

doi: 10.5862/MCE.59.5

Структура и свойства текстильно-армированного бетона Structure and properties of textile reinforced concrete

*Студент А.А. Волкова,
студент А.В. Пайков,
канд. техн. наук, доцент О.Н. Столяров,
инженер С.Г. Семенов,
д-р техн. наук, зав. каф. Б.Е. Мельников,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, Санкт-
Петербург, Россия*

*A.A. Volkova,
A.V. Paykov,
O.N. Stolyarov,
S.G. Semenov,
B.E. Melnikov,
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic
University, Saint Petersburg, Russia*

Ключевые слова: текстильно-армированный бетон; основовязанные полотна; структура

Key words: textile-reinforced concrete; warp-knitted fabrics; mechanical properties; structure

Аннотация. В статье представлены результаты исследования структуры и свойств образцов текстильно-армированного бетона. Для изготовления образцов были использованы два вида высокопрочных армирующих полотен из стеклянных и углеродных ровингов. В рамках исследования были проведены испытания полученных образцов на поперечный изгиб, определен их предел прочности при изгибе и эффективность армирования. Показано, что образцы с текстильным армированием обладают более высокими прочностными характеристиками по сравнению с неармированными. Кроме того, проанализировано деформационное поведение армированного бетона. Преимущество заключается в большей остаточной несущей способности, позволяющей сохранять целостность конструкции без разрушения после предельных механических воздействий.

Abstract. In this paper the structure and properties of textile-reinforced concrete were investigated. Two types of high strength reinforcing fabrics made of glass and carbon rovings were used in this study. The samples of textile-reinforced concrete were produced. The mechanical properties of the developed samples were determined via a three-point bending test. The maximum flexural strength and reinforcement efficiency were calculated. It was found that the samples with textile reinforcement have higher strength characteristics as compared to nonreinforced concrete. Furthermore, the deformation behavior of reinforced concrete was analyzed. The advantage is in higher residual load-bearing capacity, which allows maintaining the integrity of the structure.

Введение

В настоящее время высокопрочные текстильные материалы находят все новые применения для армирования элементов конструкций в строительной отрасли [1–4]. Для их изготовления в основном применяются высокопрочные и высокомодульные волокна и нити, такие как стеклянные, базальтовые, углеродные и др. [2]. В сочетании с цементной матрицей они образуют новый класс конструкционных строительных материалов – текстильно-армированный бетон, который сегодня считается одним из самых перспективных материалов, используемых в строительстве. По сравнению с традиционными строительными материалами текстильно-армированный бетон обладает рядом неоспоримых преимуществ, таких как высокая коррозионная стойкость, меньший вес конструкций и т. д. Однако его применение зачастую ограничено дороговизной исходных армирующих материалов, вследствие чего использование такого бетона в конструкциях массивных сооружений экономически нецелесообразно. Поэтому такое армирование находит эффективное применение в различных конструкциях, сочетающих в себе легкость, малые габариты и прочность – например, в сэндвич-панелях и различных перегородках, а также может применяться при реконструкции различных бетонных сооружений.

Литературный обзор

Применение высокопрочных текстильных материалов для армирования бетонных конструкций дает множество преимуществ, одним из которых является изготовление достаточно Волкова А.А., Пайков А.В., Столяров О.Н., Семенов С.Г., Мельников Б.Е. Структура и свойства текстильно-армированного бетона

тонких бетонных элементов по сравнению с традиционным железобетоном. В дополнение ко всему этому текстильная арматура обладает большей гибкостью и драпируемостью. В качестве армирующего компонента для композитного бетона чаще всего используют щелочестойкие стекловолокна (AR-glass), а также базальтовые и углеродные волокна. Данные наполнители могут применяться как в виде рубленого волокна, так и в виде полотен с открытыми ячейками. В отличие от дискретных волокнистых наполнителей, именно в текстильных полотнах могут быть широко реализованы свойства высокопрочных и высокомодульных нитей. Механизм работы армирующего волокна в цементной матрице сильно отличается от действующего в полимерной матрице из-за более низкого предельного удлинения первой, которое значительно меньше удлинения волокон. Поэтому в цементных композитах матрица разрушается раньше, чем будут полностью реализованы прочностные свойства волокнистого армирования. В полимерных композитах матрица обычно более пластичная, чем волокно. Существенным преимуществом также является то, что волокно будет способно воспринимать нагрузку уже после образования трещины и разрушения матрицы.

Армирующая структура для бетона представляет собой плоский или пространственный каркас, состоящий из ячеек определенной геометрической формы, которые способствуют проникновению цементной матрицы в структуру. Ячейки могут иметь различную форму: прямоугольник, ромб, треугольник и др. Размеры и форма ячеек также могут варьироваться. Чаще всего встречаются прямоугольные ячейки с размерами 8, 10, 16, 20 мм. От размеров ячеек полотна зависит сцепление с бетонной матрицей, и, как следствие, механические свойства при равном объеме армирования. Чем больше ячейка, тем выше вероятность того, что внутри бетона не будет пустот, снижающих его прочностные характеристики.

За последние два десятилетия развитию данного направления было посвящено значительное число работ. В работе [3] описывается системный подход к изучению усиленного волокнистыми композитами бетона. В общем случае он включает:

- 1) испытание материала;
- 2) анализ свойств;
- 3) расчет наилучшего соотношения прочности и трещиностойкости;
- 4) статистический анализ и расчет на прочность.

В работах [4–6] описаны методы измерений и применения конструкций из усиленного композитами бетона, а также способы производства армирующих нитей и полотен. В [7–9] рассматривается зависимость прочностных характеристик композита от структурных параметров армирующих ровингов и полотен. В исследованиях [10, 11] описывается применение полимеров в композитном бетоне. В [12] рассмотрена возможность применения углеродных волокнистых материалов и композитов на их основе в бетонных конструкциях. Различные способы усиления композитами, такие как заливка бетона в опалубку из полотна и использование смеси стальной и неметаллической фибры, рассмотрены в [13, 14]. В исследованиях [15–18] изучаются различные модели, такие как компьютерная модель композитной конструкции из бетона, модели, описывающие поведение конструкции под влиянием продолжительных нагрузок и коррозии. Существующие способы усиления железобетонных конструкций пролетных строений, включая усиление композиционными материалами на основе углеродных волокон в полимерном связующем, исследованы в работе [19]. Увеличение прочности бетонных конструкций может быть также осуществлено с применением преднапряженных текстильных полотен [20, 21]. В целом, технология применения армирующей стеки из высокопрочных ровингов обладает рядом преимуществ по сравнению с железобетоном. С помощью гибкой сетки можно создать плоский или пространственный армирующий каркас необходимой формы, который будет легко монтироваться в форме для изготовления определенных бетонных элементов.

Из проанализированных данных можно заключить, что основные преимущества использования высокопрочного текстиля для армирования бетона состоят в:

- повышении прочностных характеристик, особенно в случаях больших нагрузок на тонкие элементы;
- повышении долговечности конструкций и снижении расходов других материалов, которые используют в строительстве для получения таких же прочностных характеристик, что и при применении композитов;
- увеличении несущей способности конструктивных элементов;
- повышении трещиностойкости и меньших размерах трещин в случае их образования и др.

Постановка задачи и описание исследования

Основная цель данной работы состояла в исследовании возможности применения высокопрочных армирующих полотен из стеклянных и углеродных ровингов и изучении их влияния на механические свойства текстильно-армированного бетона. Для решения этой задачи необходимо было установить, как прочностные характеристики текстильно-армированного бетона зависят от структуры и состава волокон. В работе были исследованы два вида армирующих структур, представляющих собой сетчатоподобные основовязанные полотна, изготовленные из стеклянных и углеродных нитей. Характеристики исследуемых образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики армирующих материалов

№	Армирующий ровинг			Полотно		
	В продольном направлении	В поперечном направлении	Предел прочности при растяжении, МПа	Модуль упругости, МПа	Размер ячейки	Поверхностная плотность, г/м ²
1	Щелочестойкий стеклянный (AR-glass), 4К, 2400 текс	Щелочестойкий стеклянный (AR-glass)	1024.0 ± 60.3	66.5±2.0	8 × 8 мм	620
2	Углеродный (на основе ПАН волокна), 24К, 1600 текс		2093.0 ± 73.4	173.0±4.3	8 × 8 мм	510

Структура армирующего полотна представляет собой сетку с прямоугольными ячейками из проложенных в двух направлениях армирующих ровингов, соединенных дополнительной тонкой провязывающей полиэфирной нитью с линейной плотностью 15.6 текс. Исследуемая структура включала стеклянные (образец 1) или углеродные (образец 2) ровинги в продольном направлении и только стеклянные ровинги в поперечном направлении. Размер ячейки составлял 8 × 8 мм, при этом на 50 мм приходилось 6 ровингов. Структуры используемых армирующих полотен из стеклянных и углеродных ровингов представлены на рисунках 1а и 1б соответственно.

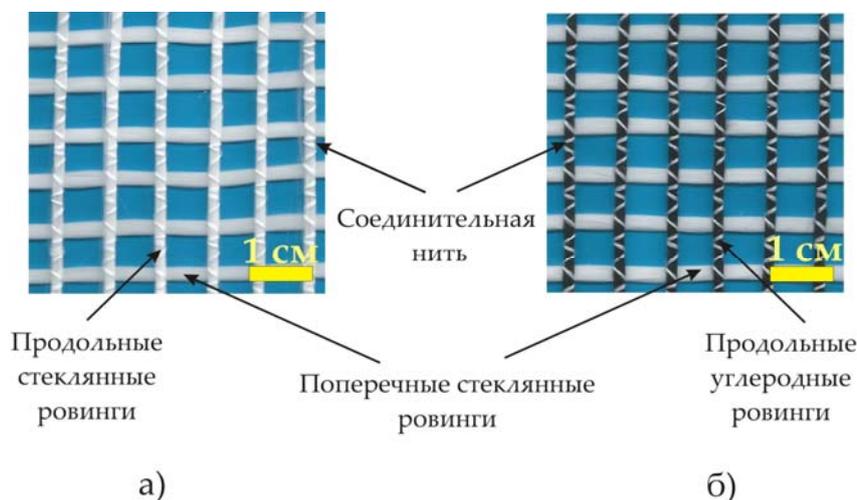


Рисунок 1. Структура армирующих полотен

Для изготовления опытных образцов текстильно-армированного бетона использовалась цементная смесь (предел прочности при сжатии в возрасте 28 суток не менее 20 МПа), заполнитель – кварцевый песок с максимальной фракцией 0.63 мм. Размеры форм прямоугольного сечения для изготовления образцов составили 56 × 200 × 20 мм. В каждый образец на расстоянии 3 мм от нижнего и верхнего краев было заложено по 2 полотна в продольном направлении ровингов симметрично срединной плоскости образца. Для испытаний каждого из видов армирования была изготовлена серия из 5 образцов, которые были испытаны на поперечный (трехточечный) изгиб в возрасте 28 суток (рис. 2). Расстояние между крайними опорами составляло 150 мм.

По результатам испытаний была определена величина предела прочности при изгибе как отношение максимального изгибающего момента при разрушении образца к осевому моменту сопротивления сечения при изгибе:

$$\sigma = \frac{M_{\text{изг}}^{\text{max}}}{W_z}, \quad (1)$$

где $M_{\text{изг}}^{\text{max}}$ – максимальный изгибающий момент, кН*м; W_z – осевой момент сопротивления, м³.



Рисунок 2. Испытание армированного образца на трехточечный изгиб

Результаты испытаний

На рисунке 3 представлены зависимости прогиба от напряжения поперечного изгиба образцов армированных цементных композитов. Из приведенных диаграмм видно, что характер поведения неармированного и армированного образцов различен. Кроме того, он существенно зависит от вида армирующей нити. Исследуемые образцы армированного бетона демонстрируют схожий характер поведения. Начальный участок деформирования характеризуется линейностью свойств с последующим переходом в участок с незначительной нелинейностью. После этого появляется первая поперечная трещина. В случае образцов из стеклоровинга величина этой нагрузки является максимальной на диаграмме поперечного изгиба. Образец из углеродного ровинга демонстрирует нагрузку при изгибе, соответствующую первой трещине и примерно равную прочности неармированного бетона. Затем наблюдается рост напряжений при изгибе за счет сопротивляемости углеродных нитей. Этот процесс происходит скачкообразно с образованием еще нескольких максимальных пиков. Величины предела прочности при изгибе представлены на рисунке 4а.

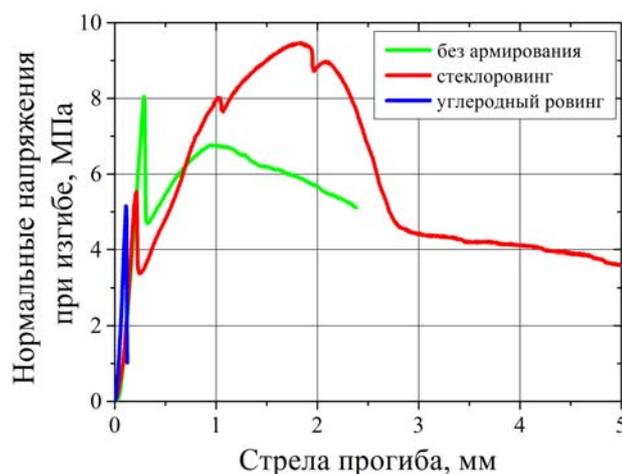


Рисунок 3. Диаграммы изгиба исследуемых образцов

Анализируя результаты, можно отметить следующее. Предел прочности при изгибе неармированного бетона составляет 5.2 МПа. Применение армирующего полотна дает определенный прирост в прочности: так, прочность образцов, армированных стекловолокном, составляет 8.1 МПа, а для образцов, армированных углеродными ровингами, достигает 9.5 МПа. Однако, как видно из представленных на рисунке 3 кривых, первый пик на диаграмме изгиба для образца на основе стекловолокна совпадает с прочностью при изгибе бетонного образца. У образца, армированного углеродными ровингами, величина первого пика составляла примерно 0.5 от предела прочности при изгибе. Далее, с ростом прогиба, наблюдается увеличение нагрузки за счет сопротивляющихся ровингов. Данная способность сохранять форму и работоспособность без разрушения при весьма больших деформациях может найти применение в важных областях, связанных, например, с сейсмостойкостью зданий и сооружений.

Эффективность применения армирующего полотна может быть оценена с помощью коэффициента, показывающего отношение предела прочности при изгибе армированного бетона к пределу прочности при изгибе исходного бетона:

$$k_3 = \frac{\sigma_{ap}}{\sigma_{и}}. \quad (2)$$

Результаты расчета по формуле (2) представлены на рисунке 4б. Как видно из полученных данных, эффективность применения армирующих полотен зависит от типа исходного ровинга. Для образца на основе стекловолокна прочность при изгибе увеличилась в 1.55 раза, а для образца на основе углеродных ровингов – в 1.81 раза. Видно, что имеется определенный эффект от армирования высокопрочными полотнами. Однако по приведенным результатам измерений сложно судить о достоверности полученных результатов, поскольку разброс значений прочности при изгибе у армированных образцов является весьма существенным. Это хорошо видно по стандартному отклонению на гистограммах для образцов армированного бетона.

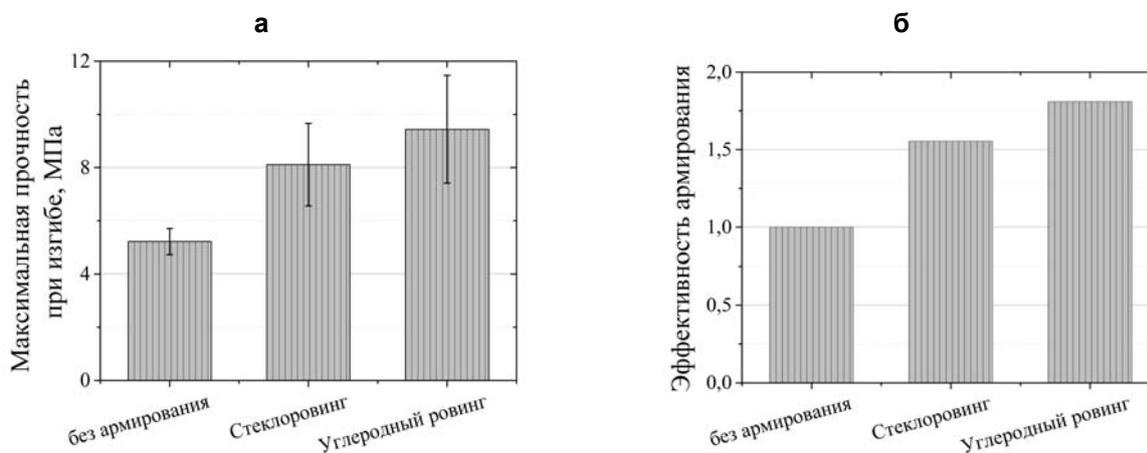


Рисунок 4. Предел прочности при изгибе (а) и эффективность армирования (б) для различных образцов

Для того чтобы оценить достоверность полученных результатов, был проведен статистический анализ достоверности различий результатов испытания по t-критерию Стьюдента. Результаты расчетов представлены в таблице 2. Жирным начертанием выделены различия между результатами испытаний, которые являются значимыми на уровне 0.05. Из полученных результатов следует, что между сериями неармированный бетон и армированный бетон на основе стеклянных или углеродных ровингов существуют значимые различия. Однако при сравнении результатов серий образцов на стеклянных и углеродных ровингах различия не являются достоверными.

Таблица 2. Статистический анализ достоверности различий между сериями образцов

Параметр	Армирующий компонент	Неармированный	Стекланный ровинг	Углеродный ровинг
Предел прочности при изгибе	без армирования		0.0119	0.0051
	стекланный ровинг			0.3168
	углеродный ровинг			

Заклучение

Показано, что образцы с текстильным армированием обладают более высокими прочностными свойствами по сравнению с исходными образцами. Эффективность армирования рассчитана с помощью предложенного коэффициента k_3 и приведена в зависимости от типа армирующего полотна. Проанализировано деформационное поведение армированного бетона. Показано, что образцы, армированные высокопрочными текстильными полотнами, обладают большей остаточной несущей способностью, позволяющей сохранять целостность конструкции без разрушений после предельных механических воздействий. Проведен статистический анализ полученных результатов. Выявлена достоверная значимость различий между результатами серий исходных образцов бетона и армированных полотнами образцов. Сравнения значений предела прочности при изгибе между армированными образцами не показали достоверных различий. Однако в целом можно отметить очевидные преимущества использования текстильного армирования, состоящие главным образом в высокой остаточной несущей способности такого материала.

Исследуемая технология армирования может быть использована при создании различных перегородок из бетона, имеющих малую толщину и высокие прочностные характеристики. Кроме того, возможно создание самонесущих конструкций, которые будут более стойкими к коррозионному воздействию и будут обладать меньшим удельным весом, нежели классические железобетонные конструкции.

Литература

1. Столяров О.Н., Горшков А.С. Применение высокопрочных текстильных материалов в строительстве // Инженерно-строительный журнал. 2009. №4. С. 21–25.
2. Stolyarov O.N., Quadflieg T., Gries T. Effects of fabric structures on the tensile properties of warp-knitted fabrics used as concrete reinforcements // Textile Research Journal. 2015. №85(18). Pp. 1934–1945.
3. Löfgren I. Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction. Department of Civil and Environmental Engineering, Structural engineering. Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden. 2005. 276 p.
4. Hegger J., Voss S. Design methods for textile reinforced concrete under bending and shear loading // Proceedings of the 2nd International FIB Congress. Neapol, 5–8 June 2006. Pp. 1–12.
5. Voss S., Hegger J. Dimensioning of textile reinforced concrete structures // 1st International Conference Textile Reinforced Concrete (ICTRC). 2006. Pp. 1–10.
6. Voss S. Design methods for textile reinforced concrete // 6th International PhD Symposium in Civil Engineering. 2006. Pp. 1–8.
7. Peled A., Cohen Z., Pasder Y., Roye A., Gries T. Influences of textile characteristics on the tensile properties of warp knitted cement based composites // Cement & Concrete Composites. 2008. №30. Pp. 174–183.
8. Horstmann M., Shams A., Hegger J. Tragverhalten von Sandwichkonstruktionen aus textiltbewehrtem Beton. // 6 Kolloquium zu textiltbewehrten Tragwerken (CTRS6). Gemeinsames Abschlusskolloquium der Sonderforschungsbereiche 528 (Dresden) und 532 (Aachen). Berlin, 19.09.2011–20.09.2011. Pp. 329–340.
9. Kulas C., Hegger J., Raupach M., Antons U. Brandverhalten textiltbewehrter Bauteile. // 6 Kolloquium zu textiltbewehrten Tragwerken (CTRS6). Gemeinsames Abschlusskolloquium der Sonderforschungsbereiche 528 (Dresden) und 532 (Aachen). Berlin, 19.09.2011–20.09.2011. Pp. 329–340.
10. Курлапов Д.В., Куваев А.С., Родионов А.В., Валеев Р.М. Усиление железобетонных конструкций с применением полимерных композитов // Инженерно-строительный журнал. 2009. №3. С. 17–21.
11. Keil A., Raupach M. Improvement of the Load-Bearing Capacity of Textile Reinforced Concrete by the Use of Polymers // Professor Yoshihiko Ohama Symposium. 12th Volkova A.A., Paykov A.V., Stolyarov O.N., Semenov reinforced concrete

References

1. Stolyarov O.N., Gorshkov A.S. Primeniye vysokoprochnykh tekstilnykh materialov v stroitelstve [Application of Extra-strong Textile Materials in construction]. *Magazine of Civil Engineering*. 2009. No. 4. Pp. 21–25. (rus)
2. Stolyarov O.N., Quadflieg T., Gries T. Effects of fabric structures on the tensile properties of warp-knitted fabrics used as concrete reinforcements. *Textile Research Journal*. 2015. No. 85(18). Pp. 1934–1945.
3. Löfgren I. *Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction*. Department of Civil and Environmental Engineering, Structural Engineering. Chalmers University Of Technology. Göteborg. Sweden. 2005.
4. Hegger J., Voss S. Design methods for textile reinforced concrete under bending and shear loading. *Proceedings of the 2nd International FIB Congress*. Neapol, 5–8 June 2006. Pp. 1–12.
5. Voss S., Hegger J. Dimensioning of textile reinforced concrete structures. *1st International Conference Textile Reinforced Concrete (ICTRC)*. 2006. Pp.1–10.
6. Voss S. Design methods for textile reinforced concrete. *6th International PhD Symposium in Civil Engineering*. 2006. Pp. 1–8.
7. Peled A., Cohen Z., Pasder Y., Roye A., Gries T. Influences of textile characteristics on the tensile properties of warp knitted cement based composites. *Cement & Concrete Composites*. 2008. No. 30. Pp. 174–183.
8. Horstmann M., Shams A., Hegger J. Tragverhalten von Sandwichkonstruktionen aus textiltbewehrtem Beton. *6 Kolloquium zu textiltbewehrten Tragwerken (CTRS6)*. Gemeinsames Abschlusskolloquium der Sonderforschungsbereiche 528 (Dresden) und 532 (Aachen). Berlin, 19.09.2011–20.09.2011. Pp. 329–340.
9. Kulas C., Hegger J., Raupach M., Antons U. Brandverhalten textiltbewehrter Bauteile. *6 Kolloquium zu textiltbewehrten Tragwerken (CTRS6)*. Gemeinsames Abschlusskolloquium der Sonderforschungsbereiche 528 (Dresden) und 532 (Aachen). Berlin, 19.09.2011–20.09.2011. Pp. 329–340.
10. Kurlapov D.V., Kuvayev A.S., Rodionov A.V., Valeyev R.M. Usileniye zhelezobetonnykh konstruktсий s primeneniym polimernykh kompozitov [Reinforcement of concrete structures using polymer composites]. *Magazine of Civil Engineering*. 2009. No. 3. Pp. 17–21. (rus)
11. Keil A., Raupach M. Improvement of the Load-Bearing Capacity of Textile Reinforced Concrete by the Use of Polymers // Professor Yoshihiko Ohama Symposium. 12th Volkova A.A., Paykov A.V., Stolyarov O.N., Semenov reinforced concrete

- International Congress on Polymers in Concrete. 2007. Pp. 873–881.
12. Параничева Н.В., Назмеева Т.В. Усиление строительных конструкций с помощью углеродных композиционных материалов // Инженерно-строительный журнал. 2010. №2. С. 19–22.
 13. Ghaib M. Al A., Go'rski J. Mechanical properties of concrete cast in fabric formworks // *Cement and Concrete Research*. 2001. № 31. Pp. 1459–1465.
 14. Sivakumar A., Santhanam M. Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and non-metallic fibres // *Cement & Concrete Composites*. 2007. №29. Pp. 603–608.
 15. Holler S., Butenweg C., Noh S.-Y., Meskouris K. Computational model of textile-reinforced concrete structures // *Computers and Structures*. 2004. №82. Pp. 1971–1979.
 16. Orłowsky J. Modeling the long-term behavior of textile reinforced concrete // *Proceedings of the 5th International PhD Symposium in Civil Engineering*. Delft, the Netherlands. 16–19 June 2004. Pp. 155–163.
 17. Orłowsky J., Antons U., Raupach M. Behaviour of Glass-Filament-Yarns in Concrete as a Function of Time and Environmental Conditions // *Brittle Matrix Compositions 7*. Elsevier Ltd. 2003. Pp. 233–241.
 18. Orłowsky J., Raupach M. Modelling the loss in strength of AR-glass fibres in textile-reinforced concrete // *Materials and Structures*. 2006. №39. Pp. 635–643.
 19. Овчинников И.Г., Валиев Ш.Н., Овчинников И.И., Зиновьев В.С., Умиров А.Д. Вопросы усиления железобетонных конструкций композитами: 1. Экспериментальные исследования особенностей усиления композитами изгибаемых железобетонных конструкций // *Науковедение*. 2012. №4. Статья 7ТВН412.
 20. Reinhardt H.W., Kruger M., Grosse C.U. Concrete Prestressed with Textile Fabric // *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2003. Vol. 1. №2. Pp. 231–239.
 21. Peled A. Pre-tensioning of fabrics in cement-based composites // *Cement and Concrete Research*. 2007. №37. Pp. 805–813.
 - Capacity of Textile Reinforced Concrete by the Use of Polymers. *Professor Yoshihiko Ohama Symposium. 12th International Congress on Polymers in Concrete*. 2007. Pp. 873–881.
 12. Paranicheva N.V., Nazmeyeva T.V. Usileniye stroitelnykh konstruktсий s pomoshchyu uglerodnykh kompozitsionnykh materialov [Strengthening of building structures using carbon composite materials]. *Magazine of Civil Engineering*. 2010. No. 2(12). Pp. 19–22 (rus)
 13. Ghaib M. Al A., Go'rski J. Mechanical properties of concrete cast in fabric formworks. *Cement and Concrete Research*. 2001. No. 31. Pp. 1459–1465.
 14. Sivakumar A., Santhanam M. Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and non-metallic fibres. *Cement and Concrete Composites*. 2007. No. 29. Pp. 603–608.
 15. Holler S., Butenweg C., Noh S.-Y., Meskouris K. Computational model of textile-reinforced concrete structures. *Computers and Structures*. 2004. No. 82. Pp. 1971–1979.
 16. Orłowsky J. Modeling the long-term behavior of textile reinforced concrete. *Proceedings of the 5th International PhD Symposium in Civil Engineering*. Delft, the Netherlands. 16–19 June 2004. Pp. 155–163.
 17. Orłowsky J., Antons U., Raupach M. Behaviour of Glass-Filament-Yarns in Concrete as a Function of Time and Environmental Conditions. In: *Brittle Matrix Compositions 7*. Elsevier Ltd. 2003. Pp. 233–241.
 18. Orłowsky J., Raupach M. Modelling the loss in strength of AR-glass fibres in textile-reinforced concrete. *Materials and Structures*. 2006. No. 39. Pp. 635–643.
 19. Ovchinnikov I.G., Valiyev Sh.N., Ovchinnikov I.I., Zinovyev V.S., Umirov A.D. Voprosy usileniya zhelezobetonnykh konstruktсий kompozitami: 1. Eksperimentalnyye issledovaniya osobennostey usileniya kompozitami izgibayemykh zhelezobetonnykh konstruktсий [Problems of reinforcement of concrete structures with composites: 1. Experimental investigations of peculiarity of reinforcement with composites for bendable concrete structures]. *Naukovedenie*. 2012. No. 4. Article 7EBT412. (rus)
 20. Reinhardt H.W., Kruger M., Grosse C.U. Concrete Prestressed with Textile Fabric. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2003. Vol. 1. No. 2. Pp. 231–239.
 21. Peled A. Pre-tensioning of fabrics in cement-based composites. *Cement and Concrete Research*. 2007. No. 37. Pp. 805–813.

Анна Андреевна Волкова,
+7(950)0219390; эл. почта: volkova-anna-andreevna@mail.ru

Алексей Витальевич Пайков,
+7(911)7447543; эл. почта: paykov-alexey@yandex.ru

Олег Николаевич Столяров,
+7(812)5526303; эл. почта: oleg.stolyarov@rambler.ru

Сергей Георгиевич Семенов,
+7(921)9834456; эл. почта: ssgrus@gmail.com

Борис Евгеньевич Мельников,
+7(812)5526303; эл. почта: kafedra@ksm.spbstu.ru

Anna A. Volkova,
+7(950)0219390; volkova-anna-andreevna@mail.ru

Alexey V. Paykov,
+7(911)7447543; paykov-alexey@yandex.ru

Oleg N. Stolyarov,
+7(812)5526303; oleg.stolyarov@rambler.ru

Sergey G. Semenov,
+7(921)9834456; ssgrus@gmail.com

Boris E. Melnikov,
+7(812)5526303; kafedra@ksm.spbstu.ru