

Клюев С. В., канд. техн. наук, доц., докторант,  
Рубанов В. Г., д-р техн. наук, проф.,  
Павленко В. И., д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова  
Гурьянов Ю. В., директор  
ООО «ВСУ «ИНТЕР/ТЭК», г. Екатеринбург  
Гинзбург А. В., канд. техн. наук  
Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова

## РАСЧЕТ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ УСИЛЕННЫХ УГЛЕВОЛОКНОМ\*

klyuyev@yandex.ru

В статье рассмотрены вопросы усиления конструкций композитами на основе углеволокна. Представлена методика расчета конструкций усиленных композитами на основе углеволокна.

**Ключевые слова:** усиление, изгибаемые конструкции, углеродное волокно.

### 1. Расчет сжатых элементов

Композитные материалы, армированные углеродными волокнами, могут применяться на внешних поверхностях для восстановления утерянной несущей способности колонн в случае потери части сечения арматуры вследствие ее коррозии или для повышения несущей способности в случае увеличения действующих нагрузок [1 – 5].

Повышение несущей способности колонн на действие продольной силы может быть обеспечено наклейкой композита в поперечном направлении.

1.1. Прямоугольные сечения колонн с соотношением сторон

$$\frac{b}{h} \leq 1.5,$$

в направлении перпендикулярном оси элемента могут быть усилены для повышения несущей способности при осевом сжатии путем создания эффекта обоймы композитным материалом (рис. 1).

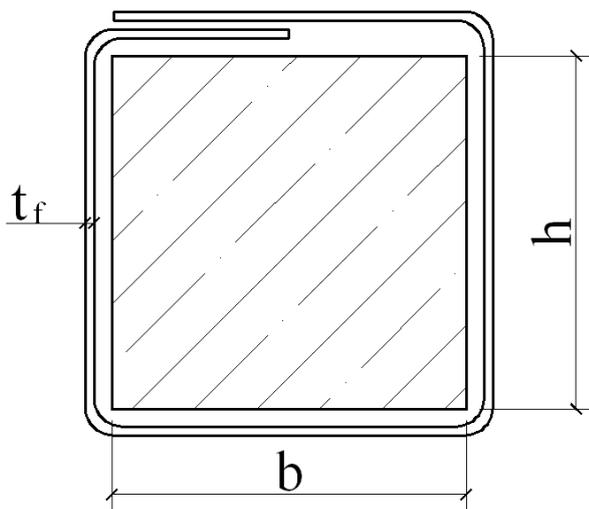


Рис. 1. Сечение усиленной колонны

Необходимая толщина обоймы ( $t_f$ ) из композитного материала определяется из выражения:

$$t_f \geq 0.5k_h \left( \frac{bh}{b+h} \right), \quad (1)$$

$$k_h = \frac{0.8(\epsilon_{bu} - 0.004)1.5R_b}{R_f \epsilon_{fu}}, \quad (2)$$

где  $R_b$  – нормативное сопротивление бетона сжатию, кгс/см<sup>2</sup>;  $\epsilon_{bu} = 0,003$  – максимальная деформация бетона при сжатии;  $R_f$  – нормативное сопротивление композитного материала растяжению, кгс/см<sup>2</sup>;  $\epsilon_{fu}$  – максимальная деформация при растяжении композитного материала;  $b$  – ширина сечения колонны, см;  $h$  – высота сечения колонны, см;  $t_f$  – толщина оболочки из композитного материала, см.

При проектировании должно соблюдаться условие:

$$E_f \epsilon_f \leq 0.75R_f, \quad (3)$$

где:  $E_f$  – нормативное значение модуля упругости композитного материала, кгс/см<sup>2</sup>;  $\epsilon_f$  – нормативная деформация растяжения композитного материала.

1.2. Круговое обертывание углеволокном создает ограничение деформированию в поперечном направлении путем создания обоймы с ориентацией волокон в поперечном направлении и приводит к увеличению прочности при сжатии. При увеличении сжимающих нагрузок обойма испытывает растяжение, сдерживая развитие поперечных деформаций. Вклад продольно расположенных волокон на прочность при сжатии бетонного элемента игнорируется. Для надежной работы обоймы необходим ее плотный контакт с элементом; величина сцепления с бетоном здесь решающего влияния не оказывает (рис. 2).

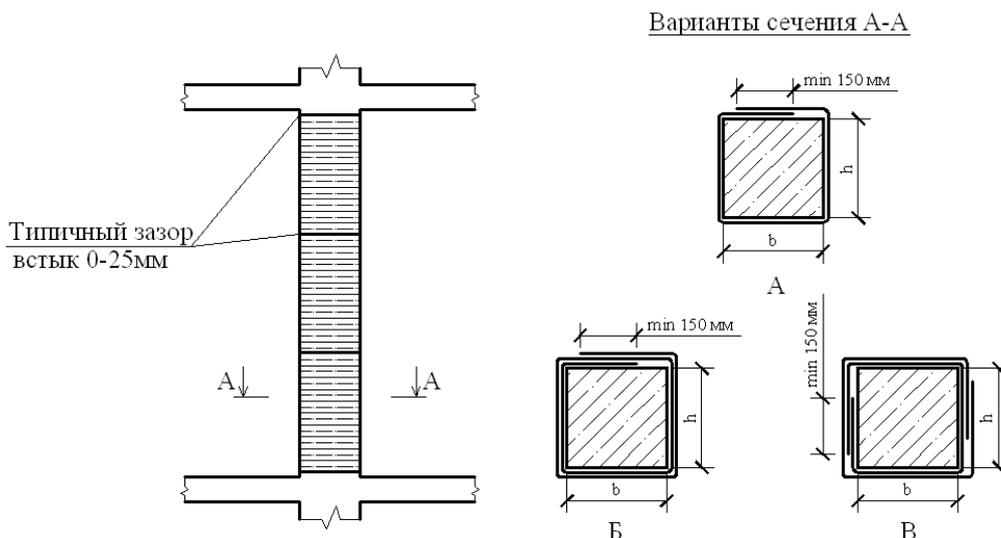


Рис. 2. Типовое решение обеспечения плотного контакта обоймы с усиляемым элементом.  
 А – в один слой; Б – в 2 слоя одной непрерывной полосой;  
 В – в 2 слоя двумя полосами

1.3. Прочность на сжатие бетонного элемента с напряжением в обойме  $\sigma_f$  можно вычислить с помощью выражения (4)

$$R_{bf} = R'_b \left[ 2.25 \sqrt{1 + 7.9 \frac{\sigma_f}{R_b} - 2 \frac{\sigma_f}{R_b}} - 1.25 \right], \quad (4)$$

где:  $R_{bf}$  – прочность на сжатие бетонного элемента, кгс/см<sup>2</sup>;  $R'_b$  – расчетное сопротивление бетона сжатию, кгс/см<sup>2</sup>;  $\sigma_f$  – максимальные расчетные напряжения в обойме, кгс/см<sup>2</sup>.

Выражение (4) раньше использовалось в расчетах эффективности стальной обоймы, исследования показали, что это выражение также применимо для бетонных элементов с обоймами из углеволокна. Прочность бетона в обойме можно вычислить с помощью выражения (4). Максимальные расчетные напряжения в обойме определяются выражением (5):

$$\sigma_f = \frac{\rho_f \sigma_{fu}}{2} = \frac{\rho_f \epsilon_{fe} E_f}{2}, \quad (5)$$

где:  $\rho_f$  – ограничивающее давление, обеспечиваемое обоймой;  $\sigma_{fu}$  – расчетное напряжение в композитном материале, кгс/см<sup>2</sup>;  $\epsilon_{fe}$  – расчетная деформация растяжения композитного материала.

1.4. Ограничивающее давление, обеспечиваемое обоймой в прямоугольном сечении, можно вычислить, используя выражение (6):

$$\rho_f = \frac{2nt_f (b + h)}{bh}, \quad (6)$$

где:  $n$  – число слоев, наклеиваемого композитного материала.

Ограничивающее давление, обеспечиваемое обоймой в круглом сечении можно вычислить, используя выражение (7):

$$\rho_f = \frac{4nt_f}{2r}, \quad (7)$$

где:  $r$  – радиус круглого сечения колонны.

1.5. Если элемент испытывает деформации сжатия и сдвига, расчетная деформация в обойме углеволокна должна быть ограничена в соответствии с (8) (рис. 3):

$$\epsilon_{fe} = 0.004 \leq 0.75 \epsilon_{fu}. \quad (8)$$

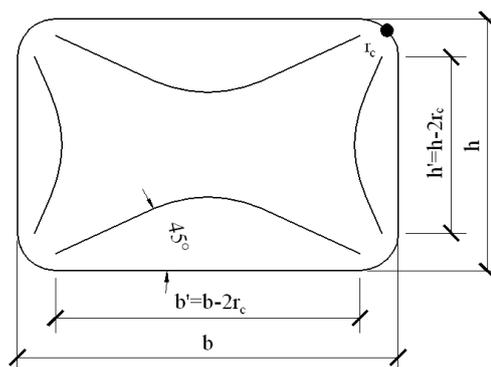


Рис. 3. Активные зоны при усилении прямоугольных сечений колонн

Следует учитывать, что для прямоугольных сечений с соотношением высоты к ширине, превышающим 1,5, или размерами поперечного сечения  $b$  или  $h$ , превышающими 900 мм, ограничивающим воздействием обоймы из углеволокна следует пренебрегать, если испытания не покажут ее эффективность.

## 2. Расчет изгибаемых элементов

2.1 Величина дополнительной обеспечиваемой несущей способности по моменту ограничивается величиной, составляющей 1,5 – 1,6 несущей способности элементов.

2.2 Композитный материал может быть соединен с поверхностями балок и плит для повышения расчетной изгибной прочности сечений, действуя как дополнительный, работающий на растяжение усиливающий элемент. В подобных случаях расчет сечения должен базироваться на равновесии сил и совместности деформаций подложки, усиливающего элемента и композитного материала.

2.3 Рекомендуется по концам продольных волокон использовать анкерующие поперечные полосы для обеспечения развития расчетной деформации и увеличения срока службы применяемого сцепления.

2.4 Для возможности передачи пара, 30% усиливаемой поверхности должны быть свободны от ткани из углеволокна.

2.5 Изгибаемый момент, воспринимаемый композитным материалом составляет:

$$M_f = R_f A_f j d$$

где:  $R_f$  – гарантированное расчетное сопротивление композитного материала;  $A_f = b_f t_f$  – площадь композитного материала;  $b_f$  – ширина композиционного материала;  $t_f$  – толщина композиционного материала;

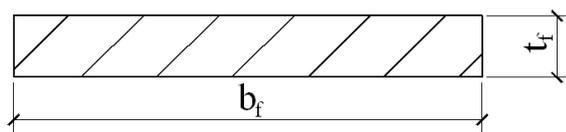


Рис. 4. Композитный материал

$j d = d - \frac{x}{2}$  – расстояние от центра тяжести

композитного материала до центра тяжести сжатой зоны бетона;  $h$  – высота балки;  $x$  – высота сжатой зоны бетона.

На рис. 5 представлена эпюра моментов в усиленной балке.

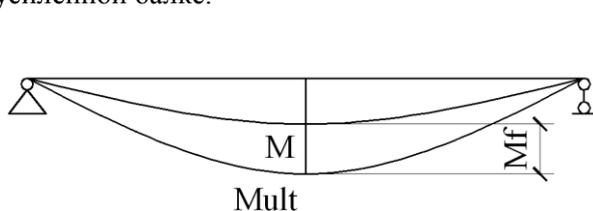


Рис. 5. Эпюра моментов в усиленной балке

На рис. 6. представлена схема усилий в сечении нормальном к продольной оси элемента.

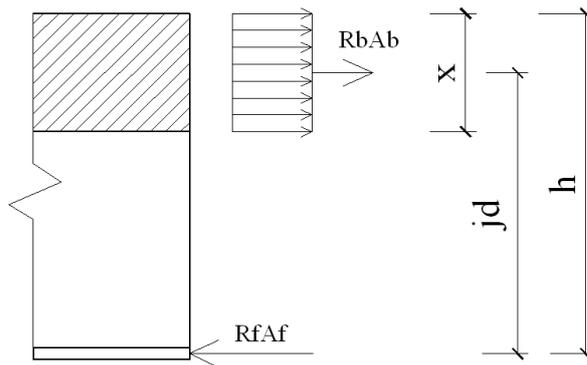


Рис. 6. Схема усилий в сечении нормальном к продольной оси элемента

*\*Работа выполнена при финансовой поддержке в виде гранта президента Российской Федерации МК-5667.2013.8 по теме: «Повышение эксплуатационных характеристик бетонных и железобетонных изделий и конструкций на композиционных вяжущих и техногенных песках за счет дисперсного и внешнего армирования» и гранта для аспирантов и молодых научно-педагогических работников БГТУ им. В.Г. Шухова в рамках реализации мероприятий Программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова на 2012-2016 годы по теме: «Разработка теоретических и практических основ усиления и восстановления строительных конструкций композитом на основе углеволокна путем внешнего армирования».*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клюев С.В., Лесовик Р.В., Рубанов В.Г. Расчет изгибаемых конструкций усиленных композитами на основе углеродного волокна // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. № 4. С. 55 – 58.
2. Клюев С.В. Усиление и восстановление конструкций с использованием композитов на основе углеволокна // Бетон и железобетон. 2012. №3. С. 23 – 26.
3. Клюев С.В., Гурьянов Ю.В. Внешнее армирование изгибаемых фибробетонных изделий углеволокном // Инженерно-строительный журнал. 2013. №1(36). С. 21 – 26.
4. Клюев С.В., Клюев А.В., Лесовик Р.В. Усиление строительных конструкций композитами на основе углеволокна: монография. Lambert, 2011. 123 с.
5. Клюев С.В. Технология усиления конструкций углеволокном// Белгородская область: прошлое, настоящее и будущее: материалы научн.-практ. конф. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. – Ч.1. – С. 404 – 408.