

**УДК 539.3**

**Гуртовий О. Г., к.т.н., доцент, Жук Д. В., ст. 5 курсу ФБА** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

### **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОГИНІВ БАЛОК З ОБМЕЖЕНОЮ ПОВЗДОВЖНЬОЮ ТРІЩИНОЮ**

**Наведено експериментальні значення прогинів дерев'яних моделей балок з повздовжніми наскрізними тріщинами обмеженої довжини при їх навантаженні зосередженою силою. Виконано аналіз експериментальних даних та порівняння їх із теоретичними значеннями.**

**Приведены экспериментальные значения прогибов деревянных моделей балок с продольными сквозными трещинами ограниченной длины при нагрузке их сосредоточенной силой. Произведен анализ экспериментальных данных и сравнение их с теоретическими значениями.**

**The experimental values of deflections models of beams with limited longitudinal cracks in their concentrated power load. The analysis of experimental data and their comparison with theoretical values was done.**

**Ключові слова:** балка, обмежена повздовжня тріщина, експеримент, прогин.

Дослідження впливу на напружено-деформований стан (НДС) зігнутої двохопорної балки виникнення в ній такого дефекту, як повздовжня тріщина обмеженої довжини, береги якої не виходять на торці балки, виконано в [1, 2] шляхом аналітичного розв'язання такої задачі. В [1, 2] в рамках гіпотези Бернуллі розглядався випадок, в якому поперечне навантаження на балку розкривало внутрішню наскрізну за шириною перерізу балки тріщину обмеженої довжини,

Експериментальні дослідження прогинів двохопорних (шарнірно опертих на края) дерев'яних балок проводились з метою оцінки результатів аналітичного розв'язку [1, 2] задачі згину балки з повздовжньою тріщиною обмеженої довжини при навантаженні її зосередженою силою посередині прогону. Поперечне навантаження на балку розкриває внутрішню тріщину (рис.1), а тріщина розміщується симетрично відносно середини прогону. В експерименті наскрізна тріщина розміщена на віддалі  $\beta h$  ( $0 < \beta < 1$ ) від нижньої навантаженої поверхні балки, де  $h$  – висота прямокутного перерізу балки.

**Задача включала** постановку та проведення експерименту, отримання та статистичний аналіз результатів, а також порівняльний аналіз теоретичних та експериментальних значень прогинів балки з обмеженою повздовжньою тріщиною в окремих поперечних перерізах балки, що частково викладено в [3].

Експериментальні дослідження прогинів проводились на експериментальній установці УСВБ-1 в лабораторії кафедри МБГ (НУВГП). Навантаження моделювало зосереджену силу, що прикладалась строго посередині прогону балки до частини під тріщиною за допомогою підвісної конструкції, що закріплювалась у невеликому отворі в балці. Для навантажування застосовувались арматурні стержні з точно встановленою вагою та з відповідним маркуванням.

**В процесі експерименту було досліджено** одну суцільну дерев'яну балку та три дерев'яні балки з повздовжніми тріщинами (їхні геометричні характеристики наведено нижче на рис.1,3,5), шириною перерізу 50 мм та з прогоном 1000 мм. Навантаження на зразки обмежувались, щоб отримати результати в пружній стадії роботи матеріалу при незмінності розмірів тріщини.

Для визначення прогинів застосовувались на кожному зразку по п'ять індикаторів годинникового типу ИЧ-10, які на схемах балок (рис. 1, 3, 5) понумеровані і ці номери відповідають також номерам перерізів балки, а для визначення відносних деформацій в суцільній балці застосовувались механічні тензометри Гугенбергера.

Навантажування балок здійснювалось по стадіях, з витримкою перед фіксацією показів приладів 2 хв на кожній стадії навантаження та без витримки на стадіях розвантаження.

Результати експериментальних досліджень та статистичного аналізу для трьох балок з тріщинами дано на рис. 2, 4, 6, а порівняння з даними теоретичного дослідження [1,2] – в табл. 1, 2, 3.

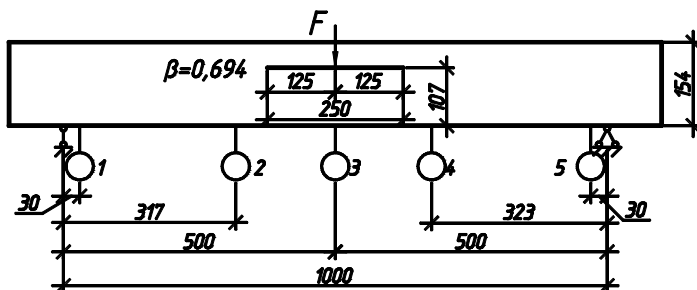


Рис. 1. Схема балки № 1 із розташуванням приладів

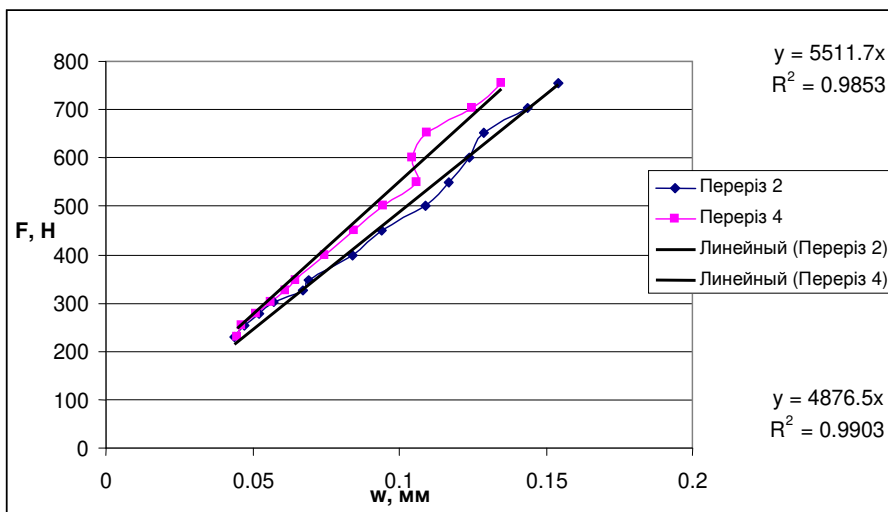


Рис. 2. Експериментальні прогини  $W$  та результати статистичного аналізу для балки № 1 (нижня залежність дана для перерізу 2, а точки відповідають значенням прогинів із табл. 1)

Таблиця 1

Порівняння теоретичних і експериментальних значень прогинів балки № 1

F, кН	Значення прогинів балки в перерізі 2, мм		Похибка $\Delta$ , %
	Експериментальні	Теоретичні [1,2]	
277,95	0,0524	0,0534	1,81
300,90	0,0574	0,0578	0,62
347,75	0,0690	0,0668	-3,24
550,61	0,1170	0,1057	-9,66
754,54	0,1540	0,1449	-5,93
F, кН	Значення прогинів балки в перерізі 4, мм		Похибка $\Delta$ , %
	Експериментальні	Теоретичні [1,2]	
277,95	0,0513	0,0542	5,64
300,90	0,0563	0,0587	4,21
347,75	0,0647	0,0678	4,83
550,61	0,1061	0,1074	1,17
754,54	0,1347	0,1471	9,24

Для балки № 1, середнє значення відносної похибки для значень прогинів у перерізі 2 становить  $\Delta = -4,75\%$ , а у перерізі 4 –  $\Delta = 5,96\%$ .

Відмітимо, що в балці № 1 індикатори № 2 та № 4 розміщені за межами тріщини (рис. 1), тоді як в балці № 2 ці індикатори розміщено в перерізах у межах тріщини (рис. 3).

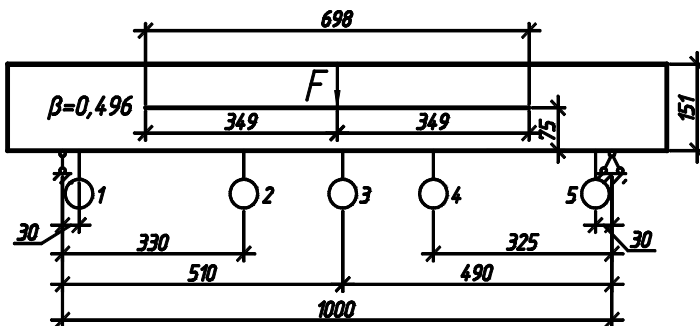


Рис. 3. Схема балки № 2 із розташуванням приладів

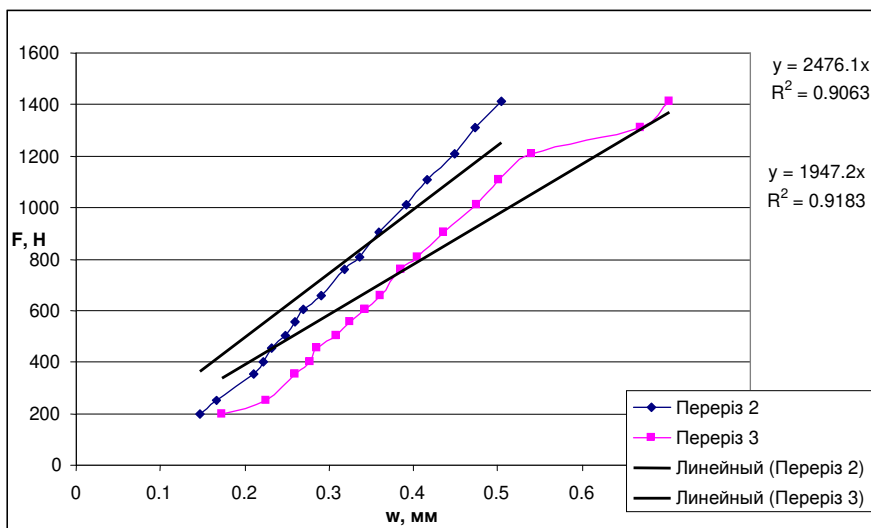


Рис. 4. Експериментальні прогини  $W$  та результати статистичного аналізу для балки № 2 (нижня залежність дана для перерізу 3, а точки відповідають значенням прогинів із табл. 2)

Порівняння теоретичних і експериментальних значень прогинів балки № 2

F, кН	Значення прогинів балки в перерізі 2, мм		Похибка $\Delta$ , %
	Експериментальні	Теоретичні [1,2]	
403,06	0,2016	0,1761	-12,65
504,75	0,2280	0,2205	-3,27
554,98	0,2396	0,2425	1,20
657,14	0,2710	0,2871	5,95
1414,30	0,4849	0,6179	27,42
F, кН	Значення прогинів балки в перерізі 3, мм		Похибка $\Delta$ , %
	Експериментальні	Теоретичні [1,2]	
403,06	0,2776	0,2334	-15,92
504,75	0,3078	0,2923	-5,04
554,98	0,3253	0,3213	-1,22
657,14	0,3605	0,3805	5,53
1414,30	0,7038	0,8189	16,35

Для балки № 2 середнє значення відносної похибки для прогинів у перерізі 2 становить  $\Delta=4,33\%$ , а у перерізі 3 –  $\Delta= 2,84\%$ .

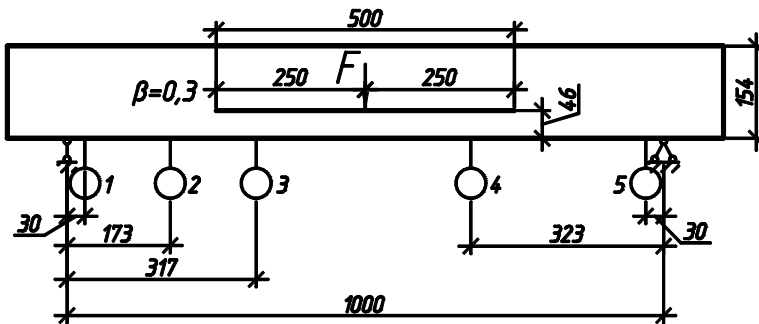


Рис. 5. Схема балки № 3 із розташуванням приладів

Для балки № 3 середнє значення відносної похибки для прогинів у перерізі 2 –  $\Delta=17,46\%$ , у перерізі 3 –  $\Delta= -3,79\%$ , а у перерізі 4 –  $\Delta= 2,63\%$  (табл. 3).

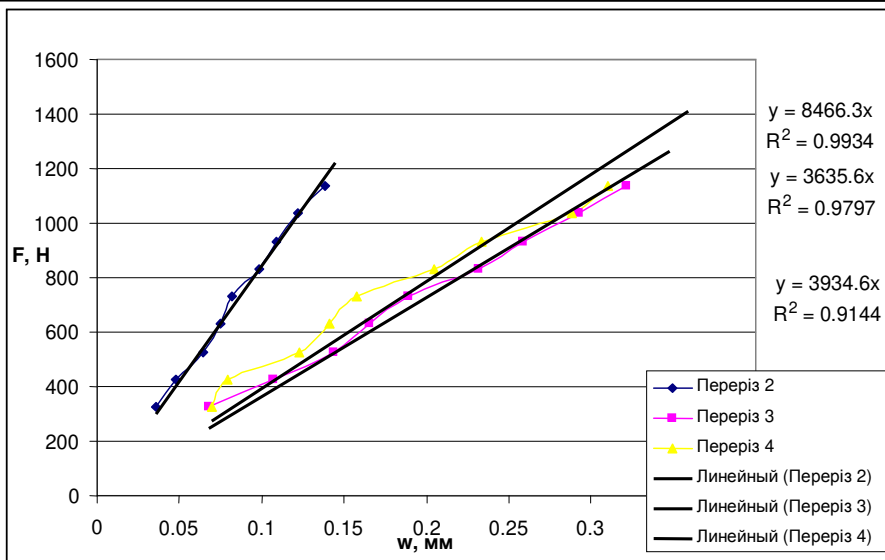


Рис. 6. Експериментальні прогини  $W$  та результати статистичного аналізу для балки № 32 (нижня залежність дана для перерізу 3, верхня – для перерізу 2, а точки відповідають значенням прогинів із табл. 3)

Таблиця 3

Порівняння теоретичних і експериментальних значень прогинів балки № 3

F, кН	Значення прогинів балки в перерізі 2, мм		Похибка $\Delta$ , %
	Експериментальні	Теоретичні [1,2]	
427,98	0,0641	0,0683	6,63
933,33	0,1219	0,1490	22,28
1137,34	0,1445	0,1816	25,70
F, кН	Значення прогинів балки в перерізі 3, мм		Похибка $\Delta$ , %
	Експериментальні	Теоретичні [1,2]	
427,98	0,1440	0,1297	-9,89
933,33	0,2932	0,2829	-3,53
1137,34	0,3480	0,3447	-0,94
F, кН	Значення прогинів балки в перерізі 4, мм		Похибка $\Delta$ , %
	Експериментальні	Теоретичні [1,2]	
427,98	0,1230	0,1333	8,34
933,33	0,2885	0,2906	0,74
1137,34	0,3586	0,3541	-1,26

Модуль пружності деревини балок визначено як середнє арифметичне за прогинами суцільної балки і становить  $E_e=1,044 \cdot 10^4$  МПа. За відносними

деформаціями та за напругами в балках контролювався рівень навантаження в межах лінійно-пружних деформацій. Експериментальний модуль пружності для дерева ( $E_e=1,044 \cdot 10^4$  МПа) – близький до його табличного значення ( $E=10^4$  МПа). Відносна похибка склала 4,4%. Застосуванням експериментального модуля пружності при порівнянні з теоретичними результатами виключався вплив методичної похибки у проведенні експерименту.

Цікаво порівняти співвідношення максимальних прогинів зразка балки до прогинів у різних перерізах того ж зразка (табл. 4). Даною характеристикою виключається вплив на результат відмінності модуля пружності конкретної балки від експериментального модуля пружності суцільної балки.

Таблиця 4

Порівняння співвідношень максимального прогину  $w_{(3)}$  до прогину  $w_{(2)}$

чи  $w_{(4)}$  у відповідному перерізі 2 або 4 балок № 1 та № 2

№ балки	№ перерізу	Співвідношення прогинів		Відносна похибка $\Delta$ , %
		Експериментальне	Теоретичне [1, 2]	
1	2	1,3154	1,2954	-1,54
	4	1,4119	1,2754	-10,70
2	2	1,3404	1,3253	-1,14
	4	1,3709	1,3253	-3,44

**Наведемо також аналітичний розв’язок задачі [1, 2] деформування шарнірно опертої на краях балки довжиною  $L = 2m$  ( $0 \leq x \leq 2m$ ), у якої є поздовжня симетрична відносно середини прогону балки наскрізна тріщина довжиною  $l = 2b = 2(m - a)$ , де  $a$  – довжина частин балки без тріщини ( $a < m$ ). У зв’язку з симетрією деформування розглянуто половину балки  $0 < x < m$ , складену із трьох частин ( $j = 1$  – частина без тріщини,  $j = 2$  – навантажена частина знизу під тріщиною та при  $j = 3$  зверху над тріщиною), і застосовано до кожної з цих трьох частин гіпотезу Бернуллі як до зігнутого елемента балки. Позначено  $w_j$  – прогин для кожної з трьох частин балки ( $j = 1, 2, 3$ ) на їхніх серединних поздовжніх осях  $x_j$ , а  $h^j$  – висоти цих частин.**

Для випадку дії зосередженої сили  $F$  посередині балки функції прогинів  $w_j(x)$  трьох частин балки ( $j = 1, 2, 3$ ) мають вигляд:

- для частини балки без тріщини ( $j = 1 ; 0 \leq x \leq a$ )

$$w_1 = \frac{Fx}{4} \left( -\frac{x^2}{3D_1} + \left( \frac{a^2}{D_1} + \frac{(m^2 - a^2)}{(D_2 + D_3)} \right) \right);$$

- для частини балки під тріщиною ( $j = 2; a \leq x \leq m$ )

$$w_2 = \frac{F}{4D_2} \left( \frac{(x^3 - a^3) D_1 - 2a^3 D_2}{3D_1} - \frac{2 \cdot (m^2 \cdot x - a^3) \cdot D_2 + d \cdot D_3}{2 \cdot (D_2 + D_3)} \right);$$

- для частини балки над тріщиною ( $j = 3; a \leq x \leq m$ )

$$w_3 = \frac{F}{2} \cdot \left( \frac{(a+m) \cdot (x-m)^2}{4 \cdot (D_2 + D_3)} - \frac{a^3}{3 \cdot D_1} \right),$$

де позначено:  $d = x^2 m - 2xma + ma^2 - a^3$ ;  $s = x^2 - 2xm + a^2$ , а характеристики жорсткості мають вигляд:

$$D_j = \int_b \int_{h_j} E(z_j)^2 dydz = E \frac{bh_j^3}{12}; \quad S_j = \int_b \int_{h_j} E dydz = Ebh_j.$$

### Висновки:

1. Відповідно до статистичного аналізу результатів експериментальних досліджень залежність деформацій усіх балок від величини зовнішнього навантаження апроксимується лінійною функцією, що проходить через початок системи координат, з достовірністю  $R^2 = 0,9183...0,9964$ , що вказує на те, що деформації мали пружний характер, а отже можливе їх порівняння з теоретичними результатами [1, 2].

2. Незначні як абсолютні відхилення, так і середні значення похибки  $\Delta$  теоретично визначених прогинів балки від експериментальних у окремих досліджуваних перерізах свідчить про достатню точність застосованого теоретичного підходу [1, 2]. При цьому відмітимо деяку відмінність розрахункової схеми експериментальних зразків від теоретично досліджуваної балки, оскільки зразки були дещо довшими від прогону балки.

1. Гуртовий О. Г., Жук Д. В. Згин ізотропної балки з обмеженою поздовжньою тріщиною. Частина 1. Аналітичні розв'язки// Тези наукової конференції студентів, аспірантів та викладачів НУВГП – Рівне : НУВГП – 2012. – 1 с. 2. Гуртовий О. Г., Жук Д. В. Диференціальні розрахункові рівняння при згинанні ізотропної балки з обмеженою поздовжньою тріщиною// Тези наукової конференції студентів, аспірантів та викладачів НУВГП – Рівне : НУВГП – 2011. – 1 с. 3. Гуртовий О. Г., Жук Д. В. Згин ізотропної балки з обмеженою поздовжньою тріщиною. Частина 2. Експериментальні дослідження// Тези наукової конференції студентів, аспірантів та викладачів НУВГП. – Рівне : НУВГП – 2012. – 1 с.

Рецензент: д.т.н., професор Трач В. М. (НУВГП)