до 800 °С наибольшая тенденция снижения модуля упругости проявилась для высокопрочного бетона на гранитном заполнителе.

Таблица 2

Результаты испытания модуля упругости высокопрочного бетона класса В100 на гранитном заполнителе при кратковременном нагреве

Table 2

Test results for elastic modulus of high-strength B100 concrete with granite aggregate under short-term heating

№ п/п	Температура, °С	Среднее значение модуля упругости, E_{bt} , МПа	Коэффициент снижения модуля упругости, β_b
1	20	52 829	1,00
2	100	49 133	0,93
3	200	35 800	0,68
4	300	28 832	0,55
5	400	17 779	0,34
6	500	13 680	0,26
7	600	6 189	0,12
8	700	6 086	0,12
9	800	4 871	0,09

Таблица 3

Результаты испытания модуля упругости высокопрочного бетона класса В100 на базальтовом заполнителе при кратковременном нагреве

Table 3

Test results for elastic modulus of high-strength B100 concrete with basalt aggregate under short-term heating

№ п/п	Температура, °С	Среднее значение модуля упругости, E_{br} , МПа	Коэффициент снижения модуля упругости, V_b
1	20	59 276	1,00
2	100	52 473	0,89
3	200	42 210	0,71
4	300	37 146	0,63
5	400	29 959	0,51
6	500	22 145	0,37
7	600	15 525	0,26
8	700	13 424	0,23
9	800	10 062	0,17

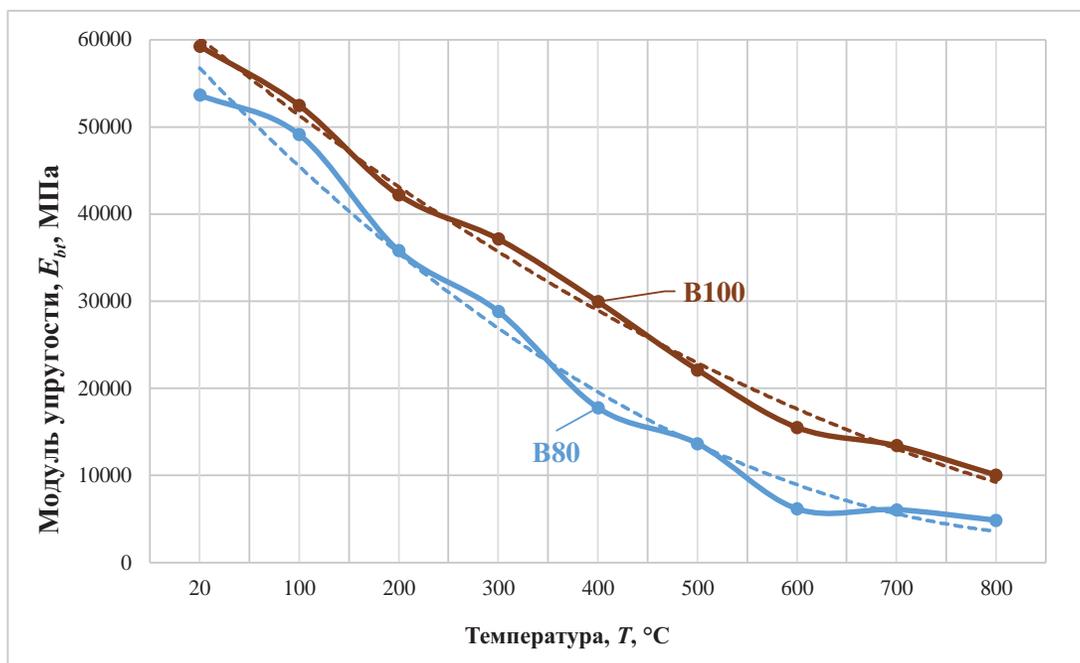


Рис. 5. Результаты испытаний модуля упругости при сжатии высокопрочных бетонов класса В100 на гранитном заполнителе и на базальтовом заполнителе при кратковременном нагреве

Fig. 5. Test results for elastic modulus when compressing high-strength B100 concrete with granite aggregate under short-term heating

Уменьшение модулей упругости высокопрочных бетонов происходит за счет повышения деформативности бетона и увеличения их упругих деформаций, а также за счет снижения призмной прочности при нагреве. Увеличение деформативности высокопрочных бетонов при нагреве связано с нарушениями и изменениями структуры высокопрочных бетонов.

Полученные тенденции изменчивости прочностных и деформативных свойств ВБ на граните и базальте имеют хорошее совпадение с результатами, изложенными в статье корейских коллег [9].

По результатам лабораторных испытаний построены диаграммы деформирования высокопрочных бетонов при нагреве в диапазоне температур от 100 до 800 °С, которые приведены на рис. 6 и 7. Анализ диаграмм по зависимости «напряжения – деформации» ($\sigma - \epsilon$) показывает, что до температур нагрева порядка 400 °С зависимости ($\sigma - \epsilon$) для исследованных видов ВБ носят практически линейный характер (однолинейная диаграмма), а двухлинейный характер диаграмм деформирования начинает проявляться при нагреве свыше 500 °С.

Предельные деформации сжатия высокопрочного бетона на граните больше, чем высокопрочного бетона на базальте. При нагреве до 100 °С относительные предельные деформации сжатия ϵ_{b2} ВБ на граните составили $2,4 \times 10^{-3}$, ВБ на базальте – $1,9 \times 10^{-3}$. При нагреве до 200 °С относительные предельные деформации сжатия ϵ_{b2} ВБ на граните и базальте составили соответственно $2,6 \times 10^{-3}$ и $2,3 \times 10^{-3}$, при нагреве до 400 °С – соответственно $3,9 \times 10^{-3}$ и $3,0 \times 10^{-3}$, при нагреве до 800 °С – соответственно $5,6 \times 10^{-3}$ и $4,4 \times 10^{-3}$. В целом предельные деформации сжатия ϵ_{b2} высокопрочных бетонов на граните и базальте при нагреве почти в 2 раза превысили теоретические предельные деформации ϵ_{b2} , установленные в СП 63.13330.2018 [15] для ВБ класса по прочности на сжатие В100 (0,0028) при нормальной температуре.

Предельные деформации сжатия ϵ_{b2} высокопрочных бетонов на гранитном и базальтовом заполнителях при нагреве изменяются по линейному закону.

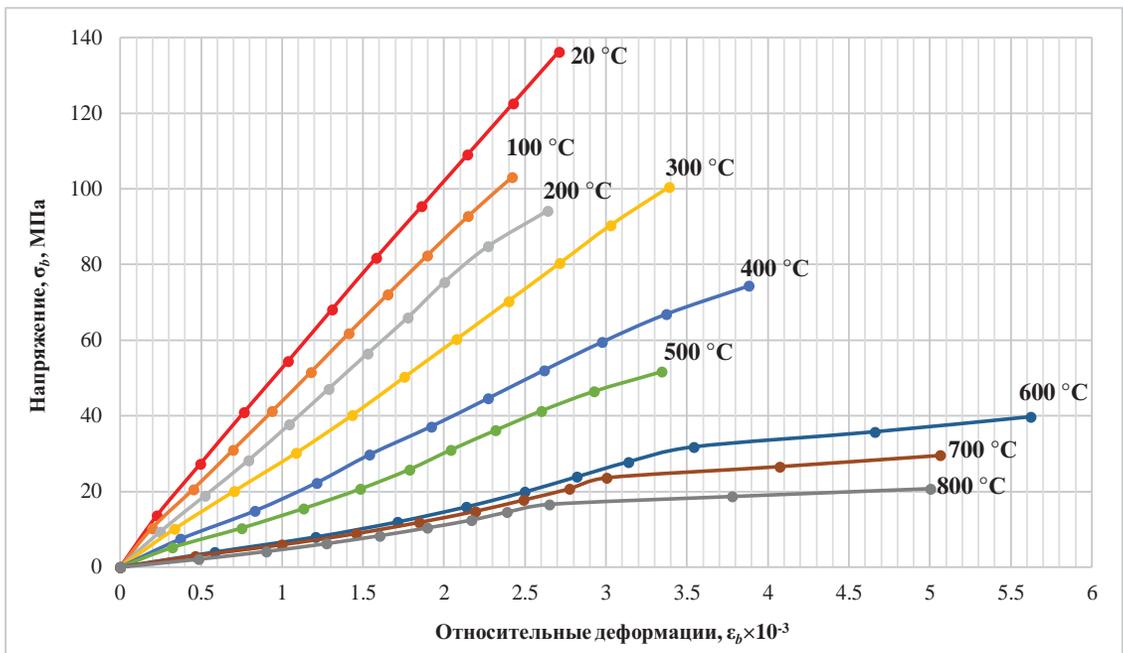


Рис. 6. Диаграммы деформирования высокопрочного бетона класса В100 на граните

Fig. 6. Diagrams of deformation of high-strength B100 granite concrete

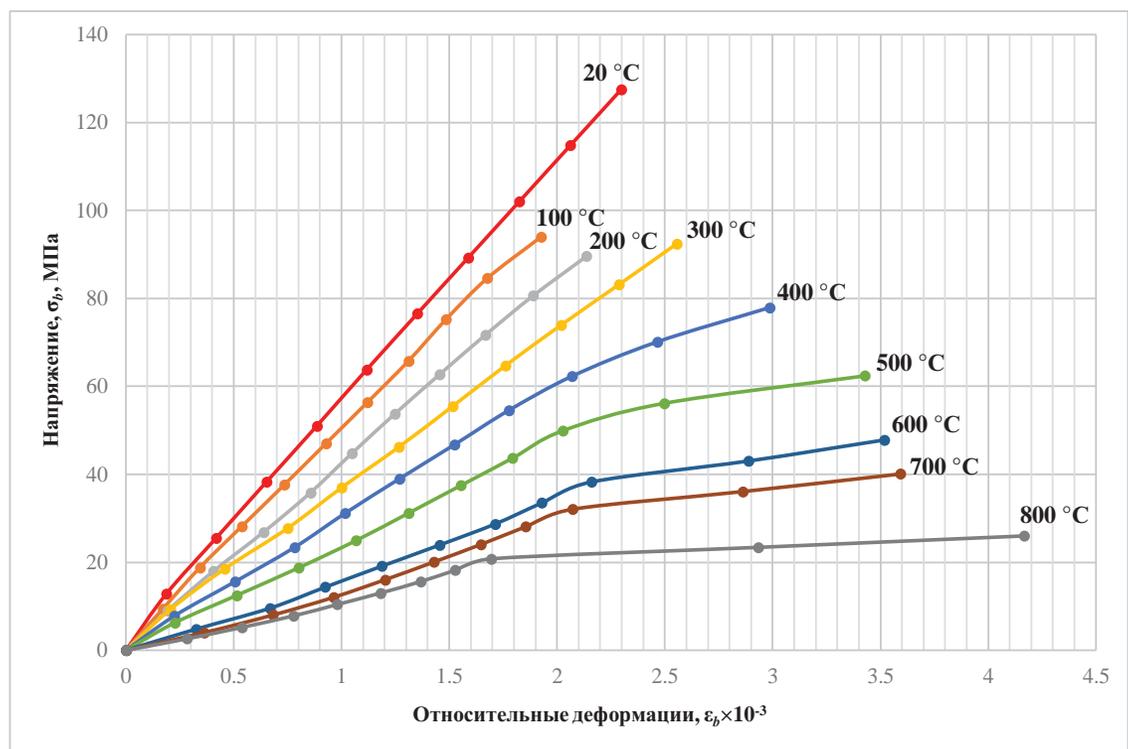


Рис. 7. Диаграммы деформирования высокопрочного бетона класса В100 на базальте
Fig. 7. Diagrams of deformation of high-strength B100 basalt concrete

Заключение

1. Экспериментальные коэффициенты условий работы γ_{bt} и β_b высокопрочных бетонов класса по прочности на сжатие В100 на гранитном и базальтовом заполнителях могут быть рекомендованы для расчетов огнестойкости железобетонных конструкций, изготовленных из этих видов бетонов.

2. Влияние вида заполнителя (базальта и гранита) на динамику изменчивости прочностных свойств высокопрочного бетона незначительное, поскольку базальт и гранит относятся к группе силикатных заполнителей, а полученные экспериментальные данные имеют небольшой разброс значений (в пределах 10–12%).

3. При нагреве свыше 200 °С заметна тенденция к увеличению разницы значений модуля упругости между высокопрочными бетонами класса по прочности на сжатие В100 на гранитном и базальтовом заполнителях. Модуль упругости высокопрочного бетона на базальте менее интенсивно снижается при нагреве и имеет более высокие значения по отношению к модулю упругости высокопрочного бетона на граните.

4. Диаграммы деформирования ВБ на граните и базальте при нагреве до 400 °С носят упругий однолинейный характер, а при нагреве свыше 500 °С – двухлинейный характер.

5. Предельные деформации сжатия ϵ_{b2} высокопрочных бетонов на граните и базальте при нагреве почти в 2 раза превышают теоретические предельные деформации ϵ_{b2} , установленные в СП 63.13330.2018 [15] для ВБ класса по прочности на сжатие В100 (0,0028) при нормальной температуре, что свидетельствует о необходимости продолжения

исследований высокопрочных бетонов разных видов с построением диаграмм деформирования по зависимости ($\sigma - \epsilon$) при нагреве для создания банка исходных данных и разработки диаграммного метода расчета огнестойкости железобетонных конструкций из высокопрочных бетонов.

Список литературы

1. Некрасов К.Д., Жуков В.В., Гуляева В.Ф. Тяжелый бетон в условиях повышенных температур. Москва: Стройиздат; 1972.
2. Милованов А.Ф. Стойкость железобетонных конструкции при пожаре. Сопротивление железобетонных конструкций при пожаре. Москва: Стройиздат; 1998.
3. Schneider U. Concrete at high temperatures - A general review. Journal of Fire Safety. 1988;13(1):55–68. [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(88\)90033-1](https://doi.org/10.1016/0379-7112(88)90033-1)
4. СП 468.1325800.2019. Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности. Москва: Стандартинформ; 2020.
5. Леонович С.Н., Литвиновский Д.А. Аналитические зависимости прочностных, деформативных, силовых и энергетических параметров высокопрочного бетона при нагреве. Вестник БНТУ. 2011;(4):30–34.
6. Леонович С.Н., Литвиновский Д.А. Вязкость разрушения высокопрочного бетона после воздействия высокой температуры. Строительные материалы. 2017;(11):12–17.
7. Kirchhof L.D., Lima R.C.A., Santos A.B., Quispe A.C., Silva Filho L.C.P. Effect of moisture content on the behavior of high strength concrete at high temperatures. Matéria (Rio de Janeiro). 2020;25(1):e-12573. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0898>
8. Phan L.T., Carino N. Mechanical properties of high-strength concrete at elevated temperatures [internet]. NISTIR 6726, National Institute of Standards and Technology; 2001. Available at: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=860330
9. Yoon M., Kim G., Kim Y., Lee T., Choe G., Hwang E., Nam J. Creep behavior of high-strength concrete subjected to elevated temperatures. Materials. 2017;10(7):781. <https://doi.org/10.3390/ma10070781>
10. Diederichs U., Jumppanen U.M., Penttala V. Behavior of high strength concrete at high temperatures. Report No. 92. Department of Structural Engineering, Helsinki University of Technology; 1989.
11. 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. Construction of Unique Buildings and Structures. 2021;96:9601.
12. 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):1291–1300. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00580-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00580-4)
13. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. Москва: Стандартинформ; 2012.
14. ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. Москва: Стандартинформ; 2008.
15. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП 52-01-2003. Москва: Стандартинформ; 2019.

References

1. Nekrasov K.D., Zhukov V.V., Gulyaeva V.F. Heavy concrete at elevated temperatures. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1972. (In Russian).
2. Milovanov A.F. Resistance of reinforced concrete structures in case of fire. Resistance of reinforced concrete structures in case of fire. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1998. (In Russian).
3. Schneider U. Concrete at high temperatures - A general overview. Journal of Fire Safety. 1988;13(1):55–68. [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(88\)90033-1](https://doi.org/10.1016/0379-7112(88)90033-1)

4. SP 468.1325800.2019. Concrete and reinforced concrete structures. Rules for ensuring of fire resistance and fire safety. Moscow: Standartinform Publ.; 2020. [In Russian].
5. Leonovich S.N., Litvinovsky D.A. Analytical dependences of strength, deformative, force and energy parameters of high-strength concrete under heating. Vestnik BNTU. 2011;(4):30–34. [In Russian].
6. Leonovich S.N., Litvinovsky D.A. The fracture toughness of high-strength concrete after exposure to high temperature. Stroitel'nye Materialy = Construction Materials. 2017;(11):12–17. [In Russian].
7. Kirchhof L.D., Lima R.C.A., Santos A.B., Quispe A.C., Silva Filho L.C.P. Effect of moisture content on the behavior of high strength concrete at high temperatures. Matéria (Rio de Janeiro). 2020;25(1):e-12573. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0898>
8. Phan L.T., Carino N. Mechanical properties of high-strength concrete at elevated temperatures [internet]. NISTIR 6726, National Institute of Standards and Technology; 2001. Available at: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=860330
9. Yoon M., Kim G., Kim Y., Lee T., Choe G., Hwang E., Nam J. Creep behavior of high-strength concrete subjected to elevated temperatures. Materials. 2017;10(7):781. <https://doi.org/10.3390/ma10070781>
10. Diederichs U., Jumppanen U.M., Penttala V. Behavior of high strength concrete at high temperatures. Report No. 92. Department of Structural Engineering, Helsinki University of Technology; 1989.
11. 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. Construction of Unique Buildings and Structures. 2021;96:9601.
12. 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):1291–1300. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00580-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00580-4)
13. State Standard 10180-2012. Concretes. Methods for strength determination using reference specimens. Moscow: Standartinform Publ.; 2012. [In Russian].
14. State Standard 24452-80. Concretes. Methods of prismatic, compressive strength, modulus of elasticity and Poisson's ratio determination. Moscow: Standartinform Publ.; 2008. [In Russian].
15. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. SNIP 52-01-2003. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. [In Russian].

Информация об авторах / Information about the authors

Ирина Сергеевна Кузнецова , канд. техн. наук, заведующая лабораторией температуростойкости и диагностики бетона и железобетонных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: 1747139@mail.ru

Irina S. Kuznetsova , Cand. Sci. (Engineering), Head of the Laboratory of Temperature Resistance and Diagnosis of Concrete and Reinforced Concrete Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: 1747139@mail.ru

Яна Владимировна Зубова, аспирант, ведущий инженер лаборатории температуростойкости и диагностики бетона и железобетонных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: 1747139@mail.ru

Iana V. Zubova, Graduate Student, Leading Engineer of the Laboratory of Temperature Resistance and Diagnosis of Concrete and Reinforced Concrete Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: 1747139@mail.ru

 Автор, ответственный за переписку / Corresponding author