

Расчет и проектирование строительных конструкций

К ВОПРОСУ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ЛОБОВЫХ ВРУБКАХ

А.С. МАРКОВИЧ, канд. тех. наук, доцент
Российский университет дружбы народов,
115419, г. Москва, Орджоникидзе, д. 3, markovich.rudn@gmail.com

В статье рассмотрены результаты компьютерного анализа напряженно-деформированного состояния опорного узла клееной металлодеревянной фермы, решенного лобовой врубкой. На основании проведенных исследований сделаны выводы о необходимости учета в расчетах нормальных напряжений между продольными слоями, от которых существенно зависит величина главных растягивающих напряжений, а также направления площадок, на которых они действуют. Помимо этого, исследована и подтверждена эффективность применения наклонно вклеенных стержней для повышения сдвиговой прочности соединений на лобовых врубках.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: деревянные конструкции, лобовые врубки, соединения на вклеенных стержнях, компьютерное моделирование, метод конечных элементов

Одними из наиболее простых и надежных опорных соединений в деревянных фермах является лобовая врубка, применяемая в строительстве на протяжении многих десятков лет. Несмотря на интенсивное развитие и внедрение армированных клееных конструкций, соединения на лобовых врубках продолжают использоваться и в настоящее время.

Главным недостатком лобовых врубок является возможность разрушения от скалывания древесины вследствие перенапряжения опорного узла.

Идея расчета лобовых врубок на основании действующих норм [1] заключается в проверке условий прочности с учетом упругих свойств древесины.

1. По площадке скалывания – AB (рис. 1):

$$\tau_{ск}^{cp} = \frac{T_{ск}}{F_{ск}} \leq R_{ск}^{cp}, \quad (1)$$

где $\tau_{ск}^{cp}$ и $R_{ск}^{cp}$ – среднее касательное напряжение на площадке AB и среднее расчетное сопротивление древесины скалыванию, $T_{ск}$ и $F_{ск}$ – скалывающее усилие и площадь скалывания.

2. По площадке смятия – BC :

$$\sigma_{см,\alpha} = \frac{N_c}{F_{см}} \leq R_{см,\alpha}, \quad (2)$$

где $\sigma_{см,\alpha}$ и $R_{см,\alpha}$ – нормальное напряжение на площадке BC и расчетное сопротивление древесины смятию под углом к продольным волокнам, N_c и $F_{см}$ – продольная сила в сжатом поясе фермы и площадь смятия.

3. По ослабленному врубкой сечению растянутого пояса – BD :

$$\sigma_p = \frac{N_p}{F_{нт}} \leq R_p, \quad (3)$$

где σ_p и R_p – нормальное напряжение на площадке BD и расчетное сопротивление древесины осевому растяжению, N_p и $F_{нт}$ – продольная сила в растянутом поясе фермы и площадь нетто ослабленного сечения.

При таком подходе не учитывают анизотропные свойства древесины и пренебрегают напряжениями, возникающие между соседними слоями ($\sigma_y = 0$). Влияние указанных факторов на напряженно-деформированное состояние

(НДС) опорного узла компенсируется повышением прочностных критериев древесины, так в случае проверки прочности древесины на скалывание расчет производится по среднему касательному напряжению, принимаемому постоянным по всей ширине площадки AB (рис. 1).

Проведенный детальный конечно-элементный анализ НДС опорного узла треугольной клееной металлодеревянной фермы пролетом 24 м выявил определенные недостатки традиционного подхода. НДС опорного узла исследовалось на нагрузки, полученные в результате статического расчета фермы.

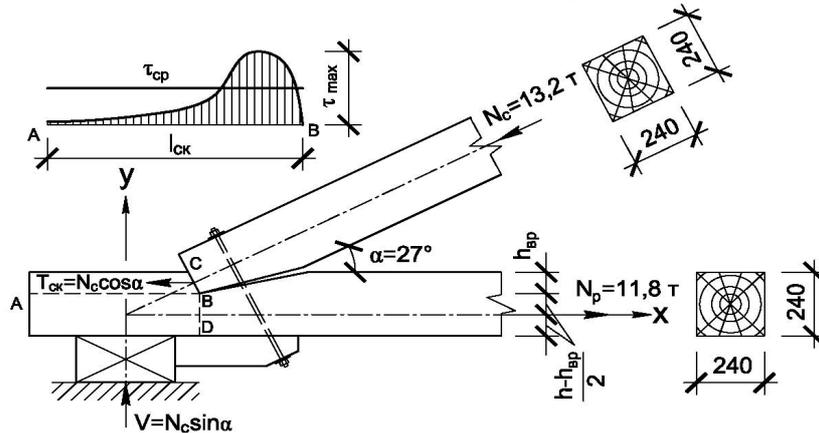


Рис. 1. Расчетная схема опорного узла фермы

В общем случае опорный узел фермы находится в сложном плосконапряженном состоянии. Элементарный элемент, выделенный из материала, пребывает в состоянии равновесия под действием нормальных напряжений σ_x, σ_y и пары касательных напряжений $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ (рис. 2).

В виду особенностей указанного напряженного состояния необходимо исследовать главные напряжения σ_1 и σ_2 , действующие на наклонных площадках. Полагая, что $\sigma_1 > \sigma_2$, тогда σ_1 будем считать главным растягивающим напряжением. В силу анизотропных свойств древесины распределение этих напряжений представляет особый интерес.

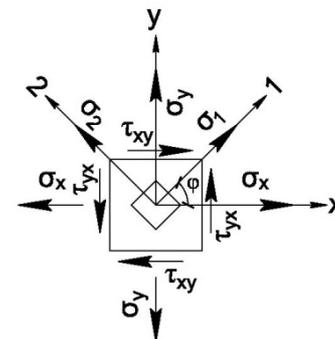


Рис. 2. Напряженное состояние элемента фермы

Для определения траектории главных растягивающих напряжений методом конечных элементов [5] был выполнен расчет опорного узла фермы (рис. 3).

При моделировании опорного узла использовались плоские КЭ мембранного типа [6], позволяющие учитывать реальные свойства материала на основе физических уравнений ортотропного упругого тела

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_1} - \nu_{12} \frac{\sigma_y}{E_2}, \quad \varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_2} - \nu_{21} \frac{\sigma_x}{E_1}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}. \quad (4)$$

Величины модулей упругости и коэффициентов Пуассона древесины во взаимно ортогональных направлениях, а также модуль сдвига принимались равными $E_1 = 10\,000$ МПа; $E_2 = 400$ МПа; $\nu_{12} = 0,02$; $\nu_{21} = 0,5$; $G = 500$ МПа.

Согласно результатам расчета в области зоны скалывания (AB) угол наклона главных растягивающих напряжений к продольной оси элемента на различных площадках составлял $25 \dots 75^\circ$.

На основании последнего утверждения можно сделать вывод, что выполнение указанных выше проверок прочности (по площадкам AB, BC и BD) является обязательным, но не всегда достаточным.

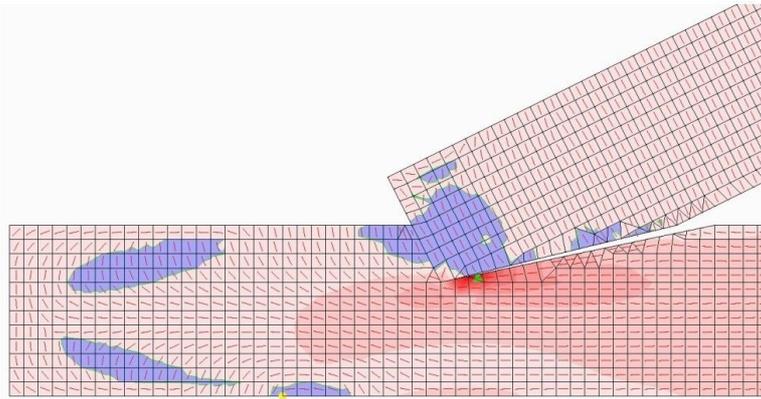


Рис. 3. Траектория главных растягивающих напряжений

Действительно, возможна такая ситуация, при которой главные растягивающие напряжения на отдельных площадках могут превзойти расчетное сопротивление древесины растяжению под углом к волокнам, т.е. будет выполняться неравенство:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} > R_{p,\alpha} \quad (5)$$

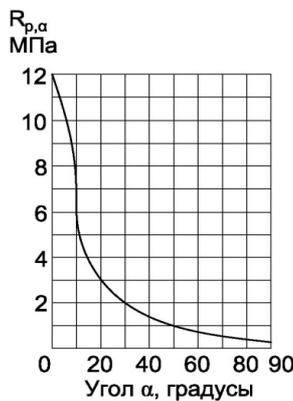


Рис. 4. К определению значений $R_{p,\alpha}$

Прочность древесины на растяжение при действии усилия под углом к волокнам является наиболее слабым видом сопротивления и нормируется только для клееной древесины [1]. В зависимости от угла α , определяющего направление действия усилия, величина $R_{p,\alpha}$ изменяется в пределах от 12 МПа при $\alpha = 0^\circ$ и до 0,3 МПа при $\alpha = 90^\circ$ (рис. 4). Таким образом, при расчете лобовой врубки пренебрежение нормальным напряжением σ_y может существенным образом исказить действительное НДС опорного узла фермы.

Как показали многочисленные исследования ЦНИИСК им. Кучеренко [2, 3, 4] и рекомендации EuroCode 5 [7], несущая способность клееных деревянных элементов, работающих на сдвиг, может быть повышена в результате установки в зоне скалывания арматурных стержней.

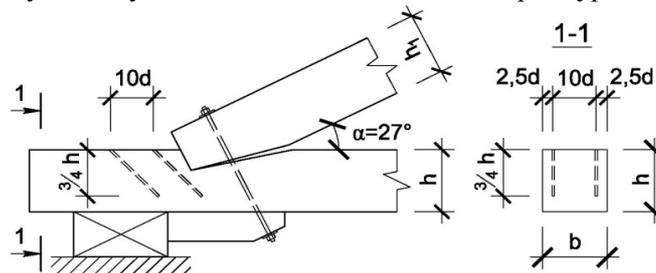


Рис. 5. Усиление опорного узла фермы клееными стержнями

Рассматривая результаты этих исследований применительно к обсуждаемой проблеме, был выполнен анализ НДС опорного узла треугольной клееной металлодеревянной фермы с клееными стержнями (рис. 5)

Для повышения несущей способности соединения в рабочее сечение опорного узла было установлено 4 арматурных стержня $\varnothing 16$ мм из арматурной стали класса А400 под углом 45° к волокнам. Такое расположение стержней в среднем соответствует траектории главных растягивающих напряжений. В резуль-

тате этого удалось добиться существенного снижения касательных напряжений τ_{xy} (рис. 6). Наибольшее касательное напряжение на площадке скалывания (AB), составлявшее $128,49 \text{ т/м}^2$ ($1,285 \text{ МПа}$), при установке арматурных стержней снизилось до величины $107,76 \text{ т/м}^2$ ($1,077 \text{ МПа}$), т.е. на $16,61\%$.

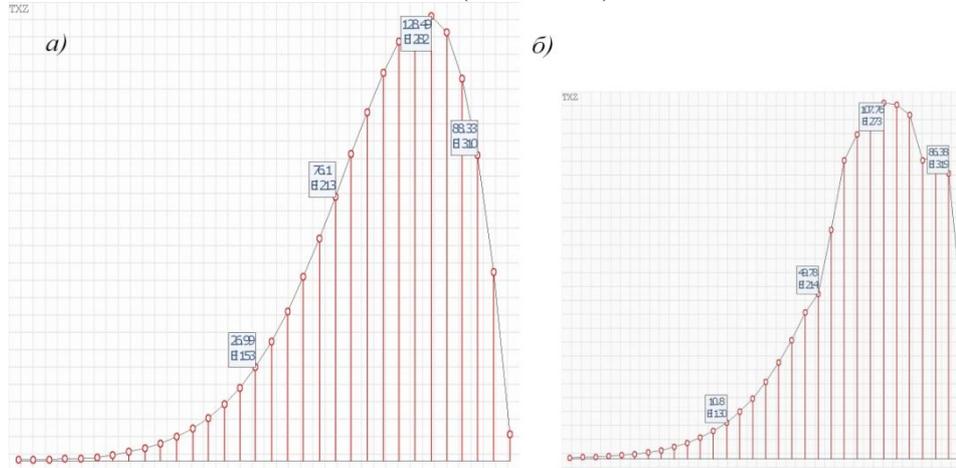


Рис. 6. Эпюры касательных напряжений τ_{xy} (т/м^2):

a – без усиления опорного узла; *б* – с вклеенными арматурными стержнями

В свою очередь в парах вклеенных стержней возникли продольные силы (рис. 7).

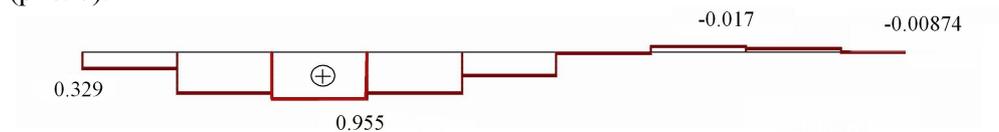


Рис. 7 Эпюры продольных сил N_a (т) в арматурных стержнях

Очевидно, что для обеспечения прочности соединения величина продольных сил в арматурных стержнях N_a не должны превышать, с одной стороны, несущую способность вклеенного стержня T_c , характеризующуюся совместными деформациями древесины и арматуры, а с другой стороны – уровнем усилий $F_a R_a$, при которых возникает текучесть стали, иными словами должны выполняться условия

$$T_c = R \pi d_1 l_p K_c K_\sigma m_d R_{p,\alpha} \cos \alpha \geq N_a, \tag{6}$$

$$T_c = R \pi d_1 l_p K_c K_\sigma m_d R_{p,\alpha} \cos \alpha \leq F_a R_a.$$

Буквенные обозначения и физический смысл поправочных коэффициентов в данных формулах приведены в п. 7.38 норм [1]. Стоит отметить, что в рассматриваемой конструкции данные условия выполняются.

Подробная компьютерная модель опорного узла треугольной фермы и детальный анализ НДС, позволили получить следующие выводы:

1. Помимо традиционного расчета по нормам [1], рекомендуется выполнять дополнительную проверку прочности опорного узла, решенного лобовой врубкой. Данная проверка сводится к выполнению условия:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \leq R_{p,\alpha}. \tag{7}$$

Как можно заметить, последнее уравнение отвечает первой теории прочности (наибольших главных напряжений), физический смысл которого заключается в том, чтобы главные растягивающие напряжения на произвольных наклонных площадках не превышали расчетного сопротивления древесины растяжению под углом к волокнам.

2. При основном (традиционном) расчете лобовых врубок согласно нормам [1], проверки прочности (по площадкам AB , BC , BD) являются обязательными, но не во всех случаях достаточными.

3. Пренебрежение в расчетах нормальными напряжениями σ_y может искажать действительное НДС опорного узла.

4. Исследование НДС особенно сильно нагруженных соединений следует проводить, используя компьютерные модели узлов и соединений, с учетом анизотропных свойств древесины на опасные сочетания нагрузок.

5. Применение клеенных наклонных стержней в зоне концентрации касательных напряжений эффективно повышает несущую способность опорного узла.

Л и т е р а т у р а

1. СП 64.13330.2011. Свод правил. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. – 87 с.

2. Турковский С.Б., Погорельцев А.А. Деревянные конструкции на основе наклонно клеенных стержней // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2008. – №6. – С. 26-28.

3. Турковский С.В., Ковальчук Л.М., Баранов Г.Р. и др. Повышение надежности деревянных конструкций поперечным армированием // Изв. вузов. Сер. «Строительство и архитектура». – 1988. – № 7. – С. 17-20.

4. Турковский С.Б., Погорельцев А.А. Деревянные конструкции с жесткими стыками в сооружениях с агрессивной средой // Промышленное и гражданское строительство. – 2001. – № 8. – С. 6-7.

5. Агапов В.П. Метод конечных элементов в статике, динамике и устойчивости конструкций. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Изд-во АСВ, 2004. – 248 с.

6. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 600 с., ил.

7. Designers' Guide to Eurocode 5: Design of Timber Buildings. EN 1995-1-1. A.J. Porteous and P. Ross. 978-0-7277-3162-3. Forthcoming: 2012. – 220 p.

References

1. SP 64.13330.2011. Svod pravil. Derevyannye konstruksii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP II-25-80. – 87 s.

2. Turkovskiy, S.B., Pogoreltsev, A.A. (2008). Derevyannye konstruksii na osnove naklonno vkleennykh stержney, *Stroitelnye Materialy, Oborudovanie, Tekhnologii XXI veka*, №6, p. 26-28.

3. Turkovskiy, S.V., Kovalchuk, L.M., Baranov, G.R. i dr. (1988). Povyshenie nadezhnosti derevyannykh konstruksiy poperechnym armirovaniem, *Izv. Vuzov. Ser. «Stroitelstvo i Arkhitektura»*, № 7.

4. Turkovskiy, S.B., Pogoreltsev, A.A. (2001). Derevyannye konstruksii s zhestkimi stykami v sooruzheniyakh s agressivnoy sredoy, *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitelstvo*, № 8, p. 6-7.

5. Agapov, V.P. (2004). *Metod Konechnykh Elementov v Statike, Dinamike i Ustoychivosti Konstruksiy*, 2-e izd., Moskva: Assotsiatsiya stroitel'nykh vuzov, 248 p.

6. Perel'muter, A.V., Slivker, V.I. (2007). *Raschetnye Modeli Sooruzheniy i Vozmozhnost' ikh Analiza*, Moscow: DMK Press, 600 s., il.

7. Designers' Guide to Eurocode 5: Design of Timber Buildings. EN 1995-1-1. A.J. Porteous and P. Ross. 978-0-7277-3162-3. Forthcoming: 2012, 220 p.

TO THE QUESTION OF STRESS STATE OF JOINTS OF WOODEN ELEMENTS WITH THE FRONTAL CUTTINGS

A.S. Markovich

Peoples' Friendship University of Russia, Moscow

The article describes the results of the computer analysis of the stress-strain state of the support junction in laminated metal-wood truss with frontal cutting. On the basis of the research, the necessity of the account of the normal stresses between layers, from which value of the main tensile stresses greatly depends, as well as the direction of areas in which they operate. Besides, effectiveness of glued inclined rods for increase shear strength of joints on frontal cuttings was investigated and confirmed.

KEY WORDS: wood construction, frontal cutting, joints on the glued rods, computer modeling, finite element method.