

Усиление стальных балок с помощью углеродно-волоконистых композитов. Завершение процесса клея при циклической нагрузке.

Е.В. Кондратьева, Л.Ю. Рыбакова

Самарский государственный технический университет

Аннотация: Было проведено испытание стальной балки, армированной углеродным волокном, которая подвергалась циклической нагрузке различной интенсивности при изгибе во время затвердевания клея и периодически испытывалась в статическом режиме для определения нарастания жесткости. Испытания показали, что сцепление происходит при более высоких нагрузках, прочность сцепления снижается, а при превышении значений напряжения сдвига в клеевом слое сцепление не происходит. Также гибкость клеевого слоя снижает характеристики сечения, но не более чем на 7 %. Испытания на сдвиг внахлест, проведенные на образцах, вырезанных из армированных балок, подтвердили результаты испытаний на изгиб, показав, что наибольшее снижение прочности сцепления происходит на концах балок, где напряжение скольжения и сдвига наиболее велико.

Ключевые слова: усиление углепластиков, циклическая нагрузка, прочность клеевого соединения, испытание на сдвиг внахлест.

Введение

Упрочнение углепластиком стальной конструкции происходит при условии, что оно выполняется в соответствии с наилучшими практическими рекомендациями, но отверждение при циклической нагрузке, которое могло бы произойти, если бы конструкция не была закрыта для движения во время упрочнения, влияет на прочность сцепления и может привести к полному разрушению соединения [1,2]. Дело в том, что гибкость адгезии снижает эффективные свойства армированной балки.

Образцы для испытаний

Образцы состояли из стальной двутавровой балки длиной 1,2 м, размером 127x76 мм и пластины длиной 0,98 м, толщиной 7,6 мм и шириной 76 мм, состоящей из однонаправленных углеродных волокон сверхвысокого модуля из эпоксидной смолы. Фланец стальной балки был обработан пескоструйным аппаратом и в течение часа пластина из углепластика была приклеена к стали [3]. После смешивания компонентов в заданных

пропорциях на сталь и углепластик были нанесены слои формованного клея. Максимальную фиксацию от скольжения по неотвержденному клею, а также для предотвращения падения углепластика использовались зажимы. В табл. 1 приведены используемые нагрузки, а на рис. 1 показан образец в испытательной установке.

Таблица № 1

Информация о нагрузке образцов

Образцы	Минимальная нагрузка, кН	Максимальная нагрузка, кН
34/1	1,0	34,0
42/1	1,0	42,0
50/1, 50/2	1,0	50,0
70/1	1,0	70,0

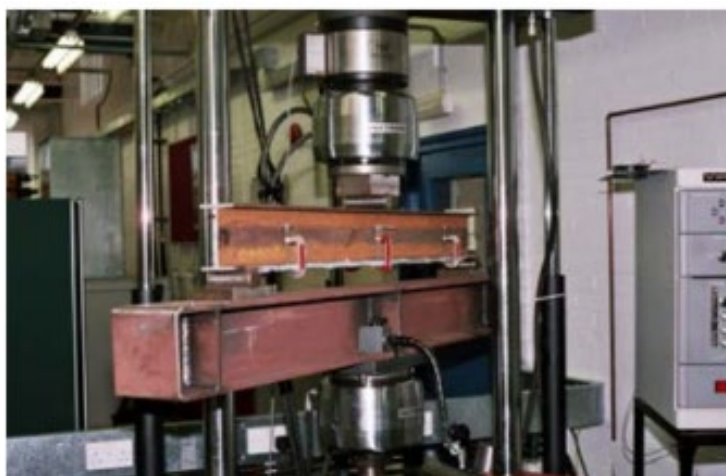


Рис.1. – Образец для испытания на изгиб в испытательной установке

Испытания проводились на гидравлическом станке. К нижней плите с помощью болтов была прикреплена тяжелая стальная балка, которая поддерживала образец с помощью двух роликов, расположенных на расстоянии 1,1 м друг от друга. К образцу прикладывалась синусоидально изменяющаяся нагрузка с частотой 0,25 Гц. Через определенные промежутки времени циклическое нагружение прекращалось и проводилось статическое испытание для измерения зависимости нагрузки от деформации образца.

Начало испытания

Кривые зависимости нагрузки от деформации для образца 50/1 и время проведения каждого статического испытания после склеивания показаны на рис. 2.

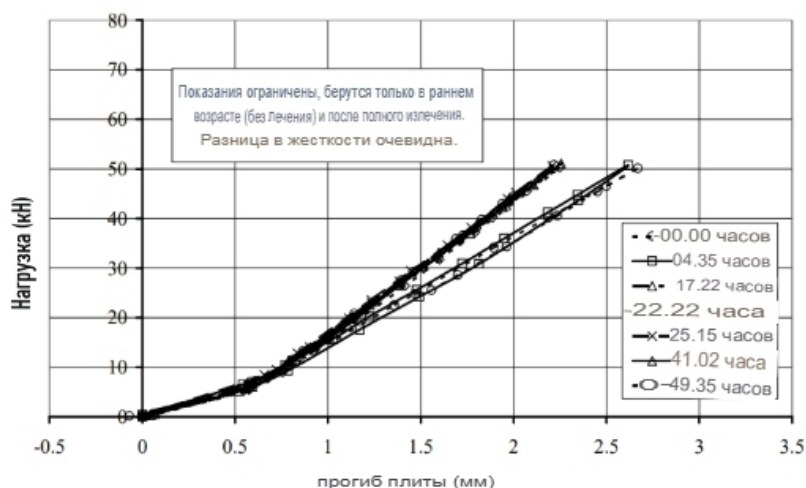


Рис. 2. – Кривые зависимости нагрузки от прогиба, балка 50/1

Изменение жесткости с течением времени (горизонтальная пунктирная линия показывает жесткость соответствующей контрольной балки)- рис. 3.

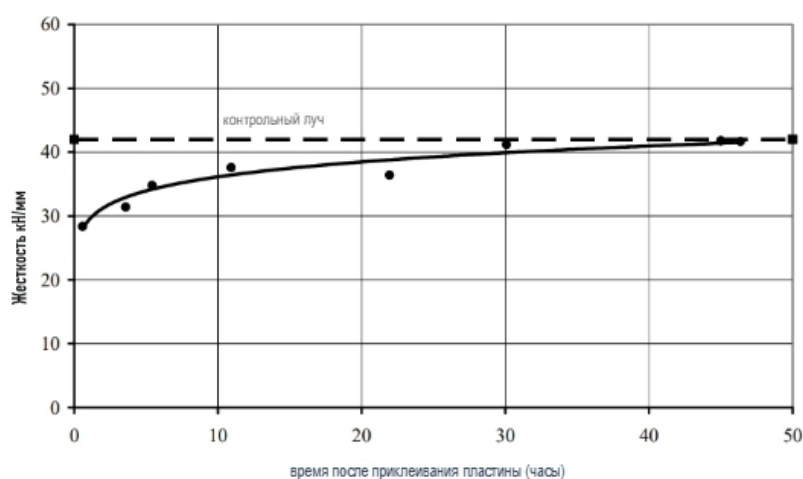


Рис. 3. -Зависимость жесткости от изгиба и времени, балка 50/2

На рис. 4 сравниваются результаты испытаний нескольких образцов.

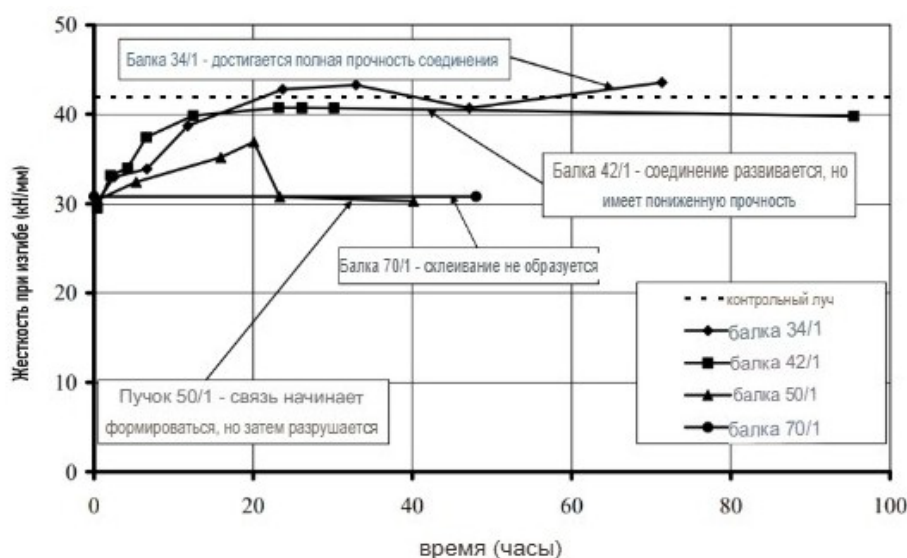


Рис. 4. – Зависимость жесткости при изгибе от времени для различных балок

Испытание на срез

Образцы были взяты из трёх усиленных балок. Две из них (балки 50/1 и 50/2) подвергались циклической нагрузке во время отверждения, а третья (балка 50/C1) была контрольной балкой, которая не подвергалась предварительной нагрузке. В каждом случае усиленный фланец был отдален от остальной части балки в месте пересечения фланца и стенки, а срез был выровнен таким образом, чтобы стальная и углепластиковая пластины имели одинаковую толщину.

Образцы были вырезаны с каждого конца и с середины балки. Концы образца были зажаты в губках испытательной машины и нагрузка увеличивалась с постоянной скоростью перемещения траверсы- 1 мм в минуту до тех пор, пока не произошло разрушение при сдвиге.

Были выявлены три вида разрушения: на границе раздела стали и клея, внутри углепластика и смешанный вид.

Жесткость при изгибе

Любой клей деформируется под нагрузкой, на эта гибкость не учитывается при использовании метода преобразованных сечений для расчета жесткости армированной балки. Сравнение прогнозируемой жесткости при изгибе с экспериментальным результатом для контрольной балки и со значением, полученным при условии, что клей жесткий. Разница между измеренной жёсткостью и значением, полученным при условии жёсткого сцепления, составляет около 7 %.

В образцах с более низкими максимальными циклическими нагрузками жесткость при изгибе увеличивалась по мере отверждения клея, пока не достигла максимального значения [4,5]. В образце 70/1, который подвергался наибольшей циклической нагрузке, наклон кривых зависимости нагрузки от прогиба не увеличился по сравнению с первоначальным наклоном кривой для стальной балки, и между сталью и углепластиком не образовалось соединения. При третьем типе поведения жёсткость на изгиб сначала увеличивалась, но в конечном счёте линия склеивания растрескалась на половине пролёта балки, и соединение было разрушено, а жёсткость на изгиб вернулась к значению, характерному для голой стальной балки.

Образец достиг постоянной жёсткости, но она была ниже жёсткости контрольной балки. В образце началось формирование соединения, но оно разрушилось через 20 часов после отверждения клея.

Таким образом, максимальная интенсивность циклической нагрузки влияет на прочность соединения, но не существует чёткой критической нагрузки, которая разделяла бы поведение с образованием и без образования соединения [6].

Относительное движение между склеиваемыми поверхностями приводит к повреждению отверждаемого клея, что приводит к ухудшению или полному отсутствию сцепления. Однако измерить фактическое проскальзывание между сталью и углепластиком не удалось: не хватило

места для установки соответствующих приборов, а расчёты показали, что проскальзывание будет очень незначительным. Для определения напряжения сдвига в клее был проведён простой анализ, основанный на инженерной теории изгиба [7]. Было решено ограничить максимальное напряжение сдвига, полученное таким образом, значением 1,0 Н/мм² (прогнозируемое напряжение в

Результаты испытаний на сдвиг в пределах каждой балки значительно различались, но среднее напряжение разрушения было ниже в предварительно нагруженных балках, чем в контрольной балке. Когда результаты были разделены на подгруппы, выяснилось, что напряжение разрушения на концах балки было ниже, чем в середине [8]. Напряжение разрушения было неизменно ниже в балках, подвергавшихся циклической нагрузке, что подтверждает, что циклическая нагрузка во время отверждения может снизить прочность клеевого соединения.

Результаты испытаний на сдвиг внахлест показывают, что величина проскальзывания или напряжения сдвига влияет на сцепление между сталью и углепластиком, что подтверждает наблюдение, сделанное в ходе испытаний на изгиб, о том, что существует предел величины проскальзывания или напряжения сдвига, которые может выдержать клей [9,10].

Выводы

Испытания на изгиб подтвердили постепенное увеличение жёсткости при более низкой циклической нагрузке по мере отверждения клея и формирования соединения. Испытания показали, что циклическая нагрузка во время отверждения клея может снизить прочность соединения. Соединение не сформируется, если деформация клея во время отверждения будет слишком большой. Однако на основании полученных результатов невозможно определить предельное значение. Испытания на сдвиг показали,

что снижение прочности было больше на концах балки, чем в середине пролёта. Целесообразно ограничить упрощённое напряжение сдвига в клеевом слое, рассчитанное на основе инженерной теории изгиба, максимальным значением 1,0 Н/мм².

Расчеты показали, что гибкость затвердевшего клеевого слоя, даже если на него не воздействовала циклическая нагрузка во время затвердевания, снижала жесткость на изгиб усиленной балки, хотя это снижение составляло не более 7 %.

Испытания показали, что модуль сдвига клеевого слоя составляет около 4000 Н/мм².

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. Морозов Ю.А. Исследование пластичности и характеристик плотности трехкомпонентного композита FeNiCu при прокатке // Инженерный вестник Дона, 2025, №10 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2025/10473
3. Михаськин В.В., К вопросу усиления изгибаемых стальных элементов при помощи углеволокнистых материалов // Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2023, С. 76–78.
4. Мыльников В.В., Кондрашкин О.Б., Шетулов Д.И., Циклическая прочность и долговечность конструкционных материалов // М: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2018, №3, С. 132-137.
5. Barnes, R.A. and Mays, G.C. The effect of traffic vibration on adhesive curing during installation of bonded external reinforcement // Structures and

- Buildings Journal, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 2001, №4, pp. 403-410.
6. Deng, J., Lee, M.M.K. and Moy, S.S.J., Stress analysis of steel beams reinforced with bonded CFRP plate // Composite Structures, pp. 205-215.
 7. Белоус А.А., Хватан А.М. Напряжения в клеевом слое клеевых конструкций // Ученые записки ЦАГИ, 1978, С. 75-83.
 8. Трощенко В.Т., Покровский В.В., Прокопенко А.В., Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении // Наукова думка, 1987, 256 с.
 9. Гусев А.Л., Горелина С.А., Захарян Р.А., Казарян М.А., Феофанов И.Н., Вибрационная и ударная прочность клеевых соединений // Альтернативная энергетика и экология, 2013, С. 85-91.
 10. Фрейдин А.С., Прочность и долговечность клеевых соединений // М: Химия, 1981, 272 с.

References

1. Danilov A.I., Kalugin I.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2021/6841
 2. Morozov Yu. A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2025, №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2025/10473
 3. Mixaskin V.V. Sankt- Peterburgskij gosudarstvennyj arxitekturno-stroitelnyj universitet, 2023, pp. 76–78.
 4. Mylnikov V.V., Kondrashkin O.B., Shetulov D.I. M: Nizhegorodskij gosudarstvennyj arxitekturno-stroitelnyj universitet, 2018, №3, pp. 132-137.
 5. Barnes, R.A. and Mays, G.C. Structures and Buildings Journal, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 2001, №4, pp. 403-410.
 6. Deng, J., Lee, M.M.K. and Moy, S.S.J. Composite Structures, pp. 205-215.
 7. Belous A.A., Xvatan A.M. Uchenye zapiski CzAGI, 1978, pp. 75-83.
-



8. Troshhenko V.T., Pokrovskij V.V. Treshchinostojkost metallov pri ciklicheskom nagruzhenii [Crack resistance of metals under cyclic loading]. Naukova dumka, 1987, 256 p.
9. Gusev A.L., Gorelina S.A., Zaxaryan R.A., Kazaryan M.A., Feofanov I.N. Alternativnaya energetika i ekologiya, 2013, pp. 85-91.
10. Frejdin A.S. M: Prochnost' i dolgovechnost' kleevyh soedinenij [Strength and durability of adhesive joints]. Ximiya, 1981, 272 p.

Дата поступления: 23.12.2025

Дата публикации: 24.01.2026