

УДК 624.011

Д. В. Михайловський

д.т.н., професор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3151-8630>

Кафедра металевих і дерев'яних конструкцій

Київський національний університет будівництва та архітектури, проспект Повітряних Сил, 31, Київ, Україна, 03037

М. А. Комар

доктор філософії, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3631-8999>

молодший науковий співробітник

ДП ДНТЦ ЯРБ

П. С. Гомон*

докторант, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5312-0351>

Кафедра металевих і дерев'яних конструкцій

Київський національний університет будівництва та архітектури, проспект Повітряних Сил, 31, Київ, Україна, 03037

*автор-кореспондент, e-mail: p.s.homon@nuwm.edu.ua

Чисельне моделювання деформування армованих дерев'яних балок з цільної та клеєної деревини

Цитувати як:

Михайловський, Д. В., Комар, М. А., Гомон, П. С. (2025). Чисельне моделювання деформування армованих дерев'яних балок з цільної та клеєної деревини. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 155-170. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-15](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-15)

© 2025, Д. В. Михайловський, М. А. Комар, П. С. Гомон.

Анотація. У статті розглядаються результати чисельного моделювання деформування дерев'яних балок з клеєної та цільної деревини, виконаного за допомогою програмного комплексу ЛІРА-САПР 2024 R2.3, що використовує метод скінчених елементів (МСЕ). Визначено можливість застосування цього програмного комплексу для проектування армованих конструкцій з деревини, що є актуальним питанням для реконструкції та підсилення будівельних елементів. Моделювання дозволяє детально аналізувати напружено-деформований стан конструкцій, прогнозувати їх поведінку під навантаженням, а також порівнювати результати з експериментальними дослідженнями та традиційними деформаційними методиками. Процес моделювання був здійснений з урахуванням ортотропії деревини, для чого використовувалися об'ємні скінчені елементи, що описують механічні характеристики матеріалу. Зокрема, для деревини були враховані модулі пружності вздовж та впоперек волокон, а також коефіцієнти Пуассона, визначені експериментальними шляхами. Для армованих елементів використовувалися аналогічні елементи, що моделюють вуглецеву стрічку та сталеву арматуру. Отримані результати чисельного моделювання були порівняні з

даними експериментальних досліджень та результатами, отриманими за допомогою деформаційної методики. Статистичний аналіз показав, що чисельне моделювання в ПК ЛІРА-САПР має середнє відхилення від експериментальних даних на рівні 21% для балок з клеєної деревини та 6,5% для деформаційної методики. Для армованих балок відхилення становить 29% для МСЕ і 7,3% для деформаційної методики. Результати чисельного моделювання показали, що програмний комплекс ЛІРА-САПР дозволяє точно визначати напруження та деформації дерев'яних конструкцій, однак деформаційна методика продемонструвала кращу точність для армованих елементів. Статистичний аналіз підтвердив, що обидва підходи є ефективними для проектування, зокрема для армованих конструкцій з деревини, при цьому деформаційна методика є більш точною в умовах підвищеного навантаження. Визначено, що для проектування армованих дерев'яних конструкцій обидва підходи можуть бути використані в залежності від вимог до точності та швидкості моделювання.

Ключові слова: дерев'яні балки, переміщення, клеєна деревина, армовані балки з деревини.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. В нормативних документах України, щодо проектування конструкцій з цільної та клеєної деревини [1-2] відсутні вказівки, щодо розрахунку армованих елементів та конструкцій, не дивлячись на явну ефективність такого прийому при реконструкції, підсиленні і новому будівництві. Для верифікації методики моделювання деформування згинальних дерев'яних елементів було проведено числове дослідження на відомому програмному комплексі ПК ЛІРА-САПР 2024 R2.3, що використовує метод скінчених елементів (далі – МСЕ). Програмний комплекс дозволяє визначати лінійні переміщення та напружено-деформований стан конструкцій, що проектуються, шляхом використання різного виду скінчених елементів. Отримані результати можна використати для верифікації моделювання в ЛІРА-САПР, а також порівнянні чисельного моделювання з деформаційними методиками, які описані в роботах [3-12], тим самим підтверджуючи доцільність їх використання.

Мета і завдання дослідження. На даний момент одним з найпопулярніших програмних комплексів у сфері проектування конструкцій в Україні є програмний комплекс ЛІРА-САПР, який використовує МСЕ. Його використання дозволяє швидко і надійно проектувати металеві та залізобетонні конструкції. Проектування таких конструкцій описано в роботі [13]. Водночас програмний комплекс дозволяє моделювання і конструкцій з цільної і клеєної деревини. Приклади моделювання дерев'яних конструкцій МСЕ представлені в роботах [14-19]. Аналізуючи роботи авторів, а також узагальнивши відгуки проектувальників, можна дійти висновку, що програмний комплекс є

сучасним інструментом в проектуванні будівель і споруд. Тому метою даної статті стало проведення чисельного моделювання за допомогою ПК ЛПРА-САПР, а також порівняння отриманих результатів з експериментальними дослідженнями [20-22] та деформаційними методиками, для вдосконалення процесу проектування.

Матеріали та методи

Методика чисельного моделювання за допомогою МСЕ. Одним з самих популярних скінчених елементів (далі – СЕ), які можуть найточніше описати роботу матеріалу та встановити напружено-деформований стан є СЕ №36 ПК ЛПРА-САПР. Об’ємний СЕ №36 дозволяє описати деревину, як ортотропний пружний матеріал, який враховує при розрахунку об’ємний напружено-деформований стан (далі – НДС) елемента. При цьому для описання матеріалу деревини слід задавати основні характеристики матеріалу, до яких входять: модуль пружності деревини вздовж волокон $E_{1,w}$, модулі пружності деревини впоперек волокон $E_{2,w}, E_{3,w}$, модулі зсуву G_w та коефіцієнти Пуассона деревини ν_w . Для чисельного моделювання деформацій деревини було використано повздовжні коефіцієнти пружності, які були визначені раніше шляхом експериментального випробування деревини, а також прийняті табличні значення модулів пружності деревини поперек волокон, модулі зсуву та коефіцієнти Пуассона. Всі значення пружних характеристик деревини занесені до таблиці 1. Для описання характеристик матеріалів стрічки, а також арматури використано також об’ємні скінчені елементи (СЕ) №36. Елементи задавались, як пружний матеріал з модулями пружності для вуглецевої стрічки та сталевий арматури відповідно E_{arm}, E_c та коефіцієнтами Пуассона ν_{arm}, ν_c . Характеристики вуглецевої стрічки та сталі занесена до табл. 1.

При створенні чисельної моделі експериментально досліджуваних балок з використанням ПК ЛПРА САПР, були збережені всі розміри елемента, а також розміщення та режим прикладання навантаження. Навантаження в чисельно змодельованій балці прикладалось через пластину на відстані 105 см від краю елемента, шляхом прикладання навантаження, відповідно до схеми завантаження в експериментальній частині. На відстані 15 см від краю були встановлені жорсткі в’язі до нижніх планок, які в реальному експерименті відповідали опорам балки. Деревина балки та арматура була змодельована об’ємними елементами розміром 1 см³. Так, як поперечний переріз арматури в чисельно змодельованій балці був більший за прийнятий об’ємний елемент, то було застосовано коефіцієнт приведення 1,13 до модуля пружності арматури, який і враховував значення додаткової площі арматури. Числові моделі ПК ЛПРА

САПР для досліджуваних балок SB, GB показано на рисунку 1 та для балки SRB на рис. 2.

Таблиця 1. Прийняті пружні та деформаційні характеристики матеріалів для моделювання балок

Змодельована балка	Модуль пружності деревини, $E_{1,w}$, МПа	Модуль пружн. впоперек волокон, $E_{2,w}, E_{3,w}$, МПа	Коефіцієнт Пуассона ν_{12}, ν_{21}	Модуль пружн. армат., E_{arm} , МПа	Коефіцієнт Пуассона ν_{arm}	Модуль пружн. вуглец. стрічки, E_c , МПа	Коефіцієнт Пуассона ν_c
SB	15100	400	$\nu_{12} = 0,018$ $\nu_{21} = 0,48$	-	-	-	-
SRB-12	15100	400		198000	0,3	165000	0,3
GB-A	13000	400		-	-	-	-
GB-B	13000	400		-	-	-	-
GRB-12A	13000	400		205000	0,3	165000	0,3
GRB-12B	13000	400		205000	0,3	165000	0,3

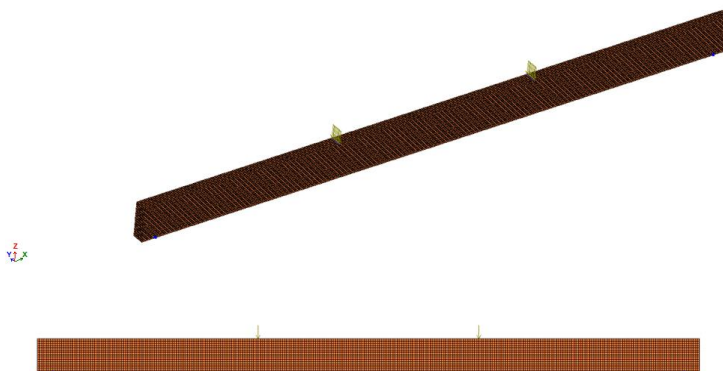


Рис. 1. Модель дерев'яних балок SB, GB в ПК ЛІРА САПР

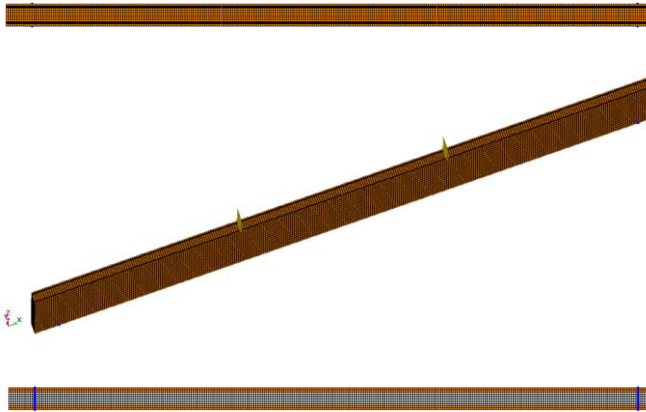


Рис. 2. Модель комбінованоармованої дерев'яної балки SRB в ПК ЛІРА САПР

Результати та обговорення

Зображення отриманих прогинів згинальних дерев'яних елементів показано на рис. 3 підсилених балок SB та невідсилених балок з цільної деревини SBR12 при навантаженні на балку 10кН. Порівняння максимальних прогинів отриманих чисельним моделювання та прогинами отриманим за деформаційною методикою, а також експериментальним шляхом для балки SB зображені на рис. 4. Ці ж дані по балці SBR12 наведено на рис. 5. Проведені статистичні порівняння між отриманими результатами, показали, що максимальний прогин визначений за допомогою ПК ЛІРА-САПР по всьому діапазоні завищений, як і в запропонованій деформаційній методиці. Середнє відхилення прогину по балці SB складає для ПК ЛІРА-САПР $\Delta f_{lira-exp} = 3,63$ мм, а для запропонованої деформаційної методици $\Delta f_{teor-exp} = 1,1$ мм, для армованої балки SBR ці значення рівні $\Delta f_{lira-exp} = 4,49$ мм, $\Delta f_{teor-exp} = 1,87$ мм.

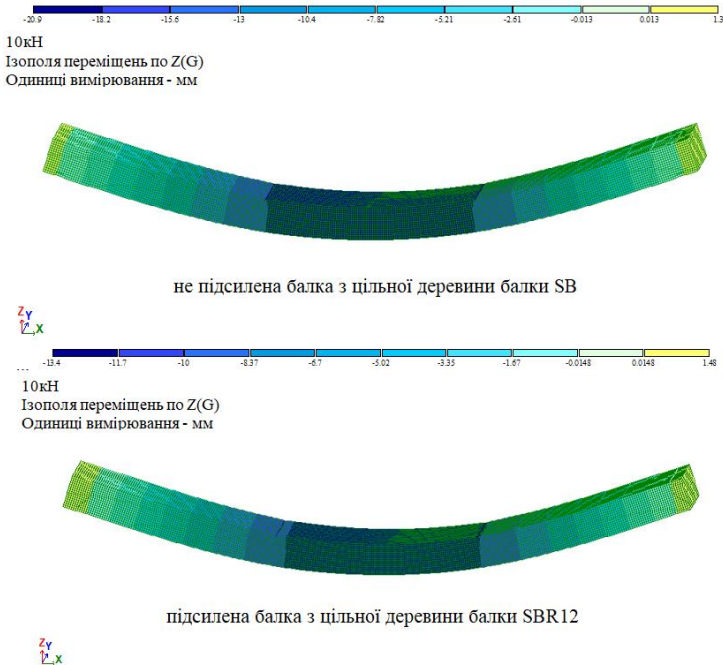


Рис. 3. Ізополя вертикальних переміщень (прогинів) отриманих на ПК ЛІРА-САПР для балок з цільної деревини SB та SBR

При цьому різниця між методиками на невисоких рівнях навантаження для досліджувальних балок є невеликою, при збільшенні ж навантаження деформаційна методика дає більш наближений до експериментальних даних результат. Отримані вертикальні переміщення за допомогою ПК ЛІРА САПР для серії балок з клеєної деревини зображено на рис. 6.

При статистичному порівнянні отриманих результатів балок з клеєної деревини, встановлено, що максимальний прогин, визначений за допомогою ПК ЛІРА-САПР, по всьому діапазоні визначення завищують, як і випадку з цільною деревиною. Запропонована теорія на базі деформаційної методики також завищує максимальні переміщення елемента.

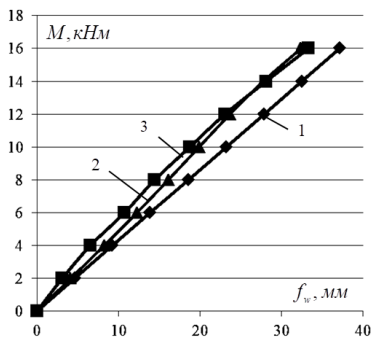


Рис. 4. Порівняння результатів числового моделювання максимальних прогинів балки SB деформаційної моделі та ПК ЛІРА САПР (1 - ПК ЛІРА САПР, 2 – деформаційна модель, 3 – експериментальна балка)

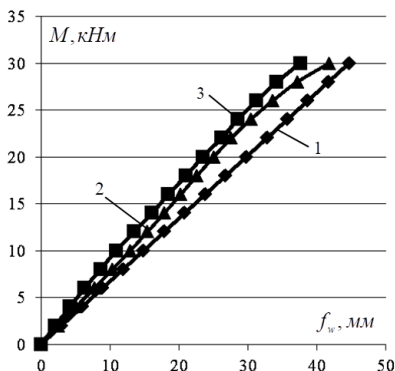


Рис. 5. Порівняння результатів числового моделювання максимальних прогинів балки SBR12 деформаційної моделі та ПК ЛІРА САПР (1 - ПК ЛІРА САПР, 2 – деформаційна модель, 3 – експериментальна балка)

Середнє відхилення прогину по балці GB-A складає для ПК ЛІРА САПР $\Delta f_{lira-exp} = 2,69$ мм, а для запропонованої методики $\Delta f_{teor-exp} = 2,63$ мм, для балки GB-B $\Delta f_{lira-exp} = 1,73$ мм, $\Delta f_{teor-exp} = 1,92$ мм. Для армованих балок середнє значення відхилення прогину по балці GBR-12A $\Delta f_{lira-exp} = 5,0$ мм, $\Delta f_{teor-exp} = 0,8$ мм, а для балки GBR-12B $\Delta f_{lira-exp} = 0,63$ мм, $\Delta f_{teor-exp} = 5,57$ мм.

Результати, отримані за допомогою ПК ЛІРА-САПР та деформаційною методикою, показали задовільну збіжність для клеєних непідсилених балок. Запропонована ж деформаційна методика для підсилених балок показала кращий результат у визначенні прогинів на відміну від ПК ЛІРА-САПР. Графіки отриманих прогинів визначені за різними методиками та експериментальним значенням зображено на рис.7 для неармованих балок та рис.8 для армованих балок.

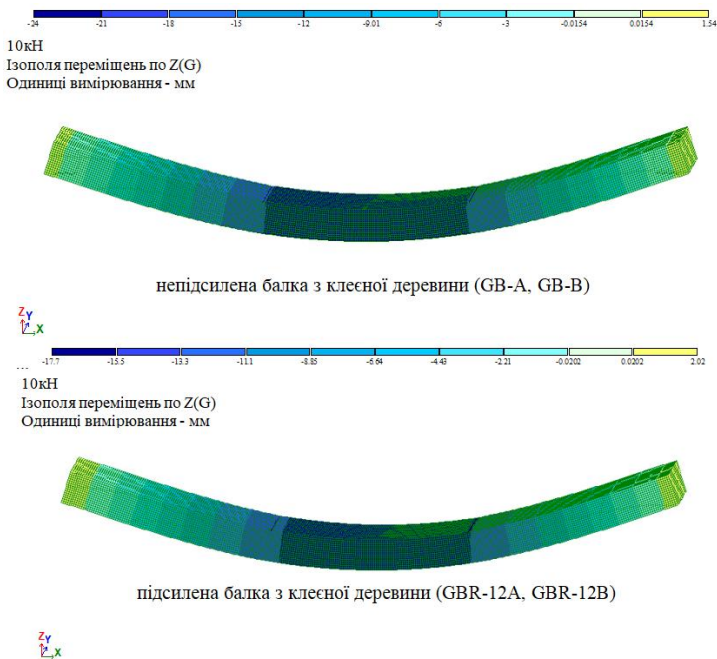


Рис. 6. Ізополю вертикальних переміщень (прогинів) отриманих на ПК ЛІРА-САПР для балок з цільної деревини GB та GBR

Проведено статистичний аналіз отриманих результатів чисельного моделювання МСЕ та натурального експерименту. Щоб зменшити вплив неточності вимірювальних приладів на невисоких рівнях для розрахунку розбіжностей було прийнято дані дослідження, які сягали значень моменту більше 10 кНм. Результати прогинів та вертикальних переміщень наведені в табл. 2.

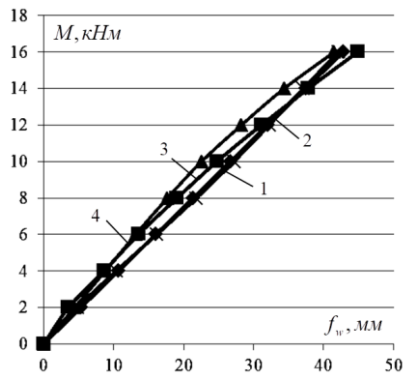


Рис. 7 Порівняння результатів числового моделювання максимальних прогинів балок GB-A, GB-B деформаційної моделі та ПК ЛІРА САПР (1 – прогин ПК ЛІРА САПР, 2 – деформаційна модель, 3,4 – експериментальна балка GB-B, GB-A)

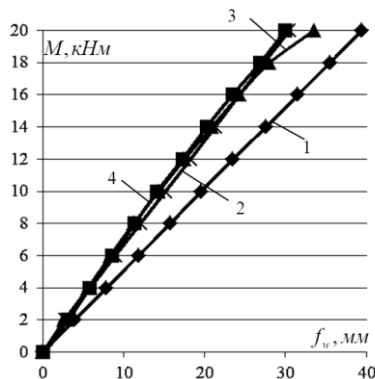


Рис. 8 Порівняння результатів числового моделювання максимальних прогинів балок GBR12A, GBR12B деформаційної моделі та ПК ЛІРА САПР (1 – прогин ПК ЛІРА САПР, 2 – деформаційна модель, 3,4 – експериментальна балка GBR12A, GBR12B)

Проаналізувавши результати можна дійти до висновків, що загальна розбіжність між експериментальними дослідженнями та деформаційними методиками складає 6,5%, для визначення за допомогою ПК ЛІРА САПР 21%. При цьому для дерев'яних не армованих балок відхилення в прогині для деформаційних методик склало 5,6%, а для ПК ЛІРА САПР 12%. Для армованих же балок відхилення деформаційних методик 7,3%, а для ПК ЛІРА САПР 29%. Обидва підходи мають хорошу збіжність результатів,

проте можна сказати, що деформаційна методика є більш точнішою, особливо при проектуванні армованих дерев'яних елементів.

Таблиця 2. Статистичне порівняння результатів числового моделювання ПК ЛІРА САПР та деформаційної моделі для балок

№ п/п	Згинальний момент, кНм	Прогин теоретичний $f_{теор}$, мм	Прогин експерт. $f_{експ}$, мм	Прогин ПК ЛІРА САПР $f_{ЛІРА}$, мм	Відхилення деф. методики від експериментального значення, %	Відхилення ЛІРИ від експериментального значення, %
SB						
1	10	19,87	18,74	23,22	6,0	23,9
2	14	27,74	28,09	32,46	1,2	15,6
3	16	32,37	33,26	37,1	2,7	11,5
SBR						
4	10	12,95	10,91	14,89	18,7	36,5
5	14	17,88	16,12	20,84	10,9	29,3
6	18	22,63	21,05	26,8	7,5	27,3
7	22	27,57	26,16	32,76	5,4	25,2
8	26	33,62	31,28	38,71	7,5	23,8
9	30	41,76	37,6	44,67	11,1	18,8
GB-A						
10	10	27,17	22,55	26,67	20,5	18,3
11	14	37,09	34,35	37,44	8,0	9,0
12	16	42,11	41,51	42,79	1,4	3,1
GB-B						
13	10	27,17	24,75	26,67	9,8	7,8
14	14	37,09	37,82	37,44	1,9	1,0
15	16	42,11	44,85	42,79	6,1	4,6
GBR12A						
16	10	15,17	14,35	19,56	5,7	36,3
17	14	21,28	20,88	27,59	1,9	32,1
18	18	27,35	28,04	35,5	2,5	26,6
19	20	30,47	33,51	39,44	9,1	17,7
GBR12B						
20	10	15,17	14,13	19,56	7,4	38,4
21	14	21,28	20,23	27,59	5,2	36,4
22	18	27,35	26,89	35,5	1,7	32,0
23	20	30,47	29,96	39,44	1,7	31,6

Висновки

1. За допомогою програмного комплексу ЛІРА-САПР можна достовірно провести чисельне моделювання роботи дерев'яної комбіновано-армованої балки, отримавши при цьому значення напружень, які виникають в різних об'ємних елементах, а також визначити переміщення цих об'ємних елементів з урахуванням ортотропії деревини.

2. Результати отримані шляхом чисельного моделювання максимальних вертикальних переміщень показали задовільну збіжність з результатами експериментальних досліджень. Збіжність результатів складає близько 21% для ПК ЛІРА САПР та 6,5% для аналітичних деформаційних методик, що для деревини є хорошим результатом. При цьому значення отримані МСЕ в ПК ЛІРА-САПР мають відхилення в більшу сторону у всіх балках, що дозволяє забезпечити більшу надійність у визначенні граничного прогину.

3. В загальному, обидві методики визначення деформування є актуальними, показують хороші результати у визначенні максимальних прогинів. Проте до переваг ПК ЛІРА САПР можна віднести автоматизацію, універсальність і швидкість виконання, а до використання деформаційних методик більшу точність моделювання і можливість аналізу процесу руйнування.

4. Запропонована методика моделювання МСЕ в ПК ЛІРА САПР дозволяє припустити можливість застосування його для моделювання будь яких армованих конструкцій з цільної та клеєної деревини.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. DBN V.2.6-161:2017 “Derev'yani konstruktsiyi. Osnovni polozhennya” - Kyuiv, “Ukrarkhbudinform” 2017. – 111 s.

2. DSTU-N B V.2.6-184:2012 “Konstruktsiyyi z tsi'l'noyi i kleyenoyi derevyny. Nastanova z proektuvannya” - Kyiv, “Ukrarkhbudinorm” 2013. – 120s.
3. Pavluk A., Gomon S., Ziatuk Y., Gomon P., Homon S., Kulakovskiy L., Iasnii V., Yasniy O., Imbirovych N. Stiffness of solid wood beams under direct and oblique bending conditions // Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen. – 2023. – Vol. 65(2). – P. 109–122. <https://doi.org/10.2478/afx-2023-0014>
4. Sobczak-Piąstka J., Pavluk A., Gomon S.S., Gomon P., Homon S., Lynnyk I. Changing the position of the neutral line of beams made of glued wood in conditions of oblique bending // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2928. – Article No. 080007. <https://doi.org/10.1063/5.0170371>
5. Gomon S., Homon S., Gomon P., Shkirenko S. The basis of the deformation method for calculating elements from wood under cross-section bending // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7(4.8). – P. 109–114. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.8.27223>
6. Homon P.S., Polishchuk M.V. Napruzhenno-deformovanyi stan balok iz derevyny z kombiinovanyim armuvanniam na riznykh rivniakh zavantazhennia // Suchasni tekhnologii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi. – Lutsk : LNTU, 2022. – Vyp. 17. – S. 23–30. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-7\(17\)-03](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-7(17)-03)
7. Homon P.S. Aproksymatsiia diagramy "moment-kryvyna" derevianykh armovanykh ta nearmovanykh balok priamokutnoho pererizu // Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia. – Kyiv: KNUBA, 2021. – № 78. – S. 157–165. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2021.78.157-165>
8. Homon P.S. Modeliuvannia roboty derevianoï balky z poslidovnym zavantazhenniam // Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia. – Kyiv: KNUBA, 2022. – № 80. – S. 159–165. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2022.80.159-165>
9. Homon P.S. Sumisnist roboty armatury ta derevyny v balkakh, yaki pratsiuiut za poperechno zhyu // Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannia. – Kyiv: KNUBA, 2022. – Vyp. 63. – S. 327–335. <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2022.63.327-335>
10. Homon P. Determination of tangential stresses in reinforced flexible wooden elements taking into account the nonlinearity of material deformation // Visnyk Ternopil'skoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. – Ternopil : TNTU, 2022. – Vyp. 106. – S. 125–132. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2022.02.125
11. Homon P., Babych Ye., Polishchuk M., Kysliuk D.Y., Bandura I., Pakholiuk O., Shevchuk A. Deformability of a glued wooden beam with pre-stressed composite reinforcement // Procedia Structural Integrity. – 2024. – Vol. 59. – P. 551–558. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.078>
12. Homon P.S. Analiz vykorystannia metalevoi ta nemetalevoi armatury dlia pidsylennia derevianykh elementiv ta konstruktsii // Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannia. – Kyiv: KNUBA, 2022. – Vyp. 62. – S. 322–332. <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2022.62.322-332>
13. Barabash M.S., Medvedenko D.V., Paliienko O.I. Prohramni kompleksy SAPFIR i LIRA-SAPR – osnova vitchyznianskykh BIM-tekhnologii : monohrafiia. – Kyiv: Nats. aviats. Unt, 2023. – 156 s.
14. Mykhailovskiy D. Method of calculation of panel buildings from cross-laminated timber // Opir materialiv i teoriia sporud: naukovo-tekhnichniy zbirnyk. – Kyiv: KNUBA, 2021. – Vyp. 107. – S. 75–88. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2021.107.75-88>

15. Mykhailovskyi D.V., Komar A.A. Perekhresno kleiedoshchati paneli ta metody yikh rozrakhunku // Budivelni konstruktсии. Teoriia i praktyka: zbirnyk naukovykh prats / KNUBA. – 2018. – Vyp. 2. – S. 146–153. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.2.2018.146-153>

16. Gomon S. S., Pavlyuk A. P. Robota balok z kleynoyi derevyny v umovakh kosoho z-hynu. Visnyk L'vivs'koho natsional'noho ahrarnoho universytetu: zb. Nauk. prats'. – L'viv, 2018. – Vyp. 19. – S. 84–89. <https://doi.org/10.31734/architecture2018.19.084>

17. Mykhailovskyi D., Komar M. Analysis of the stress-strain state of laminated timber beams reinforced with composite tapes // Academic Journal Industrial Machine Building, Civil Engineering. – 2022. – № 2(57). – P. 90–97. <https://doi.org/10.26906/znp.2021.57.2590>

18. Mykhailovskyi D.V., Matiushchenko D.M. Metodyka stvorennia rozrakhunkovoi skhemy hnutokleienykh ram za dopomohoiu metodu skinchenykh elementiv. Budivelni konstruktсии. Teoriia i praktyka: zbirnyk naukovykh prats. KNUBA. – 2018. – Vyp. 2. – S. 99–107. https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/18/2018_2.pdf

19. Mykhailovskyi D. V., Komar M. A. Armuvannia konstruktсии z derevyny kompozytnymy materialamy, stan i perspektyvy. Budivelni konstruktсии, teoriia i praktyka, № 9, KNUBA, 2021, S. 72–80. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.9.2021.72-80>

20. Mykhailovskyi D.V., Homon P.S. Doslidzhennia roboty poperedno-napruzhenykh derevianykh balok z kleienoї derevyny // Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia. – Kyiv: KNUBA, 2024. – № 87. – S. 246–254. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2024.87.246-254>

21. Mykhailovskyi D.V., Homon P.S. Veryfikatsiia metodyk modeliuвання armovanykh ta narmovanykh derevianykh balok // Resursoekonomni materialy, konstruktсии, budivli ta sporudy. – Rivne : NUVHP, 2024. – Vyp. 46. – S. 237–249. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i46.28>

22. Babych Ye.M., Homon P.S. Eksperymentalni doslidzhennia poperedno napruzhenykh kombinovano armovanykh balok z tsilnoi derevyny // Resursoekonomni materialy, konstruktсии, budivli ta sporudy. – Rivne : NUVHP, 2024. – Vyp. 45. – S. 96–105. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i45.11>

Література

1. ДБН В.2.6-161:2017 “Дерев’яні конструкції. Основні положення” - Київ, “Укрархбудінформ” 2017. – 111 с.

2. ДСТУ-Н Б В.2.6-184:2012 “Конструкції з цільної і клеєної деревини. Настамова з проєктування” - Київ, “Укрархбудінформ” 2013. – 120с.

3. Pavluk A., Gomon S., Ziatyuk Y., Gomon P., Homon S., Kulakovskiy L., Iasnii V., Yasnyy O., & Imbirovych N. Stiffness of solid wood beams under direct and oblique bending conditions. Acta Facultatis Xylogiae Zvolen, 2023, 65(2), 109–122. <https://doi.org/10.2478/afx-2023-0014>

4. Sobczak-Piątka J., Pavluk A., Gomon S.S., Gomon P., Homon S., Lynnyk I. Changing the position of the neutral line of beams made of glued wood in conditions of oblique bending. AIP Conf. Proc. 2928, 080007, 2023. <https://doi.org/10.1063/5.0170371>

5. Gomon S., Gomon S., Gomon P., Shkirenko S. The basis of the deformation method for calculating elements from wood under cross-section bending. International

Journal of Engineering & Technology, 2018, Vol. 7 (4.8), P. 109–114.
<https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.8.27223>

6. Гомон П.С., Поліщук М.В. Напружено-деформований стан балок із деревини з комбінованим армуванням на різних рівнях завантажень. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. – Луцьк: ЛНТУ, 2022. – Вип. 17. – С. 23–30. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-7\(17\)-03](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-7(17)-03)

7. Гомон П.С. Апроксимація діаграми «момент-кривина» дерев'яних армованих та неармованих балок прямокутного перерізу. Містобудування та територіальне планування. – Київ: КНУБА, 2021. – № 78. – С. 157–165. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2021.78.157-165>

8. Гомон П.С. Моделювання роботи дерев'яної балки з послідовним завантаженням. Містобудування та територіальне планування. – Київ: КНУБА, 2022. – № 80. – С. 159–165. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2022.80.159-165>

9. Гомон П.С. Сумісність роботи арматури та деревини в балках, які працюють за поперечного згину. Сучасні проблеми архітектури та містобудування. – Київ: КНУБА, 2022. – Вип. 63. – С. 327–335. <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2022.63.327-335>

10. Gomon, P. Determination of tangential stresses in reinforced flexible wooden elements taking into account the nonlinearity of material deformation. Вісник Тернопільського національного технічного університету. – Тернопіль: ТНТУ, 2022. – Вип. 106. – С. 125–132. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2022.02.125

11. Gomon P., Babych Ye., Polischuk M., Kysliuk D.Y., Bandura I., Pakholiuk O., Shevchuk A. Deformability of a glued wooden beam with pre-stressed composite reinforcement. Procedia Structural Integrity, 2024, Vol. 59, P. 551–558. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.078>

12. Гомон П.С. Аналіз використання металевої та неметалевої арматури для підсилення дерев'яних елементів та конструкцій. Сучасні проблеми архітектури та містобудування. – Київ: КНУБА, 2022. – Вип. 62. – С. 322–332. <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2022.62.322-332>

13. Барабаш М.С., Медведенко Д.В., Палієнко О.І. Програмні комплекси САПФІР і ЛІРА-САПР – основа вітчизняних ВІМ-технологій: монографія. – Київ: Нац. авіац. ун-т, 2023. – 156 с.

14. Михайловський Д. Method of calculation of panel buildings from cross-laminated timber. Опір матеріалів і теорія споруд: науково-технічний збірник. – Київ: КНУБА, 2021. – Вип. 107. – С. 75–88. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2021.107.75-88>

15. Михайловський Д.В., Комар А.А. Перехресно клеєдощаті панелі та методи їх розрахунку. Будівельні конструкції. Теорія і практика: збірник наукових праць / КНУБА. – 2018. – Вип. 2. – С. 146–153. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.2.2018.146-153>

16. Гомон С. С., Павлюк А. П. Робота балок з клеєної деревини в умовах косоного згину. Вісник Львівського національного аграрного університету: зб. наук.

праць. – Львів, 2018. – Вип.. 19. – С. 84–89.
<https://doi.org/10.31734/architecture2018.19.084>

17. Mykhaylovskiy D., Komar M. Analysis of the stress-strain state of laminated timber beams reinforced with composite tapes. Academic Journal Industrial Machine Building, Civil Engineering, 2022, № 2(57), P. 90–97.
<https://doi.org/10.26906/znp.2021.57.2590>

18. Михайловський Д.В., Матющенко Д.М. Методика створення розрахункової схеми гнукотесних рам за допомогою методу скінчених елементів. Будівельні конструкції. Теорія і практика: Збірник наукових праць / КНУБА. – 2018. – Вип. 2. – С. 99–107. https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/18/2018_2.pdf

19. Д. В. Михайловський, М. А. Комар. Армування конструкцій з деревини композитними матеріалами, стан і перспективи. Будівельні конструкції, теорія і практика № 9 КНУБА, 2021- С. 72-80. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.9.2021.72-80>

20. Михаловський Д.В., Гомон П.С. Дослідження роботи попередньо-напружених дерев'яних балок з клеєної деревини. Містобудування та територіальне планування. – Київ: КНУБА, 2024. – № 87. – С. 246–254.
<https://doi.org/10.32347/2076-815x.2024.87.246-254>

21. Михайловський Д.В., Гомон П.С. Верифікація методик моделювання армованих та неармованих дерев'яних балок. Ресурсоекономі матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне: НУВГП, 2024. – Вип. 46. – С. 237–249.
<https://doi.org/10.31713/budres.v0i46.28>

22. Бабич Є.М., Гомон П.С. Експериментальні дослідження попередньо напружених комбіновано армованих балок з цільної деревини. Ресурсоекономі матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне: НУВГП, 2024. – Вип. 45. – С. 96–105. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i45.11>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 22.05.2025	Received 22.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 23.05.2025	Received in revised form 23.05.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

D. V. Mykhailovskyi

Doctor of Technical Sciences, Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3151-8630>

Department of Metal and Timber Structures

Kyiv National University of Construction and Architecture, 31 Povitria Flots Street, Kyiv, Ukraine, 03037

M. A. Komar

PhD in Technical Sciences, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3631-8999>

Junior Research Fellow

SSTC NRS

P. S. Gomon*

Doctoral Student, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5312-0351>

Department of Metal and Timber Structures

Kyiv National University of Construction and Architecture, 31 Povitria Flots Street, Kyiv, Ukraine, 03037

*corresponding author, e-mail: p.s.homon@nuwm.edu.ua

Numerical FEM modeling of deformation solid and glulam reinforced timber beams

How to Cite:

Mykhailovskiy, D. V., Komar, M. A., Gomon, P. S. (2025). Numerical FEM modeling of deformation solid and glulam reinforced timber beams. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 155-170. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-15](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-15)

Abstract. The article presents the results of numerical modeling of the deformation of wooden beams made of laminated and solid timber, performed using the LIRA-SAPR 2024 R2.3 software suite, which utilizes the finite element method (FEM). The possibility of using this software for the design of reinforced timber structures, an issue relevant to the reconstruction and reinforcement of building elements, is explored. The modeling process enables a detailed analysis of the stress-strain state of structures, predicting their behavior under load, and comparing the results with experimental studies and traditional deformation methods. The modeling was carried out taking into account the orthotropy of timber, for which three-dimensional finite elements were used to describe the material's mechanical properties. Specifically, the elastic moduli along and across the grain of the wood, as well as Poisson's ratios, were incorporated, determined experimentally. Reinforced elements were modeled using analogous elements representing carbon strips and steel reinforcement. The obtained numerical results were compared with experimental data and results derived using the deformation method. Statistical analysis showed that the numerical modeling in the LIRA-SAPR software suite has an average deviation from the experimental data of 21% for laminated timber beams and 6.5% for the deformation method. For reinforced beams, the deviation was 29% for FEM and 7.3% for the deformation method. The results of the numerical modeling showed that the LIRA-SAPR software suite allows for the accurate determination of stresses and deformations in wooden structures; however, the deformation method demonstrated higher accuracy for reinforced elements. Statistical analysis confirmed that both approaches are effective for design, particularly for reinforced timber structures, while the deformation method proves to be more accurate under increased load conditions. It was concluded that for the design of reinforced timber structures, both approaches can be used depending on the required accuracy and modeling speed.

Keywords: timber beams, displacements, glued timber, laminated timber, solid timber, reinforced timber beams