

DOI: 10.15593/2409-5125/2016.03.10

УДК 624.012.454

А.А. Быков, В.Н. Снигирева, А.А. Корягин

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК, УСИЛЕННЫХ
УГЛЕПЛАСТИКОМ, С УЧЕТОМ ОШТУКАТУРИВАНИЯ
РЕМОНТНЫМ СОСТАВОМ**

В настоящее время широкое распространение получила технология усиления строительных конструкций композитными материалами. При внешнем армировании железобетонных конструкций следует заранее обеспечить ровность и прочность бетонного основания перед приклейкой материала усиления. Для этого поверхность оштукатуривают специальными ремонтными составами. В работе рассматривается проблема усиления углепластиком железобетонных конструкций, предварительно оштукатуренных ремонтным составом на цементной основе, затворяемым водой. Для экспериментального исследования подготовлены 11 образцов-балок пролетом 1170 мм, усиленных одним слоем углепластика. Перед наклейкой углепластика образцы первой серии не оштукатуривались ремонтным составом, образцы второй серии оштукатуривались составом слоем 2,5–3,5 см. Представлены результаты испытаний образцов обеих серий по схеме 4-точечного изгиба. По результатам испытаний определены упругий прогиб, момент трещинообразования, момент, прогиб, максимальная ширина раскрытия трещины в бетоне в предельном состоянии, относительная деформация разрыва углепластика и характер разрушения образцов. Впервые получены экспериментальные результаты, обосновывающие применение ремонтного состава для оштукатуривания поверхности балок перед наклейкой углепластика. Проанализированы данные с тензодатчиков, наклеенных на бетон, стальную арматуру и углепластик, а также схемы распределения трещин по боковой поверхности исследуемых балок в зависимости от наличия или отсутствия штукатурного слоя.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, балка, углепластик, ремонтный состав.

При длительной эксплуатации железобетонных конструкций совместное действие внешней нагрузки и среды может привести к разрушению защитного слоя бетона, появлению трещин, что провоцирует коррозию арматуры и дальнейшее разрушение бетона. Эффективное восстановление механической безопасности,

несущей способности и эксплуатационной пригодности железобетонных конструкций, имеющих силовые и коррозионные трещины, разрушения бетона на глубину более толщины защитного слоя, сколы и раковины, возможно путем внешнего армирования конструкций углепластиком.

Для изгибаемых железобетонных балок углепластик приклеивают к растянутой грани сечения для восприятия растягивающих усилий [1–3]. Работы по усилению подчинены строгому алгоритму [4]:

1. Удаление рыхлого поврежденного бетона.
2. Предотвращение коррозии арматуры:
 - 2.1. Удаление пластовой коррозии со стержневой арматуры и закладных деталей механическим способом.
 - 2.2. Обработка открытой поверхности арматуры и закладных деталей грунтом-преобразователем ржавчины.
 - 2.3. Блокирование коррозии арматуры в теле бетона при помощи пенетрирующих ингибиторов коррозии.
 - 2.4. Предотвращение возобновления процессов коррозии.
3. Восстановление поврежденных или разрушенных участков бетона полимерцементными ремонтными составами, обеспечивающими высокое сцепление со «старым» бетоном, быстрый набор прочности, высокую водонепроницаемость и химическую стойкость.
4. Приклеивание холстов, тканей или ламелей на подготовленное бетонное основание конструкции.
5. Защита усиленной поверхности от возможных проявлений вандализма, воздействий пожара, УФ-излучения и др.

На практике подготовке бетонного основания перед наклейкой углепластика уделяют особое внимание. От качества подготовки поверхности зависит сцепление углепластика с бетоном. Для конструкций, имеющих начальные дефекты поверхности, разрушения бетона, углепластик приклеивают не на бетон самой конструкции, а на слой ремонтного состава. Для ремонта бетонной поверхности используют штукатурные составы, затворяемые водой или эпоксидной смолой. Второй вариант дороже, но часто эффективнее благодаря более высоким адгезионным свойствам, хотя его применение возможно только на сухих поверхностях.

После оштукатуривания ремонтным составом конструкция по толщине бетона становится слоистой. Таким образом, сцепление углепластика с усиливаемой конструкцией становится зависимым от сцепления ремонтного состава со «старым» бетоном. Наглядный пример усиления плиты перекрытия углепластиком с предварительным восстановлением геометрии наружной поверхности показан на рис. 1 [5].

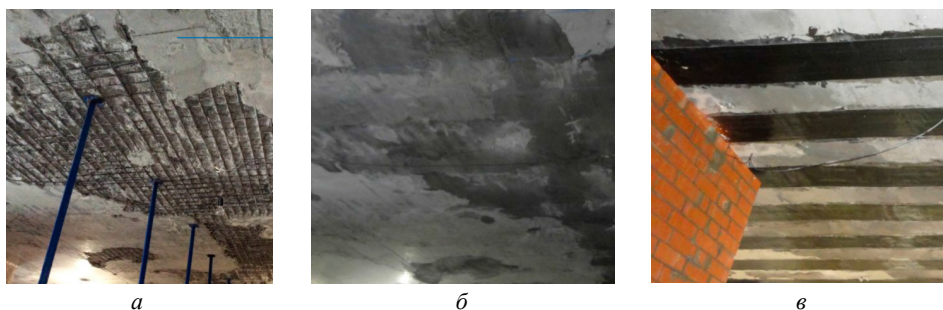


Рис. 1. Пример усиления плиты: *а* – первоначальный вид плиты перекрытия; *б* – вид оштукатуренной плиты; *в* – вид после приклейки углепластика

Кроме того, необходимость в оштукатуривании (восстановлении геометрии) усиливаемой конструкции может возникнуть в случаях, когда исходная поверхность неровная, отклонения выше 5 мм на базе 2 м или 1 мм на базе 0,3 м и площадью более 25 см² [6].

Обзор экспериментально-теоретических исследований [7–13] показал, что на сегодняшний день отсутствуют работы, в которых учитывалось бы наличие слоя ремонтного состава между углепластиком и «старым» бетоном и его влияние на совместность деформирования элементов в сечении конструкции, а также прочность, жесткость, трещиностойкость и характер разрушения изгибаемых конструкций.

Таким образом, актуальным представляется исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных балок, усиленных углепластиком, защитный слой которых представляет собой слой отвердевшего ремонтного состава. Целью данной работы является экспериментальное определение влияния наличия слоя ремонтного состава на прочность, жесткость, трещиностойкость и характер разрушения железобетонных балок, усиленных одним слоем углепластика.

Для настоящего исследования на Пермском заводе ЖБК в стандартных формах были изготовлены 11 железобетонных балок длиной 1270 мм, сечением 120x220 мм. Балки были разбиты на две группы: Б1 (проектный класс бетона В20) и Б2 (проектный класс бетона В35). В каждой группе балки разделены на две серии: серия «б» – балки без ремонтного состава, серия «д» – балки с ремонтным составом. Армирование балок стальной арматурой выполнено в соответствии с рис. 2.

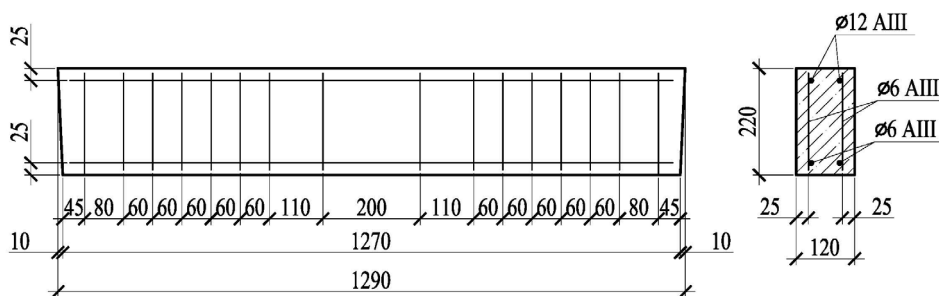


Рис. 2. Опалубочный чертеж и схема армирования образцов сталью

Для балок серии «д» защитный слой бетона со стороны нижней грани был удален механическим методом (рис. 3, а) на глубину 2,5–3,5 см. После удаления защитного слоя бетона поверхность промыли водой с помощью щетки. Далее выполнили оштукатуривание поверхности ремонтным составом Sika MonoTop-412N (рис. 3, б), который представляет собой состав на цементной основе с компенсированной усадкой, затворяемый водой и армированный фиброй. Выбор состава, затворяемого водой, был обусловлен тем, что на практике именно такие составы нашли более широкое применение благодаря своей экономической доступности.



Рис. 3. Подготовка балок серии «д» к испытаниям

После набора прочности поверхность ремонтного состава зашлифовали при помощи углошлифовальной машины с алмазной чашкой для удаления цементной пленки и создания шероховатости. Аналогично зашлифовали поверхность балок серии «б», предназначенную для наклейки углепластика. После шлифования балки промыли водой и высушили. Далее на балки был наклеен углеродный холст SikaWrap-230 при помощи эпоксидной смолы Sikadur-330 в соответствии со схемой армирования (рис. 4).

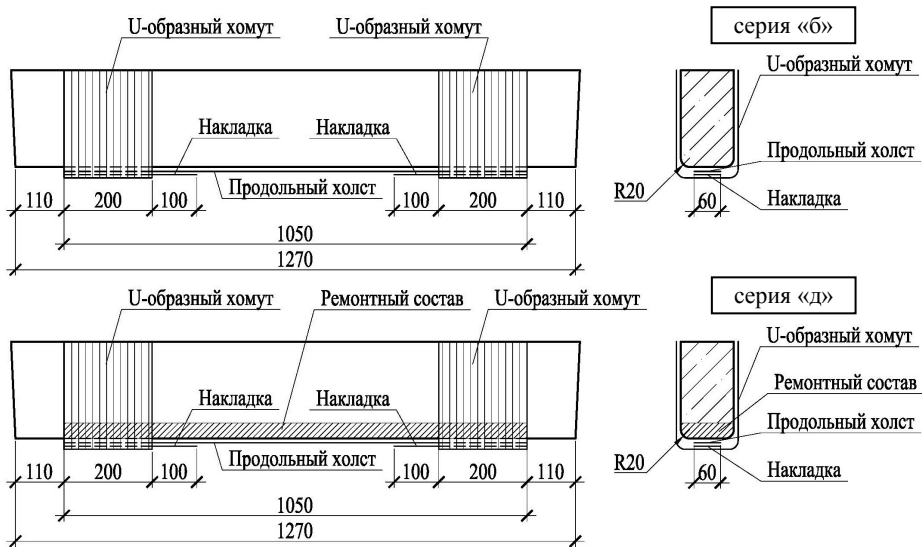


Рис. 4. Схема армирования балок углепластиком

Испытания усиленных балок проводились в лаборатории кафедры «Строительные конструкции и вычислительная механика» ПНИПУ на специально разработанном и изготовленном стенде по схеме 4-точечного изгиба. На бетоне, стальной арматуре и углепластике были наклеены тензодатчики для контроля деформаций в процессе нагружения. Описание испытательного стенда, схемы расположения тензодатчиков и измерительных приборов, схема приложения испытательной нагрузки даны в работе [14]. Нагружение балок выполняли ступенями по 2 кН. На каждой ступени фиксировали образование трещин в бетоне, ширину их раскрытия. Запись данных с тензодатчиков, прогибомера и силоизмерительного устройства велась непрерывно в течение испытания.

По результатам испытаний определены значения момента трещинообразования M_{cre} и соответствующего упругого прогиба $f_{упр}$, значения M_{ult} и соответствующего прогиба f_{ult} в предельном состоянии, максимальная ширина раскрытия трещины в бетоне $a_{cre,max}$ в предельном состоянии и относительная деформация разрыва углепластика $\varepsilon_{f,ult}$, а также характер разрушения образцов. Значения изгибающих моментов вычислены по данным соответствующих значений внешней нагрузки, которые установлены прямым измерением силоизмерительным прибором. Полученные экспериментальные данные приведены в таблице.

Сводные данные результатов статических испытаний балок

Серия	Марка образца	Проектный класс бетона	M_{cre} , кН·м	$f_{упр}$, мм	M_{ult} , кН·м	f_{ult} , мм	$a_{cre,max}$, мм	$\varepsilon_{f,ult}$, МКМ/м
«б» без ремонтного состава	Б16-3	В20	4,33	0,206	10,25	8,30	1,0	13370
	Б16-4	В20	5,40	0,257	10,10	8,08	0,9	12180
	Б16-5	В20	4,32	0,218	11,07	9,78	1,1	15040
	Среднее	–	4,68	0,227	10,47	8,72	1,0	13530
	Б26-3	В35	5,49	0,260	10,56	8,92	1,1	13790
	Б26-4	В35	5,09	0,213	11,46	9,31	1,0	14280
	Б26-5	В35	5,43	0,252	10,27	8,06	1,3	12190
	Среднее	–	5,34	0,242	10,76	8,76	1,1	13420
«д» с ремонтным составом	Б1д-1	В20	4,51	0,265	10,29	8,08	0,8	11190
	Б1д-2	В20	4,92	0,287	10,87	9,03	0,9	12860
	Среднее	–	4,72	0,276	10,58	8,56	0,85	12025
	Б2д-1	В35	4,73	0,230	10,64	7,93	1,1	12440
	Б2д-2	В35	5,58	0,311	11,52	8,34	1,1	13380
	Б2д-3	В35	4,91	0,261	11,95	9,51	1,6	14020
	Среднее	–	5,07	0,267	11,37	8,59	1,27	13280

Сопоставление данных таблицы и зависимостей изгибающего момента от прогиба (рис. 5) для испытанных образцов показало, что наличие слоя ремонтного состава слабо сказывается на значениях наблюдаемых параметров. Так, например, среднее значение M_{ult} для балок с ремонтным составом группы Б2 составило 11,37 кНм, что всего на 5 % выше значения для балок без ремонтного состава этой же группы – 10,76 кНм. Средние значения предельного и упругого прогиба, момента трещинообразования, максимальной ширины раскрытия трещин и относительной деформации разрыва углепластика одинаковы для балок серии «б» и «д» с отличием не более 5 %.

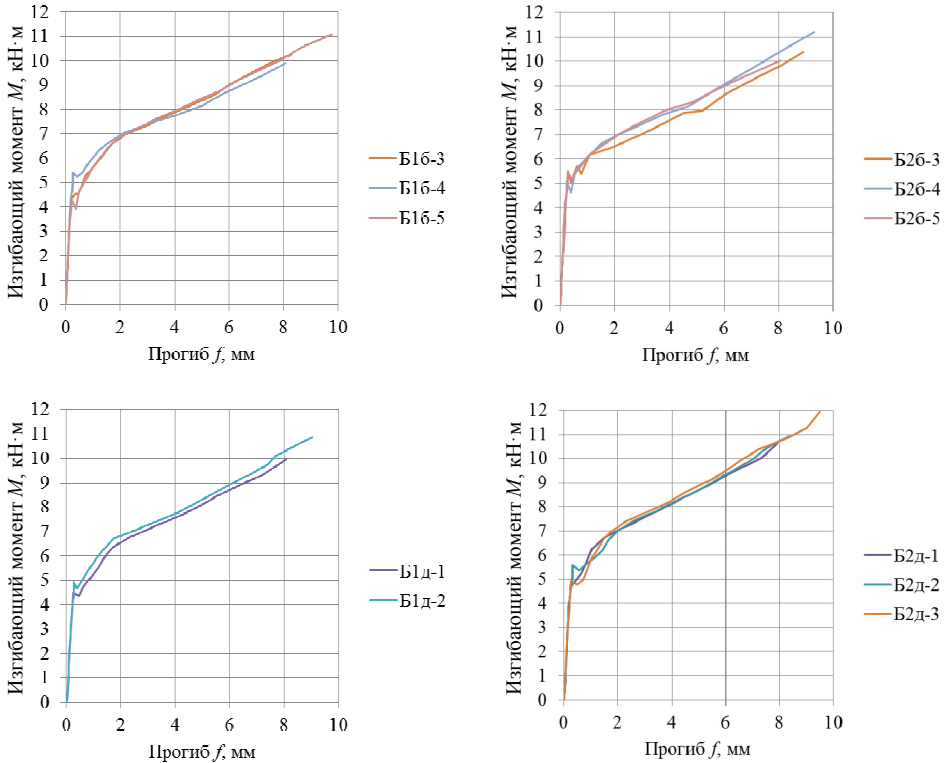


Рис. 5. Зависимость прогиба балки от величины изгибающего момента

Интересным оказалось влияние наличия ремонтного состава на характер распределения трещин в бетоне. Для балок серии «д» помимо основных магистральных трещин, аналогичных тем, что возникали в балках серии «б», в процессе нагружения образуются мелкие трещины небольшой высоты, равной толщине ремонтного состава, в количестве 5–6 штук по длине балки (рис. 6). После появления эти трещины практически больше не увеличиваются по высоте вплоть до разрушения балки.

Анализ данных тензодатчиков, наклеенных в сжатой зоне бетона, показал, что в предельном состоянии балок деформации сжатия бетона в среднем равны 1570 мкм/м независимо от наличия или отсутствия ремонтного состава. Учитывая предельные деформации сжатия бетона 3500 мкм/м (СП 52-101–2003), можно сказать, что в предельном состоянии исследованных балок сжатый бетон недоиспользует свои прочностные характеристики.

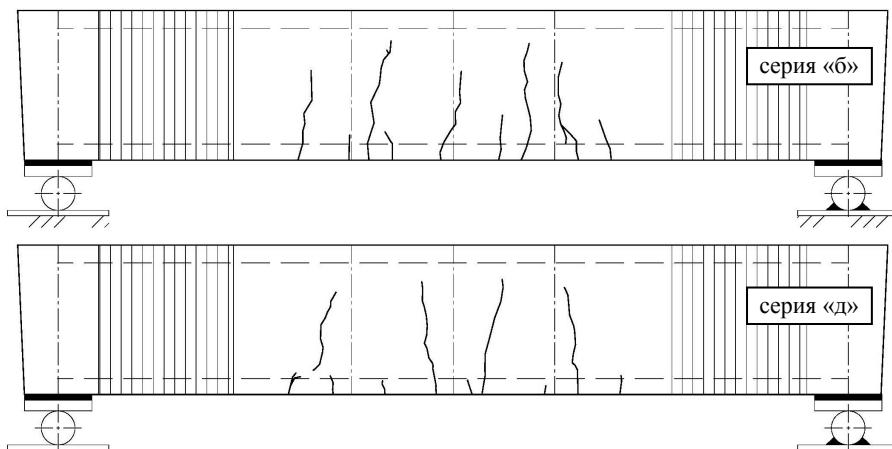


Рис. 6. Характер распределения трещин в балках

Данные тензодатчиков, наклеенных на стальной арматуре, в совокупности с данными испытаний стандартных образцов арматуры позволили установить, что пластические деформации в арматуре (величина 4300 мкм/м) достигаются в среднем при значении изгибающего момента, равном $7,8 \text{ кН}\cdot\text{м}$. В связи с этим достижение пластических деформаций в стальной арматуре практически не сказывается на жесткости балок (см. рис. 5) благодаря эффективной работе углепластика в составе усиленной конструкции.

По данным тензодатчиков, наклеенных на углепластике, относительная деформация разрыва ленты усиления в среднем составила $13\ 060 \text{ мкм/м}$, что коррелирует с данными испытаний стандартных образцов углепластика, где деформация разрыва составила $14\ 800 \text{ мкм/м}$.

Разрушение балок обеих серий происходило из-за разрыва ленты углепластика в зоне чистого изгиба. Осмотр балок после разрыва углепластиковой ленты показал, что отслоение углепластика происходило по когезионному механизму также в обоих случаях: по бетону для балок серии «б» и по ремонтному составу для балок серии «д». Кроме того, разрыв углепластиковой ленты для балок, оштукатуренных ремонтным составом, характеризуется выкалыванием крупных фрагментов ремонтного состава (рис. 7). Скалывание фрагментов ремонтного состава от «старого» бетона происходило также по когезионному механизму.

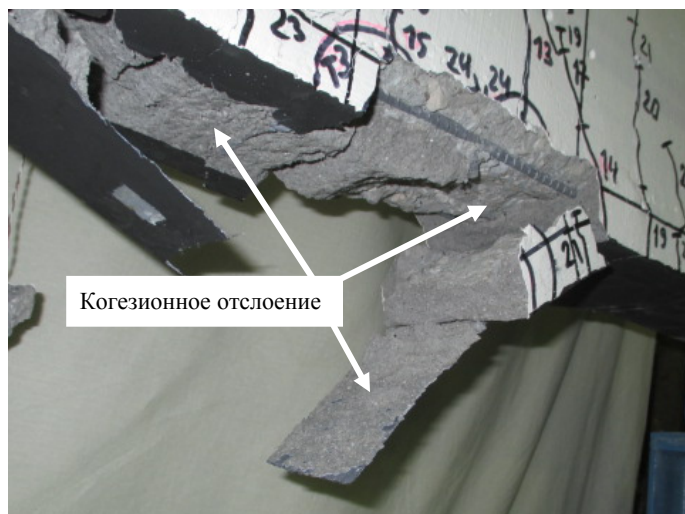


Рис. 7. Характер разрушения балок серии «д»

На основании проведенного исследования сделаны следующие выводы:

1. Получены экспериментальные результаты, обосновывающие применение ремонтного состава на цементной основе, затворяемого водой, для оштукатуривания поверхности балок перед наклейкой углепластика. Подтверждено, что ремонтный состав деформируется совместно с углепластиком и основанием вплоть до разрушения балки и не является «слабым» звеном в цепочке сцепления между углепластиком и «старым» бетоном. Отслоение ремонтного состава от бетона основания происходит в момент разрушения балок (в данном случае разрушение происходило из-за разрыва ленты углепластика) и реализуется по когезионному механизму в случае соблюдения технологии нанесения и твердения.

2. Установлено, что для оштукатуренных балок характерно образование мелких волосяных трещин в растянутой зоне бетона, высота которых равна толщине ремонтного состава, а разрушение балок сопровождается выкалыванием крупных фрагментов ремонтного состава.

3. Значения упругого прогиба, момента трещинообразования, предельного момента, максимальной ширины раскрытия трещин и относительной деформации разрыва углепластика для неоштукатуренных балок и балок, покрытых ремонтным составом, отличаются не более 5 %.

Библиографический список

1. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами / А.А. Шилин, В.А. Пшеничный, Д.В. Картузов. – М.: Стройиздат, 2007. – 184 с.
2. Усиление железобетонных конструкций путепровода по ул. Шарикоподшипниковской в Москве высокопрочными композиционными материалами на основе углеволокон / Ф.В. Задворнов, В.Н. Федосеев, А.А. Шилин // Транспортное строительство. – 2002. – № 11. – С. 2–5.
3. Григорьева Я.Е. Проблемы применения технологии усиления изгибаемых железобетонных конструкций внешним армированием углеродным волокном // Промышленное и гражданское строительство. – 2011. – № 11. – С. 60–61.
4. Чернявский В.Л. Система ремонта и усиления строительных конструкций // Гидротехника. – 2010. – № 4 (21); 2011. – № 1 (22). – С. 60–63.
5. Картотека выполненных объектов: Ремонт и усиление плиты перекрытия/ Торгово-производственное объединение ГИДРОЗО. – М., 2015. – URL: http://www.gydrozo.ru/objects/pdf/2030/chastnyu_dom.pdf?t=1438259464.
6. Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами / ГУП НИИЖБ. – М.: Интераква, 2006. – 48 с.
7. Шевцов Д.А. Усиление железобетонных конструкций композиционными материалами // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – № 8. – С. 61–65.
8. Халтурин Ю.В., Кузовенко А.В. Использование композитных материалов при реконструкции зданий и сооружений // Вестник АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – 2014. – № 1-2. – С. 51–54.
9. Армирование и схемы испытания наклонных сечений балок с внешним композитным усилением / Д.Р. Маилян [и др.] // Новые технологии. – 2015. – № 4. – С. 44–48.
10. Deflection behaviour of FRP reinforced concrete beams and slabs: An experimental investigation / R. Al-Sunna, K. Pilakoutas, I. Hajirasouliha, M. Guadagnini // Composites Part B: Engineering. – 2012. – Vol. 43(5). – P. 2125–2134.
11. An experimental study on the flexural behavior of FRP RC beams and a comparison of the ultimate moment capacity with ACI / I. Chitsazan, M. Kobraei, M. Z. Jumaat, P. Shafiqh // Journal of civil engineering and construction technology. – 2010. – Vol. 1(2). – P. 27–42.
12. Experimental and analytical study on reinforced concrete beams in bending strengthened with FRP / C.C. Spyarakos, I.G. Raftoyiannis, L. Credali, J. Ussia // The open construction and building technology journal. – 2014. – Vol. 8. – P. 153–163.
13. Investigation of structural response of reinforced concrete beams strengthened with anchored FRPs / C.B. Demakos, C.C. Repapis, D. Drivas // The Open Construction and Building Technology Journal. – 2013. – Vol. 7. – P. 146–157.
14. Экспериментальное исследование прочностных и деформационных характеристик железобетонных балок, усиленных углепластиком / А.А. Быков, С.Д. Румянцев, А.С. Бирин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2016. – № 2. – С. 111–125.

References

1. Shilin A.A., Pshenichnyi V.A., Kartuzov D.V. Usilenie zhelezobetonnykh konstruksij kompozitnymi materialami [Strengthening of reinforced concrete structures with composite materials]. Moscow: Strojizdat, 2007. 184 p.
2. Zadvornov F.V., Fedoseev V.N., Shilin A.A. Usilenie zhelezobetonnykh konstruksii puteprovoda po ul. Sharikopodshpnikovskoi v Moskve vysokoprochnymi kompozitsionnymi materialami na osnove uglevolokon. *Transportnoe stroitel'stvo*, 2002, no. 11, pp. 2-5.
3. Grigorieva Ya.E. Problemy primeneniya tekhnologii usileniya izgibaemykh zhelezobetonnykh konstruksij vneshnim armirovaniem uglernym voloknom [Problems of the use of strengthening of flexible reinforced concrete structures with external carbon fiber reinforcement]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2011, no. 11, pp. 60–61.
4. Cherniavskij V.L. Sistema remonta i usileniya stroitel'nykh konstruksii. *Gidrotekhnika*, 2010, no. 4 (21); no. 1 (22), pp. 60–63.
5. Kartoteka vypolnennykh ob'ektov: Remont i usilenie plity perekrytiya. Torgovo-proizvodstvennoe ob"edinenie GIDROZO. Moscow, 2015, available at: http://www.gydrozo.ru/objects/pdf/2030/chastnyy_dom.pdf?t=1438259464
6. Rukovodstvo po usileniyu zhelezobetonnykh konstruksij kompozitnymi materialami [Fiber Reinforced Polymer strengthening manual]. Moscow: Interakva, 2006. 48 p.
7. Shevtsov D.A. Usilenie zhelezobetonnykh konstruksij kompozitsionnymi materialami [Strengthening of reinforced concrete structures with fiber reinforced composites]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2014, no. 8, pp. 61–65.
8. Khalturin Yu.V., Kuzovenko A.V. Ispol'zovanie kompozitnykh materialov pri rekonstruksii zdaniy i sooruzhenii. *Vestnik AltGTU im. I.I. Polzunova*, 2014, no. 1-2, pp. 51–54.
9. Mailyan D.R. [et al.]. Armirovanie i skhemy ispytaniya naklonnykh sechenij balok s vneshnim kompozitnym usileniem [Reinforcing and testing the schemes of the inclined sections of beams with external composite strengthening]. *Novye tekhnologii*, 2015, no. 4, pp. 44–48.
10. Al-Sunna R., Pilakoutas K., Hajirasouliha I., Guadagnini M. Deflection behaviour of FRP reinforced concrete beams and slabs: An experimental investigation. *Composites Part B: Engineering*, 2012, vol. 43 (5), pp. 2125–2134.
11. Chitsazan I., Kobraei M., Jumaat M.Z., Shafigh P. An experimental study on the flexural behavior of FRP RC beams and a comparison of the ultimate moment capacity with ACI. *Journal of civil engineering and construction technology*, 2010, vol. 1(2), pp. 27–42.
12. Spyraeos C.C., Raftoyiannis I.G., Credali L., Ussia J. Experimental and analytical study on reinforced concrete beams in bending strengthened with FRP. *The open construction and building technology journal*, 2014, vol. 8, P. 153–163.
13. Demakos C.B., Repapis C.C., Drivas D. Investigation of structural response of reinforced concrete beams strengthened with anchored FRPs. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 2013, vol. 7, pp. 146–157.
14. Bykov A.A., Rummyantsev S.D., Birin A.S. Eksperimental'noe issledovanie prochnostnykh i deformatsionnykh kharakteristik zhelezobetonnykh balok, usilennykh ugleplastikom [Experimental study of strength and deflection behavior of CFRP strengthening concrete beams]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika*, 2016, no. 2, pp. 111–125.

Получено 24.02.2016

A. Bykov, V. Snigireva, A. Koryagin

**EXPERIMENTAL STUDY OF RC BEAMS STRENGTHENED
WITH CFRP SHEET TAKING INTO ACCOUNT
RECASTING WITH REPAIR MORTAR**

The technology of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures has recently become widespread. The external reinforcement of concrete constructions requires to ensure evenness and strength of the concrete base before attaching a reinforced material. So, the surface is plastered with special repair mortar. The paper considers the problem of strengthening carbon fiber reinforced concrete structures which have been pre-plastered by repair mortar based on cement, and shut with the water. For experimental studies 11 beams were prepared with a span of 1170 mm and reinforced with one layer of carbon fiber. Before sticking carbon fiber the samples of the first series have not been plastered using repair mixture, the samples of the second series – have been plastered with the thickness of 2.5-3.5 cm. The results of testing both sample series on the four-point bending scheme are presented. According to the results of tests, we determined elastic deflection, cracking moment, the moment, the deflection, the maximum width of the crack opening in concrete at the ultimate limit state, the relative fracture deformation and fracture of carbon fiber samples. For the first time we have obtained the experimental results justifying the use of repair mortar for plastering the beams surface before the application of the sticker carbon fiber. The data from the strain gauges glued to concrete, steel reinforcement and carbon fiber, as well as crack distribution patterns along the lateral surface of the tested beams depending on the presence or absence of the plaster layer are analyzed.

Keywords: reinforced concrete structures, beam, carbon fiber reinforced polymer, repair mortar.

Быков Антон Алексеевич (Пермь, Россия) – доцент кафедры «Строительные конструкции и вычислительная механика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: violentharp@yandex.ru).

Снигирева Влада Николаевна (Пермь, Россия) – студент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: vladasnigireva@mail.ru).

Корягин Антон Анатольевич (Пермь, Россия) – студент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: psp.anton1994@gmail.com).

Bykov Anton (*Perm, Russian Federation*) – Assistant Lecturer, Department of Building Structures and Computational Mechanics, Perm National Research Polytechnic University (29 Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, e-mail: violenthapy@yandex.ru).

Snigireva Vlada (*Perm, Russian Federation*) – Student, Perm National Research Polytechnic University (29 Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, e-mail: vladasnigireva@mail.ru).

Koryagin Anton (*Perm, Russian Federation*) – Student, Perm National Research Polytechnic University (29 Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, e-mail: psp.anton1994@gmail.com).