

## Углеродное волокно - как хороший материал для усиления железобетонных конструкций

А. И. Соловьёва<sup>1</sup>, С.В. Георгиев<sup>1</sup>, З.А. Меретуков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону.*

<sup>2</sup> *Майкопский государственный технологический университет, г. Майкоп*

**Аннотация:** Работа посвящена обзору исследования композитного материала на основе углепластика в области усиления железобетонных конструкций. Рассмотрены основные работы по изучению эффективности углепластика при усилении изгибаемых элементов по нормальному и наклонному сечениям и сжатых гибких элементов. Установлены основные достижения и выводы, а также рассмотрены недостатки расчетных методик и технологии усиления. Цель данной работы - рассмотреть уже изученные области и определить перспективные темы для дальнейшего изучения композитного материала.

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

Углеродное волокно представляет собой уникальный материал, состоящий из тончайших нитей углерода толщиной 5-15 микрон, сотканных воедино и прочно соединенных между собой под воздействием сложной термической обработки. Конечный результат высоко ценится за свои выдающиеся эксплуатационные характеристики – небольшой удельный вес, высокую силу натяжения, низкий коэффициент теплового расширения и химическую инертность.

Впервые углеродное волокно было упомянуто еще в 1880 году, в исследованиях известного изобретателя Томаса Эдисона при изобретении лампочки. На 1950-е годы приходится активное изучение свойств углеродных волокон и их внедрения в промышленность. В 1960-е годы углеродное волокно становится неотъемлемой частью многих важных отраслей промышленности, включая авиастроение [1,2]. С конца XX века углеродное волокно применяется практически повсеместно, проникнув буквально во все важные сферы деятельности человека: производство спортивных товаров [3], штучных элитных автомобилей [4], энергетика [5] и многое другое [6,7].

Предшествующим исследованием, результаты которого продвинули использование композитного материала в строительстве, являлся разработанный в Германии и Швейцарии, способ усиления изгибаемых элементов [8], путем приклеивания стальных пластин в растянутой зоне. Способ усиления был достаточно эффективным, однако именно его недостатки и привели к замене стальных пластин на композитные материалы на основе углепластика. Прежде всего это связано с экономическими выгодами, а также антикоррозийными свойствами углепластика.

Одни из первых экспериментальных исследований по использованию композиционных материалов для восстановления изгибаемых железобетонных элементов были проведены в Германии в 1978 году [9], результаты экспериментов показали высокую эффективность и однозначно закрепили этот метод за композитными материалами.

Усиление колонн обоями из композиционных материалов впервые было осуществлено в Японии в 80-х годах XX века и на данный момент широко используется в современном строительстве в России [10].

Учитывая высокую эффективность композитных материалов и перспективы их использования, в 2005 году на кафедре железобетонных и каменных конструкций «Донского государственного технического университета» началась работа по изучению композитных материалов в области усиления железобетонных конструкций.

На тот момент в России отсутствовала нормативная методика для проектирования усиления железобетонных конструкций композитными материалами. Отправной точкой для дальнейшего изучения композитного материала в России являлось руководство по усилению [11].

За период от 2005 до 2021 года на кафедре по данному направлению были защищены три кандидатские диссертации, охватывающие наибольшее количество конструкций. Была изучена эффективность композитного

---

усиления в изгибаемых элементах по нормальному [12] и наклонному сечениям [13].

В области сжатых конструкций, в дополнение к исследованиям [10] Московского университета, на кафедре были изучена эффективность композитного усиления гибких железобетонных сжатых элементов [14,15].

Ниже кратко представлены результаты исследований, выполненных на кафедре железобетонных и каменных конструкций «Донского государственного технического университета».

В работе [12] приведены результаты исследований эффективности композитных материалов при усилении растянутой зоны балок, углетканью в 3 и 6 слоев и углеламинатами, как с наличием анкерных устройств, так и без них. В соответствии с программой исследований было испытано 22 опытных образца.

Согласно результатам данного исследования, было установлено, что при использовании композитных материалов прочность увеличилась от 18 до 62%. Было установлено, что прирост прочности, в основном, зависит от 2-х показателей: это степень переармированности изгибаемого элемента (для данных образцов прирост прочности ограничивался предельной несущей способностью сжатой зоны бетона), и второй показатель – степень адгезии материала усиления и бетона усиливаемых конструкций. При отсутствии специальных анкерных устройств приращение прочности составляло всего лишь 2,5-7,5%. При использовании анкерных устройств, состоящих из U-образных хомутов, наклеенных на опирных участках балок, произошло увеличение прочности от 39,3 до 136,45 процентов. Такой разброс зависел от площади поперечного сечения продольного композитного усиления и от предельной возможности сжатой зоны бетона образцов. Один из важных аспектов, установленных авторами - нормативная методика расчёта снижает до 30% эффективность композитного усиления.

---

Результатом исследования стала возможность определить наиболее эффективные варианты усиления изгибаемых элементов по нормальному сечению и разработанные предложения к совершенствованию нормативной методики расчета.

Полученные результаты нашли отражение в практической области. Был реализован проект усиления изгибаемого безбалочного перекрытия, с использованием композитных материалов, в разработку которого входили результаты приведенных выше исследований. Подробно данный проект усиления описывается в работе [16].

Исследование эффективности композитных материалов, используемых при усилении изгибаемых элементов по наклонному сечению, по своему объёму опытных образцов представляет собой масштабную работу [13]. 26 балок усиливались и затем испытывались уже появившимися в сечении трещинами, то есть перед усилением образцы были доведены до предразрушающего состояния, до появления трещин в наклонном сечении, что является недопустимым. Уникальность данного эксперимента заключается в том, что ученые максимально приблизили испытания к реалиям современного строительства и усиления. Все опытные образцы испытывались дважды, при этом применялись дополнительные элементы стального усиления, то есть на одном образце было получено сразу 2 результата.

В процессе исследования авторами было установлено, что композитное усиление в сечении, где на момент испытания уже была трещина, даёт увеличение прочности, работает совместно с поперечной арматурой и зависит от длины анкеровки композитного хомута по отношению к расположению трещины.

Авторами было установлено влияние ширины раскрытия предварительной трещины на эффективность композитного усиления.

---

Учитывая масштабность проведённых экспериментов и количество варьируемых факторов, была проверена нормативная методика расчёта и разработаны предложения по ее совершенствованию, согласно которым, эффективность композитного усиления занижается в пользу запаса прочности.

Предложения по итогам выполненной работы, а также рекомендации по учету влияния на прочность наклонных сечений, пролета среза, ширины раскрытия трещин и вида поперечных хомутов, позволили улучшить сходимость теоретических и экспериментальных значений прочности конструкций, тем самым повышая надежность запроектированного усиления конструкций и нормативной базы в целом.

Вышедший в 2015 году свод правил по усилению композитными материалами показал, что в области усиления сжатых элементов имеются ограничения, предъявляемые к конструкциям, при которых не рекомендуется использовать метод устройства обойм. Решение этих вопросов стало задачей кафедры и нашло отражение в работе [17,18].

Согласно программе исследования, был испытан 31 опытный образец, в состав которого входили эталонные и усиленные стойки разной гибкости, эксцентриситета приложения нагрузки и вида усиления. В работе было установлено приращение прочности и деформативности для стоек, выходящих за рамки рекомендуемых норм, разработаны предложения по совершенствованию расчета. Установлены области и варианты усиления для образцов разной гибкости, испытанных при разных эксцентриситетах приложения нагрузки, для которых эти варианты усиления являются наиболее эффективными.

Авторами были разработаны новые методики расчёта для образцов, усиленных комбинированными вариантами, с расположением композитных материалов в продольном и поперечном направлении.

---

Одним из основных достижений данной работы является расширение рамок использования композитных материалов при усилении сжатых элементов, выходящих за рекомендации норм, а также предложения по совершенствованию существующих и разработка новых расчетных методик.

В заключение анализа работ по исследованию эффективности композитных материалов в области усиления железобетонных конструкций, можно сделать вывод, что композитные материалы на основе углепластика действительно дают существенное увеличение прочности и деформативности изгибаемых и сжатых элементов. К одним из перспективных дальнейших исследований, как показали результаты уже выполненных работ, можно отнести поиски новых методов и вариантов анкеровки композитных материалов или увеличение адгезии материалов усиления и бетона конструкции.

### Литература

1. Гращенко Д.В. Стратегия развития неметаллических материалов, металлических композиционных материалов и теплозащиты // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 264–271. URL: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.
2. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 344–348. URL: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
3. Клименко О.Н., Валуева М.И., Рыбникова А.Н. Полимерные и полимерные композиционные материалы в спорте (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 10 (92). С. 81-89.
4. Тимошков П.Н., Хрульков А.В., Язвенко Л.Н. Композиционные материалы в автомобильной промышленности (обзор) // Труды ВИАМ. 2017. № 6 (54). С. 7.

5. Орлова Н.А., Коробщикова Т.С., Молтусов А.С. О перспективах применения композитных материалов в энергетике на примере опор ЛЭП // Достижения вузовской науки. 2015. № 19. С. 135-139.
6. Валуева М.И., Гуляев И.Н. Углеродные волокна и углепластики: история, современность и перспективы развития. Обзор // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2016. №11. С. 2–8.
7. Валуева М. И., Зеленина И. В., Жаринов М. А., Ахмадиева К. Р. Мировой рынок высокотемпературных полиимидных углепластиков (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. №12 (84). С 67-79.
8. Шилин А.А. Пшеничный В.А., Картузов Д.М. Внешнее армирование железобетонных конструкций композитными материалами // ОАО «Издательство Стройиздат», 2007. 184с.
9. Wolf R., Miesser H.J. HLV-Spannglieder in der Praxis, Erfahrungen Mit Glasfaserverbundstaben, Beton, 2. 1989. pp. 47 - 51.
10. 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.
11. Чернявский В. Л. и др. Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами // ООО «ИнтерАква. 2006. 48 с.
12. Михуб Ахмат. Прочность, деформативность и трещиностойкость изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами // Дисс. канд. техн. Наук, Ростов-на-Дону, 2013. 211с.
13. Шилов А. А. Прочность наклонных сечений балок с трещинами, усиленных внешним композитным армированием // Дисс. канд. техн. Наук, Ростов-на-Дону, 2019. 195с.
14. Польской П.П., Георгиев С.В. Влияние различных вариантов внешнего композитного армирования на жесткость гибких сжатых элементов //



Инженерный вестник Дона, 2017, № 4.  
URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4826](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4826)

15. 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](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3374)

16. Шилов А.А. К вопросу усиления каркасно-монолитного здания автоцентра в г. Аксае с использованием композитных материалов // Строительство и архитектура, 2015: сб. докл. Междунар. науч-практ. конф. Ростов-на-Дону, 2015. С. 75-78.

17. 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

18. Польской П.П., Георгиев С.В. Усиление железобетонных колонн композитными материалами // В книге: Актуальные проблемы науки и техники 2019. Материалы национальной научно-практической конференции. 2019. С. 231-233.

19. Семенов В.В., Кравец А.И. Применение полимерных композиционных материалов в строительных конструкциях // Молодежный вестник ИрГТУ. 2017. № 2. С. 23.

20. Власенко Ф.С., Раскутин А.Е. Применение полимерных композиционных материалов в строительных конструкциях // Труды ВИАМ. 2013. № 8. С. 3.

### References

1. Grashhenkov D.V. SAviacionnye materialy i tehnologii. 2017. №S. pp. 264–271. URL: [10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271](https://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271).
2. Raskutin A.E. Aviacionnye materialy i tehnologii. 2017. №S. pp. 344–348. URL: [10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348](https://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348).





3. Klimenko O.N., Valueva M.I., Rybnikova A.N. Trudy VIAM. 2020. № 10 (92). pp. 81-89.
  4. Timoshkov P.N., Hrul'kov A.V., Jazvenko L.N. Trudy VIAM. 2017. № 6 (54). P. 7.
  5. Orlova N.A., Korobshhikova T.S., Moltusov A.S Dostizhenija vuzovskoj nauki. 2015. № 19. pp. 135-139.
  6. Valueva M.I., Guljaev I.N. UVse materialy. Jenciklopedicheskij spravochnik. 2016. №11. pp. 2–8.
  7. Valueva M. I., Zelenina I. V., Zharinov M. A., Ahmadijeva K. R. Trudy VIAM. 2019. №12 (84). pp. 67-79.
  8. Shilin A.A. Pshenichnyj V.A., Kartuzov D.M. Vneshnee armirovanie zhelezobetonnyh konstrukcij kompozitnymi materialami [External reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials]. OAO «Izdatel'stvo Strojizdat», 2007. 184 p.
  9. Wolf R., Miesser H.J. HLV-Spannglieder in der Praxis, Erfahrungen Mit Glasfaserverbundstaben, Beton, 2. 1989. pp. 47 - 51.
  10. 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.
  11. Chernjavskij V. L. i dr. Rukovodstvo po usileniju zhelezobetonnyh konstrukcij kompozitnymi materialami [Composite Reinforcement Guide for Reinforced Concrete Structures] OOO «InterAkva. 2006. 48 p.
  12. Mihub Ahmat. Prochnost', deformativnost' i treshhinostojkost' izgibaemyh zhelezobetonnyh jelementov, usilennyh kompozitnymi materialami [Strength, deformability and crack resistance of bent reinforced concrete elements reinforced with composite materials]. Diss. kand. tehn. Nauk, Rostov-na-Donu, 2013. P. 211.
-



13. Shilov A. A. Prochnost' naklonnyh sechenij balok s treshhinami, usilennyh vneshnim kompozitnym armirovaniem [Strength of inclined sections of cracked beams reinforced with external composite reinforcement]. Diss. kand. tehn. Nauk, Rostov-na-Donu, 2019. P.119.
14. Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, № 4. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4826
15. Pol'skoj P.P., Mailjan D.R., Georgiev S.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2015, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3374
16. Shilov A.A. Stroitel'stvo i arhitektura, 2015: sb. dokl. Mezhdunar. nauch-prakt. konf. Rostov-na-Donu, 2015. pp. 75-78.
17. 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. C. 02060
18. Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. V knige: Aktual'nye problemy nauki i tehniki 2019. Materialy nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2019. pp. 231-233.
19. Semenov V.V., Kravec A.I. Molodezhnyj vestnik IrGTU. 2017. № 2. P. 23.
20. Vlasenko F.S., Raskutin A.E. Trudy VIAM. 2013. № 8. p.3.