

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-39-48

¹Меркулов С.И., ^{2,*}Есинов С.М., ²Есипова Д.В.¹Курский государственный университет²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: sk31.sm@gmail.com

КОМПОЗИТНЫЕ СИСТЕМЫ ВНЕШНЕГО АРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация. В статье рассмотрены конструктивные решения систем внешнего армирования железобетонных конструкций композитными материалами. Изучены схемы деформирования и разрушения конструкций при статическом изгибе. Обобщены полученные зависимости и закономерности совместной работы бетона и неметаллической арматуры. Приведены результаты экспериментальных исследований железобетонных конструкций нескольких авторов, проведено сопоставление, показавшее схожесть результатов эмпирических методов в подходах различных ученых. Показано, что на работу составной конструкции с внешним армированием существенное влияние оказывает наличие в момент усиления напряженно-деформированного состояния и силовых повреждений, а также их уровень относительно критических величин. Подтверждена гипотеза об изменении типичного характера разрушения конструкций, а именно – вследствие потери прочности на восприятие касательных напряжений зон контакта бетона и внешнего армирования. Показано, что работа бетона сжатой зоны в меньшей степени определяет несущую способность в усиленных конструкциях, нежели чем в неусиленных. Предложен новый способ оценки несущей способности путем введения понятия о предельных относительных деформациях клеевого шва в зоне контакта. Получена зависимость между прочностью зоны контакта и прочностью бетона усиливаемой конструкции.

Ключевые слова: внешнее армирование, железобетонные конструкции, композитные системы, сцепление.

Введение. В настоящее время накоплен определенный опыт применения строительных конструкций с внешним армированием композитами [1–6]. Внешнее армирование железобетонных конструкций композитами позволяет обеспечить неповреждаемость конструкции в агрессивной среде, а также решить задачи усиления конструкций без остановки основного производства. Для внешнего армирования железобетонных конструкций предпочтительно применять однонаправленные тканые композитные материалы. Внешнее армирование изгибаемых железобетонных конструкций создает сложную конструктивную систему, несущую способность которой определяют прочность бетона сжатой зоны, прочность арматуры растянутой зоны. Более сложная картина напряженного состояния конструкции получается, когда внешнее армирование применяется в комплексе с армированием конструкции стальной арматурой [7, 8]. Экспериментальные исследования в значительной степени касаются несущей способности изгибаемых железобетонных конструкций с внешним армированием композитным материалом, обусловленной прочностью сцепления композита с бетоном поверхности конструкции [9–13]. Также эффективность внешнего армирования железобетонных конструкций определяется прочностными и деформативными характеристиками композитных материалов. Система армирования создается на основе омоноличивания композитной

ткани полимерным связующим, образуя ламинаты. Сухая композитная ткань и ламинат, полученный на основе этой ткани, отличаются прочностными характеристиками, прочность на растяжение ламината до 1,4 раза выше прочности исходной композитной ткани [14].

Материалы и методы. В качестве опорных показателей сравнения были выбраны результаты экспериментально-теоретических исследований нескольких групп авторов [1–3]. Работы сгруппированы по принципу схожести расчетных схем неусиленных и усиленных конструкций, классов прочности бетона, схем армирования и материалов усиления. Класс бетона по прочности варьируется в интервале В15...В25, основное армирование – пространственные каркасы из арматуры класса А400 и А240, материалы усиления – ламинаты на основе углеродных волокон в эпоксидной матрице (производство как заводское под марками FibARM [1] и MBace BASF [2], так и самостоятельного изготовления [3]). Расчетные схемы – однопролетные балки с шарнирными опорами без консолей. Нагрузка – сосредоточенная в третях пролета. Сечения – прямоугольные с соотношением высота:ширина – 2:1. Сравнительные показатели усиления приведены в таблице 1.

В [1] выявлены характеры разрушения изгибаемых конструкций с внешним армированием. Разрушения образцов 1,2 произошло с отслоением внешнего армирования в середине пролета с

образованием нормальных трещин. В образцах 3-6 отслоение композитного материала внешнего армирования произошло в зоне образования наклонных трещин. Образец 7: внешнее армирование выполнялось при наличии нормальных

трещин в растянутой зоне, а разрушение сопровождалось отслоением композитного материала в зоне трещин.

Таблица 1

Схемы усиления изгибаемых железобетонных конструкций

№ схемы	Схема усиления образцов	Характер армирования	Прирост несущей способности на восприятие изгибающего момента, %
Исследования группы авторов [1]			
1		по нижней грани одним слоем шириной 50мм	136
2		по нижней грани одним слоем шириной 100мм	154
3		по нижней грани одним слоем шириной 150мм	185
4		по нижней грани двумя слоями шириной 150мм	188
5		по нижней грани с устройством анкеров	189
6		по нижней грани с выходом материала на боковые поверхности	219
7		по нижней грани при наличии нормальных трещин	159
Исследования группы авторов [2]			
8		по нижней грани одним слоем	164
9		по нижней грани с выходом материала на боковые поверхности	252
10		по нижней грани с выходом материала на боковые поверхности с устройством анкеров	284
11		по нижней грани с устройством анкеров	206
12		по нижней грани одним слоем, наклейка поверх слоя еще материала с выходом на боковые поверхности	240

В [2] выявлены схожие характеры разрушения изгибаемых конструкций с внешним армированием. Разрушение образца 8 произошло из-за

отслоения внешнего армирования в середине пролета с образованием нормальных трещин шириной раскрытия не выше предельных. В образцах

9–11 отслоение композитного материала элемента внешнего армирования произошло в зоне образования наклонных трещин, в образце 12 – комбинированный вариант.

Основная часть. Для решения задачи по проверке гипотез разрушения и получения опытных данных автором в объеме экспериментальных исследований предусмотрены испытания основных образцов – железобетонных балок, изготовленных из тяжёлого бетона класса по прочности В20. Поперечное сечение: $100 \times 150(h)$, пролет – 1300 мм. Расчетный пролет составил 1200 мм. Конструктивное решение образцов приведено на рисунке 1.

Образцы железобетонных балок были испытаны в 4 серии: Б-1, Б-2, Б-3, Б-4. В серию Б-1 вошли две балки-близнеца Б-1-1 и Б-1-2. Серия Б-1 являлась контрольной.

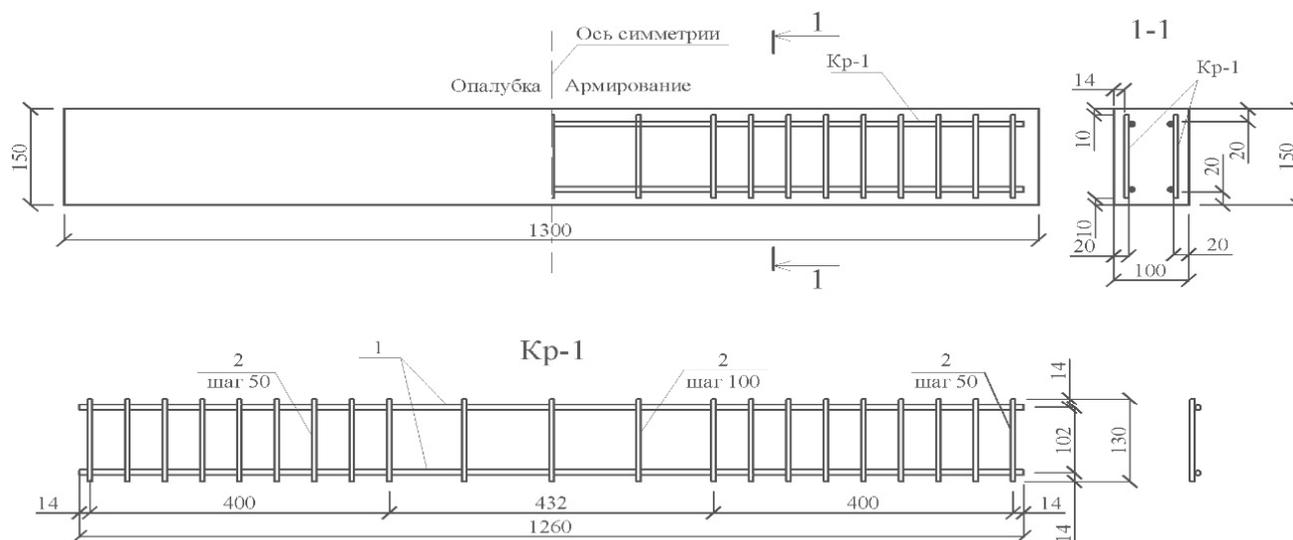
В серию Б-2 вошли две балки Б-2-1 и Б-2-2. Обе балки до испытаний были усилены внешним армированием из приклеенного к нижней грани однослойного композитного материала шириной 90 мм на основе углеродных волокон. На балке Б-2-2 были устроены торцевые хомуты шириной 120 мм из аналогичного композитного материала. На балке Б-2-1 хомутов нет.

В серию Б-3 вошли две балки Б3-1 и Б-3-2. Балка Б-3-1 была нагружена кратковременной

нагрузкой до величины изгибающего момента, равного 50 % от разрушающего для серии Б-1, после чего была полностью разгружена и усилена аналогично балке Б-2-2. Балка Б-3-2 была испытана аналогично, но с преднагружением величиной 70 % от разрушающего.

В серию Б-4 вошли две балки Б-4-1 и Б-4-2. Балка Б-4-1 была нагружена кратковременной нагрузкой до величины изгибающего момента, равного 50 % от разрушающего для серии Б-1, после чего была усилена под нагрузкой аналогично балке Б-2-2. Балка Б-4-2 была испытана аналогично, но усилена под нагрузкой величиной в 70 % от разрушающего.

Все образцы были нагружены кратковременной нагрузкой вплоть до разрушения. В качестве расчетной схемы была принята схема с однопролетным шарнирным опиранием по двум сторонам, с 2 равными сосредоточенными силами, равноудаленными от опор. Нагружение велось ступенями по 5% от разрушающей. На этапах, предшествующих разрушению, величина ступени снижалась до 2.5% для подробного рассмотрения НДС элементов. Время выдержки стабилизации на каждой ступени – 600 сек. Общий вид испытаний приведен на рисунке 2.



Спецификация арматуры

Марка изделия	Поз.	Наименование	Кол.	Масса 1 дет., кг	Масса изделия, кг
Кр-1	1	Ø8 А400, L=1260	2	0.995	1.601
	2	Ø6 А400, L=130	21	0.606	

Рис. 1. Опалубочные и арматурные чертежи образцов



Рис. 2. Общий вид проведения испытаний

Значения величин разрушающих изгибающих моментов приведены в таблице 1. Согласно полученным данным для серий Б-2, Б-3, Б-4 свойственно повышение несущей способности по из-

гибающему моменту по сравнению с Б-1. Под величиной $M_{\text{разр}}$ в таблице 1 обозначается величина предельного изгибающего момента образца без усиления, под величиной $M_{\text{разр}}^f$ – то же, усиленного образца.

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований

Серия	Маркировка образца	$M_{\text{разр}}$, кН·м	$M_{\text{разр}}^f$, кН·м	$\frac{M_{\text{разр}}^f}{M_{\text{разр}}}$	Характер разрушения
Б-1	Б-1-1	7,12	-	-	По нормальным сечениям в зоне чистого изгиба
	Б-1-2	7,19	-	-	
Б-2	Б-2-1	-	10,02	140%	Отслоение композита с разрушением защитного слоя бетона
	Б-2-2	-	11,63	163%	Разрыв композита в приопорной зоне, раздробление бетона сжатой зоны
Б-3	Б-3-1	-	9,54	134%	Разрыв части волокон композита в приопорной зоне с частичным разрушением защитного слоя бетона.
	Б-3-2	-	8,64	121%	
Б-4	Б-4-1	-	9,2	129%	Проскальзывание композита под анкером
	Б-4-2	-	8,64	121%	Отслоение композита с разрушением защитного слоя бетона

Было установлено следующее:

- Для образцов серии Б-2 характерно увеличение угла наклона к оси абсцисс диаграммы по сравнению с серией Б-1 вследствие повышения изгибной жесткости образца. Перелом диаграммы при появлении нормальных трещин находится на диаграмме выше, чем для образцов серии Б-1. При изгибающем моменте, равном $M=8.64$ кН·м происходит перелом диаграммы, соответствующий началу разрушения защитного слоя бетона и свидетельствующий о начале пластической стадии работы контактной зоны «композит-бетон» [15, 16]. Образец Б-2-1 разрушается вследствие отслоения композита с разрушением

защитного слоя бетона по касательным площадкам. Диаграмма приведена на рисунке 3.

- В образце Б-2-2 к моменту разрушения образца Б-2-1 защитный слой бетона разрушился, адгезия между бетоном и композитом практически нулевая, растянутая зона воспринимает усилия только за счет внешней арматуры, которая анкеруется в торцевых хомутах. Разрушение происходит за счет потери прочности композита на растяжение. Авторы отмечают положительное влияние хомутов, обеспечивающих более полное использование прочности композита на растяжение. Образец Б-2-2 после разрушения представлен на рисунке 4.

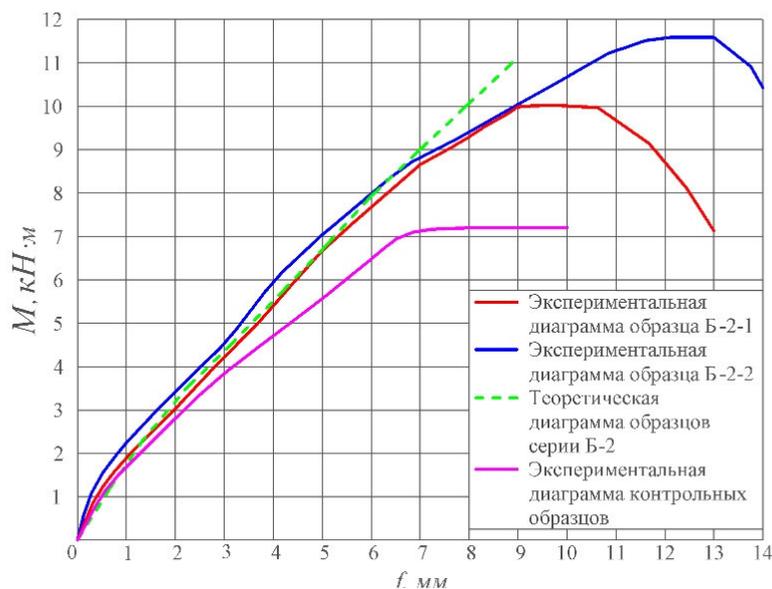


Рис. 3. Зависимость «момент – прогиб» серии Б-2

- Образцы серии Б-3 работают под нагрузкой не аналогично серии Б-2 (за исключением предельных моментов) - сказывается разница в величине предварительного нагружения. Чем ближе был образец к разрушению до разгрузки и усиления, тем меньший эффект дает усиление. Диаграмма образца Б-3-1 после усиления схожа с диаграммой образцов серии Б-2: видно, что диаграмма усиленного образца лежит выше диаграммы контрольного образца и имеет больший угол наклона к оси прогибов. Диаграмма образца Б-3-2 мало отлична от контрольной. Виден лишь прирост несущей способности, деформативность

осталась на прежнем уровне. До величины изгибающего момента $M=7,5...8$ кН·м внешнее армирование и бетон работают совместно.

- Образцы серии Б-4 демонстрируют те же закономерности, что и образцы серии Б-3. Если у диаграммы образца Б-4-1 заметен излом и уменьшение деформативности после стадии усиления при нагрузке, равной 50 % от разрушающей, вплоть до разрушения, то диаграмма образца Б-4-2 после усиления при нагрузке, равной 70 % от разрушающей повторяет диаграмму контрольных образцов.



Рис. 4. Характерное разрушение образца Б-2-2

Отслоение внешнего армирования начинается после образования критической нормальной трещины в защитном слое бетона. Взаимное горизонтальное и вертикальное смещение берегов трещин способствует отслоению [17].

Трещина проходит по нормали защитный слой бетона до нижней растянутой стальной арматуры и поворачивает в горизонтальной плоскости в направлении опор и наклонных трещин. Величина раскрытия критической трещины при

старте отслоения составила 0,16–0,17 мм. Аналитически [18–20] легко выявить точку излома диаграмм для образцов серий Б-2, Б-3, соответствующую значению изгибающего момента 7,5 кНм. При моменте, превышающем указанную величину, нарастание величины раскрытия трещин ускоряется на 15 % для серии Б-2 и на 5 % для серии Б-3.

По данным, полученным в ходе экспериментальных исследований, определены характерные точки излома «реальной» диаграммы. Установлено, что работа клеевого соединения на сдвиг носит упругий характер вплоть до достижения предельных величин касательных напряжений, после чего зависимость характеризуется ниспадающей ветвью. На рисунке 5 изображена зависимость $\tau - \varepsilon$ для клеевого соединения, определенная по экспериментальным данным.

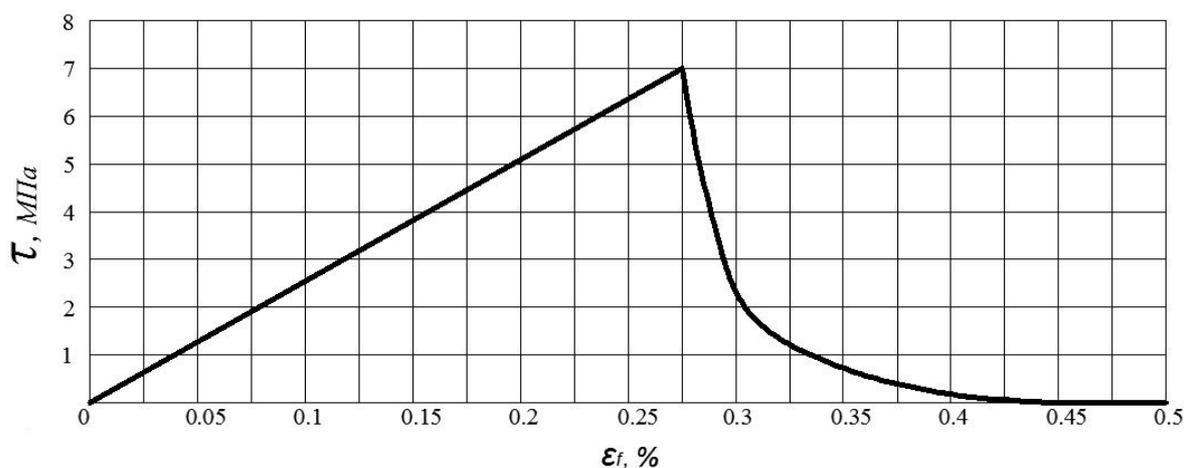


Рис. 5. Предлагаемая зависимость $\tau - \varepsilon$ в контактном шве «композит-бетон» для бетона класса В20 и $n \cdot t_f \cdot E_f = 39300 \text{ Н / мм}$

Выводы

1. Разрушение усиленных конструкций происходило вследствие нарушения совместной работы элементов усиления с бетоном конструкций. При усилении ненагруженных конструкций увеличение несущей способности составляет от 40 % (без анкеров) до 63 % (с анкерами). При усилении конструкций, разгруженных после приложения нагрузки прирост несущей способности составляет 21–34 %. При усилении под нагрузкой прирост составляет 21–29 %. Усиление на проектных стадиях работы изменяет расчетную схему, при которой конструкция работает как балка с затяжкой.

2. Форма разрушения усиленных конструкций – потеря сцепления между бетоном и внешним армированием при достижении предельных деформаций. Это подтверждается опытом других исследователей.

3. Установлено, что усиление уменьшает деформативность изгибаемых конструкций вследствие увеличения изгибной жесткости при

Обобщая результаты испытаний авторов с результатами экспериментальных исследований [1–6], была получена обобщенная формула предельных касательных напряжений в зоне контакта:

$$\tau_{u,ult} = 2,7 \cdot R_b^{0.3} \quad (1)$$

Определена величина предельных относительных деформаций внешней арматуры, при которой проявляется процесс отслоения внешнего армирования от поверхности бетона, установлено, что она практически не зависит от класса бетона и продольной жесткости композита [17–18]:

$$\varepsilon_{u,ult} = 0,0028 \div 0,003 \quad (2)$$

нагрузках до 70 % от разрушающих и вследствие изменения расчетной схемы при нагрузках свыше 70 % соответственно. Усиление ненагруженных образцов вызывает снижение прогибов на 30 %, разгруженных после приложения нагрузки – на 10–11 %, усиленных под нагрузкой – на 20–28 %. При наличии воздействия на усиленную конструкцию нагрузки, величина которой превышает 70 % от разрушающей, внешнее армирование практически не влияет на деформативность.

4. Наличие композитных анкерных устройств на торцах повышает их несущую способность на 16,4 % и позволяет реализовать рост несущей способности за счет изменения расчетной схемы.

5. Получены апробированные выражения определения предельных напряжений и деформаций в контактной зоне, являющиеся критерием разрушения усиленных конструкций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бокарев С.А., Смердов Д.Н. Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами // Известия вузов. Строительство. 2010. №2. С. 112–124.
2. Неровных А.А. Совершенствование методики оценки грузоподъемности железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов, усиленных композитными материалами: Авт. реф. дис. ...канд. техн. наук. Новосибирск. 2013. 24 с.
3. Меркулов С.И., Есипов С.М. Увеличение несущей способности железобетонных конструкций усилением внешним армированием композитным материалом // Бюллетень строительной техники. 2018. №2. С. 56–57.
4. Alferjani M.B.S., Abdul Samad A.A., Blkasem S. Elrawaff, N. Mohamad, M. Hilton. Shear strengthening of reinforced concrete beams using carbon fiber reinforced polymer laminate: A review // American Journal of Civil Engineering. 2014. 2(1). Pp. 1–7. doi:10.11648/J.AJCE.20140201.11
5. Lu X.Z., Teng J.G., Ye L.P., Jiang J.J. Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete // Engineering Structures. 2005. Vol. 27. Issue 6. Pp. 920–937. doi:10.1016/j.engstruct.2005.01.014
6. Смердов Д.Н., Клементьев А.О. Расчет по прочности сечений, нормальных к продольной оси изгибаемых железобетонных элементов с комбинированным армированием металлической и полимерной композиционной арматурой, с использованием нелинейной деформационной модели материалов // Интернет-журнал "Науковедение". 2017. № 1. С. 1–8.
7. Лесовик Р.В., Ключев С.В. Расчет усиления железобетонных колонн углеродной тканью // Инновационные материалы технологии; сборник докладов Международной научно-практической конференции: Белгород, 11-12 октября 2011 г. / Белгор. гос. технол. ун-т, Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. Ч. 2. С. 3–5
8. Римшин В.И., Меркулов С.И. Элементы теории развития бетонных конструкций с металлической композитной арматурой // Промышленное и гражданское строительство. 2015. №5. С. 38–42.
9. Невский А.В. Прочность сжатых углеродофибробетонных элементов с углекомпозитным стержневым и внешним армированием при кратковременном динамическом нагружении: дис. ...канд. техн. наук : 05.23.01 / Невский Андрей Валерьевич. Томск, 2018. 210 с.
10. Морозов В.И., Юшин А.В., Хегай А.О. Анализ напряженно-деформированного состояния двухпролетных железобетонных балок, усиленных фиброармированными пластиками по наклонному сечению // В сборнике: Современные проблемы расчета железобетонных конструкций, зданий и сооружений на аварийные воздействия. Под редакцией А.Г. Тамразяна, Д.Г. Копаницы. 2016. С. 282–286.
11. Меркулов С.И., Есипов С.М., Есипова Д.В. Экспериментальные исследования трещинообразования железобетонных балок, усиленных композитными материалами // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2019. № 3 (137). С. 102–107.
12. Меркулов С.И., Есипов С.М. Использование тканых композитов для восстановления строительных конструкций // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2019. № 3 (381). С. 256–259.
13. Ali-Ahmad, M.K., Subramaniam K.V., Ghosn M. Analysis of scaling and instability in FRP-concrete shear debonding for beam-strengthening applications // Journal of Engineering Mechanics. 2007. Pp. 58–65. doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(2007)133:1(58)
14. Nakaba K., Kanakubo T., Furuta T., Yoshizawa H. Bond Behavior between Fiber-Reinforced Polymer Laminates and Concrete // ACI Structural Journal. 2020. Vol. 98, No. 3. Pp. 1–9. doi:10.14359/10224
15. Spyrakos C.C., Raftoyiannis I.G., Credali L. and Ussia J. Experimental and Analytical Study on Reinforced Concrete Beams in Bending Strengthened with FRP // The Open Construction and Building Technology Journal. 2014. 8. Pp. 153–163. doi:10.2174/1874836801408010153
16. Krishan A., Troshkina E., Rimshin V. Experimental research of the strength of compressed concrete filled steel tube elements // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1116 AISC. Pp. 560–566. doi:10.1007/978-3-030-37919-3_56
17. Kuzina E., Rimshin V. Strengthening of concrete beams with the use of carbon fiber // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Vol. 983. Pp. 911–919. doi:10.1007/978-3-030-19868-8_90
18. Krishan A.L., Narkevich M.Yu., Sagadatov A.I., Rimshin V.I. The strength of short compressed concrete elements in a fiberglass shell // Magazine of Civil Engineering. 2020. Vol. 2 (94). Pp. 3–10. doi:10.18720/MCE.94.1
19. Trekin N.N., Kodysh E.N., Shmakov S.D., Terekhov I.A., Kudyakov K.L. Determination of the criteria of deformation in a special limiting state // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Vol. 17. Issue 1. Pp.

108–116. doi:10.22337/2587-9618-2021-17-1-108-116

20. Fediuk R.S., Lesovik V.S., Liseitsev Yu.L., Timokhin R.A., Bituyev A.V., Zaiakhanov M.Ye.,

Mochalov A.V. Composite binders for concretes with improved shock resistance // Magazine of Civil Engineering. 2019. Vol. 1 (85). Pp. 28–38. doi:10.17213/0321-2653-2018-4-85-91

Информация об авторах

Меркулов Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленного и гражданского строительства. E-mail: mersi.dom@yandex.ru. Курский государственный университет. Россия, 305000, Курск, ул. Радищева, д. 33.

Есипов Станислав Максимович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: sk31.sm@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Есипова Диана Васильевна, аспирант кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: diana.gridiakina@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 31.10.2021 г.

© Меркулов С.И., Есипов С.М., Есипова Д.В., 2022

¹Merkulov S.I., ^{2,*}Esipov S.M., ²Esipova D.V.

¹Kursk State University

²Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov

*E-mail: sk31.sm@gmail.com

COMPOSITE SYSTEMS FOR EXTERNAL REINFORCEMENT OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Abstract. The article considers structural solutions for external reinforcement systems of reinforced concrete structures with composite materials. Schemes of deformation and destruction of structures under static bending are studied. The obtained dependences and laws of joint operation of concrete and nonmetallic reinforcement are generalized. The results of experimental studies of reinforced concrete structures by several authors are presented, and a comparison is made that shows the similarity of the results of empirical methods in the approaches of various scientists. It is shown that the operation of a composite structure with external reinforcement is significantly affected by the presence of stress-strain state and force damage at the time of reinforcement, as well as their level relative to critical values. The hypothesis of a change in the typical nature of structural failure, namely, due to the loss of strength to perceive tangential stresses of the contact zones of concrete and external reinforcement, is confirmed. It is shown that the work of concrete in the compressed zone determines the load-bearing capacity in reinforced structures to a lesser extent than in non-reinforced ones. A new method for estimating the load-bearing capacity is proposed by introducing the concept of limiting relative deformations of the adhesive joint in the contact zone. The relationship between the strength of the contact zone and the strength of the reinforced concrete structure is obtained.

Keywords: external reinforcement, reinforced concrete structures, composite systems, coupling.

REFERENCES

1. Bokarev S.A., Smerdov D.N. Experimental studies of bent reinforced concrete elements reinforced with composite materials [Eksperimentalnye issledovaniya izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov, usilennykh kompozitnymi materialami]. News of higher educational institutions. Construction. 2010. No. 2. Pp. 112–124. (rus)
2. Nerovnyh A.A. Improving the methodology for assessing the carrying capacity of reinforced concrete spans of railway bridges, reinforced composite materials. Extended abstract of candidate's thesis. Novosibirsk, 2013. 24 p. (rus)
3. Merkulov S.I., Esipov S.M. Increasing the bearing capacity of reinforced concrete structures by strengthening external reinforcement with composite material [Uvelichenie nesushchej sposobnosti zhelezobetonnykh konstrukcij usileniem vneshnim armiromaniem kompozitnym materialom]. Byulleten stroitelnoj tehniki. 2018. No. 2. Pp. 56–57. (rus)
4. Alferjani M.B.S., Abdul Samad A.A., Blkasem S. Elrawaff, N. Mohamad, M. Hilton. Shear strengthening of reinforced concrete beams using carbon fiber reinforced polymer laminate: A review. American Journal of Civil Engineering. 2014. 2(1). Pp. 1–7. doi:10.11648/J.AJCE.20140201.11

5. Lu X.Z., Teng J.G., Ye L.P., Jiang J.J. Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete. *Engineering Structures*. 2005. Vol. 27, issue 6. Pp. 920–937. doi:10.1016/j.engstruct.2005.01.014
6. Smerdov D.N., Klementiev A.O. The calculation of the strength of the cross-sections normal to the longitudinal axis of bendable concrete elements with combined reinforcement in metal and polymer composite fittings, using a nonlinear deformation model of the material [Расчет по прочности сечений, нормальных к продольной оси изгибаемых железобетонных элементов с комбинированным армированием металлической и полимерной композиционной арматурой, с использованием нелинейной деформационной модели материалов]. Online magazine "SCI-ENCE STUDIES". 2017. Vol. 9. No.1. Pp. 1–8. (rus)
7. Lesovik R.V., Klyuev S.V. Calculation of reinforcement of reinforced concrete columns with carbon fabric [Расчет усиления железобетонных колонн углеродной тканью]. *Innovacionnye materialy i tekhnologii; sbornik докладов Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Belgorodskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet*. 2011. Part 2. Pp. 3–5. (rus)
8. Rimshin V.I., Merkulov S.I. Elements of the theory of development of concrete structures with nonmetallic composite reinforcement [Elementy teorii razvitiya betonnyh konstrukcij s nemetallicheskoy kompozitnoj armaturoj]. *Industrial and Civil Engineering*. 2015. No. 5. Pp. 38–42. (rus)
9. Nevsky A.V. Strength of compressed carbon fiber concrete elements with carbon composite core and external reinforcement under short-term dynamic loading [Prochnost szhatyh uglerodofibrobetonnyh elementov s uglekompozitnym sterzhnevym i vneshnim armirovaniem pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhenii]. Extended abstract of candidate's thesis. Tomsk, 2018. 210 p. (rus)
10. Morozov V.I., Yushin A.V., Khegai A. O. Analysis of the stress-strain state of two-span reinforced concrete beams reinforced with fiber-reinforced plastics along the inclined section [Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya dvuhproletnyh zhelezobetonnyh balok, usilennyh fibroarmirovannymi plastikami po naklonnomu sечениyu]. *Sovremennye problemy rascheta zhelezobetonnyh konstrukcij, zdaniy i sooruzhenij na avarijnye vozdejstviya*. 2016. Pp. 282–286. (rus)
11. Merkulov S.I., Esipov S.M., Esipova D.V., Experimental studies of crack formation in reinforced concrete beams reinforced with composite materials [Eksperimentalnye issledovaniya treshchinoobrazovaniya zhelezobetonnyh balok, usilennyh kompozitnymi materialami]. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2019. No. 3 (137). Pp. 102–107. (rus)
12. Merkulov S.I., Esipov S.M. Use of woven composites for restoration of building structures [Ispolzovanie tkanyh kompozitov dlya vostanovleniya stroitelnyh konstrukcij]. *News of higher educational institutions. Technology of the textile industry*. 2019. No. 3 (381). Pp. 256–259. (rus)
13. Ali-Ahmad M.K., Subramaniam K.V., Ghosn M. Analysis of scaling and instability in FRP-concrete shear debonding for beam-strengthening applications. *Journal of Engineering Mechanics*. 2007. Pp. 58–65. doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(2007)133:1(58)
14. Nakaba K., Kanakubo T., Furuta T., Yoshizawa H. Bond Behavior between Fiber-Reinforced Polymer Laminates and Concrete. *ACI Structural* 2020. Vol. 98. No. 3. Pp. 1–9. doi:10.14359/10224
15. Spyrakos 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. 8. Pp. 153–163. doi:10.2174/1874836801408010153
16. Krishan A., Troshkina E., Rimshin V. Experimental research of the strength of compressed concrete filled steel tube elements. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 1116 AISC. Pp. 560–566. doi:10.1007/978-3-030-37919-3_56
17. Kuzina E., Rimshin V. Strengthening of concrete beams with the use of carbon fiber. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Vol. 983. Pp. 911–919. doi:10.1007/978-3-030-19868-8_90
18. Krishan A.L., Narkevich M.Yu., Sagadatov A.I., Rimshin V.I. The strength of short compressed concrete elements in a fiberglass shell. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. Vol. 2 (94). Pp. 3–10. doi:10.18720/MCE.94.1
19. Trekin N.N., Kodysh E.N., Shmakov S.D., Terekhov I.A., Kudyakov K.L. Determination of the criteria of deformation in a special limiting state. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021. Vol. 17. Issue 1. Pp. 108–116. doi:10.22337/2587-9618-2021-17-1-108-116
20. Fediuk R.S., Lesovik V.S., Liseitsev Yu.L., Timokhin R.A., Bituyev A.V., Zaiakhanov M.Ye., Mochalov A.V. Composite binders for concretes with improved shock resistance. *Magazine of Civil Engineering*. 2019. Vol. 1 (85). Pp. 28–38. doi:10.17213/0321-2653-2018-4-85-91

Information about the authors

Merkulov, Sergei I. Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: mersi.dom@yandex.ru. KypKursk State University. Russia, 305000, Kursk, st. Radishcheva, 33.

Esipov, Stanislav M. PhD, Associate Professor. E-mail: sk31.sm@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Esipova, Diana V. Post-graduate student. E-mail: diana.gridiakina@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Received 31.10.2021

Для цитирования:

Меркулов С.И., Есипов С.М., Есипова Д.В. Композитные системы внешнего армирования железобетонных конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 4. С. 39–48. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-39-48

For citation:

Merkulov S.I., Esipov S.M., Esipova D.V. Composite systems for external reinforcement of reinforced concrete structures. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 4. Pp. 39–48. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-39-48