Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian journal of transport engineering <http://t-s.today/>

2016, Том 3, №2 / 2016, Vol 3, No 2 <http://t-s.today/issues/vol3-no2.html>

URL статьи: <http://t-s.today/PDF/02TS216.pdf>

DOI: 10.15862/02TS216 (<http://dx.doi.org/10.15862/02TS216>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Бокарев С.А., Кобелев К.В. Усиление железобетонных опор железнодорожных мостов полимерными композиционными материалами // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 3, №2 (2016) <http://t-s.today/PDF/02TS216.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

For citation:

Bokarev S.A., Kobelev K.V. [Reinforcement of the railway bridge concrete piers with polymer composite materials] Russian journal of transport engineering, 2016, Vol. 3, no. 2. Available at: <http://t-s.today/PDF/02TS216.pdf> (In Russ.)

УДК 691.175.3

Бокарев Сергей Александрович

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения», Россия, Новосибирск¹

Проректор по научной работе

Доктор технических наук, профессор

E-mail: bokarevsa@stu.ru

Кобелев Кирилл Викторович

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения», Россия, Новосибирск

Инженер

Аспирант

E-mail: jamkka@mail.ru

Усиление железобетонных опор железнодорожных мостов полимерными композиционными материалами

Аннотация. В статье приведены данные о конструкции и техническом состоянии эксплуатируемых железобетонных опор железнодорожных мостов. Выявлены наиболее распространенные дефекты, повреждения и другие факторы, снижающие грузоподъемность опор. Рассмотрены традиционные способы увеличения несущей способности центрально и внецентренно сжатых железобетонных элементов опор и инновационный метод с использованием полимерных композиционных материалов. Дано описание состояния отрасли полимерных композиционных материалов в Российской Федерации. Приведена информация об исследованиях в области деформирования бетона в трехосном напряженном состоянии, и основные эмпирические зависимости, используемые для определения прочности бетона, усиленного оболочкой из полимерных композиционных материалов. Приведена информация об отличительных особенностях работы оболочки из композиционных материалов от работы усиления, выполненного из железобетонных и металлических конструкций. В статье приведены основные нормативные зарубежные и отечественные документы, регламентирующие применение композиционных материалов для усиления железобетонных конструкций. В заключении статьи сформулированы цель исследования и задачи, которые необходимо выполнить для достижения этой цели.

Ключевые слова: железобетонные опоры мостов; дефекты; повреждения; усиление; композиционные материалы; углеродное волокно; оболочка; несущая способность

¹ 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, д. 191/3, каб. 27

На сети железных дорог ОАО «РЖД» эксплуатируют более 76 тысяч мостовых опор различных конструктивных форм, среди которых преобладают массивные каменные, бетонные монолитные и сборно-монолитные конструкции, их количество от общего числа опор составляет 78,1%. Остальные опоры в основном представлены сборными железобетонными конструкциями. Среди железобетонных опор преобладают свайные конструкции, их количество составляет 51% от общего количества железобетонных опор, остальные железобетонные опоры имеют стоечную - 21%, столбчатую - 18% или рамную конструкцию - 10%. Наиболее распространённые конструктивные формы опор мостов показаны на рисунке 1. Информация о конструкции и техническом состоянии эксплуатируемых опор железнодорожных мостов получена из базы данных «Единой корпоративной автоматизированной системы управления инфраструктурой ИССО» (ЕК АСУИ ИССО).

Рисунок 1. Конструкции промежуточных опор железнодорожных мостов

*a - stone; b - monolithic; c - prefabricated monolithic;
d - framed; e - pile; f - pole; g - column*

Figure 1. Constructions of railway bridge intermediate piers

Наиболее распространёнными элементами сборных железобетонных опор являются прямоугольные сваи сечением 35*35 и 40*40 см, круглые полые сваи диаметром 60 см и свай-оболочки диаметром 80 см. Элементы прямоугольного сечения выполняли по типовому проекту 3.500.1-.93 «Сваи забивные железобетонные цельные сплошного квадратного сечения для опор мостов» из тяжёлого бетона классом не ниже В15. В качестве рабочей арматуры в этом проекте использовали стержни классом А300 и диаметром от 20 мм. Косвенное армирование выполняли из арматуры класса А240 диаметром 6 мм в виде спирального каркаса. Полые круглые сваи и сваи-оболочки выполняли по типовому проекту 3.501.1-124 «Полые круглые сваи и сваи-оболочки диаметром 0,4-3,0 м из преднапряжённого и обычного железобетона для опор мостов» из тяжёлого бетона классом не ниже В25. Армирование полых круглых свай и свай-оболочек выполняли из арматуры А300 и диаметром от 16 мм,

косвенное армирование из арматуры класса A240 диаметром до 10 мм в виде спирального каркаса. Вид призматических и круглых свай с армированием показан на рисунке 2.

Рисунок 2. Призматические сваи и сваи-оболочки
Figure 2. Prismatic piles and shell-type piles

Для определения условий пропуска подвижной нагрузки по мостам, в соответствии с требованиями Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации, их классифицируют по грузоподъемности. Это особенно актуально в связи с принятой программой развития тяжеловесного движения на железных дорогах РФ [1]. Классификацию опор мостов обязательно повторяют при появлении повреждений, снижающих их грузоподъемность. Расчет грузоподъемности опор осуществляют по предельным состояниям первой группы, с учетом их дефектов и повреждений. Отступления от технологии строительства опор, предусмотренной в проекте, приводит к появлению дефектов конструкции. Эксплуатация опор мостов в сложных условиях, в том числе в уровне переменного горизонта воды, неизбежно приводит к появлению и развитию повреждений, что зачастую оказывает негативное влияние на несущую способность конструкций.

Ниже приведены наиболее распространенные дефекты железобетонных опор, по информации, полученной из базы данных ЕК АСУИ ИССО:

- раковины и сколы;
- отсутствие или недостаточный защитный слой;
- пустоты в теле опоры;
- бетон низкой прочности (менее 10 МПа).

Наиболее распространенными повреждениями являются:

- морозное разрушение бетона;
- выщелачивание бетона;
- отслоение защитного слоя;
- трещины;
- разрушение бетона в зоне омоноличивания ригеля со стойками;

- коррозия конструктивной и рабочей арматуры.

На рисунке 3 приведены некоторые наиболее распространенные дефекты железобетонных опор мостов.

a - раковины; б - недостаточный защитный слой

Рисунок 3. Дефекты опор мостов

a - honeycomb; b - inefficient protective layer

Figure 3. Defects of bridge piers

На рисунке 4 приведены некоторые характерные повреждения опор.

a - трещины; б - отслоение защитного слоя

Рисунок 4. Повреждения опор мостов

a - cracks; b - delamination of the protective layer

Figure 4. Damages of bridge piers

Наибольшее снижение несущей способности железобетонных опор железнодорожных путепроводов через автодороги происходит в результате разрушения стоек с повреждением рабочей арматуры, вследствие удара автомобиля. Общий вид стойки с таким разрушением показан на рисунке 5.

Рисунок 5. Дефектная стойка промежуточной опоры железнодорожного путепровода
Figure 5. A faulty column of the railway overpass intermediate pier

Еще одним негативным фактором, влияющим на снижение прочностных свойств бетона опор, является его коррозия. Анализ деградационных процессов в бетоне и их классификация была выполнена В.М. Москвиным и описана в [2]. В соответствии с этой классификацией можно выделить три вида коррозии: 1 – растворимость продуктов гидратации цемента в системе «продукты гидратации – вода», 2 – углекислотная коррозия бетон, 3 – сульфатная коррозия. Первый вид коррозии представляет собой растворение и вынос соединений, отвечающих за прочность кристаллизационных связей в цементном камне. Так как гидроксид кальция является наиболее растворимым компонентом цементного камня, то коррозионный процесс определяется обычно как процесс «выщелачивания извести». Коррозия второго вида заключается в возникновении реакций между кислотами и солями окружающей среды (углекислотные воды), с одной стороны, и элементами цементного камня – с другой. В результате этих реакций образуются легкорастворимые и выносимые водой новообразования. Сульфатная коррозия состоит в накоплении в порах бетона солей и их кристаллизации, связанной с увеличением твердой фазы. На начальных этапах коррозии третьего вида происходит уплотнение поверхностного слоя, что приводит к временному увеличению прочности бетона, не подвергающегося действию агрессивной среды. Непрекращающийся рост кристаллов приводит к росту усилий в порах и капиллярах бетона, вследствие чего происходит разрушение структуры и быстрое снижение прочности бетона. Действие одновременно нескольких видов коррозии и коррозия арматуры, увеличивает скорость деградации бетона. Вследствие этого процесса происходит снижение его прочности, и соответственно снижается несущая способность железобетонных элементов опор мостов. Таким образом, совокупность негативных факторов, воздействующих на конструкции опор мостов, приводит к необходимости восстановления несущей способности сжатых железобетонных элементов.

До настоящего времени, для восстановления несущей способности сжатых железобетонных элементов использовали методы, основанные на увеличении их поперечного

сечения с помощью железобетонной рубашки или металлической обоймы. Эти методы имеют ряд существенных недостатков:

- большая трудоемкость;
- изменение габаритов усиливаемой конструкции;
- необходимость выполнения мероприятий по защите от агрессивного воздействия внешней среды;
- производство работ с применением большого количества оборудования – кранового, сварочного и пр.

Альтернативным способом усиления или восстановления железобетонных конструкций является использование современных полимерных композиционных материалов (далее ПКМ). Активное изучение, производство и применение ПКМ на основе различных волокон (углеродных, арамидных, стеклянных волокон и др.) в строительстве началось в середине XX века. В 80-х годах в Японии композиционные материалы впервые использовали для усиления колон [4], которое выполняли созданием оболочки (обоймы), охватывающей сжатый элемент по высоте. Этот инновационный способ имеет ряд преимуществ перед традиционными (меньшую трудоемкость, удобство выполнения работ, малый собственный вес, низкая стоимость производства работ и др.) и является перспективным направлением в области ремонта и усиления опор мостов [5].

Отрасль ПКМ является новым, развивающимся сегментом экономики Российской Федерации, и темпы его развития в последние годы значительно увеличились, благодаря принятию плана мероприятий («дорожной карты») «Развитие отрасли производства композитных материалов» (распоряжение Правительства Российской Федерации № 1307-р от 24 июля 2013 г.). В соответствии с этим распоряжением основными задачами для создания и развития полноценной инновационной отрасли экономики, ориентированной на использование композиционных материалов, являются: формирование, поддержание и развитие современной системы научных исследований и разработок; увеличение производства композиционных материалов; создание комплексной системы нормативных документов. Наиболее применимыми для усиления железобетонных конструкций, в связи с высокими прочностными и деформативными характеристиками, являются ПКМ на основе углеродных волокон [6].

Все методики расчета, усиленных ПКМ, сжатых элементов основаны на теории условного повышения прочности бетона конструкции за счет восприятия оболочкой радиальных деформаций бетона. Базовой работой в области деформирования бетона, усиленного оболочкой из какого-либо материала, является работа Франка Ричарта, Энтон Брандтзага и Рекса Брауна, выполненная в начале XX века в Иллинойском университете США [7]. Их исследование посвящено работе бетона в трехосном напряженном состоянии. По результатам проведенных исследований ими была получена зависимость прочности бетона (R_{bo}), усиленного обоймой, от расчетной прочности бетона (R_b) и угла его внутреннего трения (φ):

$$R_{bo} = R_b + \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_r, \quad (1)$$

где σ_r – радиальные напряжения в обойме.

В эксперименте Ф. Ричарта к образцам в стабилометре прикладывали гидростатическое давление, постоянное в ходе всего испытания. Однако при усилении железобетонных элементов обоймами из ПКМ, в материале усиления напряжения

распределяются неравномерно и неоднородно, поэтому для описания работы усиленных образцов используют эмпирическую зависимость, приведенную в [8]:

$$R_{bo} = 2,254R_b \sqrt{1 + 7,94 \frac{\sigma_r}{R_b} - 2 \frac{\sigma_r}{R_b}} - 1,254. \quad (2)$$

В работе [9] приведен подробный анализ напряженно-деформированного состояния железобетонных колон, усиленных композиционными материалами. Помимо формулы (2) существует еще ряд следующих эмпирических зависимостей для вычисления прочности бетона железобетонных колон, усиленных обоями [10...13]:

$$R_{bo} = R_b \left(1 + 6,0 \frac{\sigma_r^{0.7}}{R_b} \right); \quad (3)$$

$$R_{bo} = R_b \left[1 + 2,2 \left(\frac{\sigma_r}{R_b} \right)^{0.84} \right]; \quad (4)$$

$$R_{bo} = R_b \left(1 + 2,98 \frac{\sigma_r}{R_b} \right); \quad (5)$$

$$R_{bo} = R_b \left[1 + 2,3 \left(\frac{\sigma_r}{R_b} \right)^{0.85} \right]. \quad (6)$$

Преимуществом зависимости (2) является то, что ее применение позволяет с достаточной точностью вести расчет колонн различной формы поперечного сечения, в то время как зависимости (3-6) показывают высокую степень точности только для круглого поперечного сечения [4].

В работе элементов усиления из ПКМ существует ряд особенностей. Помимо возникновения трехосного напряженного состояния в бетоне конструкции, изученного Ф. Ричартом, объемное напряженное состояние приобретает и оболочка из композиционных материалов. Трехосное напряженное состояние является основной особенностью работы элементов усиления сжатых конструкций. Обойма из ПКМ воспринимает сжимающие напряжения, действующие поперек волокон, пассивный отпор бетона в радиальном направлении и растягивающие напряжения от бокового расширения в продольном направлении. Силы, возникающие в обойме, показаны на рисунке 6 [5].

Рисунок 6. Распределение напряжений в оболочке из ПКМ
Figure 6. Stress Distribution in the shell made of PCM

Вторая особенность заключается в том, что обойма из композиционного материала, упруго деформируется вплоть до разрушения конструкции. ПКМ создает возрастающее пассивное радиальное давление на бетон, в отличие от металлической обоймы, которая при достижении металлом предела упругости перестает оказывать возрастающее радиальное

давление на бетон. Так как прочность ПКМ значительно выше, чем прочность стали, то и несущая способность образцов, усиленных ПКМ, оказывается выше.

Третья особенность работы оболочки из ПКМ заключается в том, что в случае усиления элементов прямоугольного сечения возникают области, неподверженные эффекту упрочнения. Эффект упрочнения частично пропадает и при усилении колонн отдельными полосами (бандажами). На рисунке 7а показано сечение прямоугольного элемента, усиленного ПКМ и области бетона без эффекта упрочнения. На рисунке 7б показано продольное сечение элемента с бандажами и область неупрочненного бетона.

а - поперечное сечение; б - продольное сечение

Рисунок 7. Эффективные области упрочнения бетона

a - cross section; b - a longitudinal section

Figure 7. The effective areas of concrete reinforcement

Очевидно, что перечисленные выше особенности работы системы усиления из ПКМ должны быть учтены в методике расчета железобетонных опор мостов, усиленных такой системой.

Большинство документов, регламентирующих расчет сжатых железобетонных элементов, усиленных ПКМ [14...17], основаны на принципах, разработанных Американским институтом бетона [16, 17]. За предельное принято состояние конструкции, при котором деформации в оболочке из ПКМ достигают максимальных (предельных) величин. Предполагается, что разрушение конструкции может происходить по двум схемам - разрыв материала оболочки из ПКМ или отслоение материала оболочки в месте объединения «внахлест».

Для предотвращения наступления предельного состояния по первой схеме ограничивают предельные деформаций ПКМ:

$$\varepsilon_{fe} \leq 0,75 \varepsilon_{fu}, \quad (7)$$

где ε_{fu} - предельные деформации КМ при разрыве.

Для предотвращения наступления предельного состояния по второй схеме вводят конструктивные требования по величине нахлестка углеволокна.

В России были выполнены исследования, направленные на изучение, усиленных полимерными композиционными материалами, центрально и внецентренно сжатых железобетонных колонн [18, 19]. А.Н. Костенко выполнен большой объем лабораторных экспериментальных исследований железобетонных колонн [19], усиленных ПКМ, подверженных осевому и внецентренному сжатию. Результаты этих исследований могут быть использованы и при разработке методики расчета железобетонных элементов опор мостов.

В России введен в действие ряд нормативных документов по усилению инженерных сооружений транспортной отрасли полимерными композиционными материалами [20...22]. Приведенные документы содержат исчерпывающую информацию о расчете изгибаемых железобетонных элементов автодорожных и железнодорожных мостов усиленных ПКМ. Расчет сжатых элементов мостов, усиленных композиционными материалами, приведен в ОДМ 218.3.027-2013 [21]. В этом документе предложен подход, подразумевающий учет ПКМ, как косвенного армирования. Более подробные методики расчета сжатых элементов, усиленных ПКМ, приведены в документах, предназначенных для расчета конструкций не подверженных динамическим воздействиям [23, 24].

Целью дальнейших исследований является снижение затрат на ремонт и усиление опор железнодорожных мостов за счет применения современной технологии с использованием полимерных композиционных материалов. Анализ оценки конструктивных особенностей и технического состояния эксплуатируемых опор железнодорожных мостов, а так же существующих методик усиления опор мостов показал, что для внедрения современной технологии усиления железобетонных элементов железнодорожных опор необходимо решить ряд задач:

- провести лабораторные экспериментальные исследования сжатых железобетонных элементов, усиленных ПКМ, на образцах, подобных по конструкции элементам железобетонных опор мостов;
- выполнить исследования методами численного моделирования;
- разработать методику расчета железобетонных опор железнодорожных мостов усиленных ПКМ с учетом особенности их конструкций, технического состояния и режимов нагружения;
- выполнить по предложенной методике расчет, запроектировать и выполнить усиление опоры моста;
- выполнить натурные испытания, усиленной конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. ОАО "РЖД" скорректировало программу развития тяжеловесного движения [Электронный ресурс]: интернет-журнал «Gudok.ru» / М. изд. дом «ГУДОК» - Режим доступа: <http://www.gudok.ru/freighttrans/?ID=1302199>.
2. Москвин В.М. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Гузев Е.А. – М.: Стройиздат, 1980. – 536 с.
3. Грушев В.Г. Разработка рекомендаций по строительству в условиях БАМ столбчатых конструкций фундаментов и опор мостов и мер по их защите ото льда, корчехода, перемещающихся донных отложений и агрессивной среды / Ленинград.: Изд-во «НИИ мостов ЛИИЖТа», 1977. 242 с.
4. Шилин А.А. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами / А.А. Шилин, В.А. Пшеничный, Д.В. Картузов. – М., Стройиздат, 2004. – 139 с.
5. Шилин, А.А. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами / А.А. Шилин, В.А. Пшеничный, Д.В. Картузов. – М., Стройиздат, 2007. – 184 с.
6. Бокарев С.А., Власов Г.М., Неровных А.А., Смердов Д.Н. Коэффициенты надежности для композиционных материалов, применяемых для усиления железобетонных элементов мостовых конструкций // вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2010. №2. С. 222-229.
7. Richart F.E., Brandtzaeg A., Brown R.L. A study of the failure of concrete under combined compressive stresses, Engineering Experimental Station, Bulletin №185, 1928, University of Illinois.
8. Mander J.B., Priestly M.J.N., Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 114. No. 8. 1988, pp. 1804-1826.
9. Teng J.G., Chen J.F., Smith S.T., Lam L. FRP Strengthened RC Structures. Copyright © 2002 John Wiley & Sons, Ltd. - 245 p.
10. Samaan M., Mirmiran A., Shahawy M. Model of Concrete Confined by Fiber Composites. - Journal of Structural Engineering, ASCE, V. 124. No 9. 1998. pp. 1025-1031.
11. Saafi M., Toutanji H.A., Li Z. Behavior of Concrete Columns Confined with Fiber-Reinforced Polymer Tubes. ACI Materials Journal, V. 96, No. 4, 1999, pp. 500 - 509.
12. Miyauchi K., Inoue S., Kuroda T., Kobayashi A. Strengthening Effects of Concrete Columns with Carbon Fiber Sheet. - Transactions of the Japan Concrete Institute, V.21, 1999, pp. 143 - 150.
13. Matthys S., Toutanji H., Audenaert K., Taerwe L. Axial Load Behavior of Large-Scale Columns Confined with Fiber-Reinforced Polymer Composites. ACF Structural Journal/March-April 2005, pp. 258 - 267.
14. CNR-DT 200/2004. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. – Rome, 2004.

15. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. ACI 440.2R-02. American Concrete Institute, 2002.
16. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. ACI 440.2R-08. American Concrete Institute, 2008.
17. Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. CNR – DT 203/2006. Rome – CNR June 2007.
18. Костенко А.Н., Бедов А.И. Использование углеволокна для усиления железобетонных колонн и кирпичных столбов // Научные труды. Юбилейная Десятая межвузовская научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и докторантов. Строительство - формирование среды жизнедеятельности. - М.: МГСУ, 2007 (25-26 апреля). - С. 88-92.
19. Ата Эль К. Шоеаб Солиман. Увеличение несущей способности трубобетонных колонн // Образование, наука, производство: тез. докл. Междунар. научн. форума. - Белгород, 2004. - 4.2. - С. 112.
20. Руководство по усилению железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов системой внешнего армирования на основе углеродных волокон. СГУПС. – Н., 2013. – 53 с.
21. ОДМ 218.3.027-2013 «Рекомендации по ремонту и усилению железобетонных конструкций мостовых сооружений с использованием гибких лент и тканей на основе углеродных волокон» / РОСДОРНИИ – М.: 2012. – 49 с.
22. СТО ТУАД 15-2013. Применение композиционных материалов на основе углеродного волокна для усиления железобетонных пролетных строений автодорожных мостов Новосибирской области. – Новосибирск, 2013 г. – 28 с.
23. СП 164.132580.2014. «Усиление железобетонных конструкций композиционными материалами» - Москва: 2014 г., 51 с.
24. Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами / Разработано в развитие СП 52-101–2003 «Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры». – М. НИИЖБ, 2006. – 48 с.

Bokarev Sergey Aleksandrovich

Siberian transport university, Russia, Novosibirsk
E-mail: bokarevsa@stu.ru

Kobelev Kirill Victorovich

Siberian transport university, Russia, Novosibirsk
E-mail: jamkka@mail.ru

Reinforced concrete railway bridges' bearings reinforcement by polymer composite materials

Abstract. The article presents data on construction and technical condition of the exploited concrete piers of railway bridges. The most widespread defects, damages and other factors that reduce the loading capacity of piers have been exposed. The traditional methods of increasing the carrying capacity of the centrally and eccentrically compressed reinforced-concrete elements of piers and an innovative method with using polymer composite materials are considered. The description of status of the polymer composite material industry in the Russian Federation is given.

Information on research in the field of concrete distortion in a triaxial stress state and the basic empirical dependences used to determine the strength of concrete reinforced with a shell made of polymer composite materials are cited. In addition, information on the characteristics of work for shell made of composite materials as distinct from work of reinforcement made of concrete and metal structures is provided. The article considers the main foreign and domestic normative documents regulatory the use of composite materials for reinforcing concrete structures. In conclusion, the authors of article formulate a goal of research and tasks that should be carried out to achieve this goal.

Keywords: reinforced-concrete bridge piers; defects; damages; reinforcement; composite materials; carbon fiber; shell; carrying capacity

REFERENCES

1. OAO "RZhD" skorrektirovalo programmu razvitiya tyazhelovesnogo dvizheniya [Elektronnyy resurs]: internet-zhurnal «Gudok.ru» / M. izd. dom «GUDOK» - Rezhim dostupa: <http://www.gudok.ru/freighttrans/?ID=1302199>.
2. Moskvina V.M. Korroziya betona i zhelezobetona, metody ikh zashchity / Moskvina V.M., Ivanov F.M., Alekseev S.N., Guzeev E.A. – M.: Stroyizdat, 1980. – 536 s.
3. Grushev V.G. Razrabotka rekomendatsiy po stroitel'stvu v usloviyakh BAM stolbchatykh konstruktsiy fundamentov i opor mostov i mer po ikh zashchite oto l'da, korchekhoda, peremeshchayushchikhsya donnykh otlozheniy i agressivnoy sredy / Leningrad.: Izd-vo «NII mostov LIIZhTa», 1977. 242 s.
4. Shilin A.A. Usilenie zhelezobetonnykh konstruktsiy kompozitnymi materialami / A.A. Shilin, V.A. Pshenichnyy, D.V. Kartuzov. – M., Stroyizdat, 2004. – 139 s.
5. Shilin, A.A. Vneshnee armirovanie zhelezobetonnykh konstruktsiy kompozitsionnymi materialami / A.A. Shilin, V.A. Pshenichnyy, D.V. Kartuzov. – M., Stroyizdat, 2007. – 184 s.
6. Bokarev S.A., Vlasov G.M., Nerovnykh A.A., Smerdov D.N. Koeffitsienty nadezhnosti dlya kompozitsionnykh materialov, primenyaemykh dlya usileniya zhelezobetonnykh elementov mostovykh konstruktsiy // vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2010. №2. S. 222-229.
7. Richart F.E., Brandtzaeg A., Brown R.L. A study of the failure of concrete under combined compressive stresses, Engineering Experimental Station, Bulletin №185, 1928, University of Illinois.
8. Mander J.B., Priestly M.J.N., Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 114. No. 8. 1988, pp. 1804-1826.
9. Teng J.G., Chen J.F., Smith S.T., Lam L. FRP Strengthened RC Structures. Copyright © 2002 John Wiley & Sons, Ltd. - 245 p.
10. Samaan M., Mirmiran A., Shahawy M. Model of Concrete Confined by Fiber Composites. - Journal of Structural Engineering, ASCE, V. 124. No 9. 1998. pp. 1025-1031.
11. Saafi M., Toutanji H.A., Li Z. Behavior of Concrete Columns Confined with Fiber-Reinforced Polymer Tubes. ACI Materials Journal, V. 96, No. 4, 1999, pp. 500 - 509.
12. Miyauchi K., Inoue S., Kuroda T., Kobayashi A. Strengthening Effects of Concrete Columns with Carbon Fiber Sheet. - Transactions of the Japan Concrete Institute, V.21, 1999, pp. 143 - 150.
13. Matthys S., Toutanji H., Audenaert K., Taerwe L. Axial Load Behavior of Large-Scale Columns Confined with Fiber-Reinforced Polymer Composites. ACF Structural Journal/March-April 2005, pp. 258 - 267.
14. CNR-DT 200/2004. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. – Rome, 2004.
15. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. ACI 440.2R-02. American Concrete Institute, 2002.

16. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. ACI 440.2R-08. American Concrete Institute, 2008.
17. Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. SNR – DT 203/2006. Rome – SNR June 2007.
18. Kostenko A.N., Bedov A.I. Ispol'zovanie uglevolokna dlya usileniya zhelezobetonnykh kolonn i kirpichnykh stolbov // Nauchnye trudy. Yubileynaya Desyataya mezhvuzovskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya molodykh uchenykh, aspirantov i doktorantov. Stroitel'stvo - formirovanie sredy zhiznedeyatel'nosti. - M.: MGSU, 2007 (25-26 aprelya). - S. 88-92.
19. Ata El' K. Shoeab Soliman. Uvelichenie nesushchey sposobnosti trubobetonnykh kolonn // Obrazovanie, nauka, proizvodstvo: tez. dokl. Mezhdunar. nauchn. foruma. - Belgorod, 2004. - 4.2. - S. 112.
20. Rukovodstvo po usileniyu zhelezobetonnykh proletrykh stroeniy zheleznodorozhnykh mostov sistemoy vneshnego armirovaniya na osnove uglerodnykh volokon. SGUPS. – N., 2013. – 53 s.
21. ODM 218.3.027-2013 «Rekomendatsii po remontu i usileniyu zhelezobetonnykh konstruktsiy mostovykh sooruzheniy s ispol'zovaniem gibkikh lent i tkaney na osnove uglerodnykh volokon» / ROSDORNII – M.: 2012. – 49 s.
22. STO TUAD 15-2013. Primenenie kompozitsionnykh materialov na osnove uglerodnogo volokna dlya usileniya zhelezobetonnykh proletrykh stroeniy avtodorozhnykh mostov Novosibirskoy oblasti. – Novosibirsk, 2013 g. – 28 s.
23. SP 164.132580.2014. «Usilenie zhelezobetonnykh konstruktsiy kompozitsionnymi materialami» - Moskva: 2014 g., 51 s.
24. Rukovodstvo po usileniyu zhelezobetonnykh konstruktsiy kompozitnymi materialami / Razrabotano v razvitie SP 52-101–2003 «Betonnye i zhelezobetonnye konstruktsii bez predvaritel'nogo napryazheniya armatury». – M. NIIZhB, 2006. – 48 s.