

К определению прочности бетона, обжатого композитными материалами, расположенными в поперечном направлении

С.В. Георгиев¹, З.А. Меретуков², А. И. Соловьева¹

¹Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону.

²Майкопский государственный технологический университет, г. Майкоп

Аннотация: В последние десятилетия композитные материалы широко используются в области усиления и изготовления железобетонных конструкций. Однако, объем экспериментальных и научно-исследовательских работ в России недостаточно большой, для того, чтобы можно было определить все возможности и реальную эффективность композитных материалов в данной области. В данной работе приведены предложения по совершенствованию методики расчета прочности железобетонных гибких внецентренно сжатых стоек, усиленных композитными материалами в поперечном направлении. Разработанные предложения базируются на результатах экспериментальных исследований. Предложения разработаны в области определения добавочной прочности бетона на сжатие от действия композитных материалов, расположенных в поперечном направлении. В работе расписаны недостатки нормативной методики расчета и разработан коэффициент, скорректированный в формулу определения сопротивления усиленного композитными материалами бетона R_{b3} .

Ключевые слова: бетон, железобетон, композитный материал, углепластик, внешнее армирование, деформации, сжатые элементы.

Данная работа является продолжением научных исследований [1,2], посвященных совершенствованию нормативной методики расчета на прочность по недеформированной схеме сжатых элементов, усиленных композитными материалами в поперечном направлении, на основе полученных экспериментальных данных, результаты которых освещены в работах [3-5].

Как показывает опыт, согласно результатам обследования и оценки технического состояния строительных конструкций [6,7], часто причиной усиления являются нарушение требований норм, технологии выполнения работ, физические повреждения и др. В зависимости от причины необходимости усиления, и от характеристик самой конструкции выбираются метод и материал усиления. Часто выбранный метод не устраивает заказчика по эстетическим и технологическим причинам, или экономически нецелесообразен. Также существуют случаи, когда усиление конструкций вообще невозможно традиционными методами.

Развитие новых методов усиления с применением композитных материалов имеет большие перспективы и экономические преимущества, а порой и является единственным решением по восстановлению или усилению конструкций [8].

В связи с этим, последние 10 лет кафедра железобетонных и каменных конструкций (ДГТУ) изучает свойства композитных материалов в области усиления железобетонных конструкций.

Столь обширные исследования позволяют охватить весь спектр железобетонных конструкций, а полученные знания позволят использовать новые возможности и варианты наиболее эффективных методов усиления.

Новые методы усиления, на основе использования композитных материалов, имеют большие перспективы [9], и дают возможность усиливать конструкции с меньшими затратами [10-12], исключают ряд проблем традиционного усиления и расширяют возможности по усилению железобетонных конструкций [13-15].

Большинство экспериментальных исследований, посвященных усилению сжатых железобетонных элементов композитными материалами, было выполнено за рубежом, в таких странах, как США, Япония и Италия [16,17].

Вышедший в России в 2014 году Свод Правил 164.1325800.2014 по усилению железобетонных конструкций композитными материалами, позволил на законодательном уровне проектировать усиление конструкций, используя высокопрочный углепластик. Однако анализ расчётных положений нормативной методики расчета в России показал, что положительные свойства и высокая эффективность новых материалов усиления в области сжатых элементов [18] не могут быть в полной мере использованы в практике. Это связано с ограничениями, которые накладывает СП 164.1325800.2014 по усилению железобетонных

конструкций композитными материалами. Экспериментально было доказана [19,20] высокая эффективность использования композитных материалов в области усиления сжатых элементов, выходящих за рамки рекомендуемых Сводом правил. Было установлено увеличение прочности и жесткости усиленных образцов, однако, согласно результатам теоретического расчета, увеличение прочности и жесткости сильно занижалось. Данный фактор значительно снижает перспективы использования новых материалов усиления, сужая круг использования композитных материалов [21-23].

В ранее выполненных работах [1,2] авторами представлены предложения по совершенствованию методики расчета сжатых элементов по прочности, а именно: предложения к определению относительной деформации усиленного бетона ξ_{b3} и предложения к определению условной критической силы N_{cr} . Эти предложения базируются на анализе результатов экспериментальных исследований и существенно сближают значения теоретических и экспериментальных прочностей образцов. Однако, для ряда опытных стоек, все же наблюдается занижение теоретической прочности по сравнению с экспериментальной, наибольший интерес из которых представляет самый мощный вариант усиления – композитная обойма (АКУ-Х₅ и БКУ-Х₅), при этом наблюдается существенное занижение теоретической прочности (ст. 8, Табл. 1) по сравнению с экспериментальной.

Анализ положений нормативной методики расчета по прочности сжатых железобетонных элементов (СП 164.1325800.2014), усиленных композитными материалами, показал, что свод правил вводит ряд ограничений к характеристикам конструкций. Одно из них связано с ограничениями значения соотношения габаритных размеров поперечного сечения усиливаемого элемента, которое не должно превышать 1,5. Данное ограничение нашло отражение в расчетных формулах, при вычислении коэффициента k_{ef} (1), который, в свою очередь, существенно занижает

увеличение сопротивления на сжатие, обжатого композитными материалами, бетона R_{b3} (2) от действия поперечного усиления, следовательно занижается и прочность стоек.

Выполнив математический расчет, для стоек с соотношением поперечного сечения $h/b=25/12,5=2$ радиусом скругления $r=2,2$ см, получили $k_{ef}=0,216$, что практически в пять раз занижает добавочную прочность бетона от действия композитного усиления. В свою очередь, результаты экспериментальных исследований [5] показали существенное увеличение прочности конструкций, которая дает возможность утверждать, что и увеличение прочности бетона на сжатие существенно больше, чем описано в нормативном расчете.

На основании вышесказанного, предлагается ввести повышающий коэффициент в нормативную формулу определения сопротивления бетона R_{b3} в условиях объемного напряженного состояния (2).

Используя данные экспериментальной прочности опытных образцов, путем математических расчётов, были определены экспериментальные значения сопротивления усиленного бетона и выведена, зависящая от эксцентриситета приложения нагрузки и нормативного коэффициента k_e (3), формула определения коэффициента k_{f3} (4). Для упрощения инженерных расчетов была разработана таблица численных значений коэффициента k_{f3} (Табл. 1).

$$k_{ef} = 1 - \frac{(b - 2 \cdot r)^2 + (h - 2 \cdot r)^2}{2 \cdot b \cdot h} \quad (1)$$

$$R_{b3} = R_b + k_{ef} \cdot k_e \cdot R_f \cdot \mu_f \quad (2)$$

$$k_e = \left(1 - \frac{S_w}{2 \cdot (\sqrt{h^2 + b^2} - 2 \cdot r)} \right)^2 \quad (3)$$

$$k_{f3} = \left(46,418 \frac{e_0}{h} - 111,43 \left(\frac{e_0}{h} \right)^2 - 0,0142 \right) \cdot e^{\left(56,131 \left(\frac{e_0}{h} \right)^2 - 25,889 \frac{e_0}{h} + 1,7328 \right)} \cdot k_e \quad (4)$$

Коэффициент k_{f3} предлагается ввести в формулу (1), и тогда она будет иметь следующий вид:

$$R_{b3} = R_b + k_{f3} \cdot k_{ef} \cdot k_e \cdot R_f \cdot \mu_f \quad (5)$$

Таблица 1

Значения коэффициента k_{f3}

k_e	e_0/h			
	0,01	0,1	0,2	0,3
0,5	0,98	3,06	2,66	2,39
0,6	1,14	2,97	2,36	2,17
0,7	1,32	2,88	2,09	1,97
0,8	1,53	2,80	1,85	1,78
0,9	1,77	2,72	1,64	1,62
1	2,05	2,64	1,46	1,46

В Табл. 2 представлены результаты расчётов, согласно методике, предложенной сводом правил (СП164.1325800.2014). В столбцах 6 и 7 приведены результаты прочности нормативного расчёта из сравнения значений с экспериментальной прочностью, в столбцах 8-9 приведены результаты расчётов, согласно разработанных предложений по совершенствованию нормативной методики, связанное с коррекцией формулы определения ε_{b3} и жесткости конструкции D [1, 2].

В столбцах 10, 11 приведены значения коэффициентов k_{f3} , рассчитанных для указанных стоек и прочность опытных образцов, рассчитанных с учетом предложений, разработанных в [1, 2] и с учётом коэффициентов k_{f3} . В столбце 12 приведены результаты сравнения экспериментальных значений прочности с соответствующими теоретическими.

Из результатов расчетов видно, что сумма среднеквадратических отклонений с учетом предложений к определению R_{b3} по сравнению с результатами нормативного расчета и расчета с учетом предложений авторов

к определению относительной деформации усиленного бетона ϵ_{b3} и жесткости D , уменьшилась с 0,124 и 0,1 до 0.0004 соответственно.

Таблица 2

Сравнение экспериментальных и теоретических значений прочности стоек нормативного расчета и с учетом предложений авторов

Шифр образца	Параметры расчета		Результаты эксперимента		Нормативный расчет		Расчет с учетом предложений [1,2]		Расчет с учетом k_{f3}		
	λ_n	e_0	$R_{b,n}^{exp}$, МПа	N^{exp} , кН	N^{theor} , кН	$\frac{N^{theor}}{N^{exp}}$	N^{theor} , кН	$\frac{N^{theor}}{N^{exp}}$	k_{f3}	N^{theor} , кН	$\frac{N^{theor}}{N^{exp}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
АКУ-Х ₁	10	0,2	282,3	1190,0	1188,0	0,97	1156	0,97	1,41	1199	1,01
АКУ-Х ₆	10	0,2	363,7	1600,0	1191,0	0,90	1462	0,91	1,97	1613	1,01
АКУ-Х ₅	10	0,2	283,0	1625,0	1298,0	0,77	1275	0,78	2,76	1645	1,01
БКУ-Х ₁	10	2,2	282,3	778,9	667,0	0,85	676	0,87	2,77	774	0,99
БКУ-Х ₂	10	2,2	284,5	794,7	686,0	0,86	699	0,88	2,37	797	1,00
БКУ-Х ₅	10	2,2	302,9	844,0	754,0	0,89	777	0,92	1,6	844	1,00
ВКУ-Х ₁	10	4,2	309,9	482,5	442,0	0,92	450	0,93	2,22	485	1,01
					$\sum \Delta^2 = 0,124$		$\sum \Delta^2 = 0,1$		$\sum \Delta^2 = 0,0004$		

Примечание: 1. Описание шифров опытных образцов в ст.1 приведены в [5].

Литература

1. Георгиев С.В., Меретуков З.А., Кремененко А.Г. К определению относительной деформации усиленного бетона ϵ_{b3} сжатых железобетонных гибких стоек, усиленных композитными материалами, расположенными в поперечном направлении // Инженерный вестник Дона, 2020, № 10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2020/6649

2. Георгиев С.В., Меретуков З.А., Соловьева А. И. К определению условной критической силы гибких железобетонных стоек, усиленных композитными материалами // Инженерный вестник Дона, 2014, № 4-21. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2021/6927

3. Польской П.П., Маилян Д.Р., Георгиев С.В. Прочность и деформативность коротких усиленных стоек при малых эксцентриситетах // Инженерный вестник Дона, 2014, № 4-1. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2734
 4. Польской П.П., Маилян Д.Р., Георгиев С.В. Прочность и деформативность гибких усиленных стоек при больших эксцентриситетах // Научное обозрение, 2014, № 12-2. С. 496-499.
 5. Polskoy P., Mailyan D., Georgiev S., Muradyan V. The strength of compressed structures with cfrp materials reinforcement when exceeding the cross-section size // E3S Web of Conferences, 2018. p. 02060
 6. Литвинов И.М. Инструкция по усилению и восстановлению железобетонных конструкций методом И. М. Литвинова // Харьков: Харьк. обл. полигр. ф-ка, 1948, 39 с.
 7. Теряник В.В., Бирюков А.Ю. Результаты экспериментальных исследований прочности и деформативности сжатых усиленных элементов реконструируемых зданий // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. 2009. №35 (168). URL:clck.ru/QgtxD
 8. Chikh N., Gahmous M., Benzaid R. Structural Performance of High Strength Concrete Columns Confined with CFRP Sheets // Proceedings of the World Congress on Engineering 2012 Vol III. WCE 2012, July 4 - 6, 2012, London, U.K.
 9. Устинов Б.В., Устинов В.П. Исследование физико-механических характеристик композитных материалов (КПМ) // Известия вузов. Строительство, 2009, № 11-12, С.118-125.
 10. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами // М: Стройиздат. 2004. 144с.
-

11. Хаютин Ю.Г., Чернявский В.Л., Аксельрод Е.З. Применение углепластиков для усиления строительных конструкций // Бетон и железобетон. 2001. №6 С. 17-20.

12. Чернявский, В.А., Аксельрод Е.З. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами // Жилищное строительство. 2003. № 3. С. 15-16.

13. Пинаджян, В.В. К вопросу усиления железобетонных конструкций // Строительная промышленность. - 1948. - № 3. - С. 14-17.

14. Мухамедиев Т.А. Проектирование усиления железобетонных конструкций композиционными материалами // Бетон и железобетон. № 3, с.6-8.

15. Belyaev Alexey, Nesvetaev Grigory, Mailyan Dmitry. Calculation of three-layer bent reinforced concrete elements considering fully transformed concrete deformation diagrams // MATEC Web of Conferences 106, 04022 (2017) URL:10.1051/matecconf/20171060 SPbWOSCE-2016 4022

16. Chajes M.J., Finch W.W., Januszka T.F. Bond and Force transfer of composite material plates bonded to concrete // ACI Structural Journal. - 1999. -V. 93, № 2. - pp. 295-303.

17. Shehata I.A.E.M., Carneiro L.A.V. and Shehata L.C.D. Strength of Short Concrete Columns Confined with CFRP Sheets. Materials and Structures, Vol. 35, January-February 2002, pp. 50 - 58.

18. Костенко А.Н. Прочность и деформативность центрально и внецентренно сжатых кирпичных и железобетонных колонн, усиленных угле и стекловолокном Автореферат. дисс. канд. техн. наук // Москва. 2010. 26с.

19. Польской П.П., Георгиев С.В. Влияние различных вариантов внешнего композитного армирования на жесткость гибких сжатых элементов // Инженерный вестник Дона. 2017. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4826

20. Польской П.П., Маилян Д.Р., Георгиев С.В. Прочность и деформативность гибких усиленных стоек при больших эксцентриситетах // Научное обозрение. 2014. № 12-2. С. 496-499.
21. Мальганов А.И., Плевков В.С., Полищук А.И. Восстановление и усиление строительных конструкций аварийных и реконструируемых зданий // Томск, Атлас схем и чертежей, 1990. 316с.
22. Шилин А.А. Пшеничный В.А., Картузов Д.М. Внешнее армирование железобетонных конструкций композитными материалами // ОАО «Издательство Стройиздат», 2007. 184с.
23. Долманюк Р.Ю. Оценка состояния железобетонных конструкций для регрессивной зависимости коррозионных повреждений стальной арматуры от толщины защитного слоя бетона в условиях открытой атмосферы // В сборнике: Образование. Транспорт. Инновации. Строительство. Сборник материалов III Национальной научно-практической конференции. 2020. С. 524-528.

References

1. Georgiev S.V., Meretukov Z.A., Kremenenko A.G. Inzhenernyj vestnik Dona, 2020, № 10. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2020/6649
2. Georgiev S.V., Meretukov Z.A., Solov'eva A. I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, № 4-21. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2021/6927
3. Pol'skoj P.P., Mailjan D.R., Georgiev S.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, № 4-1. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2734.
4. Pol'skoj P.P., Mailjan D.R., Georgiev S.V. Nauchnoe obozrenie, 2014, № 12-2. pp. 496-499.
5. Polskoj P., Mailyan D., Georgiev S., Muradyan V. E3S Web of Conferences, 2018. С. 02060
6. Litvinov I.M. Instrukcija po usileniju i vosstanovleniju zhelezobetonnyh konstrukcij metodom I. M. Litvinova [Instructions for the strengthening and

restoration of reinforced concrete structures by the method of I. M. Litvinov] Har'kov: Har'k. obl. poligr. f-ka, 1948, 39 P.

7. Terjanik V.V. Vestnik JuUrGU. Serija: Stroitel'stvo i arhitektura. 2009. №35 (168). URL:clck.ru/QgtxD
 8. Chikh N., Gahmous M., Benzaid R. Proceedings of the World Congress on Engineering 2012 Vol III. WCE 2012, July 4 - 6, 2012, London, U.K.
 9. Ustinov B.V., Ustinov V.P. Izvestija vuzov. Stroitel'stvo. 2009. № 11-12. PP.118-125. 2009, № 11-12, pp.118-125.
 10. Shilin A.A., Pshenichnyj V.A., Kartuzov D.V. M: Strojizdat. 2004. 144p.
 11. Hajutin Ju.G., Chernjavskij V.L., Aksel'rod E.Z. Beton i zhelezobeton. 2001. №6 pp. 17-20.
 12. Chernjavskij, V.A., Aksel'rod E.Z. Zhilishhnoe stroitel'stvo. 2003. № 3. pp. 15-16.
 13. Pinadzhjan, V.V. Stroitel'naja promyshlennost'. 1948, № 3, pp. 14-17.
 14. Muhamediev T.A. Beton i zhelezobeton. № 3, pp. 6-8.
 15. Belyaev Alexey, Nesvetaev Grigory, Mailyan Dmitry. MATEC Web of Conferences 106, 04022 (2017) URL:10.1051/mateconf/20171060 SPbWOSCE-2016 4022.
 16. Chajes M.J. ACI Structural Journal. 1999. V. 93. № 2. pp. 295-303.
 17. Shehata I.A.E.M., Carneiro L.A.V. and Shehata L.C.D. Materials and Structures, Vol. 35, January-February 2002, pp. 50 - 58.
 18. Kostenko A.N. Prochnost' i deformativnost' central'no i vnecentrenno szhatyh kirpichnyh i zhelezobetonnyh kolonn, usilennyh ugle i steklovoloknom [Strength and deformability of centrally and eccentrically compressed brick and reinforced concrete columns reinforced with carbon and fiberglass]. Avtoreferat. diss. kand. tehn. Nauk, Moskva, 2010. 26p.
 19. Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, № 4. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4826
-



20. Pol'skoj P.P., Mailjan D.R., Georgiev S.V. Nauchnoe obozrenie, 2014, № 12-2. pp. 496-499.
21. Mal'ganov A.I., Plevkov V.S., Polishhuk A.I. Vosstanovlenie i usilenie stroitel'nyh konstrukcij avarijnyh i rekonstruiruemyh zdanij [Restoration and strengthening of building structures of emergency and reconstructed buildings]. Tomsk, Atlas shem i chertezhej, 1990. 316 p.
22. Shilin A.A. Pshenichnyj V.A., Kartuzov D.M. Vneshnee armirovanie zhelezobetonnyh konstrukcij kompozitnymi materialami [External reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials]. OAO «Izdatel'stvo Strojizdat», 2007. 184 P.
23. Dolomanjuk R. Ju. Sbornik materialov III Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2020. pp. 524-528.