

ЕВСТИГНЕЕВА В. М., ЛАЗАРЕВ А. Л., САНГУЛОВА И. Б.

**ХАРАКТЕР НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
АРМИРОВАННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ КЛЕЕНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Аннотация. В статье приводятся основные сведения об исследованиях, направленных на изучение характера работы на изгиб и разрушение армированных клееных деревянных конструкций. Приведены данные о теоретических и практических работах исследователей по способам армирования элементов с целью обеспечения высокой степени надежности работы конструкций под эксплуатационной нагрузкой.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, составной стержень, клеевой слой, клееные деревянные конструкции, дисперсное армирование.

EVSTIGNEEVA V. M., LAZAREV A. L., SANGULOVA I. B.

**REINFORCED BENDABLE GLUED WOODEN ELEMENTS
IN STRESS-DEFORMED STATE**

Abstract. The article presents an overview of the research works aimed at studying the bending strain and fracture in reinforced glued wooden structures. The study provides theoretical and practical data on the methods of reinforcing glued wooden elements in order to ensure high reliability of the structures under operational load.

Keywords: stress-deformed state, composite core, adhesive layer, glued wooden structures, dispersed reinforcement.

В последнее время неуклонно растет спектр применения деревянных, в том числе слоистых, конструкций. Обеспечение высокой надежности клееных деревянных конструкций (КДК) и безотказность их работы в течение всего срока службы непосредственно связано с разработкой клееного элемента для конкретных условий эксплуатации. Проектирование структуры композита является актуальной и сложной проблемой как с экспериментальной, так и с математической точки зрения в силу анизотропности древесины и зависимости ее свойств от различных природных и технологических факторов.

В работе представлены результаты теоретического и практического изучения напряженно-деформированного состояния клеедеревянных армированных элементов. Объектом исследования являлись клееные деревянные композиты, усиленные материалами с более высокими, по сравнению с древесиной, прочностными характеристиками. Традиционно усиление деревянных конструкций выполняется за счет вклеивания стержневой металлической или стеклопластиковой арматуры. Перспективным также является способ армирования полотнами стекло- и углеволокна. Армирование наиболее напряженных зон

позволяет не только усилить деревянные элементы, но и уменьшить отрицательное влияние природных и технологических дефектов древесины [1; 2].

При разработке армирования деревянных элементов учитываются следующие основные требования:

- согласованность характера деформирования арматуры и древесины;
- технологичность выполнения армирования клееных деревянных конструкций.

Кроме того, необходимо принимать во внимание наличие напряжений по границам конструкционного материала и арматуры, которые могут приводить к растрескиванию элементов.

В работе [3] показано, что при проектировании клееных деревянных элементов рационально использовать в качестве расчетной модели составной стержень. В подобном случае структура композита моделируется стержневой системой, в которой составляющие стержни соединены равномерно-распределенными по длине связями, воспринимающими сдвигающие усилия, и препятствующими отрыву или прижатию стержней друг к другу. Материал отдельных слоев упрощенно представляется практически однородным. Условно податливость поперечных связей не учитывается, что существенно упрощает расчет составного стержня.

Расчет составного стержня, как статически неопределимой системы, ведется относительно основного стержня, лишенного связей сдвига, которые условно заменены функциональными неизвестными τ_i . В процессе работы составного стержня, включающего $n+1$ отдельных стержней, в связях сдвига возникают сдвигающие усилия, зависящие от координаты x соединительного шва:

$$T_i = \int_0^x \tau_i dx, \quad (1)$$

где T_i – сдвигающие усилия в шве.

С учетом этих усилий формула для определения полного изгибающего момента в системе выглядит следующим образом:

$$M = M^0 + \sum_{i=1}^{n+1} M_i^r = M_0 - \sum_{i=1}^n T_i u_i - \sum_{i=1}^n T_i v_i = M^0 - \sum_{i=1}^n T_i \omega_i, \quad (2)$$

где M^0 – суммарный изгибающий момент, равный сумме моментов, возникающих в каждом отдельном стержне от действия нагрузки без учета усилий, передающихся от поперечных связей и связей сдвига, T_i – сдвигающие усилия в шве, а ω_i – расстояние между центрами тяжести сечений двух смежных стержней, разделенных i -м швом.

Осевое усилие N_i в конкретном стержне системы определяется выражением:

$$N_i = N_i^0 - T_i + T_{i-1} (i = 1, 2, \dots, n + 1). \quad (3)$$

Внутренний момент в том же стержне определяется умножением полного момента по формуле (2) на $E_i J_i$: $(\sum E J)$

$$M_i = \frac{M^0}{\sum E_i J_i} E_i J_i - \sum_{j=1}^n T_j \omega_j \frac{E_i J_i}{\sum E_i J_i}. \quad (4)$$

Тогда нормальные напряжения в отдельном стержне определяются по формуле

$$\sigma_x = \frac{N_i}{F_i} + \frac{M_i y_i}{J_i}, \quad (5)$$

где F_i – площадь поперечного сечения i -го стержня, y_i – расстояние от центра тяжести сечения до рассматриваемого волокна

Эпюра нормальных напряжений в составном стержне выглядит ступенчатой по границам отдельных стержней с перепадом значений на величину, равную $M \cdot \omega_i / (\sum E J)$, с одинаковым наклоном к вертикальной оси.

Следует отметить, что данная методика описания напряженно-деформированного состояния справедлива для систем с дискретным распределением свойств по высоте поперечного сечения, аналогичным структуре клееных деревянных элементов. Применение ее для случаев с равномерным распределением свойств по высоте поперечного сечения элемента может не давать рациональных решений.

Как было сказано выше, стержни составного элемента соединены между собой непрерывными связями, в которых возникают сдвиговые усилия T_i по формуле (1). Величины и характер распределения напряжений от этих усилий в клеевой прослойке, зачастую, оказывают определяющее значение на несущую способность клееных армированных конструкций.

Известна неоднородность характера распределения касательных напряжений в клеевых соединениях с максимальными значениями около торцов клееного элемента (рисунок 1). Подобное распределение создает опасность локальных краевых расслоений клееных элементов и их разрушению до исчерпания прочности отдельного стержня [5]. Очевидно, что уменьшение неоднородности распределения напряжений в клеевом слое позволит значительно повысит надежность работы армированного композита.

Для решения вышеназванной задачи использовались аналитические зависимости, предложенные в работе [6]. Технологически управление характером напряженного состояния соединительной прослойки выполняется за счет изменения ее толщины и введением в состав клея дисперсных волокон углеродного волокна.

Усиление клеевого слоя дисперсной арматурой является оптимальным способом армирования клееных деревянных конструкций. При вклеивании стержневой арматуры возможно возникновение неоднородных внутренних напряжений, которые нередко приводят к нарушению монолитности клееных элементов, локальному разрушению клеевого соединения и ослаблению всей конструкции.

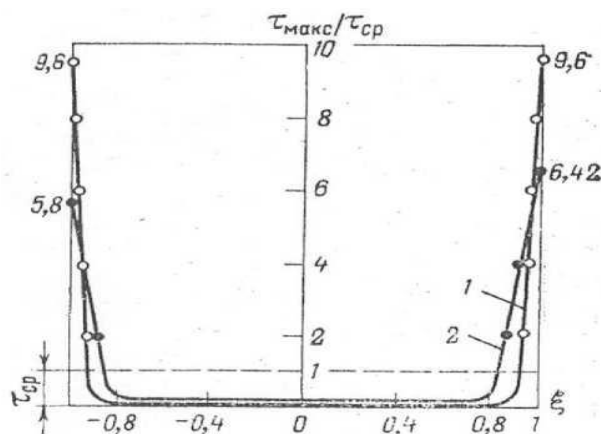


Рис. 1. Распределение касательных напряжений по длине клевого шва (по данным [5]).

Армирование дисперсной, распределенной по клеевому слою арматуры из углеродных волокон позволяет снизить локальные напряжения в клеевом слое. Армирование блоков клееных балок, рассредоточенное в плоскости склеивания, увеличивает площадь сцепления упрочняющего материала с древесиной и уменьшает напряженность в клеевом соединении, что в результате приводит к уменьшению деформации сдвига.

Серии испытаний на изгиб деревянных балок, армированных углеродными холстами в растянутой зоне, ожидаемо показали значительное снижение деформативности и увеличение прочности. При этом, в подтверждение предположения о неравномерности распределения напряжений в клеевом слое, значительная часть образцов исчерпала свою несущую способность за счет отрыва армирующего слоя и последующего разрушения образца по нормальному сечению.

Последующим испытаниям подвергались клеелесовые балки с толщиной клеевой прослойки, постепенно увеличивающейся к торцам элементов, и составные образцы, в которых клеевая прослойка на приопорных участках дополнительно армировалась дисперсными углеродными волокнами. Образцы обеих серий разрушились без отрыва арматуры при значительно больших значениях разрушающей нагрузки.

При изготовлении многослойных клеелесовых балок необходимым условием является армирование срединных клеевых швов в силу известного характера распределения касательных напряжений по высоте поперечного сечения. Проведенные исследования демонстрируют значительный потенциал применения деревянных армированных композитов. Знание характера напряженно-деформированного состояния клееных конструкций дает исследователям возможность правильного выбора методов и способов создания структур, позволяющих более полноценно использовать возможности древесины как конструкционного материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щуко В. Ю., Рощина С. И. Клееные армированные деревянные конструкции: учебное пособие. – Владимир, ВлГУ, 2008. – 82 с.
2. Лазарев А. Л. Создание градиентных покрытий с применением элементов внешнего армирования из углеволокна // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Всерос. науч.-техн. конф. / отв. ред. Т. А. Низина. – Саранск, 2016. – С. 68–71.
3. Ржаницын А. Р. Строительная механика. – М.: Высш. шк., 1991. – 440 с.
4. Селяев В. П., Карташов В. А., Клементьев В. Д., Лазарев А. Л. Функционально-градиентные композиционные строительные материалы и конструкции. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2005. – 160 с.
5. Петряев Н. Е., Левинский Ю. Б. Экспериментально-теоретическое обоснование эффективности дисперсионного армирования клееных деревянных балок // Системы. Методы. Технологии. – 2012. – №2 (14). – С.102–106.
6. Лазарев А. Л., Полторацкий Д. М., Тянкин И. А. Практическая реализация методов проектирования внешнего армирования деревянных элементов на основе функционально-градиентных композиционных материалов [Электронный ресурс] // Огарев-online. Раздел «Технические науки». – 2018. – №9. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/prakticheskaya-realizaciya-metodov-proektirovaniya-vneshnego-armirovaniya-derevyannykh-elementov-na-osnove-funkcionalno-gradientnykh-kompozicionnykh-materialov> (дата обращения 10.02.2020).