

## Усиление элементов стальных конструкций с применением клеевых соединений

*А.И. Данилов, И.А. Калугин*

*Московский государственный строительный университет (МГСУ)*

**Аннотация:** Обсуждается применение клеевых соединений при усилении элементов стальных конструкций. Клеевые соединения обеспечивают наименее затратный способ соединения элементов из любых материалов без нарушения их структуры. Особый интерес представляет усиление конструкций в растянутых зонах с применением высокопрочных волокон, таких, как стекловолокно и углеволокно, а также армированных ими полимеров. Основная трудность заключается в особенностях распределения сдвиговых усилий по длине клеевого слоя. В статье рассматривается подход к решению этой проблемы.

**Ключевые слова:** клеевое соединение, клеевой слой, сдвиговая прочность, аналитическое решение, метод конечных элементов, высокопрочное волокно, углеволокно, стекловолокно.

Усиление работающих на растяжение участков конструктивных элементов армированными высокопрочным волокном полимерами (FRP – Fiber Reinforced Polymers) на основе применения клеевых соединений позволяет в принципе упростить технологию усиления и ускорить процесс усиления стальных конструкций. При этом в большинстве случаев имеется возможность обходиться без нарушения режима их эксплуатации, поскольку здесь отсутствуют технологические операции, временно нарушающие целостность элементов или физические свойства материала.

Вместе с тем, применение клеевых соединений не может выполняться без специальной подготовки поверхности усиливаемого элемента, то есть очистки и, в случае применения углеволокна, обеспечения электроизоляции контактирующих поверхностей. Последнее выполняется путем нанесения слоя так называемого праймера. Вследствие этого при обычных габаритах усиливаемых элементов величина площади участков склеивания (далее – склеек) и, следовательно, подготовки определяет трудоемкость и затраты времени на усиление. Клеевой слой является наиболее слабым участком в

---

узлах усиления металлических конструкций в отличие от такого же усиления железобетонных и деревянных элементов, где слабым звеном при применении для склеивания, например, эпоксидных смол, как правило, оказывается материал усиливаемых элементов. Сдвиговые усилия в клеевом слое распределяются крайне неравномерно и очень быстро меняются от максимума в начале (конце) склейки практически до нуля. Для работающих на растяжение элементов, например, ферм, и растянутых участков элементов при изгибе может быть определена весьма ограниченная рациональная длина склейки, на которой касательные напряжения в клее распределяются практически равномерно, а суммарное усилие сдвига такое же, как и при приклеивании ленты усиления по всей её длине. Это должно многократно снизить трудоемкость процесса и стоимость усиления.

Вторым критическим фактором является соотношение жесткостей элементов усиления и основных (усиливаемых) стальных элементов. Сумма сечений волокон в элементах усиления очень мала по сравнению с размерами поперечных сечений усиливаемых элементов при соизмеримых величинах модуля упругости. Для достижения сколько-нибудь значительного эффекта усиления даже при модуле упругости волокон большем модуля упругости стали (высокомодульные материалы) желательно предварительное натяжение элементов усиления, что едва ли подойдет для клеевых соединений. Также эффект усиления начинает проявляться при выходе основного элемента в зону текучести, поскольку при разнице расчетных сопротивлений материалов в несколько раз высокопрочные волокна при этом продолжают работать упруго (площадка текучести к ним практически отсутствует). Высокомодульные волокна очень дороги и их использование бывает оправданно только в особых случаях. Однако, максимально допустимое усилие натяжения волокон определяется в конечном счете прочностью клеевых соединений. Это и является основной проблемой в

---

задаче усиления металлических конструкций и особенно стали. В результате вместо усиления, как такового, применение полимеров стало связываться с повышением усталостной прочности стали.

Проблемы применения полимеров на основе армирования высокопрочными волокнами для усиления элементов строительных конструкций обсуждаются в работе [1]. Результаты экспериментальных исследований поведения клеевых соединений при усилении работающих на растяжение участков стальных элементов с трещинами представлены в работах [2] и [3]. Полимерные материалы при своих уникальных физических свойствах идеально подходят для применения в качестве резервных (перехватывающих) ([4]) элементов, не работающих при нормальной эксплуатации, но активных в аварийных ситуациях в растянутых зонах. Использование полимеров с применением клеевых соединений при восстановлении и усилении анализируется в работах [5-6].

Стальные элементы усиления обладают значительным весом и при их прикреплении возникают дополнительные зоны концентрации напряжений в основном металле в результате сварки или сверления [7]. Сварка в условиях монтажа создает ряд серьезных технологических проблем [8], а во взрывоопасных зонах выполнение работ по усилению стальными элементами возможно только при введении строгих мер обеспечения безопасности [9].

При более высокой прочности, износостойкости и устойчивости к агрессивным воздействиям вес полимерного усиления в несколько раз меньше, чем у аналогичного усиления из стали [10-11],

Эффективная (рабочая) длина участка приклеивания (склейки), на котором сдвиговые напряжения близки к постоянным может быть подобрана с помощью приведенных ниже соотношений, получаемых из условия равновесия элемента клевого слоя усиления растянутого элемента:

$$\tau'' - \beta^2 \tau = 0 \quad (1)$$

---

$$\beta^2 \equiv \frac{G_a b_p}{t_a} \cdot \left( \frac{1}{E_p A_p} + \frac{1}{E_s A_s} \right)$$

где  $\tau$  - касательные напряжения в слое клея,  $G_a$  - модуль сдвига материала склеивания,  $t_a$  - толщина клеесого слоя,  $b_p$  - ширина слоя клея и элемента усиления (ленты),  $E_s$  - модуль упругости материала основного элемента,  $A_s$  - площадь сечения основного элемента,  $E_p$  - модуль упругости ленты,  $A_p$  - площадь сечения ленты,  $d$  - длина склейки,  $L$  - половина длины участка усиления (от начала склейки до середины основного элемента),  $c = (L - d)$  - свободный участок между склейками.

Решение уравнения (1) с учетом краевых условий имеет вид:

$$\tau(x) = P(B_{11}sh(\beta x) + B_{21}ch(\beta x))$$

$$B_{11} = -\frac{G_a}{\beta \cdot t_a} \cdot \frac{1}{E_s A_s}, \quad B_{21} = \frac{G_a}{\beta \cdot t_a} \cdot \frac{c \cdot \beta \cdot ch(\beta d) + sh(\beta d)}{c \cdot \beta \cdot sh(\beta d) + ch(\beta d)}$$

Усилие в ленте между склейками постоянно, а в пределах склейки определяется следующим выражением:

$$N_p(x) = P \cdot \frac{b_p}{\beta} \cdot ((B_{11}ch(\beta x) - 1) + B_{21}sh(\beta x))$$

Поскольку касательные напряжения в клее не могут превышать его сдвигового расчетного сопротивления, то, задаваясь величиной длины склейки  $d$ , можно получить ограничение на усилие в ленте  $P$  и, наоборот, при заданном  $P$  подобрать, если это возможно, эффективную величину параметра длины  $d$ .

$$\tau(x) \leq R_{as}$$

Итак, прочность усиления ограничивается прочностью клеевого соединения, что приводит проблему усиления в тупик.

Предлагаемый подход к решению проблемы усиления заключается в применении вместо одного очень прочного элемента усиления группы

работающих параллельно относительно «слабых» элементов. Таким образом, вместо одного относительно слабого вследствие ограниченности несущей способности клеевого слоя соединения конструкция усиления может включать в себя ряд таких работающих «параллельно» соединений.

Для этого на каждую предыдущую армированную высокопрочными волокнами тонкую ленту (слой) накладывается следующая большей длины. Длина приклеивания каждой ленты по концам к усиливаемому элементу определяется с помощью приведенных выше соотношений. Между собой ленты не склеиваются и относительно друг друга должны проскальзывать достаточно свободно. В результате, суммарное усилие в элементах усиления одинаковой жесткости делится между ними пропорционально их длинам и жесткостям и соответствующим образом распределяется по участкам приклеивания. Такая конструкция позволяет во многих случаях обходиться без дорогостоящих особо высокопрочных материалов. Например, при наклеивании пяти лент, усилие и напряжение в каждой из них и в каждом клеевом слое может составлять лишь пятую часть суммарного. Вместо углеволокна возможно применение менее прочного материала, например, стекловолокна. Однако следует иметь в виду, что на эффективность усиления существенно влияет жесткость элементов усиления, то есть модуль упругости материала.

### Литература

1. 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.
2. Туснин А.Р., Щуров Е.О. Экспериментальные исследования клеевого соединения элементов из стали и углепластиковых композиционных

материалов // Промышленное и гражданское строительство, № 7, 2017, с. 69-73

3. Туснин А.Р., Щуров Е.О. Экспериментальные исследования стальных элементов, усиленных углепластиковыми композиционными материалами // Промышленное и гражданское строительство, № 9, 2017, с. 25-29.

4. Данилов А.И. Концепция управления процессом разрушения строительного объекта // Промышленное и гражданское строительство, № 8, 2014, с. 74-77

5. Данилов А.И., Калугин И.А. Усиление растянутых элементов полимерами на основе высокопрочного волокна // Промышленное и гражданское строительство, № 12, 2018, с. 25-31

6. 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.

7. Tavakkolizadeh, Saadatmanesh H. Fatigue strength of steel girders strengthened with carbon fiber reinforced polymer patch // Journal of Structural Engineering, ASCE, 129, pp. 186-196, 2003.

8. El-Tawil S., Ekiz E., Goel S., Chao S.-H. Retraining local and global buckling behavior of steel plastic hinges using CFRP // Journal of Constructional Steel Research, 67, pp. 261-269, 2011.

9. 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.

10. Bocciarelli M., Colombi P., Fava G., and Poggi C. Fatigue performance of tensile steel members strengthened with CFRP plates // Composite Structures 87 pp. 334-343, 2009.

11. Ghafoori E., Motavalli M. Flexural and interfacial behavior of metallic beams strengthened by prestressed bonded plates // Composite Structures, 101, pp. 22-34, 2013.

### References

1. 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.
2. Tusnin A.R., Schurov E.O. Promyshlennoje i grajdanskoje stroitelstvo. 2017. № 7. pp. 69-73.
3. Tusnin A.R., Schurov E.O. Promyshlennoje i grajdanskoje stroitelstvo. 2017. № 9. pp. 25-29.
4. Danilov A.I. Promyshlennoje i grajdanskoje stroitelstvo. 2014. № 8. pp. 74-77
5. Danilov A.I., Kalugin I.A. Promyshlennoje i grajdanskoje stroitelstvo. № 12, 2018, pp. 25-31.
6. 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.
7. Tavakkolizadeh, Saadatmanesh H. Journal of Structural Engineering, ASCE, 129, pp. 186-196, 2003.
8. El-Tawil S., Ekiz E., Goel S., Chao S.-H. Journal of Constructional Steel Research, 67, pp. 261-269, 2011.
9. Tsouvalis N. G., Mirisiotis L. S., Dimou D. N. International Journal of Fatigue, 31, pp.1613-1627, 2009.
10. Bocciarelli M., Colombi P., Fava G., and Poggi C. Composite Structures 87 pp. 334-343, 2009.
11. Ghafoori E., Motavalli M. Composite Structures, 101, pp. 22-34, 2013.