

УДК 624.011.2

О НЕКОТОРЫХ ДОПУЩЕНИЯХ ПРИ РАСЧЕТЕ СОЕДИНЕНИЙ НА СТАЛЬНЫХ СТЕРЖНЯХ, ВКЛЕЕННЫХ В ДРЕВЕСИНУ

Ю. Б. ВЫЛЕГЖАНИН

Кузбасский политехнический институт

Стык на клеенных стальных стержнях — эффективный способ соединения элементов деревянных конструкций. Точный расчет такого стыка затруднен из-за его сложного напряженно-деформированного состояния. Задачу можно решить приближенно, если допустить отсутствие напряжений, перпендикулярных плоскости шва, и заменить фактическое распределение нормальных напряжений по ширине сечения древесины на некоторую среднюю постоянную по ширине сечения величину. Это приводит задачу к одномерной, в которой косвенно учтено сложное напряженно-деформированное состояние [2]. Однако такое решение не удовлетворяет граничным условиям на торцах, а также противоречит уравнению равновесия элементарного участка клеевого шва в направлении, перпендикулярном плоскости сдвига.

Так как толщина клеевого шва невелика, то приближенно его можно рассматривать как тонкую полимерную пленку, в которой возникают только касательные напряжения. Подобную схему использовали ряд авторов [5, 6] при расчете клеевого соединения однородных материалов. В действительности напряженное состояние клеевого шва более сложно, чем принято выше. Известны работы [1, 4], в которых приближенно учтены нормальные напряжения в клеевом слое.

Из оценки характера распределения напряжений сдвига и влияния толщины клеевого шва [4] следует, что эпюры касательных напряжений при двух- и одномерном напряженно-деформированном состоянии тонкого полимерного слоя совпадают по всей длине клеевого соединения, за исключением торцевых сечений, при условиях:

$$\begin{aligned} s_2^2/s_1^2 &\leq 24(1 + \mu_{кл})^2 E_d h_d / E_{кл} h_{кл}; \\ s_2^2/s_1^2 &\leq 24(1 + \mu_{кл})^2 E_a d_a / E_{кл} h_{кл}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь E_d , h_d и $E_{кл}$, $h_{кл}$ — модули упругости и толщина слоев древесины и клея;

$\mu_{кл}$ — коэффициент Пуассона клея;

s_1 и s_2 — корни характеристического уравнения по [4].

При увеличении отношения s_2/s_1 обе эпюры сближаются во все большей области, отличие между ними переносится ближе к торцу элемента. При отношении $s_2/s_1 \geq 20$ различие в ординатах эпюр касательных напряжений в сечении, отстоящем от торца на расстоянии 0,01 длины полимерного слоя, не превышает 10... 15%. Тогда выражения (1) при подстановке значений параметров примут вид

$$h_d/h_{кл} \geq 15; \quad d_a/h_{кл} \geq 0,8. \quad (2)$$

При существующей номенклатуре арматурных стержней второе условие всегда выполняется.

В конструкциях стыков толщина клеевого шва обычно не превышает 2 мм, и, следовательно, минимальная толщина «рабочего» слоя древесины

$$h_a^{\min} \geq 30 \text{ мм.}$$

Итак, при соблюдении приведенного условия работа клеевого шва достаточно точно описывается линейным напряженным состоянием, что значительно упрощает решение задачи. Влияние объемного напряженного состояния соединения учитывают косвенно через экспериментально определенный коэффициент пропорциональности между сдвигающими напряжениями и взаимным смещением соединяемых элементов для каждого вида соединяемых материалов и клея.

Экспериментальное исследование распределения нормальных напряжений по ширине сечения древесины проводили на образцах, состоящих из двух сосновых досок (влажностью 7...9 %, толщиной 12 мм и шириной 60 мм), сплачиваемых по длинной кромке. В шов между досками соосно вклеивали стальные стержни периодического профиля диаметром 10 мм. Нагружение образцов осуществляли по схеме промежуточного скалывания. Деформацию сечения деревянного элемента измеряли тензорезисторами в нескольких сечениях по длине соединения, индикаторами часового типа и тензограмми Анстова.

Испытания показали, что напряжения максимальны на контакте клей — древесина, по мере удаления от этой зоны они уменьшаются и на расстоянии 1,5...3,0 диаметра вклеиваемого стержня становятся практически постоянными (изменение менее 2 %). Путем обработки полученных данных на ЭВМ подобраны аналитические зависимости вида

$$y = a + b/z \text{ и } y = a e^z,$$

которые достаточно точно описывают результаты эксперимента (коэффициенты корреляции — соответственно 0,98 и 0,96, среднее отклонение от экспериментальных данных — 10,7 и 8,0 %).

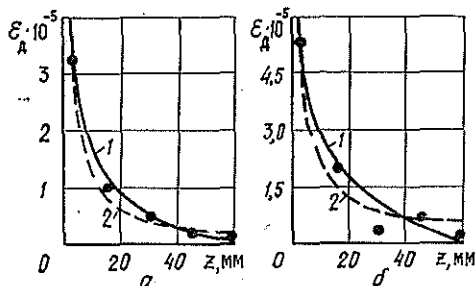


Рис. 1. Распределение относительных деформаций по ширине сечения деревянного элемента: a — 4 кН; b — 10 кН; 1 и 1' — $y = a e^z$; 2 и 2' — $y = a + b/z$

На рис. 1 показано распределение относительных деформаций по ширине деревянного элемента в сечении, отстоящем от торца на расстоянии 1,5 диаметра вклеиваемого стержня. Точками отмечены экспериментальные значения, линиями — подобранные функциональные кривые, хорошо описывающие результаты эксперимента и в других сечениях по длине соединения. Возможность аппроксимации экспериментальных значений распределения нормальных напряжений по сечению древесины приведенными зависимостями подтверждается экспериментальными данными [3].

Рассмотрим совместную работу стального стержня с деревянной призмой. Соединение осуществляется путем вклеивания стержня в продольный паз эпоксидно-цементным клеем ЭПЦ. Оси центров масс поперечных сечений элементов совпадают. Соединение загружено по схеме промежуточного скалывания, что соответствует работе стыка в растянутом элементе конструкции. Толщина клеевого шва считается постоян-

ной, равной зазору между стенкой паза и внешним диаметром стержня. Торец стержня не проклеивается и древесины за ним нет. Соединяемые материалы следуют закону Гука и равномодульны при растяжении и сжатии. Анизотропию деревянного бруса не учитывали. Распределение нормальных напряжений в арматурном стержне принимают равномерным, так как жесткость стального стержня значительно выше жесткости древесины и клея. Распределение нормальных напряжений по ширине сечения древесины удовлетворяет зависимости вида $y = a e^z$.

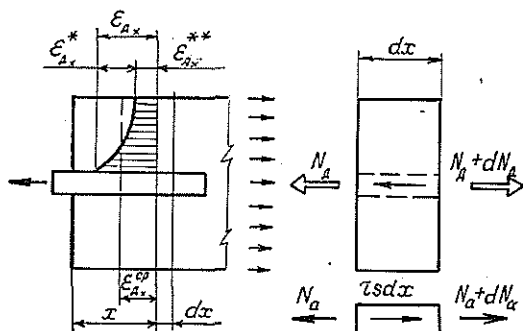


Рис. 2. Расчетная схема усилий, действующих на соединение и элементарный участок его длины

Условия равновесия для элементарного участка dx , выделенного двумя поперечными сечениями (рис. 2):

$$\frac{dN_{dx}}{dx} = \tau_{клx}^d S_{п}; \quad \frac{dN_{ax}}{dx} = -\tau_{клx}^a S_a;$$

$$\tau_{клx} = \tau_{ax} = \tau_x; \quad \tau_{dx} = \tau_{ax} \frac{S_a}{S_{п}},$$

где s_a и $s_{п}$ — периметры вклеенного стержня и паза.

Приняв за начало отсчета торец деревянного элемента, перемещение слоя клея по контакту клей — древесина запишем в виде:

$$u_{клx} = u_{dx} - u_{ax} = \gamma_{клx} h_{кл},$$

где $u_{ax} = u_{dx}^0 (e^{h_x} - e^z) / e^z (e^{h_x} - 1)$; $u_{dx} = u_{dx}^0$ (при $z = 0$).

Дифференцируя по x , получим:

$$\frac{d\gamma_{клx}}{dx} = \frac{1}{h_{кл}} (\epsilon_{dx} - \epsilon_{ax}). \tag{3}$$

Уравнение (3) — условие совместности деформаций клеевого шва, соединяющего стальной стержень с древесиной. Учитывая, что $\gamma_{клx} = \tau_{клx} / G_{кл шва}$, и подставив в (3), имеем:

$$\frac{d\tau_{клx}}{dx} = K (\epsilon_{dx} - \epsilon_{ax}), \tag{4}$$

где $K = G_{кл шва} / h_{кл}$ — некоторый коэффициент пропорциональности или коэффициент жесткости шва, определяемый экспериментально.

В упругой стадии работы физические зависимости связи напряжений и деформаций запишем в виде

$$\epsilon_{ax} = N_{ax} / E_a F_a; \quad \epsilon_{dx} = \epsilon_{dx}^* + \epsilon_{dx}^{**}; \quad \gamma_{dx} = \tau_{dx} / G_d.$$

Здесь ε_{dx}^* и ε_{dx}^{**} — составляющие эпюры относительных деформаций древесины согласно рис. 2;
 G_d — модуль сдвига древесины;
 E_a, F_a и E_d, F_d — модуль упругости и площадь поперечного сечения соответственно арматуры и деревянного бруса.

Величину ε_{dx}^{**} можно вычислить через среднее значение относительной деформации древесины $\varepsilon_{dx}^{cp} = N_{dx}/E_d F_d$, приравняв площади усредненной и действительной эпюр деформаций. Тогда

$$F(\varepsilon_{dx}^{**}) = h_d \varepsilon_{dx}^{cp} - F(\varepsilon_{dx}^*)$$

или

$$\varepsilon_{dx}^{**} = \varepsilon_{dx}^{cp} - \frac{1}{h_d (e^{h_d} - 1)} \varepsilon_{dx}^*.$$

Искомую суммарную деформацию найдем из выражения

$$\varepsilon_{dx} = \varepsilon_{dx}^{**} + \varepsilon_{dx}^* = \varepsilon_{dx}^{cp} + \left(1 - \frac{1}{h_d (e^{h_d} - 1)}\right) \varepsilon_{dx}^*.$$

Дифференцируя (4) и подставляя известные значения, получим:

$$\frac{d^2 \tau_x}{dx^2} = \alpha^2 \tau_x, \quad (5)$$

$$\text{где } \alpha^2 = \frac{K s_a (1 + u)}{E_a F_a c}; \quad c = 1 - K \frac{s_a}{s_n G_d} \left(1 - \frac{h_d + 1}{h_d e^{h_d}}\right); \quad u = \frac{E_a F_a}{E_d F_d}. \quad (6)$$

Граничные условия по концам соединения

$$\frac{d\tau_x}{dx} = -\frac{KN}{E_a F_a} \text{ при } x=0; \quad \frac{d\tau_x}{dx} = \frac{KN}{E_a F_a} \text{ при } x=l.$$

Решение однородного дифференциального уравнения второго порядка (5) с постоянными коэффициентами имеет вид

$$\tau_x = C_1 \operatorname{ch} \alpha x + C_2 \operatorname{sh} \alpha x.$$

Определив постоянные интегрирования C_1 и C_2 , найдем напряжения сдвига:

$$\tau_x = \alpha N [u \operatorname{ch} \alpha x + \operatorname{ch} \alpha (l - x)] / s_a (1 + u) \operatorname{sh} \alpha l. \quad (7)$$

Максимальное значение напряжений сдвига (при $x=0$)

$$\tau_{\max} = \alpha N / \omega s_a (1 + u); \quad \omega = \operatorname{sh} \alpha l / (u + \operatorname{ch} \alpha l).$$

Нормальные напряжения в арматурном стержне σ_{ax} получим интегрированием выражения (7) в пределах от x до l и умножением его на s_a / F_a

$$\sigma_{ax} = N [u (\operatorname{sh} \alpha l - \operatorname{sh} \alpha x) + \operatorname{sh} \alpha (l - x)] / (1 + u) F_a \operatorname{sh} \alpha l.$$

Выражение (7) отличается от приведенного в работе [2] параметром c , входящим в коэффициент α . Обозначив отношение коэффициентов α , найденных по двум решениям, через K_α и подставляя в (7) известные значения, получим: при вклейке в квадратный паз по трем граням $K_\alpha = 1,032$, то же по четырем граням $K_\alpha = 1,018$, при вклейке в круглый паз $K_\alpha = 1,029$. Параметр α отличается от соответствующего значения, вычисленного по [2], на 2...3 %, что находится в

пределах точности приближенного метода расчета. Аналогичный вывод получим для функциональных зависимостей распространения нормальных напряжений по линейному (1), гиперболическому (2), параболическому (3) законам, для которых соответственно $K_{\alpha_1} = 1,028$, $K_{\alpha_2} = 1,018$, $K_{\alpha_3} = 1,020$.

Таким образом, характер распределения нормальных напряжений по ширине сечения деревянной призмы несущественно влияет на напряженно-деформированное состояние соединения. Допущение о равномерном распределении напряжений, принятое в работе [2], можно считать достаточно корректным.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Бондин В. Ф. Напряжения в клеевом стыке внахлестку при соединении анизотропных материалов // *Механика твердого тела*.— 1972.— № 1.— С. 159. (Изв. АН СССР). [2]. Бондин В. Ф., Вылегжанин Ю. Б. О прочности на сдвиг клеевых соединений стальных стержней с древесиной // *Стр-во и архит.*— 1976.— № 11.— С. 20. (Изв. высш. учеб. заведений). [3]. Жилкин В. А., Борыняк Л. А. Экспериментальное определение функций перемещений для точек деревянной поверхности при выдергивании из нее стального стержня // *Стр-во и архит.*— 1979.— № 5.— С. 135. (Изв. высш. учеб. заведений). [4]. Рабинович А. Л. Введение в механику армированных полимеров.— М.: Наука, 1970.— 255 с. [5]. Arnovljevic. Das Verteilungspesetz der Naftspannungen in axial beanspruchten Verbundstäben // *Z. F. Arch. und Ing.*— Wesen, Hanover, 1909, 55.— S. 415. [6]. Goland M., Reissner E. The stress in cemented joints // *J. of Applied Mechanics*.— 1944.— vol. 2, N 1.— P. A—17.

Поступила 24 декабря 1984 г.

УДК 620.179.119

ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ДЕФЕКТОСКОПИИ ПИЛЕННЫХ ЛЕСОМАТЕРИАЛОВ

А. Н. КАРМАДОНОВ, Н. М. ОНТИКОВА, С. В. ПОЗДНЯКОВ

НИИ электронной интроскопии при Томском политехническом институте

Актуальность и экономическая целесообразность научных исследований по обнаружению пороков и дефектов в круглых и пиленых лесоматериалах, а также в изделиях из древесины очевидны. В работах [3—5] опубликованы основные результаты исследований и сделана оценка применимости методов неразрушающего контроля в круглых лесоматериалах, в работах [1, 2, 4, 6, 7]— данные по обнаружению пороков и дефектов в пиленых лесоматериалах, а также приведена качественная оценка различных методов контроля древесных материалов.

В работе [7] показано, что оптический метод контроля с применением отраженного излучения имеет определенные преимущества перед остальными: 1) обеспечивает выявляемость наибольшего числа пороков (дефектов); 2) отличается безопасностью для обслуживающего персонала и простотой эксплуатации; 3) позволяет автоматизировать процесс контроля. Однако оптический метод имеет общий для всех способов недостаток: слабую идентификацию пороков. Для обеспечения требуемой идентификации пороков необходимо прежде всего повысить информативность контроля и оптимизировать процесс обработки полученной информации.

В известных системах контроля пиленых лесоматериалов (досок), созданных фирмами («Bendix» США и «Plessey») на основе лазерного и люминесцентного источников излучения, указанная задача решается поэтапно [7]. На первом этапе оператор производит предварительную