

УДК 624.011.14

ПЕРЕХРЕСНО КЛЕЄДОЩАТІ ПАНЕЛІ ТА МЕТОДИ ЇХ РОЗРАХУНКУ

CROSS LAMINATED TIMBER AND METHODS FOR CALCULATING THEM

ПЕРЕКРКСТНО – СКЛЕЕННАЯ ДРЕВЕСИНА И МЕТОДЫ ИХ РАСЧЕТА

Михайловський Д.В., к.т.н., доцент, Комар А.А., (Київський національний університет будівництва і архітектури, м Київ)

Mykhailovskyi D.V., Komar A.A., (Kyiv National University of Construction and Architecture, s. Kiev)

Михайловський Д.В., к.т.н., доцент, Комар А.А., (Київський національний університет будівництва і архітектури, м Київ)

Розглянуто методики розрахунку CLT панелей за нормами: США – Handbook, європейською практикою Eurocode 5 та чисельно аналітичного моделювання в ПК Ліра та проведено їх аналіз.

Рассмотрены методики расчета CLT панелей по нормам США – Handbook, европейской практикой Eurocode 5 и численно аналитического моделирования в ПК Лира и проведения их анализа.

Consider the methods of calculating CLT panels according to the norms: USA - Handbook, European practice Eurocode 5 and numerically analytical modeling in PC Lira and their analysis

Ключові слова:

Розрахунок CLT, чисельне моделювання CLT.

CLT designer, numerical simulation CLT

Расчет CLT, численное моделирование CLT.

Стан питання та мета досліджень: На сьогоднішній день напружено – деформований стан перехресно клеєдощатих панелей залишається маловивченим як в Україні так і у всьому світі.

Для розрахунку CLT панелей [1] передбачено два способи:

1. γ - метод;

2. Метод аналогії зсуву.

γ - метод, описаний в додатку В [1] і використовується для розрахунку простих механічно з'єднаних балок. Використовуючи коефіцієнти γ ефективну згинальну жорсткість $(E \cdot I)_{ef}$ можна розрахувати для механічно з'єднаних балок (складена балка з'єднана за допомогою шпонок або болтів) від трьох окремих шарів через рівняння 1.

$$(E \cdot I)_{ef} = \sum_{i=1}^3 \left(\underbrace{E_i \cdot I_i}_A + \underbrace{\gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i^2}_B \right) \quad (1)$$

Спільні коефіцієнти ефективності γ_i враховують зсувні деформації в напівжорсткому з'єднанні двох окремих компонентів (рис.1, б). При $\gamma = 0$ частина б у формулі 1 перетворюється в нуль. В цьому випадку загальна ефективна жорсткість враховує тільки жорсткість на згин окремих складових (рис. 1, в). Коли $\gamma = 1$ жорсткість згину відповідає клейовому з'єднанню або суцільному поперечному перерізу.(рис. 1, а).

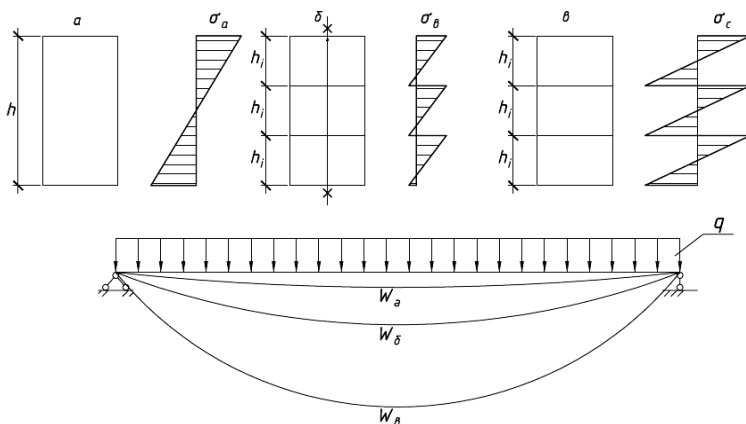


Рис. 1 Порівняння прогину і нормальних напружень цілого поперечного перерізу (а), поперечного перерізу, складеного із трьох окремих елементів з'єднаних за допомогою напівжорсткого з'єднання (б), поперечний переріз, складене за допомогою трьох вільно накладених елементів (в).

Відповідно в [1] коефіцієнти γ для окремих компонентів п'ятишарової панелі (рис. 2) $i = 1$ та $i = 5$ розраховуються наступним чином:

$$\gamma_{1(5)} = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_0 \cdot t_{1(5)} \cdot t_{2(4)}}{L_{ef}^2 \cdot G_R}} \quad (2)$$

де G_R - модуль зсуву окремих складових; L_{ef} - розрахунковий прольот панелі; $L_{ef} = 2L$ для шарнірного обпирання балки, $L_{ef} = L$ для консольної балки.

Для середнього шару $\gamma_3 = 1$.

У поперечних шарах $\gamma_{2,4} = 0$, враховується тільки згин окремих складових.

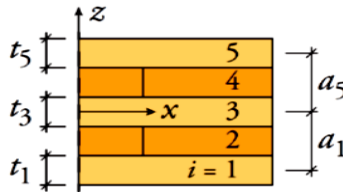


Рис. 2 Поперечний переріз п'ятишарової панелі.

Даний метод є дуже обмежений у використанні і забезпечує точне рішення диференційного рівняння лише для шарнірно обпертої панелі із рівномірно розподіленим навантаженням. Також γ -метод не враховує зсувні деформації окремих шарів і відповідно точне рішення можна отримати для балок із прольотами настільки великим, що зсувні деформації стають мізерними. Проте даний метод є досить точний для співвідношення I_{ef} / I_{net} яке наближається до одиниці (рис. 3).

$$I_{ef} = (I_i + \gamma_i \cdot A_i \cdot a_i^2) \quad (3)$$

$$I_{net} = (I_i + A_i \cdot a_i^2) \quad (4)$$

Розрахунок за методом аналогії зсуву включено до національного додатку до EC5 Великої Британії [1].

Концепція розрахунку полягає у перетворенні реальної складеної балки, включаючої в себе декілька механічно – з'єднаних елементів в єдиний фіктивний гомогенізований елемент (див. рис. 4).

Фіктивний елемент А відповідає за згинальну жорсткість усіх з'єднаних елементів вздовж окремої нейтральної осі реальних елементів.

Фіктивний елемент В враховує частини Штейнера ($E_i \cdot A_i \cdot a_i^2$) згинаючої жорсткості реальних елементів, а також жорсткість зсуву S_B .

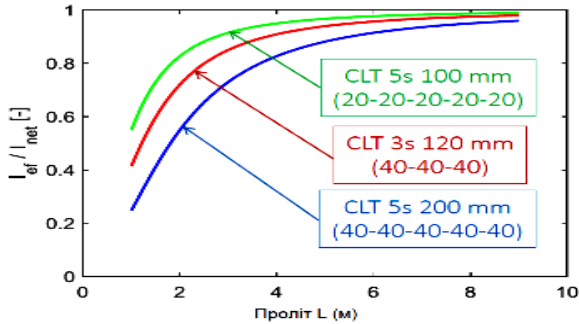


Рис. 3 Графік порівняння CLT панелей в залежності від прольоту L та співвідношення I_{ef} / I_{net}

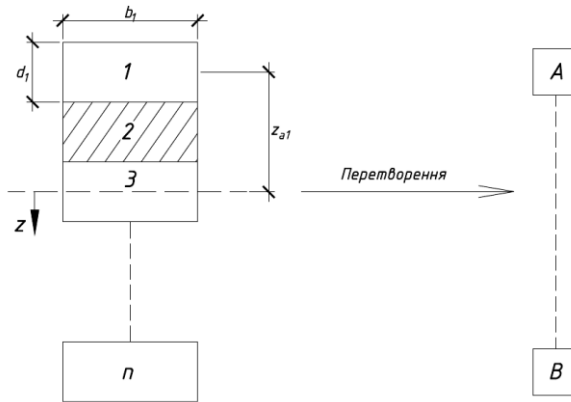


Рис. 4 Перетворення складеного перерізу у фіктивний елемент.

S_B включає в себе зсувні деформації окремих елементів, визначається за формулою (6).

$$(EI)_{ef} = (EI)_A + (EI)_B = \underbrace{\sum_{i=1}^n E_i \cdot \frac{b_i \cdot h_i^3}{12}}_{\text{елемент A}} + \underbrace{\sum_{i=1}^n E_i \cdot A_i \cdot z_i^2}_{\text{елемент B}} \quad (5)$$

в якій: $(GA)_A = S_A = \infty$ - частина із нескінченною осью жорсткістю;
 $(GA)_B = S_B$ - жорсткість зсуву компоненту B.

$$(GA)_B = \frac{a^2}{\left[\left(\frac{h_1}{2 \cdot G_1 \cdot b} \right) + \left(\sum_{i=2}^{n-1} \frac{h_i}{G_i \cdot b_i} \right) + \left(\frac{h_n}{2 \cdot G_n \cdot b} \right) \right]} \quad (6)$$

$$\frac{1}{S_B} = \frac{1}{a^2} \cdot \left[\left(\frac{h_1}{2G_1 \cdot b_1} \right) + \left(\sum_{i=2}^{n-1} \frac{h_i}{G_i \cdot b_i} \right) + \left(\frac{h_n}{2G_n \cdot b_n} \right) \right] \quad (7)$$

Даний метод підходить для розрахунку будь – яких складених елементів під будь – якою конфігурацією навантаження. Ефективна жорсткість не залежить від прольоту та умов закріплення. Враховуються деформації зсуву та згинальна жорсткість поперечного шару.

Для порівняння методів розрахунку було проведено чисельне дослідження панелі з наступними параметрами:

геометричний розмір панелі:

- L=6м. (прольот панелі);
- В=1,2м. (ширина панелі);
- Н=0,04х5=0,2м. (товщина панелі).

Клас міцності деревини складових елементів С24.

Навантаження: вага підлоги – 150кг/м.кв.; вага плити перекриття – 70кг/м.кв.; короточасне – 150кг/м.кв.; довготривале 100кг/м.кв.

Розрахунок проводився згідно [1] та [2].

Крім того виконано чисельне дослідження напружено – деформованого стану CLT панелі за допомогою методу скінчених елементів в програмному комплексі Лира Сапр 2013.

Таблиця 1

Моделювання ортотропних властивостей деревини

| Для поздовжнього шару | | |
|-----------------------|-------------|-------------|
| E_1 (МПа) | E_2 (МПа) | E_3 (МПа) |
| 370 | 11600 | 370 |
| ν_{12} | ν_{21} | ν_{13} |
| 0,0134 | 0,42 | 0,0134 |
| ν_{31} | ν_{23} | ν_{32} |
| 0,0134 | 0,42 | 0,0134 |
| Для поперечного шару | | |
| E_1 (МПа) | E_2 (МПа) | E_3 (МПа) |
| 11600 | 370 | 370 |
| ν_{12} | ν_{21} | ν_{13} |
| 0,42 | 0,0134 | 0,42 |
| ν_{31} | ν_{23} | ν_{32} |
| 0,0134 | 0,0134 | 0,0134 |

Для моделювання використана прийняте для деревини припущення про наявність пружного потенціалу(8):

$$\frac{E_1}{\nu_{12}} = \frac{E_1}{\nu_{13}} = \frac{E_2}{\nu_{21}} = \frac{E_2}{\nu_{23}} = \frac{E_3}{\nu_{31}} = \frac{E_3}{\nu_{32}} \quad (8)$$

Кожний елемент CLT моделювався об'ємними СЕ№11 із врахуванням ортотропних властивостей деревини.

У результаті розрахунку було отримано переміщення по осі Z:

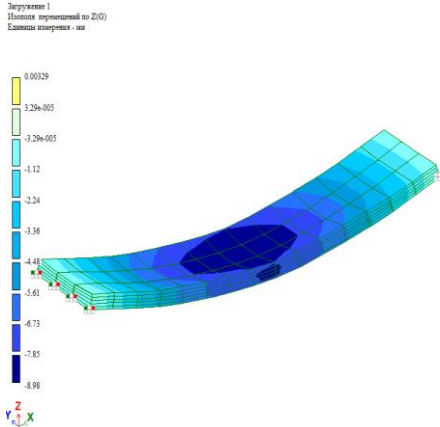


Рис. 5 Переміщення по осі Z від постійного та довготривалого навантаження.

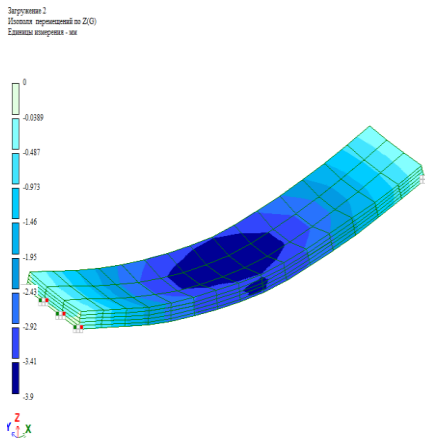


Рис. 6 Переміщення по осі Z від короточасного навантаження

Прогини визначені за формулами:

$$w_{fin} = w_{inst} + w_{creep}$$

$$w_{creep} = k_{def} \cdot w_{inst}$$

$$w_{inst} = w_{g.k} + \psi_2 \cdot w_{k.k}$$

За допомогою моделювання також було отримано еквівалентні напруження розтягу та стиску об'ємних СЕ.

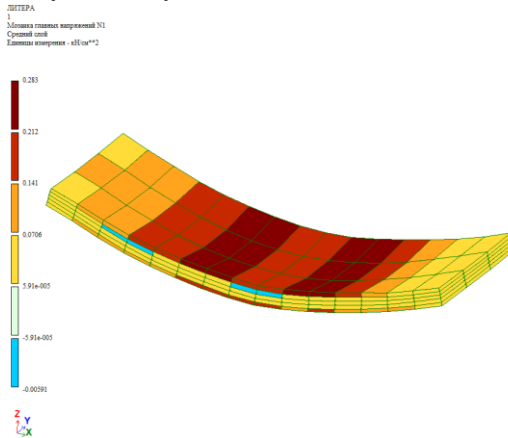


Рис. 7 Мозаїка головних напружень σ_1

Для визначення головних напружень була застосована енергетична теорія міцності (Губер – Хенки – Мизес)

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq [\sigma]$$

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(0,283 - 0,00232)^2 + (0,0023 - 0,147)^2 + (-0,147 - 0,283)^2]} =$$

$$= 0,3782 \frac{\kappa H}{\text{см}^2} \leq \frac{2,4 \frac{\kappa H}{\text{см}^2} \cdot 0,6}{1,25} = 1,152 \frac{\kappa H}{\text{см}^2}$$

Таблиця 2

| Аналіз результатів | | | | |
|--------------------|----------------------------------|-----------------|----------------------|--------------------------------|
| № | Розрахункова характеристика | γ -метод | Метод аналогії зсуву | Моделювання в ПК Лира Спр 2013 |
| 1 | W_{ef} (см ³) | 6332(0,9) | 6390,9 | - |
| 2 | $(EI)_{ef}$ (кНм ²) | 6694,07(9,7) | 7413,45 | - |
| 3 | w_{fin} (мм) | 16,57(0,9) | 16,425 | 18,27(10) |
| 4 | M_y (кНсм) | 2115 | 2115 | - |
| 5 | σ_y (кН/см ²) | 0,3340(0,9) | 0,331 | 0,3782(12,48) |

Значення в дужках відображають різницю значень у порівнянні з методом аналогії зсуву який вважається найбільш точним для панелей CLT і був прийнятий стандартом продукту [3] (різниця записана у відсотках).

Висновки:

1. γ -метод та метод аналогії зсуву розроблені для розрахунку механічно – з'єднаних складених балок (на шпонках, болтах тощо), і для розрахунку перехресно клеєдощатих панелей можуть застосовуватися з певними припущеннями. Розрахунок можна проводити тільки ототожуючи напівжорстке з'єднання із поперечними шарами CLT панелей.

2. В [2] питання розрахунку CLT не висвітленні, а отже потребують дослідження з наступним нормуванням.

3. Якщо використовувати вітчизняні програмні комплекси із використанням методу СЕ можна отримати результати які знаходяться в межах 15% від методу аналогії зсуву. Але нажаль у вітчизняній практиці не розроблено програм для чисельного конструювання перехресно клеєдощатих панелей а ті способи які є передбачають певні складнощі (моделювання ортотропії, використання теорій міцності та ін.).

1. EN 1995-1-2 (2004): Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire design [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC] – English 2004 – 124 p.; 2. ДБН В.2.6-161:2017 «Дерев'яні конструкції. Основні положення.» / керівник розробки Фурсов В.В., відповідальний виконавець: Михайловський Д.В., Найчук А.Я. та інші // - Київ, «Укрархбудінформ» 2017 – 111с. 3. ANSI/APA PRG 320-2012 «Standard for Performance – Rated Cross – Laminated Timber» - Tacoma, WA 98466 October 30, 2012, 29 p. 4. TIMBER ENGINEERING PRINCIPLES FOR DESIGN, /H.J.Blab, C. Sandhaas.// English, «KIT Scientific Publishing» 2017 – 658 p.