

УДК 624.011.1

Лобов Д.М. – аспирант

E-mail: d.m.lobov@yandex.ru

Крицин А.В. – кандидат технических наук

E-mail: ak.dk@mail.ru

Тихонов А.В. – аспирант

E-mail: tihon88@mail.ru

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 603950, Россия, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65

### Особенности армирования деревянных элементов, усиленных углеродным волокном, при статическом изгибе

#### Аннотация

Проведены предварительные сравнительные испытания деревянных элементов, усиленных углеродным волокном, на статический изгиб. Получен экономичный способ усиления деревянных конструкций углеродным волокном, который заключается переменным армированием по длине деревянного элемента. Проведен сравнительный анализ деревянных балок, армированных постоянным и переменным способом. Полученные результаты экспериментов удовлетворяют результатам теоретических изысканий. Исследования проводились в рамках изучения совместной работы древесины и углеродного волокна.

**Ключевые слова:** углеродное волокно, углеродные композиционные материалы, композиты, ткань из углеродных волокон, усиление деревянных конструкций.

В рамках исследования вопроса эффективного использования углеродного волокна при усилении изгибаемых деревянных элементов анализу подверглись формулы для определения нормальных и касательных напряжений, базирующиеся на методике расчета армированных деревянных конструкций [3].

В основу данного расчета положена первая стадия (условно упругая) напряженно деформированного состояния. При этом считается, что связь между древесиной и элементом усиления непрерывна по длине конструкции и обеспечивает их полную совместную работу на весь срок эксплуатации.

Формула для определения нормальных напряжений в древесине при статическом изгибе элемента, усиленного углеволокном, будет иметь вид:

$$\sigma_d = \frac{M}{W_{пр}^c}, \quad (1)$$

где  $W_{пр}^c = I_{пр}/h_c$  – приведенный момент сопротивления сжатой зоны сечения;

$$I_{пр} = I_d + n \cdot I_a = \frac{b \cdot h^3}{12} \cdot \frac{1 + 4 \cdot n \cdot \mu}{1 + n \cdot \mu} \quad \text{– приведенный момент инерции сечения}$$

относительно нейтральной оси;

$$h_c = \frac{h}{2} \cdot \frac{1 + 2 \cdot n \cdot \mu}{1 + n \cdot \mu} \quad \text{– высота сжатой зоны сечения;}$$

$\mu = F_a / (b \cdot h)$  – коэффициент армирования поперечного сечения конструкции;

$n = E_a / E_d$  – отношение модулей упругости элемента усиления и древесины;  $E_a$  принят равным 230 ГПа для углеродного волокна плотностью 230 г/м<sup>3</sup>;  $E_d$  – длительный модуль упругости древесины принят равным 6,9 ГПа [4].

Подставив геометрические характеристики сечения в формулу (1), получим следующее выражение для определения нормальных напряжений:

$$\sigma = \frac{M}{(b \cdot h^2 / 6)} \cdot \frac{1 + 2 \cdot n \cdot \mu}{1 + 4 \cdot n \cdot \mu} = \sigma \cdot \beta_w, \quad (2)$$

где  $\sigma = \frac{M}{(b \cdot h^2/6)}$  – формула для определения нормальных напряжений в древесине не

усиленного элемента;

$\beta_w = \frac{1+2 \cdot n \cdot \mu}{1+4 \cdot n \cdot \mu}$  – коэффициент, учитывающий включение в работу углеволокна в

качестве элемента внешнего армирования.

Формула для определения касательных напряжений в нейтральном слое древесины при статическом изгибе элемента, усиленного углеволокном, будет иметь вид:

$$\tau_{д.н.сл.} = \frac{Q \cdot S_{пр}}{I_{пр} \cdot b_{расч}}, \quad (3)$$

где  $S_{пр} = b \cdot h_c^2/2$  – приведенный статический момент инерции.

Подставив геометрические характеристики сечения в формулу (3), получим следующее выражение для определения касательных напряжений в нейтральном слое древесины:

$$\tau_{д.н.сл.} = \frac{Q \cdot S'_{бр}}{I_{бр} \cdot b_{расч}} \cdot \frac{(1+2 \cdot n \cdot \mu)^2}{(1+n \cdot \mu) \cdot (1+4 \cdot n \cdot \mu)} = \tau_{д.} \cdot \beta_{н.сл.}, \quad (4)$$

где  $\tau_{д.} = \frac{Q \cdot S'_{бр}}{I_{бр} \cdot b_{расч}}$  – формула для определения касательных напряжений в древесине в

уровне нейтрального слоя не усиленного элемента;

$\beta_{н.сл.} = \frac{(1+2 \cdot n \cdot \mu)^2}{(1+n \cdot \mu) \cdot (1+4 \cdot n \cdot \mu)}$  – коэффициент, учитывающий включение в работу

углеволокна в качестве элемента внешнего армирования.

Формула для определения касательных напряжений в уровне клевого шва при статическом изгибе элемента, усиленного углеволокном, будет иметь вид:

$$\tau_{к.ш.} = \frac{Q \cdot S_{пр}^a}{I_{пр} \cdot b_{к.ш.}}, \quad (5)$$

где  $S_{пр}^a = n \cdot F_a \cdot h_p$  – приведенный статический момент углеволокна относительно нейтральной оси;

$h_p = \frac{h}{2 \cdot (1+n \cdot \mu)}$  – высота растянутой зоны сечения;

$b_{к.ш.}$  – ширина поверхности скалывания клевого шва.

Подставив геометрические характеристики сечения в формулу (5), получим следующее выражение для определения касательных напряжений в уровне клевого шва:

$$\tau_{к.ш.} = \frac{Q \cdot S'_{бр}}{I_{бр} \cdot b_{к.ш.}} \cdot \frac{4 \cdot n \cdot \mu}{1+4 \cdot n \cdot \mu} = \tau_{д.} \cdot \beta_{к.ш.}, \quad (6)$$

где  $\beta_{к.ш.} = \frac{4 \cdot n \cdot \mu}{1+4 \cdot n \cdot \mu}$  – коэффициент, учитывающий включение в работу углеволокна в

качестве элемента внешнего армирования.

По формулам (2), (4), (6) строим графики зависимости отношений нормальных и касательных напряжений элемента, усиленного углеволокном, к нормальным и касательным напряжениям не усиленного элемента при изменении коэффициента армирования  $\mu$  при прочих равных условиях.

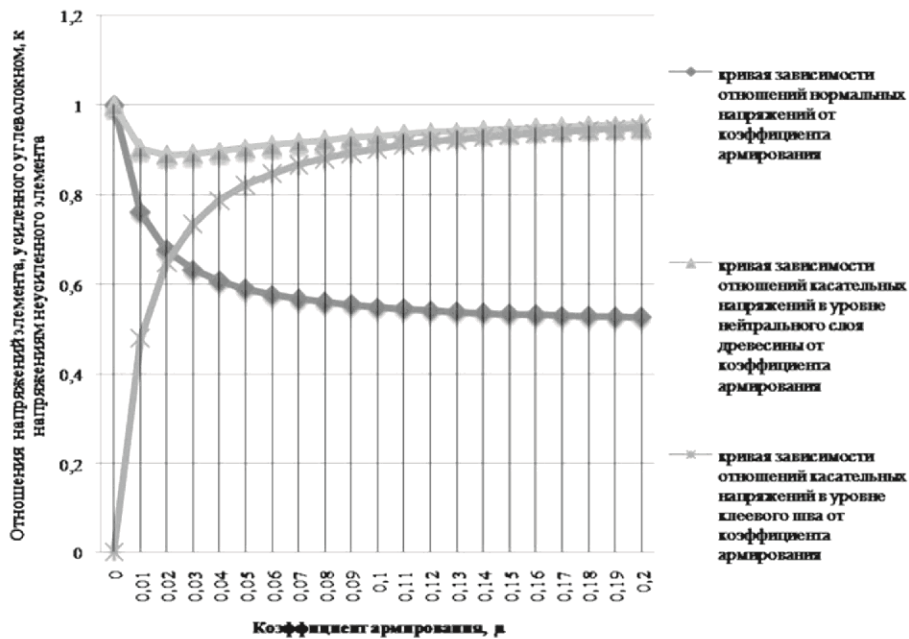


Рис. 1. График зависимости отношений нормальных и касательных напряжений

По графику видно, что при  $\mu=0$  отношение нормальных напряжений в древесине усиленного элемента к нормальным напряжениям не усиленного элемента равно 1, а при увеличении коэффициента армирования  $\mu$  отношение напряжений уменьшается. Несколько отличная ситуация наблюдается с касательными напряжениями в уровне нейтрального слоя древесины. При  $\mu=0$  отношение касательных напряжений усиленного элемента к напряжениям в не усиленном элементе равно 1, а при увеличении коэффициента армирования  $\mu$  отношение сначала уменьшается, затем плавно начинает увеличиваться, но 1 так и не достигает. Обратная ситуация наблюдается с касательными напряжениями в уровне клеевого шва. При  $\mu=0$  касательные напряжения в уровне клеевого шва усиленного элемента равны 0, а при увеличении коэффициента армирования отношение касательных напряжений в уровне клеевого шва усиленного элемента к касательным напряжениям не усиленного элемента плавно увеличивается, но 1 так и не достигает.

Проанализировав графики на рис. 1, можно сделать вывод о том, что рационально используемый коэффициент армирования составляет  $\mu=5\div6\%$ , т.к. дальнейшее увеличение углеродного волокна к значительному приросту прочности не приводит.

Исходя из соображений экономии материала для внешнего армирования, найдем оптимальный способ армирования деревянных изгибаемых элементов, нагруженных равномерно распределенной нагрузкой. При действии равномерно распределенной нагрузки расчетное сечение балки по нормальным напряжениям располагается в середине пролета, в месте действия максимального изгибающего момента. Если выполняется проверка прочности деревянного элемента, армированного углеродным волокном, по нормальным напряжениям в расчетном сечении, то проверка прочности в остальных сечениях по нормальным напряжениям выполняется автоматически. Изменяя коэффициент армирования по длине изгибаемого элемента, усиленного углеволокном, добьемся того, чтобы нормальные напряжения в любом сечении балки были равны нормальным напряжениям в расчетном сечении, т.е.:

$$\sigma_x = \sigma_{cp}, \quad (7)$$

где  $\sigma_x = \frac{6 \cdot M_x}{b \cdot h^2} \cdot \frac{1 + 2 \cdot n \cdot \mu_x}{1 + 4 \cdot n \cdot \mu_x} = \frac{6 \cdot M_x}{b \cdot h^2} \cdot \beta_x$  – нормальные напряжения в сечении изгибаемого

элемента, усиленного углеволокном, на расстоянии  $x$  от опоры;

$M_x = q \cdot x \cdot (1 - x)/2$  – изгибающий момент в сечении балки на расстоянии  $x$  от опоры от равномерно распределенной нагрузки  $q$ ;

$$\sigma_{cp} = \frac{6 \cdot M_{cp}}{b \cdot h^2} \cdot \frac{1 + 2 \cdot n \cdot \mu_{cp}}{1 + 4 \cdot n \cdot \mu_{cp}} = \frac{6 \cdot M_{cp}}{b \cdot h^2} \cdot \beta_{cp} \quad - \text{нормальные напряжения в середине}$$

пролета изгибаемого элемента, усиленного углеволокном;

$M_{cp} = q \cdot l^2 / 8$  – изгибающий момент в середине пролета балки от равномерно распределенной нагрузки  $q$ .

Подставив значения нормальных напряжений в выражение (7), получим:

$$\frac{6 \cdot M_x}{b \cdot h^2} \cdot \beta_x = \frac{6 \cdot M_{cp}}{b \cdot h^2} \cdot \beta_{cp} \quad \text{или} \quad \frac{q \cdot x \cdot (1-x)}{2} \cdot \frac{6}{b \cdot h^2} \cdot \beta_x = \frac{q \cdot l^2}{8} \cdot \frac{6}{b \cdot h^2} \cdot \beta_{cp}$$

Выполнив преобразования, получим:

$$\beta_x = \frac{l^2 \cdot \beta_{cp}}{4 \cdot x \cdot (1-x)}, \quad (8)$$

где  $\beta_x = (1 + 2 \cdot n \cdot \mu_x) / (1 + 4 \cdot n \cdot \mu_x)$  – коэффициент, учитывающий включение в работу углеволокна в качестве элемента внешнего армирования;

В результате, подставив значение  $\beta_x$  в формулу (8) и выразив  $\mu_x$ , получим зависимость коэффициента армирования изгибаемого элемента, усиленного углеволокном, по длине, от значения коэффициента армирования в середине пролета балки:

$$\mu_x = \frac{4 \cdot x \cdot (1-x) - l^2 \cdot \beta_{cp}}{4 \cdot n \cdot (l^2 \cdot \beta_{cp} - 2 \cdot x \cdot (1-x))}. \quad (9)$$

Данная зависимость представлена на рисунке 2.

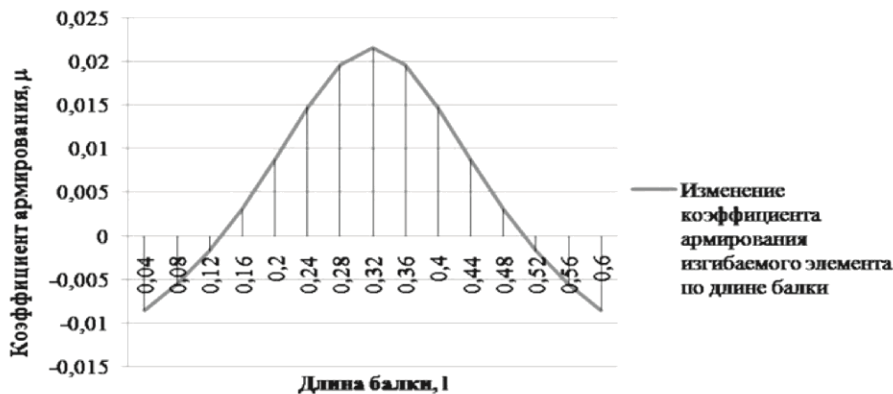


Рис. 2. График зависимости коэффициента армирования изгибаемого элемента, усиленного углеволокном, по длине, от значения коэффициента армирования в середине пролета балки

Зона отрицательных значений коэффициента не требует внешнего армирования для обеспечения прочности балки. Для предварительной проверки полученной зависимости был поставлен эксперимент. Для испытания было взято два образца из чистой древесины сосны длиной 720 мм сечением 25x25 мм при расстоянии между опорами 640 мм.

В качестве усиления образца деревянной балки была использована углеродная однонаправленная лента производства холдинговой компании ЗАО «Композит» (г. Москва) марки FibARM с плотностью 230 г/м<sup>2</sup>, модулем упругости 230 ГПа и прочностью при растяжении 4 ГПа.

Лента была разделена по структурным прядям на одинаковые части, в каждой части (слое) по шесть прядей. Толщина одного слоя составила 0,128 мм.

На первый образец было нанесено 5 слоев углеродного волокна таким образом, что коэффициент армирования оставался постоянным по всей длине балки. На второй образец было нанесено 5 слоев углеродного волокна таким образом, что функция изменения коэффициента армирования по длине изгибаемого элемента соответствовала формуле (9). Общая толщина элемента усиления из углеродного волокна составила 0,64 мм. Расход углеволокна для образца № 1 составил 15,46 граммов, для образца № 2 – 6,76 граммов. Схема армирования первого и второго образцов представлена на рисунке 3. В качестве

связующего был использован клей на основе эпоксидной смолы ЭД-20 с добавлением отвердителя полиэтиленполиамина (ПЭПА) в пропорции 1/8 в весовых частях. Перед наклеиванием нижняя грань деревянных образцов зачищалась. Каждый новый слой углеродного волокна укладывался на клеевой состав. В течение суток клей отвердевал.

Схема армирования 1-го элемента

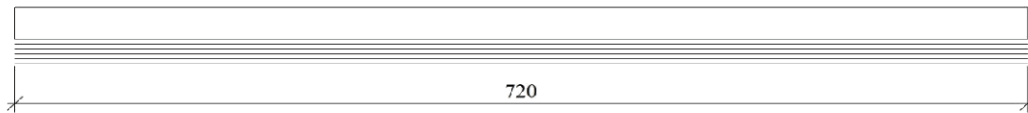


Схема армирования 2-го элемента

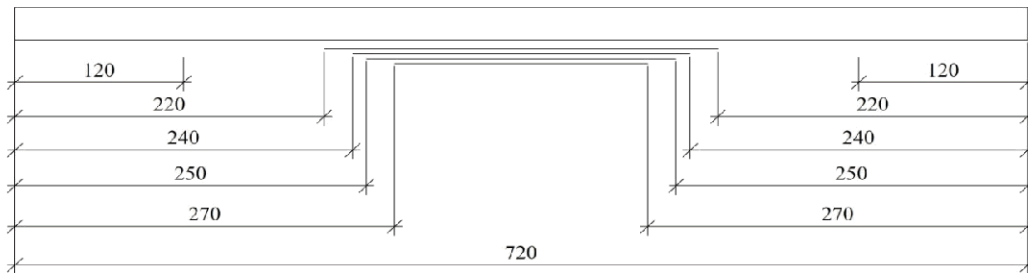


Рис. 3. Схема армирования образцов

Сразу после испытаний замерялась влажность образцов с помощью влагомера игольчатого типа марки ИВ-1. Влажность обоих образцов составила 9 %. На образцы был установлен прогибомер часового типа с ценой деления 0,01 мм для измерения прогибов посередине испытываемой балки. На рис. 4 показана расчетная схема, использованная при испытании образцов.

Согласно ГОСТ 16483.3-84 [1] образец доводился до разрушения в течение 1-2 минут с замером прогибов после приложения каждой ступени нагрузки до разрушения. Шаг загрузки был принят 5 кг. Разрушению образца с постоянным армированием по всей длине предшествовало развитие значительных прогибов с развитием пластических деформаций в сжатой зоне древесины. Разрушение произошло от разрыва углеволокна. Характер разрушения второго образца, балки с переменным армированием, был также хрупким, но произошло оно вследствие потери прочности по скалывающим напряжениям в уровне клеевого шва.

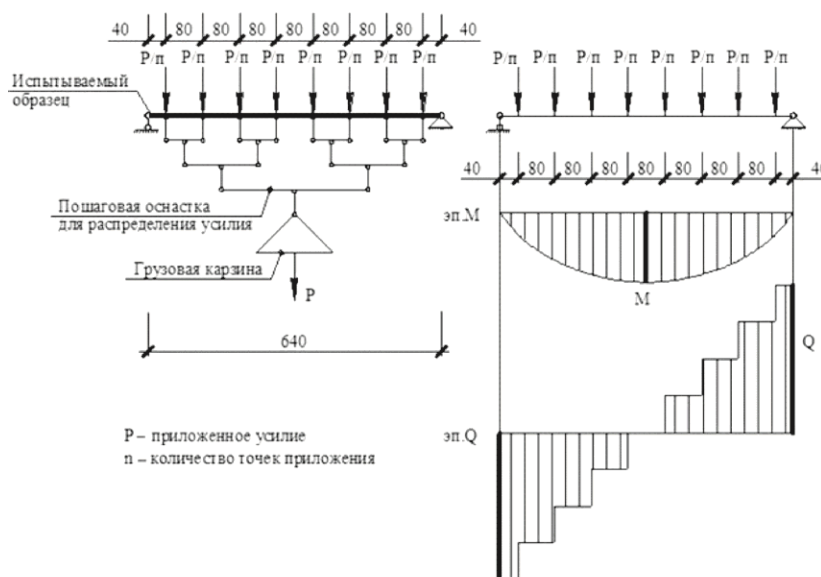


Рис. 4. Расчетная схема опытного образца с 8-ю точками приложения нагрузки (усилия, кгс, размеры, мм)

Предел прочности при изгибе для первого испытанного образца был достигнут при нагрузке в 336 кгс, а для второго – при нагрузке в 326 кгс. На основе экспериментов была также построена диаграмма зависимости между внешней нагрузкой и прогибами при статическом изгибе (рис. 5). По диаграмме видно, что деформативность 2-го образца, балки с переменным армированием, несколько выше, чем деформативность 1-го образца, балки с постоянным армированием по всей длине.

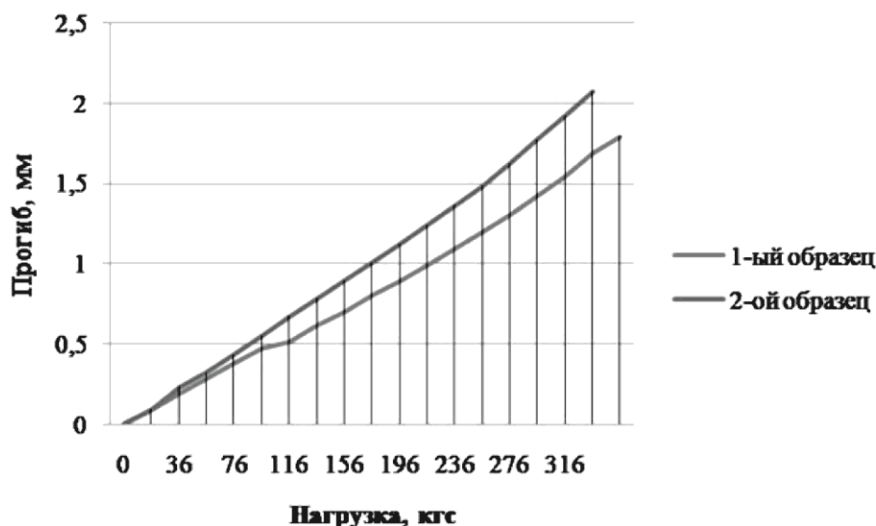


Рис. 5. График зависимости между приложенной нагрузкой и прогибами при статическом изгибе для 1-го и 2-го образцов

Таким образом, можно сделать вывод о том, что применение балок с переменным армированием по длине приведет к незначительной потере прочности и повышению деформативности, по сравнению с балками с постоянным армированием, но при этом помогает экономить более 50 % армирующего материала.

#### Список литературы

1. ГОСТ16483.3-84 Древесина. Метод определения предела прочности при статическом изгибе.
2. СП 64.13330.2011 Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. – М., 2011.
3. Щуко В.Ю. Клееные армированные деревянные конструкции: Учебное пособие / Щуко В.Ю., Рощина С.И. – СПб.: ГИОРД, 2009. – 128 с.
4. Цепяев В.А. Оценка модуля упругости древесины конструкций // Жилищное строительство, 2003, № 2. – С. 11-13.

Lobov D.M. – post-graduate student

E-mail: d.m.lobov@yandex.ru

Kritsin A.V. – candidate of technical sciences

E-mail: ak.dk@mail.ru

Tikhonov A.V. – post-graduate student

E-mail: tihon88@mail.ru

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering

The organization address: 603950, Russia, Nizhny Novgorod, Pyinskaya st., 65

## Features of reinforcing of the wooden elements strengthened by carbon fiber, at the static bend

### Resume

The paper describes a comparative study of two beams reinforced with carbon fiber

One with a variable reinforcement and the other with a constant reinforcement throughout the whole section. Test both samples are in static bending. With the optional accessories, the loads are transmitted to the beam to simulate a uniformly distributed load. Thus, in the middle of the beam we can see pure bending.

From a number of formulas determine geometric characteristics were derived dependences of the strength characteristics from the quantity reinforced material. According to the obtained dependencies were built graphics, clearly reflecting the effect of reinforcing element.

During the tests for the study of collaboration wood with carbon fiber was marked by a rather large expense of reinforcing material, which now has a commensurate value. One of the options saving carbon fiber, similar to other types of reinforcing materials, like metal, for example, is a variable reinforcement. The main objective of this article describes the experiment was to prove that the significant savings of carbon fiber carrying capacity of beam with variable reinforcement is commensurate with the carrying capacity of beams reinforced throughout the whole section. This hypothesis was confirmed. However is observed difference in the deflections, visually as well as measuring instruments. The use of less carbon-fiber will be more likely to use it as an element of reinforcement for timber.

**Keywords:** carbon fiber, carbon composite materials, variable reinforcement, tissue of carbon fibers, increased timber.

### References

1. GOST 16483.3-84 Timber. The method for determination of ultimate flexural strength.
2. SP 64.13330.2011 Wooden structures. Actualized edition SNIP II-25-80. – M., 2011.
3. Shuko V.Y. Reinforced laminated wood constructions: Study guide / Shuko V.Y., Roshchina S.I. – SPb.: Giord, 2009. – 128 p.
4. Tsepaev V.A Estimate of the modulus elasticity of wood constructions // Residential construction, 2003, № 2. – P. 11-13.