

УДК 624.011.1.046.2

Д.Ю. Стрельцов, М.А. Тарасов

Стрельцов Денис Юрьевич родился в 1978 г., окончил в 2000 г. Южно-Российский государственный технический университет. Аспирант лаборатории деревянных конструкций ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. Имеет 4 печатные работы в области обследования, реконструкции и эксплуатации деревянных конструкций.



Тарасов Михаил Александрович родился в 1977 г., окончил в 1999 г. Московский государственный строительный университет. Аспирант лаборатории деревянных конструкций ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. Имеет 5 печатных работ в области расчета деревянных конструкций.



ВЛИЯНИЕ ТРЕЩИН НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ДЕРЕВЯННЫХ БАЛОК

На основании математического моделирования деревянных балок с трещинами различных размеров и местоположения определено их объемное напряженное состояние и исследовано изменение несущей способности по сравнению с балками цельного сечения без дефектов.

Ключевые слова: деревянная балка, трещина, касательные и нормальные напряжения, несущая способность.

При натурном обследовании деревянных конструкций часто возникает необходимость производить их расчет с учетом дефектов, появившихся за время эксплуатации. Результаты расчета должны позволить принять решение о возможности дальнейшей эксплуатации конструкций или обоснованно выбрать способ их усиления.

В действующей отечественной нормативной литературе отсутствуют рекомендации по учету размеров и местоположения трещин по сечению и длине балок при определении их несущей способности.

Деревянные балки цельного сечения с горизонтальными трещинами с обеих сторон рассмотрел И.Н. Квасников [5]. Из условия хрупкого разрушения древесины балки при скалывании он определил предельные нормальные напряжения в зависимости от предельных скалывающих напряжений, глубины и местоположения трещины по высоте сечения. Однако разрушающие напряжения по экспериментальным данным отличаются от расчетных на 62 %, что свидетельствует о неточности этой методики.

Деревянные балки с выходящей на торец сквозной трещиной при различной ее длине и местоположении можно рассчитать по методу составных стержней А.Р. Ржаницына [7]. В работах [1–3, 6] рассмотрены частные

случаи решения этой задачи для дефектных изгибаемых элементов. Расчетные формулы и графики, полученные в указанных работах, пригодны для определения прочности изгибаемых элементов со сквозной трещиной, хотя в длительно эксплуатируемых элементах из цельной древесины чаще всего встречаются несквозные трещины.

В работе [4] методом математического моделирования плоской задачи проанализировано по методу конечных элементов напряженно-деформированное состояние большепролетной деревянной клееной балки с болтовым креплением в узле опирания. Болтовое крепление в опорном узле балки имитировали с помощью введения вертикальных связей в зоне отверстия. Однако этим методом невозможно определить объемное напряженное состояние балки с эксплуатационным дефектом, которое характеризуется наличием трех компонентов напряжений, действующих во всех координатных плоскостях, а также рассчитать элемент с несквозной трещиной.

Цель настоящей работы – с помощью математического моделирования сравнить объемное напряженное состояние и изменение несущей способности деревянных балок с трещинами различных размеров и местоположения и балок цельного сечения без дефектов.

При решении задачи определяли коэффициенты изменения напряжений в сечении K_σ и K_τ , зависящие от длины трещины и показывающие во сколько раз снижается несущая способность балки с дефектом:

$$K_\sigma = \frac{\sigma_a}{\sigma_0}; \quad K_\tau = \frac{\tau_a}{\tau_0}, \quad (1)$$

где $\sigma_\sigma, \tau_\sigma$ и σ_τ, τ_τ – нормальные и касательные напряжения в балке с цельным сечением и в балке с трещиной.

Обследования многих объектов, эксплуатируемых в течение 50 ... 150 лет, показали, что около 80 % балок перекрытий имеют вертикальные и горизонтальные трещины различной длины, причем 92 % из них развиваются со стороны торцов.

Объемное напряженное состояние исследовали на примере балок перекрытий больницы Министерства путей сообщения РФ (г. Москва) длиной $L = 5,2$ м и сечением 220×260 мм при соотношении $H/L = 1/20$ (H – высота сечения) с помощью комплекса MARC, работающего по методу конечных элементов. Продолжительность эксплуатации постройки 68 лет.

Древесину рассматривали как трансверсально-изотропное тело с осями изотропии, направленными вдоль и поперек волокон. В объемной модели использовали около 10 тыс. конечных элементов, каждый из которых имел 16 точек интегрирования.

Расчетные физико-механические характеристики древесины были приняты согласно СНиП II-25-80: модуль упругости вдоль оси балки $E_x = 10\,000$ МПа, поперек оси балки $E_y = 450$ МПа; модуль сдвига $G_{xy} = 500$ МПа; коэффициенты Пуассона $\mu_{yx} = 0,45$, $\mu_{xy} = 0,03$.

Сначала рассчитывали балку без трещины при шарнирном закреплении ее на одной опоре и свободном опирании на другой. Расчетная нагрузка интенсивностью $q = 51,5$ кН/м равномерно распределена по ее длине. Точность расчета напряженного состояния балки под нагрузкой оценивали за счет построения кривых зависимости результатов расчета от количества конечных элементов.

Затем рассчитывали балку со сквозной торцевой трещиной (от шарнирно закрепленной опоры) длиной $C = 0,6; 1,2; 1,8; 2,4; 3,0; 3,6$ м. Соотношение длины трещины и длины балки (C/L) составило соответственно $0,12; 0,23; 0,35; 0,46; 0,58; 0,69$. Горизонтальную трещину располагали по оси поперечного сечения $H/2$ балки (рис. 1, а) как конечный элемент, имеющий те же характеристики, что и древесина, но низкий модуль сдвига: $G_{xy} = 0,003$ МПа. Размер конечных элементов в зоне расположения трещины уменьшен в два раза. По ширине сечения величину напряжений принимали исходя из максимальных значений.

Эпюры изменения нормальных и касательных напряжений по пролету балки при различной длине трещины представлены на рис. 1.

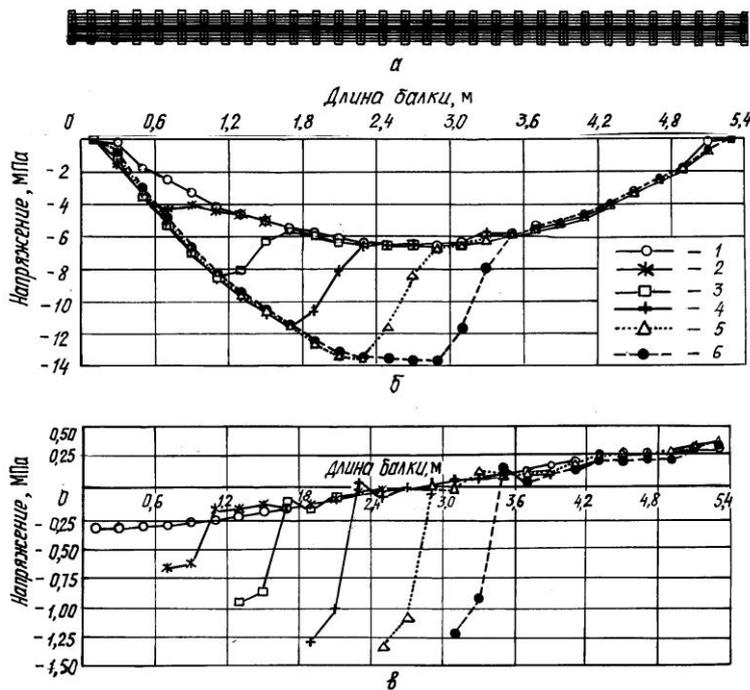


Рис. 1. Расчетная схема балки (а), распределение нормальных напряжений по нижней полке балки (б) и касательных напряжений по нейтральной оси балки (в) без трещины (1) и с трещиной (2 – 6) различной длины: 2 – 0,6 м; 3 – 1,2; 4 – 1,8; 5 – 2,4; 6 – 3,0 м

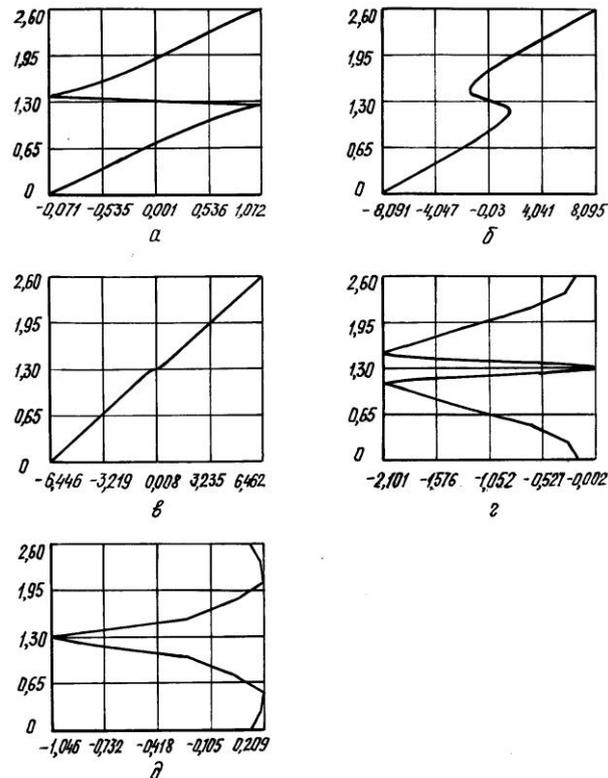


Рис. 2. Распределение нормальных (*a – в*) и касательных (*г, д*) напряжений по высоте поперечного сечения балки (длина трещины 1,8 м) на длине балки: *a, д* – 1,8 м; *б* – 2,0; *в* – 2,6; *г* – 1,6 м

Из приведенных эпюр (рис. 1) видно, что максимальные растягивающие напряжения возникают в растянутой зоне по нижней полке балки непосредственно перед трещиной, а максимальные касательные – в вершине трещины.

На рис. 2 показаны эпюры распределения напряжений по высоте сечений, расположенных в разных местах по пролету балки, при сквозной трещине длиной 1,8 м. В вершине трещины сохраняется распределение напряжений, присущее для раздельной работы ветвей потрескавшейся балки (рис 2, *a*). Изменение характера распределения напряжений на участке 0,6 м от вершины трещины приведено на рис. 2, *б*. Распределение нормальных напряжений на цельном участке, удаленном от вершины трещины на расстояние более 0,6 м, иллюстрирует рис. 2, *в*.

На расстоянии 0,4 м от вершины происходит уменьшение касательных напряжений по отношению к максимальным в 1,05–1,32 раза. Они приближаются к значениям, характерным для балки без трещины. Концентрация напряжений наблюдается в вершине трещины (рис. 2, *д*). В сечении на расстоянии 0,2 м от вершины характер распределения напряжений остается прежним.

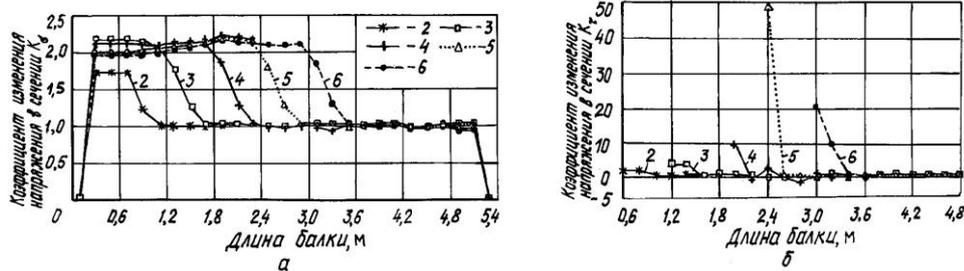


Рис. 3. Изменение нормальных (а) и касательных (б) напряжений по длине балки при различной длине трещины (см. обозначения на рис. 1)

На рис. 3 приведены графики изменения нормальных и касательных напряжений по пролету балки, построенные на основании формулы (1). Как видно, нормальные напряжения изменяются в 2,2 раза, а касательные – в 48 раз.

На рис. 4 показаны графики изменения максимальных напряжений при различной длине трещины. При развитии трещины (рис. 4, а) на участке I (C/L изменяется от 0 до 0,11) наибольшие нормальные напряжения возникают в середине пролета, что мало влияет на напряженное состояние. При дальнейшем развитии трещины повышается опасность напряжений в вершине трещины. На участке II при $C/L = 0,11 \dots 0,36$ напряжения в зоне трещины постоянно увеличиваются, в середине пролета они практически не изменяются. При длине трещины от 0,36 до 0,51 (участок III) эти изменения незначительны, в середине пролета напряжения в зоне трещины увеличиваются существенно, достигая максимума при $C/L = 0,51$.

Если трещина развивается по пролету (рис. 4, б), то наибольшие касательные напряжения возникают в вершине трещины. На участке I при изменении C/L от 0 до 0,35 наблюдается постоянное увеличение напряжений, на участке II – снижение.

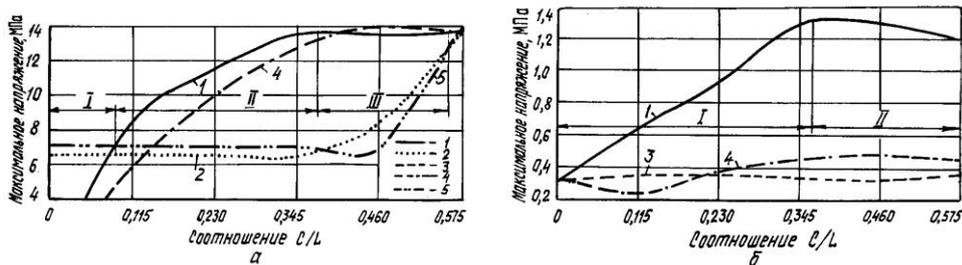


Рис. 4. Максимальные нормальные (а) и касательные (б) напряжения, рассчитанные методами конечных элементов (1 – 3) и составных стержней на упругоподатливых связях (4, 5) при различной длине трещины: 1, 4 – в вершине трещины; 2, 5 – в середине пролета балки; 3 – на торце балки

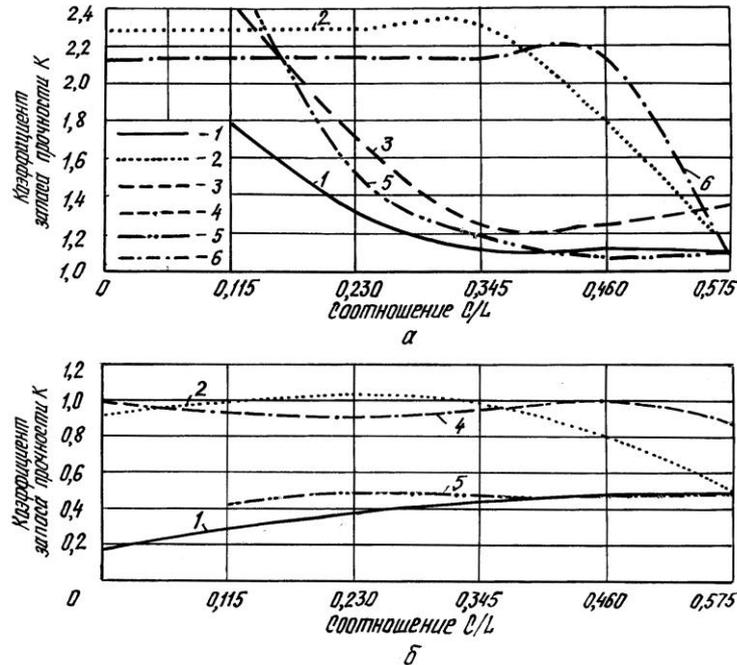


Рис. 5. Коэффициент запаса прочности по нормальным (1, 2, 5, 6) и касательным (3, 4) напряжениям (а) и изменение напряженного состояния балки (б) при различной длине трещины: 1 – 4 – метод конечных элементов; 5, 6 – метод составных стержней на упругоподатливых связях; 1, 3, 5 – в вершине трещины; 2, 6 – в середине пролета балки; 4 – на торце балки

На рис. 5, а показаны закономерности изменения коэффициентов запаса прочности, полученных по формулам:

$$K_1 = \frac{R_{\sigma}}{\sigma_a}; \quad K_2 = \frac{R_{\tau}}{\tau_a}. \quad (2)$$

Согласно СНиП II-25-80 принимали $R_{\sigma} = 15$ МПа, $R_{\tau} = 1,6$ МПа.

Из анализа графиков видно, что при увеличении нагрузки причиной разрушения рассматриваемой балки служат нормальные напряжения при любой длине трещины.

Закономерности изменения прочности балки при различной длине трещины, показанные на рис. 5, б, являются аппроксимирующими зависимостями, построенными по результатам расчетов. Уравнения аппроксимирующих кривых в виде полинома 4-й степени и соответствующие им коэффициенты корреляции приведены в таблице.

Анализ результатов расчетов по методу конечных элементов и с использованием теории составных стержней на упругоподатливых связях [1] показал следующее:

Напряжения	Уравнения аппроксимирующих кривых	Коэффициент корреляции
Нормальные: в середине пролета в зоне трещины	$y = 0,0016x^4 - 0,0293x^3 + 0,131x^2 - 0,1628x + 1$	0,9901
	$y = -7E - 05x^4 + 0,0017x^3 - 0,0278x^2 + 0,1985x$	0,9619
Касательные: у опоры (на торце) в вершине трещины	$y = -0,0011x^4 + 0,0038x^3 + 0,0519x^2 - 0,2585x + 1,2045$	0,9913
	$y = -0,0068x^4 - 0,1051x^3 + 0,6156x^2 - 1,7456x + 2,2281$	1,0000

1. При $C/L = 0,12; 0,23$ и $0,35$ значения нормальных напряжений в зоне трещины, полученные по методу конечных элементов, соответственно на 32,1; 13,7 и 6,6 % выше, чем по теории составных стержней, а при $C/L = 0,46$ и $0,58$ – соответственно на 2,4 и 2,8 % ниже.

2. При $C/L = 0,12; 0,23$ и $0,35$ значения нормальных напряжений в середине пролета, рассчитанные по методу конечных элементов, соответственно на 6,3; 6,5 и 7,8 % ниже, чем полученные по теории составных стержней, а при $C/L = 0,46$ данные метода конечных элементов на 16,3 % выше.

3. При $C/L = 0,12$ значения касательных напряжений в зоне трещины по методу конечных элементов на 31,3 % выше, чем по теории составных стержней, а при $C/L = 0,35; 0,46$ и $0,58$ – соответственно на 25,4; 30,2 и 20,7 % ниже.

Выводы

1. На основании математического моделирования деревянных балок с трещинами различных размеров объемным методом конечных элементов и методом составных стержней установлено, что значения, полученные по этим методам, отличаются для нормальных и касательных напряжений соответственно на 2,4 ... 16,3 и 20,7 ... 31,3 %.

2. Максимальные нормальные напряжения возникают в нижней ветви перед вершиной трещины балки. Наибольшие нормальные и касательные напряжения отмечены при длине трещины 0,36.

3. С помощью полученных аппроксимирующих зависимостей при известной длине трещины можно определить изменение напряженного состояния балки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биричевский М.Л., Варфоломеев Ю.А. К расчету составных стержней с неравномерно распределенными связями сдвига // Исследования в области деревянных конструкций. – М: ЦНИИСК, 1985. – С. 164–172.

2. Биричевский М.Л., Варфоломеев Ю.А. Расчет деревянных изгибаемых элементов с трещинами, выходящими на торец // Строительство и архитектура. – 1985. – № 7. – С. 10–14. – (Изв. высш. учеб. заведений).

3. Биричевский М.Л., Варфоломеев Ю.А., Славик Ю.Ю. Влияние местоположения и размеров трещин на прочность изгибаемых деревянных элементов // Строительная механика и расчет сооружений. – М.: Стройиздат, 1986. – № 3. – С. 42–44.

4. Варфоломеев Ю.А., Потуткина Л.Г. Причины снижения эксплуатационной надежности опорных узлов большепролетных балок // Перспективные направления использования сырья и совершенствования продукции в лесопилении: Науч. тр. / ЦНИИМОД, 1986. – С. 116 – 121.

5. Квасников Е.Н. О прочности и надежности деревянных балок и ферм // Повышение надежности и долговечности строительных конструкций. – Л.: ЛИСИ, 1972. – С. 47–67.

6. Крылов Н.А., Потапов А.И., Биричевский М.Л. Расчет клееной деревянной балки с симметричным непрочным // Лесн. журн. – 1975. – № 1. – С. 10–14. – (Изв. высш. учеб. заведений).

7. Ржаницын А.Р. Теория составных стержней строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1948. – 160 с.

ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко

Поступила 10.12.02

D.Yu. Streltsov, M.A. Tarasov

Influence of Cracks on Stress Condition of Wooden Beams

The three-dimensional stress state of wooden beams is determined and change of their bearing capacity is investigated based on mathematical simulation of wooden beams with cracks of different size and location in comparison with solid-section beams without defects.

