УДК 693.554-486+691.322.7

© В. С. Плевков, д-р техн. наук, профессор
(Томский государственный архитектурно-
строительный университет)

E-mail: pvs@tomsksep.ru

© В. В. Белов, д-р техн. наук, гл. строитель
(АО «АТОМПРОЕКТ»)

E-mail: v_belov@to.spbaep.ru

© И. В. Балдин, канд. техн. наук, доцент

E-mail: biwem@yandex.ru

© А. В. Невский, аспирант

(Томский государственный архитектурно-
строительный университет)

E-mail: lokop888@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-2-96-106

© V. S. Plevkov, Dr. Sci. Tech., Professor
(Tomsk State University of Architecture
and Building)

E-mail: pvs@tomsksep.ru

© V. V. Belov, Dr. Sci. Tech., chief specialist
(JSC "ATOMPROEKT")

E-mail: v_belov@to.spbaep.ru

© I. V. Baldin, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

E-mail: biwem@yandex.ru

© A. V. Nevskiy, post-graduate student

(Tomsk State University of Architecture
and Building)

E-mail: lokop888@gmail.com

РАСЧЕТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В УГЛЕКОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЕ НОРМАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКИ НАГРУЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

DESIGN STRESSES IN CARBON FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP) BARS OF NORMAL SECTIONS OF DYNAMICALLY LOADED STRUCTURES

Приведены результаты экспериментальных исследований физико-механических характеристик углекомпозитной полимерной арматуры. Представлена диаграмма деформирования углекомпозитной арматуры, дана оценка ее щелочестойкости. Рассмотрены зависимости для определения деформаций и напряжений в продольной углекомпозитной арматуре относительно высоты сжатой зоны нормального сечения. Предложено выражение для определения деформаций в арматуре данного вида при динамическом характере воздействия внешней нагрузки.

Ключевые слова: арматура композитная полимерная, углекомпозит, диаграмма деформирования, щелочестойкость, нормальные сечения, кратковременная динамическая нагрузка.

The paper presents the results of experimental research on physical and mechanical parameters of carbon fiber reinforced polymer bars. Stress-strain diagram of carbon fiber reinforced bars is given, as well as their alkali resistance evaluation. The paper considers dependences to determine strain and stress in longitudinal carbon fiber reinforced bars in relation to the height of compression area of normal section. The expression is proposed for strain determination in bars of that type subjected to dynamic load.

Keywords: fiber-reinforced polymer (FRP), carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) bar, stress-strain diagram, alkali resistance, normal section, short-time dynamic load.

В последние годы все большее распространение приобретает арматура композитная полимерная (АКП) для армирования бетонных и железобетонных конструкций. Из-за высоких прочностных показателей, а также ее специфических свойств, таких как магнитоинертность и радиопрозрачность, низкий удельный вес и теплопроводность, коррозионная стойкость и др., интерес к ее использованию в качестве стержневой арматуры в строительстве широко про-

является во всем мире. Особый интерес данный вид арматуры вызывает у специалистов военной и атомной промышленности. Этот интерес обоснован актуальностью вопросов создания новых видов строительных конструкций защитных и других видов сооружений с уникальными свойствами, которые в процессе эксплуатации могут быть подвержены динамическим воздействиям взрывного характера, связанным с диверсиями и террористическими актами или вызванным

аварийными ситуациями, возникшими на производстве. Элементы динамически нагруженных конструкций могут испытывать различные, в том числе знакопеременные нагрузки, действующие в различных направлениях. Задача проектирования подверженных таким воздействиям конструкций — недопущение возникновения в них предельных состояний, значительно отличающихся от статически нагруженных конструкций, при которых возникает угроза для человеческих жизней, а также опасность появления убытков в результате уничтожения материальных ценностей. Вопросы назначения расчетных напряжений в продольной арматуре железобетонных и бетонных элементов, армированных АКП, во всем диапазоне их нагружения являются актуальной задачей для исследования.

При расчете элементов строительных конструкций с продольной АКП важной задачей является обеспечение прочности нормальных сечений, которые могут находиться в условиях сжатия, изгиба или растяжения. При этом напряжения в продольной арматуре могут изменяться от предельных напряжений растяжения σ_f до предельных напряжений сжатия σ_{fc} . Величина напряжения в продольной арматуре зависит от высоты сжатой зоны нормального сечения, расположения арматуры в сечении, а также прочностных и деформационных характеристик бетона и арматуры. Использование высоты сжатой зоны в качестве основного параметра для

определения деформации и напряжения в продольной арматуре нормального сечения позволяет получить зависимость $\sigma_f = f(\xi)$, применимую для расчета как внецентренно сжатых и растянутых, так и изгибаемых элементов [1–4].

Для определения особенностей изменения деформаций (напряжений) в продольной АКП нормального сечения и построения зависимости $\varepsilon_f(\sigma_f) = f(\xi)$ проведены экспериментальные исследования ее прочностных и деформационных свойств [5]. В результате сопоставления физико-механических характеристик различных видов волокон [6], используемых в качестве армирующего наполнителя АКП, сделан вывод о том, что углекомпозит является наиболее целесообразным видом композита для армирования бетонных элементов, что предопределило выбор арматуры углекомпозитной (АУК) в качестве исследуемой. Объектом исследования выбрана АУК марки FibARM Rebar с песчаным анкерovacным слоем. Цель экспериментальных исследований — определение действительной диаграммы деформирования АУК при осевом сжатии и растяжении, а также оценка ее устойчивости к щелочной среде бетона путем проведения ряда испытаний серий образцов в соответствии с ГОСТ 31938–2012 [17]. Программа экспериментальных исследований АУК представлена на рис. 1. Общее количество образцов для испытания составило 24 шт.

Перед проведением экспериментальных исследований определялись объемный вес, наруж-

Рис. 1. Программа экспериментальных исследований физико-механических свойств АУК

ный и номинальный диаметр арматуры контролируемой партии. Согласно программе исследований партия образцов была поделена на две равные части, каждая из которых состояла из двух серий: для испытания на осевое растяжение и для испытания осевой сжимающей нагрузкой. Первая часть образцов испытывалась нагружением в исходном состоянии, а вторая часть была предварительно исследована на устойчивость к воздействию щелочи с последующим испытанием нагружением.

Исследование устойчивости АУК к воздействию щелочи проводилось ускоренным методом согласно [17]. Стержни АУК помещались и выдерживались в водном растворе щелочи в течение 30 сут при уровне pH 13,0 и постоянной температуре 60 °С, после чего изымались из раствора, промывались дистиллированной водой, высушивались при температуре 100 °С и взвешивались. В результате воздействия щелочи на образцах были выявлены локальные участки с нарушением целостности песчано-эпоксидного анкеровочного слоя с частичным повреждением наружного армирующего наполнителя. При этом изменение массы стержней не превышало 3 %.

Для испытания нагружением серии образцов помещались в специальные приспособления (рис. 2, б, 3, б), изготовленные по ГОСТ 31938–2012. Испытание осуществлялось приложением статической растягивающей или сжимающей нагрузки к образцам с постоянной скоростью деформирования на современных испытательных машинах. Испытание растягивающей нагрузкой производилось на автоматизированной разрывной гидравлической машине МР-500 (рис. 2, а). Продольные деформации растяжения измерялись высокоточным электронным экстензометром Epsilon-3542, подключенным в режиме синхронизации к электронному блоку управления гидравлической машиной. Испытание сжимающей нагрузкой производилось на электромеханическом прессе Instron-3382 (рис. 3, а). Продольные деформации сжатия измерялись цифровой оптической системой измерения деформаций Vic-3D. Данная система позволяет измерять поля деформаций и перемещений поверхности исследуемых объектов методом численной корреляции ее цифровых стереоскопических изображений. Точность измерения деформаций

системой составляет 0,01 %. Схема измерения деформаций при испытании образцов АУК осевой сжимающей нагрузкой изображена на рис. 4. Схемы разрушения образцов при растяжении и сжатии изображены на рис. 2, в и 3, в.

Общий вид деформирования и разрушения рабочей зоны стержней АУК при испытании на осевое сжатие представлен на рис. 5. На рисунке можно видеть, что образцы АУК не имели следов повреждений вплоть до наступления разрушения, что говорит о возможности повышения эффективности использования ее прочностных свойств в сжатых бетонных элементах, а также при применении материалов, обладающих более высокой деформативностью, чем бетон [7].

По результатам статистической обработки полученных экспериментальных данных построена диаграмма деформирования АУК (рис. 6). Изменение предела прочности в результате воздействия на АУК щелочи составило 7 % при растяжении и 10 % при сжатии. Расчетные значения прочности и предельных деформаций при растяжении АУК вычислены по формулам, представленным в Изменении № 1 к СП 63.13330.2012 [18]. В данном нормативном документе, как и в ряде других зарубежных [19–22], рекомендуется пренебрегать сопротивлением АКП сжатию. Однако продольная АКП, находящаяся в условиях сжатия в бетонных элементах, может деформироваться вплоть до предельных значений укорочения бетона при сжатии $\varepsilon_{b,u}$ [8, 9]. В зависимости от вида бетона, продолжительности действия нагрузки и относительной влажности воздуха предельные деформации укорочения бетона могут принимать различные значения, а соответствующая им величина сжимающих напряжений в АУК может достигать 210 МПа и более. Ввиду этого авторы считают возможным учитывать сопротивление продольной арматуры сжатию при расчете бетонных конструкций с АУК.

Нормативная зависимость $\varepsilon_f = f(\xi)$, связывающая деформации ε_f в продольной АКП с относительной высотой сжатой зоны бетона ξ , реализующая гипотезу плоских сечений, приведена в [18] и представляет собой выражение вида

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{b,u} \left(\frac{\omega}{\xi} - 1 \right), \text{ где } \varepsilon_{b,u} = \varepsilon_{b2}. \quad (1)$$

Рис. 2. Испытания на растяжение стержней АУК: а — общий вид; б — схема приспособлений; в — разрушение стержня

Рис. 3. Испытания на сжатие стержней АУК: а — общий вид; б — схема приспособлений; в — разрушение стержня

Рис. 4. Измерения деформаций системой Vic-3D образцов АУК при испытании осевой сжимающей нагрузкой: а — схема; б — общий вид

Рис. 5. Характерные изополя продольных относительных деформаций при различных уровнях нормальных напряжений (а–и) и схема разрушения (к) стержней АУК при продольных относительных деформациях сжатия: а — 1 ‰; б — 2 ‰; в — 3,5 ‰; г — 4 ‰; д — 5 ‰; е — 6 ‰; ж — 7 ‰; з — 8 ‰; и — 9,6 ‰; к — >9,7 ‰

Рис. 6. Диаграмма деформирования АУК марки FibARM Rebar в исходном состоянии и после воздействия щелочи (АУК^{alk})

Данная зависимость изображена на рис. 7 (кривая 1 с ветвью «1а»). В соответствии с Изменением № 1 к [18] на кривую «1» накладывается ограничение, согласно которому напряжения в продольной арматуре при $\xi > \omega$ принимаются равными нулю, представленное на рис. 7 ветвью «1б».

Более точно отразить действительный характер изменения деформаций (особенно сжимающих) продольной АУК нормального сечения в зависимости от высоты сжатой зоны можно

при помощи выражения (2), приведенного в [23], которое представлено кривой 2 на рис. 7.

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_{b,u}}{1 - \omega / 1,1} \left(\frac{\omega}{\xi} - 1 \right), \text{ где } \varepsilon_{b,u} = \varepsilon_{b0}. \quad (2)$$

Значение граничной относительной высоты сжатой зоны бетона нормального сечения элемента, а также положение конечной точки (из условия совместности деформации бетона и арматуры) диаграммы $\varepsilon_f = f(\xi)$ зависят от величины предельных деформаций бетона $\varepsilon_{b,u}$.

Рис. 7. Изменение деформаций (напряжений) в продольной ненапрягаемой углекомпозитной арматуре нормальных сечений элементов из тяжелого бетона класса по прочности на сжатие В30 (кривые 1, 2), углеородофибробетона класса В45 (кривая 3), а также усиленного облойкой углеородофибробетона (кривая 4) в зависимости от относительной высоты сжатой зоны

Для модифицированных бетонов (например, фибробетонов), имеющих более высокую деформативность по сравнению с бетоном, величина предельных деформаций укорочения может достигать более высоких значений [10, 11]. Зависимость деформаций (напряжений) в продольной углекомпозитной арматуре нормальных сечений элементов из углеородофибробетона класса по прочности на сжатие В45 от относительной высоты сжатой зоны бетона можно представить в виде кривой 3 на рис. 7. Здесь класс по прочности В45 углеородофибробетона принят в соответствии с приростом прочности, полученным в результате модифицирования бетона класса В30 дисперсным армированием [11]. Величина предельных деформаций бетона для внецентренно сжатых элементов при эксцентриситете приложения продольной силы в пределах ядра сечения может быть также увеличена путем устройства внешней облойки. В таком случае предельные относительные деформации бетона $\varepsilon_{b,u} = \varepsilon_{b3}$ и зависят от вида элементов усиления, их механических свойств и условий эксплуатации, тол-

щины облойки и наличия разрывов по ее высоте, класса по прочности на сжатие и деформационных свойств бетона усиливаемого элемента, вида и размеров его поперечного сечения и др. Так, для внецентренно сжатого элемента с поперечным сечением 300×300 мм из бетона класса по прочности В30, усиленного сплошной по высоте углекомпозитной облойкой общей толщиной 2 мм, расчетные предельные деформации бетона [24] составляют $\varepsilon_{b,u} = \varepsilon_{b3} \approx 0,0029$. А для такого же элемента из углеородофибробетона класса В45 $\varepsilon_{b,u} = \varepsilon_{cfb3} \approx 0,0039$. При этом расчетные сопротивления сжатию в осевом направлении R_{b3} и R_{cfb3} усиленных такой облойкой бетона и углеородофибробетона соразмерны классам бетона по прочности на сжатие В35 и В50 соответственно. Для вышеописанного усиленного облойкой углеородофибробетонного элемента при его продольном армировании углекомпозитной арматурой зависимость $\varepsilon_f = f(\xi)$ представлена кривой 4 на рис. 7. При этом сжимающие напряжения в арматуре могут достигать значений порядка 410 МПа.

Выражая напряжения в продольной арматуре нормального сечения через ее деформации путем умножения на соответствующий ее деформированному состоянию модуль упругости ($E_f = 1,44 \cdot 10^5$ МПа или $E_{fc} = 1,05 \cdot 10^5$ МПа), зависимость (2) можно представить в виде выражения, связывающего напряжения σ_f в АУК с относительной высотой сжатой зоны ξ :

$$\sigma_f = \frac{\sigma_{fc,u}}{1 - \omega / 1,1} \left(\frac{\omega}{\xi} - 1 \right). \quad (3)$$

Относительные напряжения в АУК равны

$$\left. \begin{aligned} \psi_f = \frac{\sigma_f}{R_f} = 1 & \quad \text{при } \xi \leq \xi_R, \\ \psi_f = \psi_{fi} = \frac{\sigma_f}{R_f} = \frac{\varepsilon_{b,u}(\omega \xi^{-1} - 1)}{\varepsilon_{f,u}(1 - \omega / 1,1)} & \quad \text{при } \xi_R < \xi \leq \omega, \\ \psi_f = \psi_{fc} = \frac{\sigma_{fc}}{R_{fc}} = \frac{(\omega \xi^{-1} - 1)}{(1 - \omega / 1,1)} & \quad \text{при } \xi > \omega. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Использование в данном случае упрощенных линейных и тригонометрических зависимостей, предложенных в [4, 12] для нормальных сечений железобетонных элементов, вместо гиперболической (4) на участках $\xi_R < \xi < \omega$ и $\xi > \omega$ приводит к большим погрешностям при вычислении относительных деформаций или напряжений в композитной арматуре.

Выражение (4) положено в основу расчетных зависимостей деформаций (напряжений) продольной композитной полимерной арматуры нормальных сечений бетонных элементов при динамическом нагружении $\varepsilon_{fd} = f(\xi)$.

При кратковременном динамическом нагружении, согласно [5], $\varepsilon_s = \varepsilon_{bd,u}$ принимается таким же, как в статике. Однако обширные экспериментальные исследования, проведенные во ВНИИ-Железобетона [13], показали, что $\varepsilon_{bd,u}$ при динамике увеличивается и может быть принята по меньшей мере на 10 % больше статической $\varepsilon_{b,u}$.

Тогда зависимость (2) при динамическом действии нагрузки после преобразований принимает вид

$$\varepsilon_{fd} = \frac{\varepsilon_{bd,u}}{1 - \omega_d / 1,1} \left(\frac{\omega_d}{\xi} - 1 \right). \quad (5)$$

В выражении (5) величина ω_d представляет собой относительную высоту сжатой зоны бетона ($\omega_d = x_{\omega} / h_0$), при которой деформации в продольной арматуре равны нулю. Таким образом, величина ω_d характеризует отклонение фактиче-

ской эпюры напряжения высотой $x_{act} = h_0$ от прямоугольной эпюры высотой x_{ω} , являясь коэффициентом полноты эпюры напряжений в сжатой зоне. Непосредственное использование диаграммы « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » для бетона сжатой зоны представляет большие трудности в определении ω и ε_f , поэтому принятая в СНиП 2.03.01-84* [23] величина ω определяется по эмпирической зависимости, полученной на основании наилучшего приближения к опытным данным:

$$\omega = x_{\omega} / h_0 = \alpha - \beta R_{bi}, \quad (6)$$

где α и β — коэффициенты, характеризующие вид бетона и его упруго-пластические свойства при сжатии; так для тяжелого бетона $\alpha = 0,85$, при статическом нагружении $\beta = (0,005 \dots 0,008) \text{ МПа}^{-1}$, и $\beta = (0,0048 \dots 0,007) \text{ МПа}^{-1}$ при динамике, [10]; R_{bi} — призмная прочность бетона при статическом или кратковременном динамическом нагружении, МПа.

Экспериментальные исследования бетонных призм и железобетонных балок при кратковременном динамическом нагружении, проведенные во ВНИИЖелезобетона под руководством В. А. Рахманова [13] и в НИИЖБе И. К. Белобровым [14], показали, что влияние скорости деформирования не сказывается на значениях ω ($\omega = \omega_d$). Особенности динамического деформирования бетона сжатой зоны сечения, в частности, его деформативная способность, несколько видоизменяют характер динамической зависимости $\varepsilon = f(\xi)$. При одинаковой условной прямоугольной эпюре напряжений и относительной высоте сжатой зоны сечения в предельном состоянии динамические деформации продольной арматуры выше статических, что позволяет более эффективно использовать арматуру [15, 16].

Зависимость изменения деформации продольной АУК от относительной высоты сжатой зоны при статическом и динамическом нагружении представлена на рис. 8.

В результате проведенных исследований выявлены особенности физико-механических свойств углекомпозитной арматуры, определены аналитические выражения, описывающие зависимость между напряжениями в продольной углекомпозитной полимерной арматуре и относительной высотой сжатой зоны нормального сечения при статическом и кратковременном динамическом нагружении. Данные выражения

Рис. 8. Изменение деформаций (напряжений) в продольной АУК в зависимости от относительной высоты сжатой зоны бетона при статическом (сплошная линия) и динамическом (прерывистая линия) нагружениях

могут быть применены для практических расчетов строительных конструкций.

Библиографический список

1. Гуца Ю. П. Статическая прочность железобетонных конструкций и их деформация в стадии, близкой к разрушению: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1980. 44 с.
2. Залесов А. С., Кодыш Э. Н., Лемыш Л. Л., Никитин И. К. Расчет железобетонных конструкций по прочности, трещиностойкости и деформациям. М.: Стройиздат, 1988. 320 с.
3. Гвоздев А. А. и др. Новое о прочности железобетона / под ред. К. В. Михайлова. М.: Стройиздат, 1977. 272 с.
4. Чистяков Е. А. Основы теории, методы расчета и экспериментальные исследования несущей способности сжатых железобетонных элементов при статическом нагружении: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1988. 48 с.
5. Плевков В. С., Балдин И. В., Кудяков К. Л., Невский А. В. Прочность и деформативность арматуры композитной полимерной при статическом и кратковременном динамическом растяжении и сжатии // Вестник ТГАСУ. 2016. № 5. С. 91–101.
6. Степанова В. Ф., Степанов А. Ю., Жирков Е. П. Арматура композитная полимерная. М.: АСВ, 2013. 200 с.
7. Савельев А. А., Тарасова А. Ю. Перспективный метод модифицирования цементных бетонов // Технологии бетонов. 2011. № 5–6. С. 12–13.
8. Лапишинов А. Е. Перспективы применения неметаллической композитной арматуры в качестве рабочей ненапрягаемой в сжатых элементах // Вестник МГСУ. 2015. № 10. С. 96–105.
9. Колмогоров А. Г., Плевков В. С. Расчет железобетонных конструкций по российским и зарубежным нормам. М.: АСВ, 2014. 512 с.

10. Плевков В. С., Колупаева С. Н., Кудяков К. Л. Расчетные диаграммы нелинейного деформирования базальтофибробетона при статических и кратковременных динамических воздействиях // Вестник ТГАСУ. 2016. № 3. С. 95–110.
11. Плевков В. С., Белов В. В., Балдин И. В., Невский А. В. Модели нелинейного деформирования углеродофибробетона при статическом и кратковременном динамическом воздействиях // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 3 (56). С. 72–82.
12. Болдышев А. М., Плевков В. С. Прочность нормальных сечений железобетонных элементов. Томск: Томский ЦНТИ, 1989. 236 с.
13. Рахманов В. А., Семин А. И., Розовский Е. Л. и др. Исследовать динамическую прочность и долговечность строительных материалов и конструкций: Отчет о НИР // ВНИИ Железобетон, № ГР 01.85. 0011305. М., 1985. Книга 1. 96 с. Книга 2. 172 с.
14. Белобров И. К. Особенности деформирования железобетонных балок при действии кратковременных динамических нагрузок // Теория железобетона. М.: Стройиздат, 1972. С. 36–48.
15. Кумпяк О. Г., Галяутдинов З. Р., Кокорин Д. Н. Прочность и деформативность железобетонных конструкций на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении. Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2016. 277 с.
16. Chiaia B., Kumpyak O. G., Placidi L., Maksimov V. B. Experimental analysis and modeling of two-way reinforced concrete slabs over different kinds of yielding supports under short-term dynamic loading // Engineering Structures. 2015. Vol. 96. Pp. 88–99.
17. ГОСТ 31938–2012. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. М.: Стандартинформ, 2014. 38 с.
18. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-101–2003. М.: Минрегион России, 2012. 161 с.
19. ACI 440.1R–15. Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP Bars. ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich. 2015. 83 p.
20. CAN/CSA-S6-02. Design and construction of building components with fibre-reinforced polymers, CAN/CSA S806-02. Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, Canada, 2002. 177 p.
21. CNR-DT 203/2006. Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione e il Controllo di Strutture di Calcestruzzo armato con Barre di Materiale Composito Fibrorinforzato. Rome: CNR, 2007. 42 p. (in Italian)
22. FIB Bulletin 40: FRP reinforcement in RC structures. International Federation for Structural Concrete 2007. 160 p.
23. СНиП 2.03.01–84*. Бетонные и железобетонные конструкции. М.: ГП ЦПП, 1995. 80 с.
24. СП 164.1325800.2014. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования. М.: Минстрой России, 2015. 56 с.
25. СП 88.13330.2014. Защитные сооружения гражданской обороны. Актуализированная редакция СНиП II–11–77*. М.: Минстрой России, 2014. 123 с.

References

1. Gushcha Yu. P. *Statically durable reinforced concrete structures and their deformation in the stage close to damage*. Author's thesis of Dr. Sci. Tech. diss.]. Moscow, 1980, 44 p.
2. Zalesov A. S., Kodysh Eh. N., Lemysh L. L., Nikitin I. K. *Calculation of reinforced concrete designs on durability, crack resistance and deformation*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988, 320 p.
3. Gvozdev A. A., et al. *New data on reinforced concrete durability*. Ed. by Mikhaylov K. V. Moscow, Stroyizdat Publ., 1977, 272 p.
4. Chistyakov E. A. *Foundations, methods of calculation and pilot studies of the bearing ability of the compressed reinforced concrete elements at static loading*. Author's thesis of Dr. Sci. Tech. diss.]. Moscow, 1988, 48 p.
5. Plevkov V. S., Baldin I. V., Kudyakov K. L., Nevskiy A. V. *Durability and deformation properties of composite polymeric fittings at static and short-term dynamic tension and compression*. *Vestnik TGASU – TSACU Bulletin*, 2016, no. 5, pp. 91–101.
6. Stepanova V. F., Stepanov A. Yu., Zhirkov E. P. *Composite polymeric fittings*. Moscow, ASV Publ., 2013, 200 p.
7. Savel'ev A. A., Tarasova A. Yu. *Perspective method of modifying of cement concrete*. *Tekhnologii betonov – Technologies of concrete*, 2011, no. 5–6, pp. 12–13.
8. Lapshinov A. E. *Perspectives of application of non-metallic composite reinforcement in the quality of work of non-prestressed concrete in the stage of deformation*. [The

prospects of use of nonmetallic composite fittings as in operation and not strained in the compressed elements]. *Vestnik MGSU – MGSU Bulletin*, 2015, no. 10, pp. 96–105.

9. Kolmogorov A. G., Plevkov V. S. *Raschet zhelezobetonnykh konstruktsey po rossiyskim i zarubezhnyim normam* [Calculation of reinforced concrete designs in accordance with the Russian and foreign norms]. Moscow, ASV Publ., 2014, 512 p.

10. Plevkov V. S., Kolupaeva S. N., Kudyakov K. L. *Raschetnye diagrammy nelineynogo deformirovaniya bazal'tofibrobetona pri staticheskikh i kratkovremennykh dinamicheskikh vozdeystviyakh* [Calculation charts of nonlinear deformation of a basalt fiber reinforced concrete at static and short-term dynamic influences]. *Vestnik TGASU – TGASU Bulletin*, 2016, no. 3, pp. 95–110.

11. Plevkov V. S., Belov V. V., Baldin I. V., Nevskiy A. V. *Modeli nelineynogo deformirovaniya uglerodofibrobetona pri staticheskoy i kratkovremennoy dinamicheskoy vozdeystviyakh* [Model of nonlinear straining of carbon fiber reinforced concrete under static and short-term dynamic loads]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. 3 (56), pp. 72–82.

12. Boldyshev A. M., Plevkov V. S. *Prochnost' normal'nykh secheniy zhelezobetonnykh ehlementov* [Durability of normal sections of reinforced concrete members]. Tomsk, Tomsk TsNTI Publ., 1989, 236 p.

13. Rakhmanov V. A., Semin A. I., Rozovskiy E. L., et al. *Issledovat' dinamicheskuyu prochnost' i dolgovechnost' stroitel'nykh materialov i konstruktsey: Otchet o NIR* [Investigating the dynamic durability and durability of construction materials and designs: Report on NIR]. VNIIZhelezobeton – All-Russian Research Institute Reinforced concrete, no. GR 01.85.0011305, Moscow, 1985.

14. Belobrov I. K. *Osobennosti deformirovaniya zhelezobetonnykh balok pri deystvii kratkovremennykh dinamicheskikh nagruzok* [Features of deformation of reinforced concrete beams subjected to the action of short-term dynamic loadings]. *Teoriya zhelezobetona* [Theory of reinforced concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1972, pp. 36–48.

15. Kumpyak O. G., Galyautdinov Z. R., Kokorin D. N. *Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnykh konstruktsey na podatlivykh oporakh pri kratkovremennoy dinamicheskoy nagruzhennii* [Durability and deformation properties of reinforced concrete designs on pliable

support at short-term dynamic loading]. Tomsk, TSACU Publ., 2016, 277 p.

16. Chiaia B., Kumpyak O. G., Placidi L., Maksimov V. B. Experimental analysis and modeling of two-way reinforced concrete slabs over different kinds of yielding supports under short-term dynamic loading. *Engineering Structures*, 2015, vol. 96, pp. 88–99.

17. GOST 31938–2012. *Armatura kompozitnaya polimernaya dlya armirovaniya betonnykh konstruktsey* [Composite polymeric fittings for reinforcing concrete designs]. Moscow, Standartinform Publ., 2014, 38 p.

18. SP 63.13330.2012. *Betonnye i zhelezobetonnye konstruktсии. Osnovnye polozheniya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIIP 52-101-2003* [Concrete and reinforced concrete designs. Basic provisions. The revised issue of Construction Norms and Regulations 52-101-2003]. Moscow, Minregion Rossii Publ., 2012, 161 p.

19. ACI 440.1R–15. *Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP Bars*. ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich. 2015, 83 p.

20. CAN/CSA-S6-02. *Design and construction of building components with fibre-reinforced polymers*, CAN/CSA S806-02. Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, Canada, 2002, 177 p.

21. CNR-DT 203/2006. *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione e il Controllo di Strutture di Calcestruzzo armato con Barre di Materiale Composito Fibrorinforzato*. Rome: CNR, 2007, 42 p. (in Italian)

22. *FIB Bulletin 40: FRP reinforcement in RC structures*. International Federation for Structural Concrete 2007, 160 p.

23. SNIIP 2.03.01–84*. *Betonnye i zhelezobetonnye konstruktсии* [SNIIP 2.03.01–84*. Concrete and reinforced concrete designs]. Moscow, GP TsPP Publ., 1995, 80 p.

24. SP 164.1325800.2014. *Usilenie zhelezobetonnykh konstruktsey kompozitnymi materialami. Pravila proektirovaniya* [SP 164.1325800.2014. Strengthening of reinforced concrete designs composite materials. Rules of design]. Moscow, Minstroy Rossii Publ., 2015, 56 p.

25. SP 88.13330.2014. *Zashchitnye sooruzheniya grazhdanskoy oborony. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIIP II-11-77** [SP 88.13330.2014. Protective constructions of civil defense. The revised issue of SNIIP II-11-77*]. Moscow, Minstroy Rossii Publ., 2014, 123 p.