



doi: 10.18720/CUBS.78.3

## Углеродные волокна в строительстве мостов

### Carbon fibers in bridge construction

О.Н. Столяров<sup>1\*</sup>, В.Я. Ольшевский<sup>2</sup>, А.Е. Донцова<sup>3</sup>,  
Ю.А. Демидова<sup>4</sup>

O.N. Stolyarov<sup>1\*</sup>, V.Y. Olshevskiy<sup>2</sup>, A.E. Dontsova<sup>3</sup>,  
Y.A. Demidova<sup>4</sup>

<sup>1-4</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

<sup>1-4</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St.  
Petersburg, Russia

#### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

углеволокно;  
углепластик;  
тросы;  
система крепления;  
мосты;  
волокна

#### KEYWORDS

carbon fiber;  
CFRP;  
cable;  
anchorage system;  
bridge;  
fiber;

#### АННОТАЦИЯ

В данной работе рассмотрены возможности применения высокопрочных волокнистых углеродных материалов в строительстве мостов, проанализированы основные функции их использования. Выполнен сравнительный анализ механических свойств основных типов углеродных волокон, рассмотрены альтернативные варианты высокопрочных волокон. Рассмотрены характеристики удельной прочности и жесткости углеродных композитов в сравнении с различными конструкционными материалами. Прочность на растяжение и модуль упругости углеродных волокон лежат в достаточно широком диапазоне. Однако, несмотря на превосходство модуля упругости углеволокна над модулем упругости традиционного материала – стали – и альтернатив в виде параарамидных волокон и волокон высокомодульного полиэтилена, углеродные волокна являются более хрупкими и менее устойчивыми к изгибу. При этом, по удельным показателям прочности и жесткости, углепластики превосходят практически все наиболее широко используемые конструкционные полимерные и металлические материалы. В связи с этим, в статье представлена концепция применения углеродных волокон в строительстве мостов.

#### ABSTRACT

The paper discusses the possibilities of use of high-strength fibrous carbon materials (CFRPs) in the bridge construction. A comparative analysis of the mechanical properties of the main types of carbon fibers is carried out, alternative variants of high-strength fibers are considered. The characteristics of specific strength and stiffness of carbon composites are compared with characteristics of traditional structural materials. The tension capacity and elastic modulus of carbon fibers lie in a rather wide range. Despite the superiority of the elastic modulus of carbon fibers over the elastic modulus of a traditional material - steel - and alternatives (para-aramid fibers and high modulus polyethylene fibers), carbon fibers are more fragile and less resistant to bending. At the same time, in terms of specific indicators of strength and stiffness, CFRPs surpass almost all polymer and metal materials used in construction. According to this, the concept of application of carbon fibers in the bridge construction is presented in the study.

#### Содержание

1.	Введение	37
2.	Методы	37
3.	Результаты и обсуждение	38
3.1.	Армирование легковесных бетонных композитов	38
3.2.	Тросы подвесных конструкций	39
3.3.	Мониторинг состояния конструкций	39
3.4.	Механические характеристики	40
3.5.	Концепция применения в вантовых мостах	42
4.	Заключение	42

## 1. Введение

Для повышения уровня жизни человека необходимо обеспечивать непрерывный процесс развития во всех областях науки и техники. Одним из определяющих факторов такого развития является разработка новых и перспективных видов волокнистых конструкционных материалов [1,2]. Востребованность таких материалов обусловлена с одной стороны их высокими механическими характеристиками и долговечностью, а, с другой стороны, невозможностью обойтись без подобных технических решений в прочных и облегченных конструкциях. Еще в конце XX века высокопрочные волокна (углеродные, стеклянные, арамидные и др.) применялись в основном в ответственных конструкциях и дорогостоящей спортивной экипировке. За последние три десятилетия высокопрочные волокна и композиты на их основе вошли в нашу жизнь и все чаще заменяют традиционные конструкционные материалы в энергетике, транспорте, электронике и других сферах деятельности [3].

Одним из перспективных направлений применения высокопрочных волокон и композитов на их основе является строительство [4]. Процесс внедрения подобных композитов в строительную отрасль происходит значительно медленнее, нежели в других сферах деятельности, где новейшие материалы нашли широкое применение. Основная причина этого состоит, главным образом, в объемах потребляемых высокопрочных волокон. Так, например, армированные волокнами детали машин по своим размерам не содержат значительного количества волокна по сравнению с объемом выпускаемой продукции. Строительная отрасль, благодаря своим масштабам, способна потреблять огромное количество волокнистых материалов. Существующие два направления развития строительного текстиля включают геотекстиль, работающий в контакте с грунтом, и текстиль, применяемый в строительных конструкционных элементах. Если первое направление развито достаточно широко, то второе направление на сегодняшний день только начинает набирать значимые темпы развития. Главная причина этого состоит в относительно высокой стоимости высокопрочных волокон и, как уже было сказано выше, в больших требуемых объемах такого волокна. Высокопрочные волокна, полотна и композиты на их основе находят различные применения в строительных конструкциях, которые включают: стеновые панели, легкие перекрытия, тросы и др. Последняя область применения позволяет наиболее оптимально реализовать прочностные и жесткостные свойства высокопрочных волокон, главным образом, углеродных.

Целью данной работы является анализ перспектив применения углеродных волокон в конструкциях тросов вантовых мостов и других областях применения для дальнейшего углубления в тему и экспериментальной проверки аналитических данных.

Задачи данной работы включают:

1. Анализ механических характеристик волокнистых материалов, их достоинства и недостатки.
2. Изучение опыта применения углеродных волокон в строительной отрасли и основными перспективными направлениями развития.
3. Сравнение углеродных волокон и композитов на их основе с другими конструкционными материалами.

## 2. Методы

В работе рассматривается применимость углепластика в качестве несущего материала в конструкциях мостов, в частности, использование углеволокна как основного материала тросов подвесных конструкций. Проводится исследование механических характеристик углеродных волокон. Достоинства и недостатки материала выявляются с помощью сравнения с альтернативами. В качестве значимых характеристик принимаются прочность на растяжение, модуль упругости, удельные прочность и жесткость.

Исследование успешного опыта применения углеволоконных материалов основано на анализе существующих научных работ на изучаемую тематику и смежные с ней.

Механические характеристики рассматриваются в сравнении: как со сталью, так и с конкурирующими полимерными материалами – параарамидными и волокнами и волокнами из высокомолекулярного полиэтилена. Удельные прочность и жесткость углепластиков сравниваются с рядом традиционных конструкционных материалов, среди которых металлы, стекло- и органопластики. Результаты сравнения для наглядности оформляются в диаграммы.

Подробный анализ углеволоконных композитов уже был проведен авторами в работе [17]. Авторами были рассмотрены теоретические аспекты использования кабелей из углеволокна в строительстве вантовых мостов, в частности, большепролетных. Авторы обосновывают применение композитных материалов резким облегчением конструкции, и, вместе с этим, уменьшением количества обслуживающих

работ. Авторы приводят сравнение механических характеристик углепластиковых кабелей со стальными, а также изучают вопросы закрепления кабелей и наилучшего вида плетения тросов. В статье доказываются возможности создания большепролетных мостов из углеродного материала уже в течение следующих 30–40 лет.

Исследование старения и истирания углеродных волокон в виде тросов для вантового моста проведено в работе [21]. Авторы изучают поведение углеродных волокон при их эксплуатации на примере нескольких уменьшенных и полноразмерных моделей тросов. В ходе эксперимента модели тросов были испытаны на растяжение и истирание. Вместе с этим было оценено влияние усталостной нагрузки на остаточные механические свойства канатов. Авторы приходят к выводам о возможности конкуренции тросов из углеволокна с традиционными стальными вантами.

В данной работе, в свою очередь выполнен сравнительный анализ механических свойств различных типов углеродных волокон, и рассмотрены альтернативные варианты других видов высокопрочных волокон, таких, как параарамид, полиэтилен и др. Для оценки возможностей применения углеволокна рассмотрены характеристики удельной прочности и жесткости углеродных композитов в сравнении с традиционными конструкционными материалами. Показано, что даже с учетом ухудшения свойств в композите (по сравнению с цельным углепластиком) удельные механические характеристики волокон остаются весьма высокими по сравнению с металлами. На основе выполненного обзора и анализа представлена концепция перспективных направлений применения углеродных волокон в строительстве мостов.

В основном, высокопрочные волокна подразделяют на углеродные, стеклянные и арамидные. Углеродные волокна получают путем термической обработки прекурсоров в форме волокон на основе гидратцеллюлозы, акрилонитрила, нефтяных пеков и др. Основной их характеристикой является высокое содержание углерода (до 99% по массе). Углеродные волокна характеризуются высокой прочностью (несколько тысяч МПа), высокими значениями модуля упругости (несколько сотен ГПа), стойкостью к атмосферным воздействиям, агрессивным средам и термостойкостью. Удельная плотность данных волокон составляет 1,8 г/см<sup>3</sup>. К недостаткам материала можно отнести невысокое сопротивление изгибу и хрупкость. Основные свойства углеродных волокон и нитей отражены в работах [5,6].

Стеклянные волокна и нити получают путем формования из расплавленного стекла. Стеклянные волокна характеризуются высокой прочностью, высокими значениями модуля упругости. Свойства стеклянных волокон зависят от химического состава стекла, и, в свою очередь, свойства определяют марку стеклянных волокон [6,7].

Арамидные волокна и нити представляют собой волокна на основе ароматических полиамидов. Они характеризуются высокими прочностными и деформационными свойствами. Кроме того, в отличие от углеродных и стеклянных волокон, они хорошо противостоят изгибным деформациям [8].

Углеродные волокна могут применяться в различной форме: коротких волокон, непрерывных ровингов (нитей), полотен, а также в сочетаниях с различными покрытиями. Последние предназначены не для существенного повышения механических характеристик, но для увеличения долговечности конструкционных элементов.

### **3. Результаты и обсуждение**

#### **3.1. Армирование легковесных бетонных композитов**

Применение волокнистых материалов для армирования конструкционных композитов находит все больший интерес в последние несколько десятилетий. Особую популярность при армировании конструкционных композитов получили текстильные полотна, представляющие собой армирующий каркас из непрерывных текстильных нитей или ровингов [4]. В отличие от дискретных и волокнистых наполнителей именно в текстильных полотнах могут быть широко реализованы свойства высокопрочных и высокомодульных волокон, особенно таких, как углеродные. Наряду с армированием полимерными композитами, в последние два десятилетия нашли широкое применение и бетонные композиты, представляющие собой сочетание текстильного армирующего каркаса и бетонной матрицы [9–15]. Использование высокопрочных текстильных полотен в качестве арматуры в бетоне предоставляет новые возможности для изготовления бетонных деталей. По факту, легковесный текстильный бетон используется во многих аспектах, включая как оригинальные архитектурные фрагменты, так и несущие конструкционные элементы. В основном, такой тип инновационных материалов используется в строительстве уникальных сооружений [15]. Ограничение распространения таких технологий на массовое строительство связано с недостатком сведений о поведении материалов и конструкций из них. Кроме того, широкое разнообразие текстильного армирования требует детального изучения свойств для

оптимального использования при армировании элементов строительных конструкций. Тем не менее, ограниченные сведения о свойствах этих материалов и конструкций создают препятствие для их широкого использования в строительстве.

Углеродные волокна могут с успехом применяться при изготовлении тонкостенных бетонных панелей. Главным фактором такого применения является возможность изготовления сравнительно тонкой конструкции по сравнению с аналогичными изделиями с применением традиционной стальной арматуры. Основные цели применения текстильной арматуры для конструкционных бетонных композитов можно резюмировать следующим образом:

- появление новых строительных технологий;
- улучшенные прочностных характеристик, особенно при больших нагрузках на тонкие конструкционные элементы;
- более низкая стоимость по сравнению с другими материалами при аналогичных прочностных характеристиках;
- улучшенная несущая способность элементов;
- более низкая подверженность коррозии;
- пригодность для предварительного напряжения бетона.

### ***3.2. Тросы подвесных конструкций***

Стальные тросы и элементы в подвесных мостах находятся под значительным риском коррозии и, в некоторых случаях, истирания в местах закреплений. Эти факторы заметно ограничивают рабочее напряжение системы вант и создают необходимость использования недешевых способов защиты кабелей. В последние годы все больше внимания уделяется перспективам применения неметаллических тросов в качестве вант. Данная технология может снизить цену на установку и обслуживание конструкции за счёт уменьшения частоты смены элементов. При этом надежность моста может быть повышена за счет значительной долговечности углеродных волокон, достигаемой благодаря их высокой коррозионной стойкости. Срок эксплуатации конструкций с использованием неметаллических несущих элементов порой может составлять до 50-100 лет. Как известно, 50 лет – условная долговечность капитального строительства – время, за которое технологии и материалы морально устаревают, а нормативные нагрузки и скорости движения возрастают.

Введение в кабели углеволокна вместо стали было предложено в 1982 году [16]. Подробные исследования применения углепластиковых кабелей в строительстве вантовых мостов, в том числе действующие примеры применения композитных тросов, проблемы и их возможные решения, а также перспективы развития и внедрения технологии, описаны в работе [17]. Технические решения, связанные с применением углепластиковых кабелей в тросах вантовых мостов приведены в статьях [18,19]. Серии испытаний на прочность, усталость и истирание были проведены для полноразмерных и малых моделей тросов из углеволокна в работах [20–22].

Ряд испытаний, проведенный на моделях тросов из углепластика, стекловолокна и арамидного волокна, описан в исследовании [20]. В работе выявлено, что углеродные и арамидные волокна обладают наивысшими эксплуатационными характеристиками. Механика истирания кабелей и проблемы их закрепления изучены авторами работы [21]. Проблема усталостного понижения прочности и стойкости тросов исследована с помощью ряда испытаний в работе [22].

Показано, что расчет висячих мостов как сложных инженерных сооружений, следует производить с учетом геометрической и конструктивной нелинейностей на действие постоянных нагрузок, включая предварительное напряжение, и нагрузок, возникающих на период монтажа и демонтажа, а также сейсмических нагрузок. Висячие системы представляют собой обширный класс строительных конструкций, основными несущими элементами которых служат растянутые тросы, воспринимающие полезную поперечную нагрузку. Воспринимая вес элементов пролетного строения, несущая конструкция получает предварительное натяжение, что увеличивает общую жесткость пролетного строения и снижает его прогибы при воздействии временной нагрузки.

### ***3.3. Мониторинг состояния конструкций***

Еще одной перспективной областью применения углеродных волокон является мониторинг нагруженных состояний. Как известно, углеродные волокна наряду с высокими механическими характеристиками обладают электропроводящими свойствами. Мониторинг с помощью успешно внедрённых конструкций из углепластика описан в работах [23–25]. Экспериментальные исследования в данной области были сосредоточены на статических и механических характеристиках креплений различных элементов предварительного напряжения, реализованных с помощью механических анкеров

для последующего натяжения системы [26–28], и на статических характеристиках прямых связей углеродных волокон и арматуры [29–32]. Однако, при проведении мониторинга выяснилось, что статическое испытание не может оценить ухудшение состояния волокон из-за ползучести, являющейся основной причиной разрушения волокон в долгосрочной перспективе. Ползучесть, как механизм, зависящий от времени, может происходить из-за ослабления напряжения в предварительно напряженных элементах, или из-за ползучести на границе раздела между стержнем и бетоном [33, 34].

В 2003 году авторами было выполнено экспериментальное исследование по балкам, предварительно напряженным с помощью углеродных волокон [35]. Это единственное исследование, которое описывает долговременную деформацию и растрескивание балок, предварительно напряженных углеродными волокнами, в течение периода, ограниченного 520 днями. Рабочие характеристики, сравниваемые с характеристиками балок, предварительно напряженных обычными стальными проводами, подтверждают высокое влияние прочности бетона на ширину трещины и ползучесть.

Впоследствии авторы представили аналитическую модель для предварительно напряженных балок и экспериментально проверили ее на трех участках пучка углепластиковых волокон в исследовании [36]. В целом, было разработано несколько аналитических подходов для прогнозирования поведения ползучести, несмотря на отсутствие достаточного количества экспериментов и долгосрочных данных по ползучести бетонных конструкций, включающих композитные арматурные стержни или углеродные волокна.

Потери напряжения в балках с предварительным натяжением углеродных волокон проанализированы в работе [37]. Авторы сравнили прогиб, приобретенный за длительное время балками, армированными предварительно напряженными тросами из различных материалов. Аналогичный эксперимент, проведенный на двутавровой балке после ее нагружения описан в [38]. Вышеописанные экспериментальные исследования имели максимальную продолжительность два года, и в их процессе не наблюдалось полных разрушений предварительно напряженной конструкции с углеродными волокнами от долгосрочных воздействий.

### 3.4. Механические характеристики

Основные достоинства применения углеродных волокон состоят в высоких механических характеристиках. При этом углеродные волокна по своим физическим свойствам также существенно различаются. Существуют различные типы углеродных волокон и нитей, например, высокопрочные (ВП), со стандартным модулем (СМ), высокомодульные (ВМ) и ультра(сверх)высокомодульные (СВМ). Каждый тип волокна имеет свою отдельную область применения. Сравнительный анализ механических характеристик представлен на рисунке 1.

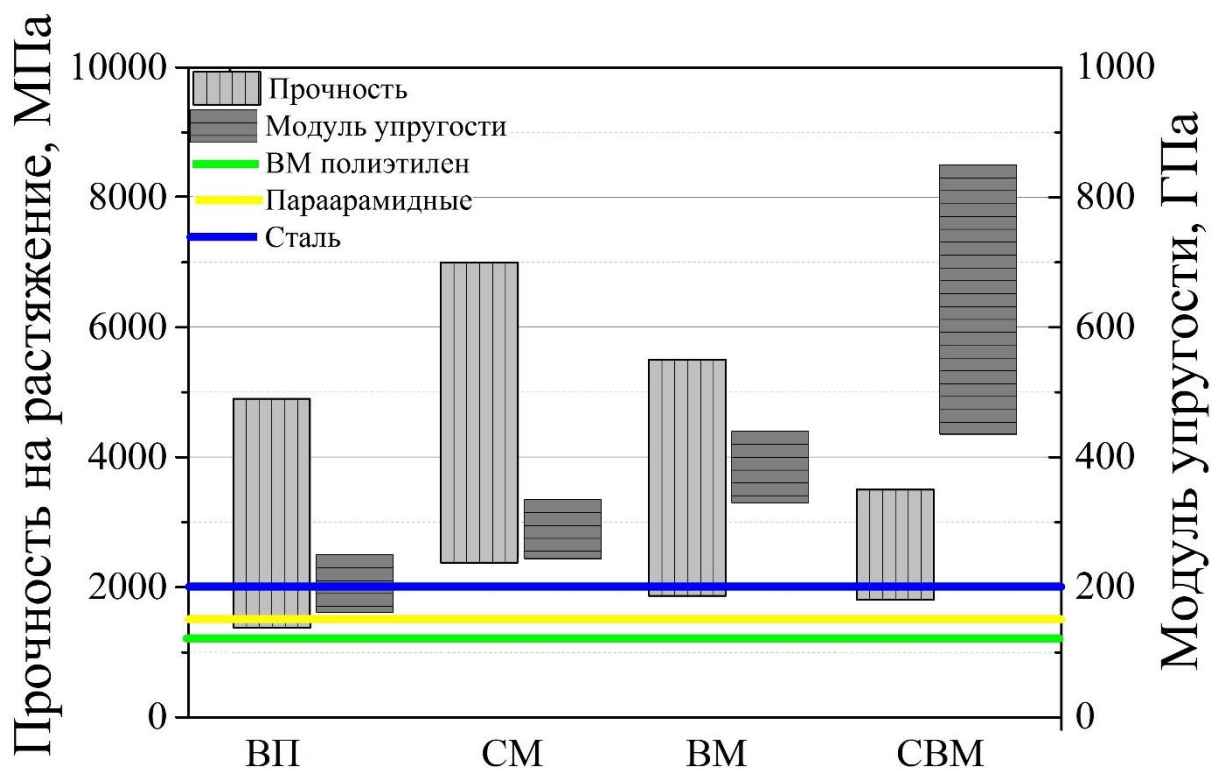


Рис. 1. Сравнительный анализ механических характеристик высокопрочных волокон

Как видно из представленного анализа, прочность на растяжение и модуль упругости углеродных волокон лежат в достаточно широком диапазоне. При этом, если прочностные характеристики различаются не так значительно, то модуль упругости увеличивается весьма существенно. Для сравнения на данный график нанесены значения модуля упругости для используемых стальных волокон и возможных альтернатив в виде параарамидных волокон и волокон высокомодульного полиэтилена. Несмотря на более низкое значение модуля упругости данные виды волокон обладают достаточно хорошей устойчивостью к изгибным воздействиям и обладают неоспоримым преимуществом по сравнению с хрупкими легкоповреждаемыми углеродными волокнами.

Кроме того, основным преимуществом использования углеродных волокон и композитов является их высокая удельная прочность и жесткость. Удельная прочность (отношение прочности к весу) может быть определена по формуле (1)

$$Y_{\text{п}} = \sigma \text{ (МПа)} / \rho \text{ (г/см}^3\text{)} \quad (1)$$

Удельная жесткость (отношение модуля упругости к весу) может быть определена по формуле (2)

$$Y_{\text{ж}} = E \text{ (МПа)} / \rho \text{ (г/см}^3\text{)} \quad (2)$$

При сравнении углеродного композита с металлами получаем для удельной прочности:

$$\text{Сталь} = 500 \text{ (МПа)} / 7,8 \text{ (г/см}^3\text{)} = 64$$

$$\text{Алюминий} = 270 \text{ (МПа)} / 2,7 \text{ (г/см}^3\text{)} = 100$$

и для удельной жесткости:

$$\text{Углерод/Полимер} = 1500 \text{ (МПа)} / 1,8 \text{ (г/см}^3\text{)} = 830$$

$$\text{Сталь} = 210 \text{ (ГПа)} / 7,8 \text{ (г/см}^3\text{)} = 27$$

$$\text{Алюминий} = 70 \text{ (ГПа)} / 2,7 \text{ (г/см}^3\text{)} = 26$$

$$\text{Углерод/Полимер} = 140 \text{ (ГПа)} / 1,6 \text{ (г/см}^3\text{)} = 77,8$$

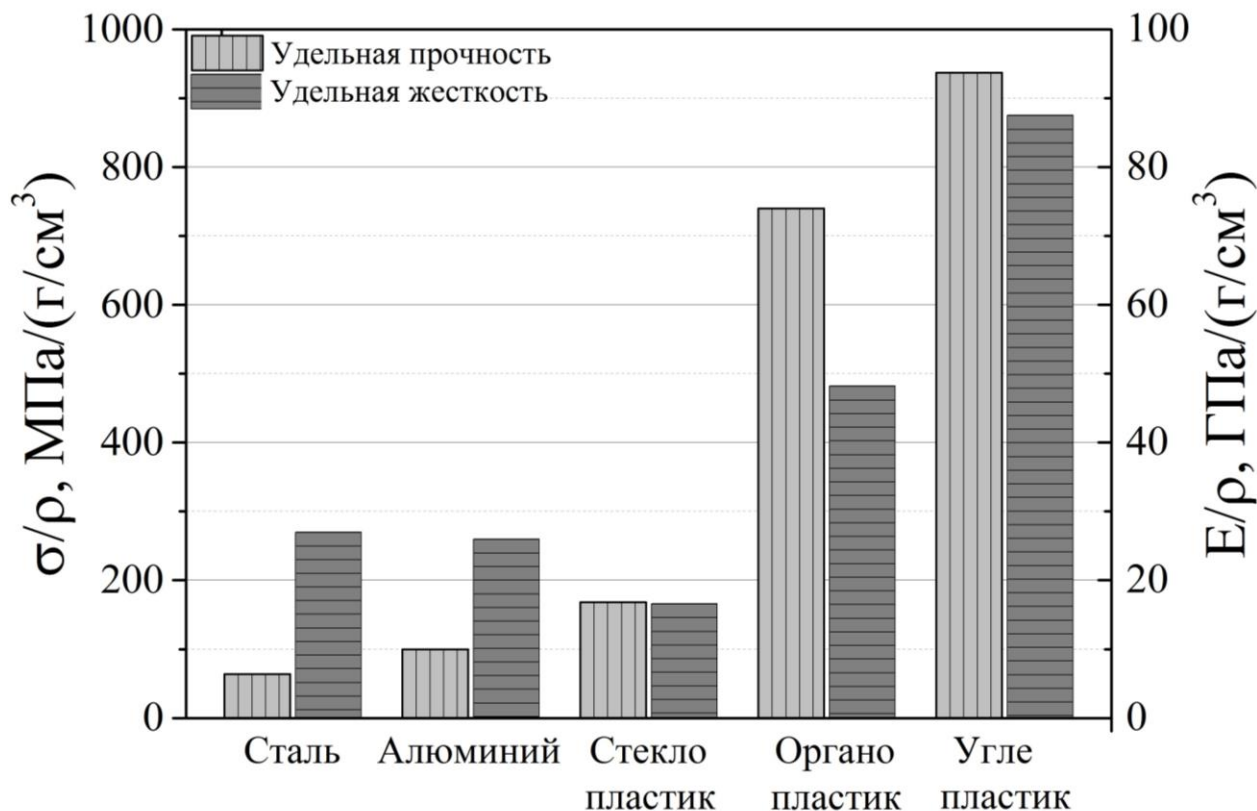


Рис. 2. Удельная прочность и удельная жесткость конструкционных материалов

Сравнительный анализ свойств материалов по удельной прочности и удельной жесткости представлен на рисунке 2. Следует отметить, что свойства углеродных композитов приведены по отношению к их характеристикам в форме композита, которые гораздо меньше чем свойства исходных углеродных волокон. Основная причина этого состоит в некоторой повреждаемости углеродных волокон при их переработке. Однако по удельным показателям прочности и жесткости углепластики превосходят практически все наиболее широко используемые конструкционные полимерные и металлические материалы.

Также значительным преимуществом углеродных волокон является низкий коэффициент линейного термического расширения, устойчивость к воздействию агрессивных сред.

### 3.5. Концепция применения в вантовых мостах

Как уже было упомянуто, применение исходных углеродных волокон в цельном виде невозможно, поэтому наиболее рациональными являются плетеные одноосноориентированные структуры, используемые в качестве тросов, либо армирующие тканые или основовязанные полотна, содержащие в своей структуре прямолинейные углеродные ровинги или нити.

Концепция возможного применения высокопрочных углеродных волокон в строительстве мостов представлена на рисунке 3. Углеродные волокна, материалы и композиты на их основе могут найти применения сразу в нескольких функциях, как армирования, так и мониторинга.

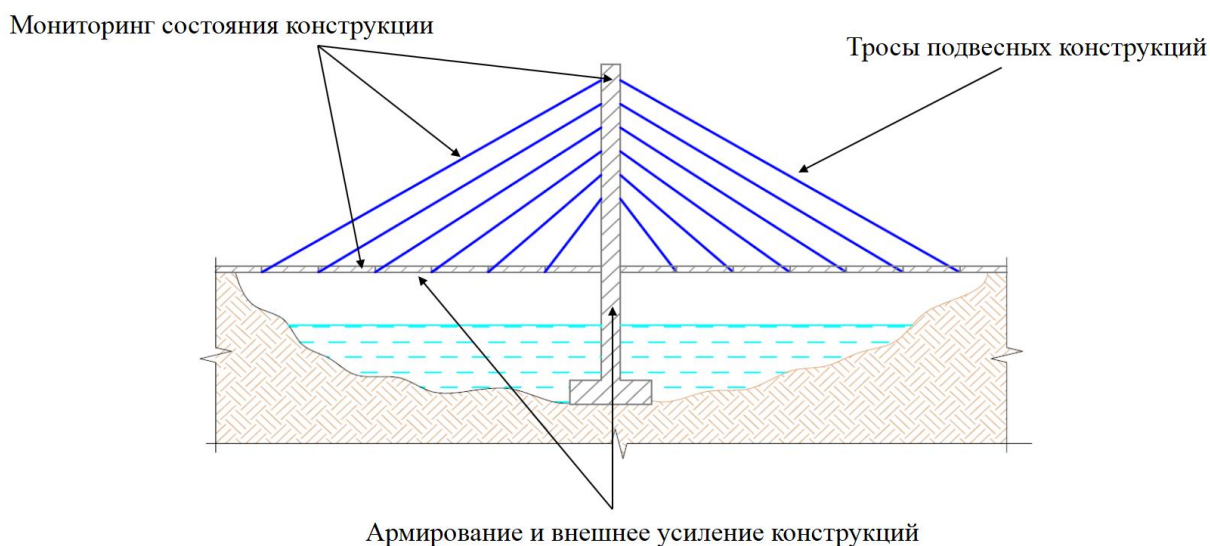


Рис. 3. Концепция применения углеродных волокон в строительстве мостов

Также существуют определенные проблемы, связанные с применением углеродных волокон в строительстве мостов. Как было отмечено выше, они главным образом связаны с высокой механической повреждаемостью волокон и их низким сопротивлением изгибу. В настоящее время это ограничивает их успешное применение, поскольку технологически избежать этого достаточно сложно. Так, например, остается вопрос закрепления углепластиковых тросов в дорожном полотне и на пилонах.

## 4. Заключение

К основным достоинствам композитных материалов из углеродного волокна можно причислить легкий вес, высокую прочность, высокие значения модуля упругости, стойкость к атмосферным воздействиям, агрессивным средам и термостойкость. Тем не менее, существует ряд проблем, требующих рассмотрения и ограничивающих на данный момент широкое применение углеродных волокон и композитов в строительстве. К ним относятся невысокое сопротивление изгибу, хрупкость, относительная дороговизна материала, а также недостаточное количество долгосрочных наблюдений за старением материала, и, как следствие, недостаточная предсказуемость поведения материала в ответственных элементах конструкций.

1. Углепластики могут быть применены в строительстве в качестве армирующих несущих компонентов. В частности, углепластиковые плиты уже используются в качестве внешних армирующих компонентов в конструкциях некоторых мостовых пролетов в Европе. В виде волокон, углеродный материал может быть использован для армирования бетона и позволяет создавать прочные

тонкостенные конструкции. В плетении, углеродное волокно может применяться в качестве тросов подвесных конструкций, а именно вантовых мостов.

2. По механическим характеристикам углепластики в форме композитного материала превосходят возможные альтернативы и аналоги: сталь, параарамид, высокомолекулярный полиэтилен, стеклопластик и органоластик. При этом, значительный недостаток углеродных волокон кроется в их хрупкости и слабой прочности на изгиб. Эти факторы подразумевают необходимость дополнительной защиты углеволокна от негативных воздействий среды.

В работе была рассмотрена применимость углеродных волокон и композитов на их основе в строительстве, в частности, в качестве альтернативы традиционным конструкционным материалам, таким, как сталь. Основной упор в выполненном обзоре сделан на возможность использования высокопрочных волокнистых углеродных материалов в строительстве мостов. Проанализированы основные функции их использования в таких конструкциях. Рассмотрены три основных перспективных направления использования углеродных волокон, включающие армирование легковесных бетонных композитов, тросы подвесных конструкций и мониторинг состояния конструкций. Ряд вопросов остается неразрешенным и требует рассмотрения для успешного введения в использование углеродных волокон в строительстве мостов, поэтому в дальнейшем планируется создать масштабную модель вантового моста, где в качестве тросов будут использованы плетеные одноосно-ориентированные структуры или армирующие тканые полотна из углеволокна, и провести аналитические эксперименты. Представленный анализ в данной статье, в дальнейшем будет являться основой для исследования по рассмотрению основных характеристик вантовых конструкций мостов и выявление их преимуществ среди других видов данных сооружений.

#### Литература

- [1]. Isley F. The use of high performance textiles in construction projects // J. Ind. Text. 2001. Vol. 31, № 3. P. 205–217.
- [2]. Eichhorn S.J. et al. Handbook of textile fibre structure. Woodhead Publishing Limited, 2009.
- [3]. Handbook of Technical Textiles. 2nd ed. / ed. Horrocks A.R., Anand S.C. Elsevier, 2016.
- [4]. Gries T. et al. Manufacturing of textiles for civil engineering applications // Textile Fibre Composites in Civil Engineering. Elsevier, 2016. P. 3–24.
- [5]. Перепелкин К.Е. Структура и свойства волокон. М.: Химия, 1985. 208 с.
- [6]. Перепелкин К.Е. Углеродные волокна со специфическими физическими и физико-химическими свойствами на основе гидратцеллюлозных и полиакрилонитрильных прекурсоров // Химия волокон. 2002. № 4. С. 32–40.
- [7]. Дубовый В.К. Стекланные волокна: Свойства и применения. СПб. 2003. 129 с.
- [8]. Волохина А.В. Высокопрочные арамидные волокна из смесей полимеров // Химия волокон. 2004. № 4. С. 5–8.
- [9]. Colombo I.G. et al. Textile Reinforced Concrete: experimental investigation on design parameters // Mater. Struct. 2013. Vol. 46, № 11. P. 1933–1951.
- [10]. Hegger J., Zell M., Horstmann M. Textile reinforced concrete — Realization in applications // Proceedings of the International FIB Symposium 2008 - Tailor Made Concrete Structures: New Solutions for our Society. CRC Press, 2008. P. 357–362.
- [11]. Hegger J., Kulas C., Horstmann M. Realization of TRC Façades with Impregnated AR-Glass Textiles // Key Eng. Mater. Trans Tech Publications Ltd, 2011. Vol. 466. P. 121–130.
- [12]. Novotná M. et al. Use of Textile Reinforced Concrete – Especially for Facade Panels // Adv. Mater. Res. Trans Tech Publications Ltd, 2014. Vol. 923. P. 142–145.
- [13]. Hegger J., Goralski C., Kulas C. Load-bearing behavior of a pedestrian bridge made of textile reinforced concrete // ACI Spec. Publ. 2011. Vol. 1, № 275 SP. P. 483–501.

#### References

- [1]. Isley F. The use of high performance textiles in construction projects. J. Ind. Text. 2001. Vol. 31, № 3. P. 205–217.
- [2]. Eichhorn S.J. et al. Handbook of textile fibre structure. Woodhead Publishing Limited, 2009.
- [3]. Handbook of Technical Textiles. 2nd ed. / ed. Horrocks A.R., Anand S.C. Elsevier, 2016.
- [4]. Gries T. et al. Manufacturing of textiles for civil engineering applications. Textile Fibre Composites in Civil Engineering. Elsevier, 2016. P. 3–24.
- [5]. Perepyolkin K.E. Struktura i svoystva volokon [Fiber structure and properties]. Moscow: Chemistry, 1985. 208 p.
- [6]. Perepyolkin K.E. Uglernodnyye volokna so spetsificheskimi fizicheskimi i fiziko-khimicheskimi svoystvami na osnove gidratsellyuloznykh i poliakrilonitrilnykh prekursorov [Carbon fibers with specific physical and physicochemical properties based on cellulose hydrate and polyacrylonitrile precursors]. Fibre Chem. 2002. № 4. P. 32–40.
- [7]. Dybovy V.K. Steklyannyye volokna : Svoystva i primeneniye [Glass Fibers: Properties and Applications]. SPb, 2003. 129 p.
- [8]. Volohina A.V. Vysokoprochnyye aramidnyye volokna iz smesey polimerov [High Strength Aramid Fibers from Polymer Blends]. Fibre Chem. 2004. № 4. P. 5–8.
- [9]. Colombo I.G. et al. Textile Reinforced Concrete: experimental investigation on design parameters. Mater. Struct. 2013. Vol. 46, № 11. P. 1933–1951.
- [10]. Hegger J., Zell M., Horstmann M. Textile reinforced concrete — Realization in applications. Proceedings of the International FIB Symposium 2008 - Tailor Made Concrete Structures: New Solutions for our Society. CRC Press, 2008. P. 357–362.
- [11]. Hegger J., Kulas C., Horstmann M. Realization of TRC Façades with Impregnated AR-Glass Textiles. Key Eng. Mater. Trans Tech Publications Ltd, 2011. Vol. 466. P. 121–130.
- [12]. Novotná M. et al. Use of Textile Reinforced Concrete – Especially for Facade Panels. Adv. Mater. Res. Trans Tech Publications Ltd, 2014. Vol. 923. P. 142–145.
- [13]. Hegger J., Goralski C., Kulas C. Load-bearing behavior of a pedestrian bridge made of textile reinforced concrete.



- [14]. Hasan M. et al. Carbon filament yarn-based hybrid yarn for the heating of textile-reinforced concrete // *J. Ind. Text.* 2014. Vol. 44, № 2. P. 183–197.
- [15]. Yin S.P., Xu S.L., Wang F. Investigation on the flexural behavior of concrete members reinforced with epoxy resin-impregnated textiles // *Mater. Struct.* 2015. Vol. 48, № 1–2. P. 153–166.
- [16]. Meier U., Müller R., Puck A. GFK-Biegeträger unter quasistatischer und schwingender Beanspruchung // *Proc. Int. Tagung über verstärkte Kunststoffe.* 1982. № 35. P. 35.1-35.7.
- [17]. Meier U. Carbon Fiber Reinforced Polymer Cables: Why? Why Not? What If? // *Arab. J. Sci. Eng.* 2012. Vol. 37, № 2. P. 399–411.
- [18]. Anderegg P., Brönnimann R., Meier U. Reliability of long-term monitoring data // *J. Civ. Struct. Heal. Monit.* 2014. Vol. 4, № 1. P. 69–75.
- [19]. Quadflieg T., Stolyarov O., Gries T. Carbon rovings as strain sensors for structural health monitoring of engineering materials and structures // *J. Strain Anal. Eng. Des.* 2016. Vol. 51, № 7. P. 482–492.
- [20]. Yeung Y.C.T., Parker B.E. Composite tension members for structural applications. In: Marshall, I.H. (ed.) // *Compos. Struct.* 1987. P. 309–320.
- [21]. Baschnagel F. et al. Fatigue and Durability of Laminated Carbon Fibre Reinforced Polymer Straps for Bridge Suspenders // *Polymers (Basel).* 2018. Vol. 10, № 2. P. 169.
- [22]. Baschnagel F. et al. Fretting Fatigue Behaviour of Pin-Loaded Thermoset Carbon-Fibre-Reinforced Polymer (CFRP) Straps // *Polymers (Basel).* Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2016. Vol. 8, № 4. P. 124.
- [23]. Czaderski C., Meier U. EBR Strengthening Technique for Concrete, Long-Term Behaviour and Historical Survey // *Polymers (Basel).* 2018. Vol. 10, № 1. P. 77.
- [24]. Kotynia R. et al. RC Slabs Strengthened with Prestressed and Gradually Anchored CFRP Strips under Monotonic and Cyclic Loading // *J. Compos. Constr.* 2011. Vol. 15, № 2. P. 168–180.
- [25]. Terrasi G., Meier U., Affolter C. Long-Term Bending Creep Behavior of Thin-Walled CFRP Tendon Pretensioned Spun Concrete Poles // *Polymers (Basel).* 2014. Vol. 6, № 7. P. 2065–2081.
- [26]. Nanni A. et al. Performance of FRP Tendon-Anchored Systems for Prestressed Concrete Structures // *PCI J.* 1996. Vol. 41, № 1. P. 34–44.
- [27]. Toutanji H., Saafi M. Performance of concrete beams prestressed with aramid fiber-reinforced polymer tendons // *Compos. Struct.* 1999. Vol. 44, № 1. P. 63–70.
- [28]. Campbell T.I. et al. Design and evaluation of a wedge-type anchor for fibre reinforced polymer tendons // *Can. J. Civ. Eng.* 2000. Vol. 27, № 5. P. 985–992.
- [29]. Cosenza E., Manfredi G., Realfonzo R. Behavior and Modeling of Bond of FRP Rebars to Concrete // *J. Compos. Constr.* 1997. Vol. 1, № 2. P. 40–51.
- [30]. De Lorenzis L., Miller B., Nanni A. Bond of fiber-reinforced polymer laminates to concrete // *ACI Mater. J.* 2001. Vol. 98, № 3. P. 256–264.
- [31]. Bakis C. Analysis of bonding mechanisms of smooth and lugged FRP rods embedded in concrete // *Compos. Sci. Technol.* 1998. Vol. 58, № 8. P. 1307–1319.
- [32]. Mahmoud Z.I., Rizkalla S.H. Bond of CFRP prestressing reinforcement // *2d Int. Conf. on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures.* Montreal, 1996.
- [33]. Gerritse A., Den Uijl J. Long term behaviour of arapree // *ACI Spec. Publ.* 2011. Vol. 1, № 275 SP. P. 483–501.
- [14]. Hasan M. et al. Carbon filament yarn-based hybrid yarn for the heating of textile-reinforced concrete. *J. Ind. Text.* 2014. Vol. 44, № 2. P. 183–197.
- [15]. Yin S.P., Xu S.L., Wang F. Investigation on the flexural behavior of concrete members reinforced with epoxy resin-impregnated textiles. *Mater. Struct.* 2015. Vol. 48, № 1–2. P. 153–166.
- [16]. Meier U., Müller R., Puck A. GFK-Biegeträger unter quasistatischer und schwingender Beanspruchung. *Proc. Int. Tagung über verstärkte Kunststoffe.* 1982. № 35. P. 35.1-35.7.
- [17]. Meier U. Carbon Fiber Reinforced Polymer Cables: Why? Why Not? What If?. *Arab. J. Sci. Eng.* 2012. Vol. 37, № 2. P. 399–411.
- [18]. Anderegg P., Brönnimann R., Meier U. Reliability of long-term monitoring data. *J. Civ. Struct. Heal. Monit.* 2014. Vol. 4, № 1. P. 69–75.
- [19]. Quadflieg T., Stolyarov O., Gries T. Carbon rovings as strain sensors for structural health monitoring of engineering materials and structures. *J. Strain Anal. Eng. Des.* 2016. Vol. 51, № 7. P. 482–492.
- [20]. Yeung Y.C.T., Parker B.E. Composite tension members for structural applications. Marshall, I.H. (ed.). *Compos. Struct.* 1987. P. 309–320.
- [21]. Baschnagel F. et al. Fatigue and Durability of Laminated Carbon Fibre Reinforced Polymer Straps for Bridge Suspenders. *Polymers (Basel).* 2018. Vol. 10, № 2. P. 169.
- [22]. Baschnagel F. et al. Fretting Fatigue Behaviour of Pin-Loaded Thermoset Carbon-Fibre-Reinforced Polymer (CFRP) Straps. *Polymers (Basel).* 2016. Vol. 8, № 4. P. 124.
- [23]. Czaderski C., Meier U. EBR Strengthening Technique for Concrete, Long-Term Behaviour and Historical Survey. *Polymers (Basel).* 2018. Vol. 10, № 1. P. 77.
- [24]. Kotynia R. et al. RC Slabs Strengthened with Prestressed and Gradually Anchored CFRP Strips under Monotonic and Cyclic Loading. *J. Compos. Constr.* 2011. Vol. 15, № 2. P. 168–180.
- [25]. Terrasi G., Meier U., Affolter C. Long-Term Bending Creep Behavior of Thin-Walled CFRP Tendon Pretensioned Spun Concrete Poles. *Polymers (Basel).* 2014. Vol. 6, № 7. P. 2065–2081.
- [26]. Nanni A. et al. Performance of FRP Tendon-Anchored Systems for Prestressed Concrete Structures. *PCI J.* 1996. Vol. 41, № 1. P. 34–44.
- [27]. Toutanji H., Saafi M. Performance of concrete beams prestressed with aramid fiber-reinforced polymer tendons. *Compos. Struct.* 1999. Vol. 44, № 1. P. 63–70.
- [28]. Campbell T.I. et al. Design and evaluation of a wedge-type anchor for fibre reinforced polymer tendons. *Can. J. Civ. Eng.* 2000. Vol. 27, № 5. P. 985–992.
- [29]. Cosenza E., Manfredi G., Realfonzo R. Behavior and Modeling of Bond of FRP Rebars to Concrete. *J. Compos. Constr.* 1997. Vol. 1, № 2. P. 40–51.
- [30]. De Lorenzis L., Miller B., Nanni A. Bond of fiber-reinforced polymer laminates to concrete. *ACI Mater. J.* 2001. Vol. 98, № 3. P. 256–264.
- [31]. Bakis C. et al. Analysis of bonding mechanisms of smooth and lugged FRP rods embedded in concrete. *Compos. Sci. Technol.* 1998. Vol. 58, № 8. P. 1307–1319.
- [32]. Mahmoud Z.I., Rizkalla S.H. Bond of CFRP prestressing reinforcement. *2d Int. Conf. on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures.* Montreal, 1996.

- Proceedings of Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-2). Ghent, Belgium, 1995. P. 57–66.
- [34]. Shahidi F. Bond degradation between FRP bars and concrete under sustained loads. University of Saskatchewan, 2003.
- [35]. Zou P.X.W. Long-Term Deflection and Cracking Behavior of Concrete Beams Prestressed with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Tendons // J. Compos. Constr. 2003. Vol. 7, № 3. P. 187–193.
- [36]. Zou P.X.W., Shang S. Time-dependent behaviour of concrete beams pretensioned by carbon fibre-reinforced polymers (CFRP) tendons // Constr. Build. Mater. 2007. Vol. 21, № 4. P. 777–788.
- [37]. Youakim S.A., Karbhari V.M. An approach to determine long-term behavior of concrete members prestressed with FRP tendons // Constr. Build. Mater. 2007. Vol. 21, № 5. P. 1052–1060.
- [38]. Rodriguez-Gutierrez J.A., Aristizabal-Ochoa J.D. Short- and Long-Term Deflections in Reinforced, Prestressed, and Composite Concrete Beams // J. Struct. Eng. 2007. Vol. 133, № 4. P. 495–506.
- [33]. Gerritse A., Den Uijl J. Long term behaviour of arapree. Proceedings of Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-2). Ghent, Belgium, 1995. P. 57–66.
- [34]. Shahidi F. Bond degradation between FRP bars and concrete under sustained loads. University of Saskatchewan, 2003.
- [35]. Zou P.X.W. Long-Term Deflection and Cracking Behavior of Concrete Beams Prestressed with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Tendons. J. Compos. Constr. 2003. Vol. 7, № 3. P. 187–193.
- [36]. Zou P.X.W., Shang S. Time-dependent behaviour of concrete beams pretensioned by carbon fibre-reinforced polymers (CFRP) tendons. Constr. Build. Mater. 2007. Vol. 21, № 4. P. 777–788.
- [37]. Youakim S.A., Karbhari V.M. An approach to determine long-term behavior of concrete members prestressed with FRP tendons. Constr. Build. Mater. 2007. Vol. 21, № 5. P. 1052–1060.
- [38]. Rodriguez-Gutierrez J.A., Aristizabal-Ochoa J.D. Short- and Long-Term Deflections in Reinforced, Prestressed, and Composite Concrete Beams. J. Struct. Eng. 2007. Vol. 133, № 4. P. 495–506.

**Контактная информация**

- 1.\* +7(812)5526303, oleg.stolyarov@rambler.ru (Столяров Олег Николаевич, к.т.н., доц.)
2. +79119199526, 79119199526@yandex.ru (Ольшевский Вячеслав Янушевич, к.т.н., доц.)
3. +79811889300, anne.dontsoova@gmail.com (Донцова Анна Евгеньевна, студент)
4. 89819509154, juliaandreeva99@mail.ru (Демидова Юлианна Андреевна, студент)

**Contact information**

- 1.\* +7(812)5526303, oleg.stolyarov@rambler.ru (Stolyarov Oleg, cand. Eng. Sc., associate prof.)
2. +79119199526, 79119199526@yandex.ru (Olshevskiy Vyacheslav, cand. Eng. Sc., associate prof.)
3. +79811889300, anne.dontsoova@gmail.com (Dontsova Anna, student)
4. 89819509154, juliaandreeva99@mail.ru (Demidova Yulianna, student)

© Столяров О.Н., Ольшевский В.Я., Донцова А.Е., Демидова Ю.А. 2019