

О влиянии гибкости стоек на эффективность композитного усиления

П.П. Польской, Д.Р. Маилян, С.В. Георгиев

Ростовский государственный строительный университет

Аннотация: Приведены и проанализированы данные о результатах испытания железобетонных стоек с гибкостью $\lambda_n=10$ и $\lambda_n=20$, усиленных внешней углепластиковой арматурой. Установлены границы влияния различных вариантов усиления на прочность и деформативность стоек и эффективность использования композитных материалов.

Ключевые слова: бетон, арматура, железобетон, композит, эксцентриситет, гибкость, нагрузка, прочность, деформативность, усиление.

Увеличение объемов каркасно-монолитного строительства зданий с безбалочными плитами при одновременном росте ремонтно-восстановительных работ, потребовали и разработки новых методов усиления конструкций. В соответствии с перспективной программой исследования [1,2], кафедра железобетонных и каменных конструкций РГСУ проводит большой объем научных исследований, связанных с усилением железобетонных конструкций различными видами композитных материалов, в том числе и на основе углепластика горячего и холодного отверждения. Общий вид указанных материалов представлен на рис.1.

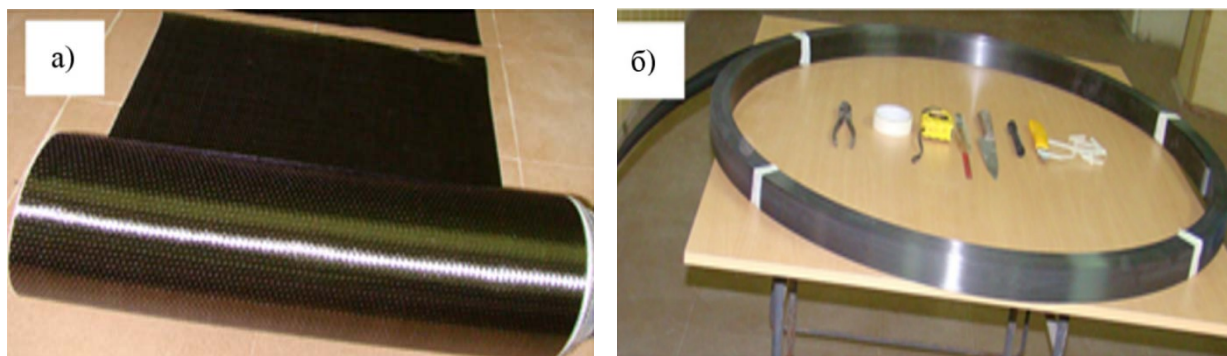


Рис 1. – Общий вид углеткани шириной 500мм (а) и углеламината шириной 50мм (б)

Появлению нормативной базы в России и за рубежом [3,4,5] предшествовали многочисленные исследования, в том числе [6,7,8].

Учитывая, что нормативная база по расчету железобетонных элементов, усиленных композитными материалами, появилась в России сравнительно недавно, проводимые кафедрой исследования по проверке надежности расчетного аппарата весьма актуальны. Настоящая статья посвящена исследованию усиленных коротких и условно длинных сжатых элементов. Программа указанных исследований представлена на рис. 2.

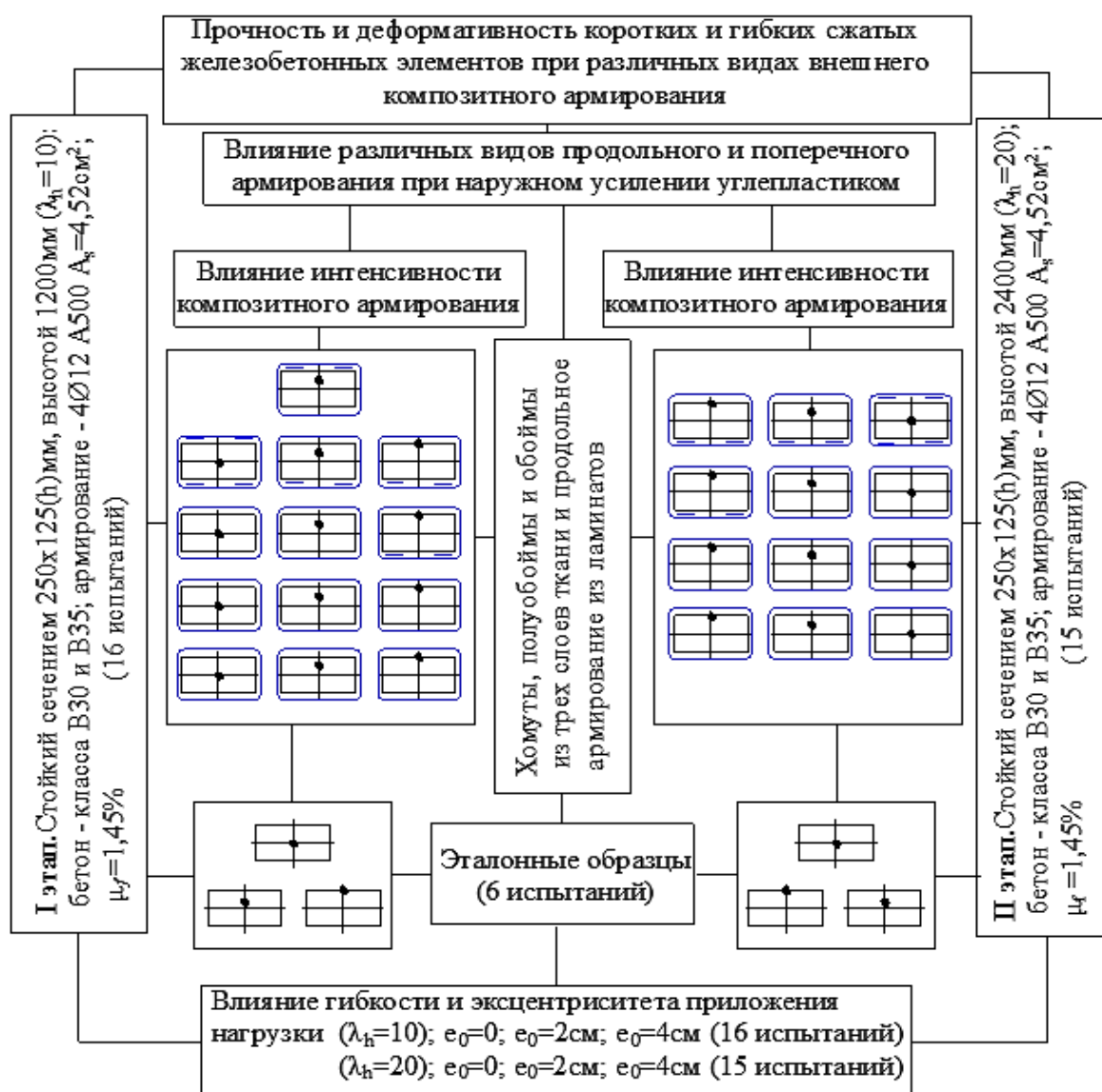


Рис 2. – Программа испытаний для исследования влияния сечения и вида продольного и поперечного композитного армирования на несущую способность сжатых железобетонных элементов при различных значениях гибкости и эксцентриситета приложения нагрузки.

Согласно программе исследований, разбитой на два этапа, были изготовлены и испытаны 31 опытный образец одинакового сечения и армирования. Варьировались только виды композитного усиления.

Опытные образцы-стойки были приняты из тяжелого бетона и согласно ГОСТ 10180 соответствуют проектному классу В30. Стойки изготавливались сечением 250x125(h)мм и длиной 1200 и 2400 мм. При данных размерах, гибкость опытных образцов составляет $\lambda_h = 10$ и 20 соответственно.

Рабочая стальная арматура для обоих этапов была принята одинаковой. Она состоит из 4 $\varnothing 12$ А500, что соответствует проценту продольного армирования $\mu_s = 1,45\%$. Стальная поперечная арматура принята вязаной $\varnothing 6$ В500 и расположена с шагом 180 мм. Дополнительно к основной поперечной арматуре на торцах и коротких, и гибких стоек установлено по 6 конструктивных сеток с шагом 50 мм. Арматура сеток принята $\varnothing 3$ В500, а размер ячеек – 50x40мм. Их цель предотвращение смятия торцов. Конструкция каркасов соответствует требованию ГОСТ 10922-2012 и представлена на рис. 3.

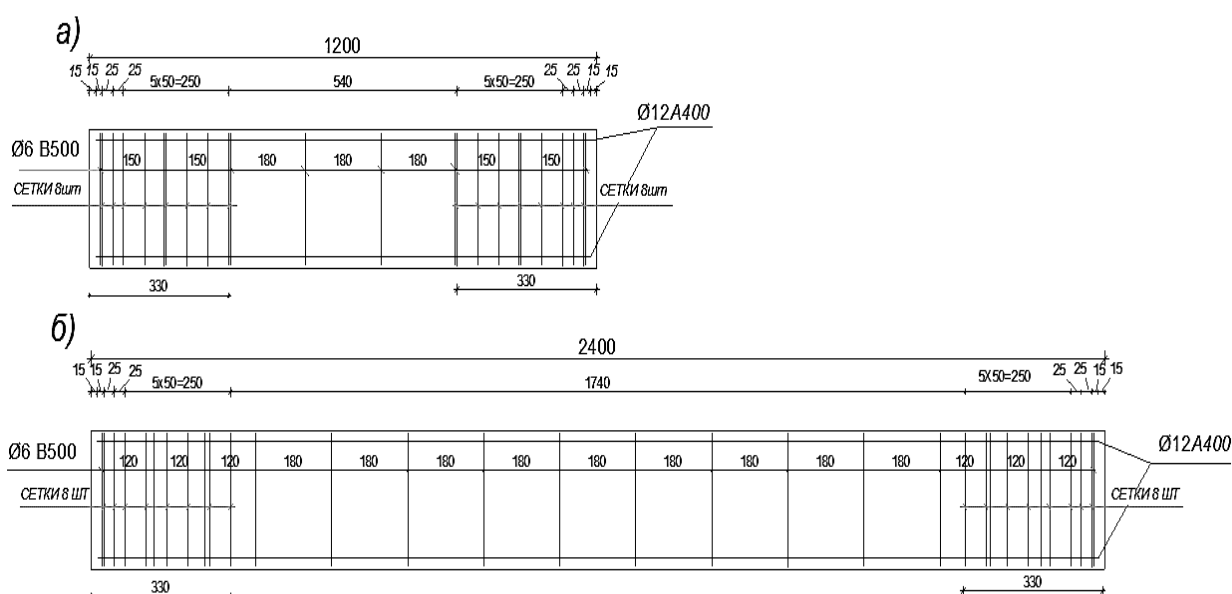


Рис 3. – Схема продольного и поперечного армирования коротких (а) и гибких (б) стоек.

В качестве элементов усиления применялись 3 типа композитных материалов на основе углепластика предоставленных Московским отделением фирмы «BASF – строительные системы». В роли внешней продольной арматуры использовались углеламинаты (полосы) шириной 50 и толщиной 1,2мм, наклеенные на наружную поверхность, и круглые стержни Ø8мм, вклеенные в пропиленную в стойке штрабу. Прочностные характеристики композитных материалов подробно приведены в статье [9]. Наружные хомуты усиления выполнялись из 3-х слоев углеткани различной ширины. Один из вариантов усиления стоек хомутами приведен на рис. 4.

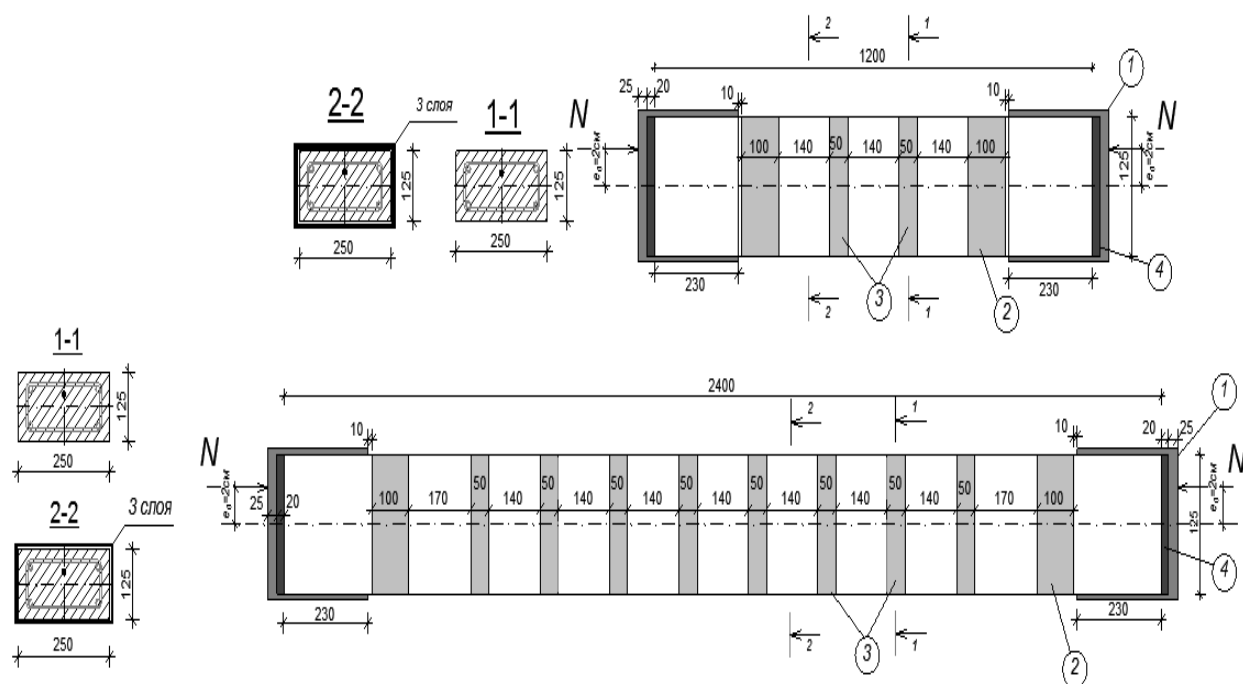


Рис 4. – Вариант схемы усиления поперечной композитной арматурой с шагом $s=190$ мм. 1 – стальной оголовок; 2 – торцевой анкер; 3 – рядовые хомуты усиления; 4 – цементно-песчаный раствор марки 200.

На усиленных образцах при различных значениях осевого эксцентриситета изучалось влияние на прочность и деформативность опытных стоек, следующих факторов: толщины, ширины и площади сечения поперечных хомутов, а также шага их расположения; эффективность полной

обоймы (аналогичной по толщине с хомутами); эффективность не полной (по высоте стойки) обоймы; влияние гибкости опытных образцов на эффективность вышеуказанных видов усиления; влияние продольного композитного армирования в сочетании с вышеуказанными видами поперечного композитного армирования на несущую способность сжатых элементов.

Для получения ответов на поставленные вопросы, опытные образцы с учетом их гибкости были разделены на два этапа: I ($\lambda_h=10$) и II ($\lambda_h=20$).

Для учета влияния эксцентриситета на эффективность композитного усиления, каждый этап разбит на три серии А, Б и В. В каждой серии образцы имели 3-6 вариантов усиления. Методика усиления подробно представлена в статье [10]. В соответствии с программой исследования, на каждом этапе было испытано по три эталонных образца и по 13 и 12 стоек, имеющих различные варианты усиления, соответственно, на первом и втором этапах исследования.

Испытания опытных образцов проводилась на специально оборудованных стендах (рисунок 5). Приложение нагрузки на стойки осуществлялось через специально законструированные стальные оголовки с прорезями, которые автоматически создавали осевой эксцентриситет $e_0=0$; 2 и 4см.

Все образцы испытывались ступенчато возрастающей нагрузкой этапами примерно по 10% от теоретической разрушающей, с выдержкой на каждом этапе 10 минут. В процессе испытания инструментально измерялись прогибы колонн и местные деформации, как на бетоне, так и на композите.

Шифр опытных образцов уже был опубликован авторами в статье [11]. Однако, в целях понимания сути вопросов, он приводится повторно с учетом дополнительно испытанных образцов.



Рис 5. – Конструкция стендов для испытания коротких и длинных стоек с различными вариантами усиления и расположением механических приборов и тензодатчиков сопротивления.

Первая буква русского алфавита – отражает величину осевого эксцентриситета (e_0) «А» - это стойки, которые испытываются как центрально-сжатые т.е. с приложением нагрузки по геометрической оси $e_0=0$. «Б» - стойки, испытанные с осевым эксцентриситетом $e_0=2\text{см}$; «В» - тоже при $e_0=4\text{см}$.

Вторые буквы русского алфавита обозначают вид эталонной стойки – короткой «К» или гибкой «Г».

Третья буква этого алфавита «У» означает, что образец имеет усиление.

Цифры рядом с буквой «Х» обозначают вариант поперечного армирования, а именно: (1) – хомуты шириной 50 мм с расстоянием между осями хомутов (шагом) 190мм; (2) – тоже с шагом 140мм; (3) – означает, что в середине высоты стойки установлен хомут шириной 240мм, а через стандартный зазор 140мм – вверх и вниз установлены хомуты по типу (1); (4) – в центре стойки установлен хомут шириной равной одной трети длины стойки. Далее до оголовков идут хомуты по типу (1); (5) – хомут в виде полного трёхслойного обертывания по всей высоте опытного образца или обойма. (6) – хомут по типу (1) с шагом в осях 115 мм;

Пятая буква – латинского алфавита означает наличие продольного углепластикового усиления стоек: «L» – с использованием ламинатов – (полос), шириной 50мм и толщиной 1,2мм; «R» – круглый стержень диаметром 8мм.

Прописные буквы рядом с латинской буквой «L» обозначают место расположения продольной композитной арматуры: (ц) – расположение с двух сторон – центральное сжатие; (с) – расположение полос на более сжатой грани бетона; (р) – тоже, на растянутой грани бетона.

Отметим при этом, что все опытные стойки, независимо от вида и вариантов усиления, рядом с металлическим оголовником имеют хомут, выполненный из трех слоев углеткани шириной 100мм. Он выполняет функцию торцевого анкера для продольной композитной арматуры. Использование анкера обосновано в работе [12].

Продольное и поперечное армирование всех опытных образцов принято одинаковым, поэтому в шифре они не отражены.

Результаты выполненных экспериментов приведены в табл. 1.

Таблица № 1

Этапы испытания по величине гибкости	Величина осевого эксцентрисита та	Конструкция усиления	Шифр опытных образцов	Опытные значения		
				Разрушаю щая нагрузка N, кН	Коэф. усиления k _{yc}	
1	2	3	4	5	6	
I Этап $\lambda_h = 10$	e ₀ =0	эталон	АК	1150	-	
		$\sigma=50; s=190$	АКУ-Х ₁	1190	1,02	
		$\sigma=50; s=190, 4L$	АКУ-Х ₁ L _ц	1100	0,96	
		$b=700$	АКУ-Х ₅	1625	1,482	
		$\sigma=50; s=115$	АКУ-Х ₆	1600	1,118	
		$\sigma=50; s=190, 4R$	АКУ-Х ₁ R _ц	1379	1,258	
	e ₀ =2	эталон	БК	592,5	-	
		$\sigma=50; s=190$	БКУ-Х ₁	778,9	1,326	
		$\sigma=50; s=145$	БКУ-Х ₂	794,7	1,307	
		$\sigma=50; s=145; 2L_{ц}$	БКУ-Х ₂ L _ц	800	1,263	
		$\sigma=50; s=190; 2L_p$	БКУ-Х ₁ L _p	700	1,128	
		$\sigma=700$	БКУ-Х ₅	844	1,33	
	e ₀ =4	эталон	ВК	422,2	-	
		$\sigma=50; s=190$	ВКУ-Х ₁	450	1,066	
		$\sigma=50; s=190; 2L_p$	ВКУ-Х ₁ L _p	530	1,255	
		$\sigma=240; s=190$	ВКУ-Х ₁ L _p	600,8	1,14	
	II Этап $\lambda_h = 20$	e ₀ =0	эталон	АГ	803	-
			$\sigma=50; s=190$	АГУ-Х ₁	873,2	1,11
$\sigma=240; s=190$			АГУ-Х ₂	900	1,239	
$b=1900$			АГУ-Х ₅	1080	1,487	
e ₀ =2		эталон	БГ	410	-	
		$\sigma=50; s=190$	БГУ-Х ₁	400	0,996	
		$\sigma=250; s=190$	БГУ-Х ₃	450	1,076	
		$\sigma=250; s=190; 2L_p$	БГУ-Х ₂ L _p	510	1,22	
		$\sigma=620; s=190; 2L_p$	БГУ-Х ₃ L _p	714,5	1,34	
		$\sigma=1900$	БГУ-Х ₅	597,5	1,518	
e ₀ =4		эталон	ВГ	242,5	-	
		$\sigma=50; s=190$	ВГУ-Х ₂	290,0	1,196	
		$\sigma=250; s=190; 2L_p$	ВГУ-Х ₂ L _p	503,5	2,486	
		$\sigma=620; s=190; 2L_p$	ВГУ-Х ₃ L _p	504,5	1,842	
		$\sigma=1900$	ВГУ-Х ₅	270	1,301	

Примечание: В столбце 6 коэффициент усиления (k_{yc}) указан с учетом приведения прочности бетона усиленных стоек к эталонным.

Прямое сопоставление результатов эксперимента для эталонных и усиленных образцов согласно табл. 1 позволяет сделать следующие выводы:

1. Эффективность усиления сжатых элементов с использованием композитных материалов зависит не только от вариантов усиления, но и от величины эксцентриситета

2. Поперечные хомуты из углеткани, расположенные с шагом, аналогичным шагу хомутов для стальной рабочей арматуры, практически, не оказывает влияние на увеличение прочности стоек независимо от величины эксцентриситета.

3. С уменьшением шага хомутов практически в два раза, прочность центрально сжатых элементов увеличивается на 12%.

4. Наибольший эффект показывают образцы, усиленные обоймой по всей длине стоек. Эта закономерность сохраняется при наличии малых эксцентриситетов, не выходящих за пределы ядрового сечения. С увеличением эксцентриситета ($e_0=4\text{см}$) коэффициент усиления обоймой снижается с 50 до 30%.

5. Локальное усиление стоек обоймой с шириной $1/3$ и более от длины стойки не приводит к увеличению их несущей способности по сравнению с эталоном, так как при указанном усилении, образцы разрушаются по бетону за пределами усиленного участка.

6. Продольное внешнее армирование центрально сжатых элементов ламинатами в дополнение к усилению хомутами не дает эффекта т.к. предельная сжимаемость углепластика горячего отверждения ниже, чем сжимаемость тяжелого бетона.

7. Вклеенные в сечение стоек углепластиковые стержни наоборот дают заметное приращение нагрузки, т.к. согласно опыту, композитные стержни работают совместно с бетоном вплоть до разрушения образца.

8. Продольное внешнее усиление ламинатами стоек с большим эксцентриситетом ($e_0=4\text{см}$), наоборот резко увеличивают их несущую способность более чем в 2 раза.

9. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости совершенствования имеющейся расчетной базы при усилении сжатых элементов.

Литература

1. Польской П.П., Маилян Д.Р. Композитные материалы - как основа эффективности в строительстве и реконструкции зданий и сооружений // Инженерный вестник Дона, 2012, №4 (часть 2)
URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1307
2. Польской П.П., Георгиев С.В. Вопросы исследования сжатых железобетонных элементов, усиленных различными видами композитных материалов // Инженерный вестник Дона, 2013, №4
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2134
3. В.А. Клевцов. Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами // НИИЖБ, 2006. 48с.
4. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1 // General rules and rules for buildings, 2004, p.229.
5. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures // ACI 440.2R-08. American Concrete Institute, 2008, p. 76.
6. Костенко А.Н. Прочность и деформативность центрально и внецентренно сжатых кирпичных и железобетонных колонн, усиленных угле- и стекловолокном // дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Москва, 2010. 244 с.
7. Хаютин Ю.Г., Чернявский В.Л., Аксельрод Е.З. Применение углепластиков для усиления строительных конструкций // Бетон и железобетон. 2003. №1. С. 25-29.

8. Чернявский В.А., Аксельрод Е.З. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами // Жилищное строительство, 2003, №3. С.15-16.
9. Польской П.П., Георгиев С.В. Характеристики материалов, используемых при исследовании коротких и гибких стоек, усиленных углепластиком // Научное обозрение. 2014. № 10, ч.2.. С. 411-414.
10. Маилян Д.Р., Польской П.П., Георгиев С.В. Методики усиления углепластиком и испытания коротких и гибких стоек // Научное обозрение, 2014, №10, ч.2. С.415-418.
11. Маилян Д. Р., Польской П. П., Георгиев С.В. Конструкция каркасов и схемы испытания опытных стоек, усиленных углепластиком // Научное обозрение. 2014, №10, ч.3. С.667-671.
12. Польской П.П., Маилян Д.Р. Влияние стального и композитного армирования на ширину раскрытия нормальных трещин // Инженерный вестник Дона, 2013, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1675

References

1. Pol'skoj P.P., Mailjan D.R. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №4/2 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1307
 2. Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2134
 3. V.A. Klevcov. Rukovodstvo po usileniju zhelezobetonnyh konstrukcij kompozitnymi materialami [Guide to strengthening reinforced concrete structures by composite materials]. NIIZhB, 2006, p.48
 4. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1. General rules and rules for buildings, 2004, p.229.
 5. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. ACI 440.2R-08. American Concrete Institute, 2008, p. 76.
-



6. Kostenko A.N. Prochnost' i deformativnost' central'no i vnecentrenno szhatyh kirpichnyh i zhelezobetonnyh kolonn, usilennyh ugle- i steklovoloknom. [The strength and deformability of the central and eccentrically compressed brick and reinforced concrete columns strengthened with carbon and fiberglass.] dis. ... kand. tehn. nauk: 05.23.01. Moskva, 2010. p.244.
7. Hajutin Ju.G., Chernjavskij V.L., Aksel'rod E.Z. Beton i zhelezobeton. 2003. №1. pp. 25-29.
8. Chernjavskij V.A., Aksel'rod E.Z. Zhilishhnoe stroitel'stvo. 2003 №3. pp.15-16.
9. Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Nauchnoe obozrenie. 2014. № 10/ 2. pp. 411-414.
10. Mailjan D.R., Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Nauchnoe obozrenie, 2014, №10/2, pp.415-418.
11. Mailjan D. R., Pol'skoj P. P., Georgiev S.V. Nauchnoe obozrenie. 2014, №10/3, pp.667-671.
12. Pol'skoj P.P., Mailjan D.R. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1675