

В.С. ФЕДОРОВ¹, В.Е. ЛЕВИТСКИЙ¹¹ Российский университет транспорта, Москва, Россия

РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОНА

Аннотация. Данная статья является первой в цикле статей, посвященных обобщению и анализу многочисленных опубликованных материалов по исследованию механических свойств бетона при нагреве. Необходимость изучения влияния температуры нагрева на механические характеристики бетона обусловлена необходимостью их использования в применяемых практических методиках расчёта по оценке огнестойкости конструкций. Дано представление об объёме имеющихся исследовательских программ, их доступности и различии. Описаны результаты многочисленных и разноплановых исследований прочностных и деформативных характеристик бетона, подтвержденные специальными методами исследования на воздействие температуры. Исследования механических свойств бетона при нагреве проводились по разным методам испытания, различных видов и составов бетона, что привело к большому разнообразию данных, что трудно установить какие-то закономерности. Связь напряжений и деформаций для бетона при нагреве не удаётся получить из опытов в прямом виде и необходима методика определения требуемых характеристик. Сделан вывод о необходимости стандартизации условий испытаний, научного обобщения, структурирования и анализа выявленного многообразия результатов исследования механических свойств бетона при нагреве, способное объяснить существующие закономерности и предсказать новые.

Ключевые слова: бетон, огнестойкость, нагрев под нагрузкой, диаграмма деформирования, модуль упругости при нагреве, разделение компонентов деформации, модель термостатического сопротивления.

V.S. FEDOROV¹, V.E. LEVITSKY¹¹ Russian University of Transport, Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF METHODOLOGY FOR STUDYING THE EFFECT OF TEMPERATURE ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE

Abstract. This article is the first in a series of articles devoted to the generalization and analysis of numerous published materials on the study of mechanical properties of concrete during heating. The need to study the effect of heating temperature on the mechanical characteristics of concrete is due to the need for their use in applied practical calculation methods for assessing the fire resistance of structures. An idea is given about the scope of the available research programs, their accessibility and differences. The results of numerous and diverse studies of the strength and deformation characteristics of concrete are described, confirmed by special methods of studying the effects of temperature. Studies of the mechanical properties of concrete during heating were carried out using various testing methods, different types and compositions of concrete, which led to a wide variety of data, which makes it difficult to establish any patterns. The relationship between stresses and deformations for concrete during heating cannot be obtained from experiments in direct form, and a methodology is needed to determine the required characteristics. The conclusion is made about the need for standardization of test conditions, scientific generalization, structuring and analysis of the revealed variety of results of studying the mechanical properties of concrete during heating, which can explain existing patterns and predict new ones.

Keywords: concrete, fire resistance, heating under load, deformation diagram, modulus of elasticity under heating, separation of deformation components, thermal force resistance model.

Введение

Необходимость изучения влияния температуры нагрева на механические характеристики материалов (бетона и арматуры) обусловлена определяющей степенью их использования в применяемых практических методиках расчёта на огнестойкость. Если для самых первых упрощённых расчётных моделей термосилового сопротивления железобетонных элементов требовался минимальный набор характеристик, то с развитием подходов и методов возникла надобность во всё большем количестве параметров, определяющих поведение материала. Использование метода «изотермы 500°C» для расчета предела огнестойкости железобетонного элемента не требует знания температурных параметров бетона, для расчёта необходима лишь зависимость предела текучести арматурной стали от температуры. Расчёт по приведённому сечению требует уже зависимости для модуля деформаций или модуля упругости нагретого бетона сжатой зоны. В случае физически нелинейного деформационного расчёта применяются диаграммы связи напряжений и деформаций бетона и арматуры при различных температурах нагрева, выраженные в том или ином виде, а также свободные температурные деформации. В данной статье внимание будет сфокусировано на установлении связи напряжений и деформаций для бетона.

Метод

Задачу получения опытных диаграмм «напряжения-деформации» при нагреве наиболее просто решить по аналогии с нормальными температурными условиями, испытывая до разрушения образцы, предварительно нагретые до заданной температуры. Методика позволяет получить базовые прочностные и деформативные характеристики бетона непосредственно из эксперимента, испытывая образцы стандартной формы, размеров и естественной влажности, а выдержка образцов при заданной температуре в течение некоторого времени исключает влияние температурных градиентов по сечению.

Первым, кто таким образом получил экспериментальные диаграммы «напряжения-деформации» для бетона при нагреве, судя по публикациям, был Fugamiga [1]. Диаграммы включали нисходящие ветви и ветви разгрузки. Результаты показали, что с ростом температуры кроме уменьшения прочности при сжатии и модуля упругости также уменьшается наклон нисходящей ветви диаграммы.

За последние шесть с лишним десятилетий был накоплен значительный массив опытных данных по влиянию высокотемпературного нагрева на механические свойства бетона, полученных для бетона различного состава и в различных условиях испытаний. Проведённые исследования были направлены как на решение задач получения требуемых характеристик для выполнения расчётов огнестойкости конструкций в условиях кратковременного (продолжительностью до 5 часов) высокотемпературном (до 1000°C) нагрева, характерного для условий пожара, так и затрагивали вопросы более общего изучения поведения бетона при кратковременном и длительном воздействии высоких температур, решение которых необходимо для проектирования жаростойких технологических установок, и в особенности, предварительно напряженных железобетонных защитных оболочек атомных реакторов – prestressed concrete pressure vessels (PCPV) [2,3,4,5].

Существующие в настоящее время режимы испытаний можно условно разделить на две группы в зависимости от того, меняется или нет температура во время нагружения.

Силовые испытания после нагрева до заданной температуры, в зарубежной терминологии – стационарные испытания, или испытания в установившихся условиях (Steady-state tests):

– нагрев образца без нагрузки и последующее нагружение с постоянной скоростью роста напряжений или деформаций (unstressed tests). Испытание позволяет определить модуль упругости, прочность и соответствующие ей предельные деформации, а постоянная скорость

деформаций также даёт возможность оценить поведение бетона на нисходящей ветви и определить максимальную механическую энергию, рассеиваемую образцом при разрушении (ultimate mechanical dissipation energy);

- нагрев образца под нагрузкой эксплуатационного уровня (обычно от 20 до 40% от разрушающей при нормальной температуре), последующее нагружение с предварительной разгрузкой, либо без неё (unstressed tests). Предполагалось, что этот режим соответствует условиям работы бетона сжатой зоны конструкций, которые во время пожара подвергаются внезапному догружению из-за выхода из строя другого конструктивного элемента;

- медленный нагрев образца и приложение постоянной нагрузки, остающейся постоянной в течение длительного времени – испытания на установившуюся ползучесть. Испытание не получило решающего значения для оценки огнестойкости, поскольку для существенного прироста деформаций обычно требуется период времени, намного превышающий продолжительность пожара.

Однако в условиях пожара, как практически и во всех остальных случаях воздействия высокой температуры, бетон в конструкциях подвергается нагреву в нагруженном состоянии. Поэтому было совершенно очевидным, что получать характеристики необходимо при нагреве предварительно нагруженных образцов.

Испытания в условиях нестационарного нагрева под нагрузкой, в зарубежной терминологии – нестационарные испытания, или испытания в переходных условиях (Transient tests):

- нагружение образца до заданного уровня и последующий нагрев со скоростью, обеспечивающей равномерность температурного поля по сечению образца. Результатом являются кривые развития полных деформаций бетона, а снижение прочности оценивается по температуре разрушения образцов;

- нагружение образца до заданного уровня и последующий нестационарный нагрев с сохранением постоянного значения начальной деформации за счёт изменения величины внешней нагрузки – тесты на релаксацию. Испытание продолжается до тех пор, пока внешняя нагрузка не снизится до исходного уровня;

- нагружение образца до заданного уровня и последующий нестационарный нагрев с постоянной скоростью и изменением внешней нагрузки по произвольному режиму (ступенчато или плавно), включая разгрузку. Испытание в наибольшей степени соответствует реальным условиям работы бетона в конструкции и задачей построения моделей термосилового сопротивления бетона является прогнозирование его реакции в этих условиях на основе данных простых испытаний.

Первые эксперименты с бетоном, нагретым под напряжением, были проведены Малхотрой [6]. Бетонные образцы в виде цилиндров диаметром 2 дюйма и длиной 4 дюйма нагревали под уровнем нагружения примерно 0,2, а затем нагружали до разрушения. Повышение прочности нагруженного бетона по сравнению с бетоном, нагретым без нагрузки, составляло от 4% при 200°C до 21% при 500°C.

В 1971 году Абрамс (Abrams M.S.) [7] сообщил об исследовании, в котором были получены аналогичные результаты (рис. 1). Образцы из шести различных бетонов были нагружены сжимающим напряжением до уровня 0,25, 0,40 и 0,55 прочности на сжатие, нагреты до 204°C, 482°C и 704°C, после чего нагружены до разрушения. Повышение прочности составило от 5 до 25% во всех испытаниях, независимо от прочих факторов (типа заполнителя, пропорций смеси, прочности до нагрева, температуры испытания).

Экспериментальные данные Abrams M.S. примечательны также и тем, что вместе с полученными Cruz C.R. [8] результатами исследования модуля упругости бетона при нагреве стали основой для соответствующего раздела американского документа ACI 216R Guide for Determining Fire Endurance of Concrete Elements [9].

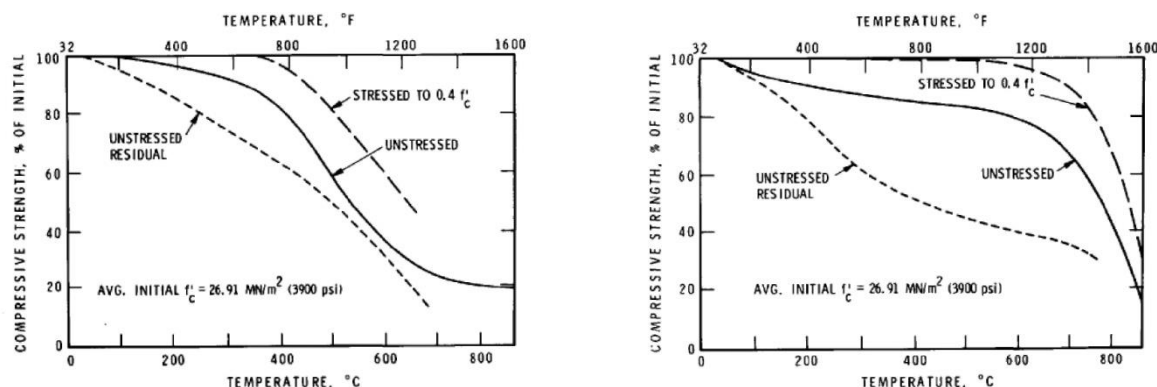


Рисунок 1 - Влияние температуры нагрева на напряженную (stressed), ненапряженную (unstressed) и ненапряженную остаточную (unstressed residual) прочность бетона [8]: а – бетон на гранитном заполнителе; б – бетон на известняковом заполнителе

Принимая во внимание, что бетон в конструкциях подвергается нестационарному нагреву, оставаясь нагруженным, для более полного соответствия реальным условиям была разработана методика, где бетон, предварительно нагруженный до заданного уровня напряжений в широком диапазоне его изменения (0,2...0,8 от прочности при нормальной температуре), сопротивляется нестационарному нагреву с заданной скоростью роста температуры (0,5...5 °C/мин) вплоть до разрушения.

Наиболее важным результатом данных испытаний стал тот факт, что деформации образцов, нагретых под нагрузкой, оказались более чем в два раза больше, чем образцов, которые были сначала нагреты до той же температуры, а затем нагружены. Об этой примечательной особенности впервые сообщили шведские исследователи Хансен и Эрикссон [10], причём они не только обнаружили данный эффект, но и установили влияние на него основных факторов. Отмеченное относительно существенное повышение деформативности (1) – проявляется только при первом нагреве; (2) – является необратимым; (3) – не зависит от скорости нагрева; (4) – в образцах из цементного камня и цементно-песчаного раствора реализуется в большей степени, чем в бетонных; (5) – проявляется не только в высыхающих, но и в изолированных от высыхания образцах.

Часто отмеченное повышение деформативности называют «кратковременной температурной ползучестью», хотя оно и не является ползучестью в привычном смысле, поскольку не зависит от времени (от скорости нагрева).

Необходимость проведения испытаний при нестационарном нагреве нагруженных образцов заставила обратить более пристальное внимание на такие факторы как форма и начальная влажность образцов. Массивные образцы не обеспечивают равномерность прогрева, поэтому для испытаний необходимо использовать полые тонкостенные цилиндры, нагреваемые со стороны внешней и внутренней поверхностей. Однако такие образцы, как правило, требуют снижения максимальной крупности заполнителя и предварительного высушивания во избежание взрывообразного разрушения, что оказывает влияние на получаемые результаты. Появились предположения, что образцы естественной влажности будут показывать иное поведение, чем высушенные образцы. Кроме того, необходимо учитывать, что в массивных элементах влага, превращающаяся в результате нагрева в водяной пар, зачастую не имеет возможности свободно выйти наружу и условиям работы бетона в таких конструкциях в лучшей степени будут соответствовать испытания изолированных от высыхания образцов.

С точки зрения применения результатов нестационарных испытаний в расчёте основной трудностью стал тот факт, что связь напряжений и деформаций не удаётся получить

из опытов в прямом виде и необходима методика определения требуемых характеристик. Однако даже при наличии такой методики следует принимать во внимание, что бетон в условиях неравномерного нестационарного нагрева сечений конструкций не находится в условиях действия постоянных напряжений. Температурная деградация жёсткостей компонентов сечения приводит к перераспределению напряжений: на участках с уменьшающейся жёсткостью напряжения падают, на более жёстких и менее прогретых – растут вместе с ростом температуры. Поэтому при интенсивном прогреве сжатой зоны в сечениях конструкций на локальном уровне нагружение бетона является режимным и необходима методика, позволяющая учесть эти условия.

Результаты и обсуждения

Первое комплексное исследование механических свойств бетона в условиях высокотемпературного нагрева было проведено Андербергом и Теландерссоном (Y. Anderberg, S. Thelandersson [11] в университете Лунд (Швеция). Программа включала четыре серии испытаний: (1) – нестационарный нагрев под нагрузкой постоянного уровня; (2) – нагружение после нагрева без нагрузки; (3) – испытания на кратковременную 3-х часовую стационарную температурную ползучесть, которые показали её незначительный вклад в развитие деформаций при кратковременном нагреве; (4) – нагружение или разгрузка в процессе нестационарного нагрева, а также тесты на релаксацию. Использовался тяжёлый бетон на гранитном заполнителе с кубиковой прочностью 55,1...64,0 МПа. В ряде испытаний оценивалось влияние начальной влажности образцов (высушенные, естественной влажности, водонасыщенные).

Оценка влияния различных факторов на прочностные и деформативные свойства бетона при нагреве была дана в серии экспериментальных исследований, проведенных под руководством Шнайдера (U. Schneider) [12, 13] в лаборатории Технического университета Брауншвейг в Германии. Были получены новые опытные данные по деформациям бетона (1) – при нестационарном нагреве под нагрузкой (для тяжёлого и лёгкого бетона); (2) – при нагружении образцов, нагревавшихся в нагруженном состоянии и затем разгруженных, эти испытания показали значительное повышение модуля упругости бетона; (3) – при длительной 250-часовой стационарной ползучести; (4) – для нескольких режимных загрузок, а также стационарной и нестационарной релаксации. Фактором, наиболее сильно влияющим на прочностные и деформативные свойства бетона наряду с последовательностью приложения силового и температурного воздействий, стал тип крупного заполнителя и его количественное содержание.

Современное состояние исследования влияния высокой температуры на свойства бетона представлено в обзорах Naus D.J. [14,15, Willam K. et al. [16], Knaack A.M. et al. [17], Phan L.T. et al. [18], Alogla and Kodur [19] и др.).

Отечественные исследования прочностных и деформативных свойств бетона при высоких температурах для задач расчёта огнестойкости проводились под руководством Яковлева А.И. во ВНИИПО и Милованова А.Ф. в НИИЖБ в 1970-80х годах.

В монографии Яковлева А.И. [20] приводятся полученные при участии Олимпиева В.Г., Зенкова Н.И. и др. данные для восьми составов бетона – высокопрочного на гранитном заполнителе (начальная прочность 59 и 78 МПа), обычной прочности на гранитном и на известняковом заполнителе (24 МПа), тяжелого крупнозернистого и мелкозернистого силикатобетона (32 МПа), легкого бетона на керамзитовом (17 МПа) и трепельном заполнителе (33,5 МПа). В монографии Милованова А.Ф. [21] даны полученные при участии Камбарова Х.У., Зиновьева В.Н., Абдуллаева Р. и др. результаты для шести составов тяжёлого и лёгкого бетона (пропаренного и естественного твердения). Все доступные результаты получены при нестационарном нагреве под нагрузкой и опубликованы в работах [22,23,24,25,26,27].

Стремление приблизить условия испытания к реальному термосопротивлению бетона в конструкции и испытать различные виды бетона привело к большому разнообразию данных. Порой создаётся впечатление, что кривые настолько заметно отличаются от испытания к испытанию, сильно зависят от состава и влажности бетона, что трудно установить какие-то закономерности. Здесь необходима теория, способная объяснить существующие закономерности и предсказать новые. О потребности в создании «общих» моделей неоднократно упоминает и разработчик программного комплекса SAFIR J.-M. Franssen [28]. Попытки стандартизировать условия испытаний начали предпринимать только сравнительно недавно. В 2024 году в нашей стране усилиями сотрудников НИИЖБ НИЦ разработан национальный стандарт ГОСТ Р 71504-2024 «Бетоны. Методы определения механических свойств при высоких температурах», который четко определяет последовательность действий и измерений температуры и деформационных характеристик бетона в процессе испытаний.

Заключение

1. Исследования механических свойств бетона с учетом высокотемпературного теплового воздействия проводились по разным методам испытания, различных видов и составов бетона, что привело к большому разнообразию данных.

2. Результаты прочностных и деформативных характеристик бетона заметно отличаются от испытания к испытанию, сильно зависят от состава и влажности бетона, что трудно установить какие-то закономерности.

3. Требуется научное обобщение, структурирование и анализ выявленного многообразия результатов исследований механических свойств бетона при нагреве, способных объяснить существующие закономерности и предсказать новые. По крайней мере, необходима методика, позволяющая обоснованно определять механические характеристики бетона для расчёта огнестойкости конструкций проектирования.

4. Развитие методов исследований (испытаний и теории расчёта) будет производиться в следующих работах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Furumura F. Stress-strain Curve of Concrete at High Temperatures // Transactions of the Architectural Institute of Japan, Abstract No 7004. 1966. p. 686.
2. Baldwin R., North M.A. Stress-strain Curves of Concrete at High Temperature – A Review / Fire Research Station, Borehamwood, Herts. Note No.785. October 1969. 15 p.
3. Baldwin R., North M.A. A Stress-strain Relationship for Concrete at High Temperature // Magazine of Concrete Research. 1973. Vol. 25. Issue 85. Pp. 208-212. DOI: 10.1680/mac.1973.25.85.208
4. Smith G.M., Young L.E. Ultimate Flexural Analysis on Stress-Strain Curves for Cylinders // ACI Journal Proceedings. 1956. Vol. 53. Issue 12. Pp. 597-609. DOI: 10.14359/11531
5. Hognestad E. A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members. Bulletin No. 399. University of Illinois Engineering, Experiment Station. Urbana, Illinois. 1951. 134 p.
6. Malhotra H.L. The effect of temperature on the compressive strength of concrete // Magazine of Concrete Research. 1956. Vol. 8. No. 3. pp. 85-94.
7. Abrams M.S. Compressive Strength of Concrete at Temperatures to 1600°F / ACI Special Publication SP-25 Temperature and Concrete. American Concrete Institute. 1971. pp. 33–58.
8. Cruz C.R. Apparatus for Measuring Creep of Concrete at Elevated Temperature // Journal of the PCA Research and Development Laboratories. Bulletin 225. Portland Cement Associations. 1968. V. 10. No. 3. Pp. 36–42.
9. ACI 216R-89. Guide for Determining Fire Endurance of Concrete Elements. / American Concrete Institute, ACI Committee 216. Farmington Hills, Michigan, 1989. 48 pp.
10. Hansen C.T., Eriksson L. Temperature Change Effect on Behavior of Cement Paste, Mortar, and Concrete under Load // ACI Journal Proceedings. 1966. Vol. 63. No. 4. Pp. 489–502.
11. Anderberg Y., Thelandersson S. Stress and Deformation Characteristics of Concrete: Part 2 - Experimental Investigation and Material Behavior Model. Bulletin 54. Lund Institute of Technology, Sweden. 1976. 85 p.

12. Schneider U. Ein Beitrag zur Frage des Kriechens und der Relaxation von Beton unter hohen Temperaturen. Habilitationsschrift. Heft 42. Technischen Universität Braunschweig. 1979. 180 p.
13. Schneider U. Behaviour of Concrete at High Temperature. HEFT 337. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Wilhelm Ernst & Sohn, Munich, Germany, 1982.
14. Naus D.J. The Effect of Elevated Temperature on Concrete Materials and Structures – A Literature Review / U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research, Oak Ridge National Laboratory. Washington, DC. 2005. 204 p.
15. Naus D.J. A Compilation of Elevated Temperature Concrete Material Property Data and Information for Use in Assessments of Nuclear Power Plant Reinforced Concrete Structures / U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research, Oak Ridge National Laboratory. Washington, DC. 2010. 328 p.
16. Willam K., Xi Y., Lee K., Kim B. Thermal Response of Reinforced Concrete Structures in Nuclear Power Plants / SESM No. 02-2009. Department of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, University of Colorado at Boulder. 2009. 210 p.
17. Knaack A.M., Kurama Y.C., Kirkner D.J. Stress-Strain Properties of Concrete under Elevated Temperatures / Structural Engineering Research Report University of Notre Dame (NDSE-09-01). Notre Dame, Indiana. 2009. 130 p.
18. Phan L.T., McAllister T.P., Gross J.L., Hurley M.J. Best Practice Guidelines for Structural Fire Resistance Design of Concrete and Steel Buildings / NIST Technical Note 1681. National Institute of Standards and Technology, Society of Fire Protection Engineers. 2010. 217 p.
19. Alogla S., Kodur V. Temperature-Induced Transient Creep Strain in Fiber-Reinforced Concrete. Cement and Concrete Composites. 2020. Vol. 113. 103719. doi:10.1016/j.cemconcomp.2020.103719.
20. Яковлев А.И. Расчёт огнестойкости строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1988. – 143 с.
21. Милованов А.Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре. – М.: Стройиздат, 1998. – 304 с.
22. Милованов А.Ф., Зиновьев В.Н. Деформации высокопрочного бетона при кратковременном нагреве // Бетон и железобетон. 1981. №9.
23. Милованов А.Ф. Методы определения физико-механических свойств бетона для условий пожара. // Пути повышения огнестойкости строительных материалов и конструкций: Материалы семинара МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского. – М.: Знание, 1982. – С. 81-85.
24. Олимпиев В.Г. О методике исследования прочности и деформативности бетона при высоких температурах в условиях пожара // Огнестойкость строительных конструкций. – М.: ВНИИПО, 1973. – Вып. 1. – С.44-64.
25. Олимпиев В.Г., Зенков Н.И. Исследование прочностных и деформативных свойств тяжелого силикатного бетона при воздействии высоких температур // Огнестойкость строительных конструкций. – М.: ВНИИПО, 1975. – Вып. 3. – С. 24-36.
26. Олимпиев В.Г., Зенков Н.И., Сорокин А.Н. Исследование прочности и деформативности лёгкого бетона при высоких температурах // Огнестойкость строительных конструкций. – М.: ВНИИПО, 1976. – Вып. 4. – С. 23-33.
27. Зенков Н.И., Зависнова Л.М. Прочность и деформативность бетона на гранитном заполнителе при действии высоких температур. // Огнестойкость строительных конструкций. – М.: ВНИИПО, 1977. – Вып. 5. – С. 88-94.
28. Franssen J.-M. Plastic Analysis of Concrete Structures Subjected to Fire. Proceedings of the Workshop Fire Design of Concrete Structures: What now? What next? Milano. 2005. Pp.133-145.

REFERENCES

1. Furumura F. Stress-strain Curve of Concrete at High Temperatures. *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, Abstract No 7004. 1966. P. 686.
2. Baldwin R., North M.A. Stress-strain Curves of Concrete at High Temperature - A Review. *Fire Research Station, Borehamwood*, Herts. Note No.785. October 1969. 15 p.
3. Baldwin R., North M.A. A Stress-strain Relationship for Concrete at High Temperature. *Magazine of Concrete Research*. 1973. Vol. 25. Issue 85. Pp. 208-212. DOI: 10.1680/macr.1973.25.85.208
4. Smith G.M., Young L.E. Ultimate Flexural Analysis on Stress-Strain Curves for Cylinders. *ACI Journal Proceedings*. 1956. Vol. 53. Issue 12. Pp. 597-609. DOI: 10.14359/11531
5. Hognestad E. A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members. Bulletin No. 399. University of Illinois Engineering, Experiment Station. Urbana, Illinois. 1951. 134 p.
6. Malhotra H.L. The effect of temperature on the compressive strength of concrete. *Magazine of Concrete Research*. 1956. Vol. 8. No. 3. Pp. 85-94.

7. Abrams M.S. Compressive Strength of Concrete at Temperatures to 1600°F. *ACI Special Publication SP-25 Temperature and Concrete*. American Concrete Institute. 1971. Pp. 33-58.
8. Cruz C.R. Apparatus for Measuring Creep of Concrete at Elevated Temperature. *Journal of the PCA Research and Development Laboratories*. Bulletin 225. Portland Cement Associations. 1968. Vol. 10. No. 3. Pp. 36-42.
9. *ACI 216R-89. Guide for Determining Fire Endurance of Concrete Elements*. American Concrete Institute, ACI Committee 216. Farmington Hills, Michigan, 1989. 48 p.
10. Hansen C.T., Eriksson L. Temperature Change Effect on Behavior of Cement Paste, Mortar, and Concrete under Load. *ACI Journal Proceedings*. 1966. Vol. 63. No. 4. Pp. 489-502.
11. Anderberg Y., Thelandersson S. *Stress and Deformation Characteristics of Concrete: Part 2 - Experimental Investigation and Material Behavior Model*. Bulletin 54. Lund Institute of Technology, Sweden. 1976. 85 p.
12. Schneider U. *Ein Beitrag zur Frage des Kriechens und der Relaxation von Beton unter hohen Temperaturen*. Habilitationsschrift. Heft 42. Technischen Universität Braunschweig. 1979. 180 p.
13. Schneider U. *Behaviour of Concrete at High Temperature*. HEFT 337. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Wilhelm Ernst & Sohn, Munich, Germany, 1982.
14. Naus D.J. *The Effect of Elevated Temperature on Concrete Materials and Structures - A Literature Review*. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research, Oak Ridge National Laboratory. Washington, DC. 2005. 204 p.
15. Naus D.J. *A Compilation of Elevated Temperature Concrete Material Property Data and Information for Use in Assessments of Nuclear Power Plant Reinforced Concrete Structures*. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research, Oak Ridge National Laboratory. Washington, DC. 2010. 328 p.
16. Willam K., Xi Y., Lee K., Kim B. *Thermal Response of Reinforced Concrete Structures in Nuclear Power Plants*. SESM No. 02-2009. Department of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, University of Colorado at Boulder. 2009. 210 p.
17. Knaack A.M., Kurama Y.C., Kirkner D.J. *Stress-Strain Properties of Concrete under Elevated Temperatures*. Structural Engineering Research Report University of Notre Dame (NDSE-09-01). Notre Dame, Indiana. 2009. 130 p.
18. Phan L.T., McAllister T.P., Gross J.L., Hurley M.J. *Best Practice Guidelines for Structural Fire Resistance Design of Concrete and Steel Buildings*. NIST Technical Note 1681. National Institute of Standards and Technology, Society of Fire Protection Engineers. 2010. 217 p.
19. Alogla S., Kodur V. Temperature-Induced Transient Creep Strain in Fiber-Reinforced Concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2020. Vol. 113. 103719. doi:10.1016/j.cemconcomp.2020.103719.
20. Yakovlev A.I. *Raschet ognestoykosti stroitelnykh konstruktsiy* [Calculation of Fire Resistance of Building Structures]. Moscow: Stroyizdat, 1988. 143 p. (rus).
21. Milovanov A.F. *Stoykost zhelezobetonnykh konstruktsiy pri pozhare* [Resistance of Reinforced Concrete Structures in Fire]. Moscow: Stroyizdat, 1998. 304 p. (rus).
22. Milovanov A.F., Zinoviev V.N. *Deformatsii vysokoprochnogo betona pri kratkovremennom nagreve* [Deformations of High-Strength Concrete under Short-Term Heating]. *Beton i zhelezobeton*. 1981. No. 9. (rus).
23. Milovanov A.F. *Metody opredeleniya fiziko-mekhanicheskikh svoystv betona dlya usloviy pozhara* [Methods for Determining Physical and Mechanical Properties of Concrete for Fire Conditions]. *Puty povysheniya ognestoykosti stroitelnykh materialov i konstruktsiy: Materialy seminar MDNTP im. F.E. Dzerzhinskogo*. Moscow: Znanie, 1982. Pp. 81-85. (rus).
24. Olimpiev V.G. *O metodike issledovaniya prochnosti i deformativnosti betona pri vysokikh temperaturakh v usloviyakh pozhara* [On the Methodology for Studying the Strength and Deformability of Concrete at High Temperatures under Fire Conditions]. *Ognestoykost stroitelnykh konstruktsiy*. Moscow: VNIPO, 1973. Iss. 1. Pp. 44-64. (rus).
25. Olimpiev V.G., Zenkov N.I. *Issledovanie prochnostnykh i deformativnykh svoystv tyazhelogo silikatnogo betona pri vozdeystvii vysokikh temperatur* [Study of Strength and Deformation Properties of Heavy Silicate Concrete under High Temperatures]. *Ognestoykost stroitelnykh konstruktsiy*. Moscow: VNIPO, 1975. Iss. 3. Pp. 24-36. (rus).
26. Olimpiev V.G., Zenkov N.I., Sorokin A.N. *Issledovanie prochnosti i deformativnosti lyogkogo betona pri vysokikh temperaturakh* [Study of Strength and Deformability of Lightweight Concrete at High Temperatures]. *Ognestoykost stroitelnykh konstruktsiy*. Moscow: VNIPO, 1976. Iss. 4. Pp. 23-33. (rus).
27. Zenkov N.I., Zavismova L.M. *Prochnost i deformativnost betona na granitnom zapolnitele pri deystvii vysokikh temperatur* [Strength and Deformability of Granite Aggregate Concrete under High Temperatures]. *Ognestoykost stroitelnykh konstruktsiy*. Moscow: VNIPO, 1977. Iss. 5. Pp. 88-94. (rus).
28. Franssen J.-M. *Plastic Analysis of Concrete Structures Subjected to Fire. Proceedings of the Workshop Fire Design of Concrete Structures: What now? What next?* Milano. 2005. Pp. 133-145.

Информация об авторе

Федоров Виктор Сергеевич

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», г. Москва, Россия,
докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой «Строительные конструкции, здания и сооружения»,
E-mail: fvs_skzs@mail.ru

Левитский Валерий Евгеньевич

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», г. Москва, Россия,
канд. техн. наук, доц., доцент кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения»,
E-mail: dobriy_vecher@mail.ru

Information about author

Fedorov Victor S.

Russian University of Transport, Moscow, Russia,
doct in tech. sc., prof, head. of the dep. of Building Construction, Buildings and Structures,
E-mail: fvs_skzs@mail.ru

Levitsky Valery E.

Russian University of Transport, Moscow, Russia,
candidate in tech. sc., docent, associated prof. of the dep. of Building Construction, Buildings and Structures,
E-mail: dobriy_vecher@mail.ru

Статья поступила в редакцию 12.04.2025
Одобрена после рецензирования 09.06.2025
Принята к публикации 11.06.2025

The article was submitted 12.04.2025
Approved after reviewing 09.06.2025
Accepted for publication 11.06.2025