

Исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных внецентренно сжатых конструкций, усиленных композитными материалами

С.В. Георгиев, А. И. Соловьёва, Чэ Сянюй, Н.О. Сизен

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

Аннотация: В статье приведены результаты опытных испытаний ряда железобетонных внецентренно сжатых конструкций, усиленных композитными материалами в продольном и поперечном направлении. В ходе проведения исследования было установлено, что композитное внешнее армирование работает в железобетонных конструкциях не одинаково, а зависит от зоны расположения композитных материалов на конструкции. Это связано с разной концентрацией напряжений по длине железобетонных конструкций от действия изгибающих моментов и поперечных сил. Следствием данного неравномерного напряжённого состояния в композитных материалах является преждевременное их отслоение и занижение общей эффективности системы усиления. В данной статье представлены результаты экспериментальных данных значений относительных деформаций ϵ_f композитных материалов железобетонных усиленных стоек, гибкостью $\lambda_H=10$, испытанных при большом эксцентриситете приложения нагрузки ($e_0 = 4$ см или $0,32h$), выходящей за ядро сечения. В данной работе рассматриваются различные варианты композитного усиления расположенного, как в продольном, так и в поперечном направлении. Деформации фиксировались тензодатчиками с базой 2,0 см, на всех уровнях нагрузки. В результате, были зафиксированы максимальные относительные деформации композитных материалов, выявлены наиболее эффективные зоны расположения поперечных хомутов и места, где деформация вдоль волокон не развивались, следовательно, композит в системе усиления не работал. Полученные данные дают возможность разрабатывать наиболее рациональные варианты усиления.

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

Введение

В современном строительстве в области усиления железобетонных конструкций в последние десятилетия в России активно развиваются новые методы усиления с использованием композитных материалов [1-3]. Наибольшую эффективность показали материалы на основе углепластика, обладающие высоким пределом прочности на растяжение и схожим с металлом модулем упругости [4], обеспечивающим надежную совместную работу материалов усиления и бетона [5]. Исследования за рубежом только

подтверждают преимущества композитного усиления при увеличении несущей способности железобетонных конструкций [6-8]. Однако, композитные материалы отличаются от традиционных (бетона и металла) своей высокой стоимостью. Поэтому, все исследования, которые позволяют наиболее экономично использовать материалы усиления при этом не занижая их эффективности, являются актуальными и перспективными.

Авторами данной статьи уже проводилась работа по изучению эффективности углепластиковой арматуры на увеличение прочности внецентренно сжатых железобетонных стоек [9] и были получены положительные экспериментальные результаты [10], однако, для полной ясности, необходимы дополнительные исследования совместной работы материала усиления и бетона усиливаемых конструкций, частью которого, и являются результаты данного исследования.

Объект исследования

В качестве экспериментальных образцов были испытаны внецентренно сжатые стойки, гибкостью $\lambda h = 10$, испытанные при эксцентриситете приложения нагрузки $e_0 = 4$ см, что при принятых размерах поперечных сечений составляет $e_0 = 0,32h$. При таких характеристиках конструкции и условиях нагружения, внецентренно сжатый элемент работает по балочной схеме.

Для увеличения общей сопротивляемости конструкции внешней нагрузке, необходимо произвести усиление не только сжатой зоны бетона, но и растянутой. В качестве усиления сжатой зоны бетона использовались хомуты в поперечном направлении для сдерживания деформаций бетона методом обжатия сечений, а для усиления растянутой зоны, использовались углепластиковые ламели.

Целью данного научного исследования является определение деформаций в композитных материалах, выполняющих роль системы

усиления внецентренно сжатых железобетонных колонн. Полученные данные позволят выявить наиболее эффективные методы и варианты усиления, учитывая особенности работы внецентренно сжатых конструкций и исключить неработающие композитные хомуты.

Для изготовления опытных образцов использовался тяжёлый бетон с проектным классом по прочности В30-В35. Продольная рабочая стальная арматура принималась периодического профиля класса А500, поперечная гладкая В500 диаметром 6 мм. Для сеток, установленных по торцам стоек, использовалась холоднодеформированная гладкая проволока \varnothing 3 мм аналогичного класса.

Усиление стоек проектировалось таким образом, чтобы охватить разные методы и сочетания вариантов усиления с целью определения наиболее эффективных. Все образцы были названы шифром, описание которого представлено ниже.

Схемы армирования, полный состав используемых материалов, характеристики бетона и стали, а также описание опытных образцов, методы усиления и испытания приведены в работе [11].

Фото испытанных опытных образцов, схемы расположения и шаг композитных хомутов приведены на рис. 1-4. На рис. 2-4, слева, указывается схема расположения тензодатчиков (Т), справа - график изменения относительных деформаций композитных материалов ε_f в зависимости от силы N.

Шифр образцов: В - обозначает что стойки испытывались при эксцентриситете $e_0=4$ см, что составляет $e_0=0,32h$; К - имеют длину 1200 мм; У - усилена композитными материалами; Х - имеется наличие хомутов. Цифры один и четыре находящийся в индексе буквы Х - обозначают схему поперечного армирования, где 1 – хомуты с шагом 1900мм, 4 – тоже, что и 1, но в центре установлен хомут шириной 250мм. Lp - означает наличие

продольного усиления, которое состоит из двух ламелей, расположенных в растянутой зоне бетона.

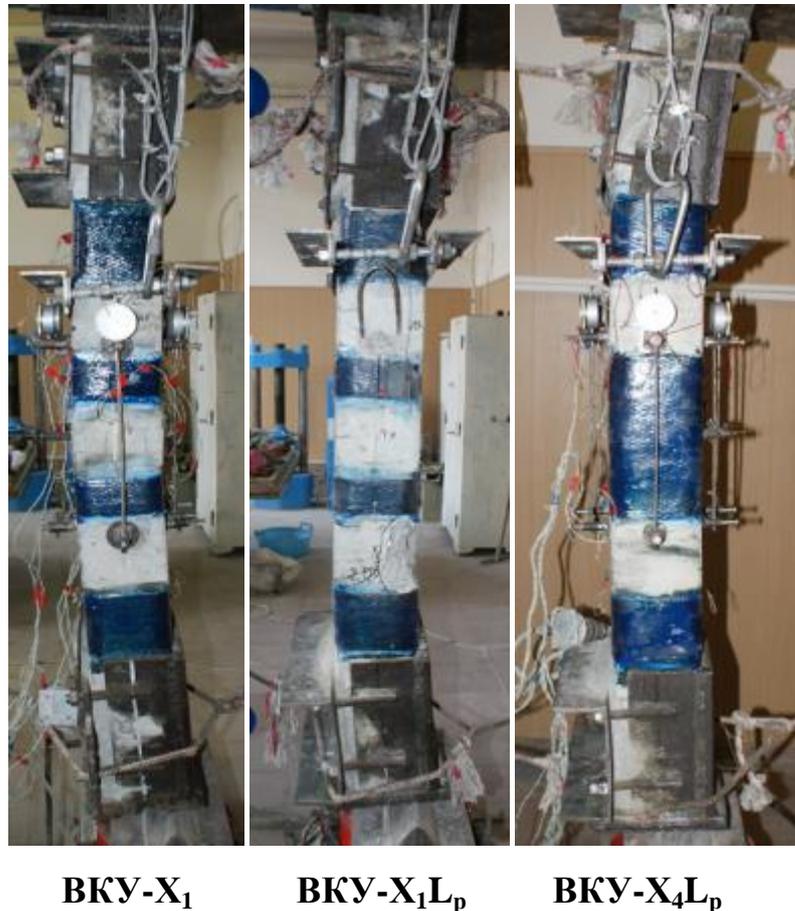


Рис. 1. Характер разрушения стоек (ВКУ-Х₁; ВКУ-Х₁L_p; ВКУ-Х₄L_p)

Результаты исследования

Ниже представлены экспериментальные данные развития деформаций композитных материалов по отношению к нагрузке опытных образцов для каждой стойки в отдельности.

ВКУ-Х₁ - внецентренно сжатая стойка, усиленная композитными хомутами, расположенными в центре с шагом 19см, шириной 5 см, на приопорных участках установлено по одному хомуту шириной 10 см.

Значения относительных деформаций в композитных хомутах, расположенных в сжатой зоне бетона, согласно тензодатчиков 14 и 15, достигают $1,18-1,27 \times 10^{-3}$ (Рис.2).

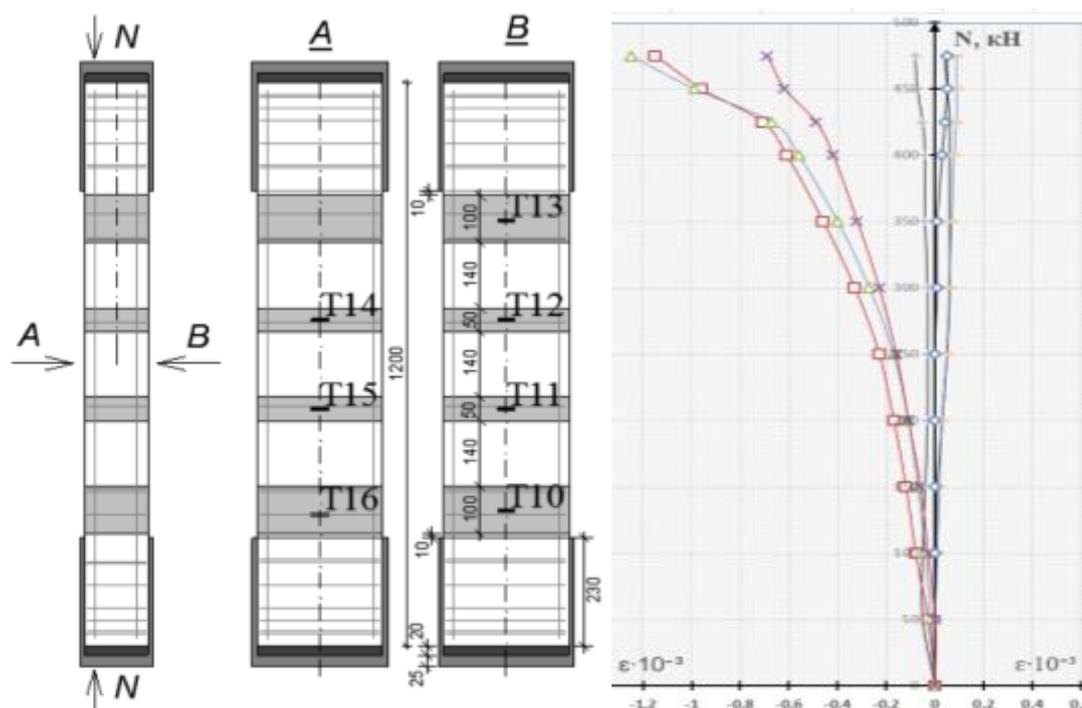


Рис. 2. Определение относительных деформаций в композитных материалах стойки шифра ВКУ-Х₁

Максимальные деформации в хомуте нижней части стойки, согласно Т16, составили $0,9 \times 10^{-3}$. Общий характер развития деформаций в хомутах, расположенных в сжатой зоне бетона конструкции, имеют линейный характер с меняющимися секущими линиями. Рубежными отметками линии кривой изменения относительных деформаций композитных материалов по отношению к уровням нагрузки являлись значения 250 кН, далее секущая меняется на 420 кН вплоть до разрушения образца.

Тензодатчики под номерами Т10-Т13 были расположены в растянутой зоне испытанного образца. Их относительные деформации практически не изменялись вплоть до разрушения стойки и находились в диапазоне $0-0,1 \times 10^{-3}$, при этом наблюдалось изменение направления напряжений растяжения и сжатия.

ВКУ-Х₁L_p - внецентренно сжатая стойка, усиленная хомутами по схеме предыдущей стойки ВКУ-Х₁. Однако, дополнительно были наклеены ламели

в продольном направлении в растянутой зоне (Рис.3). Тензодатчики были установлены в хомутах на растянутой и сжатой грани и на ламелях между хомутами.

Тензодатчики расположенные на центральных хомутах в растянутой зоне (Т14, Т15) показали одинаковое значение относительной деформации на сжатие равной $0,05 \times 10^{-3}$, что свидетельствует об отсутствии напряжений в хомутах на растянутой зоне. В сжатой зоне в одном из центральных хомутов был наклеен тензодатчик Т16, который показал максимальное развитие деформации равной $0,9 \times 10^{-3}$, при этом характер развития деформаций был плавным.

На углепластиковых ламелях, расположенных в растянутой зоне, было установлено четыре тензодатчика. Два в центре по длине конструкции и два в нижней части стойки между хомутами (рис.3). Согласно кривых графика изменения относительных деформаций по отношению к нагрузке было установлено, что в центре ламелей деформации развиваются в полтора раза больше, начиная с уровня нагрузки 250кН, чем в нижней части конструкции. При этом тензодатчики установленные симметрично на обеих ламелях показали примерно одинаковую картину, что говорит о равномерном нагружении обеих ламелей. Максимальное значение деформации тензодатчиков расположенных в центре ламелей (Т12, Т13) составляли $1,4 \times 10^{-3}$. В нижней части конструкции значения максимальных деформаций в ламелях согласно показаниям тензодатчиков Т10 и Т11 были одинаковыми и составляли $0,9 \times 10^{-3}$.

ВКУ-Х₄L_р - внецентренно сжатая стойка, усиленная хомутами по схеме предыдущей стойки ВКУ-Х₁L_р. Отличие заключалось в устройстве центрального композитного хомута шириной 240 мм.

При испытании опытного образца было установлено 10 тензодатчиков на поперечных композитных хомутах и продольных углепластиковых ламелях.

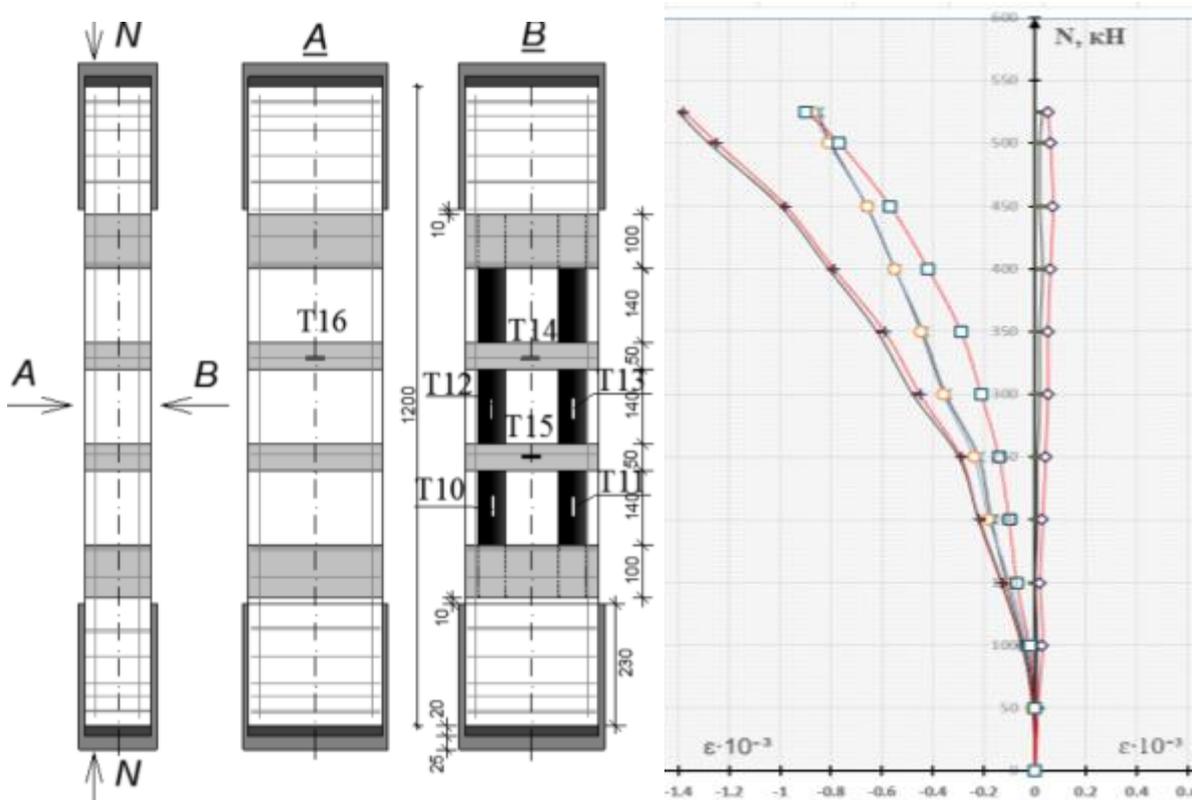


Рис. 3. Определение относительных деформаций в композитных материалах стойки шифра ВКУ-Х₁L_р

В сжатой зоне было установлено три тензодатчика Т6-Т8. В крайних хомутах деформации развивались плавно при этом максимальные значения составляли $0,7-0,8 \times 10^{-3}$. Тензодатчик под номером Т7 в процессе эксперимента вышел из строя.

В растянутой зоне стойки на хомутах было установлено три тензодатчика Т5, Т9, Т10. Однако в процессе испытания работал только тензодатчик Т9. Его деформации до достижения уровня нагрузки 550 кН составляли $0,1 \times 10^{-3}$, при этом тензодатчик показывал сжимающие напряжения. Однако при увеличении нагрузки вплоть до разрушения

образца, деформации поменяли свой знак и стали показывать растяжение, при этом максимальное значение деформации показало $0,4 \times 10^{-3}$.

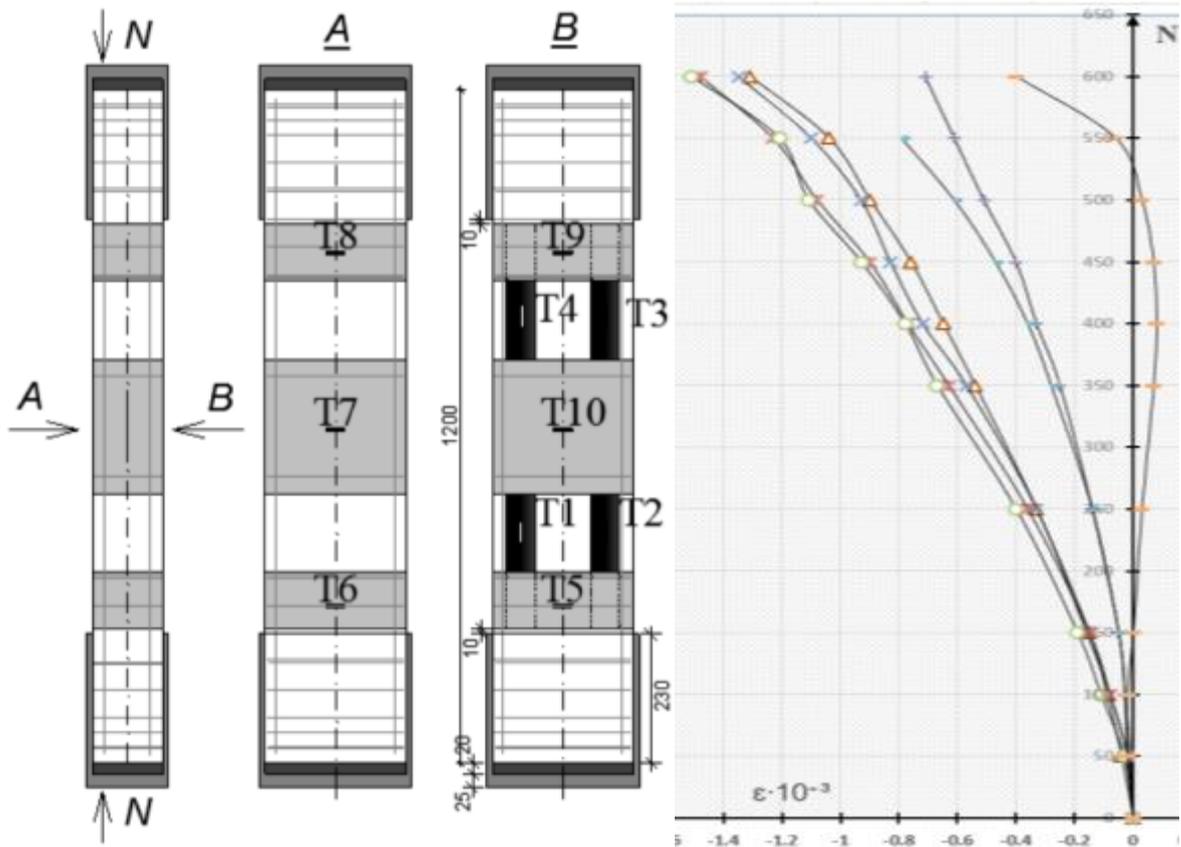


Рис. 4. Определение относительных деформаций в композитных материалах стойки шифра ВКУ-Х₄L_р

На углепластиковые ламели, расположенные в растянутой зоне, было установлено четыре тензодатчика Т1-Т4. Их максимальные деформации были примерно равны друг другу и находились в диапазоне $1,3 - 1,5 \times 10^{-3}$.

Выводы и рекомендации

На основании результатов экспериментов можно сделать следующие выводы:

- относительные деформации в ламелях, расположенных в растянутой зоне, развиваются неравномерно. При этом в центре по длине стойки, обе ламели растягиваются равномерно, относительные деформации достигают

$1,4 \times 10^{-3}$, а ближе к краю колонн, между хомутами, ламели растягивается с меньшими деформациями, равными 0.85×10^{-3} .

- растянутой зоне композитный материал практически не деформируется.

Анализ полученных результатов экспериментальных исследований по определению относительных деформаций композитных материалов, расположенных в продольном и поперечном направлении, позволил заключить следующее:

- в хомутах в процессе нагружения для всех конструкций деформации в сжатой и растянутой зонах отличаются. В связи с этим можно сделать вывод, что хомуты по поперечному сечению деформируются неравномерно.

- в хомутах в растянутой зоне относительные деформации или не развиваются вообще или показывают деформации сжатия, что совершенно нелогично при подобном нагружении конструкции. Такое явление можно объяснить развитием продольных деформаций растяжения в хомутах в растянутой зоне.

- в хомутах, расположенных в сжатой зоне, действительно наблюдается развитие относительно деформаций на растяжение, при этом максимальное значение деформации наблюдаются в центральных хомутах, что логично, учитывая характер работы и разрушения опытных образцов. Из этого следует, что хомуты в сжатой зоне действительно работают на сдерживание развития поперечных деформаций и работают вплоть до разрушения опытного образца.

- продольно расположенные ламели, согласно показаниям относительных деформаций работают на всём протяжении испытания опытных образцов. Две параллельно расположенные ламели, на всех образцах, работают симметрично одинаково. Напряжение в одной ламели

каждой стойки распределяется неравномерно, наибольшие деформации наблюдаются в центре по длине конструкций.

На основании анализа экспериментальных исследований предлагается:

- центрально расположенные хомуты делать незамкнутыми с трёх сторон конструкции, при этом основную работу по сдерживанию развития поперечных деформаций бетона будет выполнять участок хомута, расположенного на сжатой грани конструкции, а его анкеровку выполнять участки, расположенные на гранях конструкции. Однако крайние хомуты необходимо оставлять замкнутыми. Они будут выполнять роль анкерных устройств продольной композитной арматуры.

- учитывая неравномерные напряжения в углепластиковых ламелях рекомендуется в центре по длине конструкции устанавливать дополнительные ламели, воспринимающие наибольший момент, при этом их не надо доводить до граней конструкции. Другими словами, строить эпюру материалов и устанавливать продольное композитное усиление с разным поперечным сечением композитных продольных ламелей в центре и на приопорных участках конструкции.

Данная статья подготовлена в рамках гранта РФФИ (Соглашение № 24-29-00790), для выполнения научно-исследовательской работы «Новые технологии усиления железобетонных конструкций композитными материалами и методы их расчётной оценки».

Литература

1. Гаврилова Е.О. Усиление изгибаемых элементов композиционными материалами // Академическая публицистика. 2021. № 8-2. С. 111-119.
2. Данилов С.В., Фомичева Л.М. Усиление железобетонных колонн стальными обоймами // В книге: Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии. материалы международной научно-

- технической конференции. ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет». 2017. С. 240-241.
3. 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.
 4. Устинов Б.В., Устинов В.П. Исследование физико-механических характеристик композитных материалов (КПМ) // Известия вузов. Строительство. 2009. № 11-12. С.118-125.
 5. Хаютин Ю.Г., Чернявский В.Л., Аксельрод Е.З. Применение углепластиков для усиления строительных конструкций // Бетон и железобетон. 2001. №6 С. 17-20.
 6. Horiguchi T., Saeki N., Ritchie P.A. Effect of test methods and quality of concrete on bond strength of CFRP sheet external reinforcement of concrete beams using fiber // Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures Conference. Japan, 2001. V.1. pp. 265 - 270.
 7. Hutchinson A. R., and Rahimi, H (1996). Flexural strengthening of concrete beams with externally bonded FRP reinforcement // Proc., 2nd Int. conf. on Advanced compos.mat.in bridges and struct.(ACMBS). pp. 519-526.
 8. Hussain M., Sharif A., Basunbul I.A., Baluch M.H. and AL Sulaimani G.J Flexural behavior of precracked reinforced concrete beams strengthened externally by frp plates // ACI Struct.J., 92(1), pp.14-22.
 9. Польской П.П., Маилян Д.Р., Георгиев С.В. О влиянии гибкости стоек на эффективность композитного усиления // Инженерный вестник Дона, 2015, №4. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3374
 10. Георгиев С.В., Меретуков З.А., Соловьёва А.И. К определению условной критической силы гибких железобетонных стоек, усиленных композитными материалами // Инженерный вестник Дона. 2021. № 4. С. 420-429.
-

11. Георгиев С.В. Гибкие внецентренно сжатые железобетонные стойки, усиленные композитными материалами // Канд. дисс. техн. наук, Ростов-на - Дону, 2020. 201с.

References

1. Gavrilova E.O Akademicheskaja publicistika. 2021. № 8-2. pp. 111-119.
2. Danilov S.V., Fomicheva L.M V knige: Materialy, oborudovanie i resursosberegajushhie tehnologii. materialy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. GU VPO «Belorussko-Rossijskij universitet». 2017. pp. 240-241.
3. 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.
4. Ustinov B.V., Ustinov V.P. Izvestija vuzov. Stroitel'stvo. 2009. № 11-12. pp.118-125.
5. Hajutin Ju.G., Chernjavskij V.L., Aksel'rod E.Z. Beton i zhelezobeton. 2001. №6 pp. 17-20.
6. Horiguchi T., Saeki N., Ritchie P.A. Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures Conference. Japan, 2001. V.1. pp. 265 - 270.
7. Hutchinson A. R., and Rahimi,H (1996). Proc., 2nd Int. conf. on Advanced compos.mat.in bridges and struct.(ACMBS). pp. 519-526.
8. Hussain M., Sharif A., Basunbul I.A., Baluch M.H. and AL Sulaimani G.J ACI Struct.J., 92(1), pp.14-22.
9. Pol'skoj P.P., Mailjan D.R., Georgiev S.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2015, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3374
10. Georgiev S.V., Meretukov Z.A., Solov'jova A.I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021. № 4 (76). pp. 420-429.



11. Georgiev S.V. Gibkie vnecentrenno szhatye zhelezobetonnye stojki, usilennye kompozitnymi materialami [Flexible eccentrically compressed reinforced concrete struts, reinforced with composite materials]. Kand. diss. tehn. nauk, Rostov-na -Donu, 2020. 201p.

Дата поступления: 28.10.2024

Дата публикации: 15.12.2024