

ЖОРСТКІСТЬ МОДИФІКОВАНИХ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК В УМОВАХ КОСОГО ЗГИНУ

STIFNESS OF MODIFIED TIMBER BEAMS UNDER OBLIQUE BENDING CONDITIONS

Павлюк А.П., к.т.н., доцент, orcid.org/0000-0003-3958-0519, **Скрипник М.М.**, к.т.н., старший викладач, (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне), orcid.org/0000-0003-4947-3477, **Пасічник Р.В.**, к.т.н., доцент, orcid.org/0000-0002-8009-1269 (Луцький національний технічний університет, м. Луцьк)

Pavluk A.P., Candidate of Technical Sciences, associate professor, **Skrypnyk M.M.**, Candidate of Technical Sciences, senior teacher (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne), **Pasichnyk R.V.**, Candidate of Technical Sciences, associate professor (Lutsk National Technical University, Lutsk)

Виконано моделювання та розрахунок модифікованих дерев'яних балок в умовах косоного згину з використанням програмного комплексу «Ліра». Модифікація балок полягала в поверхневій обробці різними розчинами. Перша серія балок розраховувалась при обробці розчином Imersol-aqua. Друга серія розраховувалась з врахуванням фізико-механічних характеристик деревини після обробки полімерною композицією «силор». Третя серія – звичайні дерев'яні балки без обробки. Результати повних прогинів двох серій порівнювались із третьою серією балок. Розрахунок балок проводився за різних кутів нахилу від 1° до 25° . Проведено аналіз зміни деформацій на різних рівнях навантаження – від $0,2F_{max}$ до $0,8F_{max}$. Встановлено, що збільшення кута нахилу призводить до збільшення деформацій балок. Збільшення кута нахилу в більшій мірі впливає на прогини в площині у–у (з площини балки). Жорсткість балок, оброблених розчином Imersol-aqua збільшується до 12,2 %, оброблених «силором» збільшується до 17,1 % в порівнянні з балками із звичайної деревини.

Oblique bending is one of the types of bending and occurs in wooden structures not only in an explicit form, when the direction of the load does not coincide with any of the geometric axes of the beam cross-section. This stress-strain state in wooden elements can also occur due to knots, skewing, uneven sections during manufacture, etc. The aim of the work is to study the stiffness of wooden beams modified with different solutions under conditions of oblique bending at different angles of inclination. Studies of wooden structures in bending show

that the loss of load-bearing capacity of beams after the second group of limit states occurs much earlier than after the first group.

The modeling and analysis of modified wooden beams subjected to oblique bending were performed using the Lira software suite. Beam modification involved surface treatment with various solutions. The first series of beams was treated with Imersol-aqua solution, while the second series accounted for the altered physico-mechanical properties of wood following treatment with the polymer composite "Silor." The third series consisted of untreated wooden beams, serving as the control group.

Deflection responses of the treated beams were compared to those of the untreated series. Beam calculations were conducted for inclination angles ranging from 1° to 25° . Deformation behavior was analyzed at different load levels, from $0.2F_{\max}$ to $0.8F_{\max}$. It was observed that increasing the inclination angle leads to higher beam deformations, with a more pronounced effect on deflections in the y - y plane (out-of-plane relative to the beam).

The stiffness of beams treated with Imersol-aqua increased by up to 12,2%, while beams treated with "Silor" exhibited an increase of up to 17,1% compared to untreated wooden beams. These results indicate that surface modification can significantly enhance the structural performance of wooden beams under oblique bending conditions.

Ключові слова:

Деревина, згинальний елемент, напружено-деформований стан, несуча здатність, косий згин, деформативність, напруження, жорсткість, модифікація. Wood, bending element, stress-strain state, load-bearing capacity, oblique bending, deformability, stress, stiffness, modification.

Вступ. Косий згин є одним із різновидів згину і виникає у дерев'яних конструкціях не тільки у явному вигляді, коли напрямок навантаження не співпадає із жодною із геометричних осей поперечного перерізу балки. Даний напружено-деформований стан в дерев'яних елементах може виникати і за рахунок сучків, косошаруватості, нерівності перерізів при виготовленні тощо. Дослідники [1,2,3,4,5,6] вивчали поліпшення якостей деревини за рахунок її модифікації шляхом обробки різними розчинами. В цілому деякі із розчинів показують позитивні результати щодо збільшення модуля пружності деревини. Модифікація деревини може розглядатися як елемент підсилення конструкцій в умовах косоного згину, які зазнали впродовж експлуатації певних дефектів і пошкоджень та потребують підвищення несучої здатності. Дослідження дерев'яних конструкцій на згин показують, що втрата несучої здатності балок за другою групою граничних станів відбувається значно раніше, ніж за першою групою. Однією із ключових характеристик, яка впливає на жорсткість і деформативність, є модуль пружності, збільшення якого за рахунок модифікації призведе і до збільшення міцності косозігнутих балок за другою групою граничних станів.

Аналіз останніх досліджень. Автори [1] досліджували модифікацію деревини сосни шляхом просочення розчином Imersol-aqua. Результати показали, що модуль пружності для деревини сосни, ялини та ялиці після обробки збільшився на 11,25%, 8,60% і 5,57% відповідно.

Автори [2,13,14,15,16,17] досліджували модифікацію деревини сосни шляхом просочення полімерною композицією «силор». В результаті поверхневої обробки модуль пружності зріс до 17000 МПа.

Автори [3,5] досліджували фізико-механічні характеристики деревини після обробки наночастинковими реагентами, діоксином кремнію та вплив вмісту твердих речовин низькомолекулярної фенол формальдегідної смоли на просочування. Результати випробувань показали підвищення міцності і надійності деревини.

Автори [4] вивчали вплив різних модифікацій розчинів на китайську ялицю. Результати випробувань показали збільшення показників модуля пружності з 8640,7 МПа до 11498 МПа.

Для дослідження жорсткості балок, які працюють в умовах косого згину, використовувались дані випробувань модифікації деревини сосни в роботах [1] та [2].

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є дослідження жорсткості модифікованих різними розчинами дерев'яних балок в умовах косого згину за різних кутів нахилу.

Основними задачами даного дослідження є:

- аналіз існуючих досліджень фізико-механічних характеристик деревини, модифікованих різними розчинами;
- розробка моделі дерев'яних балок в умовах косого згину для розрахунку в програмному комплексі «Ліра» із врахуванням фізико-механічних характеристик модифікованої та звичайної деревини;
- дослідження жорсткості дерев'яних балок в програмному комплексі «Ліра» в залежності від кута нахилу;
- аналіз та обробка результатів досліджень.

Методика досліджень. Дослідження балок в умовах косого згину виконувалось в програмному комплексі «Ліра». Модель балки створювалась за допомогою прямокутних кінцевих елементів розміром $10 \times 10 \times 10$. Розміри поперечного перерізу балки $100 \times 150(h)$ мм, довжина балки – 3000 мм. Розрахунковий проліт 2700 мм. Розрахункова схема – шарнірно оперта балка на двох опорах. Балки першої серії моделювались із модулем пружності 15575 МПа, отриманими дослідниками при обробці деревини розчином Imersol-aqua [1], який був більшим на 11,25%, в порівнянні із звичайною клесною деревиною. Балки другої серії моделювались із модулем пружності 17000 МПа, який був отриманий дослідниками [2] в результаті просочення композиційним розчином «силором». Третя серія балок моделювалась із модулем пружності 14000 МПа, як для звичайної клесної деревини. Прикладання навантаження на балку проводилось вузловим. Величини

прикладеного навантаження визначались на основі проведених експериментальних досліджень косозігнутих балок аналогічних розмірів, які наведене в роботах [7,8,9,10,11]. Методика експериментальних випробування даних балок наведена [7,8,18,19,20]. Завантаження балки в програмному комплексі приймалися з кроком $0,2F_{max}$. В місцях прикладання навантаження прикладались в'язі для запобігання виникнення кручення.

Результати досліджень. Дослідження балок виконувалось за різних кутів нахилу – від 1° до 25° (з кроком кута нахилу 1°). Загалом було проведено розрахунки 25 балок за наведених вище кутів нахилу. Максимальні значення прогинів фіксувались в зоні чистого згину, а саме в середині прольоту балки. Загальний вигляд деформованої балки в програмному комплексі «Ліра» наведений на рис.1.

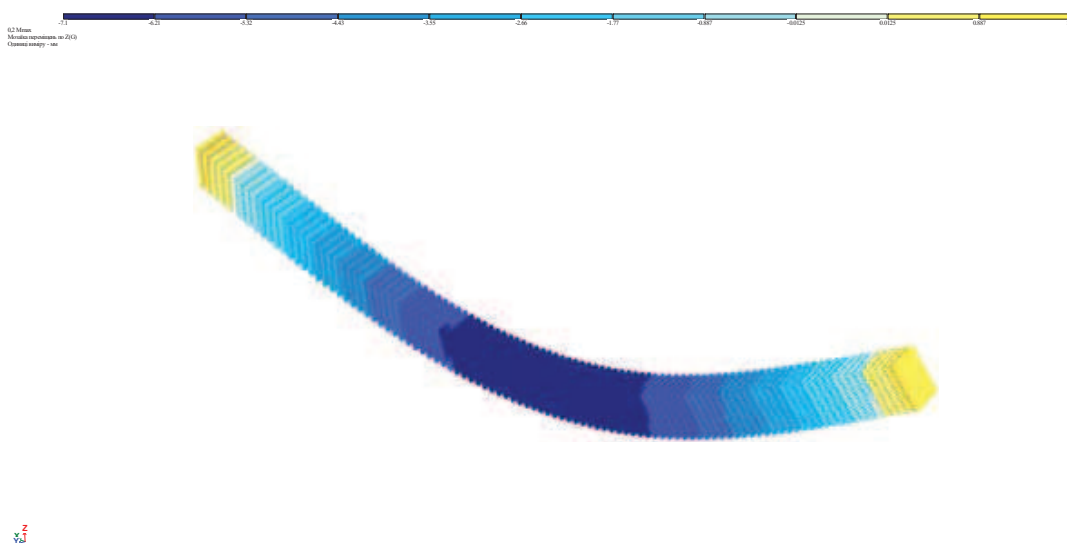


Рис.1. Загальний вигляд деформованої балки в програмному комплексі «Ліра»

Для кожної із трьох серій балок за різних рівнів навантаження від $0,2 F_{max}$ до $0,8 F_{max}$ фіксувались величини прогинів в площині балки ($z-z$) та з площини балки ($y-y$). Значення повних прогинів знаходилися як для балок, що працюють в умовах косого згину за формулою:

$$w = \sqrt{w_y^2 + w_z^2}, \quad (1)$$

де w – повні прогини балок;

w_y – прогини балок в площині $y-y$;

w_z – прогини балок в площині $z-z$.

Величини повних прогинів балок першої серії, модифіковані розчином Imersol-aqua в площині $z-z$ та $y-y$ за різних кутів нахилу на різних рівнях навантаження наведені в таблиці 1, для балок другої серії – в таблиці 2.

Таблиця 1

Повні прогини балок першої серії за різних кутів нахилу

Назва балки	Кут нахилу, град.	Повні прогини балок за рівнів навантаження, w , мм				Приріст повних прогинів балок за рівнів навантаження, Δw , мм			
		0,2 $F_{\max}$	0,4 $F_{\max}$	0,6 $F_{\max}$	0,8 $F_{\max}$	0,2 $F_{\max}$	0,4 $F_{\max}$	0,6 $F_{\max}$	0,8 $F_{\max}$
Б–1	1	5.7	9.1	13.6	18.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Б–2	2	5.7	9.1	13.7	18.1	0.0	0.0	0.1	0.0
Б–3	3	5.7	9.1	13.7	18.1	0.0	0.0	0.1	0.0
Б–4	4	5.7	9.1	13.7	18.2	0.0	0.1	0.1	0.1
Б–5	5	5.7	9.1	13.8	18.3	0.1	0.1	0.1	0.2
Б–6	6	5.7	9.2	13.9	18.4	0.1	0.1	0.3	0.3
Б–7	7	5.8	9.2	13.9	18.4	0.1	0.2	0.3	0.3
Б–8	8	5.8	9.3	14.0	18.6	0.1	0.2	0.4	0.5
Б–9	9	5.8	9.3	14.1	18.7	0.2	0.3	0.4	0.6
Б–10	10	5.9	9.4	14.2	18.8	0.2	0.3	0.6	0.7
Б–11	11	5.9	9.5	14.3	18.9	0.3	0.4	0.7	0.8
Б–12	12	6.0	9.5	14.4	19.1	0.3	0.5	0.7	1.0
Б–13	13	6.0	9.6	14.5	19.3	0.3	0.6	0.9	1.2
Б–14	14	6.1	9.7	14.6	19.4	0.4	0.7	1.0	1.3
Б–15	15	6.1	9.8	14.8	19.6	0.5	0.7	1.2	1.5
Б–16	16	6.2	9.9	14.9	19.7	0.5	0.8	1.3	1.6
Б–17	17	6.2	10.0	15.0	20.0	0.6	0.9	1.4	1.9
Б–18	18	6.3	10.1	15.2	20.1	0.6	1.0	1.6	2.0
Б–19	19	6.4	10.2	15.3	20.4	0.7	1.1	1.7	2.3
Б–20	20	6.4	10.3	15.6	20.6	0.8	1.2	1.9	2.5
Б–21	21	6.5	10.4	15.7	20.8	0.8	1.3	2.1	2.7
Б–22	22	6.6	10.5	15.8	21.0	0.9	1.5	2.2	2.9
Б–23	23	6.6	10.6	16.1	21.3	1.0	1.6	2.5	3.2
Б–24	24	6.7	10.8	16.2	21.5	1.1	1.7	2.6	3.4
Б–25	25	6.8	10.8	16.3	21.7	1.1	1.7	2.7	3.6

В процесі аналіз отриманих даних знаходились величини повних прогинів та їх прирости за різних кутів нахилу та рівнів навантаження. Приріст знаходився як різниця значень між величиною повних прогинів за певного кута нахилу і величиною повного прогину при 1° .

Таблиця 2

Повні прогини другої першої серії за різних кутів нахилу

Назва балки	Кут нахилу, град.	Повні прогини балок за рівнів навантаження, w , мм				Приріст повних прогинів балок за рівнів навантаження, Δw , мм			
		0,2 $F_{\max}$	0,4 $F_{\max}$	0,6 $F_{\max}$	0,8 $F_{\max}$	0,2 $F_{\max}$	0,4 $F_{\max}$	0,6 $F_{\max}$	0,8 $F_{\max}$
Б-1	1	5.3	8.4	12.7	16.9	0.0	0.0	0.0	0.0
Б-2	2	5.3	8.4	12.7	16.9	0.0	0.0	0.0	0.0
Б-3	3	5.3	8.5	12.7	16.9	0.0	0.0	0.0	0.0
Б-4	4	5.3	8.5	12.8	16.9	0.0	0.0	0.1	0.0
Б-5	5	5.3	8.5	12.8	17.1	0.0	0.1	0.1	0.2
Б-6	6	5.3	8.6	12.9	17.1	0.1	0.1	0.2	0.2
Б-7	7	5.4	8.6	13.0	17.2	0.1	0.2	0.3	0.3
Б-8	8	5.4	8.6	13.0	17.3	0.1	0.2	0.3	0.3
Б-9	9	5.4	8.7	13.1	17.4	0.2	0.3	0.4	0.5
Б-10	10	5.5	8.8	13.2	17.5	0.2	0.3	0.5	0.6
Б-11	11	5.5	8.8	13.3	17.7	0.2	0.4	0.6	0.8
Б-12	12	5.6	8.9	13.4	17.8	0.3	0.5	0.7	0.9
Б-13	13	5.6	9.0	13.5	18.0	0.3	0.5	0.8	1.0
Б-14	14	5.6	9.0	13.6	18.1	0.4	0.6	0.9	1.2
Б-15	15	5.7	9.1	13.7	18.2	0.4	0.7	1.0	1.3
Б-16	16	5.8	9.2	13.9	18.4	0.5	0.8	1.2	1.5
Б-17	17	5.8	9.3	14.0	18.5	0.5	0.9	1.3	1.6
Б-18	18	5.9	9.4	14.1	18.8	0.6	1.0	1.4	1.9
Б-19	19	5.9	9.5	14.3	18.9	0.7	1.1	1.6	2.0
Б-20	20	6.0	9.6	14.4	19.2	0.7	1.2	1.7	2.3
Б-21	21	6.1	9.7	14.7	19.4	0.8	1.3	1.9	2.5
Б-22	22	6.1	9.8	14.8	19.6	0.9	1.4	2.1	2.7
Б-23	23	6.2	9.9	14.9	19.8	0.9	1.5	2.2	2.9
Б-24	24	6.3	10.0	15.2	20.1	1.0	1.6	2.4	3.2
Б-25	25	6.3	10.2	15.4	20.3	1.1	1.7	2.7	3.4

Як видно з таблиці 1 та 2, збільшення кута нахилу в більшій мірі впливало на прогини в площині у-у. Деформації в даній площині росли стрімкіше, в порівнянні з площиною z-z. Аналогічний ефект спостерігався і при розрахунках балок із звичайної деревини [7]. Графік залежності повних прогинів від кута нахилу балок першої серії наведені на рис.2. Графік залежності приросту повних прогинів балок першої серії від кута нахилу наведені на рис.3. Аналогічні графіки для балок другої серії наведені на рис.4,

5 відповідно. Дані щодо величин прогинів косозігнутих балок третьої серії наведені в [7].

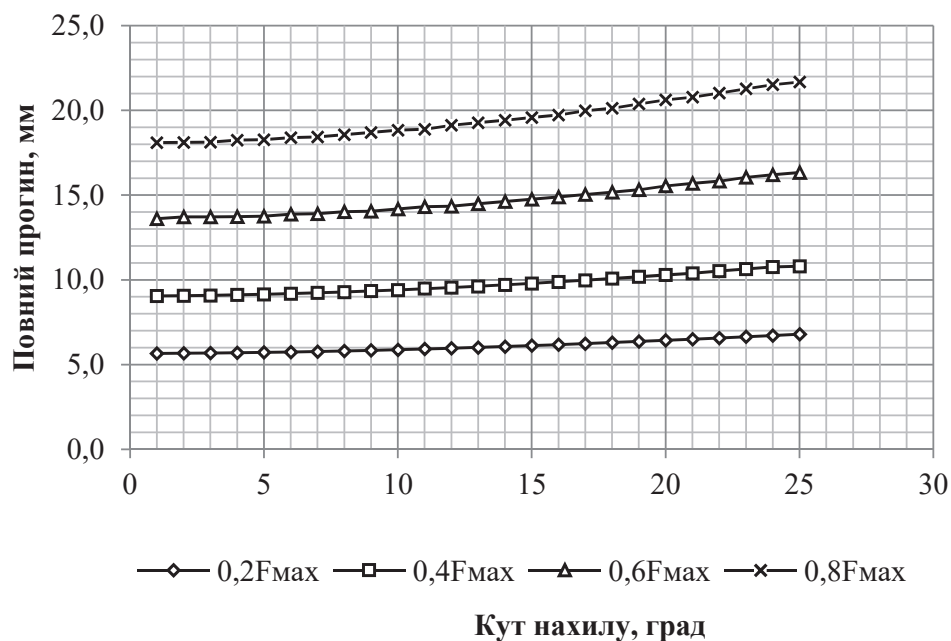


Рис.2. Графік залежності повних прогинів балки першої серії від кутів нахилу за різних рівнів навантаження

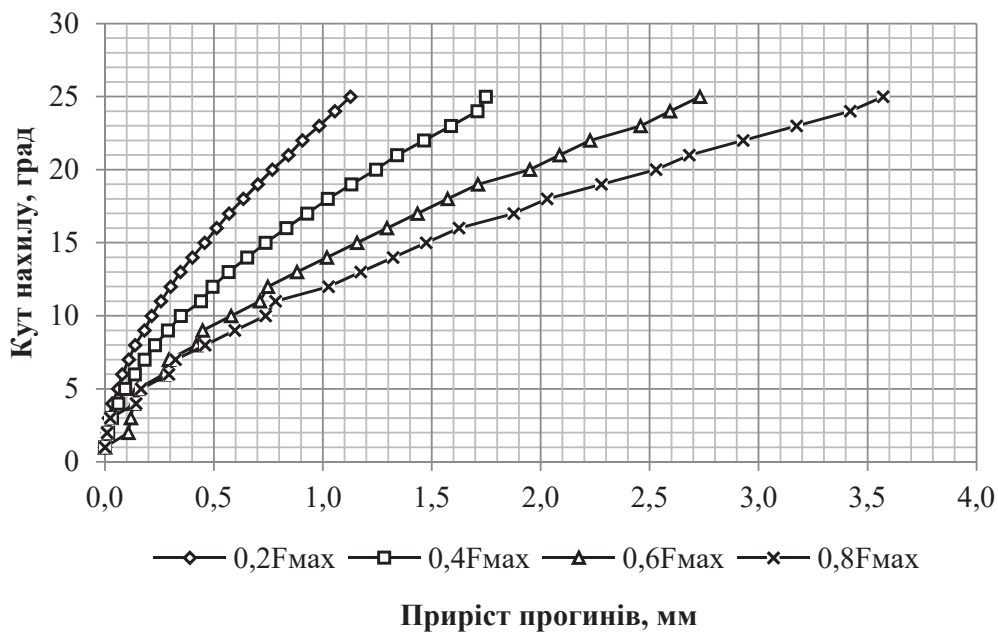


Рис.3. Графік залежності прирістів прогинів балок першої і від кутів нахилу за різних рівнів навантаження

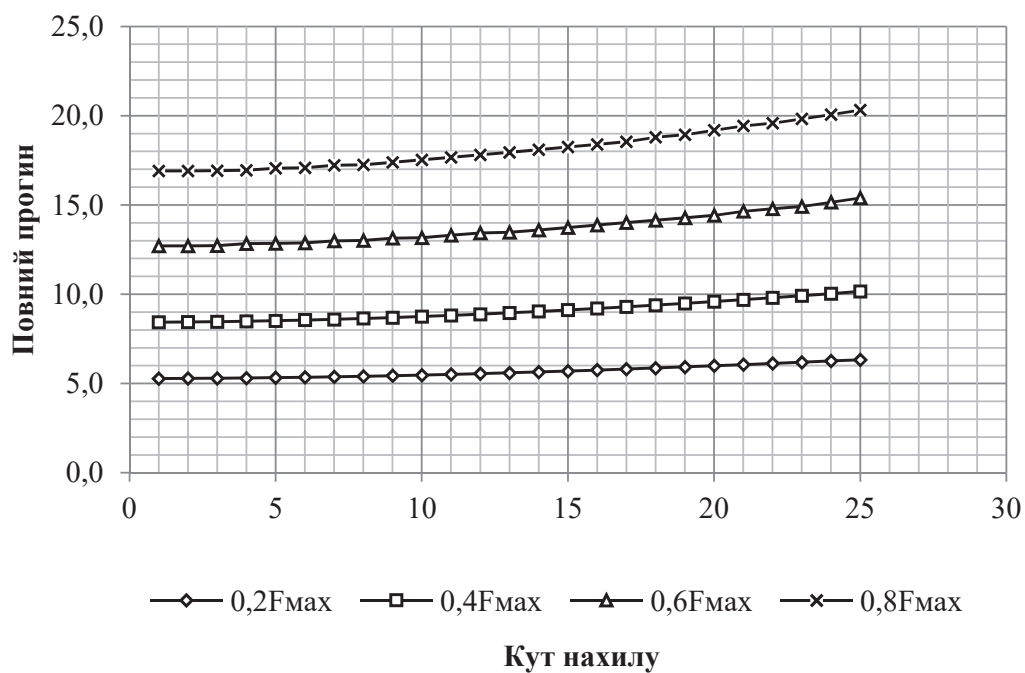


Рис.4. Графік залежності повних прогинів балки другої серії від кутів нахилу за різних рівнів навантаження

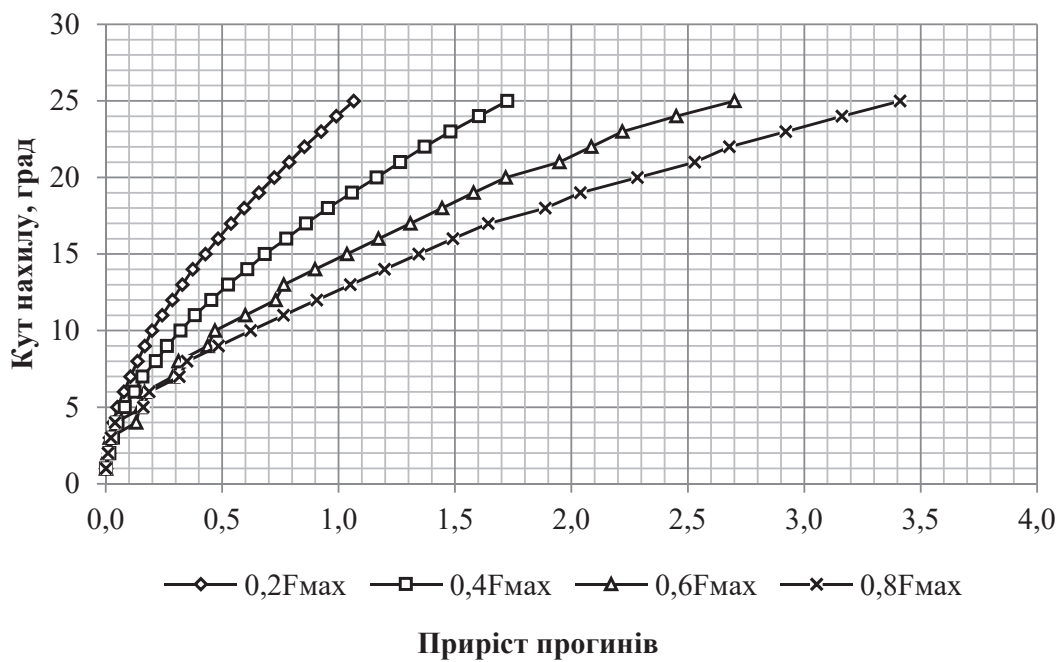


Рис.5. Графік залежності приростів прогинів балок другої від кутів нахилу за різних рівнів навантаження

Висновки.

1) Отримані нові дані щодо зміни повних прогинів на різних рівнях навантаження при зміні кутів нахилу модифікованих балок від 1° до 25;

- 2) Модифікація балок першої серії, яка виконувалась розчином Imersol-aqua збільшує жорсткість балки до 12,2 % в порівнянні із балками третьої серії із звичайної деревини
- 3) Модифікація балок другої серії, яка виконувалась «силор» збільшує жорсткість балки до 17,1 % в порівнянні із балками третьої серії із звичайної деревини.

1. Yalcın O'rs, Hakan Keskin, Musa Atar, Mustafa Colakog'lu. Effects of impregnation with Imersol-aqua on the modulus of elasticity in bending of laminated wood materials. *Construction and Building Materials* 21 (2007) 1647–1655.

2. Гомон С.С. Поліпшення міцнісних та деформівних властивостей суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі: дис. ...докт. техн. наук: 01.02.04. Тернопіль, 2021. 387 с.

Homon S.S. Polipshennia mitsnisnykh ta deformivnykh vlastyvostei sutsilnoi derevyny ta kompozytsiinykh materialiv na yii osnovi: dys. ...dokt. tekhn. nauk: 01.02.04. Ternopil, 2021. 387 s.

3. Krzysztof Przystupa, Daniel Pieniak, Waldemar Samociuk, Agata Walczak, Grzegorz Bartnik, Renata Kamocka-Bronisz and Monika Sutula. Mechanical Properties and Strength Reliability of Impregnated Wood after High Temperature Condition. *Materials* 2020, 13(23), 5521.

4. Lei He, Qian Zhang, Bengang Zhang, Hongyun Qiu, Jie Guo, Fengwen Sun, Zengfu Jiang and Weidong Zhou. Study on Phenol–Formaldehyde Resin–Montmorillonite Impregnation and Compression Modification of Chinese Fir. *Polymers* 2024, 16, 1385.

5. Huifang Wang, Youke Zhao. Studies on pre-treatment by compression for wood impregnation III: effects of the solid content of low-molecular-weight phenol formaldehyde resin on the impregnation. *Journal of Wood Science* (2022) 68:28.

6. Keita Ogawa, Kenji Kobayashi and Satoshi Fukuta. Compression properties of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) treated with resin impregnation under loading perpendicular to the grain. *Journal of Wood Science* (2024) 70:28.

7. Павлюк А.П., Гомон С.С. Робота дерев'яних балок в умовах косого згину за різних кутів нахилу. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. нак. пр. Рівне, 2021. Вип. 40. С.145 – 158.

Pavliuk A.P., Homon S.S. Robota derevianykh balok v umovakh kosoho zghynu za riznykh kutiv nakhylyu. *Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy: zb. nak. pr. Rivne*, 2021. Vyp. 40. S.145 – 158.

8. Павлюк А. П., Гомон С. С. Методика дослідження балок з цільної та клеєної деревини в умовах косого згину. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. нак. пр. Рівне, 2016. Вип. 32. С.231 – 236.

Pavlyuk A. P., Gomon S. S. Metody'ka doslidzhennya balok z cil'noyi ta kleyenoyi derevy'ny' v umovakh kosogo zgy'nu. *Resursoekonomni materialy', konstrukciyi, budivli ta sporudy': zb. nak. pr. Rivne*, 2016. Vy'p. 32. S.231 – 236.

9. Гомон С. С., Павлюк А. П. Жорсткість балок з клеєної деревини в умовах косого згину. Будівельні конструкції: теорія і практика: зб. наук. пр. К., 2017. С. 69–74.

Gomon S. S., Pavlyuk A. P. Zhorstkist' balok z kleyenoyi derevy'ny' v umovakh kosogo zgy'nu. *Budivel'ni konstrukciyi: teoriya i prakty'ka: zb. nauk. pr. K.*, 2017. S. 69–74.

10. Гомон С. С., Павлюк А. П. Робота дощатоклеєних дерев'яних балок в умовах косого згину при дії одноразових та повторних навантажень. Ресурсоекономні

матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. пр. Рівне, 2017. Вип. 34. С. 118–128.

Gomon S. S., Pavlyuk A. P. Robota doshhatokleyeny`x derev'yany`x balok v umovax kosogo zgy`nu pry` diyi odnorazovy`x ta povturny`x navantazhennyax. Resursoekonomni materialy`, konstrukciyi, budivli ta sporudy`: zb. nauk. pr. Rivne, 2017. Vy`p. 34. S. 118–128.

11. Гомон С. С., Павлюк А. П. Робота балок з клеєної деревини в умова косого згину. Вісник Львівського національного аграрного університету. Львів, 2018. Вип. 19. С. 84-89.

Gomon S. S., Pavlyuk A. P. Robota balok z kleyenoyi derevy`ny` v umova kosogo zgy`nu. Visny`k L`vivs`kogo nacional`nogo agrarnogo universy`tetu. L`viv, 2018. Vy`p. 19. S. 84-89.

12. ДБН В.2.6-161:2017. Конструкції будинків і споруд. Дерев'яні конструкції. Основні положення. К.: Мінрегіон України, 2017. 111 с.

DBN V.2.6-161:2017. Konstrukciyi budy`nkiv i sporud. Derevyani konstrukciyi. Osnovni polozhennya. K.: Minregion Ukrayiny`, 2017. 111 s.

13. Yasniy, P., Homon, S., Iasnii, V, Gomon, S.S., Gomon, P., Savitskiy, V., 2022. Strength properties of chemically modified solid woods. *Procedia Structural Integrity* 36, 211-216

14. Gomon S., Gomon S., Polishchuk M. Experimental and statistical investigation of the secant modulus of elasticity of glued timber modified with polimer “Silor”. *Proceedings of the 1st Eastern Europe Conference on Timber Constructions*. Kharkiv – “Madrid” Typography, 2018. P. 137–142.

15. Homon S., Gomon P., Gomon S., Litnitskiy S., Boyarska I., Chapiuk O., Chornomaz N. Study of the mechanical properties of coniferous wood of different ages at standard humidity. *Procedia Structural Integrity* 59 (2024) 545–550.

16. Datsiuk V., Homon S., Gomon S., Dovbenko V., Petrenko O., Parfentyeva I., Romaniuk M. Effect of long-term operation on the strength properties of pine wood. *Procedia Structural Integrity* 59 (2024) 583–587.

17. Гомон Св. Ст., Гомон Св. Св., Савицький В.В., Чорномаз Н.Ю. Методика визначення початкового модуля пружності та модуля деформації деревини різного віку. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. пр. Рівне, 2021. Вип. 40. С. 121–128.

Homon Sv. St., Homon Sv. Sv., Savytskyi V.V., Chornomaz N.Iu. Metodyka vyznachennia pochatkovoho modulia pruzhnosti ta modulia deformatsii derevyny riznoho viku. *Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy: zb. nauk. pr. Rivne*, 2021. Vyp. 40. S. 121–128.

18. 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.

19. Pavluk, A., Gomon, S., Zatiuk Y., Gomon, P., Homon, S., Kulakovskiy, L., Iasnii, V., Yasniy, O., Imbirovych, N., 2023. Stiiffness of solid wood beams under direct and oblique bending conditions. *Acta Facultatis Xylologiae Zvolen* 65(2), 109-121.

20. 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, article number 080007.