

ДЕРЕВООБРОБНІ ТА МЕБЛЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 624.011.1

<https://doi.org/10.31548/forest2020.02.079>

ІНЖЕНЕРНА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ КОМБІНОВАНОЇ КЛЕЄНОЇ ДЕРЕВИНИ

С. І. БІЛИК, доктор технічних наук, професор

<https://orcid.org/0000-0001-8783-5892>, e-mail: bilyk.sergio@gmail.com

Д. В. МИХАЙЛОВСЬКИЙ, кандидат технічних наук, доцент

<https://orcid.org/0000-0002-7404-4757>, e-mail: mykhailovskiy.dv@knuba.edu.ua

Київський національний університет будівництва і архітектури

Широкий світовий досвід упровадження будівельних конструкцій із деревини, зокрема з клеєної деревини, різноманітного призначення підтверджує доцільність їх використання. Цьому сприяє той факт, що клеєна деревина ефективно акумулює позитивні властивості деревини як конструкційного матеріалу, насамперед порівняно високу міцність, і дає змогу значною мірою нівелювати недоліки цільної деревини. Одним із видів конструкцій із клеєної деревини є конструкції з комбінованої клеєної деревини.

Враховуючи структуру і особливості роботи елементів із комбінованої клеєної деревини прямокутного поперечного перерізу, для детального аналізу напружено-деформованого стану запропоновано методику, яка полягає у застосуванні до стандартних формул розрахунку приведених характеристик поперечного перерізу: приведеної площі, приведенного моменту інерції, приведенного моменту опору. Для розрахунку елементів із комбінованої клеєної деревини прямокутного поперечного перерізу за другим граничним станом (експлуатаційною придатністю) запропоновано використовувати приведений модуль пружності перерізу до дощок зовнішніх шарів.

Для аналізу запропонованої методики проведено низку чисельних досліджень балок із комбінованої та клеєної деревини одного класу міцності з застосуванням аналітичних методик розрахунку та за допомогою методу скінчених елементів у програмному комплексі (ПК) ЛІРА-САПР, із використанням об'ємних і плоских скінчених елементів.

Із проведених чисельних досліджень видно, що результати розрахунків балок із комбінованої клеєної і з клеєної деревини одного класу міцності різняться у межах 20 % у бік збільшення значень прогинів та нормальних напружень в елементах із комбінованої клеєної деревини.

Розрахунки методом скінченних елементів у програмному комплексі ЛІРА-САПР балок із комбінованої та клеєної деревини одного класу міцності, змодельованих об'ємними та плоскими скінченними елементами, показали майже повний збіг результатів із розбіжністю до 2 %, що дає змогу стверджувати про необхідність, із метою суттєвого спрощення моделювання, задавати елементи з клеєної деревини плоскими скінченними елементами.

Аналітичний розрахунок балок із комбінованої клеєної деревини рекомендують проводити за запропонованою у роботі методикою, що дає змогу враховувати товщину і механічні характеристики для класу міцності кожної дошки, з якої складається клеєний поперечний переріз елемента, що значно розширює діапазон використання комбінованої клеєної деревини.

Підтверджено високий рівень збігу (в межах 5 %) запропонованої аналітичної методики з визначенням приведених характеристик перерізу з результатами, одержаними методом скінченних елементів для різних перерізів та прольотів балок, що дає змогу стверджувати про доцільність її застосування в інженерних розрахунках. Крім того, моделювання конструкцій із комбінованої клеєної деревини можливе стрижневими елементами з наданням їм приведенного модуля пружності за запропонованою методикою, що значно спрощує розрахунок складних стрижневих систем.

Ключові слова: клеєна деревина, аналітична методика розрахунку, метод скінченних елементів, конструкції із клеєної деревини, приведені геометричні характеристики перерізу, приведений модуль пружності.

Актуальність. Широкий світовий досвід упровадження будівельних конструкцій із деревини, зокрема з клеєної деревини, різноманітного призначення підтверджує доцільність їх використання (VNIINTPI, 1989; Koval'chuk et al., 1995). Великого поширення для перекриття середніх, великих і навіть дуже великих прольотів (більш ніж 100 м) набувають конструкції із клеєної деревини (ККД). Цьому сприяє той факт, що клеєна деревина ефективно акумулює позитивні властивості деревини як конструкційного матеріалу, насамперед порівняно високу міцність, і дає змогу значною мірою нівелювати недоліки цільної деревини. Більш докладно про впровадження ККД в Україні йдеться у (Permyakov, &

Klimenko, 2005; Klimenko, 2009; Mykhailovskyi, 2014, 2016, 2017). Одним із видів ККД є конструкції із комбінованої клеєної деревини.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У вітчизняних нормативних документах ДСТУ-Н Б В.2.6-184:2012 та ДСТУ-Б.В.2.6-217-2016 вказівок щодо розрахунку або будь-якого іншого інженерного підходу до конструкцій із комбінованої клеєної деревини немає, хоча рекомендації щодо суміщення різних сортів деревини в одному поперечному перерізі містились у багатьох навчальних посібниках і підручниках. Фактично, міцність і жорсткість елементів із комбінованої клеєної деревини визначалась фізико-механічними властивостями зовнішніх шарів, що було зумовлено обмеженням сортуван-

ням деревини, прийнятим ще за радянських часів, для всіх сортів деревини однаковим модулем пружності вздовж волокон.

У розділі 13 ДБН В.2.6-161:2017 міститься рекомендація для клеєних зігнутих і стиснуто-зігнутих елементів сумішати деревину двох класів міцності, а саме у верхній і нижній зонах на $1/6$ висоти поперечного перерізу використовувати більш високий клас міцності деревини, а в середній частині – деревину більш низького класу міцності, як показано на рис. 1. Рекомендацію введено з метою економії деревини більш високих класів міцності для балок, рам, арок та інших конструкцій, елементи якої працюють на згин або стиск зі згином.

За чинними нормами проектування ДБН В.2.6-161:2017 розрахунок дерев'яних конструкцій із комбінованої клеєної деревини слід вести за звичайними формулами, як і для однорідної клеєної деревини, із засто-

суванням фізико-механічних властивостей зовнішніх шарів. Насправді ж робота конструкцій із комбінованої клеєної деревини дещо відрізняється від роботи елементів із клеєної деревини з дощок одного класу міцності.

Мета дослідження. У цій роботі представлено інженерну методику розрахунку елементів із комбінованої клеєної деревини, яка полягає у застосуванні загальних формул, які містяться у ДБН В.2.6-161:2017, з урахуванням наявності у поперечному перерізі різних класів міцності деревини, які своєю чергою мають різні фізико-механічні властивості, шляхом використання приведених геометричних характеристик поперечного перерізу та приведених модулів пружності, з приведенням фізико-механічних властивостей до дощок зовнішніх шарів.

Матеріали і методи дослідження. Враховуючи структуру й особливості роботи елементів із комбінованої клеєної деревини прямокутного попереч-

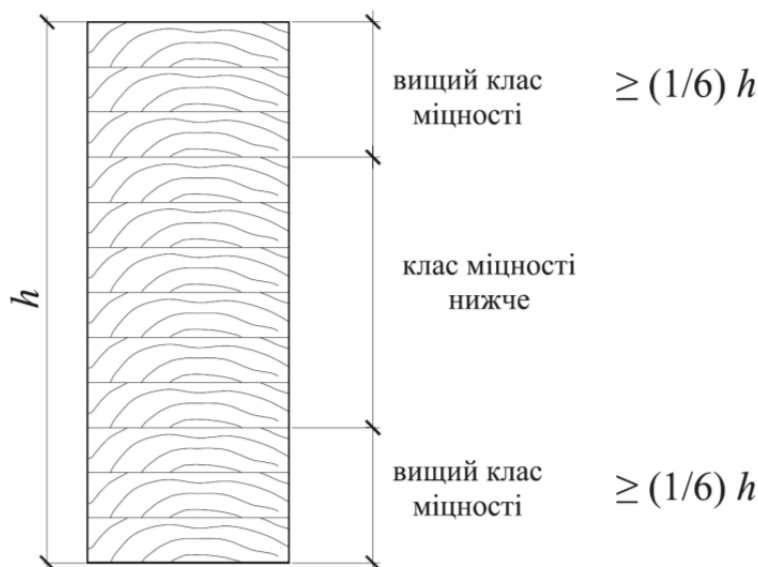


Рис. 1. Поперечний переріз із комбінованою клеєною деревиною і розподілом деревини за класами міцності за висотою поперечного перерізу балки

ного перерізу, для детального аналізу напружено-деформованого стану необхідно одержати приведені характеристики лише вздовж волокон (вісь x).

Приведена площа поперечного перерізу:

$$A_{x,ef} = \sum A_{x,i} \frac{E_{x,i}}{E_x}, \quad (1)$$

де $A_{x,i}$ – площа перерізу i -го шару дощок (переріз перпендикулярний осі x – вздовж волокон деревини дощок зовнішнього шару);

E_x – модуль пружності дощок відносно осі x , вздовж волокон зовнішнього шару;

$E_{x,i}$ – модуль пружності i -го шару дощок відносно осі x .

Приведений момент інерції перерізу:

$$I_{x,ef} = \sum I_{x,ef,i} \frac{E_{x,i}}{E_x} + \sum a_i^2 A_i \frac{E_{x,i}}{E_x}, \quad (2)$$

де $I_{x,i}$ – момент інерції перерізу перпендикулярного осі x i -го шару дощок;

$A_{x,i}$ – площа перерізу i -го шару дощок перпендикулярного осі x ;

a_i – відстань від нейтральної осі перерізу панелі до осі центру перерізу i -го шару дощок;

E_x – модуль пружності дощок вздовж волокон;

$E_{x,i}$ – модуль пружності i -го шару дощок відносно осі x .

Приведений момент опору поперечного перерізу:

$$W_{x,ef} = \frac{I_{x,ef}}{h_z}; \quad (3)$$

де $I_{x,ef}$ – приведений момент інерції поперечного перерізу перпендикулярного осі x , який слід визначати за формулою (2);

h_z – відстань від центру ваги поперечного перерізу до крайнього волокна, в якому визначають напруження.

Для розрахунку елементів із комбінованої клеєної деревини прямокутного поперечного перерізу за другим граничним станом (експлуатаційною придатністю) необхідно визначити приведений модуль пружності перерізу до дощок зовнішніх шарів.

Приведений модуль пружності клеєного елемента визначають з умови:

$$I_{x,ef} E_x = I_{x,br} E_{ef}, \quad (4)$$

де $I_{x,ef}$ – приведений момент інерції поперечного перерізу перпендикулярного осі x , який слід визначати за формулою (2);

E_x – модуль пружності дощок зовнішніх шарів вздовж волокон;

$I_{x,br}$ – момент інерції перерізу без урахування наявності дощок різного класу міцності;

E_{ef} – приведений модуль пружності елемента з комбінованої клеєної деревини вздовж волокон.

З формули (4) одержуємо формулу для визначення приведенного модуля пружності елемента з комбінованої клеєної деревини вздовж волокон:

$$E_{ef} = \frac{I_{x,ef} E_x}{I_{x,br}} \quad (5)$$

Приведений модуль пружності деревини слід використовувати введенням параметрів жорсткості стрижневого скінченного елемента в сучасні програмні комплекси для розрахунку елементів чи конструкцій з комбінованої клеєної деревини.

Для апробації запропонованої методики розрахунку елементів із комбінованої клеєної деревини проведено чисельні дослідження балки, що працює на згин, поперечним перерізом з восьми дощок (рис. 2).

Визначимо формули (1), (2), (3) у параметричному вигляді для клеєного пакета з восьми дощок (рис. 2).

Приведену площу поперечного перерізу клеєного елемента з восьми дощок визначають за формулою:

$$A_{x,ef} = \sum A_{x,i} \frac{E_{x,i}}{E_x} = bt_1 \frac{E_{x,1}}{E_x} + bt_2 \frac{E_{x,2}}{E_x} + bt_3 \frac{E_{x,3}}{E_x} + bt_4 \frac{E_{x,4}}{E_x} + bt_5 \frac{E_{x,5}}{E_x} + bt_6 \frac{E_{x,6}}{E_x} + bt_7 \frac{E_{x,7}}{E_x} + bt_8 \frac{E_{x,8}}{E_x}, \quad (6)$$

де b – ширина перерізу дощок;

$t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8$ – товщина 1-ї, 2-ї, 3-ї, 4-ї, 5-ї, 6-ї, 7-ї, 8-ї дошки відповідно;

E_x – модуль пружності дощок відносно осі x , вздовж волокон зовнішнього шару;

$E_{x,1}, E_{x,2}, E_{x,3}, E_{x,4}, E_{x,5}, E_{x,6}, E_{x,7}, E_{x,8}$ – модуль пружності відносно осі x 1-ї, 2-ї, 3-ї, 4-ї, 5-ї, 6-ї, 7-ї, 8-ї дошки відповідно.

Приведений момент інерції поперечного перерізу клеєного елемента з восьми дощок визначають за формулою:

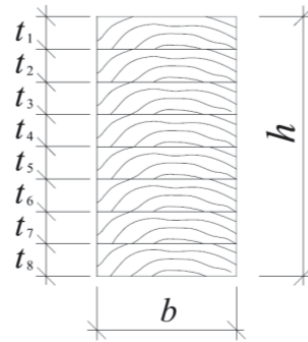


Рис. 2. Геометрична схема поперечного перерізу балки

$$I_{x,ef} = \frac{bt_1^3}{12} \frac{E_{x,1}}{E_x} + \frac{bt_2^3}{12} \frac{E_{x,2}}{E_x} + \frac{bt_3^3}{12} \frac{E_{x,3}}{E_x} + \frac{bt_4^3}{12} \frac{E_{x,4}}{E_x} + \frac{bt_5^3}{12} \frac{E_{x,5}}{E_x} + \frac{bt_6^3}{12} \frac{E_{x,6}}{E_x} + \frac{bt_7^3}{12} \frac{E_{x,7}}{E_x} + \frac{bt_8^3}{12} \frac{E_{x,8}}{E_x} + a_1^2 bt_1 \frac{E_{x,1}}{E_x} + a_2^2 bt_2 \frac{E_{x,2}}{E_x} + a_3^2 bt_3 \frac{E_{x,3}}{E_x} + a_4^2 bt_4 \frac{E_{x,4}}{E_x} + a_5^2 bt_5 \frac{E_{x,5}}{E_x} + a_6^2 bt_6 \frac{E_{x,6}}{E_x} + a_7^2 bt_7 \frac{E_{x,7}}{E_x} + a_8^2 bt_8 \frac{E_{x,8}}{E_x}, \quad (7)$$

де b – ширина перерізу дощок;

$t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8$ – товщина 1-ї, 2-ї, 3-ї, 4-ї, 5-ї, 6-ї, 7-ї, 8-ї дошки відповідно;

E_x – модуль пружності дощок відносно осі x , вздовж волокон зовнішнього шару;

$E_{x,1}, E_{x,2}, E_{x,3}, E_{x,4}, E_{x,5}, E_{x,6}, E_{x,7}, E_{x,8}$ – модуль пружності відносно осі x 1-ї, 2-ї, 3-ї, 4-ї, 5-ї, 6-ї, 7-ї, 8-ї дошки відповідно;

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8$ – відстань від центру ваги 1-ї, 2-ї, 3-ї, 4-ї, 5-ї, 6-ї, 7-ї, 8-ї дощок відповідно до центру ваги перерізу.

Відстані від центру ваги 1-ї, 2-ї, 3-ї, 4-ї, 5-ї, 6-ї, 7-ї, 8-ї дощок відповідно, до центру ваги поперечного перерізу, за умови симетричного перерізу, визначають із виразів:

$$a_1 = \frac{t_1}{2} + t_2 + t_3 + t_4, \quad a_2 = \frac{t_2}{2} + t_3 + t_4, \quad a_3 = \frac{t_3}{2} + t_4, \quad a_4 = \frac{t_4}{2},$$

$$a_8 = \frac{t_8}{2} + t_7 + t_6 + t_5, \quad a_7 = \frac{t_7}{2} + t_6 + t_5, \quad a_6 = \frac{t_6}{2} + t_5, \quad a_5 = \frac{t_5}{2}.$$

Приведений момент опору поперечного перерізу $W_{x,ef}$ для крайнього волокна потрібно обчислювати за формулою (3) з визначенням приведенного моменту інерції перерізу за формулою (7) і відстанню від центру ваги поперечного перерізу до крайнього волокна, в якому визначають напруження, $-h_z = t_1 + t_2 + t_3 + t_4$.

$$I_{x,br} = \frac{bh^3}{12} = \frac{b(t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8)^3}{12}, \quad (8)$$

Для аналізу запропонованої методики проведено низку чисельних досліджень балок із комбінованої та клеєної деревини одного класу міцності з застосуванням аналітичних методик розрахунку та за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) у програмному комплексі (ПК) ЛІРА-САПР. Чисельні дослідження МСЕ проведено із застосуванням об'ємних СЕ № 36 та плоских скінченних елементів № 41.

Об'єкт чисельних досліджень – балки з комбінованої клеєної деревини та клеєної деревини одного класу міцності на двох шарнірних опорах прямокутного поперечного перерізу, завантажені рівномірно розподіленим навантаженням різної інтенсивності, прольотами 4 м, 6 м, 8 м.

Поперечний переріз балок із клеєної деревини одного класу міцності при заданні об'ємними СЕ № 36 складено з деревини класу міцності С35 із такими механічними властивостями: модуль пружності деревини вздовж волокон $E_1 = E_{0,mean} = 13000$ МПа, модуль пружності деревини поперек волокон $E_2 = E_3 = E_{90,mean} = 430$ МПа, модуль зсуву $G = G_{mean} = 810$ МПа. При моделюванні балок із комбінованої клеєної деревини МСЕ

Приведений модуль пружності клеєного елемента з восьми дощок визначають за формулою (5), в якій $I_{x,ef}$ – приведений момент інерції поперечного перерізу перпендикулярного осі x , який обчислюють за формулою (2); E_x – модуль пружності дощок зовнішніх шарів вздовж волокон; $I_{x,br}$ – момент інерції перерізу без урахування наявності дощок різного класу міцності.

зовнішні дошки також задавали з деревини класу міцності С35 із механічними властивостями, що наведено вище. Внутрішні дошки з деревини класу міцності С14 з такими механічними властивостями: модуль пружності деревини вздовж волокон $E_1 = E_{0,mean} = 7000$ МПа, модуль пружності деревини поперек волокон $E_2 = E_3 = E_{90,mean} = 230$ МПа, модуль зсуву $G = G_{mean} = 440$ МПа.

При моделюванні плоскими СЕ № 41 зовнішнім шарам балок із комбінованої клеєної деревини надані механічні характеристики деревини класу міцності С35: модуль пружності вздовж волокон $E_1 = E_{0,mean} = 13000$ МПа, модуль пружності поперек волокон $E_2 = E_{90,mean} = 430$ МПа, модуль зсуву $G = G_{mean} = 810$ МПа; внутрішнім шарам балки надані механічні характеристики деревини класу міцності С14: модуль пружності вздовж волокон $E_1 = E_{0,mean} = 7000$ МПа, модуль пружності поперек волокон $E_2 = E_{90,mean} = 230$ МПа, модуль зсуву $G = G_{mean} = 440$ МПа.

Результати дослідження та їх обговорення. Ізополі вертикальних деформацій і нормальних напружень уздовж волокон деревини за результатами чисельних досліджень МСЕ для

балок із комбінованої клеєної деревини прольотом 4 м подано на рис. 3. Результати розрахунків балок із комбінованої та одного класу міцності деревини з іншими прольотами та за інших навантажень за аналітичними методиками та за допомогою МСЕ в ПК ЛІРА-САПР об'ємними СЕ № 36 та плоскими СЕ № 41 узагальнено в таблицях 1 і 2).

Із проведених чисельних досліджень видно, що результати розрахунків балок із комбінованої клеєної і з клеєної деревини одного класу міцності різняться в межах 20 % у бік збільшення значень прогинів та нормальних напружень в елементах із комбінованої клеєної деревини.

Проведені розрахунки методом скінченних елементів у програмному комплексі ЛІРА-САПР балок із комбінованої та клеєної деревини одного класу міцності, змодельованих об'ємними СЕ № 36 та плоскими СЕ № 41, показали майже повний збіг результатів із розбіжністю до 2 %, що дає змогу стверджувати про необхідність, із метою суттєвого спрощення моделювання, задавати елементи з клеєної деревини плоскими СЕ.

Наведені в таблицях 1 і 2 результати розрахунку балок із комбінованої клеєної деревини за запропонованою аналітичною методикою із застосуванням приведених геометричних характеристик поперечного перерізу,

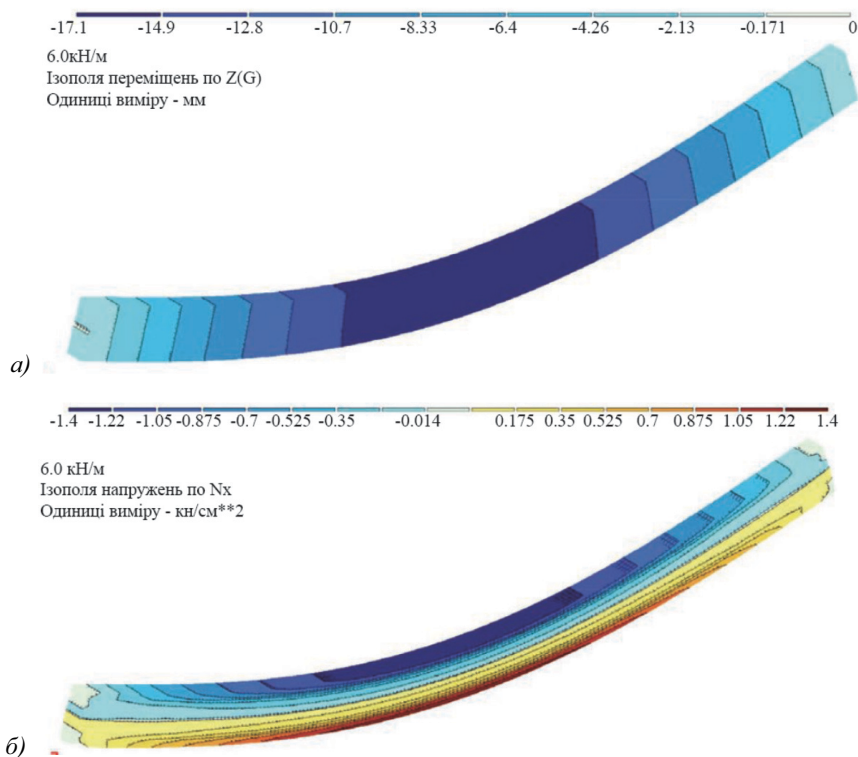


Рис. 3. Ізополя вертикальних деформацій (а) і нормальних напружень вздовж волокон (б) у балках прольотом 4 м за рівномірно розподіленого навантаження 6 кН/м

які визначають за формулами (1) - (3), та приведенного модуля пружності (4) і методу скінченних елементів у ПК ЛІРА-САПР показали розбіжність у межах 5 %.

Отже, аналітичний розрахунок балок із комбінованої клеєної деревини рекомендують проводити за наведеною у цій роботі методикою, що дає змогу враховувати товщину і механічні характеристики для класу міцності кожної дошки, з якої складається клеєний поперечний переріз елемента, що значно розширює діапазон використання комбінованої клеєної деревини.

Як бачимо з одержаних результатів (таблиці 1 і 2), зі збільшенням прольоту росте і різниця значень між розрахунком МСЕ і запропонованою аналітичною методикою з урахуванням приведених характеристик поперечного перерізу та приведених модулів пружності. Для докладнішого розуміння роботи елементів із комбінованої клеєної деревини за великих про-

льотів проведемо додаткові чисельні дослідження для балок прольотом 24 м, 40 м і 60 м, змінюючи висоту перерізу балок для кожного прольоту так, щоб виконувались умови граничних станів. Навантаження на балки прийнято рівномірно розподіленим лінійним інтенсивністю 6 кН/м.

Зовнішні шари балки змодельовані плоскими СЕ № 41 із наданням їм фізико-механічних характеристик деревини класу міцності С35: модуль пружності деревини вздовж волокон $E_1 = E_{0,mean} = 13000$ МПа, модуль пружності деревини поперек волокон $E_2 = E_{90,mean} = 430$ МПа, модуль зсуву $G = G_{mean} = 810$ МПа. Внутрішні шари балки змодельовані плоскими СЕ № 41 із наданням їм фізико-механічних характеристик деревини класу міцності С14: модуль пружності деревини вздовж волокон $E_1 = E_{0,mean} = 7000$ МПа, модуль пружності деревини поперек волокон $E_2 = E_{90,mean} = 230$ МПа, модуль зсуву $G = G_{mean} = 440$ МПа.

1. Значення прогинів і максимальних нормальних напружень для балок із комбінованої клеєної деревини та клеєної деревини одного класу міцності за рівномірно розподіленого навантаження 2,0 кН/м

| Прольот, м | | 4 | | 6 | | 8 | |
|-------------------------|---|--------------|--|--------------|--|--------------|--|
| Методики розрахунку | Згинна жорсткість EI (Wx), кНсм ² (см ³) | Прогин w, мм | Напруження $\sigma_{m,d}$, кН/см ² | Прогин w, мм | Напруження $\sigma_{m,d}$, кН/см ² | Прогин w, мм | Напруження $\sigma_{m,d}$, кН/см ² |
| Класична методика | $14\,976 \times 10^3$ (960,0) | 4,5 | 0,420 | 22,5 | 0,94 | 71,2 | 1,67 |
| Запропонована методика | $12\,978 \times 10^3$ (828,7) | 6,0 | 0,480 | 26,1 | 1,09 | 82,5 | 1,93 |
| МСЕ з плоскими СЕ № 41 | однорідна | 4,8 | 0,402 | 23,2 | 0,90 | 72,3 | 1,6 |
| МСЕ з плоскими СЕ № 41 | комбінована | 5,7 | 0,466 | 27,2 | 1,04 | 84,4 | 1,86 |
| МСЕ з об'ємними СЕ № 36 | однорідна | 4,7 | 0,402 | 25,1 | 0,90 | 72,3 | 1,60 |
| МСЕ з об'ємними СЕ № 36 | комбінована | 5,7 | 0,467 | 29,0 | 1,03 | 84,4 | 1,86 |

2. Значення прогинів і максимальних нормальних напружень для балок із комбінованої клеєної деревини та клеєної деревини одного класу міцності за рівномірно розподіленого навантаження 6,0 кН/м

| Прольот, м | | 4 | | 6 | | 8 | |
|------------------------|---|--------------|--|--------------|--|--------------|--|
| Методики розрахунку | Згинна жорсткість EI (Wx), кНсм ² (см ³) | Прогин w, мм | Напруження $\sigma_{m,d}$, кН/см ² | Прогин w, мм | Напруження $\sigma_{m,d}$, кН/см ² | Прогин w, мм | Напруження $\sigma_{m,d}$, кН/см ² |
| Класична методика | 14 976×10 ³ (960,0) | 13,4 | 1,25 | 67,6 | 2,81 | 214 | 5,0 |
| Запропонована методика | 12 978×10 ³ (828,7) | 15,5 | 1,45 | 78,3 | 3,26 | 248 | 5,79 |
| МСЕ з плоскими СЕ №41 | однорідна | 14,4 | 1,21 | 69,5 | 2,70 | 217 | 4,8 |
| МСЕ з плоскими СЕ №41 | комбінована | 17,1 | 1,40 | 81,7 | 3,13 | 253 | 5,57 |
| МСЕ з об'ємними СЕ №36 | однорідна | 14,3 | 1,21 | 75,2 | 2,71 | 217 | 4,8 |
| МСЕ з об'ємними СЕ №36 | комбінована | 17,1 | 1,40 | 86,9 | 3,09 | 253 | 5,57 |

3. Значення прогинів і максимальних нормальних напружень для балок прольотом 24 м за рівномірно розподіленого навантаження 6,0 кН/м

| Методики розрахунку | Однорідна клеєна деревина | | | Комбінована клеєна деревина | | |
|------------------------|---|-------|-------------------------------------|---|-------|-------------------------------------|
| | EI (Wx), кНсм ² (см ³) | w, мм | $\sigma_{m,d}$, кН/см ² | EI (Wx), кНсм ² (см ³) | w, мм | $\sigma_{m,d}$, кН/см ² |
| Класична методика | 19 169×10 ⁵ (30720,0) | 135,2 | 1,41 | - | - | - |
| Запропонована методика | - | - | - | 16 548×10 ⁵ (26519,0) | 156,6 | 1,63 |
| МСЕ з плоскими СЕ № 41 | 19 169×10 ⁵ (30 720,0) | 139 | 1,38 | 16 548×10 ⁵ (26 519,0) | 164 | 1,60 |

4. Значення прогинів і максимальних нормальних напружень для балок прольотом 40 м за рівномірно розподіленого навантаження 6,0 кН/м

| Методики розрахунку | Однорідна клеєна деревина | | | Комбінована клеєна деревина | | |
|------------------------|---|-------|-------------------------------------|---|-------|-------------------------------------|
| | EI (Wx), кНсм ² (см ³) | w, мм | $\sigma_{m,d}$, кН/см ² | EI (Wx), кНсм ² (см ³) | w, мм | $\sigma_{m,d}$, кН/см ² |
| Класична методика | 88 747×10 ⁵ (85 333,3) | 225,4 | 1,41 | - | - | - |
| Запропонована методика | - | - | - | 78 746×10 ⁵ (75 717,9) | 254,0 | 1,58 |
| МСЕ з плоскими СЕ № 41 | 88 747×10 ⁵ (85 333,3) | 232 | 1,37 | 78 746×10 ⁵ (75 717,9) | 265 | 1,54 |

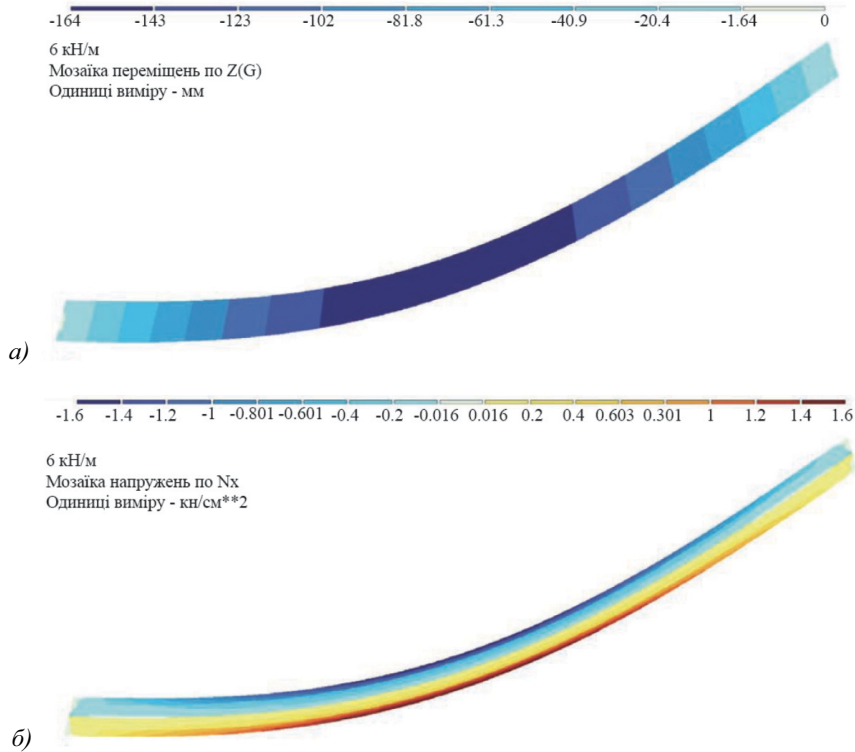


Рис. 4. Ізополя вертикальних деформацій (а) і нормальних напружень вздовж волокон (б) у балках із комбінованої клеєної деревини прольотом 24 м за рівномірною розподіленою навантаження 6 кН/м

Ізополя вертикальних деформацій і нормальні напруження вздовж волокон деревини за результатами чисельного дослідження МСЕ для балки з комбінованої клеєної деревини прольотом 24 м наведено на рис. 4.

Результати розрахунків аналітичними методами за класичною теорією, що фактично враховує переріз із деревини одного класу міцності, та запропонованою методикою розрахунку елементів із комбінованої клеєної

5. Значення прогинів і максимальних нормальних напружень для балок прольотом 60 м за рівномірно розподіленою навантаження 6,0 кН/м

| Методики розрахунку | Однорідна клеєна деревина | | | Комбінована клеєна деревина | | |
|---------------------------|---------------------------------------|----------|----------------------------|---------------------------------------|----------|----------------------------|
| | EI (Wx), кНсм² (см³) | w, мм | $\sigma_{m,d}$, кН/см² | EI (Wx), кНсм² (см³) | w, мм | $\sigma_{m,d}$, кН/см² |
| Класична методика | $363\,506 \times 10^5$ (218 453,3) | 278,5 | 1,24 | - | - | - |
| Запропонована методика | - | - | - | $322\,546 \times 10^5$ (193 837,9) | 313,9 | 1,39 |
| МСЕ з плоскими СЕ № 41 | $363\,506 \times 10^5$ (218 453,3) | 288 | 1,20 | $322\,546 \times 10^5$ (193 837,9) | 330 | 1,36 |

деревини, з урахуванням приведених характеристик поперечного перерізу та приведенного модуля пружності, та розрахунком за допомогою МСЕ у ПК ЛІРА–САПР узагальнено для кожного з прольотів балок, що досліджуються, у таблицях 3, 4 і 5.

Наведені в таблицях 3 і 4 результати розрахунку балок із комбінованої клеєної деревини за запропонованою аналітичною методикою із застосуванням приведених геометричних характеристик поперечного перерізу, які визначають за формулами (1) – (3) та приведенного модуля пружності (4), й методом скінченних елементів у ПК ЛІРА–САПР, показали розбіжність у межах 5 %.

Висновки і перспективи. Як видно з одержаних результатів, розрахунок методом скінченних елементів у ПК ЛІРА–САПР дає досить високий збіг (у межах 5 %) з наявною методикою при розрахунку елементів із деревини одного класу міцності, а відповідно може бути застосований для аналізу елементів із комбінованої клеєної деревини, що і було виконано. Різниця одержаних результатів розрахунку комбінованої клеєної деревини за запропонованою методикою та методикою, яку застосовували раніше, досягає 20 % і більше, що для аналітичних розрахунків є досить суттєвим показником. Підтверджено високий рівень збігу (в межах 5 %) запропонованої аналітичної методики з визначенням приведених характеристик перерізу за формулами (1) – (3) з результатами, одержаними методом скінченних елементів для різних перерізів та прольотів балок, що дає змогу стверджувати про доцільність її застосування в інженерних розрахунках.

Список літератури

- DBN V.2.6-161:2017. (2017). *Wooden structures. Substantive provisions*. Kyiv: Ukrarchbudinform [in Ukrainian].
- DSTU B.V.2.6-217-2016. (2016). *Design of building structures from solid and glued timber*. Kyiv: Ukrarchbudinform [in Ukrainian].
- DSTU-NB.V.2.6-184:2012. (2013). *Constructions from solide and glued timber. Design guide*. Kyiv: Ukrarchbudinform [in Ukrainian].
- Klimenko, V. Z. (2009). Domestic experience in the introduction of plywood structures in capital construction. *Achievements and problems. Construction of Ukraine*, 5, 17–21 [in Ukrainian].
- Koval'chuk, L. M., & Turkovskij, S. B. (1995). *Timber structures in construction*. Moscow: Strojizdat [in Russian].
- Mykhailovskyi, D. V. (2014). Prospects for the use of wood as a building material. *Scientific Journal "Bulletin of Sumy National Agrarian University". Series "Construction"*, 10 (18), 100–105 [in Ukrainian].
- Mykhailovskyi, D. V. (2016). World experience and prospects for the development of multi-storey wooden construction. *Bulletin of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 61, 270–277 [in Ukrainian].
- Mykhailovskyi, D. V. (2017). Application of wood and wood materials in construction. *International Information and Technical Journal Equipment and tools for professionals (woodworking)*, 4/199, 40–44 [in Ukrainian].
- Permyakov, V. A., & Klimenko, V. Z. (2005). State and prospects of using building timber structures in Ukraine. *Journal of Construction Economics*, 4, 36–41 [in Ukrainian].
- VNIINTPI Gosstroya SSSR. (1989). *Glued timber spatial structures of coatings of buildings and structures*. Moscow [in Russian].
- VNIINTPI Gosstroya SSSR. (1989). *Timber structures of bridges and overpasses*. Moscow [in Russian].

Bilyk, S. I., Mykhailovskyi, D. V. (2020). Engineering methods of calculation for elements from combined glued timber. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 11 (2), 79–90. <https://doi.org/10.31548/forest2020.02.079>.

Extensive world experience in the implementation of building structures made of timber, in particular glued timber, for various purposes confirms the feasibility of their use. This is facilitated by the fact that glued timber effectively accumulates the positive properties of timber as a structural material level the shortcomings of solid timber. One of the types of constructions of glued timber are constructions of combined glued timber.

Taking into account the structure and features of elements of combined glued timber of rectangular cross section, for a detailed analysis of the stress-strain state, a method is proposed, which consists in applying to standard formulas for calculating the reduced cross-sectional characteristics: reduced area, reduced moment of inertia, reduced moment of resistance. To calculation, the elements of combined glued timber of rectangular cross section according to the second limit state (serviceability), it is proposed to use the reduced modulus of elasticity of the section to the boards of the outer layers.

To analyze the proposed method, a number of numerical studies of beams of combined and glued timber of the same strength class using analytical calculation methods and using the finite element method in the software package LIRA-CAD, using three-dimensional and flat finite elements.

Numerical studies show that the results of calculations of beams of combined glued and glued timber of the same strength class differ within 20% in the direction of increasing the values of deflections and normal stresses in the elements of combined glued timber.

Finite element calculations in the software package LIRA-CAD beams of combined and glued timber of the same strength class modeled volumetric and flat showed almost complete coincidence of results with a discrepancy of up to 2%, which suggests the need to significantly simplify the modeling, set elements from glued timber with flat finite elements.

It is confirmed that the analytical calculation of beams of combined glued timber is recommended to be carried out according to the proposed method. The proposed technique allows to take into account the thickness and mechanical characteristics for the strength class of each board of which the glued cross section of the element, which significantly expands the range of use of combined glued timber.

The high level of coincidence (within 5%) of the proposed analytical method with determination of the given cross-sectional characteristics with the results obtained by the finite element method for different cross-sections and spans of beams is confirmed, which allows to assert the expediency of its application in engineering calculations. In addition, the modeling of structures made of combined glued timber is possible with rod elements with the provision of the reduced modulus of elasticity according to the proposed method, which greatly simplifies the calculation of complex rod systems.

Keywords: glued timber, analytical calculation method, finite element method, glued timber structures, geometric cross-sectional characteristics, modulus of elasticity.

Отримано: 2020-03-27