
Сопоставление эффективности традиционного и инновационного методов усиления гибких стоек при больших эксцентриситетах

В.А. Мурадян, А.Д. Загузов

Донской государственной технической университет

г. Ростов-на-Дону

Аннотация: Выполнено сравнение материальных и трудовых затрат для двух методов усиления гибких сжатых стоек, нагруженных при больших эксцентриситетах. Стойки усиленные по растянутой грани двумя полосами-углеламинатами, сечением 50x1,2 мм, в сочетании с трехслойными поперечными хомутами из углеткани, расположенными с шагом 190мм, показали при испытании максимальную прочность. Разрушающая нагрузка составила 503,5 кН, что в 2,076 раза больше по сравнению с эталонным образцом. Запроектированное под максимальную нагрузку классическое усиление резко увеличило сечение стойки и величину дополнительной нагрузки, т.к. толщина набетонки при одностороннем наращивании составила 90мм.

Сопоставление только стоимости материальных и трудовых затрат не дает окончательного ответа на вопрос об эффективности того или иного методов усиления необходимо учитывать сроки выполнения работ, сохранение полезного пространства, возможность усиления без остановки производства.

Ключевые слова: бетон, железобетон, сжатый элемент, гибкость, прочность, композит, углеродное волокно.

Классический метод усиления конструкций с использованием стали и бетона имеет в России уже вековую историю. Первые сведения об усилении железобетонных конструкций с использованием наращивания сечений появились в 1919 году. Данный метод под наращиванием подразумевает как замкнутую обойму, так и одно, двух или трёхстороннее наращивание сечения с толщиной набетонки от 60 до 200÷250 мм.

С течением времени наращивание сечений стало осуществляться с использованием сборных железобетонных элементов или стальных пластин, которые наклеивались на подготовленную поверхность существующих железобетонных конструкций.

Появление во второй половине двадцатого века высокопрочных бетонов и новых видов композитных материалов стало отправной точкой для

их использования и в строительстве, т.к. эти материалы обладают высокой прочностью, а композитные - еще и легкостью, высокой коррозионной устойчивостью. Эти качества способствуют не только снижению энерго- и материалоемкости новых конструкций, но и повышают эффективность строительства в целом.

Внедрение новых материалов и технологий невозможно без проведения экспериментальных работ. Исследование высокопрочных бетонов отражено, в частности, в работах [1-5]. Выход в свет в 2014 году свода правил по усилению железобетонных конструкций композитными материалами открыл не только возможности для использования композитных материалов в строительстве, но и поднял вопросы, которые раньше не «лежали» на поверхности.

С учетом вышеизложенного, кафедра железобетонных и каменных конструкций ДГТУ провела и продолжает проводить большой объем комплексных исследований, направленных на дальнейшее внедрение композитных материалов в строительство и совершенствование нормативной базы для их проектирования.

В программу комплексных исследований вошли вопросы, связанные с использованием стеклопластиковой и углепластиковой арматуры в качестве внутренней рабочей [6]. Значительно больший объем исследований связан с внедрением композитных материалов для внешнего армирования конструкций с целью их восстановления или усиления. Результаты экспериментов по усилению изгибаемых элементов на действие моментов поперечных сил, а также сжатых элементов при различной гибкости представлено в работах [7-9], опубликованных в России, и за рубежом.

Новым направлением исследования кафедры является изучение эффективности классического и инновационного методов усиления

конструкций при различных видах их напряженно-деформированного состояния

Данная статья ставит своей целью оценку эффективности каждого из указанных методов при усилении гибких сжатых элементов, испытывающих одновременное воздействие продольных сил и больших моментов. За основу взяты элементы гибкостью $\lambda_n=20$, загруженные продольной силой, расположенной за пределами сжатой арматуры при $e_0=0,32h$. К таким элементам в частности относятся стойки безраскосных ферм.

В качестве объекта для сравнения двух методов усиления взяты результаты испытания сжатых элементов. Они приведены в табл. 1.

В эксперименте участвовали образцы длиной 2400мм сечением 250x125(h) мм, выполненные из бетона класса В35,6. Стойки в продольном направлении были заармированы 4 \square 12A500С. Поперечная вязаная арматура в виде замкнутых стальных хомутов была принята \square 6B500, и установлена с шагом 180мм.

Перед испытанием опытные образцы со стороны растянутой зоны были усилены двумя полосами из углепластика сечением 50x1,2мм. Дополнительно были установлены трехслойные хомуты шириной 50мм из углеткани толщиной 0,166мм и один центре, шириной 240мм. Все материалы были поставлены фирмой MBRACE. Конструкция каркасов и характеристика опытных образцов подробно представлены на страницах данного журнала.

К изложенному добавим, что опытные образцы испытывались при эксцентриситете приложения нагрузки $e_0=4\text{см}$, что равно $0,32h$.

Из табл. 1 видно, что наибольшую эффективность показали усиленные образцы имеющие дополнительную внешнюю продольную арматуру, наклеенную на растянутой грани. Разрушающая нагрузка составила 503,5 кН, что в 1,86 раза прочнее эталонных образцов, которые показали прочность 242,2 кН.

Таблица 1

Прочность эталонных и усиленных гибких стоек при различных вариантах внешнего композитного армирования

Характеристики опытных образцов	Шифр стоек	Прочность бетона \bar{R} , МПа	Характер усиления углепластиком	Предельные деформации		Опытные значения		Коэффициент усиления N_y/N
				Сжатие $\varepsilon_e \cdot 10^{-3}$	Растяжение $\varepsilon_{ст} \cdot 10^{-3}$	Прочность кН N_y	Прогобы $f_{мм}^{exp}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сечения-250x125 (h) мм $I_0=2400$ мм, $\lambda_{нр}=20$; $e_0=4$. Продольное армирование 4Ø12A500 ($\mu_s=1.45$) хомуты – Ø6B500, $s=180$	ВГ	35,2	Эталон	4,83	4,93	242,2	31,26	1,0
	ВГУ-Х ₃	35,2	$b_f=50$ мм $s_f=190$ мм; $s=140$ мм +Хомут в центре $b_f=50$ мм	4,57	4,61	290,0	27,04	1,196
	ВГУ-Х ₅	30,1	$b_f=1920$ мм (Обойма по всей длине)	15,7	8,11	270	73,27	1,113
	ВГУ-Х ₃ L _p	35,7	$b_f=50$ мм; $s_f=190$ мм; $s=140$ мм +Хомут в центре $b_f=240$ мм +2-а углеламината в растянутой зоне $b=50$; $t=1,4$ мм	4,49	4,29	503,5	29,62	2,076
	ВГУ-Х ₄ L _p	35,7	$b_f=50$ мм $s_f=190$ мм; $s=140$ мм +локальная обойма $b_f=620$ мм +2-а углеламината в растянутой зоне $b=50$; $t=1,4$ мм	5,54	5,28	504,5	35,25	2,08

Из табл. 1 видно, что наибольшую эффективность показали усиленные образцы имеющие дополнительную внешнюю продольную арматуру,

наклеенную на растянутой грани. Разрушающая нагрузка составила 503,5 кН, что в 1,86 раза прочнее эталонных образцов, которые показали прочность 242,2 кН.

Для получения сравнительных данных по классическому методу усиления согласно [10] было запроектировано одностороннее усиление с использованием наращивания сечения эталонных стоек со стороны растянутой зоны с использованием прямоугольных хомутов, приваренных к существующей стальной арматуре, и дополнительной продольной арматуры.

Допускается выполнять расчет усиленных конструкций по недеформированной схеме и учитывать влияние прогиба конструкции умножением начального значения осевого эксцентриситета на коэффициент η .

$$\varphi_t = 1$$

$$\delta_e = (e_0 + e_a) / h_{ад} \geq \delta_e^{min} = 0,15$$

$$\mu\alpha = (A_s + A'_s) E_s / b h E_s$$

$$D_{ад} = E_b \cdot b_{ад} \cdot h_{ад}^3 \left[\frac{0,0125}{\varphi_t (0,3 + \delta_e)} \right] + 0,75 \mu\alpha \left(\frac{h_{ад} - a'_{ад}}{h_{ад}} \right) =$$

$$N_{crад} = \pi^2 D_{ад} / l_0^2$$

$$\eta = 1 / (1 - N / N_{cr})$$

По результатам вычислений $\eta = 1,17$

Значение коэффициентов А и В:

$$A = \frac{[N + R_s \cdot A_s - R_{sc} \cdot A'_{sred} - R_{bred} \cdot b(h_0 + a_0)]}{0,5 R_{сад}}$$

$$A = \frac{[503500 + 43500 \cdot 2,26 - 40000 \cdot 2,26 - 1960 \cdot 25(10 + 9)]}{0,5 \cdot 43500} = -19,3 \text{ см}^2$$

$$B = \frac{0,5[R_s \cdot A_s - R_{sc} \cdot A'_{sred}]^2 + [R_{sc} \cdot A'_{sred} \cdot a' - R_s \cdot A_s \cdot h_0 + N(e - h_0)] \cdot R_{bred} \cdot b}{0,5[R_{сад}]^2} +$$

$$\begin{aligned} & + \frac{N[R_s \cdot A_s - R_{sc} \cdot A'_{sred}] + 0,5N}{0,5[R_{sadd}]^2} = \frac{0,5[43500 \cdot 2,26 - 40000 \cdot 2,26]^2}{0,5[43500]^2} + \\ & + \frac{[40000 \cdot 2,26 \cdot 2,5 - 43500 \cdot 2,26 \cdot 10 + 503500(13,43 - 10)] \cdot 1960 \cdot 25}{0,5[43500]^2} + \\ & + \frac{50350 \cdot [43500 \cdot 2,26 - 40000 \cdot 2,26] + 0,5 \cdot 503500}{0,5[43500]^2} = 54,5 \text{ см}^2 \end{aligned}$$

Площадь дополнительной рабочей арматуры:

$$A_{sadd} = -\frac{A}{2} - \sqrt{\frac{A^2}{4} - B} = -\frac{-19,3}{2} - \sqrt{\frac{(-19,3)^2}{4} - 54,5} = 3,44 \text{ см}^2$$

Площадь утраченного сечения арматуры:

$$\Delta A_{sadd} = 0,25 \cdot A_s = 0,25 \cdot 2,26 = 0,565 \text{ см}^2$$

Полная площадь дополнительной арматуры:

$$A_{sadd}^{теор} = A_{sadd} + \Delta A_{sadd} = 3,435 + 0,565 = 4,0 \text{ см}^2$$

Принимаем (2∅16) A500; $A_{sadd} = 4,02 \text{ см}^2$

$$A_{sadd}^{факт} = A_{sadd}^{теор} - \Delta A_{sadd} = 4,02 - 0,565 = 3,455 \text{ см}^2$$

Расчетная площадь дополнительной арматуры:

$$A_{sred} = A_s + A_{sadd} \left(\frac{R_{sadd}}{R_s} \right) = 2,26 + 4,02 \left(\frac{43500}{43500} \right) = 5,7 \text{ см}^2$$

Расстояние от центра тяжести растянутой арматуры до общего центра тяжести всей растянутой арматуры:

$$a_{red} = \frac{[R_{sadd} \cdot A_{sadd} (h_{0add} - h_0)]}{[R_s \cdot A_s + R_{sadd} \cdot A_{sadd}]} = \frac{[43500 \cdot 3,45 \cdot (18,5 - 10)]}{[43500 \cdot 2,26 + 43500 \cdot 3,4]} = 8,54 \text{ см}^2$$

Приведённая высота рабочего сечения:

$$h_{0red} = h_0 + a_{red} = 10 + 8,54 = 18,54 \text{ см}$$

Высота сжатой зоны бетона:

$$x = \frac{[N + R_s \cdot A_{sred} - R_{sc} \cdot A'_{sred}]}{R_{bred} \cdot b} = \frac{[503500 + 43500 \cdot 5,7 - 40000 \cdot 2,26]}{1960 \cdot 25} = 13,5 \text{ см}$$

Несущая способность сечения:

$$\begin{aligned} M_{\text{admit}} &= R_{\text{bred}} \cdot b \cdot x (h_{0\text{red}} - 0,5x) + R_{\text{sc}} \cdot A'_{\text{bred}} (h_{0\text{red}} - a') = \\ &= 1960 \cdot 25 \cdot 13,5 \cdot (18,54 - 0,5 \cdot 13,5) + 40000 \cdot 2,26 \cdot (18,54 - 2,5) = \\ &= 93,8 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{см} > N_{\text{ад}} \cdot e_{\text{ад}} = 503500 \cdot 13,43 = 67,6 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{см} \end{aligned}$$

Оценка эффективности методов усиления осуществлялась на основе сопоставления стоимости материалов и трудозатрат, табл. 2, 3.

Перечень работ и их последовательность при **классическом** методе усиления:

- при необходимости, разгрузка колонны до уровня 65% от предельной нагрузки;
- удаление защитного слоя бетона в местах приварки хомутов;
- нанесение насечки для улучшения сцепления старого бетона с новым;
- изготовление деталей для арматурного каркаса. С целью обеспечения совместной работы дополнительной арматуры посредством приваривания ее к существующей арматуре через хомуты;
- приварка хомутов и арматуры усиления к существующей арматуре;
- обеспыливание поверхности колонны сжатым воздухом;
- промывка водой под давлением;
- установка опалубки в трех уровнях, высотой 800 мм и лесов;
- Укладка и уплотнение суперпластичной бетонной смеси под давлением с использованием бетононасосов снизу-вверх через штуцеры;
- снятие опалубки и лесов;
- уход за бетоном в течении 28 суток с соблюдением тепловлажностного режима;

Перечень и последовательность работ при **композитном** усилении:

- при необходимости, разгрузка колонны до уровня 65% от предельной нагрузки;
- очистка поверхности от цементно-песчаного молока до оголения крупного заполнителя с использованием шлифовальных кругов;
- закругление четырех углов радиусом 2 см в местах прилегания хомутов;
- обеспыливание поверхности;
- покрытие поверхности грунтовкой в местах сцепления с углеламинатами и хомутами;
- при необходимости – нанесение шпаклевки;
- нанесение первого и последующих слоев клеевого состава;
- наклеивание углеламинатов со стороны растянутой зоны;
- последовательное наклеивание трех слоев ткани;
- нанесение финишного слоя клея;
- нанесение крупнозернового песка на финишный слой клея (обсыпка);
- оштукатуривание колонны цементно-песчаным раствором марки 100 по сетке толщиной 20 мм.

Продолжительность работ по усилению колонны композитной обоймой из трехслойного углехолста составляет с учетом технологии нанесения грунтовки, шпаклевки и клеевого состава – 2,5-3 смены.

Полное отвердевание композитных клеев наступает через 7-8 суток от начала выполнения работ.

Таблица 2

Стоимость проведения работ после усиления набетонкой

Стоимость Материалов	Стоимость работ	Итого Руб.	Время набора прочности элемента,	Время выполнения работ по
-------------------------	--------------------	---------------	-------------------------------------	------------------------------

(бетон, арматура) Руб.	Руб.		дней	усилению, дней
791	1863	2654	2-4	28

Таблица 3

Стоимость проведения работ после усиления композитными материалами

Стоимость Материалов (бетон, арматура) Руб.	Стоимость работ Руб.	Итого Руб.	Время набора прочности элемента, дней	Время выполнения работ по усилению, дней
22375	1433	23808	2	7-8

Примечание:

- 1) Стоимость работ на устройство железобетонной набетонки получена согласно сметному расчету в соответствии с расценками по состоянию на сентябрь 2018 г.;
- 2) Рыночная стоимость 1 м² углеткани толщиной 0,166 мм по состоянию на сентябрь 2018 г. составляет 6.116 тыс. рублей;
- 3) Рыночная стоимость 1 м.п. углеламината толщиной 1.4 мм по состоянию на сентябрь 2018 г. составляет 3.071 тыс. рублей;
- 4) В стоимость 1 м² композитной ткани и ламината входит стоимость всех расходных материалов – грунтовки, шпаклевки и клеевого состава.

По результатам сравнения классического и инновационного методов усиления можно сделать следующие выводы:

- Суммарная стоимость материалов и работ на единицу усиления при использовании трехслойных композитных хомутов и ламинатов заметно выше по сравнению с классическим методом так как

стоимость углепластика на настоящий момент во много раз превышает стоимость железобетона.

- Сроки введения колонн в эксплуатацию после усиления новым методом составляют 7-8 суток вместо 28 суток при классическом методе, что резко снижает объем выпускаемой продукции при выполнении работ по усилению на действующих предприятиях;
- Важным фактором является отсутствие сварных работ, возможность усиления конструкций без остановки производства и сохранения большего полезного пространства.
- По совокупности вышеизложенного наиболее рациональным будет использование композитного усиления конструкций.

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 // Наукоеведение, 2017, Том 9, №4
URL: naukovedenie.ru/PDF/43TVN417.pdf
3. Mailyan D.R., Aksenov V.N., Aksenov N.B. Energy-efficient reinforced concrete columns made of concrete, grade B90...B140 // Advances in Intelligent and Soft Computing. 2018. V.692. pp. 536-542.
4. 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

5. 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

6. Польской П.П., Хишмах М., Михуб А. О возможности использования круглых углепластиковых стержней в качестве рабочей арматуры для изгибаемых элементов // Научное обозрение. 2012. №6. С. 211-213.

7. Рябинович 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.

8. Zhang Ai-hui, Jin Wei-liang, Li Gui-bing. 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.

9. 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\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804))

10. Польской П.П. Проектирование и расчет железобетонных конструкций, усиленных наращиванием сечений // Учебное пособие. – Ростов – на – Дону: РГСУ, 2011. –163с

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. Mailyan D.R., Aksenov V.N., Aksenov N.B. Advances in Intelligent and Soft Computing. 2018. V.692. pp. 536-542.
4. Suhareva A.V., Aksenov V.N. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3885
5. Radchenko A.V., Aksenov V.N. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3879
6. Pol'skoj P.P., Hishmah M., Mihub A. Nauchnoe obozrenie. 2012. №6. pp. 211-213.
7. Rjabinovich L.R. Mizernjuk B.N. Rekomendacii po proektirovaniyu usileniya zhelezobetonnyh konstrukcij zdaniya i sooruzhenij rekonstruiemyh predpriyatij. [Recommendations for the design of reinforced concrete structures of buildings and structures of reconstructed enterprises. Overhead structures and facilities]. Nadzemnye konstrukcii i sooruzheniya Har'kovskij ProstrojNII proekt, NIIZhB. M.: Strojizdat, 1992. 191p.
8. 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.
9. 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))
10. Pol'skoj P.P. Proektirovanie i raschet zhelezobetonnyh konstrukcij, usilennyh narashchivaniem sechenij [Design and calculation of reinforced concrete structures, reinforced by the buildup of sections]. Uchebnoe posobie. Rostov-na-Donu: RGSU, 2011.pp.163