

ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КЛЕЕННЫХ БАЛОК, АРМИРОВАННЫХ ВОЛОКОННЫМИ СИНТЕТИЧЕСКИМИ МАТЕРИАЛАМИ

Левинский Ю. Б., Петряев Н. Е.

ГОУ ВПО Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия (620144, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37), e-mail: petryaevne@mail.ru

В настоящее время быстрыми темпами развивается деревянное домостроение. Для удовлетворения потребностей отрасли требуются современные материалы, подходящие ко всем требованиям надежности и качества. Клееные деревянные балки – одно из наиболее востребованных изделий в этой сфере, представляют собой монолитные совокупности деревянных деталей определенных параметров и взаиморасположения, соединенных клеевой прослойкой, они обладают высокой формоустойчивостью и предназначены для выполнения несущих, ограждающих и/или декоративных функций в строительных изделиях и конструкциях. Одним из способов повышения их прочности является межслойное армирование различными материалами, в т.ч. гибкими волокноно-сетчатыми. В данной работе рассмотрена возможность использования тканевых синтетических материалов при армировании клееных деревянных конструкций и характер изменения напряженно-деформированного состояния усовершенствованных композитных конструкций. Исследовано влияние различных армирующих материалов на прочностные характеристики КДК.

Ключевые слова: клееные материалы, напряженное состояние.

FEATURES OF STRESS - STRAIN OF GLUED BEAMS, REINFORCED WITH FIBERS OF SYNTHETIC MATERIALS

Lewinski Y. B., Petriaev N. E.

Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia (620144, Yekaterinburg, street Siberian tract 37), e-mail: petryaevne@mail.ru

Currently developing rapidly wooden construction. To meet the needs of the industry requires modern materials appropriate to all the requirements of reliability and quality. Laminated wood beams are one of the most popular products in this area. System consists of monolithic set of wooden parts of certain parameters and relative position of the connected layer of adhesive, they have high dimensional stability and is designed for supporting, protecting and / or decorative features in building products and construction. One way to improve their strength is different interlayer reinforcement materials, including flexible fiber. In this paper, the possibility of using synthetic materials for tissue reinforcement of glued wooden structures and the nature of the stress - strain state of advanced composite structures. The effect of various reinforcing materials on the strength characteristics of wooden structures.

Key words: laminated materials, state of stress.

Одним из основных показателей эффективности применения клееных конструкционных материалов из древесины является их эксплуатационная прочность. Для клееных балок в этой связи определяют, прежде всего, прочность сопротивления изгибу и деформации. Согласно эпюрам изгибающих моментов и напряжений элементы конструкции работают одновременно на растяжение и изгиб [1]. Следовательно, в нижнем поясе балки, а значит, и в волокнах древесины, из которой она состоит, возникают максимальные напряжения растяжения. По характеру разрушения балки, особенно в начальной его стадии, можно предположить, что ее прочность обусловлена величиной сопротивления древесины при растяжении вдоль волокон. Поэтому, чем выше этот показатель, тем более надежно и с

меньшими деформациями работает сама конструкция. Данный вывод подтверждается при сравнении характеристик древесины разных пород (табл. 1).

Таблица 1. Сравнительные физико-математические показатели древесины

Порода древесины	Плотность ρ , кг/м ³	Пределы прочности при, МПа		
		растяжении	сжатию	изгибе
Дуб	570	117	57	103
Береза	520	137	54	110
Сосна	415	109	46	85
Осина	400	121	43	77

Тем не менее на прочность балки, склеенной из нескольких пластин древесины, оказывают влияние сопротивление сжатию в верхнем поясе, прочность клевого соединения и самого клея, деформативность элементов конструкции и размеры ее сечения. Велико также в таких системах влияние касательные напряжений, которые возникают в контактирующих слоях из-за разницы характеристик деформативности (упругости) клея и древесины [5].

Для растянуто-изгибающих стержней в расчет принимается формула:

$$\sigma_p = \frac{N_p}{F_{\text{расч}}} + \frac{M}{W_{\text{расч}}} \frac{R_p}{R_u} \leq R_p \quad (1.1)$$

где $\frac{R_p}{R_u}$ – отношение расчетных сопротивлений растяжению и изгибу.

Учитывая вышеизложенное, можно предположить, что вводя в нижний пояс многослойной балки высокопрочный материал, следует ожидать повышения ее прочности при действии изгибающих нагрузок. Это подтверждается, в частности такими практическими действиями, как армирование конструкций, накладывание на поверхность упрочняющих материалов и т.п.

Нами были исследованы возможности вклеивания гибкой волоконно-тканевой арматуры между слоями пластин деревянной балки и повышения в связи с этим прочности конструкции. Волоконные материалы (углеродное волокно, стеклоткани и др.) обладают достаточно высокой прочностью на растяжение (от 0,6 - 0,7 ГПа) и незначительной толщиной (от 0,11 мм). Это во много раз больше, чем у древесины, что позволяет считать их предельно тонкими стержнями или пластинами. Благодаря этому при изготовлении клееных балок клеевой слой можно принимать как однородный композит с ортотропными свойствами, рис. 1.

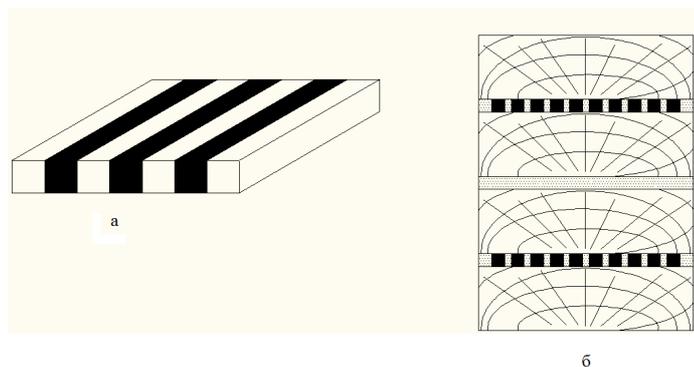


Рис 1. Схема армированной композитной клееной деревянной балки (АКБД)

а – волокно-тканевый композит; б – сечение АКБД

Сечение армированной композитной клееной деревянной балки (АКБД) имеет симметричную по составу элементов структуру, но ожидаемое упрочнение достигается только за счет наполнения нижнего пояса – пояса растяжения.

В настоящее время широко применяется усиление деревянных конструкций стальной арматурой. При этом повышается их несущая способность, но и возникает несколько проблем.

Во-первых, данный способ армирования предусматривает предварительную подготовку пазов для закладки арматуры, что не удовлетворяет требованию технологичности.

Во-вторых, надежность сопряжения древесины и металла не отвечает условию долговечности, так как при продолжительной эксплуатации в системе «древесина – клей – металл» возникают значительные по величине внутренние напряжения. Добиться их снижения можно с помощью уменьшения размеров сечения арматурных элементов и увеличения площади, а не объема армирования. В этой связи предложенное нами дисперсионное армирование волокнистыми материалами может оказаться наиболее предпочтительным.

Напряженно-деформированное состояние клеевых соединений древесины, как правило, неоднородно. Их разрушение начинается в зоне, где напряжения достигают критических для данного соединения значений [6]. При этом известно, что клеевые соединения отличаются неравномерным распределением напряжений по площади склеивания. Наличие концентрации напряжений приводит к неизбежным процессам перераспределения напряжений во времени. Следовательно, эти процессы обуславливают проявление зависимостей от температуры, влаги, свойств клеев [5].

В исследованиях К. Мойлоноса, Н. Дебройна, Н. Н. Свалова отмечено, что максимальные напряжения, сосредоточенные на краях соединения, существенно влияют на прочность и процессы разрушения [2,3]. В частности, теоретически и экспериментально

установлено, что процессы распространения трещин в клеевых соединениях при сдвиге и отрыве начинаются от краев, в месте возникновения максимальных напряжений. К тому же напряжения распределяются крайне неравномерно: на нагруженном крае напряжения достигают максимального значения, но на свободном равны нулю.

Анатомическая структура древесины такова, что подобные напряжения представляют опасность поперек волокон. В клеевых соединениях эти напряжения имеют ряд особенностей, связанных с наличием клеевой прослойки, которая препятствует деформациям, вызванным увлажнением или усушкой древесины перемещениям. Учет влажностных напряжений осложняет то обстоятельство, что распределение влаги по сечению клееного изделия редко бывает равномерным. Влажностные напряжения имеют переменные знаки, причем, их максимальное значение в среднем составляет 0,5 МПа [5].

В условиях современного деревообрабатывающего производства трудно рассчитывать на оптимальный подбор слоев отдельных досок клееного пакета, при котором конструкция сочетает в себе согласованную направленность деформаций в слоях композита и тем самым минимизирует внутренние напряжения в системе.

Так как сочетания ламелей, различающихся расположением годовых слоев и углом перерезывания волокон, дают различные деформационные смещения на краях клеевого слоя при увлажнении или сушке, влияние краевых напряжений с большой вероятностью будет меняться.

С учетом вышеизложенного, мы выдвинули гипотезу, что введение в клеевой слой тонких волоконных материалов позволит распределить внутренние напряжения на краях равномерно по всему клеевому слою, в том числе и за счет его дисперсирования («рассечения» на ячейки) этой арматурой.

Известно, что для сохранения целостности клеевого слоя внутренние нормальные напряжения в КДК не должны превышать 0,5 МПа во избежание разрушения древесины.

Введение дисперсионных армирующих материалов нивелирует неоднозначную перемену знака (увлажнение – сушка) действующих напряжений, что позволит сократить влияние цикличности действия напряжений и уменьшить интенсивность процесса физической усталости КДК, а также снизить влияние непроклеенных участков (непроклеев), которые являются концентраторами напряжений крупного размера. Их также можно рассматривать как зародышевые трещины, влияющие на энергию разрушения и прочность клеевых соединений [5].

В результате дисперсионного армирования образуется прочная «решетка», которая помимо упрочнения КДК равномерно распределяет напряжения внутри клеевого слоя, в том числе образовавшиеся в результате «непроклеев».

Дисперсионно армированный клеевой слой представляет собой двухэлементный композит, так как он составлен из материалов, резко отличающихся по своим физико-механическим показателям. При расчете параметров такой конструкции целесообразно усреднять свойства материала, рассматривая тело как однородное с анизотропными свойствами. Такое рассмотрение допустимо, поскольку размеры конструкции всегда велики по сравнению с размерами элемента структуры (например, с шагом волокон) [4]. Это не означает игнорирование действительной структуры материала, так как свойства композиции могут быть выражены через свойства составляющих. По напряжениям и деформациям, рассчитанным для квазиоднородного материала, могут быть определены напряжения и деформации в волокнах и связующем.

Каждый слой однонаправленных волокон со связующим моделируется в виде пластинки, составленной из чередующихся слоев волокон и клея, что изображено на рис. 2.

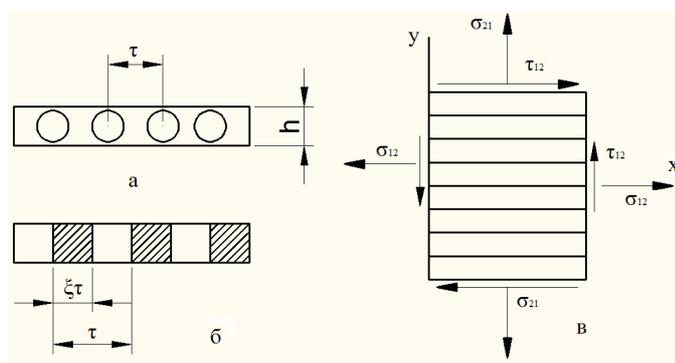


Рис. 2. Слой однонаправленных нитей со связующим

а – слой стеклошпона; б – пластинка из слоев волокна и клея; в – модель плоского напряженного состояния.

σ_{12} , σ_{21} , τ_{12} – «средние» напряжения в модели, то есть отношение соответствующих усилий к площади ее поперечного сечения.

Условия равновесия и совместности деформаций слоев наполнителя и связующего приводит к следующим уравнениям:

$$\sigma_{12} = \xi \sigma'_{12} + (1 - \xi) \sigma''_{12}; \sigma_{21} = \sigma'_{21} = \sigma''_{21}; \quad (1.2)$$

$$\tau_{12} = \tau'_{12} = \tau''_{12}; \varepsilon_1 = \varepsilon'_1 = \varepsilon''_1; \quad (1.3)$$

$$\varepsilon_2 = \xi \varepsilon'_2 + (1 - \xi) \varepsilon''_2. \quad (1.4)$$

В этих формулах величины с одним штрихом относятся к наполнителю, а с двумя штрихами к связующему; ε_1 , ε_2 – «средние» деформации модели.

Напряжения в нитях и связующем связаны со средними напряжениями формулами:

$$\sigma_1' = \sigma_1 \frac{E'}{E_1} - \sigma_2 \frac{(1-\xi)(E'v'' - E''v')}{E_1} \quad (1.5)$$

$$\sigma_1'' = \sigma_1 \frac{E''}{E'} + \sigma_2 \frac{\xi(E'v' - E''v'')}{E_1} \quad (1.6)$$

В связи с тем, что модуль упругости волокон E' существенно больше, чем модуль упругости связующего E'' , упругие постоянные также различаются по величинам.

Упругие свойства многослойной конструкции, составленной из нескольких слоев, могут быть исследованы на основе предположения, что осредненные деформации всех слоев одинаковы.

При одновременном воздействии продольно сжимающей силы в верхнем поясе и растягивающей силы в нижнем возникает сложное напряженное состояние элементов. Растянуто-изгибаемые (внецентренно-растянутые) элементы работают одновременно на растяжение и изгиб. В нижнем поясе за счет суммирования напряжений от продольной силы и изгибающего момента возникают максимальные напряжения растяжения. С учетом того факта, что сопротивление на растяжение волоконных материалов в несколько раз превышает этот показатель у древесины, применение этих материалов увеличит сопротивление КДК на растяжение, а, следовательно, увеличит его прочностные характеристики. Необходимо учитывать, что при растяжении возникают также максимальные касательные напряжения сдвига, рис 3.

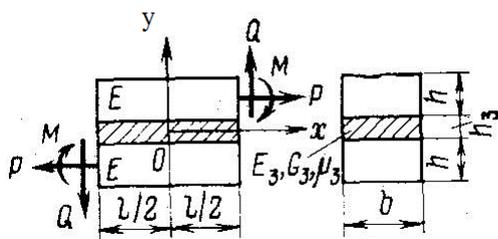


Рис. 3. Сдвиг при растяжении с учетом нормальных напряжений в клеевом соединении

$$\tau_{\max} = \tau_{\text{ср}} S_1 \exp[-S_1(1 - \xi_0)] \quad (1.7)$$

$$\sigma_y = \frac{P}{2hb} \sqrt{\frac{3E_2h}{Eh}} \quad (1.8)$$

Для подтверждения выдвинутой нами гипотезы были изготовлены модели КДК из твердолиственной и мягколиственной древесины, рис. 4.

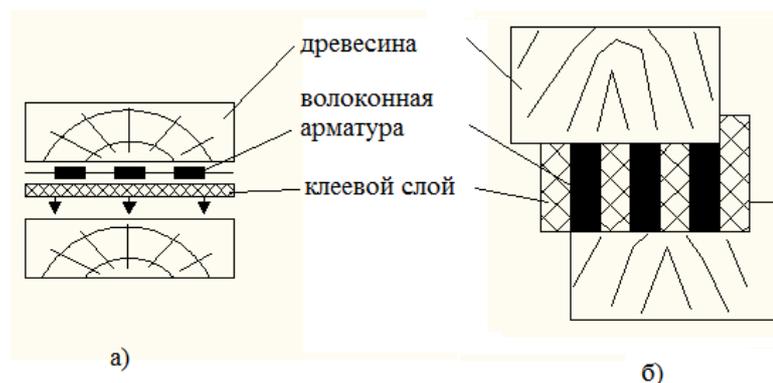


Рис. 4. Структура межслойного армирования КДК: а – комбинация пакета пластин КДБ с вклеенной полосовой волоконной арматурой; б – расположение углеволоконной арматуры в клеевой прослойке

Доля арматуры в площади клеевого соединения составила 15 %, объем арматуры составил 1 % от объема всего образца. В дальнейшем образцы были испытаны на изгиб. По результатам испытаний экспериментальных КДК подтверждается возможность значительного упрочнения клеевых балок за счет послойного армирования: углеродным волокном для мягкой и твердой древесины соответственно с 75 и 110 МПа ($\sigma_{изг}$) до 95 и 150 МПа, стекловолоконными тканями – до 105 и 135 МПа. Эти параметры могут быть увеличены, если изменить степень и комбинации армирования.

Выводы

1. В сравнении с неармированными образцами у образцов армированных стекловолокном прочность на изгиб увеличивается на 20 % и более, углеродным волокном – более чем 30 %. Величина прогиба у армированных образцов в среднем была меньше на 30 %, что показывает уменьшение касательных напряжений при сдвиге в поясе растяжения.

2. Дисперсионное армирование КДК волоконными материалами позволяет равномерно распределить напряжения, возникающие вследствие увлажнения и усушки древесины, а также при наличии несклеенных участков.

3. Армированный клеевой слой представляет собой композит, в котором присутствуют компоненты с разными модулями упругости, в результате чего при растяжении нижнего пояса КДК удается уменьшить значения касательных напряжений, а, следовательно, уменьшить величину прогиба КДК.

Список литературы

1. Александров А. В., Потапов В. Д., Державин Б. П. Сопротивление материалов. М.: Высш. шк., 2001, 560 с.
2. Майлонас К., Деброин Н. Статистические проблемы склеивания. М., 1954.

3. Свалов Н. Н. Вариационная статистика. М., 1977.
4. Тимошенко С. П. Сопротивление материалов. М.: Наука, 1965. 365 с.
5. Фрейдин А. С., Вуба К. Т. Прогнозирование свойств клеевых соединений древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 224 с.
6. Фрейдин А. С. Прочность и долговечность клеевых соединений. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1981. 272 с.

Рецензенты:

Ляпцев Сергей Андреевич, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой технической механики УГГУ, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург.

Комиссаров А. П., доктор технических наук, профессор, Уральская государственная сельскохозяйственная академия, г. Екатеринбург.