

И.С. КУЗНЕЦОВА✉, В.Г. РЯБЧЕНКОВА, Д.В. АКОПЯН

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА ПРИ ПОЖАРЕ

Аннотация

Введение. Высокопрочный бетон обладает высокой механической прочностью и рядом других преимуществ, но склонен к взрывообразному разрушению при быстром высокотемпературном нагреве (при пожаре), что приводит к уменьшению сечений железобетонных конструкций и преждевременному наступлению предела огнестойкости по потере несущей способности (R). Результаты исследований огнестойкости конструкций из высокопрочных бетонов отсутствуют в строительной нормативной базе. Расчетный метод оценки огнестойкости конструкций из высокопрочного бетона также не проработан с апробацией огневыми испытаниями.

Цель. Экспериментальное исследование огнестойкости железобетонных плитных конструкций из высокопрочных бетонов классов В60 и В100 с учетом влияния процесса взрывообразного разрушения высокопрочного бетона при пожаре.

Материалы и методы. Огневые испытаниям подлежали серии натуральных плит, изготовленные из высокопрочного бетона классов В60 и В100 с добавкой микрокремнезема в количестве 6,75, 9 и 13%, с армированием стальной арматурой класса А500С. Для сопоставления результатов были испытаны контрольные плиты из обычного тяжелого бетона класса В30. По результатам огневых испытаний определялись пределы огнестойкости натуральных плит из высокопрочного бетона и специфика взрывообразного разрушения высокопрочного бетона при пожаре. Установлен упрощенный метод оценки предела огнестойкости для плитных конструкций из высокопрочного бетона на микрокремнеземе.

Результаты. В статье приведены результаты экспериментальных исследований и огневых испытаний огнестойкости плитных конструкций из высокопрочного бетона классов В60 и В100 с добавкой микрокремнезема в количестве 6,75, 9 и 13 %, с армированием стальной арматурой класса А500С.

Выводы. Эффективность исследований определяется развитием расчетного метода оценки огнестойкости для конструкций из высокопрочного бетона при проектировании. По результатам работы выявлена необходимость дальнейших исследований огнестойкости разных типов конструкций из высокопрочного бетона с вариациями классов и видов высокопрочных бетонов в зависимости от их вещественно-количественного состава.

Ключевые слова: высокопрочный бетон, добавка микрокремнезема, пожар, натурные плиты, огневые испытания, предел огнестойкости, взрывообразное разрушение бетона

Для цитирования: Кузнецова И.С., Рябченкова В.Г., Акопян Д.В. Исследование поведения железобетонных конструкций из высокопрочного бетона при пожаре // *Бетон и железобетон*. 2023. № 1 (615). С. 14–22. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-1\(615\)-14-22](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-1(615)-14-22)

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследования выполнялись в рамках государственного задания на оказание государственных услуг Федеральному автономному учреждению «Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве», утвержденного Минстроем России 30.12.2020 № 069-00004-21-00 на 2021 год и на плановый период 2022 и 2023 годов, и финансировались из средств федерального бюджета.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 07.12.2022

Поступила после рецензирования 11.01.2023

Принята к публикации 19.01.2023

I.S. KUZNETSOVA✉, V.G. RYABCHENKOVA, D.V. AKOPYAN

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

STUDY OF THE BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES MADE FROM HIGH-STRENGTH CONCRETE DURING FIRE

Abstract

Introduction. High-strength concrete has high mechanical strength and a number of other advantages, but is prone to explosive destruction during rapid high-temperature heating (in case of fire), which leads to a decrease in the cross-sections of reinforced concrete structures and premature occurrence of the fire resistance limit by loss of bearing capacity (R). The results of studies on the fire resistance of structures made of high-strength concrete are not available in the construction regulatory framework. The calculation method for assessing the fire resistance of structures made of high-strength concrete with fire testing has not been worked out too.

Aim. Experimental study of fire resistance of reinforced concrete slab structures made of high-strength concrete of B60 and B100 classes, taking into account the influence of the process of explosive destruction of high-strength concrete in case of fire.

Materials and methods. Concrete samples and full-scale slabs made of high-strength concrete with the addition of microsilica of B60 and B100 classes were subject to research. Full-scale solid-section slabs made of high-strength concrete of B60–B100 classes with steel reinforcement of A500C class were subject to fire tests. Based on the results of fire tests, the limits of fire resistance of full-scale slabs of high-strength concrete and the specifics of explosive destruction of high-strength concrete in a fire were determined.

Results. The article presents the results of experimental studies and fire tests of the fire resistance of slab structures made of high-strength concrete.

Conclusions. The effectiveness of research is determined by the development of a computational method for assessing fire resistance for structures made of high-strength concrete during design. Based on the results of

the work, the need for further studies of the fire resistance of different types of structures made of high-strength concrete, with variations of high-strength concrete classes and types, depending on their material and quantitative composition, was revealed.

Keywords: high-strength concrete, microsilica additive, fire, full-scale slabs, fire tests, fire resistance limit, explosive destruction of concrete

For citation: Kuznetsova I.S., Ryabchenkova V.G., Akopyan D.V. Study of the behavior of reinforced concrete structures made from high-strength concrete during fire. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2023. No. 1 (615), pp. 14–22. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-1\(615\)-14-22](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-1(615)-14-22)

Author contribution statements

All authors have made an equivalent contribution to the preparation of the article.

Funding

The research was carried out within the framework of the state task for the provision of public services to the Federal autonomous institution “Federal center for regulation, standardization and technical conformity assessment in construction”, approved by the Ministry of construction of the Russian Federation on 30.12.2020 No. 069-00004-21-00 for 2021 and for the planning period of 2022 and 2023 and was funded from the federal budget.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 07.12.2022

Revised 11.01.2023

Accepted 19.01.2023

В современном строительстве высокопрочный бетон (далее – ВБ) является часто востребованным строительным материалом при возведении ответственных конструкций за счет позиционирования его высокой механической прочности, газо- и водонепроницаемости, коррозионной стойкости, стойкости к воздействию агрессивных сред и истиранию. Перечисленные преимущества, конечно, не подлежат сомнениям.

Вместе с тем широкому кругу специалистов известно, что для ВБ характерна склонность к взрывообразному разрушению при быстром нагреве (при пожаре), приводящему к уменьшению сечения железобетонной конструкции и, как следствие, снижению предела огнестойкости по потере несущей способности.

Исследования огнестойкости натуральных конструкций из ВБ путем огневых испытаний в нашей стране практически не проводились либо носили частный характер без внесения результатов испытаний в строительную нормативную базу.

В нормативных документах отсутствуют данные о влиянии воздействия высоких температур на динамику снижения прочности высокопрочных бетонов. При проектировании зданий с обеспечением огнестойкости железобетонных конструкций из ВБ ранее применялись коэффициенты условий работы при нагреве, как и для обычного тяжелого бетона. Однако правомочность такого допущения не проверена экспериментально, а на практике может быть далека от действительности.

Также неизвестно, насколько отличаются пределы огнестойкости железобетонных конструкций из ВБ от пределов огнестойкости аналогичных конструкций из обычных тяжелых бетонов.

Правила оценки огнестойкости железобетонных конструкций из ВБ не отражены конкретикой в нормативных документах. В разделе 5 СП 468.1325800.2019 [1] отмечено, что для высокопрочных бетонов классов В60 и выше коэффициенты условий работы и другие расчетные характеристики при нагреве следует определять экспериментально.

В европейских нормах (Еврокод EN 1992-1-2:2004 [2]) есть указания о том, что для бетона классов $80/95 < C \leq 90/105$ характерно хрупкое разрушение при пожаре. Для конструкций из бетона классов от C55/67 до C80/95 при процентном содержании микрокремнезема более 6 % по массе цемента необходимо предусматривать специальные мероприятия по защите от хрупкого взрывообразного разрушения бетона при пожаре.

Повышенные прочностные характеристики ВБ достигаются, как правило, за счет применения минеральных и химических добавок. Наиболее часто применяемыми являются минеральные тонкомолотые добавки на основе микрокремнезема, золы-уноса и доменных шлаков.

Структурообразование ВБ имеет сходные черты с процессами, протекающими в обычном бетоне. Основной отличительной особенностью ВБ является более низкая пористость, повышение однородности структуры, уменьшение количества макродефектов в цементном камне и контактной зоне. Это достигается за счет снижения расхода воды по сравнению с обычным бетоном, уплотнения структуры в результате замещения цемента тонкомолотой минеральной добавкой и уплотнения структуры контактной зоны между цементным камнем и заполнителем. Присутствие тонкодисперсных наполнителей и добавок снижает количество портландита и этtringита и обеспечивает заполнение капиллярных пор продуктами гидратации [3–5], что снижает пористость и приводит к достижению высокой прочности бетона.

Рядом исследователей установлено [8–12], что ВБ имеет высокий потенциал к взрывообразному разрушению при высокотемпературном нагреве (при пожаре). Взрывообразный характер проявлялся в нескольких группах образцов, подвергнутых одинаковым условиям испытания. Неустойчивое поведение затрудняет точный прогноз взрывного разрушения ВБ при пожаре. Существует мнение, что предрасположенность к такому разрушению у ВБ связана с условиями проведения эксперимента, наличием тонкомолотой добавки и, как следствие, низкой проницаемостью, ограничивающей возможность нагретой влаги мигрировать через поры в бетоне. Это является результатом увеличения давления пара внутри цементного камня с ростом температуры и продолжается до тех пор, пока давление пара не приведет к взрывообразному разрушению нагретого бетона [8].

Поскольку взрывообразное разрушение бетона наблюдается не только в конструкциях из высокопрочного бетона, но и из обычного тяжелого бетона, в рассматриваемой научно-исследовательской работе ставилась задача определения характерного отличия протекания процесса взрывообразного разрушения в конструкциях из обычного тяжелого бетона и ВБ на микрокремнеземе. Для изучения специфики взрывообразного разрушения ВБ был выбран тип плитных конструкций для проведения огневых испытаний.

Помимо изучения специфики характера взрывообразного разрушения ВБ на микрокремнеземе, целью проведенных лабораторных исследований и огневых испытаний являлось получение экспериментальных данных о:

- фактических пределах огнестойкости железобетонных плит из ВБ на микрокремнеземе;
- геометрических параметрах повреждений плит от взрывообразного разрушения бетона (глубина и площадь распространения дефекта);
- влиянии процентного содержания микрокремнезема в ВБ классов В60 и В100 на интенсивность

взрывообразного разрушения при пожаре.

Огневые испытания проведены для шести серий железобетонных плит сплошного сечения, изготовленных с вариацией двух классов высокопрочных бетонов на микрокремнеземе (В60, В80, В100), с вариацией содержания микрокремнезема 6,75 и 9 % – для бетонов класса В60, 9 и 13 % – для бетонов класса В100, 9 % – для бетонов класса В80.

Для всех серий ВБ применены идентичные базовые сырьевые материалы:

- вяжущее – портландцемент со шлаком ЦЕМ II/A-Ш 42,5Н, ГОСТ 31108-2016 [17];
- крупный заполнитель – гранитный щебень, ГОСТ 8267-93 [18], фракции 5–20 мм;
- мелкий заполнитель – песок класса I, ГОСТ 8736-2014 [19], с модулем крупности 2,2 мм;
- модификатор бетона марки МБ 10-50С;
- вода затворения.

В некоторые серии ВБ вводился порообразователь – СНВ.

Для сопоставительного анализа была изготовлена седьмая контрольная серия натуральных плитных образцов из обычного тяжелого бетона класса В30.

Геометрические параметры и армирование всех серий плит были идентичными. Натурные плиты имели габариты 4200 × 1200 × 150 мм (длина × ширина × толщина). Армирование плит, однорядное, производилось горячекатаной стержневой арматурой класса А500С в количестве 7 стержней диаметром 12 мм при толщине нижнего защитного слоя касательно к арматуре – 20 мм.

Время от начала затворения бетонной смеси (время отправки машины-бетоновоза с бетонного завода) до ее укладки в опалубку крупноразмерных плит составляло ~ (1,0–1,5) часа. Температура воздуха – 35 °С. После заливки бетона все плиты были промаркированы и укрыты полиэтиленовой пленкой (рис. 1).

Твердение бетона плит осуществлялось в течение 28 суток хранения под пленкой с периодическим



Рис. 1. Фрагмент процесса изготовления натуральных плит на площадке НИЭЦ «Стройтест»

Fig. 1. Fragment of the process of full-scale plates manufacturing at the site of the NIETs "Stroytest"

поливом плит водой. Далее плиты были распалублены и штабелированы на площадке НИЭЦ «Стройтест» с установкой прокладок (устройство продухов для сушки бетона). Возраст бетона плит к моменту огневых испытаний составлял не менее 1,5 месяцев.

Огневые испытания натуральных плит проведены по методикам ГОСТ 30247.0-94 [13] и ГОСТ 30247.1-94 [14] в специализированном испытательном центре – ООО «Независимый Испытательный и Экспертный Центр «Стройтест» (ООО «НИЭЦ «Стройтест») в г. Алексине Тульской области.

В ходе огневых испытаний воспроизводилось двустороннее шарнирное опирание плит (статически определимая схема работы) при рабочем пролете 4000 мм (рис. 2).

Перед огневыми испытаниями (не менее чем за 1 час до начала испытания) плиты нагружались равномерно распределенной нагрузкой, идентичной во всех сериях плит и равной 720 кг/м² с учетом собственного веса конструкций и коэффициента перегрузки, равного 1,2 по СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия» [20] (рис. 3). Нагружение плит поддерживалось постоянным до окончания огневого испытания.

Непосредственно перед огневыми испытаниями из плит всех серий отбирались образцы для контроля влажности бетона по ГОСТ 12730.2-2020 [21] в лабораторных условиях, которые герметично упаковывались и доставлялись в лабораторию НИИЖБ. Фактическая влажность бетона в сериях плит варьировалась в пределах 3,4–4,2 %.

В ходе нагружения и в процессе огневого испытания производились замеры прогибов плит в середине пролета при помощи струнных прогибомеров с электронной шкалой.

Контроль температур в пространстве огневой камеры печи осуществлялся при помощи печных термопар. Помимо печных термопар, при изготовлении плит в тело бетона на нижнюю арматуру

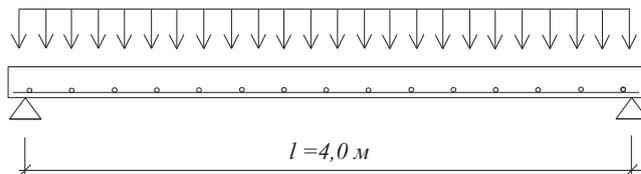


Рис. 2. Принципиальная схема нагружения опытных плит равномерно-распределенной нагрузкой при огневых испытаниях
Fig. 2. Schematic diagram of loading of experimental plates with evenly distributed load during fire tests

устанавливались термопары в соответствии с требованиями пункта 7.3.1 ГОСТ 30247.1-94 [14] в количестве 5-ти термопар на каждую испытываемую плиту.

Огневые испытания плит проводились до момента наступления одного из предельных состояний огнестойкости: по потере несущей способности (R), потере целостности (E) и потере теплоизолирующей способности (I) по ГОСТ 30247.1-94 [14]. Во всех сериях плит предельное состояние наступало по признаку потери несущей способности – по достижению предельного прогиба ($L/20$, где L – пролет плиты).

В процессе огневых испытаний всех серий плит фиксировалось время начала и окончания взрывообразного разрушения бетона, его периодичность и интенсивность.

По результатам огневых испытаний устанавливались фактические пределы огнестойкости плит. После остывания плит производился их визуальный осмотр, фиксировались параметры повреждений нагреваемой бетонной поверхности (трещины и сколы бетона, их глубина и размеры).

Во всех сериях плит из ВБ на микрокремнеземе (серии 1–6) процесс взрывообразного разрушения бетона начинался через 7–9 минут от начала огневого воздействия и прекращался за 5–10 минут до наступления предельного состояния по достижению предельного прогиба ($L/20$). Интенсивность взрывообразного разрушения бетона на протяжении всего времени огневого испытания была различной. На начальной стадии взрывообразного разрушения, в течение примерно 10 минут, звуковой эффект напоминал приглушенные множественные хлопки, подобно звуку хлопков попкорна при жарке, а через смотровое окно наблюдалось непрерывное осыпание или отстреливание множества мелких частиц бетона размером 3–10 мм (в виде «каменного дождя») с нижней нагреваемой поверхности. Через 20 минут от

начала огневого воздействия громкость хлопков усиливалась, но частота их уменьшалась (периодичность между звуками взрывов составляла 2–5 сек). Через 25–30 минут от начала испытания слышны резкие взрывообразные одиночные звуки, происходящие с интервалом 10–40 сек. Наблюдались отстрелы щепады бетона с боковых угловых граней плит с разлетом осколков вне камеры печи на несколько метров. Такой неравномерный и длительный характер протекания процесса взрывообразного разрушения ВБ в плитах довольно специфичный и имеет значительное распространение по площади бетонной поверхности плит. Глубина повреждения бетонной поверхности, вследствие взрывообразного разрушения, составляла в среднем порядка 10 мм, что ускоряло прогрев арматуры.

Минимальная интенсивность взрывообразного разрушения и повреждаемость бетона наблюдались в серии плит класса В60 из ВБ с содержанием микрокремнезема 6,75 % (серия 1). При этом повреждение целостности поверхностного слоя бетона со стороны обогреваемой поверхности распространилось на ~10 % площади плит и на глубину до 10 мм. Оголение арматуры плит отсутствовало (рис. 4).

Наибольшая интенсивность взрывообразного разрушения и существенная повреждаемость бетона наблюдались в сериях плит классов В60, В80 и В100 из ВБ с содержанием микрокремнезема 9 % (серии 2, 4, 6). Повреждения целостности бетона со стороны обогреваемой поверхности распространялись на ~(60–70) % площади плит и на глубину до 5–8 мм. Оголение арматуры по площади плит отсутствовало, за исключением локальных участков арматуры в угловых зонах вблизи продольных граней, где глубина сколов была наиболее значительной (рис. 5–7).

Таким образом, положение Еврокода EN 1992-1-2:2004 [2] о том, что для ВБ с содержанием микрокремнезема более 6 % по массе цемента необходимо предусматривать специальные мероприятия



Рис. 3. Характерный вид плит серии 6 под нагрузкой перед огневым испытанием
Fig. 3. Characteristic view of the series 6 plates under load before the fire test



Рис. 4. Вид обогреваемой поверхности плиты серии 1 (6,75 % микрокремнезема в ВБ) после огневого испытания
Fig. 4. View of the heated surface of the series 1 plate (6.75 % of microsilica in HSC) after the fire test

по защите от хрупкого взрывообразного разрушения бетона при пожаре, подтвердилось результатами проведенных исследований.

Предельное состояние всех серий плит в процессе огневого испытания наступало при достижении предельного прогиба с последующим обрушением плит через 1–2 минуты. При этом в сериях 1–6 плит из ВБ средняя температура нагрева арматуры в момент наступления предельного состояния составляла 500–550 °С, а максимальная температура на необогреваемой поверхности плит достигала 70 °С.

В конструкциях из обычного тяжелого бетона процесс взрывообразного разрушения бетона при пожаре происходит иначе. Разрушение, как правило, начинается через 10–15 минут от начала огневого воздействия и происходит в виде нескольких одиночных резких взрывных эффектов разной громкости в течение не более 15–20 минут. При этом происходят локальные сколы бетона различной глубины (5–15 мм) и площади разрушения. Примером отличия

характера взрывообразного разрушения бетона может служить серия 7 плит из обычного тяжелого бетона, которая испытывалась в качестве контрольных образцов, в ней присутствуют только локальные сколы бетона на обогреваемой поверхности после огневого испытания (рис. 8). Площадь поражения взрывообразным разрушением нагреваемой поверхности плит значительно меньше, чем в плитах из ВБ на микрокремнеземе. Аналогичный характер взрывообразного разрушения плит из обычного тяжелого бетона наблюдался в процессе огневых испытаний в НИОКР от 2017 и 2019 годов [15, 16].

Обобщенные результаты огневых испытаний натуральных плит сплошного сечения из ВБ с различным содержанием микрокремнезема, а также контрольных плит из обычного тяжелого бетона приведены в табл. 1.

В ходе проведенной расчетной оценки огнестойкости плит из ВБ с микрокремнеземом по СП 468.1325800.2019 [1] с учетом взрывообразного



Рис. 5. Вид обогреваемой поверхности плиты серии 2 (9 % микрокремнезема в БВ) после огневого испытания. Класс бетона – В60

Fig. 5. View of the heated surface of the series 2 plate (9 % of microsilica in HSC) after the fire test. Concrete class – В60



Рис. 7. Вид обогреваемой поверхности плиты серии 4 (9 % микрокремнезема в БВ) после огневого испытания. Класс бетона – В100

Fig. 7. View of the heated surface of the series 4 plate (9 % of microsilica in HSC) after the fire test. Concrete class – В100



Рис. 6. Вид обогреваемой поверхности плиты серии 6 (9 % микрокремнезема в БВ) после огневого испытания. Класс бетона – В80

Fig. 6. View of the heated surface of the series 6 plate (9 % of microsilica in HSC) after the fire test. Concrete class – В80



Рис. 8. Вид обогреваемой поверхности плиты контрольной серии 7 (из обычного тяжелого бетона) после огневого испытания. Класс бетона – В30. Присутствуют два локальных скола бетона

Fig. 8. View of the heated surface of the control series 7 plate (made of ordinary heavy concrete) after the fire test. The concrete class is В30. There are two local concrete chips

разрушения бетона путем уменьшения толщины защитного слоя бетона на 6–10 мм получена удовлетворительная сходимости теоретических и экспериментальных результатов с погрешностью не более $\pm 5\%$.

По результатам огневых испытаний сделаны следующие выводы.

1. Во всех сериях плит фактические пределы огнестойкости по потере несущей способности (R) были меньше, чем в контрольной серии 7 из обычного тяжелого бетона на 13–22 минуты (в среднем – на 15 минут) и достигались по критерию наступления предельного прогиба (L/20).

2. После огневого испытания на обогреваемых поверхностях всех серий плит из ВБ с микрокремнеземом наблюдалось повреждение целостности защитного слоя бетона на глубину 6–10 мм. Распространение повреждений поверхностного слоя бетона по площади варьировалось от 10 до 60 %. Наибольшая степень поврежденности нагреваемой поверхности наблюдалась в плитах из ВБ с содержанием микрокремнезема 9 %.

3. Оголения арматуры во всех сериях огневых испытаний серий плит из ВБ с микрокремнеземом не наблюдалось, за исключением локальных оголений крайних стержней арматуры в угловых зонах продольных граней. Уменьшение толщины защитного слоя на обширной площади поверхности плит вызывало преждевременный прогрев нижнего ряда арматуры, что повлияло на уменьшение предела огнестойкости плитных конструкций.

4. Поскольку наиболее интенсивное взрывообраз-

ное разрушение бетона происходило по граням плит, определена необходимость проведения исследований огнестойкости колонн и балок из высокопрочных бетонов (т. е. конструкций с наличием граней и углов) для установления характера взрывообразного разрушения и определения возможности применения расчетного метода оценки огнестойкости таких конструкций. Данные об огнестойкости колонн и балок из ВБ на настоящий момент отсутствуют в нормативных документах.

5. По результатам расчетно-экспериментального обоснования была подтверждена возможность расчетной оценки предела огнестойкости плитных конструкций из ВБ с микрокремнеземом по СП 468.1325800.2019 [1] с учетом взрывообразного разрушения бетона. При этом был сделан вывод о том, что при определении температуры прогрева арматуры в плитах следует уменьшать толщину защитного слоя бетона всех арматурных стержней нижнего ряда на 8–10 мм, учитывая взрывообразное разрушение бетона обогреваемой поверхности плит.

Для упрощенной расчетной оценки огнестойкости возможен расчет предела огнестойкости по потере несущей способности плитных конструкций из ВБ без уменьшения толщины защитного слоя бетона (как для обычного тяжелого бетона по методике СП 468.1325800.2019 [1]), но с уменьшением полученного значения предела огнестойкости на 15 минут.

6. Результаты работы целесообразно внести в СП 468.1325800.2019 «Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности» [1].

Таблица 1
Table 1

Обобщенные результаты испытаний на огнестойкость натуральных плит
Generalized results of fire resistance tests of fullscale slabs

№ серии	Вид бетона	Содержание микрокремнезема по массе цемента	Фактический предел огнестойкости	Фактическая влажность бетона, %	Взрывообразное разрушение бетона, % площади повреждения и глубина плит
1	ВБ класса В60	6,75 %	REI 82	4,0	Присутствует на 10 % площади глубиной до 10 мм (рис. 4)
2	ВБ класса В60	9 %	REI 78	3,9	Присутствует на 60 % площади глубиной до 6 мм (рис. 5)
3	ВБ класса В60	9 % с добавкой СНВ	REI 85	4,2	Присутствует на 15 % площади глубиной до 5 мм
4	ВБ класса В100	9 %	REI 87	3,5	Присутствует на 60 % площади глубиной до 8 мм (рис. 7)
5	ВБ класса В100	13 %	REI 84	3,8	Присутствует на 20 % площади глубиной до 6 мм
6	ВБ класса В80	9 %	REI 87	3,7	Присутствует на 60 % площади глубиной до 6 мм (рис. 6)
7	Обычный тяжелый бетон класса В30	–	REI 100	3,4	Присутствует незначительно на 3 % площади (рис. 8)

Эффективность проведенной экспериментальной работы определяется развитием расчетного метода оценки огнестойкости для конструкций из ВБ при проектировании, что позволит обеспечить конструктивную пожарную безопасность объектов строительства.

В заключение следует отметить, что в представленной НИОКР исследовался один вид высокопрочного бетона на микрокремнеземе. Но существуют другие виды ВБ с иным вещественным составом (например, на золе-уноса и доменном шлаке), которые также необходимо подвергать исследованиям с позиций обеспечения пожарной безопасности зданий и сооружений, развития расчетным методом оценки огнестойкости конструкций и нормативной строительной базы в целом. Дальнейшие экспериментальные исследования огнестойкости конструкций из ВБ необходимы во исполнение требований пункта 10 федерального закона № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [22] о возможности применения расчетных методов только для конструкций, аналогичных по форме, материалам и конструктивному исполнению строительным конструкциям, прошедшим огневые испытания.

Список литературы

1. СП 468.1325800.2019. Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности. 2020.
2. EN 1992-1-2:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design. [EN 1992-1-2:2004. Еврокод 2: Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1–2. Общие правила. Определение огнестойкости].
3. Каприелов С.С. Новые модифицированные бетоны. М.: ООО «Предприятие Мастер Бетон». 2010, 258 с.
4. Kim J.-K., Kim Y.-Y. Experimental study of the fatigue behavior of high strength concrete. *Cement and Concrete Research*. 1996, vol. 26, Issue 10.
5. Aitcin P.C. High-performance concrete. London: E&FN SPON. 1998.
6. Shi C., Wu Z., Xiao J., Wang D., Huang Z., Fang Z. A review on ultra-high performance concrete: Part 1. Raw materials and mixture design. *Construction and Building Materials*. 2015, no. 101, pp. 741–751.
7. Chan Y., Chu S. Effect of silica fume on steel fibre bond characteristics in reactive powder concrete. *Cement and Concrete Research*. 2004, no. 34 (7), pp. 1167–1172.
8. Леонович С.Н., Литвиновский Д.А. Аналитические зависимости прочностных, деформативных, силовых и энергетических параметров высокопрочного бетона при нагреве // *Вестник БНТУ*. 2011. № 4. С. 30–34.

9. Castillo C. Effect of transient high temperature on high-strength concrete / C. Castillo. *ACI structural journal*. 1990, vol. 87, p. 8.
10. Djaknoun S. Characterization of the Fracture Toughness of the Concrete Mortars Exposed to Elevated Temperatures/ Laboratoire de Mecanique / S. Djaknoun. *American Journal of Applied Sciences*. 2009, vol. 6(2), pp. 296–305.
11. Zhang B. Fracture energy of high performance concrete at high temperatures up to 450 C: the effect of heating temperatures and testing conditions; Napier University; University of Glasgow / B. Zhang. *Magazine of concrete Research*. 2006, vol. 58, pp. 277–288.
12. Plan L.T. Mechanical properties of high-strength concrete at elevated temperature / L.T. Plan. NISTIR 6726, National Institute of Standards and Technology. 2001.
13. ГОСТ 30247.0-94 (ИСО 834-75). Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования. 1996.
14. ГОСТ 30247.1-94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции. 1996.
15. Отчет по НИОКР «Проведение огневых испытаний и формирование требований к огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций». Том 1. АО «НИЦ «Строительство». 2017. 271 с.
16. Отчет по НИОКР «Исследование бетонных конструкций, армированных фиброй композитной полимерной и арматурой композитной полимерной (АКП), на воздействие пожара». Том 1. АО «НИЦ «Строительство». 2019. 127 с.
17. ГОСТ 31108-2016. Цементы общестроительные. Технические условия. 2017.
18. ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. 1995.
19. ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия. 2015.
20. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* (с Изменениями № 1, 2, 3, 4). 2017.
21. ГОСТ 12730.2-2020. Бетоны. Методы определения влажности. 2021.
22. Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ (ред. от 30.04.2021) «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».

References

1. SP 468.1325800.2019. Concrete and reinforced concrete structures. Rules for ensuring of fire resistance and fire safety. 2020 (in Russian).
2. EN 1992-1-2:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design.

3. Kapriyelov S.S. Novyye modifitsirovannyye betony. [New modified concretes]. M.: ООО "Predpriyatiye Master Beton". 2010, 258 p.
4. Kim J.-K., Kim Y.-Y. Experimental study of the fatigue behavior of high strength concrete. *Cement and Concrete Research*. 1996, vol. 26, issue 10.
5. Aitcin P.C. High-performance concrete. London: E&FN SPON. 1998.
6. Shi C., Wu Z., Xiao J., Wang D., Huang Z., Fang Z. A review on ultra-high performance concrete: Part 1. Raw materials and mixture design. *Construction and Building Materials*. 2015, no. 101, pp. 741–751.
7. Chan Y., Chu S. Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete. *Cement and Concrete Research*. 2004, no. 34 (7), pp. 1167–1172.
8. Leonovich S.N., Litvinovskiy D.A. Analiticheskiye zavisimosti prochnostnykh, deformativnykh, silovykh i energeticheskikh parametrov vysokoprochnogo betona pri nagreve [Analytical dependencies of strength, deformation, power and energy parameters of high-strength concrete during heating]. *Vestnik BNTU*. 2011, no. 4, pp. 30–34 (in Russian).
9. Castillo C. Effect of transient high temperature on high-strength concrete / C. Castillo. *ACI structural journal*. 1990, vol. 87, p. 8.
10. Djaknoun S. Characterization of the Fracture Toughness of the Concrete Mortars Exposed to Elevated Temperatures/ Laboratoire de Mecanique / S. Djaknoun. *American Journal of Applied Sciences*. 2009, vol. 6(2), pp. 296–305.
11. Zhang B. Fracture energy of high performance concrete at high temperatures up to 450 °C: the effect of heating temperatures and testing conditions; Napier University; University of Glasgow / B. Zhang. *Magazine of concrete Research*. 2006, vol. 58, pp. 277–288.
12. Plan L.T. Mechanical properties of high-strength concrete at elevated temperature / L.T. Plan. NISTIR 6726, National Institute of Standards and Technology. 2001.
13. State Standard 30247.0-94 (ISO 834-75). Elements of building constructions. Fire-resistance test methods. General requirements. 1996 (in Russian).
14. State Standard 30247.1-94. Elements of building constructions. Fire-resistance test methods. Loadbearing and separating constructions. 1996 (in Russian).
15. Otchet po NIOKR «Provedeniye ognevykh ispytaniy i soblyudeniye trebovaniy k ognestoykosti i ognesokhrannosti zhelezobetonnykh konstruksiy». Tom 1. AO «NITS «Stroitel'stvo». 2017, 271 p. (in Russian).
16. Otchet po NIOKR «Issledovaniye betonnykh konstruksiy, armirovannykh fibroy kompozitnoy polimernoy i armaturoy kompozitnoy polimernoy (AKP), na vozdeystviye pozhara». Tom 1. AO «NITS «Stroitel'stvo». 2017 (in Russian).
17. State Standard 31108-2016. Common cements. Specifications. 2017.
18. State Standard 8267-93. Crushed stone and gravel of solid rocks for construction works. Specifications. 1995.
19. State Standard 8736-2014. Sand for construction works. Specifications. 2015 (in Russian).
20. SP 20.13330.2016. Loads and actions. Updated version of SNiP 2.01.07-85* (with changes No. 1, 2, 3, 4). 2017 (in Russian).
21. State Standard 12730.2-2020. Concretes. Method of determination of moisture content. 2021 (in Russian).
22. Federal Law No. 123-FZ of 22.07.2008 (as amended on 30.04.2021) "Technical Regulations on fire safety requirements" (in Russian).

**Информация об авторах /
Information about the authors**

Ирина Сергеевна Кузнецова , канд. техн. наук, заведующий 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, NIIZHB named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: 1747139@mail.ru

Вера Геннадьевна Рябченкова, заместитель заведующего лабораторией температуростойкости и диагностики бетона и железобетонных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: 1747139@mail.ru

Vera G. Ryabchenkova, Deputy Head of the Laboratory of temperature resistance and diagnostics of concrete and reinforced concrete structures, NIIZHB named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: 1747139@mail.ru

Дорвард Ваагнович Акопян, ведущий инженер лаборатории температуростойкости и диагностики бетона и железобетонных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Dorvard V. Akopyan, Leading Engineer of the Laboratory of temperature resistance and diagnostics of concrete and reinforced concrete structures, NIIZHB named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: 1747139@mail.ru

 Автор, ответственный за переписку / Corresponding author