

УДК 53.072:691.32: 536.4

А.С. Молодая, С.Д. Николенко, С.А. Сазонова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВА СТАЛЕФИБРОБЕТОНА

*Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, Россия*

Работа посвящена вопросу физического моделирования высокотемпературного воздействия на дисперсноармированный бетон. Приведены результаты экспериментальных исследований поведения дисперсноармированных мелкозернистых бетонов с металлической фиброй (сталефибробетонов), при моделированном в муфельной печи высокотемпературном воздействии. Муфельная печь выбрана исходя из требуемых параметров высокотемпературного воздействия. В частности, максимальной температуры нагрева, времени подъема температуры до требуемых 850°C. Все выбранные параметры хорошо соотносятся с параметрами реальных пожаров. Средой рабочего пространства муфельной печи при создании температурного воздействия является воздух. Одним из преимуществ выбранной муфельной печи является простота управления и достаточная стабильность поддерживаемой температуры. Отработана методика проведения эксперимента при разном по времени высокотемпературном воздействии на сталефибробетон. Показано, что применение дисперсного армирования в виде металлических фибр улучшает состояние экспериментальных образцов после высокотемпературного воздействия заданного уровня. Выявлено что степень влияния дисперсного армирования на состояние образцов зависит от процента армирования и величины температурного воздействия. Показано что увеличение времени высокотемпературного воздействия влияет на состояние образцов. Результаты исследований помогут далее развивать процесс физического моделирования высокотемпературного нагрева при исследовании свойств строительных материалов.

Ключевые слова: моделирование, муфельная печь, высокотемпературный нагрев, дисперсноармированный бетон, эксперимент.

Введение. Настоящая работа является продолжением цикла исследований посвященных комплексной безопасности строительных конструкций с применением дисперсного армирования. В частности, конструкции зданий, находящихся в сейсмоопасной зоне [1, 2]. В результате землетрясений возможно возникновение пожаров. Их температурное воздействие на конструкции может привести к изменению свойств материала конструкции.

Кроме этого, ежегодно в мире и в России происходит достаточно большое количество пожаров, нанося достаточно значительный ущерб. Например, за 2016 год в стране произошло около 140000 пожаров. Уничтожено 34493 повреждено 88388 строений. Значительная часть поврежденных конструкций бетонные и железобетонные.

Бетон относится к числу огнестойких материалов. Однако высокие температуры, как правило, сказываются на поведении бетона. Поэтому необходимо знать, как изменяется поведение бетона в результате нагрева.

Исследованию огнестойкости бетона при высокоинтенсивном нагреве посвящены исследования под руководством Еналеева Р. Ш. В работах [3-6] на основании результатов экспериментов показано, что при моделировании номинальных температурных режимов пожара последствиями нагрева бетона являются образование микротрещин и отколов. Показано, что основная причина этого явления увеличение капиллярного давления пара, образующегося при нагреве. В итоге образцы бетона разрушаются после образования магистральных трещин после достижения температуры в приповерхностном слое более 600°C . В работе [7] приведены результаты исследований бетона повышенной термостойкости.

С 70-х годов прошлого столетия в мире активно ведутся исследования свойств дисперсно-армированных бетонов [8]. В работе [9] приведены результаты исследований свойств таких бетонов в том числе и при температурных воздействиях.

Достаточно обширные исследования огнестойкости дисперсно-армированных бетонов проведены с полимерными фибрами [10-13]. Работа [14] посвящена экспериментальному исследованию цилиндров из сталефибробетона на температурное воздействие от 200°C до 800°C .

Несмотря на относительно большой объем проведенных исследований, большинство исследований выполнены на разном оборудовании, с разными фибрами, по разным методикам и при температурных воздействиях до 800°C .

Целью исследования являлось моделирование высокотемпературного нагрева сталефибробетона и отработка методики эксперимента.

Выбор оборудования для физического моделирования. В обычных условиях практически невозможно крупномасштабное моделирование высокотемпературных тепловых потоков. Поэтому принято решение провести экспериментальные исследования в муфельной печи. Что согласуется с общепринятой практикой. В работе [15] на основе анализа сделан вывод, что в большинстве исследований образцы сталефибробетона нагревали в муфельной печи или газовой горелкой и на образцах в виде кубов или цилиндров с размером поперечного сечения 100 мм. При этом скорость нагрева образцов изменялась от 1,4 до $8^{\circ}\text{C}/\text{мин}$

Применение муфельных печей обеспечивает полное отсутствие взаимодействия нагреваемых элементов с различными компонентами, выделяющимися в воздух в результате сгорания топлива (например, сажей, газообразными веществами, а также копотью).

Очень важным показателем для моделирования температурного воздействия является скорость прогрева печи. При испытаниях на огнестойкость по ГОСТ 30247.0 применяют быстрый нагрев со скоростью 30°C/мин [16].

Большинство муфельей изготавливается из огнестойкого кирпича, жаропрочной стали или высокопрочного керамического волокна.

Чаще всего для высокотемпературного нагрева применяют электрические лабораторные муфельные печи, которые оснащаются открытыми или закрытыми нагревательными элементами. Печи с открытыми нагревательными элементами достаточно быстро прогревают камеру до высокой температуры. Печи с закрытыми нагревательными элементами требуется гораздо больше времени для прогрева камеры до высокой температуры.

Наиболее простой конструкцией обладает оборудование, имеющее одноступенчатый терморегулятор. Принцип работы, следующий: с самого начала, камера печи нагревается до определенной температуры, а затем она поддерживается на протяжении рабочего процесса.

Для более сложной аналитической работы предназначаются муфельные печи, которые функционируют за счет специального программного управления.

На основании анализа печей, имеющих в лаборатории и требуемых температурных параметров, для проведения исследований была выбрана электрическая горизонтальная муфельная печь с одноступенчатым регулятором «Снол 8,2-1100» (Рисунок 1).



Рисунок 1 - Вид применяемой муфельной печи «Снол»

Конструктивно лабораторная печь выполнена из листового металла и ее внутренний объем разделен горизонтальной перегородкой на две части. Верхняя часть печи представляет рабочую камеру с многослойной теплоизоляцией и электронагревателями. В нижней части печи расположен блок управления. Рабочая камера состоит из высокоэффективной волокнистой теплоизоляции на основе оксида кремния. В печи имеется дополнительная теплоизоляция из плит с применением базальтового волокна.

Температурный режим создается с помощью электронагревателей спирального типа из стали «Суперфехраль». Нагреватели расположены вдоль боковых стенок рабочей камеры. Среда, которая является рабочим пространством при создании температурной среды – воздух.

Максимальная температура, создаваемая в печи 1100°C. Все температурные режимы поддерживаются автоматически.

Материалы и методы. В наших исследованиях образцы представляли собой кубы со стороной 100x100x100 мм. Образцы были изготовлены из мелкозернистого бетона состава Ц: П=1:2,5 при В/Ц=0,45. Цемент марки 400. Часть образцов из мелкозернистого бетона с дисперсным армированием стальной фиброй. Состав матрицы для сталефибробетона, был принят аналогичным образцам без добавления фибры.

Так как стальные фибры являются наиболее широко используемыми в строительстве, они использовались в эксперименте. Геометрические характеристики стальной фибры приняты в диапазоне, приведенном в работе [15] диаметр от 0,4 до 0,75 мм и длина от 30 до 60 мм. Принята фибра (Рисунок 2) длиной 33мм, исходя из размеров кубов, чтобы уменьшить эффект «стесненности». Диаметр принятой фибры 0,6 мм.

Процент армирования металлической фибры составил 1,5 % и 2%. Это согласуется с материалами работ [15, 17]. В исследованиях процент армирования стальной фиброй варьировался от 0,5 до 1,5 % (в отдельных случаях до 3 %) [21]. При нагреве прочность сталефибробетона изменяется по сравнению с обычным бетоном при содержании фибры больше 1,5 % [17].



Рисунок 2 - Вид фибры используемой в эксперименте

Всего было изготовлено 15 образцов по пять образцов в серии. Пять образцов неармированных, пять образцов с дисперсным армированием 1,5%, пять образцов с дисперсным армированием 2%. Все образцы были случайным образом пронумерованы. Основные характеристики исследуемых образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Характеристики исследуемых образцов

| № серии | № образцов | Армирование фиброй, % |
|---------|--------------|-----------------------|
| 1 | 1,4,7,10,13 | 0 |
| 2 | 2,5,11,14,15 | 1,5 |
| 3 | 3,6,8,9,12 | 2 |

Исследования проводились при максимальной температуре 850°С, что соответствовало наибольшей температуре пожара в закрытом пространстве. В эксперименте применялся нагрев со скоростью 14°С/мин. Подъем температуры в печи до 850°С за 60,7 минут. Это соответствует паспортным характеристикам печи. После 60 минут температура стабилизируется и автоматически поддерживается.

На Рисунке 3 показано цифровое табло муфельной печи со значением заданных параметров: нижняя строка (зеленое поле) заданная температура 850°С; верхняя строка текущая температура разогрева печи 9°С.



Рисунок 3 - Вид цифрового табло муфельной печи

Образцы закладывались в печь по партиям в произвольном порядке по 3 образца одновременно. При этом для создания одинаковых условий, одновременно испытывались по одному образцу от всех трех серий.

При достижении в печи заданной максимальной температуры образцы выдерживали в печи 10 минут. Общее время воздействия на образцы температуры выше комнатной составило 70 минут. Что можно считать соответствующем общему времени пожара.

После этого печь выключалась и образцы остывали в выключенной печи до комнатной температуры 20–23°C. После остывания образцы перемещались на открытое пространство, со свободным доступом воздуха.

Результаты и их обсуждение. После температурного воздействия образцы приобрели темно желтый цвет, что косвенно указывает на высокую температуру нагрева. Визуальная оценка состояния образцов показала, что нагрев по-разному влияет на поведение мелкозернистого бетона без дисперсного армирования и с дисперсным армированием (Рисунки 4-6).

Все образцы без дисперсного армирования (серия 1) имели сквозные трещины. Один из образцов раскололся практически пополам (Рисунок 4). По всей видимости, это произошло из-за отслаивания заполнителя от цементного камня.



Рисунок 4 - Вид образцов без фибр после испытаний

На Рисунке 5 видно, что отдельные образцы серии 2 имеют большее раскрытие трещин. Это можно объяснить неравномерным распределением фибр в образце и как следствие появлением малоармированных зон.

Образцы с дисперсным армированием в количестве 1,5% также имели трещины. Однако сквозных трещин среди них не было (Рисунок 5).



Рисунок 5 - Вид образцов с 1,5% фибр после испытани

Образцы с дисперсным армированием в количестве 2% имели только поверхностные волосяные трещины (Рисунок 6).

Это связано с тем, что фибры пересекая образывавшиеся трещины не дают им развиваться. Что соответствует результатам многих исследований трещинообразования, например [8, 18, 19]. С увеличением процента дисперсного армирования количество трещин уменьшается.



Рисунок 6 - Вид образцов с 2% фибр после испытаний

Фотографии образцов выполнялись после их выема из остывшей муфельной печи. Видно, что после высокотемпературного воздействия все образцы сохраняют свою форму. Однако после двух суток нахождения в воздушной среде при комнатной температуре, образцы серии 1 потеряли прочность и перестали сохранять форму. Их физическое состояние характеризовалось повышенной сыпучестью с фрагментарным разрушением части элементов.

Образцы серии 2 конструктивно сохранили первоначальную форму, но еще через сутки так же разрушились. Образцы серии 3 в это время продолжали сохранять форму.

Для оценки поведения образцов при высокотемпературном нагреве в течении большего времени, чем при принятой методике три образца (по одному из каждой серии) были выдержаны в муфельной печи после достижения температуры в печи 850°С в течении 30 минут. В этом случае

общее время воздействия на образцы температуры выше комнатной составило 90 минут. На Рисунке 7 показаны образцы после такого нагрева.



Рисунок 7 - Вид образцов выдержанных дополнительно в печи:
а - серии 1, б - серии 2, в - серии 3

Видно, что все образцы имеют сквозные трещины. Образец из серии 1 практически развалился на части.

Таким образом увеличение времени воздействия высокой температуры (850°C) на образцы значительно снизило их прочность. Все образцы после двух суток нахождения в воздушной среде при комнатной температуре потеряли форму.

Заключение. Проведенные экспериментальные исследования показали правильность выбора оборудования для моделирования высокотемпературного нагрева сталефибробетона. А результаты испытаний образцов позволили считать отработанной методику проведения таких исследований.

Проведенные экспериментальные исследования лягут в основу дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Николенко С.Д. Применение фибрового армирования в зданиях и сооружениях, расположенных в сейсмоопасных районах / С.Д. Николенко // Системы жизнеобеспечения и управления в чрезвычайных ситуациях: Межвузовский сборник научных трудов. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2006. С. 38-46.
2. Nikolenko S.D. Behaviour of concrete with a disperse reinforcement under dynamic loads / S.D. Nikolenko, E.A. Sushko, S.A. Sazonova, A.A. Odnolko, V.Ya. Manokhin // Magazine of Civil Engineering. 2017. No. 7(75). Pp. 3–14. DOI: 10.18720/MCE.75.1.
3. Еналеев Р.Ш. Моделирование огнестойкости бетона при высокоинтенсивном нагреве / Р.Ш. Еналеев, Р.Р. Димухаметов, О.А.

- Тучкова, О.Ю. Харитоновна // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Том 15. №10. С. 88-95.
4. Еналеев Р.Ш. Огнестойкость элементов строительных конструкций при высокоинтенсивном нагреве / Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, О.А. Тучкова, О.Ю. Харитоновна, А.В. Качалкин // Пожаровзрывобезопасность. 2010. Т. 19. № 5. С. 48-53.
 5. Еналеев Р.Ш. Критерии огнестойкости элементов строительных конструкций на пожаровзрывоопасных объектах / Р.Ш. Еналеев, Н.М. Барбин, Э.Ш. Теляков, О.Л. Тучкова, А.В. Качалкин // Пожаровзрывобезопасность. 2011. Т. 20. № 1. С. 33-41.
 6. Еналеев Р.Ш. Огнестойкость бетона при высокоинтенсивном нагреве / Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, С.В. Анаников // Международный журнал экспериментального образования. 2012. №7. С. 55-57.
 7. Перцев В.Т. Бетон повышенной термостойкости для огнестойких железобетонных изделий: монография / В.Т. Перцев, Т.В. Загоруйко, А.А. Леденев // Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2017. 102 с.
 8. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: монография / Ф.Н. Рабинович // М.: Издательство АСВ, 2004. 560 с.
 9. Korsun V. The Strength and Strain of High-strength Concrete Elements with Confinement and Steel Fiber Reinforcement Including the Conditions of the Effect of Elevated Temperatures / V. Korsun, N. Vatin, A. Franchi, A. Korsun, P. Crespi, S. Mashtaler // Procedia Engineering. 2015. No. 117. Pp. 970–979. DOI: 10.1016/j.proeng. 2015.08.192.
 10. Голованов В.И. Прочностные и теплофизические свойства бетона с полипропиленовой фиброй в условиях температурного режима стандартного пожара / В.И. Голованов, Н.С. Новиков, В.В. Павлов, Е.В. Кузнецова // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26. №5. С. 37-44.
 11. Новиков Н.С. Огнестойкость и прочность конструкций из фибробетона / Н.С. Новиков // Технологии техносферной безопасности. 2016. №3 (67). С. 122-127.
 12. Young-Sun Heo. Synergistic effect of combined fibers for spalling protection of concrete in fire / Young-Sun Heo, Jay G. Sanjayan, Cheon-Goo Han, Min-Cheol Han // Cement and Concrete Research. 2010. No 40. Pp. 1547-1554.
 13. Пушенко А.С. Высокопрочный бетон в условиях воздействия высоких температур при пожаре: дис. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 2008. 217 с.

14. Yuh-Shiou Tai. Mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800 °C / Yuh-Shiou Tai, Huang-Hsing Pan, Ying-Nien Kung // Nuclear Engineering and Design. 2011. Pp. 2416-2424.
15. Дорф В.А. Огнестойкость высокопрочного сталефибробетона (аналитический обзор) / В.А. Дорф, Р.О. Красновский, Д.Е. Капустин, П.С. Султыгова // Вестник гражданских инженеров. 2017. №4(63). С. 72-80. DOI: 10.23968/1999-5571-2017-14-4-72-80.
16. ГОСТ 30247.0–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования.
17. Swamy R.N. Fiber Reinforced Cement and Concrete / R.N. Swamy // Proceedings of the Fourth RILEM Internal Symposium. E & FN Spon, 1992. 1354 pp.
18. Barros J.A.O. Post-cracking behaviour of steel fibre reinforced concrete / J.A.O. Barros, V.M.C.F. Cunha, A.F. Ribeiro, J.A.B. Antunes // Materials and Structures. 2005. Vol. 38. No. January. Pp. 47-56.
19. Jafarifar N. Post-cracking tensile behaviour of steel-fibre-reinforced roller-compacted-concrete for FE modelling and design purposes / N. Jafarifar, K. Pilakoutas, H. Angelakopoulos, T. Bennett // Materiales de Construcción. 2017. Vol 67(326). No 326. April–June. e122. DOI: <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2017.06716>.

A.S. Molodaya, S.D. Nikolenko, S. A. Sazonova
**MODELING OF HIGH-TEMPERATURE HEATING
OF STEEL-FIBROBETON**

Voronezh state technical University, Voronezh, Russia

The work is devoted to the problem of physical simulation of high-temperature impact on dispersed-reinforced concrete. The results of experimental studies of the behavior of fine-grained fine-grained concretes with metallic fiber (steel fiber-reinforced concrete), in the high-temperature effect modeled in the muffle furnace, are presented. The muffle furnace is selected on the basis of the required high-temperature exposure parameters. In particular, the maximum heating temperature, the rise time of the temperature to the required 8500C. All selected parameters are well correlated with the parameters of real fires. The medium of the working space of the muffle furnace when creating the temperature effect is air. One of the advantages of the selected muffle furnace is the ease of operation and sufficient stability of the maintained temperature. The technique of carrying out the experiment at different high-temperature effects on steel-fiber-reinforced concrete has been worked out. It is shown that the use of dispersed reinforcement in the form of metallic fibers improves the state of experimental samples after high-temperature exposure of a given level. It was revealed that the degree of influence of disperse reinforcement on the state of samples depends on the percentage of reinforcement and the magnitude of the temperature effect. It is shown that an increase in the time of high-temperature exposure affects the state of the samples. The results

of the research will help further develop the process of physical simulation of high-temperature heating in the study of the properties of building materials.

Keywords: modeling, fine-grained concrete, high temperature heating, dispersion-reinforced concrete, experimental study.

REFERENCES

1. Nikolenko S.D. *Primenenie fibrovogo armirovaniya v zdaniyakh i sooruzheniyakh, raspolozhennykh v seysmopasnykh rayonakh* / S.D. Nikolenko // *Sistemy zhizneobespecheniya i upravleniya v chrezvychaynykh situatsiyakh: Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov. Voronezh: Voronezhskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2006. pp. 38-46.*
2. Nikolenko S.D. *Behaviour of concrete with a disperse reinforcement under dynamic loads* / S.D. Nikolenko, E.A. Sushko, S.A. Sazonova, A.A. Odnolko, V.Ya. Manokhin // *Magazine of Civil Engineering. 2017. No. 7(75). Pp. 3–14. DOI: 10.18720/MCE.75.1.*
3. Enaleev R.Sh. *Modelirovanie ognestoykosti betona pri vysokointensivnom nagreve* / R.Sh. Enaleev, R.R. Dimukhametov, O.A. Tuchkova, O.Yu. Kharitonova // *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2012. Tom 15. Vol. 10. pp. 88-95.*
4. Enaleev R.Sh. *Ognestoykost' elementov stroitel'nykh konstruktsiy pri vysokointensivnom nagreve* / R.Sh. Enaleev, E.Sh. Telyakov, O.A. Tuchkova, O.Yu. Kharitonova, A.B. Kachalkin // *Pozharovzryvobezopasnost'. 2010. Vol. 19. No.5. pp. 48-53.*
5. Enaleev R.Sh. *Kriterii ognestoykosti elementov stroitel'nykh konstruktsiy na pozharovzryvoopasnykh ob"ektakh* / R.Sh. Enaleev, N.M. Barbin, E.Sh. Telyakov, O.L. Tuchkova, A.B. Kachalkin // *Pozharovzryvobezopasnost'. 2011. Vol. 20. No.1. pp. 33-41.*
6. Enaleev R.Sh. *Ognestoykost' betona pri vysokointensivnom nagreve* / R.Sh. Enaleev, E.Sh. Telyakov, S.V. Ananikov // *Mezhdunarodnyy zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya. 2012. No.7. pp. 55-57.*
7. Pertsev V.T. *Beton povyshennoy termostoykosti dlya ognestoykikh zhelezobetonnykh izdeliy: monografiya* / V.T. Pertsev, T.V. Zagoruyko, A.A. Ledenev // *Voronezh: Voronezhskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2017. 102 s.*
8. Rabinovich F.N. *Kompozity na osnove dispersno armirovannykh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniya, tekhnologiya, konstruktsii: monografiya* / F.N. Rabinovich // *M.: Izdatel'stvo ACB, 2004. 560 p.*
9. Korsun V. *The Strength and Strain of High-strength Concrete Elements with Confinement and Steel Fiber Reinforcement Including the Conditions of the Effect of Elevated Temperatures* / V. Korsun, N. Vatin, A. Franchi, A.

- Korsun, P. Crespi, S. Mashtaler // *Procedia Engineering*. 2015. No. 117. Pp. 970–979. DOI: 10.1016/j.proeng. 2015.08.192.
10. Golovanov V.I. Prochnostnye i teplofizicheskie svoystva betona s polipropilenovoy fibroy v usloviyakh temperaturnogo rezhima standartnogo pozhara / V.I. Golovanov, N.S. Novikov, V.V. Pavlov, E.V. Kuznetsova // *Pozharovzryvobezопасnost'*. 2017. Vol. No.5. pp. 37-44.
 11. Novikov N.S. Ognestoykost' i prochnost' konstruktsiy iz fibrobetona / N.S. Novikov // *Tekhnologii tekhnosfernoy bezопасnosti*. 2016. No.3 (67). pp. 122-127.
 12. Young-Sun Heo. Synergistic effect of combined fibers for spalling protection of concrete in fire / Young-Sun Heo, Jay G. Sanjayan, Cheon-Goo Han, Min-Cheol Han // *Cement and Concrete Research*. 2010. No 40. Pp. 1547-1554.
 13. Pushenko A.S. Vysokoprochnyy beton v usloviyakh vozdeystviya vysokikh temperatur pri pozhare: dis. ... kand. tekhn. nauk. Rostov-na-Donu, 2008. 217 p.
 14. Yuh-Shiou Tai. Mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800 °C / Yuh-Shiou Tai, Huang-Hsing Pan, Ying-Nien Kung // *Nuclear Engineering and Design*. 2011. Pp. 2416-2424.
 15. Dorf V.A. Ognestoykost' vysokoprochnogo stalefibrobetona (analiticheskiy obzor) / V.A. Dorf, R.O. Krasnovskiy, D.E. Kapustin, P.S. Sulygova // *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2017. No.4(63). pp. 72-80. DOI: 10.23968/1999-5571-2017-14-4-72-80.
 16. GOST 30247.0–94. Konstruktsii stroitel'nye. Metody ispytaniy na ognestoykost'. Obshchie trebovaniya.
 17. Swamy R.N. Fiber Reinforced Cement and Concrete / R.N. Swamy // *Proceedings of the Fourth RILEM Internal Symposium*. E & FN Spon, 1992. 1354 rr.
 18. Barros J.A.O. Post-cracking behaviour of steel fibre reinforced concrete / J.A.O. Barros, V.M.C.F. Cunha, A.F. Ribeiro, J.A.B. Antunes // *Materials and Structures*. 2005. Vol. 38. No. January. Pp. 47-56.
 19. Jafarifar N. Post-cracking tensile behaviour of steel-fibre-reinforced roller-compacted-concrete for FE modelling and design purposes / N. Jafarifar, K. Pilakoutas, H. Angelakopoulos, T. Bennett // *Materiales de Construcción*. 2017. Vol. 67(326). No. 326. April–June. e122. DOI: <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2017.06716>.