

## Численное моделирование напряженно - деформированного состояния сжатых железобетонных стоек, усиленных композитными материалами

*Д.А. Шилов, А.А. Веремеенко, А.В. Шилов, Д.Р. Маилян*

*Донской государственной технической университет*

**Аннотация:** В настоящее время большое количество исследований посвящено использованию полимерных композиционных материалов, используемых для повышения прочности и долговечности железобетонных элементов. В сжатых железобетонных колоннах несущая способность зависит от эксцентриситета приложения внешней силы и соответствующего напряженно-деформированного состояния, а также от расположения и количества композитных материалов, приклеенных к поверхности конструкции. Выбор схемы расположения композитных материалов в зависимости от напряженного состояния конструкции является актуальной научной проблемой. В то же время исследования, проводимые на центрально сжатых элементах, часто дают противоречивые результаты. Основной целью данного исследования было проведение численного эксперимента цифровой модели центрально сжатой железобетонной стойки, усиленной композитными материалами. Представлены результаты расчета 3 коротких колонн с различными схемами усиления. Показано, что использование композитных материалов в усилении конструкций увеличивает несущую способность до 10%. По результатам исследования предложены рекомендации по выбору оптимальных схем усиления композитными хомутами негибких колонн, армированных в поперечном направлении.

**Ключевые слова:** железобетонные колонны, нормальные сечения, конечно-элементное моделирование, усиление композитными материалами.

Анализ современного строительного рынка показывает, что наряду с ростом капитального строительства объем инвестиций в ремонт и усиление строительных конструкций, безусловно, растет. В некоторых случаях объем таких инвестиций сравнивается с объемом нового строительства. В России и за рубежом значительно растет использование композитных материалов [1-3]. В строительстве они наиболее широко используются при реконструкции [4-6] и усилении конструкций [7,8], которые обладают недостаточной несущей способностью. Использование композитных материалов в строительстве оправдано их высокой прочностью на разрыв, малым весом, технологичностью армирования и линейной зависимостью между напряжениями и деформациями вплоть до их разрушения.

---

Полимерные композитные материалы используются в современном строительстве в различных исполнениях и технологических формах. Широко известно использование полимерных волокон в качестве дисперсной арматуры [9-11]. Такой подход дает эффективные результаты на этапе изготовления конструкций, но редко используется при реконструкции или проведении ремонтных работ [12,13].

В последние годы полимерные композитные материалы широко используются в качестве внешнего армирования [14-16]. Эта технология усиления и ремонта существующих конструктивных элементов показала эффективность в различных элементах, включая балки [17,18], колонны [19-21], плиты перекрытия [22,23] и другие.

Анализ показывает, что, несмотря на многочисленные исследования, проблемой и основным пробелом эффективного использования продольных и поперечных методов усиления сжатых железобетонных элементов остаются выбор схемы наклейки композитных материалов.

Таким образом, целью данной работы было изучение численных параметров эффективности вариантов использования композитного усиления в зависимости от переменных параметров и разработка методологии их расчета.

Научная новизна работы заключается в экспериментальном и аналитическом исследовании оценки прочности центрально сжатых элементов, армированных композитными материалами в поперечном направлении.

Данное исследование является логическим продолжением научных исследований [19], проводимых Донским государственным техническим университетом на кафедре «Железобетонные и каменные конструкции».

Объектом исследования являлась железобетонная колонна размерами: ширина  $b=250$  мм; высота  $h=125$  мм; длина  $L=1200$  мм. В экспериментальной

---

колонне использовался тяжелый бетон прочностью 31 МПа. Армировалась колонна продольной рабочей арматурой 4-мя стержнями диаметром 12 мм класса А500. Поперечное армирование предусматривалось в виде хомутов диаметром 6 мм классом В500 с шагом 180 мм. Конструкция колонны показана на рис. 1.

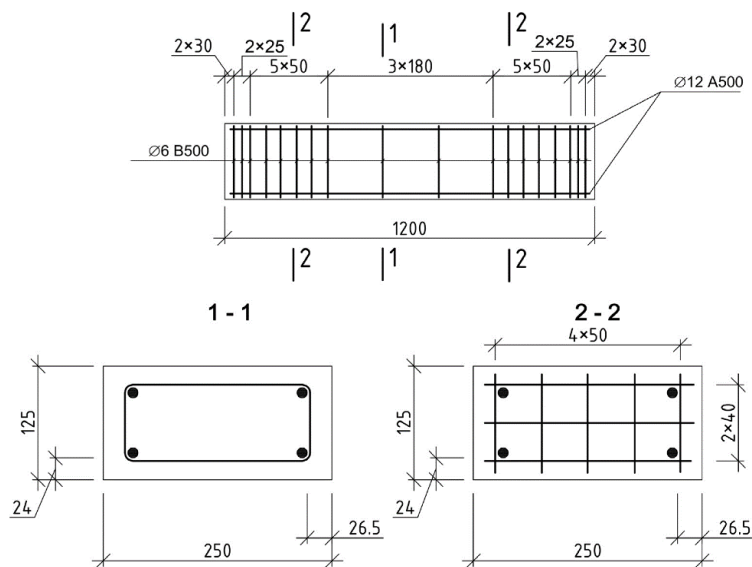


Рисунок 1. Конструкция экспериментального образца.

Для усиления колонн использовался композитный материал из углеродного волокна, а именно углеродная ткань плотностью  $300 \text{ г/м}^2$ , изготавливаемая московским филиалом MBRACE-BASF BUILDING SYSTEMS LLC. В частности, в качестве поперечной арматуры - углеродная ткань (MBRACE FIB CF 300/4900.300 г/5,100 м). Среднее значение временного сопротивления  $\sigma_{fu} = 2888 \text{ МПа}$ . Модуль упругости композитного материала, составляет 244 ГПа.

В проведенном эксперименте предусматривался расчет 3 железобетонных колонн: эталонной не усиленной, усиленной в поперечном направлении композитными хомутами с шагом 115 мм (схема 1) и усиленной сплошным обертыванием композитным холстом (схема 2). Геометрия и расположение элементов усиления представлена на рис. 2.

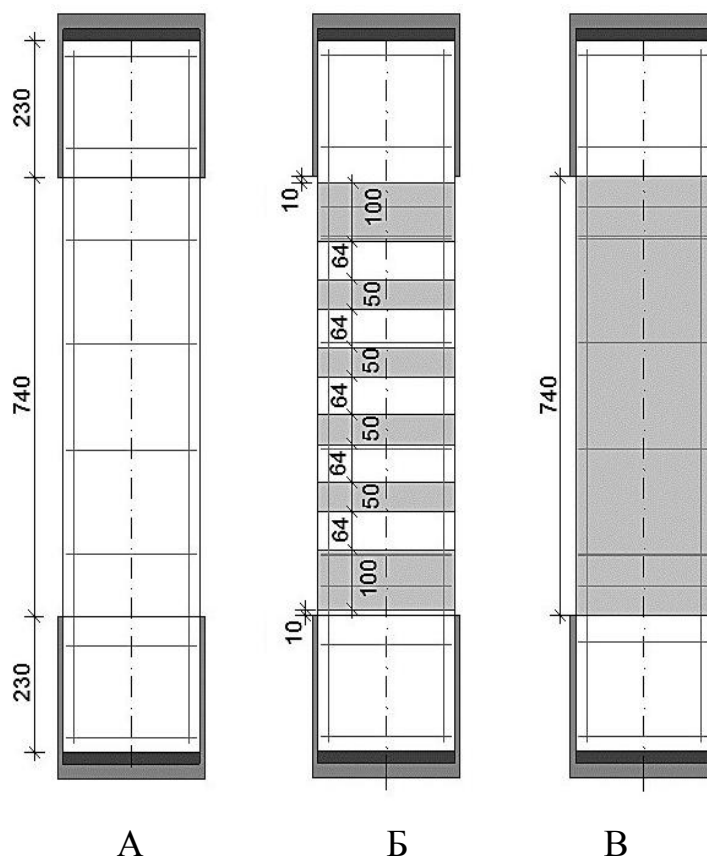


Рисунок 2. Схемы усиления конструкций композитными материалами

А - эталон; Б – 1 схема усиления; В – 2 схема усиления

Для дальнейшего изучения особенностей работы сжатого железобетонного элемента, усиленного композитными материалами, а также для получения данных об его прочности и деформативности было проведено численное моделирование с использованием метода конечных элементов в расчетном программном комплексе Ansys Mechanical APDL. При этом ось Z направлена вдоль продольной оси колонны, ось Y направлена вдоль меньшей стороны сечения, а ось X направлена перпендикулярно плоскости ZY.

Бетон представлен 8-узловыми упругопластическими элементами SOLID65, предназначенными для моделирования железобетона с возможностью растрескивания (рис. 3); арматурные стержни моделируются упругими элементами цилиндрической балки BEAM188, привязанными к сетке из элементов SOLID65 (рис. 4).

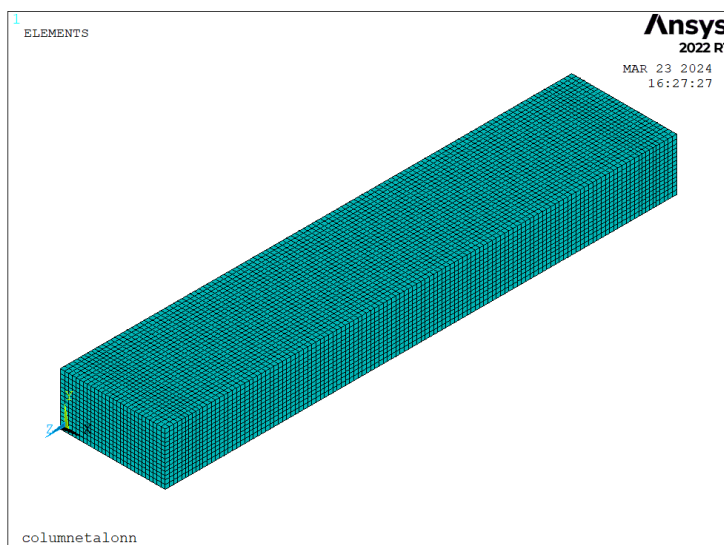


Рисунок 3. Конечно – элементная модель бетона колонны.

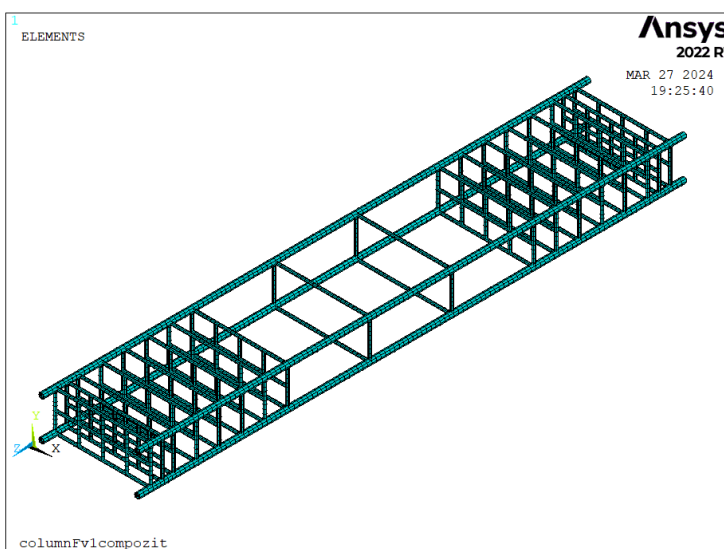


Рисунок 4. Конечно – элементная модель арматурного каркаса колонны.

### Эталонный образец (А):

Исследование нормальных полей напряжений в бетоне и арматуре эталонной (неусиленной) колонны при нагружении показывает, что разрушение конструкции происходит вследствие достижения напряжений в бетоне предельных значений. В нормальном сечении средней части колонны напряжения в бетоне достигают 32 МПа, а относительные деформации при

сжатии  $2,2 \times 10^{-3}$ . На рис. 5 показаны поля напряжений при разрушающей нагрузке 1200 кН. При этом численные значения разрушающей нагрузки и напряжений идентичны данным [19].

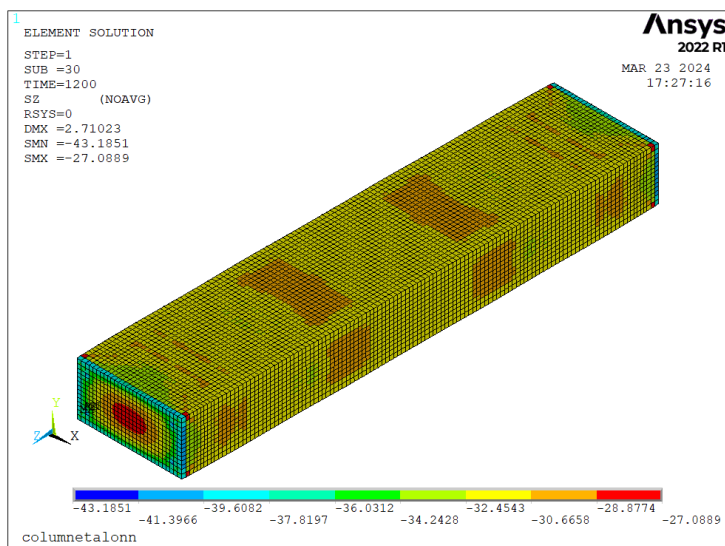


Рисунок 5. Поля нормальных напряжений в бетоне при нагрузке 1200 кН.

Полученные в результате расчета сжимающие напряжения в продольной рабочей арматуре соответствуют 440 МПа (Рис. 6).

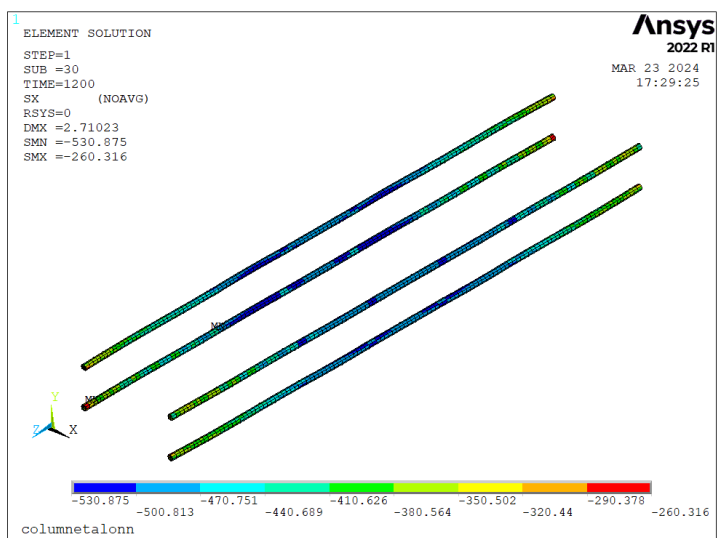


Рисунок 6. Поля напряжений в продольной рабочей арматуре при нагрузке 1200 кН.

### Усиленный образец (Б – 1 схема):

Элементы композитного усиления (рис. 9) были смоделированы 8-узловыми упругопластическими элементами BEAM188, со следующими характеристиками:

- Модуль упругости:  $E = 2,44 \times 10^5$  МПа,
- Коэффициент Пуассона:  $\nu = 0,26$ ;
- Предел прочности при сжатии:  $R_f = 2888,0$  МПа;
- Предельная относительная деформация при сжатии:  $\varepsilon = 0,01183$

Конечно – элементная модель усиления композитными хомутами представлена на рис. 7

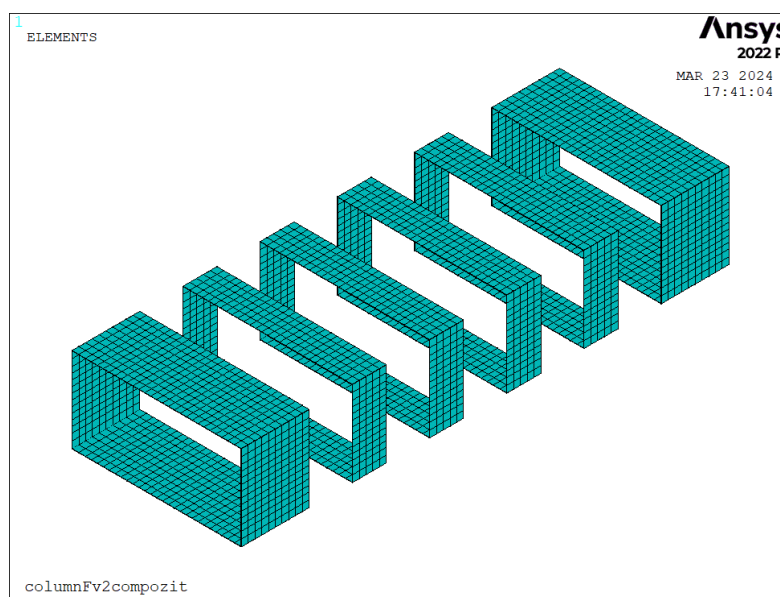


Рисунок 7. Конечно – элементная модель усиления композитными хомутами по схеме 1.

Результат расчета усиленной колонны показал, что несущая способность сжатого элемента увеличилась на 10% и составила 1320 кН. При этом предельные напряжения в сжатом бетоне нормального сечения

увеличились за счет обжатия композитными хомутами и составили 35 МПа, превышая показатель прочности бетона на 12,9% (рис. 8).

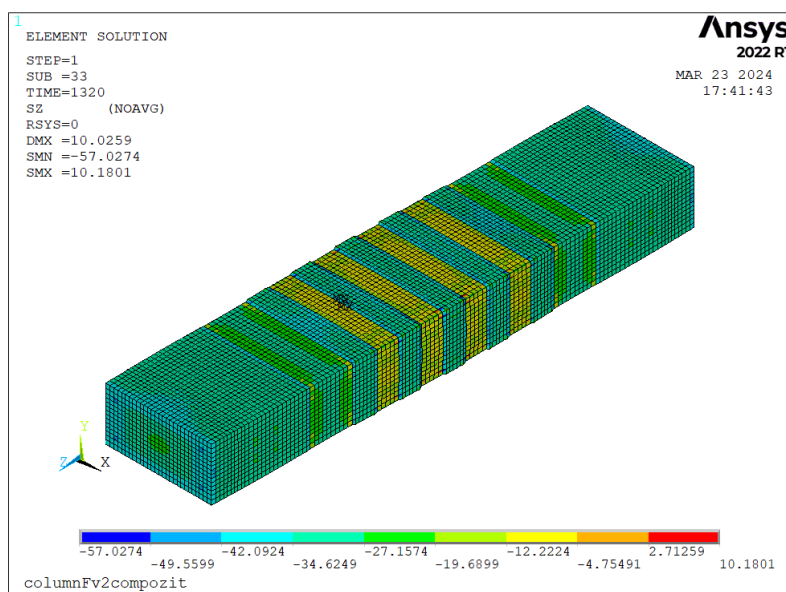


Рисунок 8. Поля нормальных напряжений в бетоне при нагрузке 1320 кН.

Значительно увеличились напряжения в сжатой продольной рабочей арматуре и составили 530 МПа, превышая аналогичный параметр в эталонном образце на 20,5% (рис. 9).

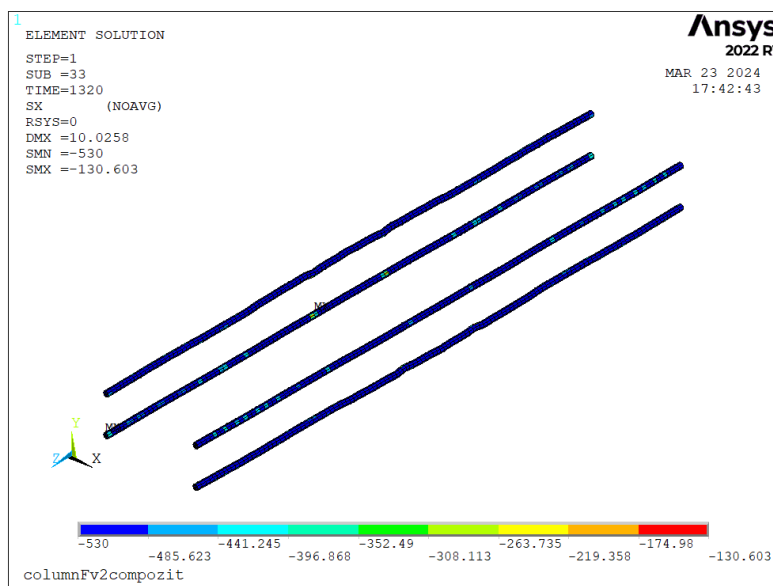


Рисунок 9. Поля напряжений в продольной рабочей арматуре при нагрузке 1320 кН.



Растягивающие напряжения в поперечном направлении по оси X в композитных хомутах составили 1215 МПа, что доказывает эффективность применения данной схемы усиления композитными материалами (рис. 10).

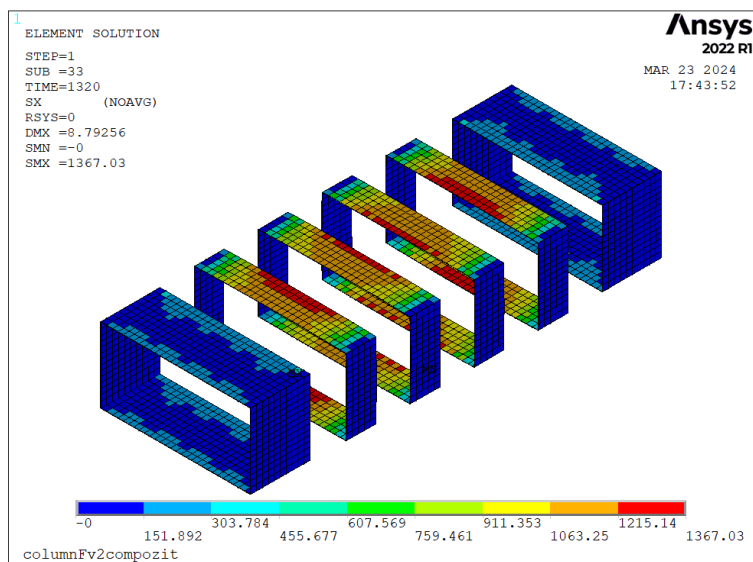


Рисунок 10. Поля напряжений в композитных хомутах при нагрузке 1320 кН.

Разрушение элемента произошло вследствие потери устойчивости продольной рабочей арматуры (рис. 11).

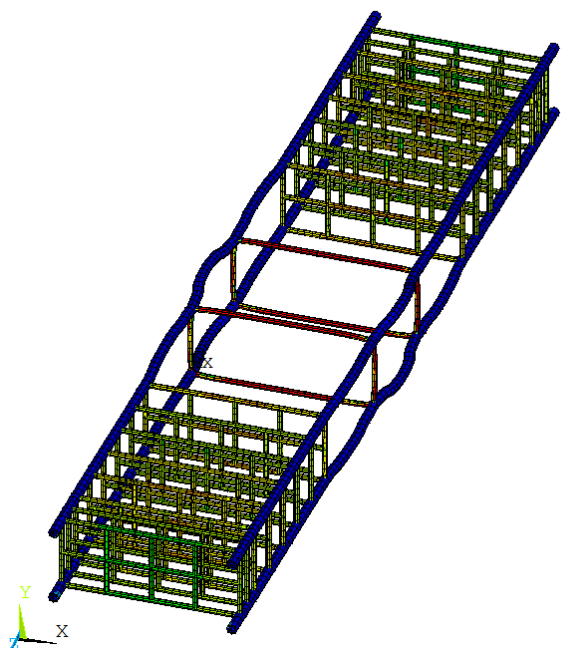


Рисунок 11. Внешний вид арматурного каркаса в стадии разрушения.

### Усиленный образец (В – 2 схема):

Усиление по 2 схеме предусматривало сплошное обертывание тела колонны композитным холстом. Конечно – элементная модель усиления композитными хомутами представлена на рис. 12.

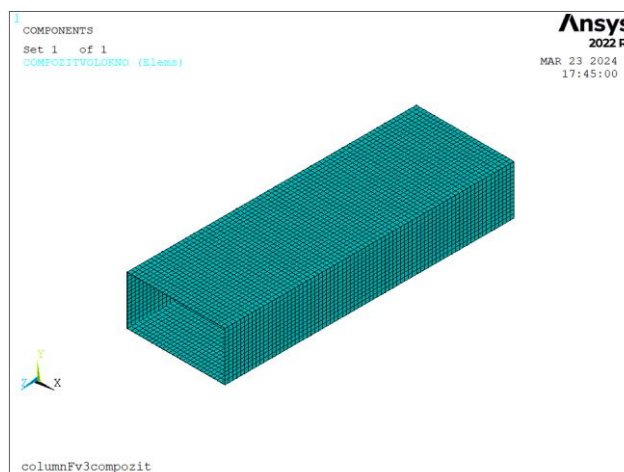


Рисунок 12. Конечно – элементная модель композитного хомута

Результат расчета усиленной по второй схеме колонны показал, что несущая способность сжатого элемента не увеличилась по сравнению со схемой 1 и составила 1320 кН. Однако напряженно деформированное состояние нормального сечения в средней части колонны полностью изменилось. Предельные напряжения в бетоне нормального сечения составляли 32 МПа (рис. 13).

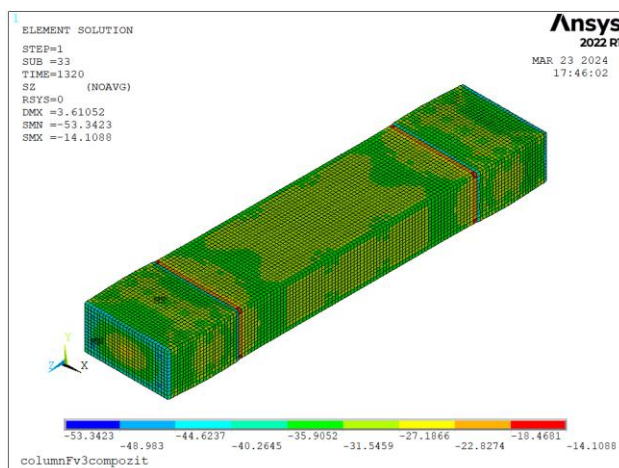


Рисунок 13. Поля нормальных напряжений в бетоне при нагрузке 1320 кН.

Напряжения в сжатой продольной рабочей арматуре уменьшились до 390 МПа, не достигая предельных значений (рис. 14)

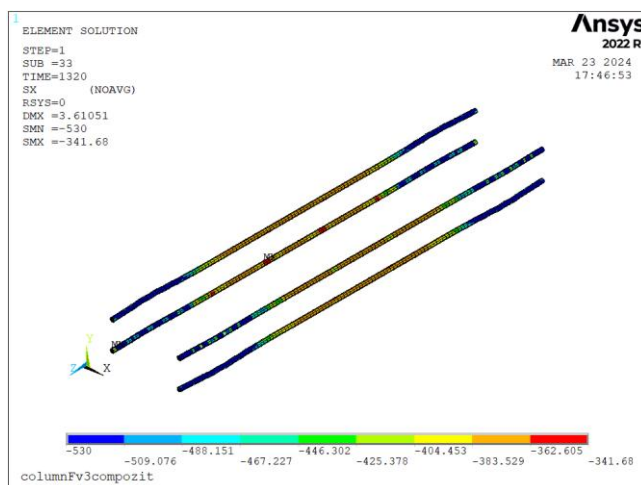


Рисунок 14. Поля напряжений в продольной рабочей арматуре при нагрузке 1320 кН

Данный эффект снижения напряжений в бетоне и арматуре произошел за счет полного включения в восприятие сжимающих напряжений нормального сечения колонны сплошной обоймы из композитного материала, который не только сдерживает растягивающие поперечные напряжения, но и воспринимает сжатие как элемент наружного продольного армирования. Сжимающие напряжения в композитной обойме по оси Z составили 410 МПа (рис.15), растягивающие напряжения в поперечном направлении составили 62 МПа (Рис.16).

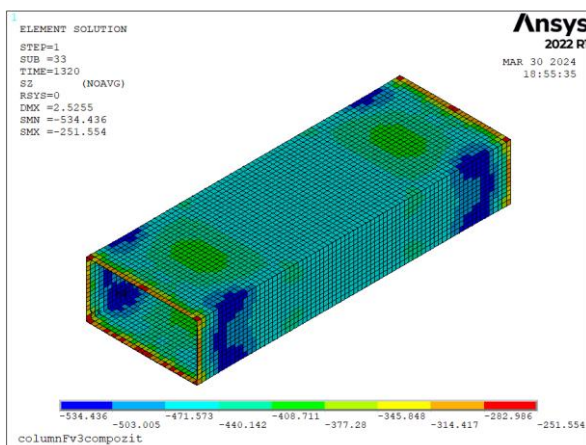


Рисунок 15. Поля напряжений в композитном хомуте при нагрузке 1320 кН.

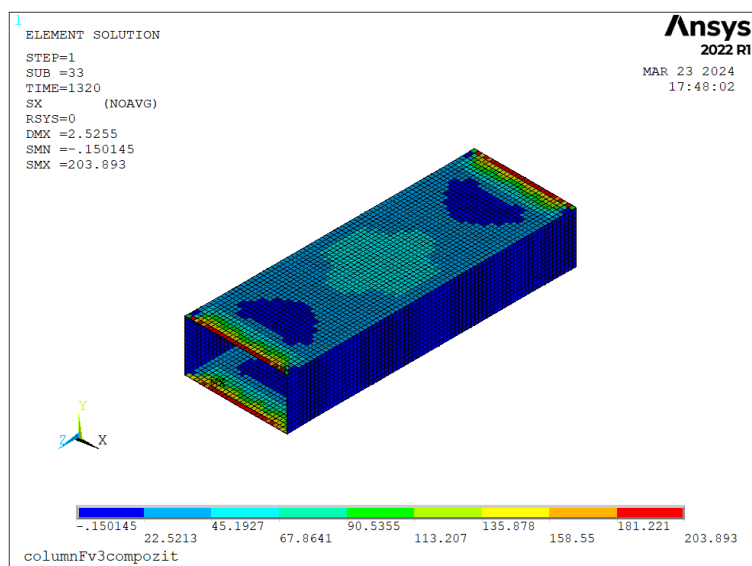


Рисунок 16. Поля напряжений в композитном хомуте при нагрузке 1320 кН.

При этом стоит отметить, что вариант усиления колонны полным обертыванием по периметру композитным материалом полностью меняет работу нормального сечения. При этом разрушение смещается в неусиленную область, что отчетливо видно на рисунках 13 – 14. Напряжения в бетоне достигают 36 МПа, а арматура теряет устойчивость с напряжениями 530 МПа.

### Заключение

Расчет сжатых железобетонных элементов, армированных поперечными композитными хомутами, позволили получить новые данные о напряженно-деформированном состоянии сжатых элементов, которые свидетельствуют о высокой эффективности композитного усиления железобетонных конструкций. На основании результатов испытаний, представленных в этой статье, сделан вывод о том, что в колоннах с централизованным сжатием при усилении композитными разреженными хомутами и сплошной обоймой был достигнут одинаковый по величине

эффект увеличения несущей способности (10%), но при этом усиление по схеме 1 является более предпочтительной, т.к. предусматривает меньший расход композитного материала.

### Литература

1. Abid, S.R.; Al-Lami, K. Critical review of strength and durability of concrete beams externally bonded with FRP. // *Cogent Eng.* 2018, 5, 1525015. Pp. 3-10.
2. Maljaee, H.; Ghiassi, B.; Lourenço, P.B.; Oliveira, D.V. FRP–brick masonry bond degradation under hygrothermal conditions // *Compos. Структура.* 2016, 147. Pp. 143-154.
3. Ghiassi, B.; Xavier, J.; Oliveira, D.V.; Kwiecien, A.; Lourenço, P.B.; Zajac, B. Evaluation of the bond performance in FRP–brick components re-bonded after initial delamination // *Compos. Структура.* 2015, 123. Pp. 271-281.
4. Bedirhanoglu, I.; Ilki, A.; Triantafyllou, T.C. Seismic Behavior of Repaired and Externally FRP-Jacketed Short Columns Built with Extremely Low-Strength Concrete // *J. Compos. Констр.* 2022, 26, 04021068. Pp. 15-18.
5. Sanginabadi, K.; Yazdani, A.; Mostofinejad, D.; Czaderski, C. Bond behavior of FRP composites attached to concrete using EBROG method: A state-of-the-art review // *Compos. Структура.* 2022, 299, 116060. Pp. 6-12.
6. da Costa Santos, J.; da Costa Santos, A.C.; Archbold, P.; Puppi, R.F.K. Experimental Analysis of R.C. Beams Preloaded, Repaired and Flexural Strengthened with Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP). // In 10th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Proceedings of the 10th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2021), Istanbul, 8–10 December 2021; Ilki, A., Ispir, M., Inci, P., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2022; Pp. 1587–1600.

7. Jahani, Y.; Baena, M.; Barris, C.; Torres, L.; Sena-Cruz, J. Effect of fatigue loading on flexural performance of NSM CFRP-strengthened RC beams under different service temperatures. // Eng. Struct. 2022, 273, 115119. Pp. 10-12.

8. Manos, G.C.; Katakalos, K.B. Reinforced Concrete Beams Retrofitted with External CFRP Strips towards Enhancing the Shear Capacity. // Appl. Sci. 2021, 11, 7952. Pp. 17-23.

9. Meskhi, B.; Beskopylny, A.N.; Stel'Makh, S.A.; Shcherban', E.M.; Mailyan, L.R.; Beskopylny, N.; Chernil'Nik, A.; El'Shaeva, D. Insulation Foam Concrete Nanomodified with Microsilica and Reinforced with Polypropylene Fiber for the Improvement of Characteristics. // Polymers 2022, 14, 4401. Pp. 5-15.

10. Meskhi, B.; Beskopylny, A.N.; Stel'Makh, S.A.; Shcherban', E.M.; Mailyan, L.R.; Beskopylny, N.; Dotsenko, N. Theoretical and Experimental Substantiation of the Efficiency of Combined-Reinforced Glass Fiber Polymer Composite Concrete Elements in Bending. // Polymers 2022, 14, 2324. Pp. 10-15.

11. Ibragimov, R.; Bogdanov, R.; Miftakhutdinova, L.; Fediuk, R.; Vatin, N.I.; de Azevedo, A.R.G. Effect of polydisperse reinforcement on the fresh and physical-mechanical properties of self-compacting concrete. // Case Stud. Constr. Mater. 2022, 17, e01188. Pp. 4-8.

12. Ye, Y.-Y.; Zeng, J.-J.; Li, P.-L. A State-of-the-Art Review of FRP-Confined Steel-Reinforced Concrete (FCSRC) Structural Members. // Polymers 2022, 14, 677. Pp. 9-19.

13. Beskopylny, A.N.; Stel'makh, S.A.; Shcherban', E.M.; Mailyan, L.R.; Meskhi, B.; Efremenko, I.; Varavka, V.; Beskopylny, N.; Dotsenko, N. Modeling and Experimental Verification of the Performance of Polymer Composite Reinforcing Bars of Different Types in Concrete of Different Density. // Polymers 2022, 14, 1756. Pp. 2-5.

14. Beskopylny, A.N.; Meskhi, B.; Stel'makh, S.A.; Shcherban', E.M.; Mailyan, L.R.; Veremeenko, A.; Akopyan, V.; Shilov, A.V.; Chernil'nik, A.; Beskopylny,

---

N. Numerical Simulation of the Bearing Capacity of Variotropic Short Concrete Beams Reinforced with Polymer Composite Reinforcing Bars. // *Polymers* 2022, 14, 3051. Pp. 6-12.

15. Polskoy, P.P.; Mailyan, D.; Beskopylny, A.N.; Meskhi, B. Bearing Capacity of Reinforced Concrete Beams with Initial Cracks Reinforced with Polymer Composite Materials. // *Polymers* 2022, 14, 3337. Pp. 5-14.

16. Shcherban', E.M.; Stel'makh, S.A.; Beskopylny, A.; Mailyan, L.R.; Meskhi, B. Influence of Mechanochemical Activation of Concrete Components on the Properties of Vibro-Centrifugated Heavy Concrete. // *Appl. Sci.* 2021, 11, 10647. Pp. 4-12.

17. Nawaz, W.; Elchalakani, M.; Karrech, A.; Yehia, S.; Yang, B.; Youssf, O. Flexural behavior of all lightweight reinforced concrete beams externally strengthened with CFRP sheets. // *Constr. Build. Mater.* 2022, 327, 126966. Pp. 7-9.

18. Bahij, S.; Omary, S.; Steiner, V.; Feugeas, F.; Faqiri, A. Strengthening Reinforced Concrete Beams by Using Different Types and Methods of Fiber-Reinforced Polymers: A Critical Review. // *Pract. Period. Struct. Des. Constr.* 2022, 27, 03122005. Pp. 693-699.

19. Petr P. Polskoy, Dmitry Mailyan, Alexey N. Beskopylny, Besarion Meskhi, Aleksandr V. Shilov and Artur Umarov. Strength of Compressed Reinforced Concrete Elements Reinforced with CFRP at Different Load Application Eccentricity. // *Polymers* 2022, 15(1), 26. Pp. 7-13.

20. Польской П.П., Маилян Д.Р., Георгиев С.В. О несущей способности усиленных коротких стоек при больших эксцентриситетах // *Инженерный вестник Дона*, 2014, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2631](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2631)

21. Маяцкая И.А., Польской П.П., Георгиев С.В., Федченко А.Е. Применение углепластиковых ламелей при усилении строительных

конструкций // Строительство и техногенная безопасность, 2018, №12(64). С. 34-35.

22. Najafi, S.; Borzoo, S. Different strengthening designs and material properties on bending behavior of externally reinforced concrete slab. // Struct. Monit. Maint. 2022, 9, Pp. 271–287.

23. Breveglieri, M.; Czaderski, C. Reinforced concrete slabs strengthened with externally bonded carbon fibre-reinforced polymer strips under long-term environmental exposure and sustained loading. Part 1: Outdoor experiments. // Compos. Part C Open Access 2022, 7, 100239. Pp. 3-13.

### References

1. Abid S.R., Al'-Lami K. Cogent Eng. 2018, 5, 1525015. Pp. 3-10.
2. Maljaee, H.; Ghiassi, B.; Lourenço, P.B.; Oliveira, D.V. Compos. Structures. 2016, 147, Pp. 143-154.
3. Ghiassi, B.; Xavier, J.; Oliveira, D.V.; Kwiecien, A.; Lourenço, P.B.; Zajac, B. Compos. Structures. 2015, 123, Pp. 271-281.
4. Bedirhanoglu, I.; Ilki, A.; Triantafillou, T.C. J. Compos. Construction. 2022, 26, 04021068. Pp. 15-18.
5. Sanginabadi, K.; Yazdani, A.; Mostofinejad, D.; Czaderski, C. Compos. Structures. 2022, 299, 116060. Pp. 6-12.
6. da Costa Santos, J.; da Costa Santos, A.C.; Archbold, P.; Puppi. In 10th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Proceedings of the 10th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2021), Istanbul, 8–10 December 2021; Ilki, A., Ispir, M., Inci, P., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2022; Pp. 1587–1600.
7. Jahani, Y.; Baena, M.; Barris, C.; Torres, L.; Sena-Cruz, J. Eng. Struct. 2022, 273, 115119. Pp. 10-12.
8. Manos, G.C.; Katakalos, K.B. Appl. Sci. 2021, 11, 7952. Pp. 17-23.



9. Meskhi, B.; Beskopylny, A.N.; Stel'Makh, S.A.; Shcherban', E.M.; Mailyan, L.R.; Beskopylny, N.; Chernil'Nik, A.; El'Shaeva, D. *Polymers* 2022, 14, 4401. Pp. 5-15.

10. Meskhi, B.; Beskopylny, A.N.; Stel'Makh, S.A.; Shcherban', E.M.; Mailyan, L.R.; Beskopylny, N.; Dotsenko, N. *Polymers* 2022, 14, 2324. Pp. 10-15.

11. Ibragimov, R.; Bogdanov, R.; Miftakhutdinova, L.; Fediuk, R.; Vatin, N.I.; de Azevedo, A.R.G. *Case Stud. Constr. Mater.* 2022, 17, e01188. Pp. 4-8.

12. Ye, Y.-Y.; Zeng, J.-J.; Li, P.-L. *Polymers* 2022, 14, 677. Pp. 9-19.

13. Beskopylny, A.N.; Stel'makh, S.A.; Shcherban', E.M.; Mailyan, L.R.; Meskhi, B.; Efremenko, I.; Varavka, V.; Beskopylny, N.; Dotsenko, N. *Polymers* 2022, 14, 1756. Pp. 2-5.

14. Beskopylny, A.N.; Meskhi, B.; Stel'makh, S.A.; Shcherban', E.M.; Mailyan, L.R.; Veremeenko, A.; Akopyan, V.; Shilov, A.V.; Chernil'nik, A.; Beskopylny, N. *Polymers* 2022, 14, 3051. Pp. 6-12.

15. Polskoy, P.P.; Mailyan, D.; Beskopylny, A.N.; Meskhi, B. *Polymers* 2022, 14, 3337. Pp. 5-14.

16. Shcherban', E.M.; Stel'makh, S.A.; Beskopylny, A.; Mailyan, L.R.; Meskhi, B. *Appl. Sci.* 2021, 11, 10647. Pp. 4-12.

17. Nawaz, W.; Elchalakani, M.; Karrech, A.; Yehia, S.; Yang, B.; Youssf, O. *Constr. Build. Mater.* 2022, 327, 126966. Pp. 7-9.

18. Bahij, S.; Omary, S.; Steiner, V.; Feugeas, F.; Faqiri, A. *Pract. Period. Struct. Des. Constr.* 2022, 27, 03122005. Pp. 693-699.

19. Petr P. Polskoy, Dmitry Mailyan, Alexey N. Beskopylny, Besarion Meskhi, Aleksandr V. Shilov.; Artur Umarov. *Polymers* 2022, 15(1), 26. Pp. 7-13.

20. Pol'skoj P.P., Mailjan D.R., Georgiev S.V. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2014, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2631](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2631)

21. Majackaja I.A., Pol'skoj P.P., Georgiev S.V., Fedchenko A.E. 2018, №12(64). Pp. 34-35.

---



22. Najafi, S.; Borzoo, S. Struct. Monit. Maint. 2022, 9. Pp. 271–287.

23. Breveglieri, M.; Czaderski, C. Compos. Part C Open Access 2022, 7, 100239. Pp. 3-13.

**Дата поступления: 27.03.2024**

**Дата публикации: 8.05.2024**