

**ЛЕГКІ КЛЕЄФАНЕРНІ ПАНЕЛІ ІЗ ЗІГНУТИМИ Х-ПОДІБНИМИ
ПОВЗДОВЖНІМИ РЕБРАМИ ЖОРСТКОСТІ**¹**Бідаков А.М.**, д.т.н., доцент,

bidakov@kname.edu.ua, ORCID: 0000-0001-6394-2247

¹**Пустовойтова О.М.**, к.т.н., доцент,

oksana_pustov@ukr.net, ORCID: 0009-0003-4774-6686

¹**Єфимович В.Ю.**, студент,

slavmovich@gmail.com, ORCID: 0009-0000-4159-2784

¹*Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова*
17, вул. Черноголазівська, Харків, 61002, Україна

Анотація. Сучасний стан будівельної галузі в Україні з кожним роком збільшує відсоток будівель, що реалізуються з використанням деревини в новому будівництві, підхоплюючи тенденцію європейських країн, де деревина стає основним матеріалом при реалізації житлових та громадських будівель. Поверховість таких дерев'яних каркасів вже сягає 20-30 поверхів з несучими каркасними конструкціями з клеєного бруса та CLT-панелей. Останні є новим інноваційним панельним матеріалом, що дозволяє легко та швидко збирати будівлі різної товщини, але їх ефективність значно знижується для прольотів понад 6 м. Запропоновані фанерні легкі панелі або панелі PRX є рішенням проблеми простого покриття для збільшених прольотів покриттів та перекриттів завдяки інноваційному підходу з використанням гнутих поздовжніх ребер панелей, для стійкості яких не потрібне розташування поперечних ребер. Проблема цього типу панелей полягає у визначенні відповідності Х-подібних фанерних ребер на основі досліджень з розробкою спрощеного методу розрахунку як системи факторів або коефіцієнтів, що коригують традиційні алгоритми розрахунку подібних тонкостінних конструкцій, що працюють на згин. У запропонованій розробці легких та одночасно жорстких панелей основний акцент було зроблено на простоті та технологічності виробництва панелей, спираючись на сучасне автоматизоване виробниче обладнання. Панелі PRX можуть бути використані як елементи самонесучих стін.

Метою розробки інноваційних легких фанерних панелей було створення нового технологічного рішення для перекриттів та дахів будівель для прольотів 7-20 м. Ідея легких та жорстких панелей з Х-подібними криволінійними стінками або ребрами є продовженням досліджень балок з такими стінами, де ефективність криволінійної форми фанерних стін показала певні переваги порівняно з класичними двотавровими балками з фанерними стінками. Запропоноване рішення обшивки панелей дозволяє швидко збирати будівлі різного призначення та розміщувати ізоляцію та деякі комунікації всередині панелей. Для уточнення параметрів міцності, деформативності та визначення характеру руйнувань панелей були проведені натурні статичні випробування натурального зразка, а також виконані числові дослідження в аналітичних програмних пакетах з акцентом на поведінку та податливість криволінійних фанерних стін на різних етапах навантаження панелей. На основі отриманих експериментальних та числових даних запропоновано методику, яка враховує не лише геометрію поперечного перерізу, але й його випотіння фанерними стінками або поздовжніми ребрами панелей PRX.

Ключові слова: клеєфанерні панелі, піддатливість, зігнуті ребра жорсткості, Х-подібні ребра, втрата стійкості, панелі покриття.

Вступ. Сучасний стан будівельної галузі в Україні з кожним роком збільшує відсоток будівель реалізованих з використанням деревини у новому будівництві, підхоплюючи тренд Європейських країн, де деревина стає основним матеріалом при реалізації житлових і громадських будівель. Поверховість таких дерев'яних каркасів вже сягає 20-30 поверхів з

несучими конструкціями каркасу із клеєної деревини та ПКД чи СЛТ панелей. Останні є новим інноваційним матеріалом панельного типу який дозволяє просто та швидко складати будівлі різних плануваль, але їх ефективність суттєво скорочується при прольотах більше 6м. Запропоновані клеєфанерні легкі панелі або ПРХ панелі є рішенням задачі простого покриття для збільшених прольотів покриттів і перекриттів завдяки інноваційному підходу з використанням зігнутих повздожніх ребер панелей для стійкості яких не потрібно влаштування поперечних ребер. Проблематика такого типу панелей складається у визначенні піддатливості Х-подібних фанерних ребер на основі досліджень з розробкою спрощеної методики розрахунку як системи факторів чи коефіцієнтів коригуючи традиційні алгоритми обчислень аналогічних тонкостінних конструкцій працюючих при згині.

У запропонованій розробці легких та одночасно жорстких панелях основний акцент був зроблений на простоту і технологічність виробництва панелей, спираючись на сучасні автоматизовані виробничі устаткування. ПРХ панелі можуть використовуватись як елементи самонесучих стін.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Популяризація та активні дослідження панельних дерев'яних конструкцій у вітчизняній практиці відноситься до періоду 60-90х років минулого століття. Панельні рішення як конструктивні елементи покриттів і перекриттів відомі у індустріальних та типових рішеннях житлових каркасних будівель. Загальна типологія панельних конструкцій поділяється на варіанти в залежності від поперечного перетину: коробчасті панелі і ребристі панелі в яких ребра є масивні і з'єднані відносно тонкими обшивками. Також існує рішення використання фанери у тонкостінних конструкціях як балки відповідно двотаврового типу та коробчастого типу. Система балок з тонкими стінками при блоковому компонуванні можливо розглядати як панель. Саме така аналогія дозволила перейти від ідеї блок з Х-подібною стінкою до панелей з Х-подібними стінками чи ребрами. Детальний розгляд роботи стінок різного радіусу кривини було досліджено у рамках дисертаційної роботи [1] ще у період 2011-2014 року. Конструкція балок з Х-подібними стінками захищена патентом на винахід у 2014 році [2], а конструкція ПРХ панелі із зігнутими фанерними стінками запатентована у 2023 році [3]. Близьким аналогом до запропонованих панелей є австрійські Кільштег панелі в основі яких є кілеподібна балка також із зігнутими стінками але дещо іншого характеру (рис. 1), і яка також у цей же період захищена патентом [2] у 2013 році. Дослідження щодо міцності і особливостей роботи Кільштег панелей представлені у роботах проф. Штудгартського університету S. Aicher [2].



Рис.1. Загальний вид Кільштег панелі [4-5]

Рекомендований діапазон використання Кільштег панелей сягає проліт 30м при висоті поперечного перерізу 800мм, де пояса панелі виконані з клеєної або цільної деревини товщиною 43-85мм зі стінками з ОСБ або фанери товщинами 4-12мм, згідно до технічного заключення [6] і технічних каталогів виробника [4-5]. Впровадження таких панелей реалізовано у десятках будівель, що підтверджує ефективність і об'єктивні переваги легких інноваційних рішень для покриттів будівель.

Попередні оціночні висновки щодо ПРХ панелей від розробників Кільштег панелей були позитивними у особистому спілкуванні, визнаючи що робота зігнутих ребер як циліндричної оболонки є більш вигідним ніж варіант пластини у випадку прямих ребер.

Мета та завдання. Нові конструктивні рішення будівельних конструкцій для впровадження у будівельну практику потребують наявності експериментальних і чисельних досліджень, а також їх критичний аналіз для створення і оптимізації параметрів промислового зразка, який включає розробку сортаменту конструктиву з геометричними параметрами складових. Перехід від промислового зразка до серійного потребує комплексного розгляду як сортаменту, методів спрощення технологічного процесу виробництва, які навіть можуть шкодити якості у певних діапазонах несучої здатності, але при цьому мати знижену собівартість. Такі кроки можливі лише після визначення слабких місць, чинників впливу на механічні характеристики панелі. Дослідження легких клеєфанерних ПРХ панелей із зігнутими фанерними стінками виконано як аналітично, так і чисельно через розгляд їх геометричних варіацій, а також розробка інженерного методу розрахунку ПКД панелей, що і стояло на меті виконаних досліджень та критичного аналізу отриманих даних. Існуючі аналоги для ПРХ панелей і методи розрахунку для тонкостінних систем використані у порівняльному аналізі при аналізі фактора зменшення міцності фанери при зсуві.

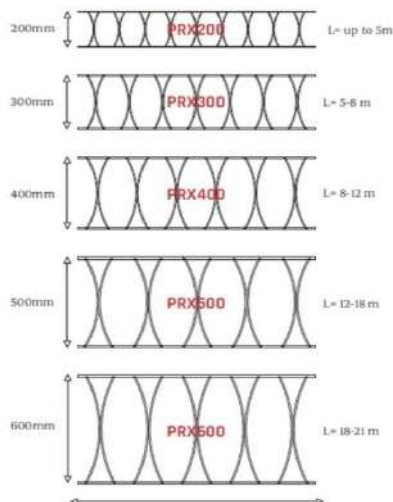
Матеріали та методика дослідження. Висока міцність фанери як листового матеріалу була визнана ще 100 років тому і вона знайшла своє використання не лише у будівельній сфері, а також у авіа будівництві періоду 40-х років у конструкції літаків ІЛ-2 у якості обшивок крил та корпусу. Робота фанери була у криволінійній геометрії та в умовах складного напруженого стану та динамічних навантажень. Масивність ПКД або CLT панелей сьогодні окреслює їх ефективність при певних умовах прольотів і навантажень, що спонукає до розробки нових легких конструктивів з великою жорсткістю та можливістю створювати будівельний підйом або вигин, що вкрай важливо для конструкцій прольотом від 12м. Технологія виготовлення ПРХ панелей базується на простому виготовленні складових у вигляді фрагментів панелі, які складаються з двох обшивок та зігнутих ребер (рис. 2). В подальшому виготовленні фрагменти панелі довжиною до 2,4м з'єднуються у панель заданої довжини певного перерізу, де вигин формується при стикуванні таких фрагментів на спеціальних стендах для укрупнюючої збірки на виробництві.

Фанерні обшивки панелі фрезеруються у повздовжньому напрямку для подальшого вклеювання у фрезеровані пази зігнутих стінок. Х-подібні ребра виготовляються шляхом скріплення двох фанерних частин у середині відносно їх ширини у повздовжньому напрямі з використанням степлерних скоб та фанерних рейок, щоб уникнути пробивання фанери стінок у місцях встановлення скоб. Вигин скріплених стінок виконується механічно і фіксується попередньо виготовленими пластинками у місцях пазів по краях ребер таким чином, щоб не заважали вклеюванню у фанерні обшивки. Ширина всіх панелей 1200мм виходячи з формату листів фанери, а відповідні товщини стінок та обшивок змінні в залежності від висоти перерізу (табл. 1). Клеєві системи для стикування Х-подібних стінок та обшивок виконується із застосуванням однокомпонентних клеїв без притискання. Торцеві ребра також влаштовуються на клеях на останній фазі виробництва.

Таблиця 1 – Геометричні параметри ПРХ панелей

Висота перерізу панелі, мм	Товщина нижньої обшивки, мм	Товщина верхньої обшивки, мм	Товщина стінок, мм	Радіус кривини стінок, мм	Співвідношення висоти стінки, до її товщини (h_w/b_w)	Макс. рекомендов. проліт панелі
300	10	10	6	300	23,33	5-8
400	12	12	6	400	31,33	8-12
500	15	15	8	500	29,38	12-15
600	15	15	8	600	35,63	15-18
800	20	20	10	800	38	18-22

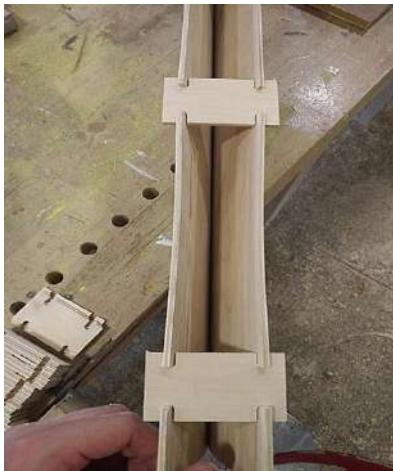
Матеріал фанери F25/E10 згідно до стандарту EN12369-2:2004 [7] та стандарту EN636:2012 [8].



а) загальний вид перерізів панелей



б) розташування ребер у обшивці панелі перед вклеюванням



в) розпірки між ребрами



г) загальний вид панелі з торцевими ребрами перед випробуванням



д) переріз панелі після випробувань

Рис. 2. Загальний вид PRX панелі та етапи виробництва

Спрощені методи інженерного розрахунку для зручності застосування PRX-панелей базуються на наближенні панелі як сукупності балок з Х-подібними зігнутими стінками, що, в свою чергу, прирівнюється до балки з тонкими стінками, рис. 3. Метод розрахунку міцності верхньої та нижньої полиць балки залишається типовим для цього типу конструкцій, а Х-подібні стінки потребують особливої уваги та врахування своєї зниженої міцності на зсув $f_{v,0,d}$ при розрахунку від сили $F_{v,w,Ed}$, яка, як правило, є максимальною в зоні опори для однопролітних шарнірно спертих балок.

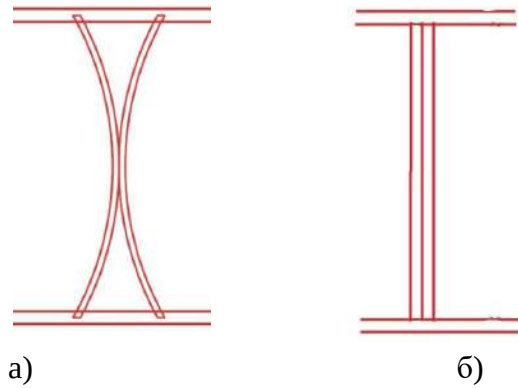


Рис. 3. Спрощення балок з Х-подібними вигнутими стінками (а) як тонкостінної двотаврової балки (б)

Діючий Єврокод-5 [9] та нова його проектна редакція prEN 1995-1-1:2023 [10] визначає, що розрахунок поперечної сили слід виконувати залежно від співвідношення висоти стінки h_w до її товщини b_w (рівняння 1 та 3). Висота стиснутих та розтягнутих полиць балки позначена відповідно як $h_{f,t}$ та $h_{f,c}$.

$$F_{v,w,Ed} \leq b_w h_w \left(1 + \frac{0,5(h_{f,t} + h_{f,c})}{h_w} \right) f_{v,0,d} \quad \text{для} \quad h_w \leq 35b_w. \quad (1)$$

У випадку, коли $h_{f,t}$ та $h_{f,c}$ однакові, замість рівняння (1) можна використовувати модифіковане рівняння:

$$F_{v,w,Ed} \leq b_w (h_w + h_f) f_{v,0,d}, \quad (2)$$

$$F_{v,w,Ed} \leq 35b_w^2 \left(1 + \frac{0,5(h_{f,t} + h_{f,c})}{h_w} \right) f_{v,0,d} \quad \text{для} \quad 35b_w \leq h_w \leq 70b_w. \quad (3)$$

Спрощені методи проектування панелей Kielsteg, які є подібними до PRX панелей, запропонували наступні алгоритми проектування, наведені в роботах [6, 11, 12], де $V_{w,k}$ та $R_{w,k}$ – характеристичні значення діючої сили зсуву та несуча здатність до зсуву стінки панелі, а ефективний поперечний переріз стінки позначено як $A_{w,eff}$:

$$V_{w,k} = R_{w,k} = A_{w,eff} \cdot f_{v,eff,k}, \quad (4)$$

$$A_{w,eff} = b_w h_w \left[1 + \frac{0,5(h_{f,t} + h_{f,c})}{h_w} \right], \quad A_{w,eff} = b_w [h_w + h_f] \quad (5)$$

Ефективна міцність на зсув у площині фанерних стінок – це добуток характеристичної міцності на зсув у площині матеріалу стінки $f_{v,0,k}$ та редуційного коефіцієнту ξ . Коефіцієнт ξ є напівемпіричним параметром, що базується на результатах випробувань, і залежить від співвідношення висоти та товщини стінок h_w/b_w .

$$f_{v,eff,k} = f_{v,0,k} \cdot \xi, \quad (6)$$

$$\xi = 0,1124 + 772 \left(\frac{b_w}{h_w} \right)^2. \quad (7)$$

Відповідно до ETA-18/1014 “KielstegVorgefertigte tragende Tafeln aus Holz und Holzwerkstoffen” [6] ефективну міцність на зсув у фанерних полотнах $f_{v,w,eff,k}$ потрібно обчислювати залежно від деякого іншого співвідношення h_w/b_w порівняно з EN1995-1-1 [9]:

$$f_{v,w,eff,k} = f_{v,0,k} = 7,5 \text{ N/mm}^2 \quad \text{для} \quad h_w / b_w < 30, \quad (8)$$

$$f_{v,w,eff,k} = 7,5 \left[0,1124 + 772 \left(\frac{b_w}{h_w} \right)^2 \right] \quad \text{для} \quad 30 \leq h_w / b_w \leq 66. \quad (9)$$

Дещо інший алгоритм розрахунку міцності пропонується для обчислення міцності зігнутих стінок ПРХ панелей при дії зсуву. Дотичні напруження мають бути меншими за міцність фанери на зсув:

$$\tau = \frac{Q \cdot S_f}{J \cdot b_w \cdot \varphi_X} \leq f_{v,w,d}, \quad (10)$$

де:

Q – сила зсуву;

S_f – статичний момент полиці відносно нейтральної осі розглянутої балки;

J – момент інерції балки;

t_w – товщина фанерних стінок;

φ_X – коефіцієнт стійкості фанерних стінок, що визначається наступним чином:

$$\varphi_X = 1 - \frac{\tau_u}{\tau_{cr}}. \quad (11)$$

Граничне напруження зсуву для фанерної стіни приймається рівним $\tau_u = 7,5$ МПа. Критичне напруження зсуву (рівняння 12) належить до розрахункової практики вигнутих фанерних циліндричних обшивок крил та корпусів літаків:

$$\tau_{cr} = \frac{k_1 \cdot E_w}{\left(\frac{H_w}{b_w} \right)^2} + 0,1 \frac{E_w}{\frac{R}{b_w}}, \quad (12)$$

де:

E_w – модуль пружності фанери;

R – радіус кривизни полотна фанери;

k_1 – коефіцієнт, що залежить від умов кріплення сторін панелі обшивки: для вільно опертих сторін панелі $k_1=5$; та для защемлених сторін $k_1=7,5$.

Результати досліджень. Порівняння величин редукційних коефіцієнтів за вище наведеними методиками наведені для ПРХ панелей виходячи з їх геометрії поперечного перерізу (табл. 1), і з величини співвідношення висоти стінки h_w до її ширини b_w (рис. 4). Для ПРХ панелей висотою перерізу 600 мм і вище спостерігається зниження міцності на зсув.

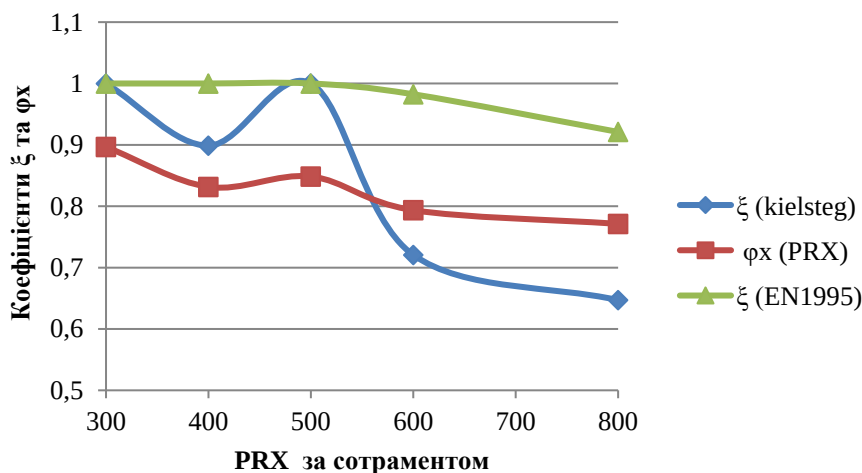


Рис. 4. Значення редукційних коефіцієнтів для фанерних стінок при зсуві

Важливою перевіркою міцності для легких тонко-реберних конструкцій є несуча здатність на стиск в зоні спирання панелі на кінцях панелі так і на проміжних опорах або при умові консольно-балочної схеми використання ПРХ панелей. Розрахунок міцності ПРХ панелі при стиску на опорі виконується наступним чином, а саме для полук:

$$\frac{F_{f,Ed}}{l \cdot b_f \cdot k_{c,90} \cdot f_{c,90,f,d}} \leq 1, \quad (13)$$

$$F_{f,Ed} = F_{Ed} \cdot \frac{E_{m,90,f,mean} \cdot b_f}{E_{m,90,f,mean} \cdot b_f + 2 \cdot E_{c,90,w,mean} \cdot b_w}, \quad (14)$$

де:

$F_{f,Ed}$ – розрахункове значення частки опорної сили на суцільній дерев'яній полці;

F_{Ed} – розрахункове значення загальної опорної сили на ідеалізований поперечний переріз;

$E_{m,90,f,mean}$ – модуль пружності при згині полук балки у поперечному напрямі відносно напрямку волокон;

$E_{c,90,w,mean}$ – модуль пружності при стиску в площині стінки поперек волокон відносно зовнішніх шарів шпону;

$k_{c,90}$ – коефіцієнт умов навантаження поперек волокон, який дорівнює 1,25 згідно до EN1995-1-1;

$f_{c,90,f,d}$ – розрахункове значення міцності при стиску поперек волокон полук;

l – довжина опори, яка сприймає навантаження.

Для стінок слід використовуватися аналогічні вирази:

$$\frac{F_{w,Ed}}{2 \cdot l \cdot b_w \cdot f_{c,90,w,d}} \leq 1, \quad (15)$$

$$F_{w,Ed} = F_{Ed} \cdot \frac{2 \cdot E_{c,90,w,mean} \cdot b_w}{E_{m,90,f,mean} \cdot b_f + 2 \cdot E_{c,90,w,mean} \cdot b_w}, \quad (16)$$

де:

$F_{w,Ed}$ – розрахункове значення частки опорної сили на стінці товщиною $2 \cdot b_w$;

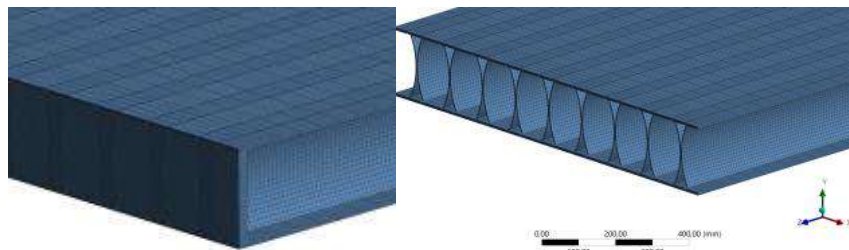
$f_{c,90,w,mean}$ – розрахункове значення міцності на стиск стінки в площині, перпендикулярній напрямку волокон зовнішніх шарів.

Верифікація точності інженерного методу розрахунку експериментальні випробування є край важливою для подальших коригувань конструкції панелі з урахуванням характеру руйнування і виявлення недоліків. На рис. 5 показано загальний вид перед прикладанням навантаження (рис. 6, а) ПРХ панелі довжиною 3000мм (прольотом 2,8мм), шириною 750мм та висотою перерізу 208мм. Схема навантажень – 4-точковий згин з прикладанням зосереджених сил у третях панелі через накладки, які передають навантаження по всій ширині панелі. Для фіксації вертикальних переміщень у місцях прикладання навантажень влаштовувались прогиноміри (D-2 та D-4), а в середині прольоту прогиномір D-3. Для визначення кута повороту торцевих ребер панелі встановлювались індикатори лінійних переміщень по середині відносно її ширини та у верхній точці відносно висоти перерізу. Навантаження панелі виконувалось з рівномірним зростанням навантаження у інтервалі часу 300+/-120с до руйнування (рис. 6, б) згідно вимог стандарту ДСТУ EN408 [13].

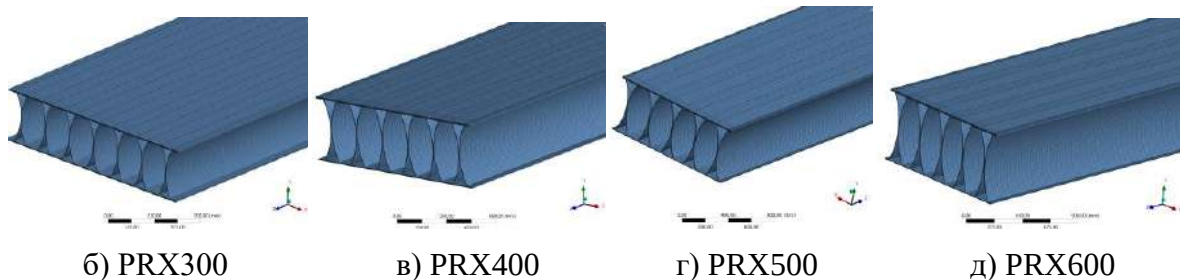


Рис. 5. Загальний вид панелі перед випробуванням (а) та після руйнування (б)

Аналітичний розрахунок всіх типів ПРХ панелей виконувався у програмному комплексі ANSYS шляхом використання об'ємних скінчених елементів (рис. 6) та введення пружних характеристик як для ортотропного матеріалу з трьома осями пружної симетрії матеріалу: $E_x=5500\text{N/mm}^2$, $E_y=370\text{N/mm}^2$, $E_z=1000\text{N/mm}^2$, $G_{xy}=700\text{N/mm}^2$, $G_{xz}=700\text{N/mm}^2$, $G_{yz}=200\text{N/mm}^2$, $\nu_{xy}=0,042$, $\nu_{yz}=0,015$, $\nu_{xy}=0,35$.



а) тип панелі PRX200 з опорним ребром жорсткості та без нього



б) PRX300

в) PRX400

г) PRX500

д) PRX600

Рис. 6. Об'ємі скінчено-елементні моделі панелей ПРХ різних типів

Отримані результати прогинів кутових переміщень, дотичних (рис. 7) та нормальних (рис. 8) напружень відносно різних осей показали співпадіння максимально напружених зон з місцями руйнування та візуальних деформацій і утворених тріщин під час випробувань.

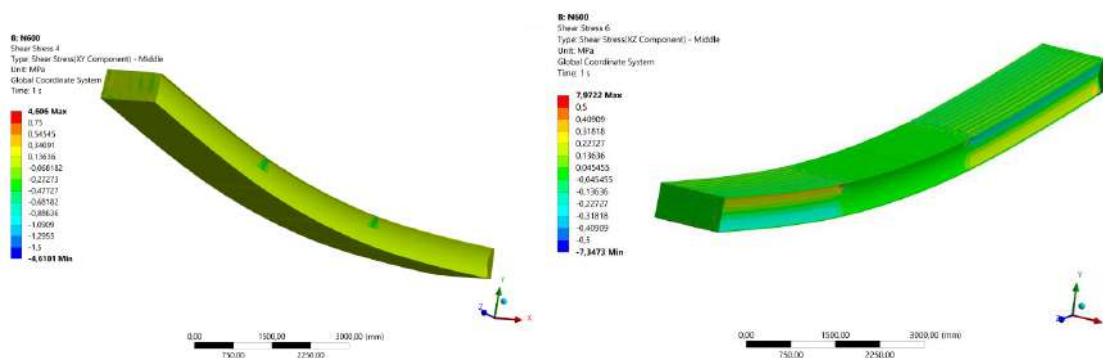


Рис. 7. Розподіл дотичних напружень у ПРХ панелі

На рис. 8 показано характер розподілу нормальних напружень в ПРХ панелях висотою перерізу 200, 300, 400 та 500 мм.

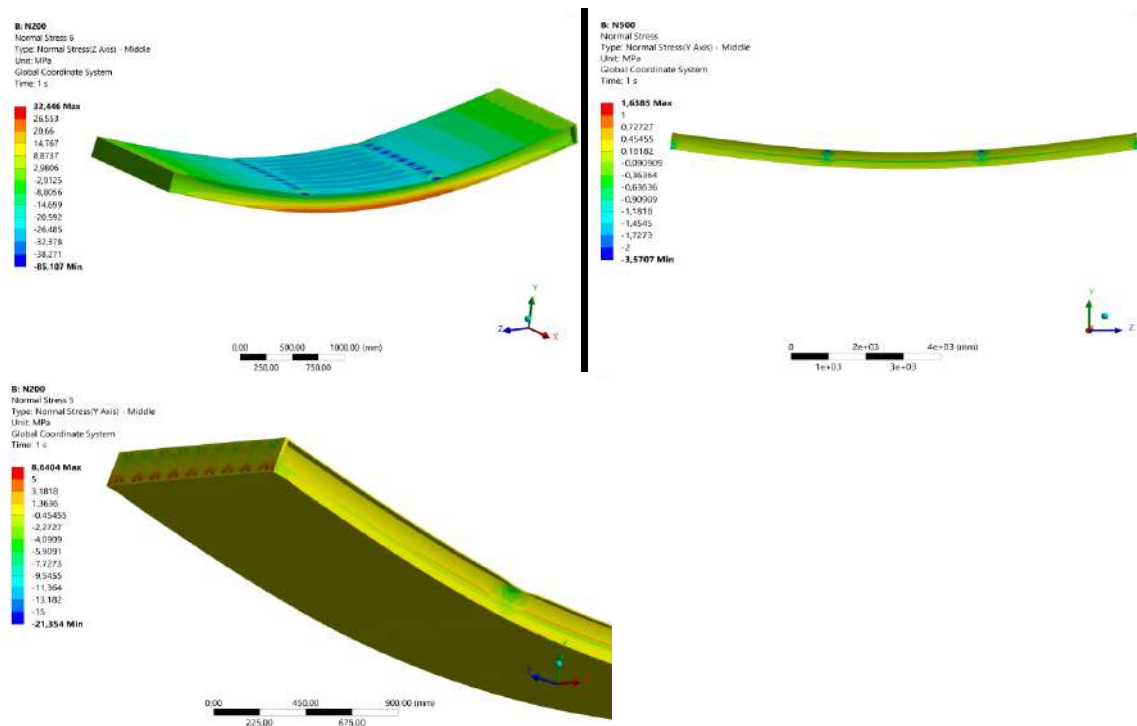


Рис. 8. Розподіл нормальних напружень у ПРХ панелях

Порівняння деформативності ПРХ панелі у середині прольоту (крива D-3) та в місцях прикладання навантаження (криві D-2 та D-4) з деформаціями у середині прольоту при чисельному аналізі у програмному комплексі ANSYS (лінія «Ansys») показано на рис. 9. Лінійна апроксимація показує рівнянням достовірність отриманих експериментальних даних для прогину у середині прольоту.

Аналіз інтенсивності кутових деформацій відносно інтенсивності деформацій у середині прольоту та в місцях прикладання навантаження показує близьке співпадіння, що підтверджується характером роботи зігнутих стінок з певним перерозподілом напружень та змінної форми стінок по довжині панелі з відповідною затухаючою складовою до опорних зон від середини прольоту.

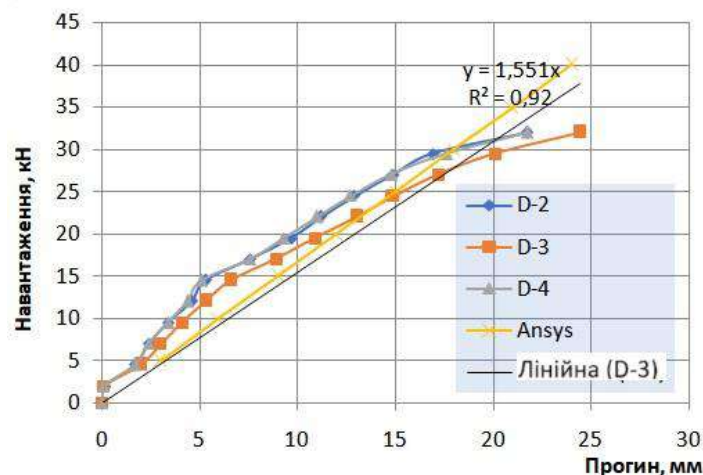


Рис. 9. Крива деформація-навантаження для панелі при випробуваннях і за результатами чисельного розрахунку

Умови експлуатації PRX панелей у відповідності до норм вогнестійкості викликають необхідність розробки рішень перерізів панелей з обшивками із клеєної деревини товщиною 50-90мм в залежності від класу вогнестійкості і відповідно часу який має витримати конструкцій до початку руйнування (REI45 чи REI60), див. ДБН В.1.1-7:2016 [14]. Таким чином PRX панель буде мати перерізи близькі до Кільштег панелей і напрацювання по балкам з Х-подібними стінками будуть більш дотичними до PRX панелей з обшивками з клеєної деревини, оскільки у балках при випробуваннях розглядався переріз з товстими поясами.

Висновки. Панель PRX – це інноваційне рішення для перекриттів та дахів будівель зі значними параметрами жорсткості завдяки роботі Х-подібних фанерних стінок. Легкість та висока міцність таких панелей, враховуючи їх автоматизацію виробництва, роблять їх конкурентоспроможним рішенням для CLT-панелей, особливо при прольотах 7 м і більше. Запропонований інженерний метод розрахунку таких панелей з Х-подібними фанерними ребрами в PRX панелях базується на методи, запропонованому в EC-5 для тонкостінних балок коробчастого та двотаврового перерізу, але з урахуванням особливостей роботи криволінійних стінок, шляхом використання додаткового коефіцієнта ϕ_x для розрахунку міцності на зсув стінок. Різниця редуційних параметрів за різними методиками складає 9-12%, де коефіцієнт для PRX панелей є більшим. Проведені статичні випробування панелі показали її деформативність та місця руйнування панелі і сам характер руйнування.

Для точної оцінки впливу кривизни стінки на значення жорсткості панелі та характер перерозподілу зусиль в обшивках було проведено аналіз методом скінченних елементів об'ємних моделей різних типів PRX панелей. Аналіз запропонованого методу розрахунку методом Eurocode-5 шляхом апроксимації Х-подібної балки двотавровою балкою показав незначні відмінності [15]. Порівняльний аналіз експериментальних випробувань PRX панелі та результатів чисельного розрахунку показує максимальну різницю у прогинах 2,4-3,1мм при межі навантаженні близької до половини несучої здатності для якої характерна зміна інтенсивності деформацій. При цьому експериментальні величини прогину у середині прольоту менша ніж за результатами обчислень.

Наявні результати проведених досліджень дають впевненість у практичному використанні запропонованих PRX панелей у будівництві покриттів та потребує додаткових подальших досліджень всієї типології панелей за сортаментом і досліджень вузлових з'єднань PRX панелей.

Література

1. Бідаков А.М. Збільшення міцності та стійкості клеєфанерних балок шляхом влаштування Х-подібної фанерної стінки: дис. д-ра техн. наук: 05.23.01 / Київський національний університет будівництва і архітектури. Харків, 2014, 185 с.
2. Патент на винахід №104243 «Клеєфанерна балка з Х-подібною стінкою». Фурсов Вадим Вікторович, Бідаков Андрій Миколайович, 10.01.14, Бюл. №1. UA104243.
3. Патент на корисну модель №150812 «Клеєфанерна панель», Бідаков Андрій Миколайович, 20.04.22, Бюл. №16. U2021 07020.
4. Kielsteg. URL: <https://www.kielsteg.com/> (дата звернення: 19.04. 2025).
5. Kulmerbau. URL: https://www.kulmerbau.at/kielsteg_68.htm. (дата звернення: 19.04. 2025).
6. ETA-18/1014. Kielsteg. Pre-fabricated wood-based loadbearing stressed Skin Panels. European Technical Assessment. 2019, 34 p.
7. EN12369-2:2011. Wood-based panels – Characteristic values for structural design – Part 2: Plywood. CEN/TC 250/SC 5. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
8. EN 636:2012. Plywood – Specifications. European Committee for Standardization CEN, Brussels, Belgium.
9. EN1995-1-1:2004. Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings, CEN, Brussels, Belgium.
10. prEN 1995-1-1:2023. Eurocode 5: Design of timber structures – Common rules and rules for buildings – Part 1-1: General. CEN/TC 250/SC 5. European Committee for Standardization,

Brussels, Belgium

11. Aicher S., Stritzke C., Klöck W. Keel-Web Element – Novel Wood-Based Lightweight Element For Wide Spans, *World conference on Timber Engineering*, Quebec, Canada, 2014.

12. Aicher S., Stritzke C. Novel lightweight timber composite element – web design in shear and compression. In: S. Aicher, H.-W. Reinhardt, H. Garrecht, Eds., Springer Dordrecht, Heidelberg, 2013, pp. 135-148.

13. ДСТУ EN 408:2007. Лісоматеріали конструкційні. Конструкційна та клеєна шарувата деревина. Визначення деяких фізичних та механічних властивостей (EN 408:2003, IDT).

14. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги [Чинний від 2017-06-01]. К.: Мінрегіонбуд України, 2017. 47 с. (Національний стандарт України)

15. Bidakov A., Strashko B., Stepinac M., Jockwer R. World Conference on Timber Engineering 2021, WCTE 20212, Reinforcement of moment resisting joints in LVL frames. URL: <https://research.chalmers.se/en/publication/527643>. Дата звернення: 01.05.2025.

References

- [1] A.M. Bidakov, "Zbilshennia mitsnosti ta stiikosti kleiefanernykh balok shliakhom vlashtuvannia Kh-podibnoi fanernoi stinka": dis. d-ra tekhn. nauk: 05.23.01, Kiïvskii natsionalnii universitet budivnistva i arkhitekturi. Kharkiv, 2014.
- [2] Patent na vynakhid no. 104243. "Kleiefanerna balka z Kh-podibnoi stinkoiu", Fursov Vadym Viktorovych, Bidakov Andrii Mykolaiovych, 10.01.14, Biul. no.1. UA104243.
- [3] Patent na korysnu model no. 150812. "Kleiefanerna panel", Bidakov Andrii Mykolaiovych, 20.04.22, Biul. no.16. U2021 07020.
- [4] Kielsteg. [Online]. Available: <https://www.kielsteg.com/> Accessed on: April 19, 2025.
- [5] Kulmerbau. [Online]. Available: https://www.kulmerbau.at/kielsteg_68.htm. Accessed on: April 19, 2025.
- [6] ETA-18/1014. Kielsteg. Pre-fabricated wood-based loadbearing stressed Skin Panels. European Technical Assessment, 2019.
- [7] EN12369-2:2011. Wood-based panels – Characteristic values for structural design – Part 2: Plywood. CEN/TC 250/SC 5. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- [8] EN 636:2012. Plywood – Specifications. European Committee for Standardization CEN, Brussels, Belgium.
- [9] EN1995-1-1:2004. Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings, CEN, Brussels, Belgium.
- [10] EN 1995-1-1:2023. Eurocode 5: Design of timber structures – Common rules and rules for buildings – Part 1-1: General. CEN/TC 250/SC 5. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- [11] S. Aicher, C. Stritzke, W. Klöck, "Keel-Web Element – Novel Wood-Based Lightweight Element For Wide Spans", *World conference on Timber Engineering*, Quebec, Canada, 2014. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/265178293_KEEL-WEB_ELEMENT_-_NOVEL_WOOD-BASED_LIGHTWEIGHT_ELEMENT_FOR_WIDE_SPANS. Accessed on: April 19, 2025.
- [12] S. Aicher, H.-W. Reinhardt, H. Garrecht, Eds., *Novel lightweight timber composite element – web design in shear and compression*, Springer Dordrecht, Heidelberg, 2013, pp. 135-148.
- [13] DSTU EN 408:2007. Lisomaterialy konstruktsiini. Konstruktsiina ta kleiena sharuvata derevyna. Vyznachennia deiakykh fizychnykh ta mekhanichnykh vlastyvostei (EN 408:2003, IDT).
- [14] DBN V.1.1-7:2016. Pozhezhna bezpeka obiektiv budivnytstva. Zahalni. K.: Minrehionbud Ukrainy, 2017.
- [15] A. Bidakov, B. Strashko, M. Stepinac, R. Jockwer, "Reinforcement of moment resisting joints in LVL frames", *World Conference on Timber Engineering*, 2021. [Online]. Available: <https://research.chalmers.se/en/publication/527643>. Accessed on: April 19, 2025.

LIGHTWEIGHT PLYWOOD PANELS WITH CURVED X-SHAPED LONGITUDINAL RIBS OF RIGIDITY

¹**Bidakov A.M.**, D.Sc., Associate Professor,
bidakov@kname.edu.ua, ORCID: 0000-0001-6394-2247

¹**Pustovoitova O.M.**, PhD, Associate Professor,
oksana_pustov@ukr.net, ORCID: 0009-0003-4774-6686

¹**Yefymovych V.**, Student,
slavmovich@gmail.com, ORCID: 0009-0000-4159-2784

¹*O.M. Beketov National University of Urban Economy*
17, Chernoglazivska str., Kharkiv, 61002, Ukraine

Abstract. The current state of the construction industry in Ukraine increases every year the percentage of buildings implemented using wood in new construction, picking up the trend of European countries, where wood is becoming the main material in the implementation of residential and public buildings. The number of floors of such timber frames already reaches 20-30 floors with load-bearing frame structures made of glued-laminated timber and CLT panels. The latter are a new innovative panel-type material that allows assembling buildings of various thicknesses easily and quickly, but their efficiency is significantly reduced for spans of more than 6 m. The proposed plywood lightweight panels or PRX panels are a solution to the problem of simple covering for increased spans of coverings and floors due to an innovative approach using bent longitudinal ribs of panels for stability of which the arrangement of transverse ribs is not required. The problem of this type of panels consists in determining the compliance of X-shaped plywood ribs based on research with the development of a simplified calculation method as a system of factors or coefficients correcting traditional algorithms for calculating similar thin-webbed structures operating in bending. In the proposed development of lightweight and simultaneously rigid panels, the main emphasis was placed on the simplicity and manufacturability of panel production, relying on modern automated production equipment. PRX panels can be used as elements of self-supporting walls.

The purpose of developing innovative lightweight plywood panels was to create a new technological solution for ceilings and roofs of buildings for spans of 7-20 m. The idea of lightweight and rigid panels with X-shaped curved webs or ribs is a continuation of research on beams with such walls, where the efficiency of the curved shape of plywood walls showed certain advantages compared to classic I-beams with plywood webs. The proposed solution of the covering panels allows assembling buildings for various purposes and place insulation and some communications inside the panels quickly. To clarify the parameters of strength, deformability and determine the nature of panel failures, full-scale static tests of a full-scale sample were conducted, as well as numerical studies were performed in analytical software packages with a focus on the behavior and compliance of curved plywood walls at different stages of panel loading. Based on the experimental and numerical data obtained, a methodology was proposed that takes into account not only the geometry of the cross-section, but also its sweating of plywood walls or longitudinal ribs of PRX panels.

Keywords: plywood panels, PRX, slip, bent stiffeners, X-shaped ribs, loss of stability, roof panels.

Стаття надійшла до редакції 9.05.2025

Стаття прийнята до друку 5.06.2025

Дата публікації статті 24.09.2025

This work by © 2025 by Бідаков А.М., Пустовойтова О.М., Єфимович В.Ю. is licensed under CC BY 4.0