

УДК 624.011

doi:10.31650/2707-3068-2025-29-93-102

## МОДУЛЬ ПРУЖНОСТІ І ДОСТОВІРНІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕОРЕТИЧНОЇ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ЗГИНАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ З ДЕРЕВИНИ ЗА ДЕФОРМАЦІЙНОЮ МЕТОДИКОЮ

Гомон С.С., д.т.н., проф.,  
s.s.homon@nuwm.edu.ua; ORCID: 0000-0003-2080-5650

Гомон Св.Св., д.т.н., проф.,  
homonsviatoslav@ukr.net; ORCID: 0000-0001-9818-1804

Рябченко Н.В., аспірант,  
n.v.ryabchenyuk@nuwm.edu.ua; ORCID: 0009-0004-1988-8801

Лук'яненко О.А., аспірант,  
o.a.lukjyanenko@nuwm.edu.ua; ORCID: 0009-0004-6383-2733

Поліщук М.В., д-р філос.,  
m.v.polishchuk@nuwm.edu.ua; ORCID: 0000-0003-1981-8008

*Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне*

**Анотація:** Проаналізовано сучасний стан експериментально-теоретичних досліджень в наявних літературних джерел за даною проблематикою. Встановлено основні проблеми з даних досліджень. Проаналізовано сучасні методики з визначення початкового модуля пружності цільної деревини. В статті наведено результати експериментально-теоретичних досліджень вибору значень початкового модуля пружності цільної деревини на визначення теоретичної несучої здатності згинальних неармованих та армованих елементів з клеєної деревини. Мета роботи – це особливості визначення модуля пружності деревини і достовірність визначення теоретичної несучої здатності згинальних елементів з деревини за деформаційною методикою. Встановлено, що найбільш близькими результатами є результати розрахунку теоретичної несучої здатності згинальних елементів з клеєної деревини до експериментальних з використанням деформаційної моделі, в якому використовується початковий модуль пружності встановлений на базі цільної деревини з якої виготовлена конструкція. Деформаційна модель розрахунку згинальних елементів з клеєної деревини передбачає використання визначених нормальних напружень на базі деформацій, що виникли в нормальному перерізі згинального елемента під зовнішнім навантаженням. Напруження в розрахунковому нормальному поперечному перерізі описуємо різними функціями на трьох різних ділянках висоти перерізу. Перша ділянка - ділянка розтягу, починається від низу елемента до нейтральної лінії описується лінійною функцією; друга ділянка – ділянка стиску, від нейтральної лінії до максимального значення напружень стиску описується нелінійною функцією; третя ділянка – це також ділянка стиску, від кінця другої ділянки до верху згинального елемента описується нелінійною функцією з врахуванням появи складки. Подано аспекти подальших досліджень.

**Ключові слова:** дерево, згинальний елемент, деформаційна модель, модуль пружності, несуча здатність.

**Постановка проблеми.** Завдяки своїй красі, простоті в обробці, монтажі та міцності деревина давно надихає на все більше її використання в простих та складних дерев'яних конструкціях. А застосування в будівництві клеєної деревини і використання подвійного пасивного армування ще сильніше збільшує надійність конструкцій і дозволяє звести до мінімуму вплив природних вад та недоліків матеріалу. Найчастіше в будівництві використовують деревину у якості згинальних елементів. Але такі конструкції потребують досконалого розрахунку.

**Аналіз останніх джерел досліджень та публікацій.** Нині за діючими нормами [1-2] теоретичний розрахунок несучої здатності за нормальними перерізами елементів з армованої

та неармованої деревини [3] проводиться за силовою методикою з використанням геометричної характеристики - момент опору розрахункового поперечного перерізу  $W$ . Але за рахунок анізотропії деревини, а саме того, що міцність деревини на розтяг майже в два рази перевищує міцність деревини на стиск вздовж волокон, а також і за того, що при однакових деформаціях різних шарів деревини напруження розтягу та стиску є різними, то силова нейтральна лінія не співпадає з центром ваги поперечного перерізу. Проте визначення моменту опору поперечного перерізу елемента з деревини  $W$  саме і прив'язане до встановленого центра ваги і базується на ньому. Якщо силова лінія не співпадає з центром ваги, то геометричні характеристики момент опору  $W$  та момент інерції  $I$  для такого напружено-деформованого стану поперечного перерізу не можна використовувати в розрахунках, бо вони невірно враховують розподіл поперечного перерізу на розтягнуту і стиснуту зони. Якщо на цей факт не звертати увагу і ми все ж таки використаємо в розрахунках  $W$  особливо для граничних умов, то отримаємо завідомо недостовірні значення. Отже, необхідно шукати інші шляхи для вирішення даної проблеми.

Рішенням цієї задачі, на наш погляд, є використання деформаційної моделі розрахунку згинальних елементів з неармованої та армованої цільної та клеєної деревини [4-9]. А деформаційна модель розрахунку згинальних елементів з неармованої та армованої деревини передбачає крім силових та геометричних параметрів ще використання деформаційних показників матеріалів таких, як критичні і граничні значення відносних деформацій та початкового модуля пружності. І ці перераховані параметри по ходу удосконалення використання деформаційної методики потребують уточнення.

**Постановка цілей і завдань досліджень.** Мета роботи – це особливості визначення модуля пружності деревини і достовірність визначення теоретичної несучої здатності згинальних елементів з деревини за деформаційною методикою.

**Виклад основного матеріалу.** Зупинимось на початковому модулі пружності деревини. Як показує практика, початковий модуль пружності може бути визначений різними способами і має суттєві розбіжності в своїх показниках.

Деформаційна модель розрахунку згинальних елементів з деревини передбачає використання визначених нормальних напружень на базі деформацій, що виникли в нормальному перерізі згинального елемента під зовнішнім навантаженням. Напруження в розрахунковому нормальному поперечному перерізі описуємо різними функціями на трьох різних ділянках висоти перерізу. Перша ділянка - ділянка розтягу, починається від низу елемента до нейтральної лінії; друга ділянка – ділянка стиску, від нейтральної лінії до максимального значення напружень стиску; третя ділянка – це також ділянка стиску, від кінця другої ділянки до верху згинального елемента.

Епюру  $\sigma$  в залежності від  $u$  для нормального перерізу дерев'яного згинального елемента виразимо двома функціями на різних ділянках:

- перша функція є прямолінійною та описує напруження в розтягнутій зоні дерев'яного елемента і діє в межах від 0 до  $u_t$

$$\sigma_{t,d} = f_1(u) = E_{0,05} \cdot u_{t,d}, \quad (1)$$

де  $E_{0,05}$  - модуль пружності деревини за дії розтягу;  $u_{t,d}$  - відносні деформації за дії розтягу деревини;

- друга функція описує напруження, що виникають в двох ділянках стиснутої зони дерев'яного елемента в межах від 0 до  $u_c$

$$\sigma_{c,d} = f_2(u) = k_1 u_{c,d} + k_c u_{c,d}^2. \quad (2)$$

Розрахунок згинальних елементів за використання деформаційної моделі як бачимо передбачає використання модуля пружності деревини. Але як видно з даних наведених в роботах [10-16], початкові модулі пружності для цільної та клеєної деревини одного і того ж класу міцності однієї і тієї ж породи дуже різняться від  $E=11801$  МПа до  $E=23140$  МПа (табл. 1).

Таблиця 1 - Основні параметри кореляційних рівнянь залежності « $E' - \eta$ » та їх статистики

| Назва зразка | Кореляційні рівняння                       | $r$   | $m_r$ | $r / m_r$ | $V, \%$ |
|--------------|--------------------------------------------|-------|-------|-----------|---------|
| ПЦ-1         | $E' = 12,858 \cdot (1 - 0,056 \cdot \eta)$ | 0,959 | 0,024 | 40        | 1,13    |
| ПЦ-2         | $E' = 15,446 \cdot (1 - 0,133 \cdot \eta)$ | 0,840 | 0,089 | 9         | 4,75    |
| ПЦ-3         | $E' = 15,024 \cdot (1 - 0,107 \cdot \eta)$ | 0,984 | 0,009 | 104       | 1,12    |
| ПЦ-4         | $E' = 15,467 \cdot (1 - 0,060 \cdot \eta)$ | 0,977 | 0,014 | 71        | 0,71    |
| ПЦ-5         | $E' = 14,121 \cdot (1 - 0,068 \cdot \eta)$ | 0,998 | 0,001 | 734       | 0,27    |
| ПЦ-6         | $E' = 12,702 \cdot (1 - 0,070 \cdot \eta)$ | 0,994 | 0,004 | 283       | 0,53    |
| ПЦ-7         | $E' = 11,801 \cdot (1 - 0,030 \cdot \eta)$ | 0,725 | 0,143 | 5         | 1,93    |
| ПК-1         | $E' = 19,563 \cdot (1 - 0,087 \cdot \eta)$ | 0,902 | 0,056 | 16        | 3,67    |
| ПК-2         | $E' = 15,848 \cdot (1 - 0,055 \cdot \eta)$ | 0,930 | 0,041 | 23        | 2,42    |
| ПК-3         | $E' = 17,543 \cdot (1 - 0,053 \cdot \eta)$ | 0,861 | 0,078 | 11        | 2,94    |
| ПК-4         | $E' = 23,140 \cdot (1 - 0,102 \cdot \eta)$ | 0,894 | 0,061 | 15        | 3,74    |
| ПК-5         | $E' = 15,716 \cdot (1 - 0,032 \cdot \eta)$ | 0,743 | 0,135 | 5,5       | 0,78    |

Зі значень, приведених в табл.1, встановлено:

- середнє значення для клеєної деревини –  $E = 18360 \text{ МПа}$  (прийнято  $18000 \text{ МПа}$ );
- найменше значення для клеєної деревини –  $E = 15710 \text{ МПа}$  (прийнято  $15500 \text{ МПа}$ );
- середнє значення для цільної деревини –  $E = 14400 \text{ МПа}$  (прийнято  $14500 \text{ МПа}$ ).

**Результати та обговорення.** Проведено розрахунок несучої теоретичної здатності за деформаційною методикою для трьох видів балок з клеєної деревини, як неармованих БК (балка клеєна), так і комбіновано армованих балок марок БКА-12 (армована в стиснутій зоні  $2\text{Ø}12 \text{ A500C} + \text{Sika CarboDur S-512}$  в розтягнутій зоні) та БКА-16 (армована в стиснутій зоні  $2\text{Ø}16 \text{ A500C} + \text{Sika CarboDur S-512}$  в розтягнутій зоні). Для порівняння обрахунків проводився з використанням різних приведених значень початкового модуля пружності: а)  $E = 18000 \text{ МПа}$ ; б)  $E = 15500 \text{ МПа}$ ; в)  $E = 15000 \text{ МПа}$ ; г)  $E = 14500 \text{ МПа}$ .

Розрахунок за деформаційною методикою проводився за алгоритмом, що наведений в роботі [7]. В даній роботі приведено приклад розрахунку згинальних елементів з деревини лише з модулем пружності  $E = 15500 \text{ МПа}$ , а результати обрахунків з іншими значеннями модуля пружності занесені до табл. 2.

#### *Приклад розрахунку неармованих балок з клеєної деревини марки БК*

Вихідні дані:

Деревина - сосна з такими фізичними характеристиками:

$E_{0,05} = 15500 \text{ МПа} = 1550 \text{ кН} / \text{см}^2$  - модуль пружності, що відповідає наближено до квантіля початкового модуля пружності деревини на розтяг;

$u_{c,fn,d} = 0,0035$  - критичні відносні деформації деревини на стиск;

$u_{c,fn,t} = 0,0038$  - граничні відносні деформації деревини на розтяг;

$f_{c,o,d} = 46 \text{ МПа}$  - граничне значення напружень, що може сприйняти деревина при роботі на стиск;

$k_I = 2628 \text{ МПа}$  - коефіцієнт полінома I;  $k_c = 375510 \text{ МПа}$  - коефіцієнт полінома II;

$b = 10 \text{ см}$  - ширина перерізу балки;  $h = 15 \text{ см}$  - висота перерізу.

Для початку розрахунку встановлюємо початкове значення відносних деформацій, які можуть виникати в крайньому волокні розтягнутої зони  $u_{t,d,1}$  та задаємо положенням

нейтральної лінії  $y_{c,1}$ ,  $y_{t,1}$ . Після пошуку рівноваги перерізу ми отримуємо значення відносних деформацій  $u_{c,d,1}$ , які виникають в стиснутій зоні і відповідають рівновазі.

У нашому випадку:

$$u_{c,d,1} = \frac{u_{t,d,1} \cdot y_{c,1}}{y_{t,1}} = \frac{0,0038 \cdot 7,32}{7,68} = 0,00362 \quad (3)$$

Зусилля, які сприймає поперечний переріз в стиснутій  $N_c$  та розтягнутій зоні  $N_t$ , що є у балансі:

$$N_c = b y_{c,1} \left( \frac{k_1 u_{c,d,1}}{2} + \frac{k_c u_{c,d,1}^2}{3} \right) = 10 \cdot 7,32 \cdot \left( \frac{2628 \cdot 0,00362}{2} + \frac{-375510 \cdot 0,00362^2}{3} \right) = 228,1 \text{ кН} \quad (4)$$

$$N_t = \frac{1}{2} b y_{t,1} E u_{t,d,1} = 0,5 \cdot 10 \cdot 7,68 \cdot 1550 \cdot 0,0038 = 229,1 \text{ кН} \quad (5)$$

Оскільки  $N_c = 228,1 \text{ кН} \approx N_t = 229,1 \text{ кН}$ , то можна вважати, що переріз знаходиться в стані рівноваги, тому можемо визначити згинальний момент, що сприймає поперечний переріз в стиснутій  $M_c$  та розтягнутій зоні  $M_t$ :

$$M_c = b y_{c,1}^2 \left( \frac{k_1 u_{c,d,1}}{3} + \frac{k_c u_{c,d,1}^2}{4} \right) = 10 \cdot 7,32^2 \cdot \left( \frac{2628 \cdot 0,00362}{3} + \frac{-375510 \cdot 0,00362^2}{4} \right) / 100 = 10,4 \text{ кНм} \quad (6)$$

$$M_t = \frac{1}{3} b y_{t,1}^2 E u_{t,d,1} = \left( \frac{1}{3} \cdot 10 \cdot 7,68^2 \cdot 1550 \cdot 0,0038 \right) / 100 = 11,73 \text{ кНм} \quad (7)$$

Згинальний момент, що може сприйняти переріз:

$$M_{Ed} = M_c + M_t = 10,4 + 11,73 = 22,13 \text{ кНм} \quad (8)$$

#### Приклад розрахунку армованих балок

**Балки БКА-12.** Для розрахунку балок БКА-12 з комбінованим армуванням прийнято наступні вихідні дані:

Характеристики деревини:  $E = 1550 \text{ кН / см}^2$ ;  $u_{c,fn,d} = 0,0035$ ;  $u_{c,fn,t} = 0,0038$ ;  $f_{c,o,d} = 46 \text{ МПа}$ ;  $k_1 = 2628 \text{ МПа}$ ;  $k_c = 375510 \text{ МПа}$ ;  $b = 10 \text{ см}$ ;  $h = 15 \text{ см}$ .

Характеристики арматури в стиснутій зоні:  $2\text{Ø}12 \text{ A500C}$   $A_s = 2,26 \text{ см}^2$  - площа перерізу двох стержнів арматури;  $E_{c,z} = 210000 \text{ МПа} = 2,1 \cdot 10^4 \text{ кН/см}^2$  - модуль пружності арматури;  $u_{c,z} = 0,0022$  - деформації стиснутої арматури в момент руйнування балки.

Характеристики арматури в розтягнутій зоні:  $b_b = 2,5 \text{ см}$  - ширина стрічки;  $t_b = 0,12 \text{ см}$  - товщина стрічки;  $E_{t,z} = 165000 \text{ МПа} = 1,65 \cdot 10^4 \text{ кН/см}^2$  - модуль пружності стрічки;  $u_{t,z} = 0,0036$  - деформації розтягнутої арматури в момент руйнування балки.

Для початку аналогічним чином встановлюємо початкове значення відносних деформацій, які можуть виникати в крайньому волокні розтягнутої зони  $u_{t,d,2}$  та задаємося положенням нейтральної лінії  $y_{c,2}$ ,  $y_{t,2}$ . Після пошуку рівноваги перерізу отримуємо значення відносних деформацій  $u_{c,d,2}$ , які виникають в стиснутій зоні і відповідають рівновазі.

У даному випадку:

$$u_{c,d,2} = \frac{u_{t,d,2} \cdot y_{c,2}}{y_{t,2}} = \frac{0,0038 \cdot 6,45}{8,55} = 0,00289 \quad (9)$$

Зусилля, які сприймає поперечний переріз в стиснутій зоні  $N_c$  отримуємо як суму зусиль, що виникають у стиснутій деревині  $N_{c,d}$  та арматурі  $N_{c,z}$ :

$$N_c = N_{c,d} + N_{c,z} = b y_{c,2} \left( \frac{k_1 u_{c,d,2}}{2} + \frac{k_c u_{c,d,2}^2}{3} \right) + A_{c,z} E_{c,z} u_{c,z,0} = 10 \cdot 6,45 \times \left( \frac{2628 \cdot 0,00289}{2} + \frac{-375510 \cdot 0,00289^2}{3} \right) + 2,26 \cdot 2,1 \cdot 10^4 \cdot 0,0022 = 176,6 + 95,2 = 271,8 \text{ кН} \quad (10)$$

Зусилля, що сприйме розтягнута зона поперечного перерізу  $N_t$  обчислюємо як суму зусиль, що виникають у розтягнутій деревині  $N_{t,d}$  та стрічці  $N_{t,z}$ :

$$N_t = N_{t,d} + N_{t,z} = \frac{1}{2} b y_{t,2} E u_{t,d,2} + A_{t,z} E_{t,z} u_{t,z,0} = 0,5 \cdot 10 \cdot 8,55 \cdot 1550 \cdot 0,0038 +$$

$$+ 2,5 \cdot 0,12 \cdot 16,5 \cdot 10^4 \cdot 0,0036 = 251,8 + 17,8 = 269,7 \text{ кН} \quad (11)$$

Так, як  $N_c = 271,8 \text{ кН} \approx N_t = 269,7 \text{ кН}$ , то можна вважати, що переріз знаходиться в рівновазі, тому визначимо згинальний момент, що сприймає поперечний переріз в стиснутій  $M_c$  та розтягнутій зоні  $M_t$ :

$$M_c = b y_{c,2}^2 \left( \frac{k_1 u_{c,d,2}}{3} + \frac{k_c u_{c,d,2}^2}{4} \right) + A_{c,z} E_{c,z} u_{c,z,0} y_{c,z} = 10 \cdot 6,45^2 \times$$

$$\times \left( \frac{2628 \cdot 0,00289}{3} + \frac{-375510 \cdot 0,00289^2}{4} \right) / 100 + (2,26 \cdot 2,1 \cdot 10^4 \cdot 0,0022 \cdot 5,1) / 100 =$$

$$= 7,24 + 4,6 = 11,84 \text{ кНм}, \quad (12)$$

де  $y_{c,z} = 5,1 \text{ см}$  – відстань по висоті перерізу від нейтральної лінії до центра сталеві арматури, тобто до лінії дії зусилля  $N_{c,z}$ .

$$M_t = \frac{1}{3} b y_{t,2}^2 E u_{t,d,0} + A_{t,z} E_{t,z} u_{t,z,0} y_{t,z} = \left( \frac{1}{3} \cdot 10 \cdot 8,55^2 \cdot 1550 \cdot 0,0038 \right) / 100 +$$

$$+ (2,5 \cdot 0,12 \cdot 16,5 \cdot 10^4 \cdot 0,0036 \cdot 8,61) / 100 = 14,35 + 1,53 = 15,88 \text{ кНм}, \quad (13)$$

де  $y_{t,z} = 8,28 \text{ см}$  – відстань по висоті перерізу від нейтральної лінії до центра композитної стрічки, тобто до лінії дії зусилля  $N_{t,z}$ .

Сумарний згинальний момент, що може сприйняти армований переріз:

$$M_{Ed} = M_c + M_t = 11,84 + 15,88 = 27,72 \text{ кНм}. \quad (14)$$

**Балки БКА-16.** Розрахунок балок БКА-16 з комбінованим армуванням прийнято наступні вихідні дані:

Характеристики деревини:  $E_{0,05} = 1550 \text{ кН/см}^2$ ;  $u_{c,fn,d} = 0,0035$ ;  $u_{c,fn,t} = 0,0050$ ;  $f_{c,o,d} = 46 \text{ МПа}$ ;  $k_1 = 2628 \text{ МПа}$ ;  $k_c = 375510 \text{ МПа}$ ;  $b = 10 \text{ см}$ ;  $h = 15 \text{ см}$ .

Характеристики арматури в стиснутій зоні:  $2\text{Ø}16\text{A}500\text{C}$   $A_s = 4,02 \text{ см}^2$ ;  $E_{c,z} = 2,1 \cdot 10^4 \text{ кН/см}^2$ ;  $u_{c,z,0} = 0,0025$ .

Характеристики арматури в розтягнутій зоні:

$$b_b = 2,5 \text{ см}; t_b = 0,12 \text{ см}; E_{t,z} = 1,65 \cdot 10^4 \text{ кН/см}^2; u_{t,z,0} = 0,0055.$$

Встановлюємо початкове значення відносних деформацій, які можуть виникати в крайньому волокні розтягнутої зони  $u_{t,d,3}$  та задаємося положенням нейтральної лінії  $y_{c,3}$ ,  $y_{t,3}$ . Після пошуку рівноваги перерізу отримуємо значення відносних деформацій  $u_{c,d,3}$ , які виникають в стиснутій зоні і відповідають рівновазі.

У даному випадку:

$$u_{c,d,3} = \frac{u_{t,d,3} \cdot y_{c,3}}{y_{t,3}} = \frac{0,0050 \cdot 6,06}{8,94} = 0,0034 \quad (15)$$

Зусилля, які сприймає стиснута зона поперечного перерізу  $N_c$ :

$$N_c = N_{c,d} + N_{c,z} = b y_{c,3} \left( \frac{k_1 u_{c,d,3}}{2} + \frac{k_c u_{c,d,3}^2}{3} \right) + A_{c,z} E_{c,z} u_{c,z,0} = 10 \cdot 6,06 \times$$

$$\times \left( \frac{2628 \cdot 0,0034}{2} + \frac{-375510 \cdot 0,0034^2}{3} \right) + 4,02 \cdot 2,1 \cdot 10^4 \cdot 0,0025 =$$

$$= 182,7 + 191,7 = 374,4 \text{ кН} \quad (16)$$

Зусилля в розтягнутій зоні  $N_t$ :

$$N_t = N_{t,d} + N_{t,z} = \frac{1}{2} b y_{t,3} E u_{t,d,3} + A_{t,z} E_{t,z} u_{t,z,0} = 0,5 \cdot 10 \cdot 8,94 \cdot 1550 \cdot 0,0050 +$$

$$+ 2,5 \cdot 0,12 \cdot 16,5 \cdot 10^4 \cdot 0,0055 = 346,25 + 27,23 = 373,5 \text{ кН} \quad (17)$$

Так як  $N_c = 374,4 \text{ кН} \approx N_t = 373,5 \text{ кН}$ , то можна визначити згинальний момент, що сприймає поперечний переріз в стиснутій  $M_t$  та розтягнутій зоні  $M_t$ :

$$M_c = by_{c,3}^2 \left( \frac{k_1 u_{c,d,3}}{3} + \frac{k_c u_{c,d,3}^2}{4} \right) + A_{c,z} E_{c,z} u_{c,z,0} y_{c,z} = 10 \cdot 6,06^2 \times$$

$$\times \left( \frac{2628 \cdot 0,0034}{3} + \frac{-375510 \cdot 0,0034^2}{4} \right) / 100 + (4,02 \cdot 2,1 \cdot 10^4 \cdot 0,0025 \cdot 4,1) / 100 =$$

$$= 6,94 + 6,97 = 13,91 \text{ кНм},$$

де  $y_{c,z} = 4,1 \text{ см}$ .

$$M_t = \frac{1}{3} by_{t,3}^2 E u_{t,d,0} + A_{t,z} E_{t,z} u_{t,z,0} y_{t,z} = \left( \frac{1}{3} \cdot 10 \cdot 8,94^2 \cdot 1550 \cdot 0,0050 \right) / 100 +$$

$$+ (2,5 \cdot 0,12 \cdot 16,5 \cdot 10^4 \cdot 0,0055 \cdot 9,0) / 100 = 20,65 + 2,43 = 23,08 \text{ кНм},$$

де  $y_{t,z} = 9,0 \text{ см}$ .

Загальний згинальний момент, що може сприйняти переріз:

$$M_{Ed} = M_c + M_t = 13,91 + 23,08 = 36,99 \text{ кНм}. \quad (20)$$

Значення несучої здатності, отримані шляхом експериментальних випробувань при дії одноразових статичних навантажень та теоретичним методом з використанням деформаційної моделі розрахунку, наведено для всіх зазначених балок із клеєної деревини у таблиці 2. Необхідно зауважити, що руйнування експериментальних зразків марок БК та БКА-12 пройшло по нормальному перерізу, а зразків марки БКА-16 по дотичним перерізам за рахунок сколювання.

Як видно з табл. 2 розрахунки за деформаційною моделлю неармованих марки БК та комбіновано армованих згинальних елементів марки БКА-12 необхідно проводити з використанням початкового модуля пружності зразків цільної деревини з того ж матеріалу, що виготовлена дощатоклеєна балка. Так як балки з комбінованим армуванням БКА-16 зруйнувалися на опорі за дотичних напружень від сколювання, то можна говорити, що вони не вичерпали свої можливості несучої здатності по нормальному перерізу, а результати експериментальних досліджень порівнювати некоректно.

Таблиця 2 - Порівняльна таблиця несучої здатності балок з клеєної деревини  $M_{max}$  (кН/м) з різним модулем пружності  $E$  (МПа)

| Познач. | Армування                        | Експер. несуча здатність | Несуча здатність $E=18000$ | Несуча здатність $E=15500$ | Несуча здатність $E=15000$ | Несуча здатність $E=14500$ |
|---------|----------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| БК-А    | -                                | 23,85                    | 24,03                      | 22,15                      | 21,53                      | 21,06                      |
| БК-Б    | -                                | 22,05                    |                            |                            |                            |                            |
| БКА-12А | 2Ø12 A500C + Sika CarboDur S-512 | 26,55                    | 30,59                      | 27,72                      | 27,38                      | 26,48                      |
| БКА-12Б | 2Ø12 A500C + Sika CarboDur S-512 | 29,25                    |                            |                            |                            |                            |
| БКА-16А | 2Ø16 A500C + Sika CarboDur S-512 | 31,95                    | 41,17                      | 36,99                      | 36,19                      | 35,45                      |
| БКА-16Б | 2Ø16 A500C + Sika CarboDur S-512 | 33,75                    |                            |                            |                            |                            |

**Висновки.** На основі проведених експериментально-теоретичних досліджень зроблено наступні висновки:

1. Розрахунки за деформаційною моделлю неармованих та комбіновано армованих згинальних елементів необхідно проводити з використанням початкового модуля пружності, що визначається за зразками з цільної деревини. Тоді теоретичні значення розрахунку несучої здатності не перевищують експериментальні значення та близькі за значенням.

2. Балки з комбінованим армуванням БКА-16 зруйнувалися від сколювання на опори за дотичних напружень і не вичерпали своєї несучої здатності по нормальному перерізу.

3. Назріла необхідність розробки підсилення комбіновано армованих балок з деревини по похилим перерізам.

### Література

1. ДБН В.2.6-161:2017. Конструкції будинків і споруд. Дерев'яні конструкції. Основні положення. Київ: ДП Укрархбудінформ, 2017. 111 с.
2. Eurocode 5. Design of timber structures. Part 1.1. General rules and rules for buildings. 1995. 124 с.
3. Гомон, С. С. (2016). *Конструкції з дерева та пластмас: Навчальний посібник*. Рівне: НУВГП. 219 с.
4. Babich, E. M., & Gomon, S. S. (2019). Розрахунок згинальних елементів з деревини після дії малоциклових повторних навантажень за критерієм деформаційного руйнування. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*, (37), 106–117. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i37.335>
5. Гомон, С. С. (2019). *Напружено-деформований стан і розрахунок за деформаційною методикою елементів з деревини при одноразових та повторних навантаженнях: Монографія*. Рівне: Волинські обереги. 288 с.
6. Гомон, С. С., Бабич, Є. М., & Павлюк, А. П. (2019). Розрахунок несучої здатності дерев'яних балок за поперечного згину з використанням деформаційної моделі: Рекомендації. Рівне: НУВГП. 28 с.
7. Гомон, С. С., Поліщук, М. В., Гомон, Св., Св., Гомон, П. С., & Пугач, Ю. В. (2024). Розрахунок нормального перерізу пасивно комбіновано армованих балок з деревини з врахуванням критерію деформаційного руйнування. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*, (45), 147–157. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i45.16>
8. Бабич, Є. М., & Гомон, П. С. (2023). Рекомендації щодо проектування згинальних елементів з цільної та клеєної деревини з пасивним та попередньо напруженим комбінованим армуванням. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*, (44), 133–139. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i44.15>
9. Михаловський, Д. В., & Гомон, П. С. (2024). Дослідження роботи попередньо-напружених дерев'яних балок з клеєної деревини. *Містобудування та територіальне планування*, (87), 246–254.
10. Гомон, С. С., & Поліщук, М. В. (2018). Експериментально-статистичні дослідження залежностей «січний модуль-рівень напружень» для цільної та клеєної деревини. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*, (35), 60–67. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i35.231>
11. Гомон, С. С., & Поліщук, М. В. (2018). Експериментально-статистичні дослідження січного модуля пружності деревини в залежності від тривалості насичення водою. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*, (36), 96–101. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i36.254>
12. Гомон, С. С., Гомон, С. С., Гомон, П. С., & Верешко, О. В. (2020). До визначення січного модуля деформацій клеєної деревини модифікованої «СИЛОРОМ». *Містобудування та територіальне планування*, (74), 92–101.

13. Гомон, С. С., Гомон, С. С., Савицький, В. В., & Черномаз, В. Ю. (2021). Методика визначення початкового модуля пружності та модуля деформацій деревини різного віку. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*, (40), 121–128. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i40.15>
14. Gomon, S., Homon, S., Gomon, P., Dovbenko, T., Savitsiy, V., Matviiuk, O., Kulakovskiy, L., Bronytskyi, V., Bosak, A., & Chornomaz, N. (2022). Experimental and statistical studies of the initial modulus of elasticity and the module of deformations of continuous wood at different ages and moisture. *AD ALTA: Journal of Interdisciplinary Research*, (Special Issue), 321–326.
15. Pavluk, A., Gomon, S., Khoruzhyi, M., Homon, S., Dejneka, O., Smal, M., & Dziubynska, O. (2024). Peculiarities of calculation of wooden beams for oblique bending using the deformation model. *Procedia Structural Integrity*, 59, 566–574. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.080>
16. Гомон, С. С., Павлюк, А. П., & Луцько, С. І. (2022). Дослідження модуля пружності балок з клеєної деревини в умовах косого згину. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*, (41), 173–178. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i41.19>
17. Gomon, S. S., Gomon, S., Karavan, V., Gomon, P., & Sobczak-Piastka, J. (2019). Investigation of solid and glued wood on the effect of variables of low-cycle repeated loads. *AIP Conference Proceedings*, 2077, <https://doi.org/10.1063/1.5091881>
18. Sobczak-Piastka, J., Pavluk, A., Gomon, S. S., Gomon, P., Homon, S., & Lynnyk, I. (2023). Changing the position of the neutral line of beams made of glued wood in conditions of oblique bending. *AIP Conference Proceedings*, 2928 <https://doi.org/10.1063/5.0170371>

### References

- [1]. DBN V.2.6-161:2017. Konstruktsii budynkiv i sporud. Derev'yani konstruktsii. Osnovni polozhennia. (2017). Kyiv: DP Ukrarkhbudininform.
- [2]. Eurocode 5. Design of timber structures. Part 1.1. General rules and rules for buildings. 1995. 124 p.
- [3]. Gomon, S. S. (2016). Konstruktsiyi z dereva ta plastmas. Navchal'nyy posibnyk. Rivne: NUWEE. 219 p.
- [4]. Babich, E. M., & Gomon, S. S. (2020). Calculation of bending elements of wood after the action of low-cycle repeated loads on the criterion of deformation destruction. *Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudy*, 37, 106–117. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i37.335>
- [5]. Gomon, S. S. (2019). Napruzhenno-deformovanyy stan i rozrakhunok za deformatsiynoyu metodykoyu elementiv z derevyny pry odnorazovykh ta povtornykh navantazhennyakh. Monohrafiya.- Rivne: Volyns'ki oberehy. 288 p.
- [6]. Gomon, S. S., Babych, Ye. M., & Pavlyuk, A. P. (2019). Rozrakhunok nesuchoyi zdatsnosti derev'yanykh balok za poperechnoho z'hynu z vykorystannyam deformatsiynoyi modeli. Rekomendatsiyi. Rivne: NUWEE. 28 p.
- [7]. Gomon, S. S., Polishchuk, M. V., Homon, Sv. Sv., Gomon, P. S., & Puhach, Yu. V. (2024). Rozrakhunok normal'noho pererizu pasyвно kombinovano armovanykh balok z derevyny z vrakhuvannyam kryteriyu deformatsiynoho ruynuvannya. *Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudy*, (45), 147–157. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i45.16>
- [8]. Babych, Ye. M., & Gomon, P. S. (2024). Rekomendatsiyi shchodo proektuvannya zhynal'nykh elementiv z tsil'noyi ta kleyenoyi derevyny z pasyvnym ta poperedn'o napruzhenym kombinovanyam armuvannyam. *Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudy*, 44, 133–139. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i44.15>
- [9]. Mykhalovs'kyi, D. V., & Gomon, P. S. (2024). Doslidzhennya roboty poperedn'o-napruzhenykh derev'yanykh balok z kleyenoyi derevyny. *Mistobuduvannya ta terytorial'ne planuvannya*, (87), 246–254.
- [10]. Gomon, S. S., & Polishchuk, M. V. (2018). Eksperymental'no-statystychni doslidzhennya zalezhnostey «sichnyy modul'-riven' napruzhen'» dlya tsil'noyi ta kleyenoyi derevyny.



- Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudy*, (35), 60–67. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i35.231>
- [11]. Gomon, S. S., & Polishchuk, M. V. (2018). Eksperymental'no-statystychni doslidzhennya modulya pruzhnosti derevyny v zalezhnosti vid tryvalosti nasychennya vodoyu. *Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivnytstva ta sporudy*, (36), 96–101. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i36.254>
- [12]. Homon, S. S., Gomon, S. S., Gomon, P. S., & Vereshko, O. V. (2020). Do vyznachennya sichnoho modulya deformatsiy kleyenoyi derevyny modyfikovanoyi «SYLOROM». *Mistobuduvannya ta terytorial'ne planuvannya*. (74), 92–101.
- [13]. Gomon, Sv. St., Homon, Sv. Sv., Savyts'kyy, V. V., & Chornomaz, N. Yu. (2022). Metodyka vyznachennya pochatkovoho modulya pruzhnosti ta modulya deformatsiy derevyny riznoho viku. *Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudy*, 40, 121–128. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i40.15>
- [14]. Gomon, S., Homon, S., Gomon, P., Dovbenko, T., Savitsiy, V., Matviiuk, O., Kulakovskiy, L., Bronytskyi, V., Bosak, A., & Chornomaz, N. (2022). Experimental and statistical studies of the initial modulus of elasticity and the module of deformations of continuous wood at different ages and moisture. *AD ALTA: Journal of Interdisciplinary Research*, (Special Issue), 321–326.
- [15]. Pavluk, A., Gomon, S., Khoruzhyi, M., Homon, S., Dejneka, O., Smal, M., & Dziubynska, O. (2024). Peculiarities of calculation of wooden beams for oblique bending using the deformation model. *Procedia Structural Integrity*, 59, 566–574. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.080>
- [16]. Pavlyuk, A. P., Gomon, S. S., & Luts'ko, S. I. (2022). Doslidzhennya modulya pruzhnosti balok z kleyenoyi derevyny v umovakh kosoho zhyngu. *Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudy*, 41, 173–178. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i41.19>
- [17]. Gomon, S. S., Gomon, S., Karavan, V., Gomon, P., & Sobczak-Piąstka, J. (2019). Investigation of solid and glued wood on the effect of variables of low-cycle repeated loads. *AIP Conference Proceedings*, 2077, 020020. <https://doi.org/10.1063/1.5091881>
- [18]. Sobczak-Piąstka, J., Pavluk, A., Gomon, S. S., Gomon, P., Homon, S., & Lynnyk, I. (2023). Changing the position of the neutral line of beams made of glued wood in conditions of oblique bending. *Proceedings of the 15th international conference on x-ray microscopy – XRM2022*, 2990, 080007. <https://doi.org/10.1063/5.0170371>

## GENERALIZED MODEL OF THE ACTUAL WORK OF DECIDUOUS AND CONIFEROUS WOOD UNDER AXIAL COMPRESSION ALONG THE FIBERS

**Gomon Svyatoslav**, Dr.Sc. in Engineering, Professor,  
[s.s.homon@nuwm.edu.ua](mailto:s.s.homon@nuwm.edu.ua); ORCID: 0000-0003-2080-5650

**Homon Sviatoslav**, Dr.Sc. in Engineering, Professor,  
[homonsviatslav@ukr.net](mailto:homonsviatslav@ukr.net); ORCID: 0000-0001-9818-1804

**Riabcheniuk Nazarii**, Post-graduate student,  
[n.v.ryabchenyuk@nuwm.edu.ua](mailto:n.v.ryabchenyuk@nuwm.edu.ua); ORCID: 0009-0004-1988-8801

**Lukjyanenko Oleksandr**, Post-graduate student,  
[o.a.lukjyanenko@nuwm.edu.ua](mailto:o.a.lukjyanenko@nuwm.edu.ua); ORCID: 0009-0004-6383-2733

**Polishchuk Mykola**, PhD in Engineering,  
[m.v.polishchuk@nuwm.edu.ua](mailto:m.v.polishchuk@nuwm.edu.ua); ORCID: 0000-0003-1981-8008  
*National University of Water and Environmental Engineering, Rivne*

**Abstract:** Modern methods for determining the initial modulus of elasticity of solid wood are analyzed. The article presents the results of experimental and theoretical research on the selection of values of the initial modulus of elasticity of solid wood for determining the theoretical bearing capacity of bending unreinforced and reinforced elements made of glued laminated timber. The

purpose of the work is to determine the features of determining the modulus of elasticity of wood and the reliability of determining the theoretical bearing capacity of bending elements made of wood using the deformation method. It is established that the closest results are the results of calculating the theoretical bearing capacity of bending elements made of glued laminated timber to the experimental ones using a deformation model, which uses the initial modulus of elasticity established on the basis of solid wood from which the structure is made. The deformation model for calculating bending elements made of glued laminated timber involves the use of determined normal stresses based on deformations that have arisen in the normal cross-section of the bending element under external loading. The stresses in the calculated normal cross-section are described by different functions in three different sections of the cross-section height. The first section is the tension section, starting from the bottom of the element to the neutral line and described by a linear function; the second section is the compression section, from the neutral line to the maximum value of the compressive stresses is described by a nonlinear function; the third section is also a compression section, from the end of second section to the top of the bending element is described by a nonlinear function taking into account the appearance of a fold.

**Keywords:** wood, bending element, deformation model, modulus of elasticity, bearing capacity.