

УДК 624.16.042.5.001.24

В. П. СТУКОВ

Архангельский государственный технический университет



Стуков Валерий Павлович родился в 1941 г., окончил в 1963 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерных конструкций и архитектуры Архангельского государственного технического университета. Имеет около 60 печатных работ в области исследований работы и расчета балок комбинированного сечения, составленных из древесины и бетона; пространственных методов расчета балочных пролетных строений мостов.

### УЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МОСТОВЫХ БАЛКАХ ИЗ КЛЕЕНОЙ ДРЕВЕСИНЫ И ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

Рассмотрен расчет балки комбинированного сечения из древесины и железобетона, объединенных для совместной работы, на температурные воздействия.

The design of the beam of combined section made of wood and reinforced concrete combined for joint work has been considered for temperature effect.

Клееную древесину широко применяют в мировой практике мостостроения как самостоятельный материал, так и в сочетании с железобетоном. В Канаде и в северных штатах США построены десятки тысяч мостов с балками комбинированного сечения [5]. В Европе, особенно в Скандинавии, подобные мосты в прошлом не находили широкого распространения. В настоящее время европейские страны начали проявлять к ним интерес. Достаточно сказать, что в Финляндии в 1992 г. разработана долгосрочная программа, предусматривающая исследования деревянных мостов, в том числе с балками комбинированного сечения [4].

Одна из особенностей работы таких балок, составленных из различных материалов, – возникновение в ребре и плите температурных напряжений при колебаниях температуры.

В отличие от сталежелезобетонных балок, в которых напряженное состояние при действии температуры зависит в основном от различной теплопроводности материалов пролетных строений, при комбинировании древесины и железобетона основным фактором является различие в коэффициентах линейной температурной деформации бетона  $\alpha_b$  и древесины  $\alpha_d$ :  $\alpha_b = (0,7...1,0) \cdot 10^{-5}$  МПа;  $\alpha_d = (1,7...3,6) \cdot 10^{-6}$  МПа.

В работе [1] отмечается, что для балки из древесины и железобетона опасно увеличение температуры, так как при этом возрастают нормальные напряжения в бетоне и сдвигающие усилия в плоскости контакта между частями сечения.

Поскольку объединение железобетонной плиты с ребром из древесины производится в основном при положительных температурах, расчетная разность температур  $\Delta t$  может быть сравнительно невелика и температурные усилия не превышают 30 % усилий от внешних нагрузок. В случае объединения плиты и ребра при иных температурах эти усилия могут быть значительными.

При понижении температуры расчетная разность температур увеличивается и напряженное состояние существенно изменяется, особенно в плите балки.

Рассмотрим случай повышения температуры. Балка комбинированного сечения схематично представлена на рис. 1, а. Ребро из клееной древесины и железобетонная плита соединены при помощи клеевого шва. Собственные деформации тонкого клеевого шва при действии сдвигающих усилий незначительны, поэтому ими можно пренебречь. Материалы, из которых состоит балка, отличаются модулями упругости.

Коэффициент линейной температурной деформации бетона больше, чем древесины, и при повышении температуры происходит изгиб с вогнутостью в сторону ребра из древесины. При однородном нагреве изгибающий момент в балке постоянен, поэтому ось балки примет форму дуги окружности с кривизной  $1/r = \text{const}$ .

Различие деформаций плиты и ребра  $\Delta \varepsilon_t$  балки при перепаде температур  $\Delta t$  имеет вид

$$\Delta \varepsilon_t = \varepsilon_{t,b} - \varepsilon_{t,d} = (\alpha_b - \alpha_d) \Delta t, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{t,b}$ ,  $\varepsilon_{t,d}$  — деформация бетона и древесины:

$$\Delta t = t_p - t_0; \quad t_p - \text{наибольшее значение максимальной или минимальной температуры балки в течение годового цикла; } t_0 - \text{температура плиты и ребра в момент их объединения.}$$

При повышении температуры из-за различий величин  $\alpha_b$  и  $\alpha_d$  плита подвергается не только изгибу, но и сжатию, а ребро — изгибу и растяжению [3].

Рассмотрим элемент балки комбинированного сечения, выделенный двумя смежными поперечными сечениями  $m$  и  $m_1$  (рис. 1, б). Внутренние силы по поперечному сечению ребра можно привести к растягивающему усилию  $N_p$  и паре  $M_p$ , внутренние силы для железобетонной плиты — к сжимающему усилию  $N_n$  и паре  $M_n$  (рис. 1, в).

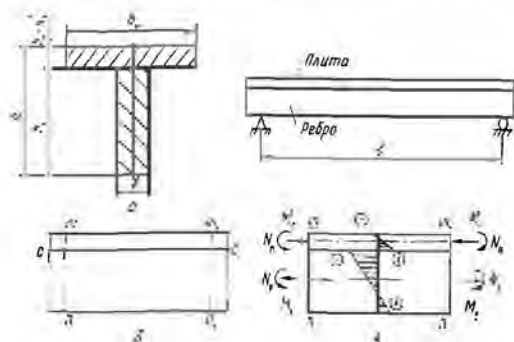


Рис. 1. К расчету балки комбинированного сечения: а – поперечное сечение и расчетная схема балки; б – элемент балки; в – схема усилий в ребре и плите балки и эпюра напряжений на участке  $m-m$

Внутренние силы в любом сечении балки должны уравновеситься:

$$N_p = N_n = N$$

и

$$Nh/2 = M_p + M_n, \quad (2)$$

где  $h$  – высота сечения балки.

Изгибающие моменты для ребра и плиты

$$M_p = \frac{E_d I_p}{r}, \quad M_n = \frac{E_b I_n}{r}, \quad (3)$$

где  $I_p, I_n$  – моменты инерции сечений ребра и плиты;

$E_d, E_b$  – модули упругости древесины и бетона;

$r$  – радиус кривизны.

Подставляя выражение (3) в уравнение (2), получаем

$$\frac{Nh}{2} = \frac{E_d I_p}{r} + \frac{E_b I_n}{r}. \quad (4)$$

Другое уравнение для определения  $N$  и  $r$  можно вывести из условия, что по поверхности соприкосновения  $C-C$  относительные удлинения бетона и древесины должны быть одинаковыми. Это условие можно записать в виде

$$\alpha_d \Delta l + \frac{N}{E_d A_p} + \frac{h_p}{2r} = \alpha_b \Delta l - \frac{N}{E_b A_n} - \frac{h_n}{2r}, \quad (5)$$

где  $A_p, A_n$  – площадь сечения ребра и плиты;

$h_p, h_n$  – высота сечения ребра и плиты,

$$\text{или} \quad N \left( \frac{1}{E_d A_p} + \frac{1}{E_b A_n} \right) = (\alpha_b - \alpha_d) \Delta l - \frac{h}{2r}. \quad (6)$$

Подставляя выражение (4) в (6), находим

$$\frac{2}{hr} (E_d I_p + E_b I_n) \left( \frac{1}{E_d A_p} + \frac{1}{E_b A_n} \right) = (\alpha_b - \alpha_d) \Delta l - \frac{h}{2r}. \quad (7)$$

Вводим обозначения

$$N = \frac{E_s \sigma}{E_n}; \quad I = I_p + \nu I_n;$$

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{A_p} + \frac{1}{\nu A_n} \quad (8)$$

С учетом (1) и (8) выражение (7) принимает вид

$$\frac{1}{r} \left( \frac{2I}{Ah} + \frac{h}{2} \right) = \Delta \varepsilon_t \quad (9)$$

Из выражения (9) получаем

$$\frac{1}{r} = \frac{\Delta \varepsilon_t h}{\frac{2I}{A} + \frac{h^2}{2}} \quad (10)$$

Из уравнений (4) и (10) находим

$$N = \frac{2\Delta \varepsilon_t E_n I}{\frac{2I}{A} + \frac{h^2}{2}} \quad (11)$$

а из (3) и (10)

$$M_p = \frac{\Delta \varepsilon_t h}{\frac{2I}{A} + \frac{h^2}{2}} E_s I_p; \quad (12)$$

$$M_n = \frac{\Delta \varepsilon_t h}{\frac{2I}{A} + \frac{h^2}{2}} E_s I_n. \quad (13)$$

Напряжения в древесине ребра и бетоне плиты получаем сложением напряжений от усилия  $N$  и кривизны  $1/r$ .

Напряжения в ребре

$$\sigma = \frac{\frac{2I}{A} + \frac{hh_p}{2}}{\frac{2I}{A} + \frac{h^2}{2}} E_s \Delta \varepsilon_t \quad (14)$$

Напряжения в плите

$$\sigma = \frac{\frac{2I}{A} + \frac{hh_n \nu}{2}}{\frac{2I}{A} + \frac{h^2}{2}} E_s \Delta \varepsilon_t \quad (15)$$

В расчетах на понижение температуры следует знаки усилий изменить на противоположные.

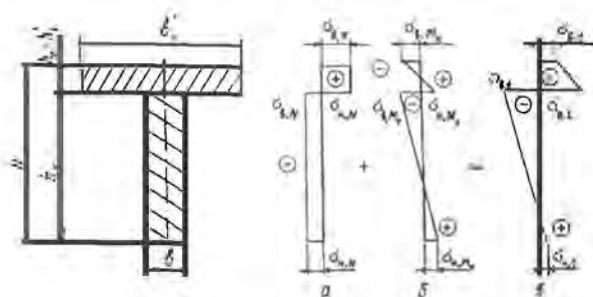


Рис. 2. Эпюры нормальных напряжений при повышении температуры: *a* – от продольной силы; *b* – от температурных моментов; *в* – результирующая

На рис. 2 приведены эпюры нормальных напряжений при повышении температуры.

Как видим, при повышении температуры железобетонная часть сечения удлиняется больше, чем деревянная. Древесина ребра сдерживает деформации бетона плиты. В плите возникают сжимающие напряжения, а в верхней зоне ребра – растягивающие. В нижней части ребра возможно возникновение небольших сжимающих или растягивающих напряжений (рис. 2, *в*).

Температурные напряжения суммируются с напряжениями от внешней нагрузки, в связи с чем увеличиваются нормальные напряжения в железобетонной плите и несколько изменяются напряжения в нижних волокнах ребра из древесины (рис. 3).

Увеличение сжимающих напряжений в железобетонной плите не является опасным, так как в ней, как правило, прочность бетона используется не полностью.

При понижении температуры (рис. 4) плита из железобетона укорачивается более интенсивно. Ее деформации сдерживаются древесиной ребра. В бетоне плиты возникают растягивающие напряжения, а в верхней части ребра – сжимающие. В нижних волокнах ребра возможно появление растягивающих напряжений.

При суммировании температурных напряжений с напряжениями от внешней нагрузки уменьшаются сжимающие напряжения в бетоне плиты. Возможно появление растягивающих напряжений в нижних волокнах плиты. Увеличение сжимающих напряжений в верхних волокнах ребра из дерева не является опасным, поскольку внешние нагрузки в

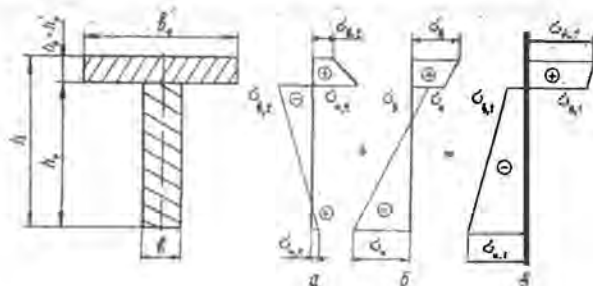


Рис. 3. Эпюры нормальных напряжений при повышении температуры (*a*), внешней нагрузки (*б*) и результирующая (*в*)

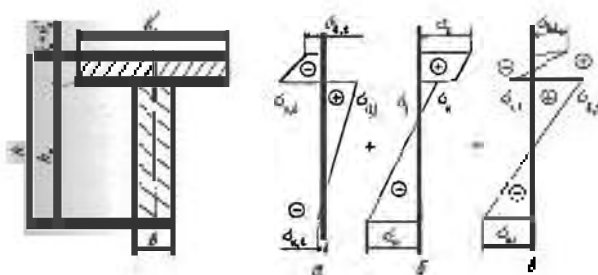


Рис. 4. Эпюры нормальных напряжений при понижении температуры (а), внешней нагрузки (б) и результирующая (в)

этой части сечения невелики. Опасны растягивающие напряжения (рис. 4, в) в нижних волокнах плиты, поскольку в отдельных случаях может потребоваться расчетное армирование этой зоны сечения.

Анализ напряженного состояния балки позволяет сделать вывод: изменение температуры окружающей среды может значительно повлиять на напряженное состояние комбинированной балки, вызывая изменение нормальных напряжений в некоторых частях ее сечения.

В работе [2] рассмотрена реконструкция балочного моста с пролетами  $l = 18$  м через р. Лявлю на автодороге Архангельск – Косково, где балки из клееной древесины объединены с железобетонной плитой. Балки имеют следующие характеристики:  $h = 1,55$  м;  $I = 0,0607$  м<sup>4</sup>;  $A_p = 0,364$  м<sup>2</sup>;  $1/A = 4,62$  1/м<sup>2</sup>;  $E_d = 9,81 \cdot 10$  МПа/см; при  $\Delta t = 35$  °С  $\Delta \sigma = 20,65 \cdot 10^{-5}$ . По нашим расчетам, напряжения в нижних волокнах ребра из древесины от расчетной нагрузки составили 9,34 МПа.

Расчеты по формуле (14) показывают, что при повышении температуры нормальные температурные напряжения в крайнем нижнем волокне ребра из древесины будут сжимающими и равными 1,55 МПа. При понижении температуры они будут растягивающими и составлять 16,6 % от растягивающих напряжений от полной внешней расчетной нагрузки. Приведенный пример подтверждает необходимость учета температурных напряжений при проектировании мостов с пролетными стропилами из балок комбинированного сечения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Мельников Ю.О. Влияние температурных деформаций на напряженное состояние деревобетонных мостовых балок // Тр. СибАДИ. - 1971. - № 4. - С. 87 - 96. [2]. Стуков В.П. К вопросу применения клееной древесины в мостовых конструкциях // Лесн. журн. - 1993. - № 5 - 6. - С. 73 - 76. - (Изв. высш. учеб. заведений). [3]. Тимошенко С.П. Соппротивление материалов. Т.1. - М.: Наука, 1965. - 363 с. [4]. Research project development of wood bridges, survey of source documents / P. Naakana, A. Jutila, H. Rautakorpi, L. Salokangas // Except of the Finnish Report Survey of background information (Publ. 3). - 1993. - 45 p. [5]. Timber bridge decks // Civ. Eng. (USA). - 1985. - 55, N 5. - P. 47 - 49.

Поступила 20 мая 1996 г.