

Методы расчётной оценки прочности железобетонных колонн, усиленных металло-композитными материалами.

С.В. Георгиев¹, А.И. Соловьёва¹, Д.Р. Маилян¹, З.А. Меретуков²

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

² Майкопский государственный технологический университет, г. Майкоп

Аннотация: В настоящей работе представлено всестороннее экспериментальное изучение инновационной методики усиления железобетонных колонн, основанной на совместном применении, стали и углеродного волокна. Представлено обоснование актуальности исследования посредством анализа существующих технологий усиления железобетонных элементов, подверженных сжатию, с акцентом на их ограничениях, учтенных при разработке нового подхода. Для оценки влияния масштабного фактора инновационного метода усиления на базе стали и композита спроектированы и испытаны на осевое и внецентренное сжатие до разрушения две группы образцов железобетонных колонн (общее количество – 46) различной гибкости. Ключевыми параметрами исследования являлись гибкость колонн, величина эксцентриситета нагрузки, наличие внутренней и внешней стальной арматуры, а также шаг и площадь поперечного сечения композитного усиления. Изучено воздействие перечисленных факторов на характер разрушения, предел прочности, максимальное напряжение и деформационные характеристики колонн, усиленных углепластиком - полимером, армированным углеродным волокном (carbon fiber reinforced polymer - CFRP). Результаты продемонстрировали, что железобетонные колонны, усиленные CFRP, при идентичных габаритах и одинаковых условиях нагружения, обладают различным приростом предельной прочности в сравнении с не усиленными аналогами. Пиковое напряжение возрастает с увеличением площади сечения стального усиления и снижается при увеличении шага композитных хомутов. Предельные осевые деформации усиленных образцов увеличиваются при уменьшении интервала между композитными хомутами. Различие в площади сечения композитного усиления не оказывает значительного влияния на несущую способность и предельные деформации усиленных железобетонных конструкций.

Ключевые слова: железобетон, колонна, металл, испытание, композитный материал, полимер армированный углеродным волокном, усиление.

Восстановление или увеличение несущей способности железобетонных колонн, а также продление срока их эксплуатации – важная задача, решаемая посредством усиления [1]. Существуют разнообразные подходы к решению этой задачи [2-4], однако использование композитных материалов часто оказывается более предпочтительным и технологичным [5], в отличие от традиционных методов, включая усиление стальными конструкциями. Современные методики усиления конструкций с применением композитов характеризуются рядом преимуществ [6-8], среди которых – быстрота и

простота монтажа [9], возможность проведения работ без прекращения эксплуатации здания и высокая прочность в сочетании с небольшим весом [10].

При проектировании методов усиления железобетонных колонн инженеры должны выбирать оптимальный способ, учитывая тип нагрузки [11], конструкцию и требования расчетов по предельным состояниям. Основная сложность заключается в точном расчете необходимого усиления (например, оборачивание или добавление арматуры) и обеспечении надежного соединения нового усиления с существующей конструкцией.

Часто не учитывается специфика поведения прямоугольных колонн под нагрузкой, в частности, концентрация напряжений в углах. Прямоугольное [12-14] или квадратное сечение [15-17] при усилении требует особого подхода из-за отличий от круглых сечений [18-20], что влияет на распределение нагрузок [21-23].

Сжатые гибкие железобетонные колонны при расчёте и проектировании требуют учета их склонности к продольному прогибу и выполнения мероприятий по снижению влияния изгиба, что сложно при использовании металлических обойм.

Одним из главных недостатков композитного усиления полимером, армированным углеродным волокном (carbon fiber reinforced polymer CFRP), является неполное обжатие всего сечения железобетонной колонны, что снижает эффективность материала и увеличивает его площадь и стоимость. В отличие от круглых колонн, усиление прямоугольных конструкций композитами осложнено неравномерным распределением материала из-за наличия углов [24, 25]. Это уменьшает прочность и увеличивает потребность в количестве композитного материала, что повышает общую стоимость усиления [26, 27].

Решением данных проблем является металло-композитное усиление, где металлы используются в качестве продольной арматуры, а композиты – в качестве поперечных хомутов.

2. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В рамках проведённого исследования было изготовлено 46 бетонных и железобетонных стоек. Экспериментальная часть была условно разделена на два этапа.

На первом этапе были испытаны две группы образцов, включающие 13 и 12 стоек соответственно. Обе группы имели идентичные размеры, но отличались наличием внутренней арматуры. Вторым этапом включал испытания также двух групп колонн, состоящих из 11 и 10 образцов. Разделение на серии на втором этапе исследования проводилось с целью оценки эффективности усиления металло-композитными материалами конструкций с малой ($\lambda_h=10$) и большой ($\lambda_h=20$) гибкостью. На данном этапе все опытные образцы подвергались испытаниям при трёх значениях эксцентриситета приложения нагрузки ($e_0=0$; $e_0=2$ см; $e_0=4$ см) в каждой серии. Это было сделано для понимания работы металло-композитного усиления колонн, подвергаемых осевому сжатию, внецентренному сжатию с небольшим эксцентриситетом приложения нагрузки, не превышающим границы ядра сечения, и с большим эксцентриситетом, выходящим за ядро сечения.

Таким образом, масштабность исследования заключалась в оценке эффективности функционирования металло-композитного усиления для бетонных и железобетонных образцов с гибкостью $\lambda_h=4$, $\lambda_h=10$ и $\lambda_h=20$, при различных значениях эксцентриситета приложения нагрузки. Это позволяло определить напряженно-деформированное состояние колонн при сложном напряженном состоянии.

Принимая во внимание инновационный характер разработанной

методики металло-композитного усиления, не имеющей аналогов, авторами был оформлен патент на изобретение [28].

В каждой серии обоих этапов испытаний изменялись три параметра усиления, включающие различные варианты внешнего металлического усиления, толщину композитных хомутов и расстояние между ними.

Для создания опытных образцов применялись следующие компоненты: бетонная смесь, стальная арматура, стальной профиль, углеродная ткань и углеродные ламинаты, а также клеевой состав, предназначенный для фиксации внешнего усиления. Детальная информация о процессе производства бетона и свойствах его компонентов, таких как песок, цемент и щебень, а также характеристики стальной и композитной арматуры, подробно изложены в ранее опубликованной работе [29]. Здесь приводятся только ключевые параметры.

При производстве образцов применялся тяжелый бетон, показатели прочности которого указаны в Таблицах 1 и 2.

В первом этапе конструирования использовалась продольная арматура класса А500 диаметром 10 мм, а во втором этапе – диаметром 12 мм, соответственно. Поперечное армирование на обоих этапах выполнялось гладкой арматурой класса В500. В качестве композитного материала использовалась углеродная ткань, характеризующаяся пределом прочности углеродного волокна на растяжение в 4900 МПа.

Процесс создания и усиления колонн осуществлялся следующим образом. Все колонны, предназначенные для первой и второй фаз проекта, были произведены в университетской лаборатории ДГТУ. При каждой укладке бетона изготавливались двенадцать контрольных образцов в форме кубов размерами 10х10 см и 15х15см.

Усиление образцов проводилось в два этапа. На первом этапе выполнялись подготовительные работы, включающие в себя приклеивание

металлических уголков к углам колонн. Перед нанесением клея поверхность колонн обрабатывалась шлифовальным инструментом до обнажения щебня, затем очищалась от пыли и покрывалась специальным грунтовочным составом. Металлические уголки фиксировались с использованием эпоксидного клея, аналогичного тому, что применяется для приклеивания угле-ламинатов. Второй этап усиления состоял в приклеивании композитных бандажей и углеламинатов.

Методика испытания опытных образцов принята следующей. Испытания колонн проводились с использованием двух прессов мощностью 2500 кН и 5000 кН. Перед каждым испытанием на опытных образцах монтировались индикаторы для фиксации деформаций бетона и композитных хомутов, а также прогибомеры для измерения прогиба, которые применялись для колонн, тестируемых во время второй стадии испытания. Для выявления локальных деформаций применялись тензодатчики, которые прикреплялись как к бетону, так и к композитам.

Испытания выполнялись путем постепенного увеличения нагрузки до момента разрушения. Каждый шаг увеличения составлял примерно одну десятую от теоретической пиковой нагрузки и поддерживался в течение 10-15 минут.

Всем прототипам был присвоен уникальный идентификационный шифр. Информацию о кодировке образцов можно найти в соответствующей публикации [30].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Все образцы в процессе изготовления и усиления находились в идентичных условиях до проведения эксперимента. На начальном этапе приложения нагрузки в бетонных элементах и компонентах усиления каких-либо заметных изменений не отмечалось. При достижении уровня нагрузки, составлявшего приблизительно 80% от предельного, в композитных хомутах

наблюдалось начало выпучивания углеродных нитей. Разрушение происходило быстро и сопровождалось резким и громким звуком взрыва, а также разрывом одного из композитных хомутов, чаще всего располагавшейся в центре конструкции. Бетон под и над поврежденным хомутом разрушался. Металлические уголки, расположенные под обоймой, изгибались в стороны.

В таблицах 1 и 2 представлены основные результаты испытания всех бетонных и железобетонных колонн.

Таблица 1. Результаты I этапа испытаний I и II серий колонн

| Порядковый номер | Шифр колонн | \overline{R}_b , МПа | Прочность колонн, N_{exp} , кН | Стальная обойма | | Композитная обойма | | Композитная и стальная обойма | |
|------------------|--|------------------------|----------------------------------|-------------------|----------------------|--------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------|
| | | | | $N_1^{теор}$, кН | $N_1^{теор}/N_{exp}$ | $N_2^{теор}$, кН | $N_2^{теор}/N_{exp}$ | $N_3^{теор}$, кН | $N_3^{теор}/N_{exp}$ |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1. | PE ₁ | 41,8 | 700 | - | - | - | - | - | - |
| 2. | PE ₂ | 41,8 | 702,5 | - | - | - | - | - | - |
| 3. | PUM ₁ | 44,6 | 737,5 | - | - | - | - | - | - |
| 4. | PUM ₁ -X ₁ ¹ | 41,8 | 812,5 | 896,4 | 1,10 | 759,8 | 0,94 | 971,3 | 1,20 |
| 5. | PUM ₁ -X ₁ ² | 44,6 | 952,5 | 939,4 | 0,99 | 845,7 | 0,89 | 1057,2 | 1,11 |
| 6. | PUM ₁ -X ₂ ² | 44,6 | 1100,0 | 939,4 | 0,85 | 877,9 | 0,80 | 1089,4 | 0,99 |
| 7. | PUM ₁ -X ₂ ² H ² | 41,8 | 1015,0 | 896,4 | 0,88 | 834,8 | 0,82 | 1046,3 | 1,03 |
| 8. | PUM ₂ -X ₁ ¹ | 41,8 | 800,0 | 813,6 | 1,02 | 732,4 | 0,92 | 861,1 | 1,08 |
| 9. | PUM ₂ -X ₁ ² | 46,0 | 810,0 | 878,0 | 1,08 | 809,4 | 1,00 | 938,1 | 1,16 |
| 10. | PUM ₂ -X ₃ ¹ | 41,8 | 900,0 | 813,6 | 0,90 | 756,8 | 0,84 | 885,5 | 0,98 |
| 11. | PUM ₂ -X ₂ ² | 46,0 | 852,5 | 878,0 | 1,03 | 844,4 | 0,99 | 973,1 | 1,14 |
| 12. | PUM ₂ -X ₂ ² | 46,0 | 1072,5 | 878,0 | 0,82 | 869,5 | 0,81 | 998,2 | 0,93 |
| 13. | PUM ₂ ² -X ₂ ² | 41,8 | 900,0 | 813,6 | 0,90 | 745,0 | 0,83 | 873,7 | 0,97 |
| 14. | KE ₁ | 46,0 | 962,5 | - | - | - | - | - | - |
| 15. | KE ₂ | 46,0 | 955,5 | - | - | - | - | - | - |
| 16. | KUM ₂ -X ₁ ² | 44,6 | 1125,0 | 982,2 | 0,87 | 948,6 | 0,84 | 1077,3 | 0,96 |
| 17. | KUM ₂ -X ₂ ² | 44,6 | 1200,0 | 982,2 | 0,96 | 973,7 | 0,95 | 1102,4 | 1,08 |
| 18. | KUM ₁ | 44,6 | 712,5 | - | - | - | - | - | - |
| 19. | KUM ₁ -X ₁ ² | 44,6 | 1100,0 | 1065,0 | 0,97 | 971,3 | 0,88 | 1182,8 | 1,08 |
| 20. | KUM ₁ -X ₂ ² | 46,0 | 1200,0 | 1086,4 | 0,91 | 1024,9 | 0,85 | 1236,4 | 1,03 |
| 21. | $\sum \Delta^2$ | | | 0,13 | | 0,25 | | 0,12 | |

Для анализа полученных расчетных данных применялись два основных показателя: разница между теоретическим значением прочности стоек и



результатами экспериментов $\Delta_i = N_i^{theor} / N_i^{exp}$, взятая отдельно для каждой стойки, а также суммарное среднеквадратическое отклонение, определяемое согласно следующей формуле $\sum \Delta^2 = \sum_{i=1}^n (1 - N_i^{theor} / N_i^{exp})^2$

Таблица 2. Результаты II этапа испытаний I и II серий

| № | Шифр | \overline{R}_b , МПа | Прочность кН, N_{exp}^{ult} | Прогибы мм, f_{exp}^{max} | Предельные деформации | | Коэффициент усиления при прямом сопоставлении, k_f |
|----|--|---------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--|----------------------------------|---|
| | | | | | $\varepsilon_{b1} \cdot 10^{-3}$ (ε_{br}) | $\varepsilon_{e2} \cdot 10^{-3}$ | |
| 1 | АК | 28,0 | 1340,0 | 1,150 | 1,26 | 1,41 | 1,00 |
| 2 | АКУ-Х ₁ | 23,2 | 1200,0 | 0,275 | 2,59 | 2,93 | 1,08 |
| 3 | АКУМ ₁ -Х ₁ | 23,2 | 1486,0 | 1,485 | 3,34 | 3,31 | 1,34 |
| 4 | АГ | 39,2 | 800,0 | 14,135 | 3,10 | 0,49 | 1,00 |
| 5 | АГУ-Х ₁ | 38,4 | 880,0 | 19,105 | 4,11 | 0,49 | 1,12 |
| 6 | АГУМ ₁ -Х ₁ | 34,0 | 1506,0 | 3,760 | 0,67 | 2,40 | 2,17 |
| 7 | БК | 20,3 | 834,0 | 6,475 | 0,06 | 2,75 | 1,00 |
| 8 | БКУ-Х ₁ | 20,3 | 785,0 | 7,285 | -0,52 | 3,83 | 0,94 |
| 9 | БКУМ ₁ -Х ₁ | 20,3 | 1104,1 | 5,535 | -0,36 | 2,31 | 1,32 |
| 10 | БКУ-Х ₁ L | 20,3 | 710,0 | 11,42 | -1,65 | 7,5 | 0,90 |
| 11 | БКУМ ₁ ² -Х ₁ L | 20,3 | 950,0 | 5,977 | 0,21 | 1,77 | 1,14 |
| 12 | ВГ | 30,6 | 415,0 | 20,485 | -1,2 | 2,04 | 1,00 |
| 13 | ВГУ-Х ₁ | 30,0 | 404,5 | 15,255 | -0,33 | 2,23 | 0,97 |
| 14 | ВГУМ ₁ ² -Х ₁ | 34,2 | 1010,0 | 7,885 | 0,17 | 1,69 | 2,18 |
| 15 | ВГУМ ₁ ² -Х ₁ L | 31,3 | 850,0 | 27,645 | -1,04 | 2,87 | 2,00 |
| 16 | ВК | 42,6 | 430,0 | 9,15 | -2,20 | 3,30 | 1,00 |
| 17 | ВКУ-Х ₁ | 42,6 | 489,0 | 10,215 | -2,90 | 4,21 | 1,14 |
| 18 | ВКУМ ₁ ² -Х ₁ L | 28,0 | 768,2 | 14,430 | -1,87 | 7,14 | 2,74 |
| 19 | ВГ | 45,2 | 250,0 | 33,725 | -2,65 | 2,5 | 1,00 |
| 20 | ВГУ-Х ₁ | 45,2 | 290,0 | 31,445 | -2,6 | 2,51 | 1,16 |
| 21 | ВГУМ ₁ ² -Х ₁ L | 34,2 | 603,4 | 29,200 | -3,22 | 2,88 | 3,19 |
| 22 | КЕС | 46,0 | 960,0 | - | 1,02 | | 1,00 |
| 23 | КУ | 44,6 | 1190,0 | - | 3,35 | | 1,24 |
| 24 | КУН | 44,6 | 1400,0 | - | 10,04 | | 1,46 |
| 25 | ПУС | 46,0 | 2200,0 | - | 18,01 | | 3,14 |
| 26 | КУС | 46,0 | 2500,0 | - | 21,06 | | 2,61 |

Кривые «напряжение–деформация»

Для определения реакции композитных материалов и усиленного бетона на нагрузку, были наклеены тензодатчики, по данным которых построены графики, где наглядно показана зависимость между напряжением (внутренним сопротивлением) и деформацией (изменением формы). Локальные тензодатчики применялись для измерения деформаций в конкретных точках, что позволило построить графики деформаций и оценить свойства материалов, такие как предел прочности, предел текучести, пластичность.

В зонах концентрации напряжений на композитные обоймы монтировались датчики деформаций. Данные о деформациях, полученные посредством тензометрических измерений, использовались для оценки напряжений, возникающих в железобетонных элементах в ходе испытаний. С учетом анизотропии композитных материалов, датчики размещались в центральной части обойм с ориентацией вдоль направления волокон. Поверхность бетона под датчики сопротивления подготавливалась для обеспечения надежной адгезии, затем наносился специализированный адгезив, и осуществлялось подключение к измерительному комплексу.

На каждом образце устанавливалось от пяти до десяти тензодатчиков. В связи с масштабностью исследования, в данной статье представлены графики зависимости напряжения от деформации для наиболее характерных образцов. Кривые «напряжение–деформация» для бетонных и железобетонных колонн гибкостью $\lambda_n = 4$, усиленных металло-композитными материалами представлены на рис. 1, рис. 4, рис. 6. Схемы расположения датчиков для конкретных образцов и соответствующие графики приведены на рис. 2, рис. 3 и рис. 5.

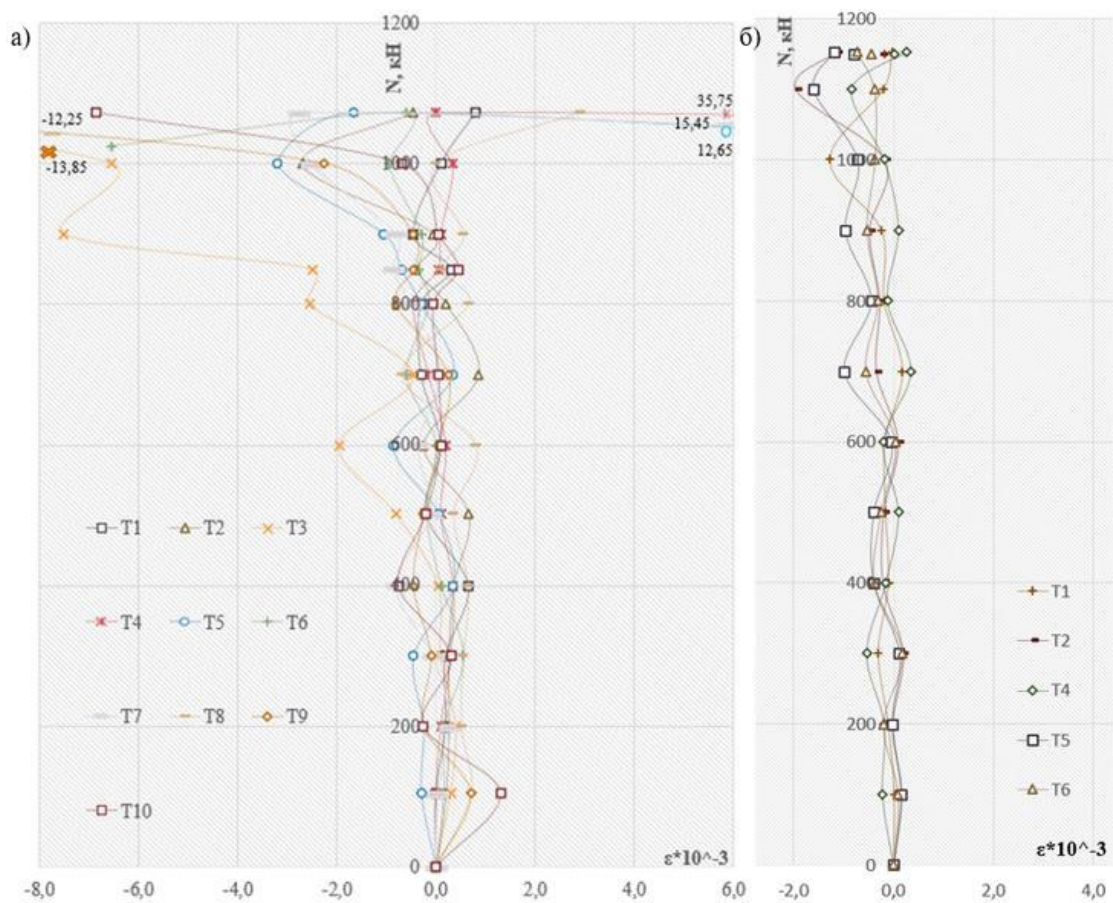


Рис.1. Графики деформаций тензодатчиков: а) $PUM_2 - X_2^2$; б) $KUM_2 - X_1^2$.

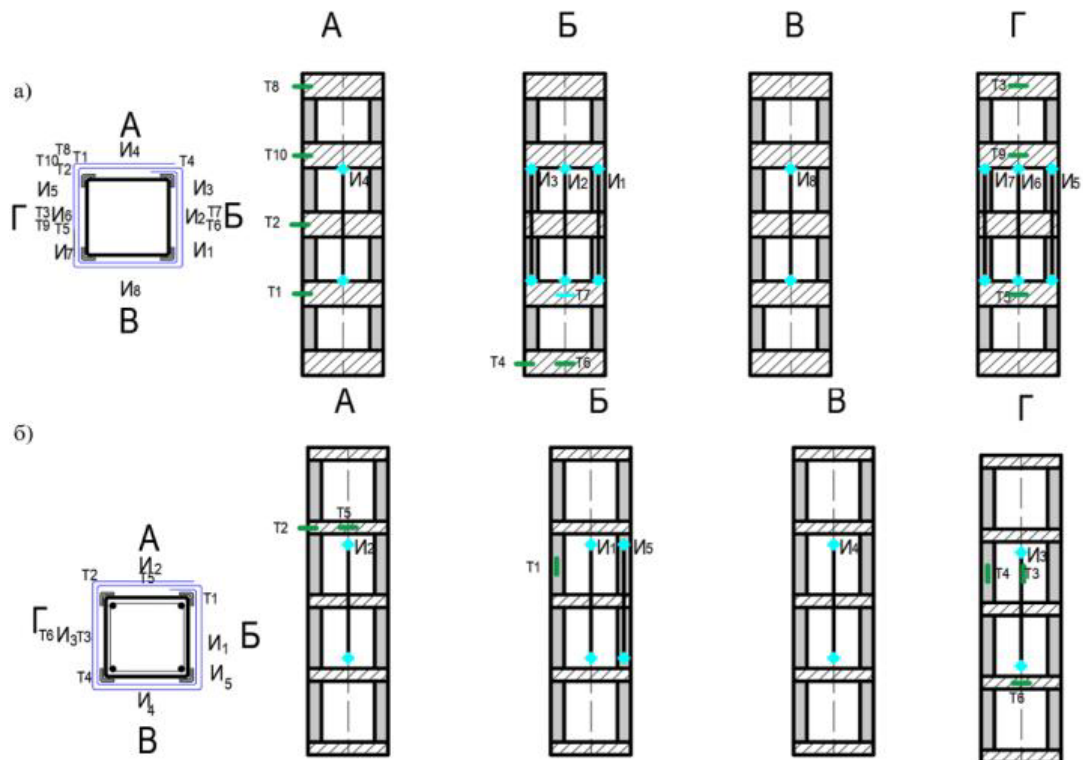


Рис. 2. Схемы расположения тензодатчиков: а) $PUM_2 - X_2^2$; б) $KUM_2 - X_1^2$.

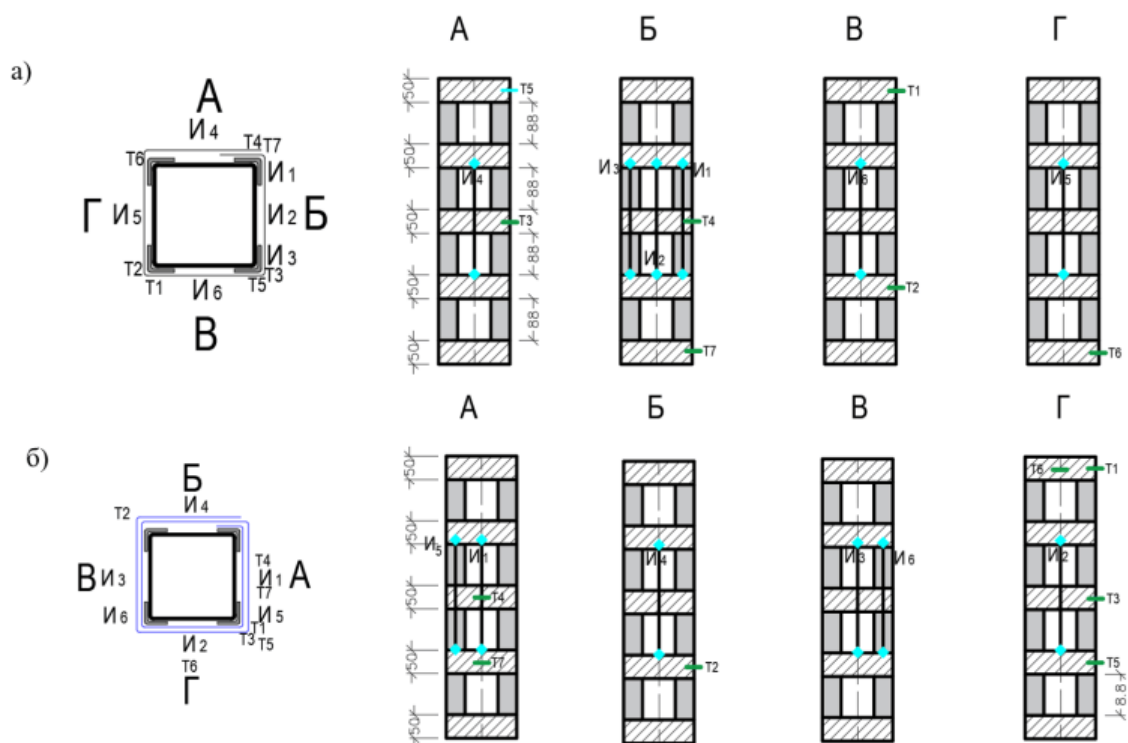


Рис. 3. Схемы расположения тензодатчиков: а) $PUM_1 - X_2^1$; б) $PUM_1 - X_2^2$.

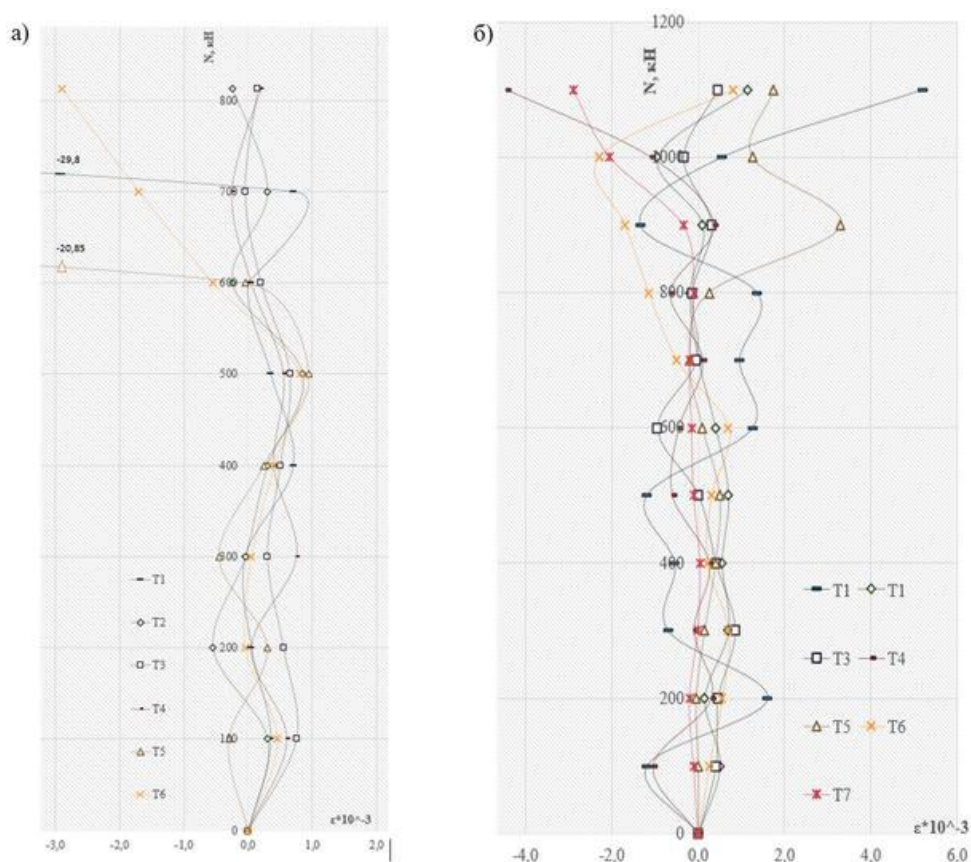


Рис.4. Графики деформаций тензодатчиков: а) $PUM_1 - X_2^1$; б) $PUM_1 - X_2^2$.

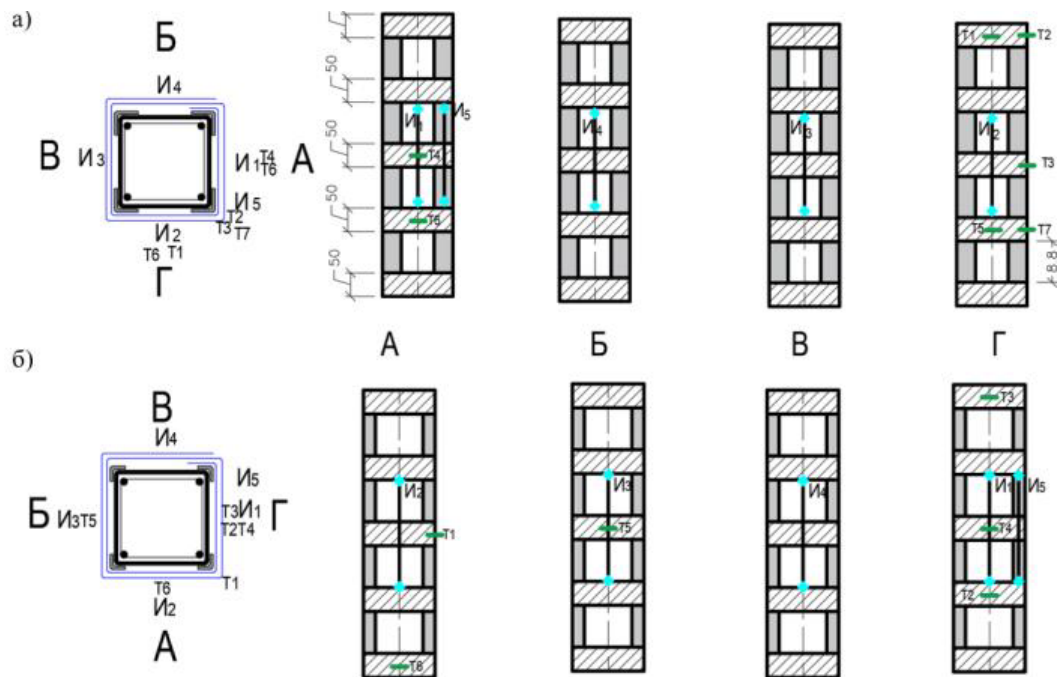


Рис. 5. Схемы расположения тензодатчиков: а) $KUM_1 - X_2^2$; б) $KUM_2 - X_2^2$.

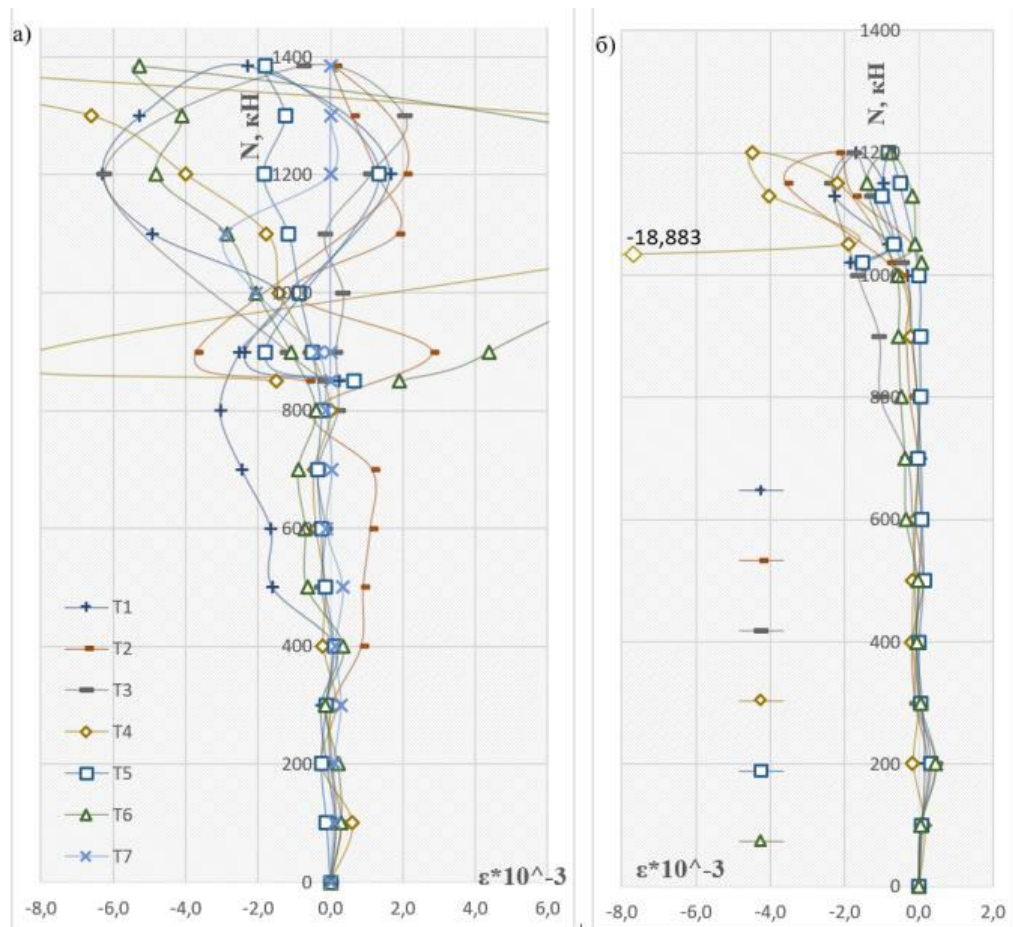


Рис.6. Графики деформаций тензодатчиков: а) $KUM_1 - X_2^2$; б) $KUM_2 - X_2^2$.

Анализ кривых "напряжение-деформация" показал, что на начальных этапах приложения нагрузки влияние композитных обоем незначительно. Деформации демонстрируют колебательный характер. Это объясняется тем, что при сжатии конструкции происходит выпучивание обоем и их сжатие вместе с бетоном в продольном направлении. Однако при достижении предельных нагрузок композитные обоймы начинают активно работать, достигая средних относительных деформаций порядка $\varepsilon=0,004$, что соответствует напряжениям приблизительно 1000 МПа. На заключительных этапах эксперимента деформации в обоймах, расположенных в зоне разрушения, достигают значений до $\varepsilon=0,15$, а напряжения – до 3500 МПа.

В большинстве испытанных образцов в момент разрушения наблюдался разрыв одного из композитных бандажей, что подтверждало достижение максимальных напряжений в композитном материале.

Таким образом, композитные обоймы выполняют двойную функцию: обеспечивают стабильность стальных уголков и служат удерживающей композитной системой, ограничивая развитие продольных деформаций в бетоне при нагружении.

Методы расчётной оценки

Для автоматизации расчетов в Excel были разработаны алгоритмы, опирающиеся на положения СП 63.13330 "Бетонные и железобетонные конструкции. Базовые требования" и СП 164.1325800.2014 "Укрепление железобетонных конструкций с использованием композитных материалов".

Для разработки расчетной методики было проведено сопоставление двух существующих подходов к усилению: с использованием металлической обоймы и с применением композитной обоймы. Поскольку все образцы подвергались двойному усилению, ключевым моментом стало отдельное определение влияния композитных хомутов и металлических уголков на повышение прочности колонн.

Ниже представлены расчетные формулы: вариант один – для колонн, усиленных металлической обоймой (1), вариант два – для колонн, усиленных исключительно композитными материалами (2), и вариант три – для колонн с комбинированным металло-композитным усилением (3).

Расчетная формула усиления ж/б колонны стальной обоймой:

$$N_{ult} = m * \varphi * [R_b * A_b + R_{sc} * A_{s,tot} + \varphi_1 * R_{sc,ad} * A_{sad,tot}] \quad (1)$$

Расчетная формула усиления железобетонной колонны поперечной композитной обоймой:

$$N_{ult} = m * \varphi * [R_{b3} * A_b + R_{sc} * A_{s,tot}], \text{ где } R_{b3} = k_{ef} * k_b * R_f * \mu_f \quad (2)$$

Расчетная формула усиления железобетонной колонны поперечной композитной и стальной обоймой:

$$N_{ult} = m * \varphi * [R_{b3} * A_b + R_{sc} * A_{s,tot} + \varphi_1 * R_{sc,ad} * A_{sad,tot}] \quad (3)$$

Сопоставление экспериментальных данных о прочности с теоретическими значениями привело к выводу о необходимости интеграции двух методов и проведения расчетов по формуле 3.

Результаты теоретических расчетов прочности колонн и их сравнение с экспериментальными данными по всем трем методам сведены в таблице 1. Для анализа результатов эксперимента было вычислено среднеквадратическое отклонение, значения которого также представлены в таблице для каждого из трех методов усиления.

Анализ графиков деформаций зафиксированных тензодатчиками показывает, что стандартные методы вычислений не принимают во внимание воздействие композитного усиления на колебание величины относительной деформации бетона. Опираясь на эмпирические данные, полученные в ходе испытаний, авторами предложена модификация существующей нормативной

формулы для определения $\varepsilon_{b3,exp}$, а именно, введение корректирующего коэффициента k_{f1} .

Для повышения точности вычислений рекомендуется использовать в уравнении коэффициент k_{f1} , который учитывает шаг хомутов и рассчитывается по предложенной формуле $k_{f1} = 1,25 \cdot k_e - 0,5$.

4. ВЫВОДЫ

В результате проведённой научной работы были сделаны следующие выводы:

- Комплексные исследования усиленных металло-композитных железобетонных колонн позволили получить новые экспериментальные данные о прочностных и деформационных характеристиках. При этом учитывались такие параметры, как гибкость конструкций, степень внецентренного приложения нагрузки, тип и специфика усиления.
- Экспериментально подтверждена эффективность применения металла и композитного материала с ориентацией волокон в поперечном направлении для усиления железобетонных конструкций.
- Анализ данных, полученных в ходе экспериментальных исследований прочности и деформативности, показал, что использование только металлических элементов, закреплённых на углах колонны, без дополнительных композитных хомутов, не приводит к значительным улучшениям.
- Анализ полученных данных о прочности указывает на то, что как металлические уголки, так и композитный материал, расположенный в поперечном направлении (в форме хомутов), способствуют увеличению прочности.
- Усиление зоны сжатия бетона продольным армированием, достигаемое путём установки металлических уголков поверх бетона,

наиболее эффективно для колонн с высокой гибкостью, подверженных нагрузкам с большим эксцентриситетом.

- Металло-композитное усиление демонстрирует надёжность на всех этапах нагрузки, обеспечивая совместную работу металла, композитного материала, бетона и внутреннего арматурного каркаса колонн до момента разрушения.

- Полученные результаты позволят выявить закономерности и разработать расчётные методики для дальнейшего проектирования усиления железобетонных и бетонных конструкций с использованием металло-композитного метода.

- Металлические уголки демонстрируют надёжное сцепление с бетоном, исключая возможность их отрыва. Однако, использование для усиления только металла без композитных хомутов не даёт ожидаемого эффекта.

- Разработаны схемы усиления для трёх различных степеней эксцентриситета приложения нагрузки.

- Разработана методика расчёта усиленных железобетонных конструкций на основе нормативных методик, а также предложены методы определения предельной относительной деформации усиленного бетона и сопротивления бетона сжатию.

- На основании анализа кривых "напряжение-деформация" можно утверждать, что композитные хомуты выступают в роли конструктивных элементов, поддерживающих уголки, и одновременно являются ограничивающей поперечные деформации системой.

Статья подготовлена в процессе выполнения диссертационного исследования на соискание учёной степени кандидата наук при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ) (Соглашение № 24-

29-00790), для выполнения научно-исследовательской работы «Новые технологии усиления железобетонных конструкций композитными материалами и методы их расчётной оценки».

Литература

1. Мареева, О. В., Кловский А. В. Оценка эффективности способов усиления железобетонных колонн при реконструкции // Природообустройство. – 2017. – № 2. – с. 33-41.
2. Курицына, А. М., Камчаткина В. М. Сравнительная оценка влияния разных видов усиления на несущую способность железобетонной колонны // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2024. – № 8(788). – с. 22-31.
3. Кибирева Ю. А., Астафьева Н. С. Применение конструкций из сталежелезобетона // Экология и строительство. – 2018. – № 2. – С. 27-34.
4. Иванов Г.П., Садретдинов М.А. Дефекты железобетонных стоек арочных мостов с ездой поверху из монолитного железобетона, способы их ремонта и усиления // Техника и технология транспорта. 2019. № 11. С. 40-47.
5. Ванус Д. С., Щербакова П. И., Мельникова И. В. Комплексное исследование методов усиления железобетонных конструкций // Components of Scientific and Technological Progress. – 2023. – № 5(83). – С. 6–11.
6. Николаев С. В., Сердюк А. И., Хаютин Ю. Г., Шрейбер А. К. О назначении нормативных характеристик композитных материалов для усиления строительных конструкций внешним армированием // Строительные материалы. 2018. №7. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-761-7-8-11.
7. Неволин Д. Г., Смердов Д. Н., Смердов М. Н. Усиление железобетонных конструкций зданий и сооружений различного назначения

полимерными композиционными материалами. — Екатеринбург : Уральский государственный университет путей сообщения, 2017. — 152 с.

8. Хишмах М., Маилян Д. Р., Польской П. П., Блягоз А. М. Прочность и деформативность изгибаемых элементов из тяжелого бетона, армированных стеклопластиковой и стальной арматурой // Новые технологии, 2012, №4, С. 147-152.

9. Чернавин, В. Ю. , Кенжебеков С. Б. Методы применения композитных материалов при ремонте каменных и железобетонных конструкций // Научные горизонты. – 2022. – № 5(57). – С. 87-93.

10. Георгиев С. В., Маилян Д. Р., Соловьева А. И. К определению наиболее эффективного способа усиления железобетонных колонн при разных уровнях нагружения // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. – 2024. – Т. 3, № 1.– DOI: 10.23947/2949-1835-2024-3-1-7-14.

11. Морина Е. А., Макаров А. И., Цыгвинцев И. В., Матирная П. И. Обследование и усиление железобетонных сооружений на примере угольной башни // Синергия Наук. – 2017. – № 17. – С. 437-461.

12. Gu Xianglin, Li Yupeng, Zhang Weiping. Compressive stress-strain relationship of concrete confined by carbon fiber composite sheets // Structural Engineers, 2006, 22 (2): 54. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0159.2006.02.012.

13. Lam L., Teng J. G. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete in rec-tangular columns // Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2003, 13(22): 1151. DOI: 10.1177/0731684403035429.

14. Wu Gang, Lyu Zhitao. Study on the stress-strain relationship of FRP-confined concrete rec-tangular columns // Journal of Building Structures, 2004, 25 (3): 104. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6869.2004.03.016.

15. Teng J. G., Huang Y. L., Lam L., Ye L. P. Theoretical model for fiber reinforced polymer confined concrete // Journal of Composites for Construction, ASCE, 2007, 11 (2): 208. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2007)11:2(201).
16. Jing Denghu, Cao Shuangyin. A model for calculating the axial stress strain curve of square-section concrete column confined by FRP // China Civil Engineering Journal, 2005, 38 (12): 35. DOI: 10.3321/j.issn:1000-131X.2005.12.006.
17. Pan Jinglong, Wang Yuguang, Lai Wenhui. Effect of sectional shape of concrete column on the bearing capacity of short columns wrapped with FRP // Industrial Construction, 2001, 31(6): 18. DOI: 10.3321/j.issn:1000-8993.2001.06.005.
18. Ключев С. В., Ключев А. В., Аюбов Н. А., Федюк Р. С., Левкина Е. В. Конечно-элементное проектирование и анализ устойчивых моно- и гибридно-армированных волокнистых геополимеров. Перспективные инженерные исследования (Ростов-на-Дону). 2025; №25(3). URL: doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-171-185.
19. Xiao Y., Wu H. Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets // Journal of Materials in Civil Engineering, 2000, 12(2): 144. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2000)12:2(139).
20. Wu Gang, Wu Zhishen, Lyu Zhitao. Study on the stress-strain relationship of FRP-confined concrete circular column with a strain-softening response // China Civil Engineering Journal, 2006, 39 p.
21. Георгиев С. В., Маилян Д. Р., Соловьева А. И. К определению наиболее эффективного способа усиления железобетонных колонн при разных уровнях нагружения // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. – 2024. – Т. 3, № 1.– DOI: 10.23947/2949-1835-2024-3-1-7-14.

22. Георгиев С. В., Маилян Д. Р., Соловьева А. И. Исследование эффективности композитного продольного и поперечного усиления при увеличении прочности и жесткости гибких внецентренно сжатых железобетонных стоек // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. – 2023. – Т. 2, № 4. – DOI: 10.23947/2949-1835-2023-2-4-7-18.

23. Георгиев С. В., Маилян Д. Р., Соловьева А. И. Новый метод усиления железобетонных сжатых колонн, основанный на использовании бетона и композита // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. – 2022. – Т. 1, № 2. – DOI: 10.23947/2949-1835-2022-1-2-4-12.

24. Wu G., Wu Z., Lu Z. Stress-strain relationship for frp-confined concrete prisms // Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures, 2003: pp. 561-570.

25. Toutanji H., Deng Yong. Strength and durability performance of concrete axially loaded members confined with AFRP composite sheets // Composites: Part B, 2002, 33(4): 257. DOI: 10.1016/S1359-8368(02)00016–1.

26. Youssef M. N., Feng M. Q., Mosallam A. S. Stress-strain model for concrete con-fined by FRP composites // Composites: Part B, 2007, 38 (5/6): 623. DOI: 10.1016/j.compositesb.2006.07.020.

27. Георгиев С. В., Соловьева А. И., Чэ С., Сизен Н. О. Исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных внецентренно сжатых конструкций, усиленных композитными материалами // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2024/9710

28. Георгиев С. В., Маилян Д. Р., Соловьёва А. И., заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Донской государственный технический университет",

ДГТУ. Способ усиления железобетонной колонны прямоугольного или квадратного сечения. Патент. № RU 2796699 С1. Российская Федерация. МПК E04G 23/02: № 2022132862: заявл. 14.12.2022: опубл. 29.05.2023; Бюл. № 16. URL: elibrary.ru/download/elibrary_54053597_43321206.PDF.

29. Georgiev S.V., Mailyan D.R., Solovyeva A.I. The high-tech and effective method of strengthening reinforced concrete structures with CFRP materials with preliminary modification of the cross-section shape // Construction Materials and Products. 2024. Vol. 7, No 6. DOI: 10.58224/2618-7183-2024-7-6-7

30. Георгиев С. В., Маилян Д. Р., Соловьёва А. И., Меретуков З.А. Влияние металло-композитного усиления на работу железобетонных колонн при различных эксцентриситетах внешней силы // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2025/10545

References

1. Mareeva O. V., Klovskiy A. V. Prirodoobustroystvo. 2017. № 2. Pp. 33–41.
2. Kuritsyna A. M., Kamchatkina V. M. Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo. 2024. №. 8(788). Pp. 22–31.
3. Kibireva Yu. A., Astaf'eva N. S. Ekologiya i stroitel'stvo. 2018. № 2. Pp. 27–34.
4. Ivanov G.P., Sadretdinov M.A. Tekhnika i tekhnologiya transporta. 2019. № 11. Pp. 40-47.
5. Vanys D. S., Shcherbakova P. I., Mel'nikova I. V. Components of Scientific and Technological Progress. 2023. No. 5(83). Pp. 6–11.
6. Nikolaev S. V., Serdyuk A. I., Khayutin Yu. G., Shreiber A. K. Stroitelnie materialy. 2018. № 7. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-761-7-8-11.
7. Nevolin D. G., Smerdov D. N., Smerdov M. N. Stroitel'nye materialy. 2017. 152 P.

8. Khishmakh M., Mailyan D. R., Pol'skoy P. P., Blyagoz A. M. *Novye tekhnologii*, 2012, № 4, Pp. 147–152.
 9. Chernavin V. Yu., Kenzhebekov S. B. *Nauchnye gorizonty*. 2022. №. 5(57). Pp. 87–93.
 10. Georgiev S. V., Mailian D. R., Solov'eva A. I. *Sovremennye tendentsii v stroitel'stve, gradostroitel'stve i planirovke territoriy*. 2024. Vol. 3, №1. DOI: 10.23947/2949-1835-2024-3-1-7-14.
 11. Morina E. A., Makarov A. I., Tsygvintsev I. V., Matirnaya P. I. *Sinergiya Nauk*. 2017. №17. Pp. 437–461.
 12. Gu Xianglin, Li Yupeng, Zhang Weiping. *Structural Engineers*, 2006, 22 (2): 54. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0159.2006.02.012.
 13. Lam L., Teng J. G. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2003, 13(22): 1151. DOI: 10.1177/0731684403035429.
 14. Wu Gang, Lyu Zhitao. *Journal of Building Structures*, 2004, 25 (3): 104. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6869.2004.03.016.
 15. Teng J. G., Huang Y. L., Lam L., Ye L. P. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 2007, 11 (2): 208. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2007)11:2(201).
 16. Jing Denghu, Cao Shuangyin. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38 (12): 35. DOI: 10.3321/j.issn:1000-131X.2005.12.006.
 17. Pan Jinglong, Wang Yuguang, Lai Wenhui. *Industrial Construction*, 2001, 31(6): 18. DOI: 10.3321/j.issn:1000-8993.2001.06.005.
 18. Klyuev S. V., Klyuev A. V., Ayubov N. A., Fedyuk R. S., Levkina E. V. *Perspektivnye inzhenernye issledovaniya (Rostov-na-Donu)*, 2025, t. 25, № 3. URL: doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-171-185.
 19. Xiao Y., Wu H. *Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets*, 2000, 12(2): 144. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2000)12:2(139).
-

20. Wu Gang, Wu Zhishen, Lyu Zhitao. China Civil Engineering Journal, 2006, 39 P.
 21. Georgiev S. V., Mailyan D. R., Solov'eva A. I. Sovremennye tendentsii v stroitel'stve, gradostroitel'stve i planirovke territoriy, 2024, t. 3, № 1. DOI: 10.23947/2949-1835-2024-3-1-7-14.
 22. Georgiev S. V., Mailyan D. R., Solov'eva A. I. Sovremennye tendentsii v stroitel'stve, gradostroitel'stve i planirovke territoriy, 2023, t. 2, № 4. DOI: 10.23947/2949-1835-2023-2-4-7-18.
 23. Georgiev S. V., Mailyan D. R., Solov'eva A. I. Sovremennye tendentsii v stroitel'stve, gradostroitel'stve i planirovke territoriy, 2022, t. 1, № 2. DOI: 10.23947/2949-1835-2022-1-2-4-12.
 24. Wu G., Wu Z., Lu Z. Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures, 2003: pp. 561-570.
 25. Toutanji H., Deng Yong. Composites: Part B, 2002, 33(4): 257. DOI: 10.1016/S1359-8368(02)00016-1.
 26. Youssef M. N., Feng M. Q., Mosallam A. S. Composites: Part B, 2007, 38 (5/6): 623. DOI: 10.1016/j.compositesb.2006.07.020.
 27. Georgiev S. V., Solov'eva A. I., Che S., Sizen N. O. Inzhenernyj vestnik Dona. 2024. № 12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2024/9710
 28. Georgiev S. V., Mailyan D. R., Solovyova A. I., zayavitel Federalnoe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatelnoe uchrezhdenie visshego obrazovaniya "Donskoi gosudarstvennii tekhnicheskii universitet", DGTU. Sposob usileniya zhelezobetonnoi kolonni pryamougolnogo ili kvadratnogo secheniya [Method for strengthening a rectangular or square reinforced concrete column]. Patent. № RU 2796699 C1. Rossiiskaya Federatsiya. MPK E04G 23/02.: № 2022132862: zayavl. 14.12.2022: opubl. 29.05.2023; Byul. № 16. URL: elibrary.ru/download/elibrary_54053597_43321206.PDF.
-



29. Georgiev S.V., Mailyan D.R., Solovyeva A.I. Construction Materials and Products. 2024. Vol. 7, No 6. DOI: 10.58224/2618-7183-2024-7-6-7.

30. Georgiev S. V., Mailian D. R., Solov'eva A. I., Meretukov Z. A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2025. No. 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2025/10545

Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.

Дата поступления: 1.11.2025

Дата публикации: 10.12.2025