

9. Richards J. A., Jia X. Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction: monograph. Berlin: Springer, 2006. 438 p. doi: <http://doi.org/10.1007/3-540-29711-1>
10. Гром М. М. Лісова таксація: навч. пос. Львів: ПВБ НЛТУ, 2007. 413 с.
11. ESA Sentinel online. URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2> (Last accessed: 05.09.2018)
12. Congalton R., Green K. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices: monograph. Boca Raton: CRC Press, 2009. 200 p.

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук, професор Уль А. В.
Дата надходження рукопису 05.07.2018*

Мельник Олександр Валентинович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра геодезії, землевпорядкування та кадастру, Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025
E-mail: hockins@gmail.com

Манько Павло Володимирович, аспірант, кафедра геодезії, землевпорядкування та кадастру, Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025
E-mail: Pavlo_Manko@ukr.net

УДК 624.011

DOI: 10.15587/2313-8416.2018.143020

РОЗРАХУНКОВІ УМОВИ МІЦНОСТІ ДЕРЕВИНИ ПРИ СКЛАДНОМУ НАПРУЖЕНОМУ СТАНІ

© Д. В. Михайловський

В конструкціях з цільної та клеєної деревини, а особливо в зонах їх вузлових з'єднань наявний особливий складний напружений стан, що характеризується одночасним впливом на міцність декількох складових різних напружень. Наведені розрахункові умови міцності деревини з врахуванням складного напруженого стану, отримані з енергетичної теорії міцності. Запропоновано шляхи визначення дійсної роботи деревини з урахуванням анізотропії фізико-механічних властивостей

Ключові слова: *деревина, розрахункова умова міцності, складний напружений стан, напружено-деформований стан*

1. Вступ

Будівельні дерев'яні конструкції в багатьох країнах Європи та і всього світу давно набули широкого застосування [1, 2]. Це стосується не тільки традиційних малоповерхових будівель каркасного типу житлового та іншого призначення, а і офісних будівель, аудиторських корпусів навчальних закладів за вишки до п'яти поверхів, великопрольотних покриттів громадських і спортивних будівель різноманітного призначення.

В останній час широкого розповсюдження набувають конструкції з відносно нового будівельного матеріалу – клеєної деревини. Клеєна деревина ефективно акумулює в собі позитивні властивості деревини як конструкційного матеріалу, насамперед, відносно високу міцність і дозволяє в значній мірі нівелювати недоліки цільної деревини. Завдяки цьому в останні роки застосування конструкцій з клеєної деревини (ККД) в світовій практиці поширюється все більше.

2. Літературний огляд

В різних місцях конструкцій (особливо в криволінійних) під навантаженням та в зонах вузлових з'єднань спостерігається одночасна дія не тільки нормальних напружень вздовж волокон та дотичних

(сколюючих), а й особливо небезпечних для деревини, нормальних напружень поперек волокон (рис. 1). Через особливості будови деревини, міцність її поперек волокон значно менша. Одночасна дія різних напружень в одному перерізі елемента характеризується як складний напружений стан (СНС) матеріалу. Донедавна, врахування СНС не містилось в жодних нормативних документах по проектуванню дерев'яних конструкцій [3, 4], за виключенням [5], в якому наведено перевірку двоскатних балок з клеєної деревини за квадратичним критерієм Норриса, що враховує одночасну дію дотичних і нормальних напружень вздовж та поперек волокон.

Питанню впливу анізотропії фізико-механічних властивостей деревини на її міцність, а відповідно і несучу здатність, присвячено багато наукових робіт. В роботах [6, 7] стверджується, що анізотропія фізико-механічних властивостей не суттєво впливає на величини напружень у головних напрямках пружної симетрії. В [8] наведено огляд запропонованих раніше умов міцності деревини при СНС, і вказані певні недоліки, які призвели до того, що вони досі не набули широкого впровадження. Таким чином, питання одержання умов міцності деревини при СНС з врахуванням анізотропії фізико-механічних властивостей для

використання в інженерних розрахунках досі є актуальною і важливою науковою задачею.

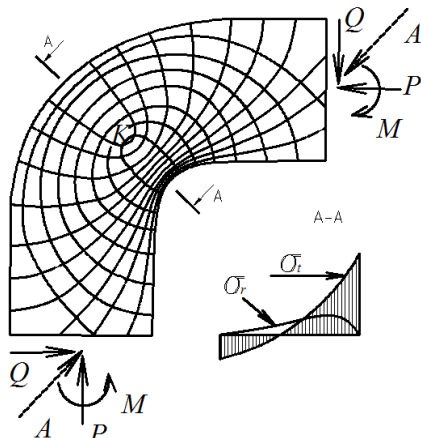


Рис. 1. Розподіл головних напружень та перерозподіл напружень в карнизному вузлі рами

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – одержання умов міцності деревини при СНС з врахуванням анізотропії фізико-механічних властивостей для використання в інженерних розрахунках.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

1. Застосуванням прийнятої для деревини енергетичної теорії міцності отримати умову міцності деревини при СНС з врахуванням анізотропії фізико-механічних властивостей в загальному вигляді.

2. З одержаної умови міцності деревини при СНС вивести розрахункові умови міцності для конкретних напружених станів деревини.

3. Обґрунтувати важливість проведення додаткових експериментальних досліджень роботи сучасних конструкцій з клеєної деревини, особливо гнучо-клеєних елементів та фактично всіх типів вузлових з'єднань дерев'яних конструкцій з позиції врахування СНС при різних комбінаціях напружень.

4. Одержання розрахункових умов міцності деревини при складному напруженому стані з врахуванням анізотропії фізико-механічних властивостей

В основі запропонованих розрахункових умов міцності деревини при СНС з врахуванням анізотропії фізико-механічних властивостей лежить прийнята для деревини четверта енергетична теорія міцності, з передумови, що деревина задовольняє загальній умові існування пружного потенціалу. Пружний потенціал відповідає потенційній енергії пружної деформації, що відноситься до одиниці об'єму тіла. Умова існування пружного потенціалу для деревини підтверджується виконанням 15 співвідношень та обмежень, що накладаються на пружні постійні. Четверта енергетична теорія міцності базується на гіпотезі, що руйнування матеріалу відбувається в точці у той момент коли енергія формозміни досягає деякого небезпечного для даного матеріалу значення.

Отримане рішення відображає енергію формозміни при об'ємному напруженому стані. Воно скла-

дне і використовувати його для розрахунків у загальному вигляді важко. В конструкціях деревина перебуває в плоскому складному напруженому стані, для якого рівняння енергії деформації форми суттєво спрощується і набуває такого вигляду:

$$V_\phi = \frac{1}{2} \left[\frac{\sigma_x^2}{E_x} (\mu_{xy} + \mu_{xz}) + \frac{\sigma_{zy}^2}{E_{zy}} (\mu_{yx} + \mu_{yz}) - \frac{\sigma_x \sigma_y}{E_x E_y} \left(2E_y \mu_{xy} + \frac{E_y}{1 - \mu_{xy} - \mu_{xz}} + \frac{E_x}{1 - \mu_{yx} - \mu_{yz}} \right) + \frac{\tau_{xy}^2}{G_{xy}} \right], \quad (1)$$

де $\sigma_x, \sigma_{zy}, \sigma_y, \tau$ – напруження вздовж волокон, поперек волокон та дотичні, відповідно; E_x, E_{zy}, E_y – модулі пружності вздовж та поперек волокон; G_{xy} – модуль зсуву; $\mu_{xy}, \mu_{xz}, \mu_{yx}, \mu_{yz}$ – відповідні коефіцієнти Пуассона.

Енергія формозміни для конкретного напруженого стану матеріалу не має перевищувати граничного значення енергії формозміни, що відповідає діючим у матеріалі напруженням, які дорівнюють характеристичним значенням міцності деревини. Враховуючи це і поділивши ліву і праву частини на граничне значення енергії формозміни, отримана умова міцності деревини при СНС в загальному вигляді:

$$\frac{\sigma_x^2}{(R_x)^2} + \frac{\sigma_{zy}^2}{(R_x)^2} \frac{E_x \mu_{yx} + \mu_{yz}}{E_y \mu_{xy} + \mu_{xz}} - \frac{\sigma_x \sigma_y}{(R_x)^2} \frac{1}{E_y \mu_{xy} + \mu_{xz}} \times \left(2E_y \mu_{xy} + \frac{E_y}{1 - \mu_{xy} - \mu_{xz}} + \frac{E_x}{1 - \mu_{yx} - \mu_{yz}} \right) + \frac{\tau_{xy}^2}{(R_x)^2} \frac{E_x}{G_{xy} \mu_{xy} + \mu_{xz}} \leq 1. \quad (2)$$

Замінивши напруження $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ відповідно на розрахункові напруження в елементі можна записати умову міцності в наступному вигляді

$$\frac{\sigma^2}{(R)^2} + \frac{\sigma_{90}^2}{(R)^2} A_1 - \frac{\sigma \sigma_{90}}{(R)^2} C_1 + \frac{\tau^2}{(R)^2} B_1 \leq 1, \quad (3)$$

де A_1, B_1, C_1 – параметричні коефіцієнти, що залежать від пружних постійних деревини:

$$A_1 = \frac{E_x \mu_{yx} + \mu_{yz}}{E_y \mu_{xy} + \mu_{xz}};$$

$$C_1 = \frac{1}{E_y} \frac{1}{\mu_{xy} + \mu_{xz}} \left(2E_x \mu_{xy} + \frac{E_x}{1 - \mu_{xy} - \mu_{xz}} + \frac{E_y}{1 - \mu_{yx} - \mu_{yz}} \right);$$

$$B_1 = \frac{E_x}{G_{xy} \mu_{xy} + \mu_{xz}}.$$

Замінивши в (3) тимчасові опори деревини на тимчасові опори відповідному виду роботи: тимчасовий опір поперек волокон $R=n_1R_{90}$; тимчасовий опір сколюванню $R=n_2R_v$; одержимо більш характерний для умов міцності запис

$$\frac{\sigma^2}{(R)^2} + \frac{\sigma_{90}^2}{(R_{90})^2} A - \frac{\sigma \sigma_{90}}{R R_{90}} C + \frac{\tau^2}{(R_v)^2} B \leq 1, \quad (4)$$

де A , B , C – параметричні коефіцієнти, які залежать не тільки від пружних постійних деревини, але й від співвідношення тимчасових опорів різним видам роботи

$$A = \frac{1}{n_1^2} \frac{E_x \mu_{yx} + \mu_{yz}}{E_y \mu_{xy} + \mu_{xz}};$$

$$C = \frac{1}{n_1} \frac{1}{E_y \mu_{xy} + \mu_{xz}} \times \left(2E_x \mu_{xy} + \frac{E_x}{1 - \mu_{xy} - \mu_{xz}} + \frac{E_y}{1 - \mu_{yx} - \mu_{yz}} \right);$$

$$B = \frac{1}{n_2^2} \frac{E_x}{G_{xy}} \frac{1}{\mu_{xy} + \mu_{xz}}. \quad (5)$$

5. Результати дослідження

Підставляючи відповідні значення розрахункових опорів та пружних постійних для кожного виду роботи деревини отримаємо умови міцності для різних комбінацій напруженого стану в позначеннях ДБН В.2.6-161:2017:

– (I) при дії нормальних напружень від згину (σ_m), сколюючих (τ) та напружень розтягу поперек волокон ($\sigma_{t,90}$):

$$\frac{\sigma_m^2}{(f_{m,k})^2} + \frac{\sigma_{t,90}^2}{(f_{t,90,k})^2} A_{m,t} - \frac{\sigma_m \sigma_{t,90}}{f_{m,k} f_{t,90,k}} C_{m,t} + \frac{\tau^2}{(f_{v,0,k})^2} B_{m,t} \leq 1; \quad (6)$$

– (II) при дії нормальних напружень від згину (σ_m), сколюючих (τ) та напружень стиску поперек волокон ($\sigma_{c,90}$):

$$\frac{\sigma_m^2}{(f_{m,k})^2} + \frac{\sigma_{c,90}^2}{(f_{c,90,k})^2} A_{m,c} - \frac{\sigma_m \sigma_{c,90}}{f_{m,k} f_{c,90,k}} C_{m,c} + \frac{\tau^2}{(f_{v,0,k})^2} B_{m,c} \leq 1; \quad (7)$$

– (III) при дії нормальних напружень від стиску (σ_c), сколюючих (τ) та напружень розтягу поперек волокон ($\sigma_{t,90}$):

$$\frac{\sigma_c^2}{(f_{c,0,k})^2} + \frac{\sigma_{t,90}^2}{(f_{t,90,k})^2} A_{c,t} - \frac{\sigma_c \sigma_{t,90}}{f_{c,0,k} f_{t,90,k}} C_{c,t} + \frac{\tau^2}{(f_{v,0,k})^2} B_{c,t} \leq 1; \quad (8)$$

– (IV) при дії нормальних напружень від стиску (σ_c), сколюючих (τ) та напружень стиску поперек волокон ($\sigma_{c,90}$):

$$\frac{\sigma_c^2}{(f_{c,0,k})^2} + \frac{\sigma_{c,90}^2}{(f_{c,90,k})^2} A_{c,c} - \frac{\sigma_c \sigma_{c,90}}{f_{c,0,k} f_{c,90,k}} C_{c,c} + \frac{\tau^2}{(f_{v,0,k})^2} B_{c,c} \leq 1; \quad (9)$$

– (V) при дії нормальних напружень від розтягу (σ_t), сколюючих (τ) та напружень розтягу поперек волокон ($\sigma_{t,90}$):

$$\frac{\sigma_t^2}{(f_{t,0,k})^2} + \frac{\sigma_{t,90}^2}{(f_{t,90,k})^2} A_{t,t} - \frac{\sigma_t \sigma_{t,90}}{f_{t,0,k} f_{t,90,k}} C_{t,t} + \frac{\tau^2}{(f_{v,0,k})^2} B_{t,t} \leq 1; \quad (10)$$

– (VI) при дії нормальних напружень від розтягу (σ_t), сколюючих (τ) та напружень стиску поперек волокон ($\sigma_{c,90}$):

$$\frac{\sigma_t^2}{(f_{t,0,k})^2} + \frac{\sigma_{c,90}^2}{(f_{c,90,k})^2} A_{t,c} - \frac{\sigma_t \sigma_{c,90}}{f_{t,0,k} f_{c,90,k}} C_{t,c} + \frac{\tau^2}{(f_{v,0,k})^2} B_{t,c} \leq 1, \quad (11)$$

де $A_{m,t}$, $C_{m,t}$, $B_{m,t}$, $A_{m,c}$, $C_{m,c}$, $B_{m,c}$, $A_{c,t}$, $C_{c,t}$, $B_{c,t}$, $A_{c,c}$, $C_{c,c}$, $B_{c,c}$, $A_{t,t}$, $C_{t,t}$, $B_{t,t}$, $A_{t,c}$, $C_{t,c}$, $B_{t,c}$ – параметричні коефіцієнти, що залежать від рівня початкових напружень та пружних властивостей деревини.

Наведені в нормах проектування, довідковій і навчально-методичній літературі пружні характеристики деревини мають ряд суттєвих недоліків для застосування в запропонованих розрахункових умовах міцності. Пружні характеристики визначались дослідним шляхом для суцільної деревини малих зразків, а наведені в нормах проектування значення стосуються лише діапазону пружної роботи деревини. При руйнуванні, в деревині спостерігаються напруження вищі за межу пружності, а отже і пружні характеристики змінюються. Це добре відомо з теорії стійкості стиснутих та стиснуто-зігнутих стержнів, в якій для роботи матеріалу в закритичній області рекомендується приймати дотичний модуль пружності. Так само і коефіцієнти Пуассона в закритичній

стадії для деревини суттєво змінюються від загальноприйнятих.

Врахування СНС в сучасних конструкціях з клеєної деревини, особливо для гнукклеєних елементів [9] та фактично всіх типів вузлових з'єднань, навіть елементарних балок [10], має стати обов'язковим.

Для визначення реальних значень параметричних коефіцієнтів необхідно провести велику кількість випробувань натурних конструкцій та додаткові дослідження. Також окремих досліджень потребують самі конструкції з клеєної деревини, особливо гнукклеєні та зони вузлових з'єднань, з метою визначення небезпечного з позиції складного напруженого стану місця.

6. Висновки

1. За допомогою прийнятої для деревини енергетичної теорії міцності отримано умову міцності деревини при СНС з врахуванням анізотропії фізико-механічних властивостей.

2. Виведені розрахункові умови міцності деревини при СНС з врахуванням анізотропії фізико-механічних властивостей для конкретних напружених станів.

3. Обґрунтована важливість проведення додаткових експериментальних досліджень роботи сучасних конструкцій з клеєної деревини, особливо гнукклеєних елементів та фактично всіх типів вузлових з'єднань дерев'яних конструкцій з позиції врахування СНС при різних комбінаціях напружень.

Література

1. Кліменко В. З. Ефективний конструкційний матеріал – клеєна деревина // Будівництво України. 2009. № 9-10. С. 16–20.
2. Михайловський Д.В. Застосування деревини та деревинних матеріалів у будівництві // Оборудование и инструмент для профессионалов (деревообработка). 2017. № 4 (199). С. 40–44.
3. ДБН В.2.6-161:2017 Конструкції будівель і споруд. Дерев'яні конструкції. Основні положення. Київ: Мінрегіонбуд, 2017. 111 с.
4. EN 1995-1-1 Eurocode 5: Design of timber structures Part 1-1: General Common rules and rules for buildings. 2008. 76 p.
5. Справочное руководство по древесине / ред. Горшин С. Н. Москва: Лесная промышленность, 1979. 544 с.
6. Серов Е. Н., Мелешко Л., Орлович Р. Прочность деревянных конструкций в сложном напряженном состоянии: мат. междунар. науч. конф. // Дерево и древесные материалы в строительных конструкциях. Щецын, 1999. С. 83–89.
7. Ашкенази Е. К. Анизотропия древесины и древесных материалов. Москва: Лесная промышленность, 1978. 224 с.
8. Михайловський Д. В. Врахування складного напруженого стану в конструкціях з клеєної деревини: зб. наук. пр. // Ресурсоєкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Рівне: НУВГП, 2013. № 27. С. 150–160.
9. Михайловський Д. В., Матющенко Д. М. Напружений стан гнукклеєних рам з врахуванням анізотропії фізико-механічних властивостей клеєної деревини: сб. науч. тр. // Строительство, материаловедение, машиностроение. Днепропетровск: ПГАСА, 2015. № 81. С. 124–129.
10. Найчук А. Я. О некоторых направлениях совершенствования и развития деревянных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 7. С. 65–68.

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук Першаков В. М.
Дата надходження рукопису 17.07.2018*

Михайловський Денис Віталійович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра металевих та дерев'яних конструкцій, Київський національний університет будівництва і архітектури, пр. Повітрофлотський, 31, м. Київ, Україна, 03037
E-mail: demyh@mail.ua