

# СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Делова М. И., канд. техн. наук,  
Авдяков Д. В., канд. техн. наук  
Курский государственный университет

## КОНТРОЛЬ СТОЙКОСТИ ИЗГИБАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КЛЕЕНОЙ ДРЕВЕСИНЫ К ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЮ

avd-77@mail.ru

Приведены результаты исследований по определению схемы нагружения, наиболее полно отвечающей реальным условиям работы клееных деревянных конструкций и условий зарождения трещин в изгибаемых элементах. Предлагается методика контроля стойкости изгибаемых конструкций из клееной древесины к трещинообразованию.

**Ключевые слова:** деревянные клееные конструкции, изгиб, прочность, надежность, долговечность, напряжения, деформации, несущая способность, статическая нагрузка.

Одной из наиболее важных задач, стоящих перед исследователями является контроль прочностных и деформационных параметров - эксплуатационных параметров - строительных конструкций в течение всего срока службы. Решение данной задачи невозможно без учета реальных процессов, протекающих в конструкциях, одним из которых является зарождение и развитие трещин технологического и силового происхождения, которые существенно снижают общую несущую способность элементов, являясь концентраторами напряжений. Поэтому в последнее время внимание исследователей все больше и больше концентрируется на способности строительных материалов и конструкций сопротивляться трещинообразованию т.е. на

трещиностойкости. Клееная древесина, как известно, обладает большим сопротивлением при изгибе, чем при других формах напряженно-деформированного состояния, в связи с чем конструкции из клееной древесины чаще всего проектируют изгибаемыми. Поэтому целью проведенных исследований стала стойкость к трещинообразованию изгибаемых клееных конструкций.

Для определения схемы нагружения, наиболее полно отвечающей реальным условиям работы клееных деревянных конструкций и изучения условий зарождения трещин в изгибаемых элементах была проведена серия испытаний образцов, где варьировался параметр  $x$  в пределах  $x=0,5 \dots 0,25 l_p$  (рис. 1)

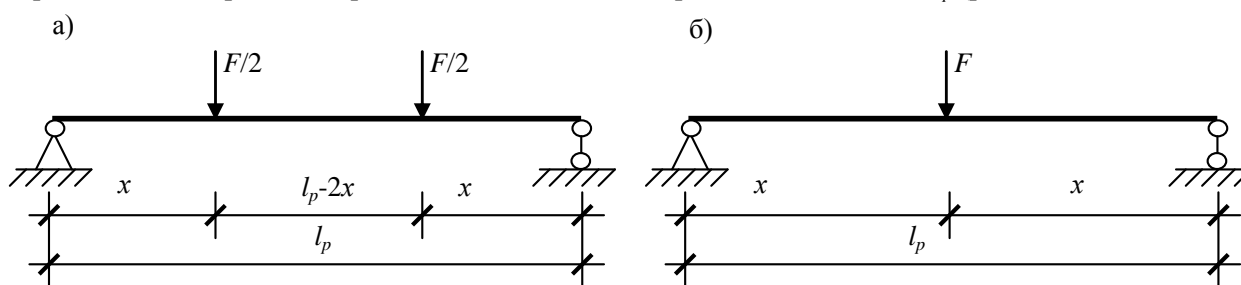


Рис. 1. Схемы приложения нагрузки

а)  $x = 0,375l_p$ ;  $x = 0,354l_p$ ;  $x = 0,333l_p$ ;  $x = 0,250l_p$ ; б)  $x = 0,500l_p$

Для проведения испытаний была использована установка, нагружение образцов в которой осуществлялось с помощью винтового пресса. Передача нагрузки на образец производилась в двух точках на расстоянии  $x$  от опор в зависимости от принятых схем погружения. Нагрузка на образец передавалась через металлическую траверсу. Для исключения обмятия образцов в местах приложения нагрузки и на опорах ис-

пользовали металлические прокладки. Контроль за величиной нагрузки производили по динамометру ДОСМ-0.2 с пределом измерений от 0 до 2,0 кН (цена деления  $\pm 5$  Н), который, в свою очередь, выполнял роль одной из опор.

Нагружение образцов проводили ступенчато-возрастающей нагрузкой. Величина одной ступени нагружения составляла  $(100 \pm 5)$ Н.

В общее время нагружения входило время снятия отсчетов по приборам. Время до разрушения одного образца составляло 3÷5 минут.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- разрушение образцов при всех схемах нагружения происходило от разрыва волокон в растянутой зоне (рисунок 2), что согласуется с результатами предварительного анализа о влиянии схем нагружения на форму разрушения элементов при изгибе;

- величина средней разрушающей нагрузки  $\bar{F}_{раз}$  уменьшается с увеличением отношения  $x/l_p$  (где  $x$  – расстояние от опоры до места приложения нагрузки;  $l_p$  – расчетный пролет). Величины среднего разрушающего напряжения  $\bar{\sigma}_{раз}$  представлены в табл. 1.

- полученные результаты свидетельствуют о линейной зависимости деформаций от уровня нагружения как в сжатой, так и в растянутой зонах образца, что позволяет сделать вывод о линейной зависимости между напряжениями и деформациями в сжатой и растянутой зонах изгибаемого образца;

- полученные результаты свидетельствуют о линейной зависимости деформаций от уровня нагружения как в сжатой, так и в растянутой зонах образца, что позволяет сделать вывод о линейной зависимости между напряжениями и деформациями в сжатой и растянутой зонах изгибаемого образца;

- деформации по абсолютной величине в

растянутой зоне при всех схемах нагружения больше деформаций в сжатой зоне. При этом независимо от схем приложения нагрузок разница в величинах деформаций от напряжений статистически недостоверна [1], что позволило объединить результаты испытаний в одну выборку, соответственно для растянутой и сжатой зоны.

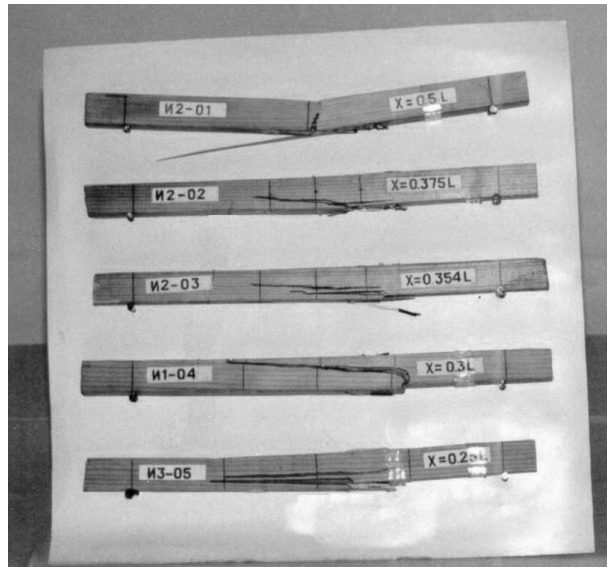


Рис. 2. Характер разрушения образцов при изгибе в зависимости от отношения  $x/l_p$

Однако зависимость величины среднего разрушающего напряжения при различных схемах нагружения образцов статистически не достоверна.

Таблица 1

Величина среднего разрушающего напряжения при различных схемах нагружения образцов

Схема приложения нагрузки	$x/l_p$	Статистические характеристики			
		$\bar{\sigma}_{раз}$ , МПа	$S_{\sigma}$ , МПа	$\gamma_{\sigma}$ , %	$p$ , %
	0,500	102,60	4,65	4,53	2,03
	0,375	106,40	6,54	6,14	2,75
	0,354	100,20	7,92	7,90	3,53
	0,333	104,20	6,58	6,32	2,82
	0,250	102,80	5,67	5,52	2,47

Для определения модулей упругости древесины в растянутой и сжатой зонах были использованы соответственно следующие формулы [2]:

$$E_x^+ = (M/W) \cdot [(\epsilon_p + \epsilon_c) / 2\epsilon_p^2], \quad (1)$$

$$E_x^- = (M/W) \cdot [(\epsilon_p + \epsilon_c) / 2\epsilon_c^2], \quad (2)$$

где  $M$  – разрушающий момент от внешних нагрузок, кНм;  $W$  – момент сопротивления об-

разца, м<sup>3</sup>;  $\epsilon_p$ ,  $\epsilon_c$  – фибровые деформации в растянутой и сжатой зоне при одном уровне нагрузки соответственно, 10<sup>-5</sup>.

При статистическом анализе результатов, установлено, что полученные величины модулей упругости для растянутой и сжатой зон принадлежат одной совокупности [1]. Поэтому результаты исследований по оценке модуля упругости для всех схем нагружения были объединены в одну выборку (табл. 2).

Таблица 2

## Усредненные величины модулей упругости для растянутой и сжатой зон образцов

Растянутая зона		Сжатая зона	
модуль упругости $E_x^+$ , МПа	корреляционное уравнение	модуль упругости $E_x^-$ , МПа	корреляционное уравнение
17389,6	$\sigma^+ = 1,789 \cdot \varepsilon \cdot 10^4$	19717,5	$\sigma^- = 1,895 \cdot \varepsilon \cdot 10^4$

Полученные величины модулей упругости в изгибаемых образцах в растянутой зоне меньше, чем в сжатой зоне. В технической литературе модули упругости древесины на одноосное растяжение превышают таковые на сжатие на 10% - 15% [3], а при изгибе модуль упругости сопоставим по величине с модулем упругости на растяжение, что не согласуется с проведенными испытаниями. Это говорит о том, что механические характеристики при таком виде напряженного состояния, как изгиб, нельзя отождествлять с механическими характеристиками для одноосного растяжения или сжатия. Различие в модулях упругости связано с влиянием касательных напряжений на работу изгибаемого элемента.

Анализ характера разрушения образцов показал, что зарождение магистральной трещины в большинстве образцов происходило в зоне чистого изгиба т.е. между приложенными силами. Поэтому для определения параметров трещиностойкости изгибаемых элементов из клееной древесины была выбрана модель с имитацией трещины именно в этой зоне и отношением  $x/l_p = 0,25$  (рис.3). Размеры образцов составили  $L = 450$  мм,  $h = 45$  мм, толщиной  $t = 40$  мм, влажность образцов составила 14%. Глубина инициированной трещины для определения зависимости  $K_{IC} - a/h$  назначили  $a/h = 0,11$ ,  $a/h = 0,2$ ,  $a/h = 0,33$  т.е.  $a = 5, 9$  и  $15$  мм

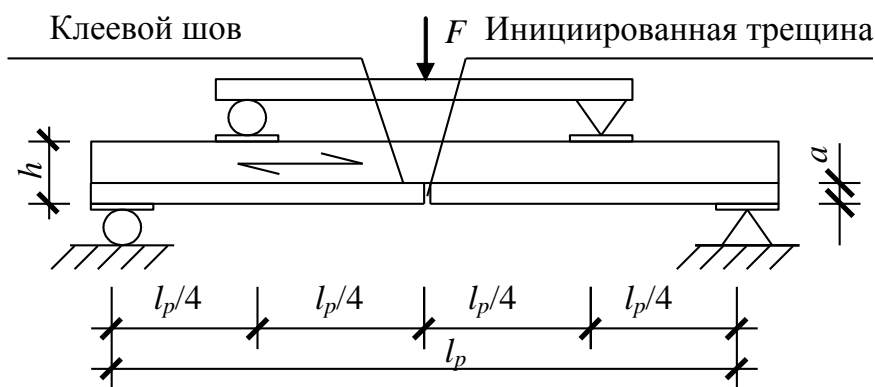


Рис. 3. Балочный образец с трещиной с поворотом (БОТП-образец)

Разрушение образцов было хрупким и сопровождалось акустической эмиссией. Трещины зарождались в клеевом шве и следовали вдоль волокон в направлении, нормальном к плоскости начального пропила по массиву древесины. Трещины распространялись обычно в обоих направлениях относительно инициированной трещины. Если волокна располагались под углом к клеевому шву, то трещина, не пересекая их, уходила в клеевой шов. Трещина прорастала вдоль волокон (горизонтально) до точек приложения нагрузки в четвертях пролета, а затем в зоне одновременного действия изгибающего момента и поперечной силы устремлялась вверх, разрывая волокна древесины, в результате чего образец окончательно терял несущую способность. Таким образом, в процессе проведения эксперимента измерялись две нагрузки, при которой начинался рост трещины, и , при которой образец полностью терял несущую способность. Анализ зависимости траектории роста трещины

и критического коэффициента интенсивности напряжений от структуры древесины не дал результатов из-за относительно малого числа выборки для такого неоднородного материала, как древесина.

Поскольку в месте расположения искусственной трещины отсутствуют сдвигающие напряжения и есть растягивающие, в результате действия изгибающего момента, то критический коэффициент интенсивности напряжений определяли по формуле:

$$K_{IC} = \frac{M}{t(h-a)^3} \sqrt{\frac{6(h-a)^3 a^3}{(h-a)^3 + a^3}}, \quad (3)$$

где  $M$  – изгибающий момент, возникающий в вершине трещины от действия нагрузки;  $t$  – толщина образца;  $h$  – высота образца;  $a$  – глубина инициированной трещины [5].

В результате испытаний получили: при  $a/h = 0,11$   $K_{IC} = 117,5 \text{ КПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ , при  $a/h = 0,2$   $K_{IC} = 348,2 \text{ КПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ , при  $a/h = 0,33$   $K_{IC} = 770,45 \text{ КПа}\cdot\text{м}^{1/2}$  и статистически достоверную зависимость между отношением длины трещины к высоте образца и критическим коэффициентом интенсивности напряжений

$$K_{IC} = 3125097(a/h)^2 + 1591775(a/h) - 95159$$

Полученная зависимость имеет практически прямолинейный вид и является возрастающей, что по нашему мнению, это связано прежде всего с уменьшением значения изгибающего момента по высоте сечения при одной и той же нагрузке, что в свою очередь ведет к увеличению трещиностойкости изгибаемых элементов.

Анализ данных показал, что нагрузка, соответствующая полной потере образцом несущей способности  $P_{max}$ , в среднем на 30% выше нагрузки страгивания уже существующей трещины  $P_c$ :

- при  $a = 0,11 h$ ,  $P_c = 0,717 P_{max}$ ;
- при  $a = 0,2 h$ ,  $P_c = 0,616 P_{max}$ ;
- при  $a = 0,33 h$ ,  $P_c = 0,83 P_{max}$ .

При анализе достоверности различия полученных результатов можно сделать вывод, что при вероятности  $P = 0,95$  различие средних достоверно только в диапазоне 9...15 мм, хотя если брать среднее значение отношения  $P_c/P_{max}$  для длины трещины  $a = 5...9$  мм и сравнивать их со значением этого отношения при  $a = 15$  мм, достоверность нарушается. Следовательно, можно сделать вывод о том, что во всех случаях  $P_c/P_{max} = 0,72$ .

Следует отметить, что для определения по описанной выше методике влияния таких факторов как длительность нагружения, геометрические размеры, строение, порода, температура и влажность клееной древесины требуются дополнительные исследования, результаты которых можно использовать при контроле стойкости клееных деревянных конструкций к трещинообразованию.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы обработки данных / Н. Джонсон, Ф. Лион. – М.: Мир, 1980. – 610 с.
2. Сухарев, И.П. Экспериментальные методы исследования деформаций и прочности / И.П. Сухарев. – М.: Машиностроение, 1987. – 216 с.
3. Боровиков, А.М. Справочник по древесине: Справочник / А.М. Боровиков, Б.Н. Уголев. – М.: Лесн. Пром-сть, 1989. – 296 с.
4. Smith, T.W. Fracture mechanics analysis of butt joints in laminated wood beams / T.W. Smith, D.T. Penney // Wood Sci. – 1980 - №12(4). – P. 227-235.