

О влиянии модуля упругости композитных материалов на прочность и деформативные свойства усиленных конструкций.

П.П. Польской¹, Н.В. Василенко¹, З.А. Меретуков²

¹ *Донской государственный технический университет*

² *Майкопский государственный технологический институт*

Аннотация: Выполнено сопоставление прочности, деформативности и ширины раскрытия нормальных трещин опытных образцов длиной 220, сечением 12,5x25 (h) см, усиленных композитными холстами и ламинатами разной площади сечения, изготовленных на основе стекло- и углепластиков. Образцы имели рабочую арматуру, представленную 2Ø14A600, поперечную – двухсрезными хомутами Ø5B500, установленными с шагом 100 мм. Образцы загружались двумя сосредоточенными силами, приложенными в третях пролета. При композитном усилении варьировались вид внешней композитной арматуры, а также наличие или отсутствие U-образных анкерующих хомутов, наклеенных на приопорных участках балок. Установлено, что наибольший эффект усиления дают композитные материалы на основе углеродных волокон, у которых модуль упругости сопоставим с модулем упругости стали.

Ключевые слова: бетон, железобетон, изгибаемый элемент, композит, стеклопластик, углепластик, прочность, деформативность.

На кафедре железобетонных и каменных конструкций ДГТУ продолжают комплексные исследования, направленные на совершенствование инновационных технологий. В их числе исследования, связанные с применением центрифугированных [1,2] и высокопрочных бетонов [3,4], а также исследования, связанные с совершенствованием существующих [5,6] и инновационных технологий при усилении строительных конструкций. Последние исследования связаны с разработкой теории и практики усиления конструкций с использованием композитных материалов. Этим исследованиям посвящены работы [7-9]. Данная статья посвящена вопросам сравнения эффективности различных видов внешней композитной арматуры, используемой при усилении железобетонных конструкций на действие изгибающих моментов.

За основу взяты результаты испытания изгибаемых элементов, усиленных внешней стекло- и углепластиковой арматурой [10]. Опытные балки прямоугольного профиля с проектным классом бетона по прочности на

сжатие В35-40 имели одинаковую длину 220 см и сечение 12,5x25 (h) см. Внутренняя стальная рабочая, монтажная и поперечная арматура также были одинаковыми. Продольная арматура – представлена 2Ø14А600 ($\mu_s=1,12\%$), у которой площадка текучести отсутствует, а монтажная – 2Ø6В500. Поперечная арматура состояла из замкнутых хомутов Ø6В500, установленных с шагом 100 мм на приопорных участках и 150 – в зоне чистого изгиба.

Всего к сопоставлению было принято 12 опытных образцов, в том числе 2 эталонных, 4 усиленных стеклопластиком на основе ткани толщиной 0,255 мм, 2 образцов, усиленных углетканью толщиной 0,166 мм и 4 образцов, усиленных углеламинатами, 2 из которых имели анкерные устройства (хомуты) на приопорных участках.

Согласно программы исследований, опытные образцы были усилены холстами, состоящими из трех или шести слоев соответственно стеклоткани марки EWR400; углеткани – MBRACE® FIB CF 230/4900.300g/5.50m и углеламинатов MBRACE® LAM CF210/2800.50x1.4.100m, состоящими из одной или двух полос.

По результатам испытания образцов-восьмерок, временное сопротивление $\sigma_{fu}=R_{fn}$, составила 732,6 МПа для холстов, состоящих из трех слоев стеклоткани и 679,5 МПа – для шестислойных холстов. Нормативное сопротивление холстов из углеткани составило соответственно 2887,9 и 2751,0 МПа, а для углеламинатов толщиной 1,4 мм и шириной 50 мм – 2800 МПа. Модуль упругости стеклоткани $E_{fg}=7,6 \cdot 10^4$ МПа, углеткани – $E_{fc}=2,3 \cdot 10^5$ МПа, а углеламината – $E_{fL}=2,1 \cdot 10^5$ МПа.

Усиление образцов композитными материалами осуществлялось по системе MBRACE®: – подготовка поверхности бетона; грунтовка; шпатлевка (при необходимости) и наклеивание композитного материала.

Опытные образцы испытывались по схеме однопролетных свободно опертых балок до момента их разрушения ступенчатой кратковременной нагрузкой, передаваемой через траверсу в виде двух сосредоточенных симметрично расположенных сил. Расчетный пролет балок составлял 180 см, а величина пролета среза – 60 см. Загружение осуществлялось интенсивностью 4, 6 и 8 кН, что составляло приблизительно 1/20 и 1/10 часть от расчетных значений предельной нагрузки соответственно до и после образования трещин.

Результаты испытаний по прочности, деформативности и ширине раскрытия наклонных трещин опытных образцов, а также оценка влияния вида композитных материалов на несущую способность опытных образцов представлены в табл. 1 и 2.

По результатам анализа опытных данных можно отметить факт существенного влияния вида композитного материала на несущую способность опытных образцов, которое проявилось на всех этапах нагружения, начиная от характера развития трещин, общей деформативности и прочности. Конкретно можно отметить следующее:

Трещиностойкость эталонных опытных образцов, с высокопрочной стальной арматурой класса А600 оказалась практически одинаковой с опытными образцами, имеющими рабочую арматуру класса А500 и практически вдвое меньшую площадь сечения. Вместе с тем, количество нормальных трещин оказалось больше в тех балках, где и площадь арматуры, и ее прочность были больше. Иным был и характер развития этих трещин.

На характер развития нормальных и наклонных трещин оказывает влияние не только вид композитного материала, но и его площадь сечения. По сравнению с эталонными балками, количество нормальных трещин также увеличилось, особенно в опытных образцах, усиленных холстами из стеклоткани. Особенностью опытных образцов, усиленных стеклопластиком,

является то, что именно в таких балках происходило в уровне верха рабочей арматуры раздвоение ранее появившихся нормальных трещин.

Нормальные трещины образовывались не только в зоне чистого изгиба, но и на приопорных участках. При этом, в балках, усиленных стеклотканью, нормальные трещины распространялись почти до середины приопорного участка, а усиленных углетканью – до 2/3 расстояния от оси приложения нагрузки до оси опорной реакции.

Таблица 1

Результаты испытания опытных балок по ширине раскрытия нормальных трещин

Серия балок по виду композитной арматуры	Шифр балок	Площадь композитной арматуры $A_f, \text{см}^2$	Нагрузка N_i^{exp} , кН, воспринимаемая балкой при ширине раскрытия нормальных трещин $a_{\text{срс}}, \text{мм}$				
			0,05	0,1	0,2	0,25	0,3
1	2	3	4	5	6	7	8
А Эталон	Б-2-1	-	14,0	28,0	49,5	57,8	66,4
	Б-2-2	-	12,5	32,5	51,0	59,2	68,5
Б Стеклоткань	БУg-2-1	0,765	14,0	33,0	56,0	68,1	79,0
	БУg-2-2	1,53	15,0	35,0	60,0	74,0	92,0
	БУg-2-3	1,53	15,0	35,0	62,7	73,1	86,3
	БУg-2-4	1,53	15,0	36,6	64,5	98,5	-
В Углеткань	БУс-2-1	0,622	25,0	44,5	90,0	-	-
	БУс-2-2	1,245	27,8	45,5	133,5	-	-
Б Углеламинат	БУЛ-2-1	0,7	23,6	43,0	107,5	-	-
	БУЛ-2-2	1,4	24,5	45,0	-	-	-
Д Углеламинат +анкер	БУЛ*-2-1	0,7	27,5	50,5	120,0	-	-
	БУЛ*-2-2	1,4	30,5	51,0	-	-	-

Важно отметить и тот факт, что при одинаковых этапах загрузки по количеству и интенсивности усиленные балки имели большее развитие по высоте, чем эталонные. При этом, в балках, усиленных углепластиком, высота трещин была больше чем для стеклопластика.

Влияние вида композитного материала на прочность определялось прямым сопоставлением результатов эксперимента для эталонных и усиленных образцов. При этом было установлено существенное влияние площади внешнего композитного усиления на прочность нормальных сечений. Отметим также, что величина приращения прочности балок, усиленных углепластиком, в большей степени зависит от прочности и процента стального армирования опытных образцов, по сравнению с балками, аналогично усиленными стеклопластиком.

Таблица 2

Результаты испытания опытных балок по прочности

Серия балок по виду композитной арматуры	Шифр балок	Площадь композитной арматуры A_f , см ²	Опытная прочность балок N_s^{exp} , N_f^{exp} , кН	Макс. приращение несущей способности $\frac{N_f^{\text{exp}}}{N_s^{\text{exp}}}$, %	Нагрузка N_{ult}^{exp} при предельно допустимом прогибе $f_{ult} = \frac{l_0}{200}$, кН	Приращение предельно допустимой нагр. $\frac{N_{ult}^{\text{exp}}}{N_s^{\text{exp}}}$, %
1	2	3	4	5	6	7
А Эталон	Б-2-1	-	125,2	-	111,0	-
	Б-2-2	-	124,6	-	110,0	-
Б Стеклоткань	БУg-2-1	0,765	140,0	12,1	113,5	2,7
	БУg-2-2	1,53	151,0	20,9	116,0	4,97
	БУg-2-3	1,53	148,3	18,7	113,0	2,26
	БУg-2-4	1,53	155,8	24,7	116,0	4,9
В Углеткань	БУс-2-1	0,622	140,8	18,5	131,0	18,55
	БУс-2-2	1,245	134,0	7,3	131,0	18,55
Г углеламинат	БУЛ-2-1	0,7	133,7	7,04	127,0	14,9
	БУЛ-2-2	1,4	128,0	2,48	128,0	15,84
Д Углеламинат + анкер	БУЛ*-2-1	0,7	166,0	32,9	132,5	19,9
	БУЛ*-2-2	1,4	206,0	64,9	150,0	35,75

Примечание: символом N_s^{exp} и N_f^{exp} обозначена величина опытной нагрузки, приложенной на траверсу, соответственно при испытании эталонной или усиленной балки.

Балки, переармированные композитным материалом, приводят практически к нулевому эффекту усиления, особенно в балках, усиленных углепластиком, если отсутствует надежная анкеровка композитной арматуры у опоры. Все вышеизложенное хорошо прослеживается в табл. 1.

Деформативность опытных образцов также находится в прямой зависимости, как от класса и площади стальной арматуры, так и вида, и площади сечения композитных материалов. Сравнение прогибов эталонных балок показывает, что они примерно на 20% меньше в элементах, армированных сталью А600, по сравнению с балками с рабочей арматурой класса А500.

Деформативность балок, усиленных тканью на основе стекловолокна, практически не отличается от эталонных образцов, независимо от класса и площади сечения стальной арматуры. Балки, усиленные разными видами углепластика (холсты из углеткани и углеламинаты) показали резкое уменьшение деформации по сравнению с эталонными образцами, независимо от класса стальной арматуры. Эффект уменьшения деформаций тем больше, чем выше модуль упругости композитных материалов на основе углеродных волокон.

Опытами установлено также, что наличие U-образных хомутов у опоры на торцах композитной арматуры резко уменьшает деформативность опытных образцов, при одновременном увеличении их прочности. Важно отметить и тот факт, что приращение прочности образцов с анкерами увеличивается вместе с ростом площади сечения композитной арматуры.

Ширина раскрытия нормальных трещин также находится в прямой зависимости от вида композитного усиления, что хорошо прослеживается по табл. 2. В дополнение отметим лишь следующее. Раскрытие трещин в балках, усиленных стеклопластиком, незначительно отличается от ширины трещин

эталонных образцов во всем диапазоне действующих нагрузок. Увеличение площади сечения композитных холстов также сказывается незначительно.

Балки, усиленные холстами из углеткани и углеламинатами имеют значительно меньшее раскрытие нормальных трещин при одинаковых нагрузках. Важно подчеркнуть и тот факт, что ширина раскрытия трещин в балках, усиленных углепластиком в наших опытах не превысила перед разрушением значения, равного 0,2 мм.

Отметим также, что балки при ширине раскрытия трещин – 0,2 мм, имеющие одинаковое продольное усиление в сочетании с U-образными хомутами, превысили разрушающую нагрузку эталонных образцов в 2,39 раза.

Проведенный анализ показывает, что эффективность композитного усиления в большей степени зависит от модуля упругости композитного материала, по сравнению с влиянием его прочности. Поэтому, предпочтение при усилении железобетонных конструкций следует отдавать композитным материалам на основе углепластика, модуль упругости которых равен, либо несколько превышает модуль упругости стали.

С учетом вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что характер трещинообразования и развития нормальных трещин, а также вид разрушения опытных образцов и их деформативность находятся в прямой зависимости от вида и процентов армирования стальной и композитной арматурой.

2. Повышение жесткости холстов из композитного материала и процентов композитного армирования способствуют уменьшению деформативности опытных образцов вне зависимости от вида композитного материала. Вместе с тем, степень уменьшения прогибов повышается при использовании более упругих композитных материалов.

3. Наибольший эффект при усилении балок, включая и перearмированное сечение, показывают образцы, имеющие U-образные торцовые анкеры для композитной арматуры. Наличие анкерных устройств, наклеенных на всю высоту балок привело к увеличению их прочности при прочих равных условиях на 39,3%. Анкеры, наклеенные не на полную высоту усиленных элементов – неэффективны.

Литература

1. Щуцкий В.Л., Чубаров В.Е., Коробкин А.П., Гриценко М.Ю. Исследование трещиностойкости и деформативности цилиндрических опор ЛЭП // Научное обозрение. -2017. - №12. URL:sced.ru/ru/index.php?Itemid=156&catid=39&id=618:nauchnoe-obozenie-12-2017&option=com_content&view=article

2. Щуцкий В.Л., Коробкин А.П., Шевченко А.С., Стельмах С.А. Исследование работы конических опор электропередач в качестве стоек для антенных башенных надстроек // Наукоедение, 2017, Том 9, №4. URL:naukovedenie.ru/PDF/43TVN417.pdf

3. Сухарева А.В., Аксенов В.Н. Сравнительный анализ эффективности использования кесонных перекрытий Skydome в современных многоэтажных зданиях при стандартном шаге колонн // Инженерный вестник Дона, 2016, №4. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3885

4. Радченко А.В., Аксенов В.Н. Методы расчета каркасных зданий из монолитного железобетона на прогрессирующее обрушение на примере 17-этажного жилого дома // Инженерный вестник Дона, 2016, №4. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3879

5. Рабинович Л.Р. Мизернюк Б.Н. Рекомендации по проектированию усиления железобетонных конструкций здания и сооружений реконструируемых предприятий. Надземные конструкции и

сооружения // Харьковский ПростройНИИ проект, НИИЖБ – М.: Стройиздат, 1992.-191с.

6. Mander J. B.; Priestley M. J. N., Park R. Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete // Journal of structural Engineering. Vol. 114. №8. 1988. URL: doi.org/10.1061/ (ASCE) 0733-9445(1988)114:8(1804).

7. Польской П.П., Маилян Д.Р. Прочность и деформативность усиленных композитными материалами балок при различных варьируемых факторах // Инженерный вестник Дона. 2013. № 2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1676

8. Польской П.П., Маилян Д.Р. О расчете ширины нормальных трещин, усиленных стекло- и углепластиком // Научное обозрение. – 2014. - №12. – С. 490-492.

9. Ai-hui Zhang, Wei-liang Jin, Gui-bing Li. Behavior of preloaded RC beams strengthened with CFRP laminates // Journal of Zhejiang University-SCIENCE A. 2006. Vol. 7. №3. pp. 436-444. URL: link. Springer.com/article/10.1631/jzus.2006.A0436.

10. Polskoy P.P., Mailyan D.R., Dedukh D.A., Georgiev S.V. Design of reinforced concrete beams in a case of a change of cross section of composite strengthening reinforcement // Global Journal of Pure and Applied Mathematics. 2016. – Vol. 12, N2. pp. 1767-1786. URL: ripublication.com

References

1. Shhuckij V.L., Chubarov V.E., Korobkin A.P., Gricenko M. Ju. Nauchnoe obozrenie. 2017. №12 URL: sced.ru/ru/index.php?Itemid=156&catid=39&id=618:nauchnoe-obozrenie-12-2017&option=com_content&view=article
 2. Shhuckij V.L., Korobkin A.P., Shevchenko A.S., Stel'mah S.A. Naukovedenie V 9, №4. 2017. URL: naukovedenie.ru/PDF/43TVN417.pdf
-



3. Suhareva A.V., Aksenov V.N. Inzenernyj vestnik Dona, 2016, №4.
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3885
4. Radchenko A.V., Aksenov V.N. Inzenernyj vestnik Dona, 2016, №4.
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3879
5. Rjabinovich L.R. Mizernjuk B.N. Rekomendacii po proektirovaniyu usileniya zhelezobetonnyh konstrukcij zdaniya i sooruzhenij rekonstruiruemyh predpriyatij. Nadzemnye konstrukcii i sooruzheniya [Recommendations for the design of reinforced concrete structures of buildings and structures of reconstructed enterprises. Overground structures and facilities]. Har'kovskij ProstrojNII proekt, NIIZhB. M.: Strojizdat, 1992. pp.-191
6. Mander J. B.; Priestley M. J. N., Park R. Journal of structural Engineering. Vol. 114. №8. 1988. UL: [doi.org/10.1061/ \(ASCE\) 0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804))
7. Pol'skoy P.P., Mailyan D.R. Inzhenernyy vestnik Dona. 2013. № 2.
URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1676
8. Pol'skoy P.P., Mailyan D.R. Nauchnoye obozreniye. 2014. №12. pp. 490-492.
9. Zhang Ai-hui, Jin Wei-liang, Li Gui-bing. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A. 2006. Vol. 7. №3. pp. 436-444. URL: [link.Springer.com/article/10.1631/jzus.2006.A0436](http://link.springer.com/article/10.1631/jzus.2006.A0436).
10. Polskoy P.P., Mailyan D.R., Dedukh D.A., Georgiev S.V. Global Journal of Pure and Applied Mathematics. 2016. Vol. 12, N2. pp. 1767-1786.
URL: ripublication.com.