

Экспериментальное исследование стальной трубы, усиленной углепластиковым композитным материалом

И.А. Калугин, Е.В. Никонова

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация: Обсуждается применение углепластиковых композитных материалов для усиления образцов, выполненных из отрезков труб, при растяжении под действием внутреннего давления. Описаны экспериментальные исследования стальных труб под действием внутреннего давления, как без усиления, так и с усилением углеродной лентой различным количеством слоев. Особое внимание уделено совместной работе стенки трубы и элементов внешнего армирования. Отмечено значительное влияние внешнего армирования на жесткость и деформативность образцов.

Ключевые слова: высокопрочное волокно, углеволокно, углеродная лента, адгезионный слой, труба, система внешнего армирования, полимерные композитные материалы, прочность при растяжении.

Эффективным методом усиления строительных конструкций является система внешнего армирования на основе эпоксидных полимерных композитных материалов (далее ПКМ), армированных углеродными, арамидными, полиэфирными и базальтовыми волокнами или стекловолокном [1]. Система внешнего армирования строительных конструкций основана на создании на поверхности растянутой зоны конструкций усиливающих элементов, выполненных из высокопрочных ПКМ, воспринимающих дополнительные усилия [2]. Усиление ПКМ выполняется путём пропитки и наклейки лент, тканей или сеток на предварительно подготовленную поверхность конструкций с помощью эпоксидных связующих, обеспечивающих надёжную пропитку армирующего наполнителя и адгезию к поверхности усиливаемой конструкции, а также может служить защитой конструкций в агрессивных средах [3]. После отверждения эпоксидного связующего полимерные композитные накладки работают совместно с конструкцией и воспринимают возникающие в ней растягивающие усилия [4, 5]. Влияние усиления полимерными материалами

в зависимости от количества наклеенных слоёв усиливающих ламелей, тканей, лент или сеток проектная несущая способность строительных конструкций может быть восстановлена либо значительно увеличена. Так, например, в статье [6] рассматривается влияние усиления ПКМ на трещинообразование в стальной пластине.

Систему внешнего армирования ПКМ используют при ремонте и усилении конструкций мостов, тоннелей, резервуаров, конструкций промышленных, общественных и жилых зданий, а также при строительстве новых сооружений [7, 8]. Мировой и отечественный опыт применения ПКМ для усиления строительных конструкций различных инженерных сооружений (промышленных и гражданских зданий, мостовых конструкций, башен, труб, свайных опор, морских причалов, обделок тоннелей и других подземных сооружений, памятников архитектуры) показал их высокую эффективность и надежность. Несомненными достоинствами ПКМ являются высокие прочность и модуль упругости при растяжении, низкая плотность, технологичность, стойкость к действию агрессивных внешних факторов, способность повторять практически любые геометрические формы поверхности усиливаемой конструкции, другие факторы. Обоймы из ПКМ являются эффективной альтернативой стальным обоймам, поскольку их включение в работу усиливаемого элемента конструкций обеспечивается через клеевой слой [9, 10].

Испытания на прочность при растяжении внутренним давлением стальных труб, усиленных углеродной лентой шириной 300 мм с поверхностной плотностью 230 ± 10 г/м², проводили на образцах, состоящих из отрезка трубы из стали Ст20 длиной 1500 мм и углеродной ленты FibArm Tare 230/300, наклеенной под углом 45° к оси трубы, геометрические размеры которых соответствуют рис. 1. Заявленные производителем прочность при растяжении волокна и модуль упругости при растяжении

волокна углеродной ленты FibArm Tape 230/300 4,9 ГПа и 245 ГПа соответственно. В качестве адгезива был использован FibArm Risen 230+. Схема проведения испытания, за основу которой принят метод А из ГОСТ Р 54925-2012, представлена на рис. 2.

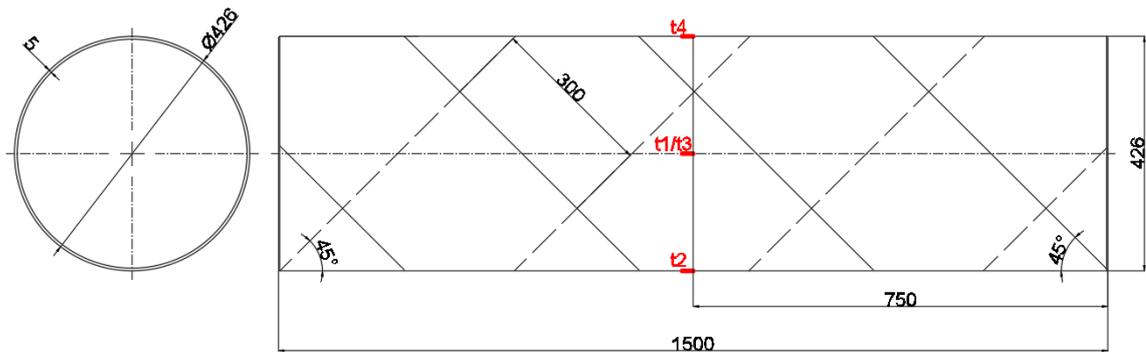


Рис. 1. - Геометрические размеры образцов, усиленных углеродной лентой, для испытания на растяжение внутренним давлением

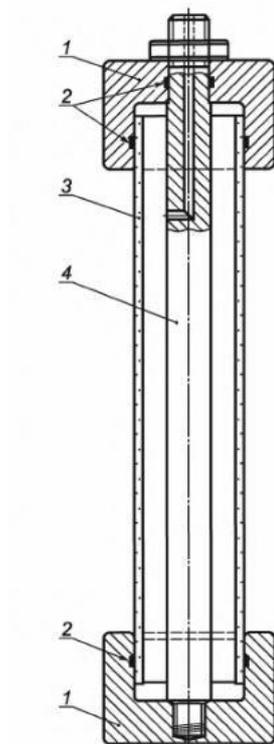


Рис. 2. – Схема испытания стальных труб, усиленных ПКМ: 1 – торцевые заглушки; 2 – концевые уплотнительные элементы; 3 – образец; 4 – соединительный стержень, работающий на осевую нагрузку

Были проведены испытания следующих образцов:

- Образец 1 – стальная труба круглого сечения 426x5 мм без усиления. Длина образца 1500 мм.
- Образец 2 – стальная труба круглого сечения 426x5 мм с одним слоем усиления, наклеенным под углом 45°. Длина образца 1500 мм.
- Образец 3 – стальная труба круглого сечения 426x5 мм с двумя слоями усиления, наклеенными под углом 45°. Длина образца 1500 мм.
- Образец 4 – стальная труба круглого сечения 426x5 мм с тремя слоями усиления, наклеенными под углом 45°. Длина образца 1500 мм.

При проведении испытаний используется испытательная оснастка, представляющая собой торцевые заглушки толщиной 40 мм из стали Ст3 для образцов труб, стянутые стальными резьбовыми шпильками М36 с классом прочности 8.8 для исключения осевой нагрузки на образцы. К заглушке подключается насос высокого давления (MGF Electric Test Pump High Pressure) с максимальным давлением 25 МПа для повышения давления внутри образцов. Для контроля давления устанавливается высокоточный манометр (PWF-20MPB). Одна из заглушек оборудована сбросным краном для отвода воздуха при наполнении образцов водой. Общий вид испытательной оснастки представлен на рис. 3.

Нагружение образцов производилось поэтапно с шагом 1 МПа и выдержкой 3 минуты на каждом этапе. Во время испытаний в режиме реального времени фиксировалось давление в образце и деформации с тензорезисторов на основе тонких пленок TML FLA-5-11, установленных на металл образцов согласно схеме, представленной на рис. 1. Геометрические характеристики образцов представлены в таблице 1, результаты

экспериментальных исследований стальных труб, усиленных полимерными композитными материалами представлены в таблице 2.

В качестве контрольного образца использовался образец № 1, представляющий собой стальную трубу круглого сечения 426x5 мм без усиления. Общий вид после разрушения показан на рис. 4.



Рис. 3. – Общий вид испытательной оснастки с установленным образцом до проведения испытания

В результате испытания образца № 1 установлено, что максимальное давление до потери герметичности составило 10,634 МПа. Потеря герметичности произошла в связи с разрушением стенки трубы. Зависимость деформации трубы в окружном направлении от внутреннего давления представлена на рис. 5.

На рис. 6-8 представлены образцы № 2, № 3 и № 4 после разрушения внешнего слоя армирования, выполненного из углеродной ленты FibArm Tare 230/300 в один, два и три слоя, соответственно. Разрушение углеродных

лент произошло при внутреннем давлении 9,823 МПа, 10,587 МПа и 11,76 МПа соответственно, при этом герметичность образцов не была нарушена. Зависимость деформации трубы в окружном направлении от давления представлены на рис. 9, 10 и 11.

Таблица 1

Геометрические характеристики образцов

№ образца	Общая длина, мм	Внешний диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Площадь поперечного сечения, см ²
1	1500	426	416.4	4.8	63.48
2	1500	426	416.4	4.8	63.48
3	1500	426	416.4	4.8	63.48
4	1500	426	416.4	4.8	63.48

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований

№ образца	Разрушающее давление в трубе, МПа	Окружной предел прочности при растяжении, Н/мм	Окружной модуль упругости при растяжении, МПа	Деформация при разрушении, %
1	10.63	2097.77	120678	7.12
2	9.82	2201.83	123561	1.59
3	10.59	2213.83	127287	2.09
4	11.76	2434.93	150796	1.81

Примечание: рассчитано по ISO 8521:2009



Рис. 4. – Образец № 1 после разрушения



Рис. 5. – Деформация трубы в окружном направлении для образца № 1



Рис. 6. – Общий вид образца № 2 после разрушения



Рис. 7. – Общий вид образца № 3 после разрушения



Рис. 8. – Общий вид образца № 4 после разрушения



Рис. 9. – Деформация трубы в окружном направлении для образца № 2



Рис. 10. – Деформация трубы в окружном направлении для образца № 3



Рис. 11. – Деформация трубы в окружном направлении для образца № 4

Экспериментальное исследование образцов № 2, № 3 и № 4 показало, что внешнее армирование углеродными лентами значительно уменьшает деформативность образцов. Внешний слой усиления разрушился при внутреннем давлении 9,82 МПа, 10,59 МПа и 11,76 МПа при относительных деформациях 1,59 %, 2,09 % и 1,81 % для образцов 2, 3 и 4 соответственно. Так же стоит отметить увеличение начального окружного предела прочности при растяжении образцов № 2, № 3 и № 4 относительно образца № 1 на 4,96 %, 5,53 % и 16,07 % соответственно и окружного модуля упругости 2,39 %, 5,48 % и 24,96 % соответственно.

Автор выражает благодарность Лаборатории натуральных испытаний НИИ ЭМ НИУ МГСУ за помощь в проведении эксперимента.

Литература

1. Данилов А.И., Калугин И.А. Усиление элементов стальных конструкций с применением клеевых соединений // Инженерный вестник Дона, 2021, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2021/6841/.
2. Туснин А.Р., Щуров Е.О. Экспериментальные исследования стальных элементов, усиленных углепластиковыми композиционными материалами // Промышленное и гражданское строительство, № 9, 2017, с. 25-29.

3. Польской П.П., Маилян Д.Р. Композитные материалы - как основа эффективности в строительстве и реконструкции зданий и сооружений // Инженерный вестник Дона, 2012, №4 (часть 2). URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1307.

4. Danilov A. I. FRP-Strengthening of Stretched Parts of Structural Elements by Cascade Multilayer Method. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 661, 2019, 012064 XXVIII R-P-S Seminar 2019, 9–13. September 2019, Žilina, Slovakia volume 661 of conference series, 2019, 7 p

5. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Татиев Д.А., Покулаев Д.В. Усиление металлических конструкций фиброармированными пластиками // Интернет-журнал "Науковедение" № 3, 2014. Май – июнь. с. 1–27.

6. Tsouvalis N. G., Experimental and numerical study of the fatigue behaviour of composite patch reinforced cracked steel plates // International Journal of Fatigue, 31, pp.1613-1627, 2009.

7. Гроздов В.Т. Усиление строительных конструкций при реставрации зданий и сооружений. СПб. 2005. 114 с

8. Леонова А.Н., Акритов Х.Э. Усиление деревянных конструкций композитными материалами // Наука. Техника. Технологии. 2020. №2. С. 329-333.

9. Kim Y.J., Hossain M., Harries K.A. CFRP strengthening of timber beams recovered from a 32-year-old quonset: Element and system level tests. Engineering Structures, 2013, vol. 57, pp. 213-221. URL: sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029613004409/

10. Hoseinpour H., Valluzzi M.R., Garbin E. et al. Analytical investigation of timber beams strengthened with composite materials. Construction and Building Materials, 2018, vol. 191, pp. 1242-1251. URL: sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818324127/.

References

1. Danilov A.I., Kalugin I.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2021/6841/.
2. Tusnin A.R., Schurov E.O. Promyshlennoje i grajdanskoje stroitelstvo. 2017. № 9. pp. 25-29.
3. Pol'skoy P.P., Mailyan D.R. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012. №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1307.
4. Danilov A. I. FRP-Strengthening of Stretched Parts of Structural Elements by Cascade Multilayer Method. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 661, 2019, 012064 XXVIII R-P-S Seminar 2019, 9–13. September 2019, Žilina, Slovakia volume 661 of conference series, 2019, 7 p.
5. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Tatiev D.A., Pokulaev D.V. Internet-zhurnal "Naukovedenie" № 3, 2014. Maj – iyun'. pp. 1– 27.
6. Tsouvalis N. G., Mirisiotis L. S., Dimou D. N. International Journal of Fatigue, 31, pp.1613-1627, 2009.
7. Grozdov V.T. Usilenie stroitel'nykh konstruktsiy pri restavratsii zdaniy i sooruzheniy [Strengthening of building structures in the restoration of buildings and structures]. SPb. 2005. 114 p.
8. Leonova A.N., Akritov K.E. Nauka, tehnika, tehnologii. 2020. №2. Pp. 329-333.
9. Kim Y.J., Hossain M., Harries K.A. Engineering Structures, 2013, vol. 57, pp. 213-221. URL: sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029613004409/.
10. Hoseinpour H., Valluzzi M.R., Garbin E. et al. Construction and Building Materials, 2018, vol. 191, pp. 1242-1251. URL: sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818324127/.

Дата поступления: 19.06.2024

Дата публикации: 3.08.2024