

DOI: 10.32347/2076-815X.2024.87.246-254

УДК 624.011

д.т.н., професор **Михайловський Д.В.**,
mykhailovskyi.dv@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-3151-8630,
Київський національний університет будівництва та архітектури,
к.т.н., доцент **Гомон П.С.**,
p.s.homon@nuwm.edu.ua, ORCID: 0000-0002-5312-0351,
Національний університет водного господарства
та природокористування, м. Рівне

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНИХ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК З КЛЕСНОЇ ДЕРЕВИНИ

Описано експериментальні та теоретичні дослідження роботи попередньо-напружених дерев'яних балок. Описано метод попереднього напруження та методіку проведення експериментальних досліджень. Результати експериментальних досліджень попередньо напруженої дерев'яної дощатоклеїної балки порівняно з результатами її числового моделювання. В статті наведено графіки “момент-кривина” та “момент-деформація (прогин)” для експериментальних даних та чисельно змодельованих. Описано зміну напружено-деформованого стану поперечного перерізу досліджуваного зразка та зображений характер його руйнування.

Ключові слова: балка; попереднє напруження; згинальний елемент; несуча здатність; напружено-деформований стан.

Постановка проблеми. Вже неодноразово було підняте питання актуальності ефективного використання матеріалів в конструкціях. В статтях [1, 2] описано можливості збільшення жорсткості згинальних дерев'яних елементів. Встановлено, що збільшення жорсткості дає змогу збільшення прольоту перекриття, що в свою чергу дасть можливість економити матеріали. Одним з найпопулярніших шлях збільшення жорсткості є армування згинального дерев'яного елемента. Цьому напрямку присвячено роботи [3-7]. Були розроблені варіанти підсилення, а також варіанти попереднього напруження дерев'яних згинальних елементів. Виконано запланований комплекс випробувань дерев'яних неармованих і армованих балок з попереднім напруженням та без попереднього напруження з цільної та клеєної деревини. Більш детальний опис запланованих та виконаних досліджень описано в статті [2].

Постановка завдання. Для аналізу роботи армованих попередньо напружених балок була поставлена задача: провести експериментальні

дослідження з виконанням попереднього напруження комбіновано-армованих згинальних дерев'яних елементів; виконати їх експериментальне дослідження роботи з встановленням напружено-деформованого стану та прогинів; встановити вплив пасивного та попередньо напруженого комбінованого армування на роботу згинальних армованих дерев'яних елементів.

Викладення основного матеріалу. В лабораторії кафедри промислового, цивільного будівництва Національного університету водного господарства та природокористування (далі – НУВГП) було вперше виготовлено попередньо напружений згинальний елемент з клеєної деревини з комбінованим армуванням. Виготовлення попередньо-напруженого зразка виконувалось за допомогою методу, який раніше описано в роботі [8]. За цією методикою виготовлено дерев'яну дощатоклеєну балку, в якій влаштовані два пази під сталеву арматуру в стиснутій зоні. Сталева арматура діаметром 12 мм класу А500С вклеєна за допомогою розчину з піску та епоксидного клею. Після кристалізації клею, що фіксувала сталеву арматуру в повздовжніх пазах балки було навантажено для створення вигину до межі допустимого граничного прогину, що склав для балки $f_m = 18 \text{ мм}$. Після цього в майбутню розтягнуту зону, а поки що ця зона стиснута, була наклеєна композитна вуглецева стрічка Sika CarboDur S-512 за технологією виробника.

Для зручності вклеювання вуглецевої стрічки Sika CarboDur S-512 використано дерев'яні підпорки під місцями прикладання навантаження для створення вигину. Підпорки були розміщені на відстані, щоб можна було легко змонтувати всередині стрічку. Для запобігання проковзування та відриву арматурної композитної вуглецевої стрічки Sika CarboDur S-512 від деревини розтягнутої зони балки було проведено анкетування по краях кріплення вуглецевої стрічки поперечним приклеюванням щонайменше трьох конструктивних шарів цієї стрічки поверх повздовжньої робочої. Вигин та подальший прогин вимірювався за допомогою механічних приладів, а деформації по висоті поперечного перерізу балки та в арматурі за допомогою тензодатчиків.

Для теоретичних розрахунків балки з клеєної деревини на всіх етапах створення попереднього напруження та експлуатації для визначення напружень в різних шарах деревини по висоті поперечного перерізу прийнята пружно-пластична залежність роботи деревини під навантаженням. Моделювання роботи попередньо напруженої балки проходила в такі етапи [9, 10]:

1. Визначено згинальний момент, при якому балка з вклеєною в стиснутій зоні сталеву арматуру досягає граничного прогину для влаштування попереднього вигину.

2. Було визначено напружено-деформований стан вигнутої балки, як у розрахунковому нормальному поперечному перерізі балки, так і в різних перерізах по довжині балки при різних рівнях завантаження. Також в цих поперечних перерізах визначалася кривина, кути повороту, а також прогин на кожному етапі завантаження.

3. Після вклеювання композитної вуглецевої стрічки Sika CarboDur S-512, було додано в розрахунковий переріз армування стрічкою розтягнутої зони. Проведено розрахунок балки по її розвантаженню. Він включав в себе визначення напружено-деформованих стану нормальних поперечних перерізів, прогинів, кривини та кута повороту по довжині балки на різних етапах розвантаження.

Частину ділянки між опорою та місцем прикладання навантаження, було розбито на ділянки, в яких було розраховано напружено-деформовані стани, які пізніше використовувались для визначення кривини в цих перерізах і кутів повороту. Під час обчислення прогинів балка розбивалась на 100 елементарних частинок. Після обчислення напружено-деформованого стану в різних точках по довжині балки, а також після визначення кривини, кутів поворотів елементарних ділянок, зміщень кожної елементарної ділянки визначався прогин кожної точки по довжині балки. В результаті був отриманий від'ємний прогин (вигин) попередньо напруженої балки та напружено-деформований стан розрахункового поперечного перерізу та перерізів по довжині балки. Напружено-деформований стан для такої балки можна охарактеризувати змінною кривиною по довжині згинального елемента. Зміна кривини в розрахунковому поперечному перерізі при завантаженні та розвантаженні елемента з клеєної деревини зображена на рис. 1 за допомогою теоретичного числового моделювання з урахуванням фізико-механічних характеристик деревини, сталі класу А500С та композитної вуглецевої стрічки Sika CarboDur S-512.

Аналізуючи діаграми “момент-кривина” (рис. 1) видно, що експериментальна балка завантажувалась для створення вигину, який був рівний граничному прогину балки, що склав $f_m = 18$ мм і який відповідає навантаженню рівному $M_f = 9,45$ кНм.

Кривина в розрахунковому нормальному поперечному перерізі при такому рівні завантаження для досліджуваної балки з клеєної деревини GRB-12 (Prst) склала $\zeta_{\text{exp},f_m} = -0,0177$ м⁻¹. При цьому рівні навантаження теоретичне отримане значення кривини балки склало $\zeta_{\text{teor},f_m} = -0,01706$ м⁻¹. Рівень завантаження для балки був визначений шляхом ділення діючого моменту $M_f = 9,45$ кНм на максимальний момент, що може сприйняти нормальний розрахунковий

поперечний переріз без армування вуглецевою стрічкою $M_{\max} = 24,98$ кНм. В результаті, рівень завантаження для балки склав $\eta_f = 0,378$.

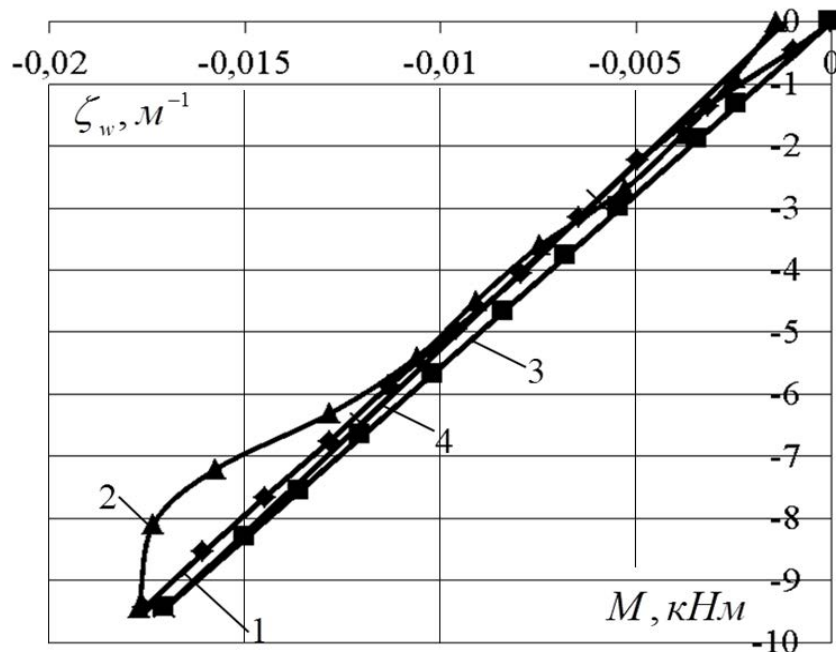


Рис.1 – Графіки “момент-кривина” за попереднього напруження балки з комбінованим армуванням (1, 2 – експериментально визначена крива відповідно при завантаженні та розвантаженні експериментальної балки; 3, 4 – теоретично отримані графіки “момент-кривина” з числовим моделюванням роботи при завантаженні та розвантаженні)

Після зняття навантаження, яке створювало умови для надання попереднього напруження, визначено залишкову кривину в розрахунковому поперечному перерізі балки з клеєної деревини експериментально та теоретично, які відповідно складають $\zeta_{\text{exp},0} = -0,014$ м⁻¹, $\zeta_{\text{teor},0} = -0,012$ м⁻¹. Розбіжність експериментальних даних від теоретичних складала в межах $\pm 10\%$. Проте при розвантаженні балки (рис. 1) було отримано більше розходження в даних на початковому етапі розвантаження за рахунок релаксації волокон деревини. При подальшому зменшенні навантаження експериментальний графік повертається в положення теоретично отриманої кривої.

Шляхом числового моделювання було визначено залишковий вигин, що створився внаслідок надання попереднього напруження в балці GRB-12 (Prst). Теоретично цей залишково-початковий вигин для балки склав $f_{\text{teor},0} = 4,51$ мм, експериментальне значення було $f_{\text{exp},0} = 4,72$ мм.

Після створення попереднього напруження армована балка з клеєної деревини GRB-12 (Prst) випробовувалася експлуатаційним навантаженням на тій самій установці, де було здійснено попереднє напруження. За результатами випробувань було отримано дані відносного деформування шарів деревини по висоті елемента, сталевій арматурі та композитної вуглецевої стрічки Sika

CarboDur S-512, які визначались за допомогою тензодатчиків. Після обробки цих даних побудований графік «момент-кривина» в розрахунковому нормальному поперечному перерізі балки GRB-12 (Prst) (рис.2). Також було змодельовано роботу в розрахунковому нормальному поперечному перерізі балки GRB-12 (Prst) та отримано теоретичний графік роботи досліджуваної балки. Теоретичні та експериментальні графіки «момент-кривина» в розрахунковому нормальному поперечному перерізі балки GRB-12 (Prst) зображені на рис. 2.

З рис. 2 видно, що теоретична та практична отримані криви для балки співпадають, розбіжність в даних складає не більше 7%, при цьому найбільша розбіжність на невисоких рівнях завантаження пов'язане з точністю вимірювання.

За даними співвідношень «момент-кривина» проведено теоретичний розрахунок зростання деформацій (прогину) балки від зростання зовнішнього навантаження. Для числового моделювання роботи було визначено рівень напружено-деформованого стану в розрахунковому нормальному поперечному перерізі балки GRB-12 (Prst) в найбільш завантаженій частині балки, де графік «момент-кривина» співпав під час завантаження з теоретичним (рис. 2).

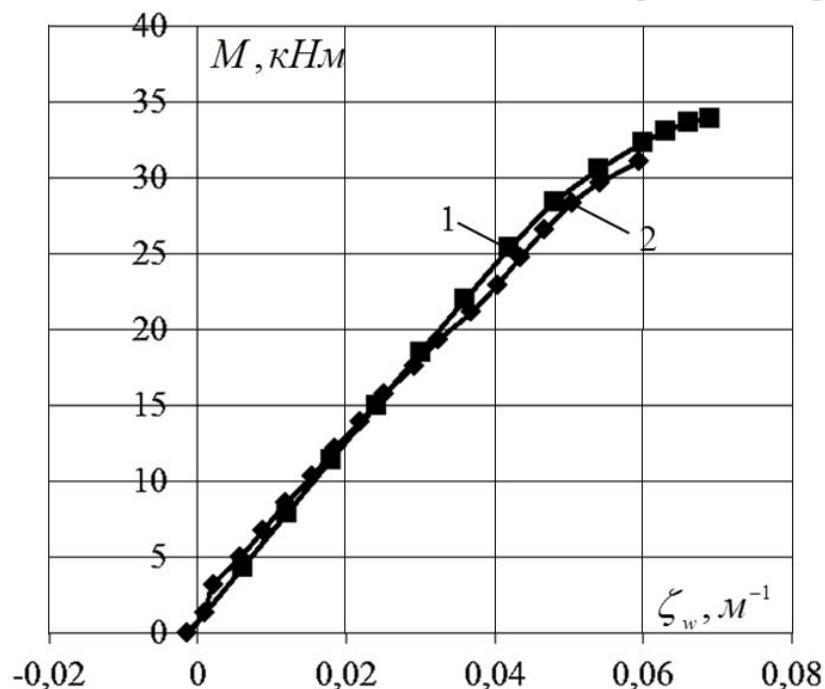


Рис. 2. Графіки «момент-кривина» для досліджуваної поперечно напруженої балки (1 – теоретичний, 2 – експериментальний)

Проведено порівняльний аналіз зростання теоретично визначеного прогину від зростання зовнішнього навантаження з даними прогину встановленого шляхом експериментально випробування. Ці дані наведені на рис.3. Статистичний аналіз збіжності теоретичних та експериментальних даних

кривини балки GRB-12 (Prst) в залежності від прикладеного навантаження проведений методом різниці найменших квадратів показав хорошу збіжність результатів, середнє неспівпадіння склало 9,58%. При цьому найбільша розбіжність значення прогинів була на рівні 0,2 від максимального значення за рахунок співставлення малих величин деформування і навантажень. Попередньо напружена комбіновано армована балка з клеєної деревини GRB-12 (Prst) зруйнувалася внаслідок сколювання деревини по середині висоти елемента за дії граничних дотичних напружень. Руйнування балки GRB-12 (Prst) показано на рис. 4.

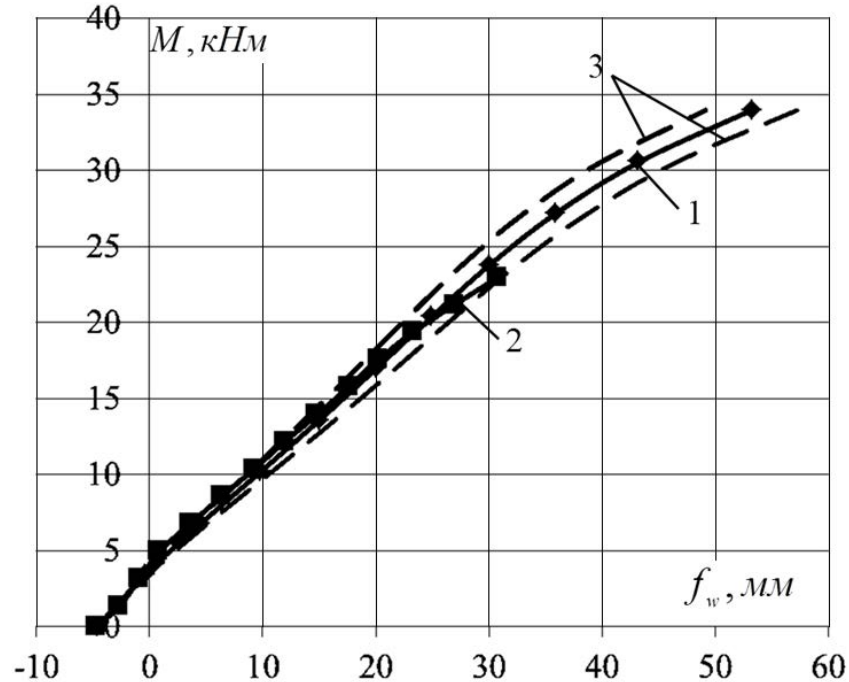


Рис. 3. Порівняння експериментальних даних деформацій (прогинів) (2) попередньо-напруженої балки з теоретичними (1) (3 – межі -7% до +7% від теоретичного значення)



Рис. 4 Характер руйнування попередньо напруженої комбіновано армованої балки з клеєної деревини GRB-12 (Prst)

Висновки. 1. Проведено теоретично-експериментальні дослідження створення попереднього напруження та аналіз випробування дерев'яної попередньо напруженої комбіновано армованої балки короткочасним навантаженням.

2. Отримано нові експериментальні дані щодо деформування дерев'яної балки з комбінованим армуванням в межах розрахункового перерізу в процесі виконання попереднього напруження композитної арматури в розтягнутій зоні, які верифіковані з аналогічними результатами її числового моделювання.

Список використаних джерел

1. 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.

2. Бабіч В.Є., Гомон П.С., Пращур О. Шляхи підвищення жорсткості елементів з цільної та клеєної деревини за поперечного згину. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне: НУВГП, 2021. Вип. 40. С. 97-104.

3. Сурмай М.І. Міцність та деформативність дощатоклеєних балок армованих склопластиковою та базальтовою арматурою: дис. канд. техн. наук: 05.23.01. Нац. ун-т "Львівська політехніка". 2015. 185 с.

4. Gomon S., Gomon P., Homon S., Polishchuk M., Dovbenko T., Kulakovskiy L. Improving the strength of bending elements of glued wood. *Procedia Structural Integrity* 36, 217-222.

5. Mykhailovskyi D., Komar O., Komar M. Engineering method of calculating laminated timber elements reinforced with composite tapes. *Strength of Materials and Theory of Structures* 109, 239-262.

6. Mykhailovskyi D., Komar M. Definition of the stress-strain state of a glued laminated timber beam reinforced with composite strips using experimental method. *Strength of Materials and Theory of Structures* 112, 43-51.

7. Михайловський Д.В., Комар М.А., Комар О.А. Аналіз напружено-деформованого стану плит з перехресно-клеєної деревини підсилених композитними стрічками. *Будівельні конструкції, теорія і практика*. Київ: КНУБА, 2024. № 14.

8. Гомон П.С., Поліщук М.В. Робота комбіновано армованих балок клеєної деревини з попередньо напруженою композитною арматурою. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне: НУВГП, 2023. Вип. 43. С. 177-186.

9. Гомон П.С. Моделювання роботи підсиленого попередньо напруженого згинального дерев'яного елемента. Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини. Одеса: ОДАБА, 2023. Вип. № 27. С. 59-66.

10. Гомон П.С. Визначення прогинів дерев'яних згинальних елементів з урахуванням нелінійності деформування деревини. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія «Технічні науки». Рівне: НУВГП, 2022. Випуск 2(98). С. 183-192.

doctor of technical sciences, professor **Mykhailovskiy Denys**,
Kyiv National University of Construction and Architecture,
candidate of technical sciences, associate professor **Gomon Petro**,
National University of Water and Environmental Engineering, Rivne

RESEARCH OF THE WORK OF PRE-STRESSED WOODEN BEAMS MADE OF GLUELAMMED WOOD

It was established that the increase in stiffness allows for an increase in the overlap spans, which in turn will make it possible to save materials. Therefore, options for reinforcement, as well as options for prestressing wooden bending elements, were developed. There was a planned set of tests of wooden reinforced and unreinforced beams with prestressing and without prestressing from solid and glued wood.

The work describes experimental and theoretical studies of the work of pre-stressed wooden beams. The method of prestressing and the methodology of conducting experimental studies are described. The results of experimental studies of pre-stressed wooden glulam beams compared with the results of its numerical simulation. The article presents "moment-curvature" and "moment-deflection (deflection)" graphs for experimental and numerically simulated data. The change in the stress-strain state of the cross-section of the sample under study is described and the nature of its destruction is depicted.

A comparison of experimental data and data obtained by theoretical numerical modeling of deformation diagrams "moment - curvature" and "moment - deflection" for pre-stressed wooden beams made of glulam with combined reinforcement is carried out. The results of the numerical simulation showed a good agreement with the experimental ones. Deviation of experimental data from theoretically determined deflections is within 10%

Key words: beam; prestress; bending wooden element; stress-deformed state.

REFERENCES

1. Homon P.S. Analiz vykorystannia metalevoi ta nemetalevoi armatury dlia pidsylennia derevianykh elementiv ta konstruktsii. Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannia. Kyiv: KNUBA, 2022. Vypusk 62. S. 322-332. {In Ukrainian}.
2. Babich V.Ie., Homon P.S., Prashchur O. Shliakhy pidvyshchennia zhorstkosti elementiv z tsilnoi ta kleienoi derevyny za poperechnoho zghynu. Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy. Rivne: NUVHP, 2021. Vyp. 40. S. 97-104. {In Ukrainian}.
3. Surmai M.I. Mitsnist ta deformatyvnist doshchatokleienykh balok armovanykh skloplastykovoioiu ta bazaltovoioiu armaturoiu: dys. kand. tekhn. nauk: 05.23.01. Nats. un-t "Lvivska politehnika". 2015. 185 s. {In Ukrainian}.
4. Gomon S., Gomon P., Homon S., Polishchuk M., Dovbenko T., Kulakovskiy L. Improving the strength of bending elements of glued wood. *Procedia Structural Integrity* 36, 217-222. {in English}.
5. Mykhailovskyi D., Komar O., Komar M. Engineering method of calculating laminated timber elements reinforced with composite tapes. *Strength of Materials and Theory of Structures* 109, 239-262. {in English}.
6. Mykhailovskyi D., Komar M. Definition of the stress-strain state of a glued laminated timber beam reinforced with composite strips using experimental method. *Strength of Materials and Theory of Structures* 112, 43-51. {in English}.
7. Mykhaylovs'kyi D.V., Komar M.A., Komar O.A. Analiz napruzhenodeformovanoho stanu plyt z perekhresno-kleyenoyi derevyny pidsylenykh kompozytnymy strichkami. *Budivel'ni konstruktsiyi, teoriya i praktyka*. Kyiv: KNUBA, 2024. № 14. {In Ukrainian}.
8. Homon P.S., Polishchuk M.V. Robota kombinovano armovanykh balok kleienoi derevyny z poperedno napruzhenoiu kompozytnoiu armaturoiu. Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy. Rivne: NUVHP, 2023. Vyp. 43. S. 177-186. {In Ukrainian}.
9. Homon P.S. Modeliuvannia roboty pidsylenoho poperedno napruzhenoho zghynalnoho derevianoho elementu. Suchasni budivelni konstruktsii z metalu ta derevyny. Odesa: ODABA, 2023. Vyp. № 27. S. 59-66. {In Ukrainian}.
10. Homon P.S. Vyznachennia prohyniv derevianykh zghynalnykh elementiv z urakhuvanniam neliniinosti deformuvannia derevyny. *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia. Seriiia «Tekhnichni nauky»*. Rivne: NUVHP, 2022. Vypusk 2(98). S. 183-192. {In Ukrainian}.