

Усиление при изгибе поврежденных стальных балок предварительно напряженными углепластиковыми пластинами с использованием системы предварительного напряжения

Е.В. Кондратьева, Л.Ю. Рыбакова

Самарский государственный технический университет

Аннотация: В ходе исследования была разработана новая система предварительного напряжения пластины из полимера, армированного углеродным волокном, для усиления поврежденных стальных балок. Был проведен параметрический анализ с использованием моделирования методом конечных элементов. Результаты показали, что удовлетворительная эффективность усиления может быть достигнута с помощью новой системы предварительного напряжения. Предварительно напряженный углепластик значительно увеличил показатели при изгибе балок на упругой и упруго-пластической стадиях благодаря использованию высокой прочности пластины из углепластика. Кроме того, по мере увеличения уровня предварительного напряжения эффективность усиления возрастала. Простое увеличение площади или модуля упругости пластины из углепластика немного улучшило эффективность упрочнения, тогда как одновременное применение предварительного напряжения явно увеличивает эффективность упрочнения.

Ключевые слова: Усиление при изгибе, стальная балка, предварительное напряжение, новая система, углепластиковая пластина.

Введение

Большое количество стальных конструкций неизбежно повреждаются из-за воздействия нагрузки и коррозии под воздействием окружающей среды в течение срока службы, что приводит к снижению их механических свойств и возникновению значительных потенциальных угроз безопасности. В последние десятилетия использование углепластика при усилении инженерных конструкций привлекло большое внимание исследователей и инженеров, а приклеивание углепластиков к компонентам является наиболее распространенным методом практического применения.

В этом исследовании была предложена новая система предварительного напряжения для усиления стальных балок. На основе этой системы был проведен параметрический анализ с использованием моделирования методом конечных элементов для обсуждения ключевых

параметров, влияющих на эффективность усиления несвязанных предварительно напряженных стальных балок, упрочненных углепластиком.

Описание моделей

Было проведено численное моделирование с использованием программного обеспечения конечных элементов ABAQUS [1]. Трехмерные (3D) модели КЭ были созданы для моделирования поврежденных стальных балок, усиленных несклеенными предварительно напряженными пластинами из углепластика [2-4]. Два анкера были закреплены на двух опорах с помощью Г-образного паза, упорной пластины и соединительных винтов, при этом относительного перемещения между двумя опорами и нижним фланцем в процессе нагружения не наблюдалось. Для моделирования стальной балки, анкера и пластины из углепластика использовался трехмерный восьмиузловой линейный твердотельный элемент. На рис. 1 показана зависимость текучести от размера сетки в зоне чистого изгиба.

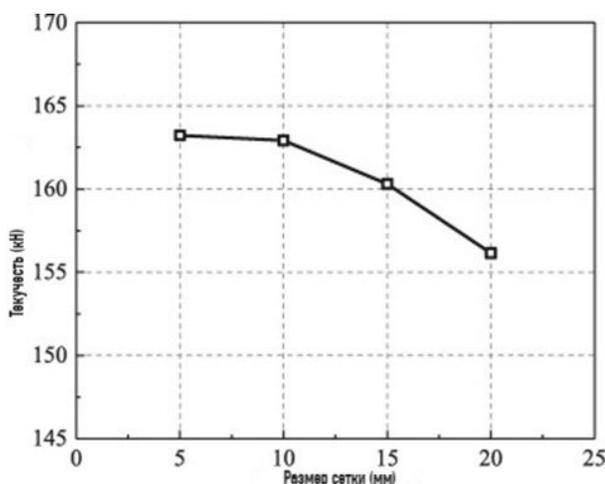


Рис. 1. – Зависимость текучести от размера сетки

Видно, что текучесть увеличивается при уменьшении размера сетки с 20 мм до 10 мм, а также сходимость модели КЭ происходила, когда размер ячейки достигал 10 мм

Учитывая эффективность и точность, в зоне чистого изгиба была принята мелкая сетка размером 10 мм, в то время, как другие зоны стальной балки моделировались с размером сетки 20 мм. Размер ячейки анкера и пластины из углепластика также составлял 10 мм. Типичные сетки модели показаны на рис. 2.

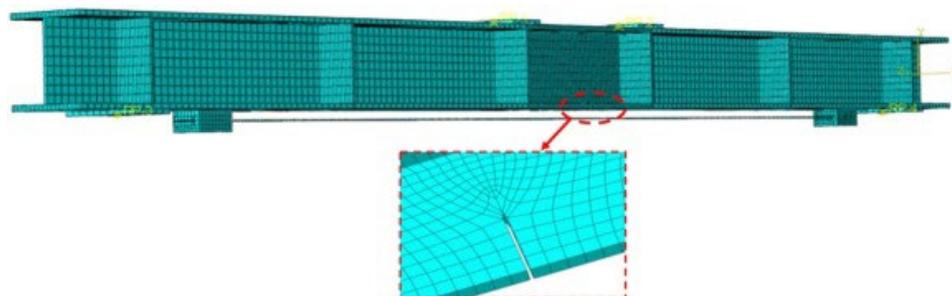


Рис. 2. – Сетки модели

Модели включали три типа компонентов: стальную балку, анкер и пластину из углепластика. Основные механические свойства этих материалов приведены в таблице 1.

Таблица №1

Механические свойства материалов

Материалы	Спецификация	Предел текучести, МПа	Прочность на растяжение, МПа	Модуль Юнга, ГПа	Удлинение, %
1	2	3	4	5	6
Сталь	-	271	429	207	15,8
Пластина из углепластика	2 мм	-	2516	163	1,54

1	2	3	4	5	6
Пластина из углепластик а	3 мм	-	2410	160	1,60
Клей	-	-	49,2	4,5	1,64

Стальная балка и анкер были смоделированы как изотропные материалы, и использовалось истинное поведение напряжения-деформации [5,6]. Пластина из углепластика моделировалась как изотропный линейно-упругий материал без учета механических свойств в поперечном направлении [7,8].

Для предварительно напряженных образцов в пластине из углепластика было создано заданное температурное поле для имитации предварительного напряжения в пластине из углепластика.

Параметрический анализ

1. Уровень предварительного напряжения

Результаты испытаний показали, что уровень предварительного напряжения был важным параметром, влияющим на поведение поврежденной стальной балки, усиленной углепластиком [9,10]. Параметрический анализ был проведен с шестью уровнями предварительного напряжения: 0, 20%, 35%, 50%, 60% и 75%. Кривые нагрузки и прогиба стальных балок, усиленных углепластиком, с различными уровнями предварительного напряжения и неусиленной стальной балки показаны на рис. 5. Можно заметить, что упругая изгибная жесткость стальной балки без предварительного напряжения была в основном такой же, как и у стальной балки без усиления. Когда применялось предварительное напряжение, изгибная способность и изгибная жесткость стальных балок постепенно улучшались с увеличением уровня предварительного напряжения из-за увеличения предварительного развала.

Результаты исследования показали, что увеличение предварительного напряжения в несвязанных пластинах из углепластика может еще больше повысить эффективность усиления при изгибе.

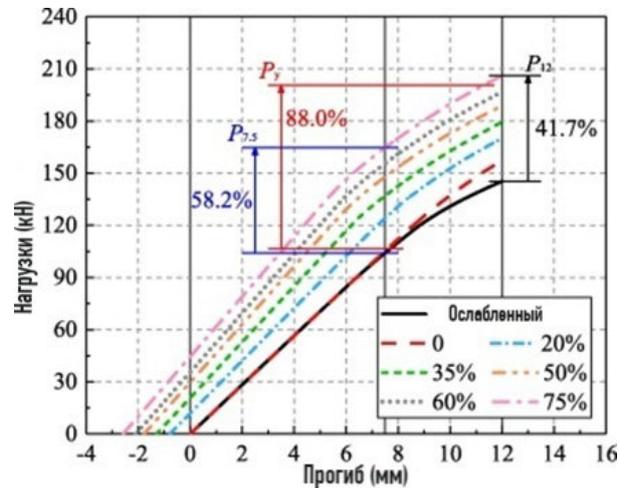


Рис. 3. – Зависимость между нагрузкой и прогибом стальных балок

2. Площадь плиты углепластика

На рис. 4 показано сравнение кривых нагрузки и прогиба стальных балок, усиленных углепластиковыми пластинами различной толщины.

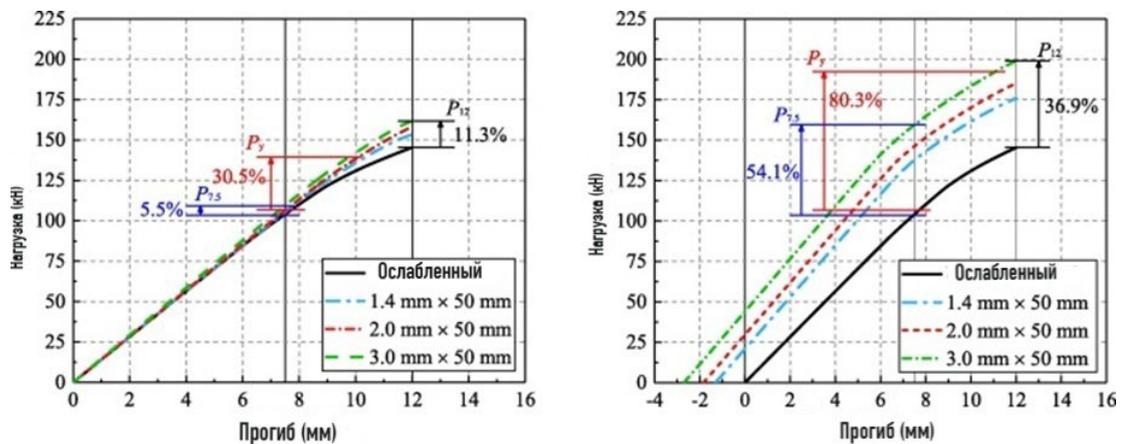


Рис. 4. – Кривая нагрузки и прогиба стальных балок различной толщины

Толщина углепластиковой пластины в моделях составляла 1,4, 2,0 и 3,0 мм соответственно, а уровень предварительного напряжения составлял 0% и 50% соответственно. В целом, можно заметить, что, хотя увеличение

площади углепластика может повысить жесткость при изгибе и характерные нагрузки поврежденных стальных балок, улучшения, особенно на упругой стадии, не были очевидны.

Заключение

В этом исследовании изучалось поведение при изгибе поврежденных стальных балок, усиленных предварительно напряженными углепластиковыми пластинами с использованием новой системы предварительного напряжения. Было проведено численное исследование для анализа влияния двух ключевых параметров на эффективность укрепления [11].

Применение предварительного напряжения значительно повысило эффективность усиления и использование прочности, которые постепенно увеличивались по мере увеличения уровня предварительного напряжения. Характерные нагрузки для образцов с несвязанными предварительно напряженными пластинами из углепластика увеличились на 19–30%, 38–50% соответственно, тогда как для несвязанных пластин из углепластика без предварительного напряжения увеличились только на 1%, 20 % соответственно.

Параметрический анализ показал, что увеличение площади углепластика улучшило поведение при изгибе в ограниченной степени, тогда как сочетание с предварительным напряжением было эффективным методом повышения эффективности усиления.

Литература

1. Кузнецов Т.А. Расчет балок с помощью программного комплекса «ABAQUS» // Вестник ВГАВТ. 2016. №47. С. 209-211.
2. Черпаков А.В., Акопьян В.А., Соловьев А.Н., Кабельков А.Н., Шевцов С.Н. Аналитический и конечно-элементный анализ параметров колебаний в



стержне с повреждением // Северо-Кавказский регион технической науки. 2010. №5. С. 21-28.

3. Голованов А.И., Бережной Д.В. Метод конечных элементов в механике деформированных тел // ДАС. 2001. С. 301

4. Бекетова Е.А. Разработка интерфейса для специализированного пакета программ на основе метода конечных элементов // Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук. 2005. №7. С. 153-154.

5. Михаськин В.В. К вопросу усиления изгибаемых стальных элементов при помощи углеволокнистых материалов // Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук. 2023. №10. С. 76-77.

6. Smith S. T., Teng J. G. Interfacial stresses in planted beams // Engineering Structures. 2001. №23. С. 857-871

7. Амелина Е.В., Голушко С.К., Ерасов В.С, Идимешев С.В., Немировский Ю.В., Семисалов Б.В., Юрченко А.В., Яковлев Н.О. О нелинейном деформировании углепластиков: эксперимент, модель, расчет // Вычислительные технологии. 2015. №5. С. 31-34

8. Абрамов А.В., Березовская М.Е., Войкина О.В., Чернеева А.С. Обработка экспериментальных данных по определению механических свойств конструкционных материалов // Новости материаловедения. Наука и техника. 2014. №1 С. 20-23.

9. Маилян Д.Р., Польской П.П. Прочность и деформативность усиленных композитными материалами балок при различных варьируемых факторах // Инженерный вестник Дона. 2013. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1676

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



11. Бельский М.Р. Усиление сжатых стержней стальных конструкций под эксплуатационной нагрузкой // Стройиздат.1984. С.45-49.
12. Morsy A., Heniegal A. Strengthening of steel beams with opening using CFRP // Architecture and Technology. 2022. №12. С.35.

References

1. Kuznecov T.A. Vestnik VGAVT. 2016. №47. pp. 209-211.
2. Cherpakov A.V., Akop'yan V.A., Solov'ev A.N., Kabel'kov A.N., Shevcov S.N. Severo-Kavkazskij region tekhnicheskoy nauki. 2010. №5. pp. 21-28.
3. Golovanov A.I., Bereznoj D.V. DAS. 2001. pp. 301
4. Beketova E.A. Sovremennye problemy fundamental'nyh i prikladnyh nauk. 2005. №7. pp. 153-154.
5. Mihas'kin V.V. Sovremennye problemy fundamental'nyh i prikladnyh nauk. 2023. №10. pp. 76-77.
6. Smith S. T., Teng J. G. Engineering Structures. 2001. №23. pp. 857-871
7. Amelina E.V., Golushko S.K., Erasov V.S, Idimeshev S.V., Nemirovskij Yu.V., Semisalov B.V., Yurchenko A.V., Yakovlev N.O. Vychislitel'nye tekhnologii. 2015. №5. pp. 31-34
8. Abramov A.V., Berezovskaya M.E., Vojkina O.V., Cherneeva A.S. Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika. 2014. №1. pp. 20-23.
9. Mailyan D.R., Pol'skoj P.P. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1676
10. Pol'skoj P.P., Mailyan D.R. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012. №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1307
11. Bel'skij M.R. Usilenie szhatyh sterzhnej stal'nyh konstrukcij pod ekspluatacionnoj nagruzkoj [Reinforcement of compressed bars of steel structures under service load]. Strojizdat.1984. pp. 45-49.
12. Morsy A., Heniegal A. Architecture and Technology. 2022. №12. pp.35.

Дата поступления: 9.05.2025 Дата публикации: 26.06.2025
