

К вопросу об эффективности усиления железобетонных балок композиционными материалами из углеродных волокон в виде ламелей

А.А. Иодчик, А.А. Чебровский, С.В. Чебровская

Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск

Аннотация: Основными элементами системы внешнего армирования изгибаемых железобетонных конструкций являются ткани и ламели. Ткани и ламели приклеиваются на поверхность строительных конструкций в полимерную матрицу. Матрица обеспечивает сцепление армирующего наполнителя с усиливаемой конструкцией. Цена усиления углеродными ламелями в разы выше, чем на усиление углеродной тканью. В статье показано сравнение предложений на рынке строительных материалов по усилению железобетонных конструкций ламелями на основе углеродных волокон. На примере железобетонной балки четырех типов поперечного сечения выполнен сравнительный анализ выбранных систем усиления в разных температурных условиях, выявлен коэффициент условной полезности, показывающий соотношение цены к процентному усилению конструкции. Полученные результаты могут быть использованы для выбора наиболее экономически эффективной композитной системы усиления.

Ключевые слова: железобетонные балки; усиление; композиционный материал; углеродные ламели; внешнее армирование; температура эксплуатации.

Постановка проблемы.

Большая доля российских предприятий, зданий и сооружений существует несколько десятков лет. Когда-то они были технически инновационны, функциональны, экономически привлекательны, исторически памятны, эстетически красивы. Но жизнь вносит свои коррективы, и многие из них в процессе эксплуатации значительно изнашивались и обветшали, в них появились дефекты и повреждения, а некоторые превратились в не подходящий под свое назначение объект. Все чаще поступают предложения: «Снести и построить новые!» А если попытаться сохранить и модернизировать? В этом случае, для обеспечения механической безопасности строительных объектов возникает потребность в усилении их конструкций, в увеличении несущей способности при изменении расчетных постоянных и временных нагрузок. Для удовлетворения указанных

потребностей у современной науки есть предложения. В настоящее время вопросы эффективности усиления композитными материалами, поиск оптимальных решений систем усилений, исследования действительного напряженно - деформированного состояния конструкций, усиленных углеродным волокном, волнуют многих специалистов. Основы проектирования и технологии внешнего армирования современными композиционными материалами на основе углеродных, арамидных и стекловолокон представлены в [1,2]. Существующие способы усиления железобетонных конструкций композиционными материалами на основе углеродных волокон в полимерном связующем рассмотрены в [3-5]. Также существуют экспериментальные исследования балок, усиленных композитными материалами [6-8]. Большой вклад в исследования упрочняющего действия листов из углеродного волокна и поведения связи между этими листами и бетоном внесли иностранные специалисты [9,10]. Кроме того, исследования касаются определения материальных свойств композитных материалов, армированных углеродным волокном [11,12].

В современной России большим спросом пользуются композиционные материалы из углеродных волокон в виде ламинатов. Такие материалы производятся в заводских условиях. Ткань пропитывают полимерными составами и из необходимого количества слоев формируют пакет. Далее, многослойную пропитанную ткань протягивают через систему валиков, тем самым прессуют и термообработывают до полного отверждения смолы. Получают ламинаты - жесткие композиционные ленты. В качестве отверждающего полимера используют эпоксидные и полиакрилонитриловые смолы. Приклейка холстов и ламелей производится с помощью полимерного эпоксидного клея. Гигроскопичность бетона позволяет клею проникнуть в его поры, чем обеспечивается прочность и сплошность соединения материалов усиления с усиливаемой конструкцией. Главным достоинством

композиционных материалов по сравнению с металлом и бетоном является их небольшой объемный вес и более высокие прочностные, деформативные характеристики.

Применение системы усиления железобетонной балки углеродными ламелями.

Рассмотрим пример применения систем усиления композитными материалами к изгибаемой железобетонной конструкции. Для сравнения эффективности усиления из углеродного композиционного материала были выбраны три температурных условия: для наружных конструкций $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура внутри отапливаемых помещений $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Объектом исследования являются железобетонные балки сечением 300×180 , 400×190 , 220×180 и 300×380 выполненные по серии 1.126.1 КЛ-1 «Балки железобетонные для кирпичных жилых и общественных зданий».

Расчетное значение сопротивления растяжению R_{ft} следует определять по формуле:

$$R_{ft} = \frac{\gamma_{f1} \cdot \gamma_{f2} \cdot R_{ftn}}{\gamma_f},$$

где γ_f – коэффициент надежности по композитному материалу;

γ_{f1} – коэффициент условий работы композитного материала, принимаемый в зависимости от типа композитного материала и условий эксплуатации конструкции;

γ_{f2} – коэффициент условий работы композитного материала, учитывающий сцепление композитного материала с бетоном, определяемый по формуле:

$$\gamma_{f2} = \frac{1}{2,5 \cdot \varepsilon_{f,ult} \sqrt{n \cdot E_f \cdot t_f}} \leq 0,9,$$

где n – число слоев композитного материала;

t_f – безразмерный параметр, численно равный значению толщины одного слоя композитного материала, мм;

E_f – модуль упругости композитного материала, МПа;

$\varepsilon_{f,ult}$ – значение предельных относительных деформаций композитного материала, определяемое при значении R_{ft} :

$$\varepsilon_{f,ult} = \frac{R_{ft}}{E_f}.$$

Элементами усиления выбрана система из композитных материалов на основе углеродных волокон. Приклейка ламелей произведена клеем на основе эпоксидной смолы, выпускаемым каждым выбранным для исследования брендом. Наиболее популярными композитными материалами, по результатам анализа рынка, определены фирмы SIKA (ЕС), CarbonWrap (Россия), MAREI (Италия). Из этих же брендов взяты и углеродная ткань с ламелью. Материалы, использованные в расчетах по усилению железобетонных балок системами внешнего армирования из углеродных ламелей, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Физико-механические свойства углеродных ламелей для расчетов усиления железобетонных балок системами внешнего армирования

№	Наименование материала	Прочность на растяжение, МПа	Модуль упругости, ГПа	Ширина материала, мм	Толщина материала, мм
1.	CarbonWrap lamel T 50/58	1100	150	58	5
2.	Sika CarboDur S614	2800	165	60	1,4
3.	Sika CarboDur M614	2400	210	60	1,2
4.	Sika CarboDur S912	2800	165	90	1,2
5.	Sika CarboDur M914	2400	210	90	1,4

Результаты вычислений при различных значениях температуры окружающей среды, а также типов ламелей, представлены на рис. 1 - 7.

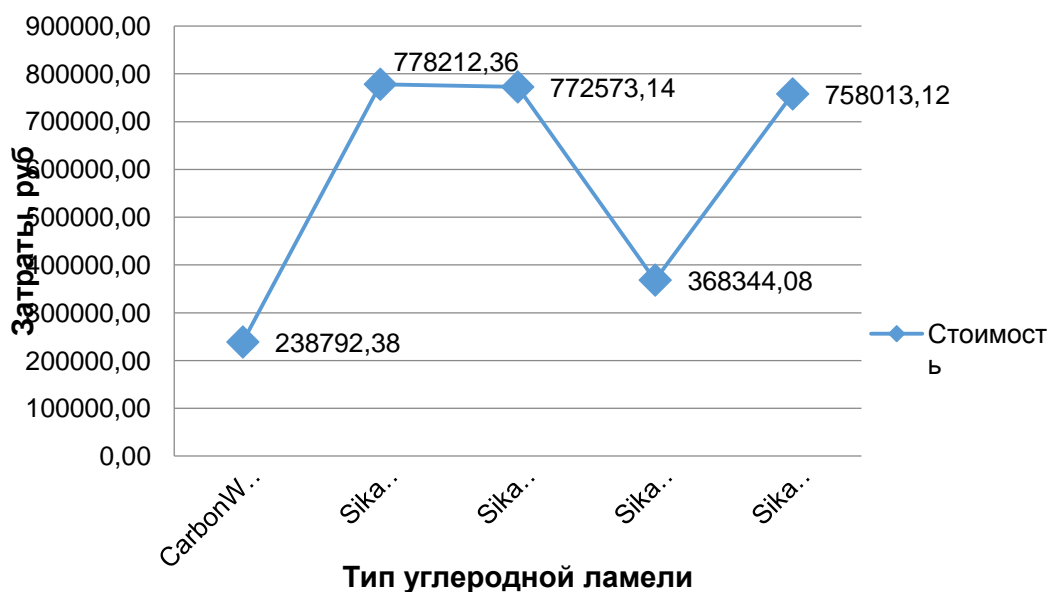


Рис. 1. Изменение стоимости усиления из углеродных ламелей железобетонной балки сечением 300x180 в зависимости от типа и производителя

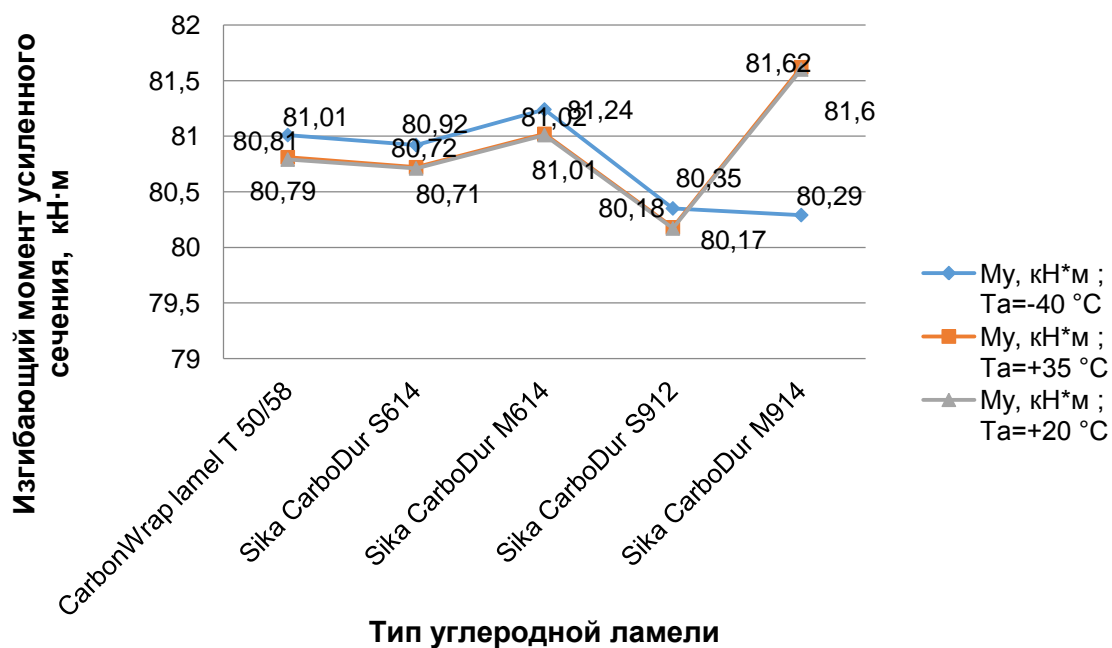


Рис. 2. Изменение изгибающего момента сечения 300x180 усиленного углеродными ламелями в зависимости от температуры

Стоимость усиления железобетонной балки сечением 400x190 не отличается суммами от сечения 300x180.

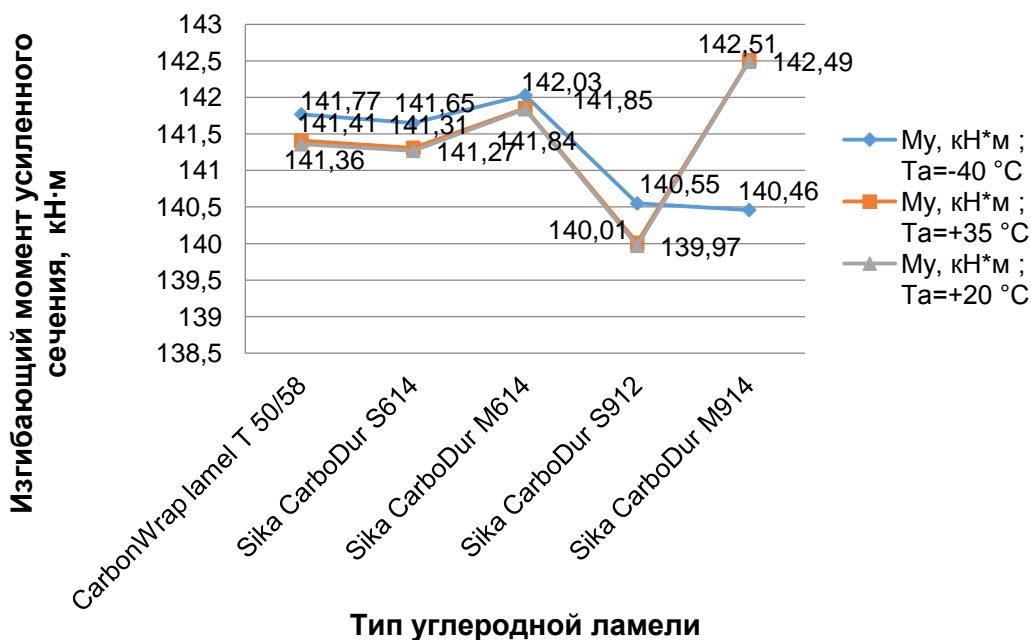


Рис. 3. Изменение изгибающего момента сечения 400x190, усиленного углеродными ламелями в зависимости от температуры эксплуатации

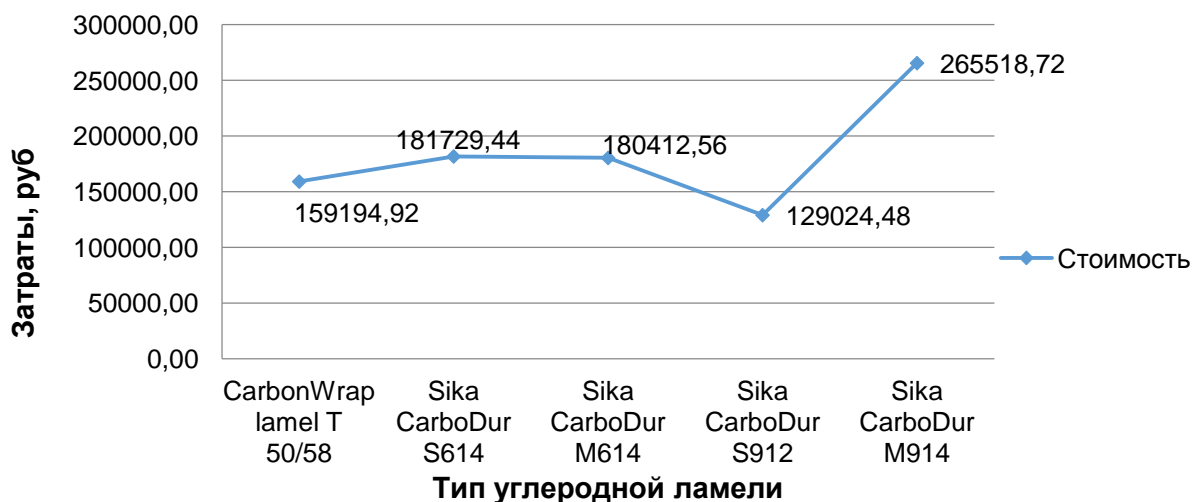


Рис. 4. График изменения стоимости усиления из углеродных ламелей железобетонной балки сечением 220x180 в зависимости от типа и производителя

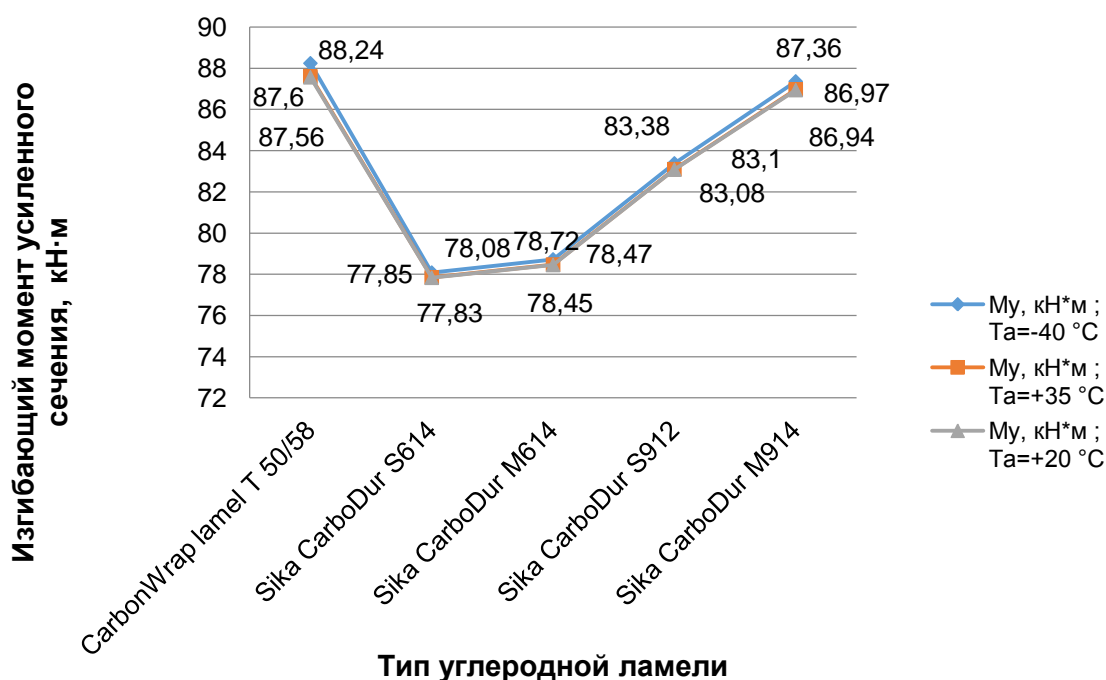


Рис. 5. График изменения изгибающего момента сечения 220x180, усиленного углеродными ламелями в зависимости от температуры эксплуатации

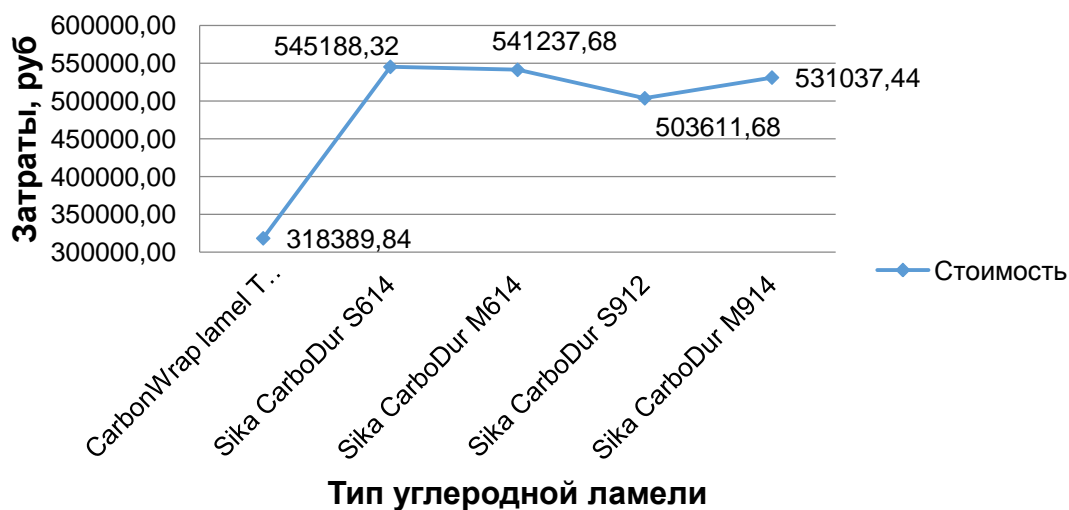


Рис. 6. График изменения стоимости усиления из углеродных ламелей железобетонной балки сечением 300x380 в зависимости от типа и производителя

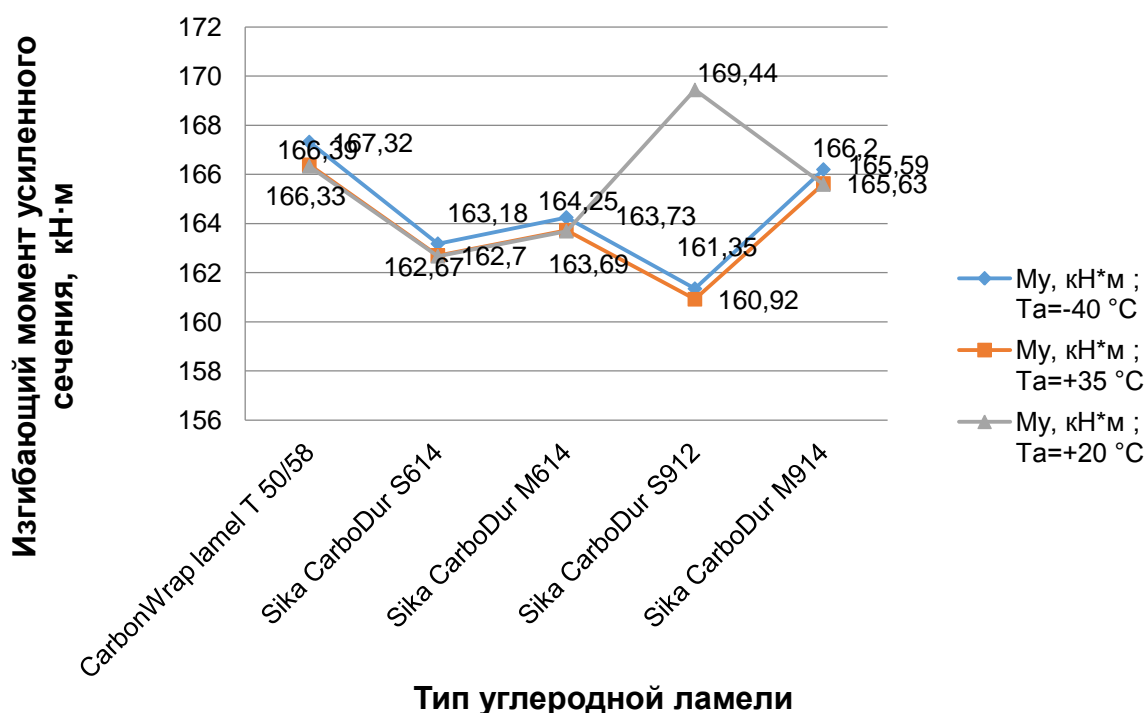


Рис. 7. Изменение изгибающего момента сечения 300x380 усиленного углеродными ламелями в зависимости от температуры

Заключение.

В результате проведенной работы установлено: композитные материалы высокой стоимости не показывают лучшего результата усиления, чем их дешевые аналоги. Применена методика расчета прочности усиленных балочных железобетонных конструкций композиционными материалами в процессе эксплуатации учетом разных температур. Получены расчетные данные, демонстрирующие влияние температуры эксплуатации на прочностные характеристики усиленных сечений. Выявлена зависимость между габаритами сечения и процента изменения несущих способностей при разных температурах эксплуатации. Продемонстрирована экономическая эффективность в сравнении с другими способами усиления железобетонных конструкций.

Литература

1. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. М.: Стройиздат, 2004. 139 с.
 2. Высокопрочные системы усиления IPECWRAP/IPECRESIN. Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами, Екатеринбург, 2010. 66 с.
 3. Овчинников И.Г., Валиев Ш.Н., Овчинников И.И. Вопросы усиления железобетонных конструкций композитами: Экспериментальные исследования особенностей усиления композитами изгибаемых железобетонных конструкций // Интернет-журнал науковедение, 2012. №4. 89 с.
 4. Смердов Д.Н., Неровных А.А. Методика проведения экспериментальных исследований изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. - Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2009. № 21. С. 146-155.
 5. Соловьёва А.И., Георгиев С.В., Меретуков З.А. Углеродное волокно - как хороший материал для усиления железобетонных конструкций. // Инженерный вестник Дона, 2021, №10 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7232/.
 6. Польской П.П., Михуб А., Георгиев С.В. Методики усиления композитными материалами и испытания железобетонных элементов. // Инженерный вестник Дона, 2013, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1687/.
 7. Юшин А.В., Морозов В.И. Анализ напряженно-деформированного состояния двухпролетных железобетонных балок, усиленных композитными материалами по наклонному сечению, с учетом нелинейности // Современные проблемы науки и образования, 2014. №5. 273 с.
-

8. Польской П.П., Маилян Д.Р. Композитные материалы - как основа эффективности в строительстве и реконструкции зданий и сооружений. // Инженерный вестник Дона, 2012, №4-2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1307/.

9. Ge W., Tang R., Wang Y. Flexural performance of ECC-concrete composite beams strengthened with carbon fiber sheet. // Results in Engineering, 2022, №13. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123022000044/](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123022000044/).

10. Li X., Gu X., Song X. Contribution of U-shaped strips to the flexural capacity of low-strength reinforced concrete beams strengthened with carbon fibre composite sheets. // Composites Part B: Engineering, 2013, №45(1), pp. 117-126. URL: [sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836812005859/](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836812005859/).

11. Sabau C., Popescu C., Sas G. Strengthening of RC beams using bottom and side NSM reinforcement. // Composites Part B: Engineering, 2018, №149, pp. 82-91. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836818305870/](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836818305870/).

12. Kormanikova E., Zmindak M., Novak P., Sabol P. Tensile properties of carbon fiber reinforced polymer matrix composites: Application for the strengthening of reinforced concrete structure. // Composite Structures, 2021, №275. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822321009107/](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822321009107/).

References

1. Shilin A.A., Pshenichnyj V.A., Kartuzov D.V. Usilenie zhelezobetonnih konstrukcij kompozitnymi materialami [Reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials]. M.: Strojizdat, 2004. 139 p.

2. Vysokoprochnye sistemy usileniya ITECWRAP/ITECRESIN. Rukovodstvo po usileniyu zhelezobetonnih konstrukcij kompozitnymi materialami [High strength ITECWRAP/ITECRESIN reinforcement systems. Guidelines for reinforcing reinforced concrete structures with composite materials], Ekaterinburg, 2010, 66 p.

3. Ovchinnikov I.G., Valiev SH.N., Ovchinnikov I.I. Internet-zhurnal naukovedenie, 2012. №4. 89 p.
4. Smerdov D.N., Nerovnyh A.A. Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. Novosibirsk: Izd-vo SGUPSa, 2009. №. 21. pp. 146-155.
5. Solov'yova A.I., Georgiev S.V., Meretukov Z.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №10 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7232/.
6. Pol'skoj P.P., Mihub A., Georgiev S.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1687/.
7. YUshin A.V., Morozov V.I. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya, 2014, №5. 273 p.
8. Pol'skoj P.P., Mailyan D.R. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, №4-2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1307/.
9. Ge W., Tang R., Wang Y. Results in Engineering, 2022, №13. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123022000044/](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123022000044/).
10. Li X., Gu X., Song X. Composites Part B: Engineering, 2013, №45(1), pp. 117-126. URL: [sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836812005859/](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836812005859/).
11. Sabau C., Popescu C., Sas G. Composites Part B: Engineering, 2018, №149, pp. 82-91. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836818305870/](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836818305870/).
12. Kormanikova E., Zmindak M., Novak P., Sabol P. Composite Structures, 2021, №275. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822321009107/](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822321009107/).