

Сравнение методов усиления железобетонных стоек с точки зрения экономической эффективности

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

¹ Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону.

² Майкопский государственный технологический университет, г. Майкоп

Аннотация: Как показывает практика, окончательный выбор метода усиления железобетонных конструкций зависит от влияния большого количества факторов, учитывающих, как технические возможности, так и экономическую целесообразность каждого известного метода усиления. Современное строительство требует новых методов усиления, позволяющих сократить трудозатраты и время производства работ, при этом, сохранить эстетический облик строящегося или восстанавливаемого здания. Камнем преткновения становится цена вопроса и надёжность новых методов усиления. С этой целью было проведено сравнение известных и используемых методов усиления, основанных на таких материалах, как железобетон и металл, с достаточно новыми методами, основанными на использовании композитного усиления.

В настоящей статье приведены примеры и результаты расчётов усиления колонны железобетонной, металлической и композитной обоймой. Исходя из результатов расчётов, было выполнено технико-экономическое сравнение данных методов усиления.

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

Введение

Последние десять лет наиболее популярными технологиями возведения жилых и общественных зданий является монолитное домостроение. Современные технологии позволяют проектировать и возводить здания с безбалочными перекрытиями, опирающиеся на железобетонные колонны [1]. Такое техническое решение позволяет в полной мере осуществлять архитектурные решения, перестраивать внутренние помещения по желанию заказчика.

Из-за несовершенства технологии возведения работ по бетонированию, технология монолитного домостроения часто несет в себе опасность занижения прочности бетона в конструкциях [2]. Это связано с влиянием внешних факторов, таких, как бетонирование в условиях жаркого климата [3] или, наоборот, при отрицательных температурах [4], сложностями доставки

бетона в опалубку [5], качественное его вибрирование [6] и др. Нередки случаи субъективных факторов, связанных с ошибками строителей.

Всё это ведёт к отклонениям от проекта, и, в результате заключений по обследованию зданий, приводит к необходимости замены конструкций или их усилению.

Как показывает опыт, в изгибаемых элементах, а именно, в безбалочных перекрытиях [7,8], сжатая зона бетона всегда имеет запас прочности, следовательно, наиболее распространёнными вариантами усиления является дополнительное армирование растянутой зоны. Другими словами, занижение прочности бетона в этих конструкциях не всегда приводит к необходимости усиления перекрытия. Что касается сжатых несущих конструкций, в роли которых выступают колонны, занижение прочности бетона напрямую связано с занижением прочности конструкций.

Большинство колонн монолитных зданий с безбалочными перекрытиями работает на центральное сжатие или с небольшими эксцентриситетами приложения нагрузки [9]. Также, стоит учитывать, что колонны имеют жесткую заделку с перекрытием, при этом уменьшается расчётный пролет колонн в два раза, а достаточно небольшая их длина позволяет сделать вывод, что влияние гибкости на несущую способность конструкций несущественное [10]. Всё это приводит к тому, что для колонн монолитного здания прочность конструкции в основном определяется, как совместная несущая способность бетона и арматуры конструкции на осевое сжатие [11].

Из известных методов усиления наиболее популярными считаются традиционные, основанные на использовании железобетона и металла [12]. Из новых методов усиления набирает популярность композитное внешнее армирование [13-15]. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки [16,17].

Целью данного научного исследования является определение в области усиления или восстановления несущей способности сжатых железобетонных колонн наиболее эффективного метода.

В качестве материалов исследования была взята колонна, длиной 3 м, сечением 40x40см и внутренним армированием 4Ø25A500.

Для понимания вопроса научного исследования, ниже приведены примеры расчётов усиления колонны тремя методами при коэффициенте усиления 1,5, согласно действующим нормативным документам СП 164.1325800.2014 и СП 63.13330.2018.

Исходные данные:

Сечение 40x40 см. Длина колонны 3м. Класс бетона В25($R_b = 14,5$ МПа). Класс продольной арматуры А500 ($R_{sc}=400$ МПа), $a=3$ см. Стержни продольной арматуры 4Ø28A500 ($A_{s,tot}=24,63$ см²).

Расчет элементов усиления ж/б колонны ж/б обоймой:

- Определяем несущую способность существующего сечения:

При жесткой заделке $l_0=0,5l=0,5*3=1,5$ м. $\lambda_n=150/40=3,75$,

Следовательно: $\varphi = 1$.

$$N_{ult} = \varphi * [R_b * A_b + R_{sc} * A_{s,tot}] = 1 * [145 * 40 * 40 + 4000 * 24,63] \\ = 330520 \text{ кг} * \text{с}$$

$$k_{yc}=330520*1,5=495800$$

- Определяем площадь сечения обоймы:

$$A_{b,ad} = \frac{\left[\frac{N}{\varphi} - R_b * A_b - R_{sc} * A_{s,tot} \right]}{R_b + 0,01 * R_{sc}} \\ = \frac{\left[\frac{495800}{1} - 145 * 40 * 40 - 4000 * 24,63 \right]}{145 + 0,01 * 4000} = 893 \text{ см}^2$$

- Определяем толщину обоймы:

$$d = -\frac{b+h}{4} + \frac{1}{4} * \sqrt{(b+h) + 4 * A_{b,ad}}$$
$$= -\frac{40+40}{4} + \frac{1}{4} * \sqrt{(40+40)^2 + 4 * 893} = 5 \text{ см} < d = 6,0 \text{ см}$$

Принимаем толщину обоймы по конструктивным соображениям $d = 6,0 \text{ см}$.

- Фактическая площадь сечения обоймы колонны:

$$A_{b,ad}^{\text{факт}} = 2 * b * d + 2 * h * d + 4 * d^2 =$$
$$= 2 * 40 * 6 + 2 * 40 * 6 + 4 * 6^2 = 1104 \text{ см}^2$$

-Площадь дополнительной арматуры:

$$A_{s,ad} = 0,01 * A_{b,ad} = 0,01 * 1104 = 11,04 \text{ см}^2.$$

Принимаем: 4Ø16 A500 $A_{sw,ad} = 8,04 \text{ см}^2$

Шаг поперечной арматуры класса A240 принимаем из 3-х условий: $S = 15ds = 15 * 12 = 180 \text{ мм}$, $S = 3d = 3 * 60 = 180 \text{ мм}$, $S = 150 \text{ мм}$.

Расчет элементов усиления ж/б колонны стальной обоймой:

Принимаем вариант усиления колонны металлической обоймой из стали марки ВСтЗпс6 (класса С235) с термонапряженными соединительными планками. $R_y = R_{sc} = 215 \text{ МПа}$. Уголки устанавливаем на цементно-песчаном растворе с плотным прилеганием к колонне по всей длине. Уголок может изгибаться только на участке между планками.

-Площадь сечения из четырех уголков при $\varphi = 1$:

$$A_{s,ad} = \frac{\left[\frac{N}{\varphi} - R_b * A_b - R_{sc} * A_{s,tot} \right]}{R_{sc,ad}}$$
$$= \frac{\left[\frac{495800}{1} - 145 * 40 * 40 - 4000 * 24,63 \right]}{2150} = 76,87 \text{ см}^2$$

-Площадь сечения одного уголка:

$$A_{s,ad1} = \frac{A_{s,ad}}{4} = 19,2 \text{ см}^2, \text{ принимаем } 4L125 \times 8, \text{ для которых } A_{s,ad1} =$$
$$19,7 \text{ см}^2; A_{sad,tot} = 78,8 \text{ см}^2; i_x = 3,9 \text{ см};$$

Расстояние между осями планок не должно превышать максимальной гибкости $\lambda_i = 40$

$$L = 40i_x = 40 * 3,9 = 156 \text{ см.}$$

По конструктивным требованиям принимаем: $L=40$ см

Ширину полосы принимаем конструктивно равной 8см, следовательно расстояние в свету ветви уголка между полосами: $L-8\text{см} = 40-8=32\text{см}$

- Фактическая гибкость ветви уголка:

$$\lambda = \frac{L}{i_x} = \frac{32}{3,9} = 8,2, \text{ принимаем } \varphi_1 = 0,99$$

-Несущая способность железобетонной колонны, усиленной металлической обоймой :

При $\varphi = 1$

$$\begin{aligned} N_{\text{oult}} &= \varphi * [R_b * A_b + R_{sc} * A_{s,tot} + \varphi_1 * R_{sc,ad} * A_{sad,tot}] \\ &= 1 * [145 * 40 * 40 + 4000 * 24,63 + 0,99 * 2150 * 78,8] \\ &= 498245,8 \text{ кгс} > N_{\text{ad}} = 495800 \text{ кгс} \end{aligned}$$

Усиление железобетонной колонны поперечной композитной обоймой:

Определяем требуемое значение прочности бетона, работающего в сложном напряженном состоянии:

$$R_{b3}^{\text{треб}} = \frac{N/\varphi - R_{sc} * A_{stot}}{A_b} = \frac{(495800/1 - 4000 * 24,63)}{1592} = 249 \text{ кгс/см}^2$$

где $A_b = b * b - 2 * r * r = 40 * 40 - 2 * 2 * 2 = 1592 \text{ см}^2$

– приращение прочности бетона при установке сплошной обоймы.

$$R_{bf} = R_{b3}^{\text{треб}} - R_{bn} = 249 - 145 = 104 \text{ кгс/см}^2$$

– коэффициент композитного поперечного армирования:

$$\mu_f = \frac{R_{bf}}{k_{ef} * k_b * R_f}$$

$$k_{ef} = 1 - \frac{(b-2r)^2 + (h-2r)^2}{2b * h} = 1 - \frac{(40-2*2)^2 + (40-2*2)^2}{2*40*40} = 0,190 \quad (1)$$

Для сплошной обоймы коэффициент, учитывающий наличие разрывов в обойме $k_e = 1.0$.

– расчетное сопротивление композитного материала на растяжение при коэффициенте $\gamma_{f2} = 1.0$

$$R_f = \frac{\gamma_{f1} * \gamma_{f2} * R_{fn}}{\gamma_f} = \frac{0.95 * 1.0 * 3790}{1.2} = 30000 \text{ кгс/см}^2$$

$$\mu_f = \frac{R_{bf}}{k_{ef} * k_e * R_f} = \frac{104}{0.19 * 1.0 * 30000} = 0,0182$$

- площадь сечения композитной арматуры:

$$A_f = \mu_f * A_b = 0.0182 * 1592 = 29 \text{ см}^2$$

- периметр рабочего сечения, подлежащего усилению:

$$U_f = 2(b + h - 4r) = 2(40 + 40 - 4 * 2) = 144 \text{ см}$$

- число слоев в составе холста обоймы Армошел КБ 500 с $t=0,27$ мм

$$n_f = \frac{A_f}{U_f t_f} = \frac{29}{144 * 0.027} = 7,45 \text{ слоя.}$$

Принимаем обойму в 8 слоев.

Или использование материала Армошел КБ900 с $t=0,48$ мм:

$$n_f = \frac{A_f}{U_f t_f} = \frac{29}{144 * 0.048} = 4,1 \text{ слоя.}$$

Принимаем обойму в 4 слоя.

Результаты расчетов показали:

Железобетонная обойма принимается габаритами, принятыми согласно конструктивным соображениям. Толщина набетонки принимается равной 6 см, а продольное армирование - 4 стержня диаметром 16 А500, что соответствует примерно 1% от площади набетонки. На усиление одной колонны требуется затратить 0,33м³ бетона. Общая стоимость, согласно розничным ценам арматуры и бетона, согласно информации фирм «Металлтранс терминал» и «Бетон-ЮГ», будет равна 5693р.

С точки зрения расхода материалов, железобетонная обойма является наиболее экономичным видом усиления. Вариант усиления металлической обоймой показал, что необходимо на колонну установить 4 металлических уголка, шириной 125мм, толщиной 8 мм. В качестве поперечных планок используются полосы шириной 8 см, расположенные с шагом 40 см. Всего расход материалов составляет - 12 м. уголков и 11 м. полос. Данный метод существенно дороже предыдущего. Согласно выставленному счёту фирмы "Металлтранс терминал", на 20 декабря 2021 год стоимость материалов на усиление одной колонны составило 27523,6р. В стоимость входят только основные материалы усиления. Стоит также учитывать и большой вес металлического уголка, который будет находиться в районе 45 кг, что существенно усложняет процесс изготовления системы металлического усиления.

Композитное усиление позволяет обеспечить прочность конструкции при заданном коэффициенте усиления с использованием 8 слоёв углеткани с толщиной 0,27 мм или 4 слоя, с толщиной углеткани 0,48 мм.

От количества слоёв зависит объём используемого клея, соответственно, и стоимость. Однако цены на углеткань не пропорциональны их толщине, поэтому будет рассчитаны два варианта усиления композитной обоймой.

Цены на композитные материалы не прописываются на сайтах фирм их реализующих. В России используется практика не фиксированных цен, а договорных, в зависимости от продолжительности сотрудничества с фирмой, объёмов материалов и др.

По информации цен, полученной от менеджера фирмы ООО "Гидрозо", можно только ориентировочно судить о стоимости материалов усиления одной колонны и, соответственно, реалиях современного строительного рынка композитных материалов.

При усилении четырьмя слоями углеткани, стоимость материалов усиления составляет примерно 191000 руб., а при усилении 8 слоями - стоимость повышается до 232000р.

По расходам на материалы композитное усиление является самым дорогим.

Согласно полученным данным и проведённому анализу, можно сделать следующие выводы:

1. Все описанные в данной статье методы усиления позволяют увеличить прочность колонны на коэффициент усиления 1,5.
2. Согласно стоимости материалов усиления, самым дешёвым оказался метод усиления железобетонной обоймой, композитное усиление существенно отличается от своих аналогов высокой стоимостью.
3. В стоимость работ по усилению входят не только материалы, но и работа, а также доставка материала на объект, стоимость аренды опалубки, крана и др.
4. В работе были рассмотрены примеры расчёта 1 колонны, при одном коэффициенте усиления. Для полной ясности картины требуется увеличить число коэффициентов усиления и экономическое сравнение выполнить согласно большего числа конструкций. Данная работа будет выполняться в дальнейшей перспективе.
5. Результаты расчёта композитного усиления показали существенную площадь поперечного сечения материалов усиления, что, соответственно, и привело к такой высокой стоимости материалов. Учитывая наличие экспериментальных данных, а также проделанную работу по совершенствованию расчётного аппарата [11-13], авторами данной работы, в дальнейшей перспективе будут разработаны предложения по совершенствованию расчёта сжатых элементов и поиски новых методов усиления.

Литература

1. Пхай П. Эффективность железобетонных монолитных безбалочных перекрытий при строительстве каркасных гражданских зданий // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2015. С. 2485-2489.
2. Попов Р.А. Экономико-технологические проблемы и перспективы сборно-монолитного домостроения // Девелопмент и инновации в строительстве. Сборник материалов III Международной научно-практической конференции. 2020. С. 166-173.
3. Баскаков К.О. Особенности бетонирования при строительстве высотных зданий в условиях сухого жаркого климата // StudNet. 2020. Т. 3. № 5. С. 425-431.
4. Чернова А.Р., Пыжьянова Д.В., Терехов И.Г. В Бетонирование в условиях отрицательных температур // Актуальные проблемы технических, естественных и гуманитарных наук. Материалы Международной научно-технической конференции Памяти В. Х. Хамаева. 2016. С. 148-150.
5. Солодкова Е.В. Особенности транспортировки товарного бетона в РФ // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Материалы Пятидесятой научной и учебно-методической конференции. Санкт-Петербург, 2021. С. 210-213.
6. Максимович С.В. Факторы, влияющие на прочность бетона монолитных конструкций // Современные строительные материалы и технологии. Сборник научных статей II международной конференции. Под редакцией М. А. Дмитриевой. 2020. С. 47-63.
7. Спирин А.С. Способы усиления монолитных безбалочных перекрытий // Дни студенческой науки. Сборник докладов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов

института строительства и архитектуры НИУ МГСУ. Москва, 2021. С. 335-337.

8. Болгов А.Н. Работа узлов сопряжения колонн из высокопрочного бетона с перекрытием в монолитных зданиях с рамно-связевой системой // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2005. С.24.

9. Абрамян С.Г., Гнатюк Д.В. Сборные и сборно-монолитные каркасные системы высотных зданий с плоскими плитами перекрытия // Интернет-журнал Науковедение. 2017. Т. 9. № 1. С. 83. URL: naukovedenie.ru/PDF/83TVN117.pdf

10. Кулебякин И.Н., Тороцин А.С. Восстановление монолитных колонн в каркасных зданиях // Общество. Наука. Инновации (НПК-2017). сборник статей. Всероссийская ежегодная научно-практическая конференция. Вятский государственный университет. 2017. С. 1385-1389.

11. Зырянов П.А., Иванова Г.Д., Горевой И.В., Ульянов Н.П. Опорный узел сборно-монолитного перекрытия каркасного здания // Патент на полезную модель. Патентное ведомство: Россия. 10.08.2011г. RU 107203 U1. URL: elibrary.ru/download/elibrary_38394136_43024575.pdf

12. Онуфриев Н.М. Усиление железобетонных конструкций промышленных зданий и сооружений // Стройиздат. Ленинград. 1965. 342 с.

13. Polskoy P., Georgiev S., Muradyan V., Shilov A. The deformability of short pillars in various loading options and external composite reinforcement // В сборнике: MATEC Web of Conferences. 2018. С. 02026. URL: pdfs.semanticscholar.org/6e4e/2e4f4eae3378fe348218df7f99d4e141f703.pdf

14. 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. С. 02060. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2018/01/e3sconf_2018_01_02060.pdf

researchgate.net/publication/323575585_The_strength_of_compressed_structures_with_CFRP_materials_reinforcement_when_exceeding_the_cross-section_size.

15. 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

16. 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.

17. Шиляева О.В., Мурадян В.А., Блягоз А.М., Сморгунцова М.В. К расчету армированных железобетонных колонн методом конечного элемента // Новые технологии. 2013. № 3. С. 148-154.

References

1. Phaj P. Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija molodyh uchenyh BGTU im. V.G. Shuhova. Belgorodskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet im. V.G. Shuhova. 2015. PP. 2485-2489.

2. Popov R.A. V sbornike: Development i innovacii v stroitel'stve. Sbornik materialov III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2020. PP. 166-173.

3. Baskakov K.O. StudNet. 2020. T. 3. № 5. pp. 425-431.

4. Chernova A.R., Pyzh'janova D.V., Terehov I.G. Aktual'nye problemy tehniceskikh, estestvennyh i gumanitarnyh nauk. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii Pamjati V. H. Hamaeva. 2016. pp. 148-150.

5. Solodkova E.V. V sbornike: Al'manah nauchnyh rabot molodyh uchenyh Universiteta ITMO. Materialy Pjatisjatoj nauchnoj i uchebno-metodicheskoy konferencii. Sankt-Peterburg, 2021. pp. 210-213.

6. Maksimovich S.V. Sovremennye stroitel'nye materialy i tehnologii. Sbornik nauchnyh statej II mezhdunarodnoj konferencii. Pod redakciej M. A. Dmitrievoj. 2020. pp. 47-63.
 7. Spirin A.S. Dni studencheskoj nauki. Sbornik dokladov nauchno-tehnicheskoy konferencii po itogam nauchno-issledovatel'skih rabot studentov instituta stroitel'stva i arhitektury NIU MGSU. Moskva, 2021. pp. 335-337.
 8. Bolgov A.N. Rabota uzlov soprjazhenija kolonn iz vysokoprochnogo betona s perekrytiem v monolitnyh zdaniyah s ramno-svjazevoj sistemoj. [Operation of joints of high-strength concrete columns with ceilings in monolithic buildings with a frame-braced system]. Moskva, 2005. P.24.
 9. Abramjan S.G., Gnatjuk D.V. Internet-zhurnal Naukovedenie. 2017. T. 9. № 1. P. 83. URL: naukovedenie.ru/PDF/83TVN117.pdf
 10. Kulebjakin I.N., Toroshhin A.S. V sbornike: Obshhestvo. Nauka. Innovacii (NPK-2017). sbornik statej. Vserossijskaja ezhegodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija. Vjatskij gosudarstvennyj universitet. 2017. pp. 1385-1389.
 11. Zyrjanov P.A., Ivanova G.D., Gorevoj I.V., Ul'janov N.P. Opornyj uzel sborno-monolitnogo perekrytija karkasnogo zdaniya [Support unit of prefabricated-monolithic ceiling of a frame building]. Patent na poleznuju model'. Patentnoe vedomstvo: Rossija. 10.08.2011g. RU 107203 U1. URL: elibrary.ru/download/elibrary_38394136_43024575.pdf.
 12. Onufriev N.M. Usilenie zhelezobetonnyh konstrukcij promyshlennyh zdaniy i sooruzhenij [Strengthening reinforced concrete structures of industrial buildings and structures]. Strojizdat. Leningrad. 1965. P. 342.
 13. Polskoy P., Georgiev S., Muradyan V., Shilov A. V sbornike: MATEC Web of Conferences. 2018. pp. 02026. URL: pdfs.semanticscholar.org/6e4e/2e4f4eae3378fe348218df7f99d4e141f703.pdf
 14. Polskoy P., Mailyan D., Georgiev S., Muradyan V. V sbornike: E3S Web of Conferences. 2018. pp. 02060. URL: www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2018/01/e3sconf_2018_01_02060.pdf
-



researchgate.net/publication/323575585_The_strength_of_compressed_structures_with_CFRP_materials_reinforcement_when_exceeding_the_cross-section_size.

15. Pol'skoj P.P., Mailjan D.R., Georgiev S.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2014. № 4-1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2734

16. Pol'skoj P.P., Mailjan D.R., Georgiev S.V. Nauchnoe obozrenie. 2014. № 12-2. pp. 496-499.

17. Shiljaeva O.V., Muradjan V.A., Bljagoz A.M., Smorgunova M.V. Novye tehnologii. 2013. № 3. pp. 148-154.