

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет лісового господарства та екології  
Кафедра експлуатації лісових ресурсів та деревообробних технологій

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

КИРИЧЕНКО КОСТЯНТИН ЮРІЙОВИЧ

УДК 684.4.04

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ КЛЕЄНИХ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК ДЛЯ  
ДЕРЕВ'ЯНОГО ДОМОБУДІВНИЦТВА

205 «Лісове господарство»

Подається на здобуття освітнього ступеня «Магістр»

кваліфікаційна робота містить результати власних наукових досліджень.  
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на  
відповідне джерело

\_\_\_\_\_ К.Ю. Кириченко

Керівник роботи  
Кульман Сергій Миколайович  
кандидат техн. наук, доцент

Висновок кафедри експлуатації лісових ресурсів

за результатами попереднього захисту: \_\_\_\_\_

Протокол засідання кафедри експлуатації лісових ресурсів та деревообробних технологій № \_\_\_\_ від « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 р.

Завідувач кафедри експлуатації лісових ресурсів та деревообробних технологій

к. б. н., доцент \_\_\_\_\_ Кратюк Олександр Леонідович  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 р.

#### Результати захисту кваліфікаційної роботи

Здобувач вищої освіти Кириченко Костянтин Юрійович захистив кваліфікаційну роботу з оцінкою:

сума балів за 100-бальною шкалою \_\_\_\_\_

за шкалою ECTS \_\_\_\_\_

за національною шкалою \_\_\_\_\_

Секретар ЕК

\_\_\_\_\_ Білецька Наталія Миколаївна

## АНОТАЦІЯ

Кириченко К.Ю. Розробка і дослідження клеєних дерев'яних балок для дерев'яного домобудівництва.– Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 205 – лісове господарство. – Поліський національний університет, Житомир, 2020.

У роботі проаналізовано сучасний стан дерев'яного домобудівництва. Описано основні матеріали і конструктивні особливості несучих дерев'яних перекриттів (балок). Особливу увагу приділено способам зниження матеріаломісткості несучих дерев'яних конструкцій. Дан широкий аналіз існуючих способів посилення міцності властивостей балок.

В роботі досліджено спосіб підвищення несучої здатності прямих дерев'яних клеєних балок шляхом з попереднього напруження. Проведено прочностной аналіз підвищення згинальної міцності балок з попереднім напруженням ламелей за допомогою методу скінченних елементів. Верифікація проведених розрахунків проводилася шляхом натурального експерименту, який їх повністю підтвердив. Проведені дослідження дозволили розробити і дати практичні рекомендації щодо використання способу.

*Ключові слова:* дерев'яна балка, попереднє напруження, метод кінцевих елементів, напруги при вигині

## ANNOTATION

Kyrychenko K.Y. Development and research of glued timber beams for wooden housing construction. – Qualification work on the rights of the manuscript.

Qualifying work for a master's degree in the specialty 205 – forestry. – Polissya National University, Zhytomyr, 2020.

In master thesis the modern wooden house-building mill has been analyzed. The main materials and design features of load-bearing timber beams are described. Particular attention is paid to methods for reducing the consumption of materials bearing wood structures. A broad analysis of the existing methods of strengthening the strength properties of beams is given.

The paper investigates a method of increasing the bearing capacity of straight glued timber beams by means of prestressing. Strength analysis of increasing the bending strength of beams with prestressing lamellae using the finite element method is carried out. The verification of the calculations was carried out by a field experiment, which fully confirmed them. The research carried out made it possible to develop and give practical recommendations for using the method.

*Key words:* timber beam, prestressing, finite element method, bending stresses

## ЗМІСТ

ВСТУП	4
1. Аналіз останніх досліджень способів підвищення згинальної жорсткості дерев'яних балок	6
1.1. Існуючі конструкції дерев'яних клеєних балок, їх особливості та способи підвищення їх несучої здатності	6
1.2. Мета і завдання дослідження	6
2. Обчислювальний експеримент	7
2.1. Ціль та задачі обчислювального експерименту	7
2.2. Матеріал і методи дослідження	8
2.3. Результати і обговорення	10
2.4. Дослідження екологічної стійкості при застосуванні клеєних дерев'яних балок	15
2.5. Висновки та перспективи подальших досліджень	18
3. Верифікація математичної моделі попередньо напруженої балки	19
3.1. Мета, об'єкт та предмет дослідження	19
3.2. Матеріали і обладнання	19
3.3. Методика випробувань	19
3.4. Результати і обговорення	20
3.5. Висновки та рекомендації	25
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	26
Перелік використаних джерел	27
Додатки	27

## ВСТУП

Легковажність структур є одним з показників розвинутої цивілізації. Всі конструкції, в тому числі транспортні засоби, будинки, будівлі, товари, і т.д., з кожним роком стають все легше, а попит на них збільшується. Легкі конструкції постійно привертають увагу інженерів-будівельників протягом багатьох років.

Конструкції мінімально можливої ваги завжди привертали до себе тих, хто займається розробкою нових виробів або конструює деталі машин. Адже для їх створення можна застосувати менше матеріалу і таким чином здешевити, а значить конкурувати з аналогами. Особливу увагу до конструкцій мінімального обсягу витрачається матеріалу стало проявлятися в останні десятиліття в зв'язку зі створенням і початком широкого використання нових типів технологій, названих аддитивними.

Попередньо напружені конструкції протягом багатьох років успішно застосовуються, наприклад, в будівництві в якості несучих балок. У дерев'яному житловому будівництві використовуються як попередньо напружені прямолінійні балки, так і купольні дерев'яні конструкції, склеєні по радіусах з ламелей.

Виходячи з аналізу останніх досліджень попередньо напружених дерев'яних балок, **метою дослідження** ставилося розробка конструкції із зменшеною витратою матеріалів. **Завданням дослідження** було довести, що розроблена конструкція дійсно зможе виконувати ті ж функції, що і її аналог при меншій витраті матеріалів.

При вирішенні поставленого завдання використовувалися наступні **методики дослідження**: обчислювальний експеримент в середовищі *SolidWorks Simulation* методом кінцевих елементів (МКЕ); метод визначення межі міцності при випробуванні деревини на вигин.

**Технічною задачею**, на вирішення якої спрямовано пропонований спосіб, є підвищення несучої здатності балки при заданій висоті шляхом створення

попередньо напруженого її стану, а також спрощення конструкції балки, та розширення її технологічних можливостей.

**Об'єкт дослідження** – пряма попередньо напружена дерев'яна балка для дерев'яного домобудівництва.

**Предмет дослідження** – спосіб виготовлення прямої попередньо напруженої дерев'яної балки.

**Публікації по темі досліджень:**

1. Кириченко К. Ю. Клеєні дерев'яні балки - основні несучі елементи дерев'яних домобудівль. Проблеми ведення та експлуатації лісових і мисливських ресурсів: матеріали II Всеукраїнської науково-практичної конференції присвяченої пам'яті професора А.І. Гузія. (Житомир, 25 вересня 2020 р.). Житомир, 2020, с. 173.
2. Кириченко К. Ю., Кульман С. М. Исследование возможностей концепции рационального проектирования в деревянном домостроении. Тези Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих вчених «Сталий розвиток країни в рамках Європейської інтеграції», 12 листопада 2020 року. – Житомир: «Житомирська політехніка», 2020. – с. 110.
3. Кириченко К. Ю., Кульман С. М. Исследование экологической устойчивости при применении клееных деревянных балок. III Всеукраїнська науково-практична конференція Сучасні екологічні проблеми урбанізованих територій. (Житомир, 10-11 листопада 2020 р.). Житомир, 2020, с. 41-42.

**Практичне значення отриманих результатів.** Результати досліджень повністю підтвердили гіпотезу про можливість підвищення згинальної жорсткості при застосуванні запропонованого способу, що дає можливість пропонувати домобудівній компаніям почати випускати продукти ринкової новизни.

**Структура та обсяг роботи.** Работа содержит 28 страниц основного текста, 19 рисунков, 3 таблиц, и 7 приложений.

## **1. Аналіз останніх досліджень способів підвищення згинальної жорсткості дерев'яних клеєних балок**

### 1.1. Існуючі конструкції дерев'яних клеєних балок, їх особливості та способи підвищення їх несучої здатності

Дерев'яні клеєні балки широко використовуються в будівництві завдяки своїми явними перевагами в порівнянні з цільними (Додаток А). Здатність балки виконувати в будівельній конструкції свої функції багато в чому залежать від розуміння того як працює балка (Додаток Б).

Знаючи особливості роботи балки, розроблена достатня велика кількість балок оптимальної конструкції (Додаток В).

Велика кількість публікації, пов'язаних зі способами підвищення згинальної жорсткості дерев'яних клеєних балок говорить про актуальність вирішення даного питання (Додаток Г).

### 1.2. Мета і завдання дослідження

Виходячи з аналізу останніх досліджень попередньо напружених дерев'яних балок, метою дослідження є розробка конструкції із зменшення витрат матеріалів. Завдання дослідження також було довести, що розроблена конструкція дійсно може виконувати ті ж функції, що і її аналог при меншій витраті матеріалів. Авторське право на спосіб виготовлення прямої попередньо напруженої дерев'яної балки (pre-stressed beam) належить Поліському національному університету і захищено патентом України № 119405 (Додаток Е). Попередні (пілотні) розрахунки були проведені в 2019 році в лабораторії фізико-механічних випробувань на кафедрі експлуатації лісових ресурсів і деревообробних технологій ПНУ [1]. Однак дані розрахунки були зроблені

тільки одного класу граничних умов, тому для розширення можливостей практичного використання методу було вирішено провести більш детальні розрахунки для балок різних конструкцій.

## 2. Обчислювальний експеримент

Проведення обчислювального експерименту було здійснено шляхом побудови 3-D моделі по методу кінцевих елементів з використанням комерційного коду *SolidWorks Simulation* для моделювання переднапруженої поведінки глулямових балок з використанням попередньо напружених дерев'яних ламелей. Деревина ламелей моделюється як ортотропними лінійний пружний матеріал при розтягуванні і стисненні. Були змодельовані умови контакту між попередньо напруженими дерев'яними ламелями [2].

### 2.1. Мета та завдання обчислювального експерименту

Метою даного дослідження є вивчення властивостей попередньо напружених дерев'яних конструкцій шляхом моделювання їх механічного поведінки під навантаженням з використанням методу скінченних елементів і перевірки отриманих розрахункових моделей на спеціальному стенді.

Тривимірні моделі кінцевих елементів були розроблені для імітації прогину попереднього напруження балок. Щоб спростити модель, деякі параметри були проігноровані, такі як спотворення в зерні, зміна температури і щільності. Хоча у деревини існують різні швидкості деформації і коефіцієнти деформації в 3-х напрямках L, R і T, коефіцієнтом набухання в напрямку L нехтували.

Взаємодія між ламелями моделюється шляхом визначення як дотичного, так і нормальної поведінки контакту. Формула тертя є «грубої» в



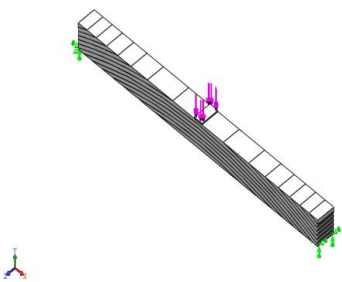
тангенціальному поведінці і «жорстким контактом» для подолання тиску при нормальному поведінці.

Властивості матеріалу, використаного при моделюванні, були отримані з результатів експерименту за допомогою випробувань на зрушення і стиснення.

## 2.2. Матеріал і методи дослідження

Як об'єкт дослідження в обчислювальному експерименті, використовувалася 3D модель розміром 300 x 20 x 20 мм, склеєна з пластин прямої форми розміром 300 x 20 x 3 мм з матеріалу, механічні властивості якого представлені в таблиці 1. Умови консолідації однакові для різних варіантів навантаження. У термінології *SolidWorks Simulation* геометрія нижніх поперечних ребер приймалася фіксованою. Вони показані за посиланням на модель в табл. 1. Тут показана так само прийнята в обчислювальному експерименті робоче навантаження у вигляді сили  $P = 1000$  Н, яка діє на верхню площину балки в середині її прольоту. Розрахункові моделі були вивчені для чотирьох типів балок однакового розміру: суцільні з масиву балки; клеєні балки з прямих ламелей; вигнуті балки з ламелей з радіусом 1000 мм; балки з вигнутих ламелей з радіусом 500 мм.

Таблиця 2.1. Умови кріплення та властивості матеріалу

Посилання на модель	Properties	
	Type of model:	Linear Elastic Isotropic
	Flow limit:	1.12e+008 N/m <sup>2</sup>
	Bulk density:	600 kg/m <sup>3</sup>

	Modulus of elasticity: 1.4e+010 N/m <sup>2</sup>
	Poisson coefficient: 0.394

Сітка кінцевих елементів моделі представлена на рис. 2.1. Метою експерименту було дослідити жорсткість на вигин прямолінійної балки, клеєної з криволінійних ламелей, за відсутності попередніх напружень у ламелях, та за наявності таких напружень. Методологічна сітка обчислювальних експериментів включає чотири варіанти умов навантаження, наведені в табл. 2.2.

У кожному з варіантів були розраховані наступні значення (символи згідно програми SolidWorks Simulation): фон Мізеса - еквівалентна напруга по Мізесу, МПа; SX - нормальне напруження при перетині згину, МПа; URES - рух у напрямку результуючого навантаження, мм.

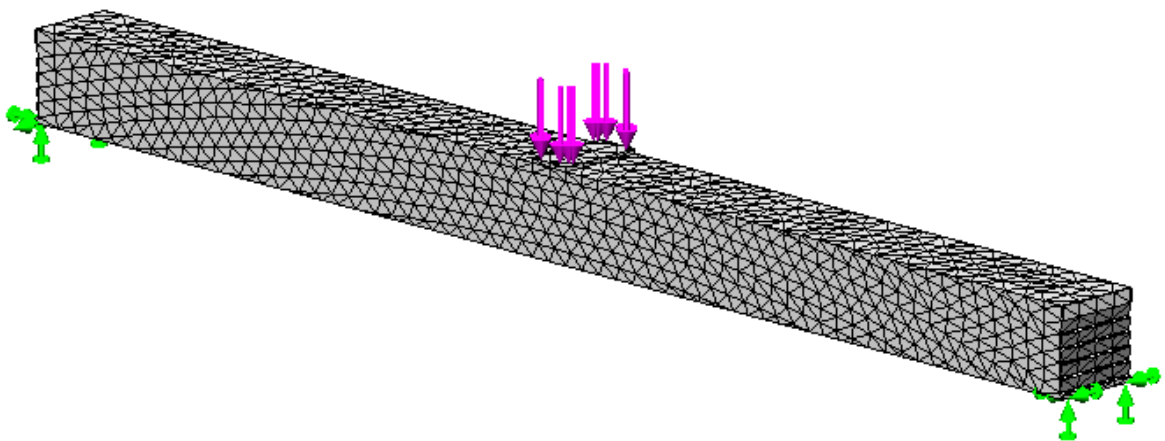


Рис. 2.1. Сітка кінцевих елементів прямолінійної балки з малюнком із попередньо деформованих ламелей

### 2.3. Результати і обговорення

Результати дослідження в *SolidWorks Simulation* представлені в таблиці 2.2. Перший варіант навантаження полягав у створенні поперечно напруженої балки та визначенні максимальних еквівалентних та нормальних напружень.

Модель. На рис. 2.2 показано змодельоване відхилення вгору, тобто попередній розвал, для балки, посиленої склеюванням поперечно напружених пластин.

Попередньо напружений стан ламелей у зігнутому та фіксованому (склеєному) положенні імітували, розтягуючи верхні шари кожної з ламелей з їх глобальним контактом. Діаграма нормальних напружень четвертого типу клеєного бруса під дією попереднього напруження наведена на рис. 2.2.

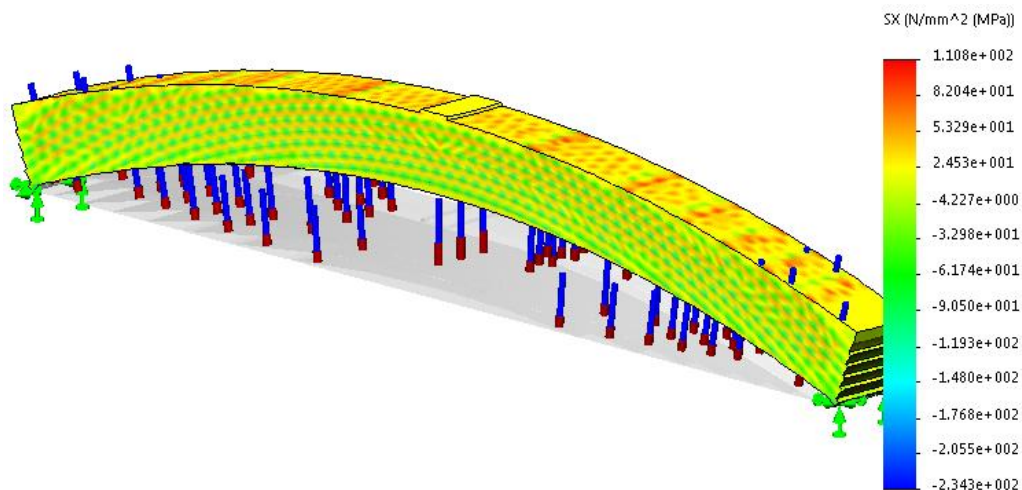
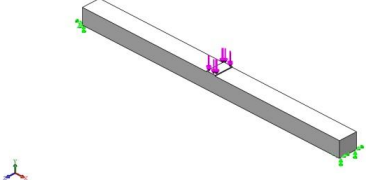
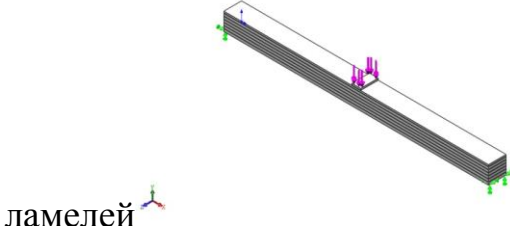
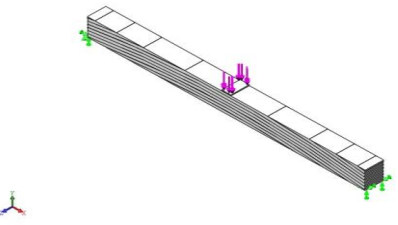
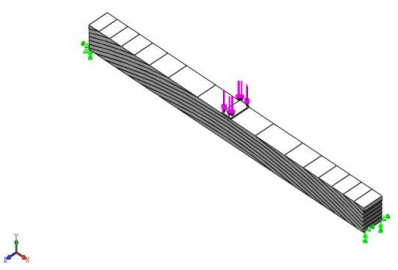


Рис. 2.2. Ділянки заздалегідь створених нормальних напружень у кожній з планок балки. Моделювання попередньої деформації для армованої балки

Як впливає з рис. 2.2, кожна з ламелей має розтягнуті ділянки у верхній частині з напругою розтягування від  $SX = +25$  МПа до  $SX = +30$  МПа і стиснуту область знизу з напругою стиснення  $SX = -30$  МПа до  $SX = -60$  МПа.

Таблиця 2.2. Методологічна мережа експериментів та результати імітаційних досліджень

Тип балки	Test results		
	MOR Von Mises, MPa	MOR SX, MPa	URES, mm
<p>Балка з масиву</p> 	37,3	27,4	1,458
<p>Клеєна з прямих ламелей</p> 	38,1	31,1	1,466
<p>Попередньо напружена з радіусом 1000</p> 	63,3	50,2	0,481
<p>Попередньо напружена з радіусом 500</p> 	62,4	49,9	0,466

Другим варіантом моделювання було створення робочого навантаження на верхню площину балки при відсутності попереднього натягу. Діаграма переміщення цього варіанту наведена на рис. 2.3. Як бачимо, максимальний прогин в середині балки становив  $URES = 1,535$  мм.

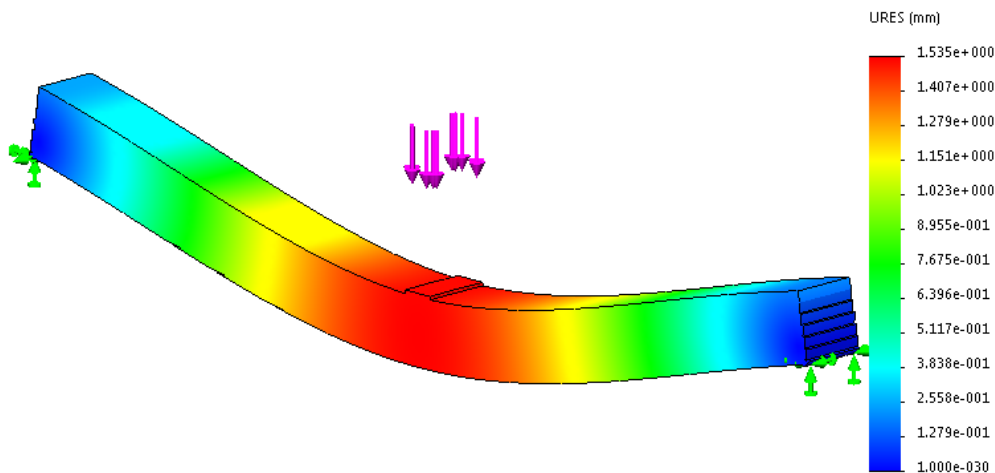


Рис. 2.3. Зсув балки без попереднього натягу у напрямку навантаження

Діаграма нормальних напружень при вигині балки представлена на рис. 2.4. Значення внутрішніх напружень знаходяться в діапазоні від  $SX = - 57$  МПа в зоні стиску до  $SX = + 32,47$  МПа в розтягнутому.

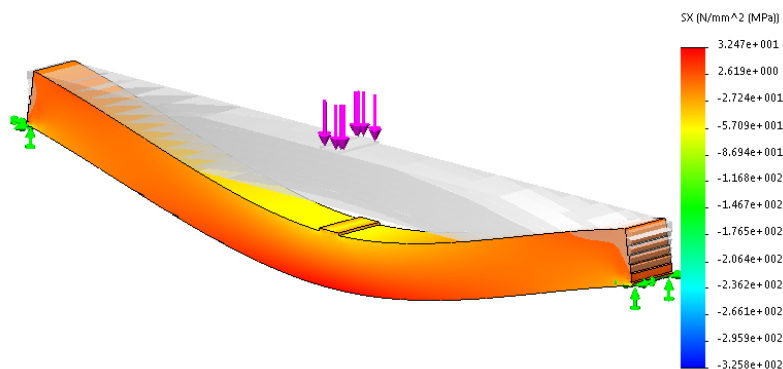


Рис. 2.4. Схема нормальних напружень в балці без попереднього натягу

Третя версія імітації була за наявності як попередньої напруги, так і навантаження. На рис. 2.5 показана схема переміщень для цього варіанту.

Максимальний прогин в середині балки становив  $URES = 0,466$  мм.

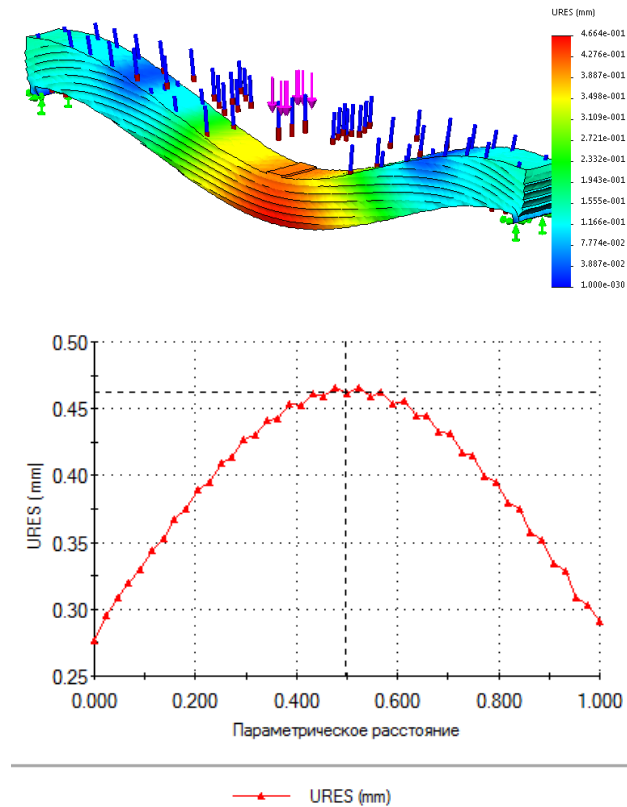


Рис. 2.5. а) діаграма переміщень попередньо напруженої балки у напрямку навантаження на вигин; б) параметричний графік руху нижнього краю у вузлах

Діаграма нормальних напружень при вигині балки у випадку попереднього натягу наведена на рис. 2.6. Значення внутрішніх напружень знаходяться в діапазоні від  $SX = -10$  МПа до  $SX = -100$  МПа в зоні стиску до  $SX = +20$  МПа до  $SX = +60$  МПа в розтягнутому.

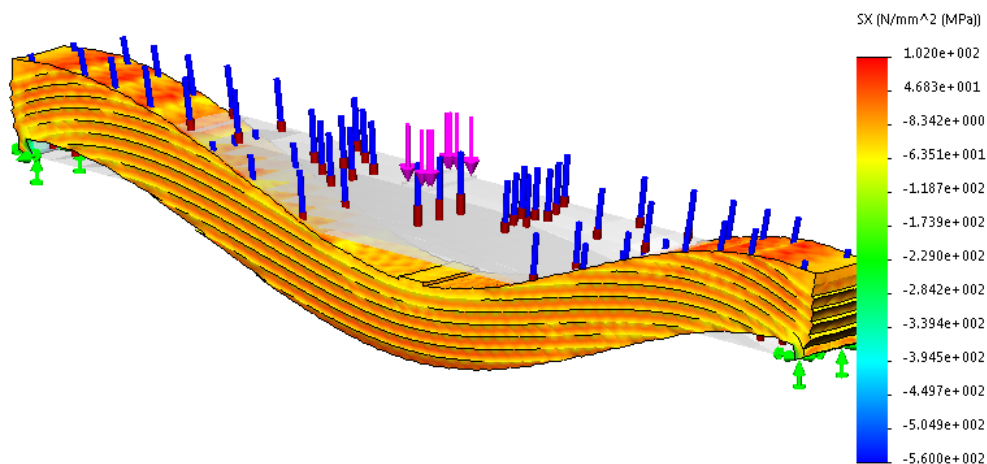


Рис. 2.6. Схема нормальних напружень у попередньо напруженої балки

На рис. 2.7 параметризовані графіки нормальних напружень представлені в проектних точках скінченних елементів для різних склеєних ламелей, починаючи з найнижчого.

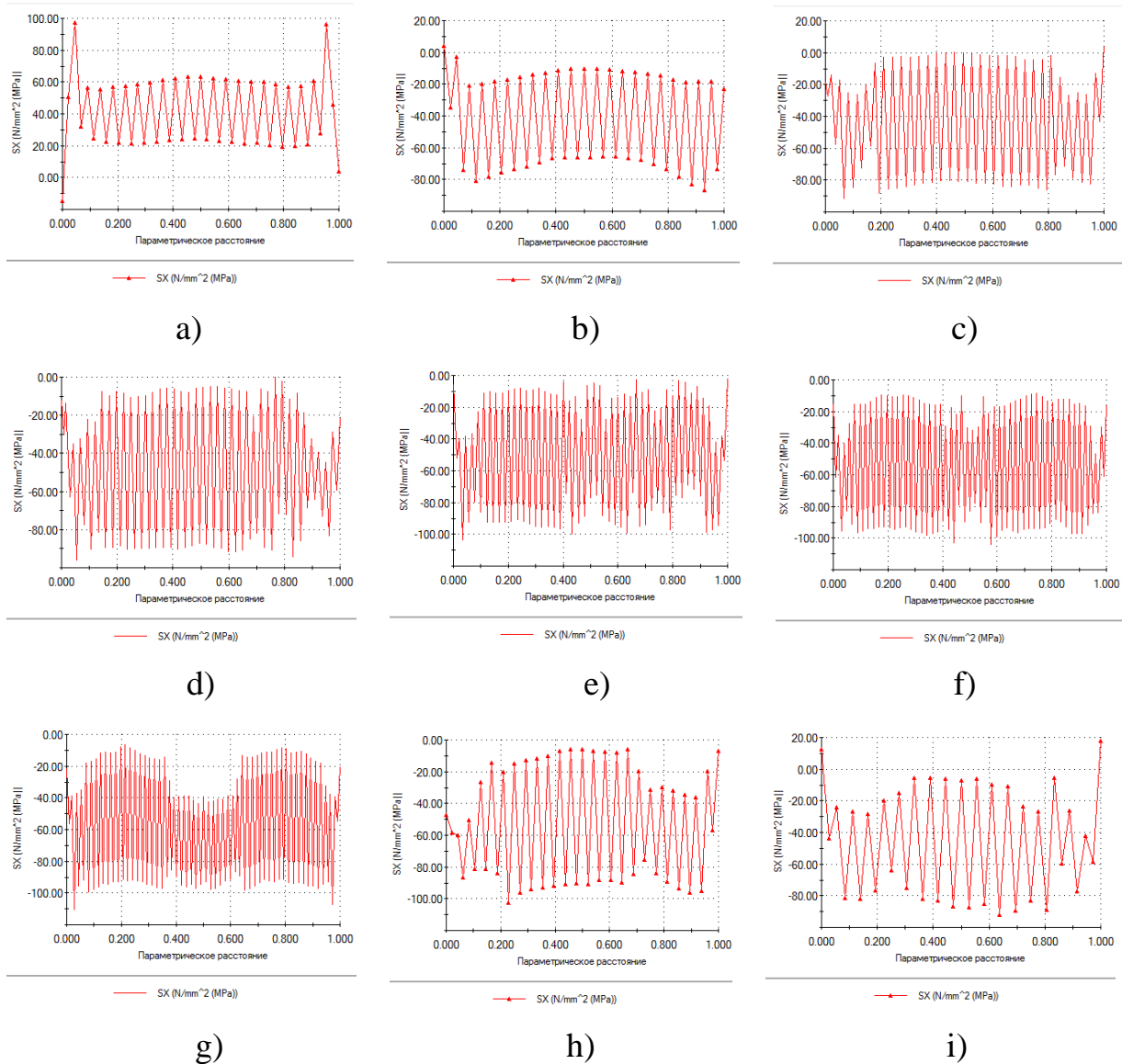


Рис. 2.7. Параметризовані графіки нормальних напружень у проектних точках скінченних елементів. а - нижній край першої ламелі; б - друга ламеля; в - третя ламеля; г - четвертий; е - п'ятий; ф - шостий; г - сьомий; h - восьмий; і - дев'ятий.

Результати експериментів представлені в табл. 2.2 вказують, що для початкових та граничних умов, які ми прийняли, попереднє напруження балки збільшує її несучу здатність більш ніж утричі.

Застосування методу передбачає збільшення несучої здатності прямолінійної балки прямокутного зрізу на заданій висоті, що дозволить розширити технологічні можливості та спростити конструкцію балки.

#### 2.4. Дослідження екологічної стійкості при застосуванні клеєних дерев'яних балок

Вплив на навколишнє середовище відбувається на всіх етапах життя продукту. Впливу на навколишнє середовище, пов'язані з виробництвом, використанням та утилізацією, наприклад, велосипеда, сильно відрізняються від утилізації машини. Але незалежно від характеру, розміру і часу виникнення екологічних впливів продукту, переважна більшість з них можуть бути вирішені на ранніх етапах розробки продукту.

Приблизно 80% екологічного профілю продукту є фіксованим при створення концепції в розробці продукту. Таким чином, розробник продукту впливає на життєвий цикл продукту, а також на його подальші дії. Саме тут матеріали, технології і термін служби продукту фіксовані. Отже, важливо, щоб розробник продукту включав екологічні міркування ретельно і систематично в проект розвитку. В процесі розробки продукту, необхідно робити також оцінку того, які екологічні наслідки будуть найбільш вірогідні в перебігу життя продукту. Важливо що сьогодні управління навколишнім середовищем стало невід'ємною частиною процесу розробки продукту, нарівні з такими міркуваннями, як вартість, якість, дизайн і т.д.. Беручи систематичний і творчий підхід до екологічних поліпшень при розробці продукції, можна створювати інноваційні та радикально поліпшені екологічні концепції .

Важливо також те, що сьогодні існують програми проектування промислових продуктів, які глибоко інтегровані з програмами екологічної безпеки урбанізованих територій. Однак їх використання поки зовсім незначно, тому наша мета - показати необхідність використання таких програм при



проектуванні нових промислових виробів з метою створення продукту з мінімальним впливом на навколишнє середовище [3,4].

Як об'єкт дослідження була прийнята клеєна попередньо напружена дерев'яна балка, модель якої була створена в середовищі SolidWorks і досліджена в SolidWorks Simulation. Модель і результати статичних досліджень представлені на Рис. 2.8. Після цього в програмі SolidWorks Sustainability були визначені всі фактори, пов'язані з навантаженням на навколишнє середовище при її заготівлі, виробництві, транспортуванні, експлуатації та утилізації. Результати аналізу програми для двох матеріалів: поточний - дуб; попередній - сосна; представлені на Рис. 2.9.

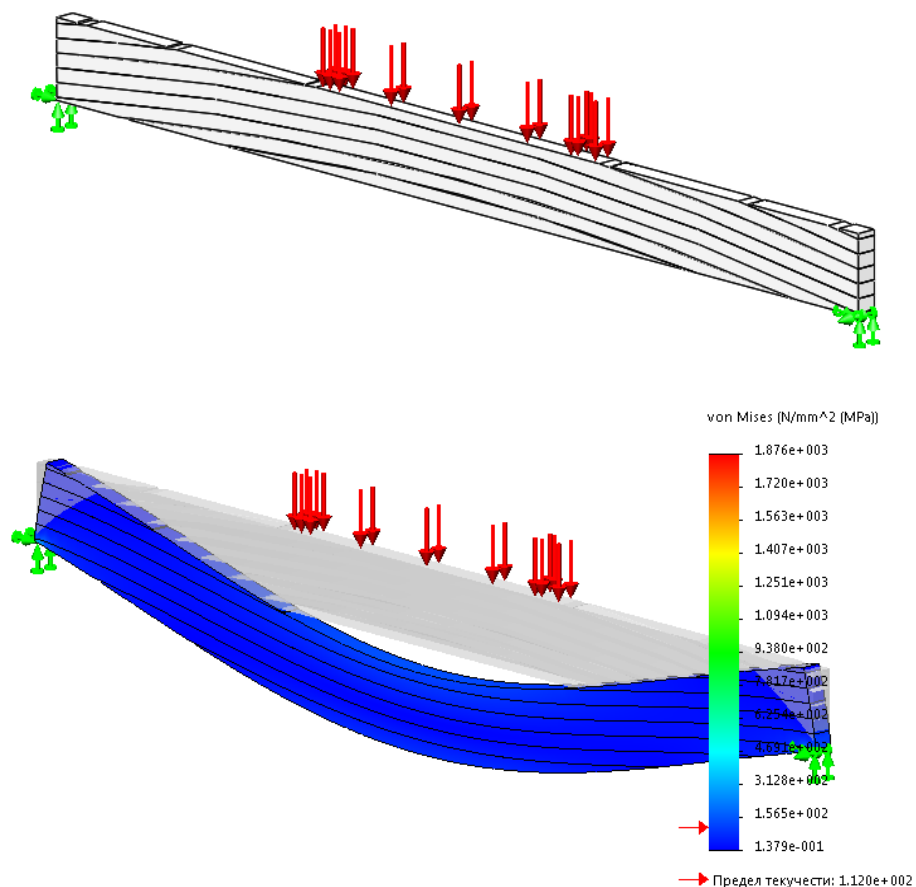


Рис. 2.8. Модель і результати статичних досліджень які були використані в якості вихідних даних при аналізі екологічного тиску при виробництві продукту

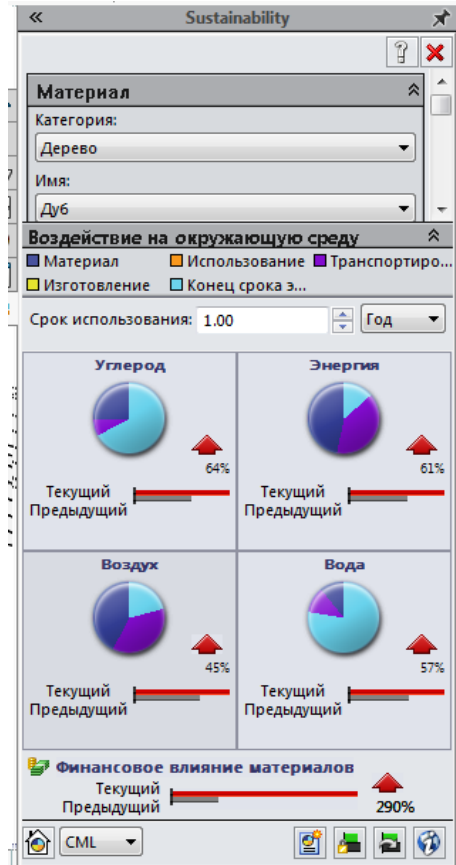


Рис. 2.9. Результаты анализа программы для двух материалов: поточный - дуб; попередній - сосна; представлені на Вплив на навколишнє середовище (розраховується на основі методології оцінки впливу CML) представлено на Рис. 2.10.



Рис. 2.10. Вплив на навколишнє середовище (розраховується на основі методології оцінки впливу CML)

Як бачимо виготовлення продукту з деревини сосни набагато вигідніше, ніж з дуба. Таким чином, ми ще раз підтвердили правильність використання саме сосни в дерев'яному житловому будівництві.

## 2.5. Висновки та перспективи подальших досліджень

На основі аналізу отриманих результатів імітаційної моделі можна зробити наступні висновки:

1. Застосування явища попереднього напруження дозволяє створювати конструкції з прямолінійних клеєних дерев'яних балок зменшеного вмісту матеріалу.

2. У цьому випадку ефект збільшення несучої здатності дерев'яних балок буде обмежений силою стиснення матеріалу, з якого він виготовлений.

3. З метою отримання більш точних значень збільшення коефіцієнта збільшення несучої здатності запропонованої конструкції дерев'яних балок планується провести експерименти *in situ* на спеціальному програмно-апаратному комплексі лабораторії механічних випробувань.

## 3. Верифікація математичної моделі попередньо напруженої балки

### 3.1. Мета, об'єкт та предмет дослідження

Мета натурного експерименту - підтвердити або спростувати результати обчислювальних експериментів.

Об'єкт дослідження - дерев'яна балка.

Предмет дослідження - залежність міцності властивостей балки від її конструктивних особливостей і величини попереднього напруження.

### 3.2. Матеріали і обладнання

Матеріали. В якості вихідних матеріалів для виготовлення натурних моделей використовувалися тонкі плоскі ламелі з бука довжиною 200 мм, шириною 20 мм, товщиною 3 мм і вологістю МС 6%, з яких склеювалися зразки розміром 200x20x20 для проведення випробувань. Натурні моделі були вивчені для чотирьох типів моделей балок однакового розміру: суцільні з масиву бука; балка клеєна з прямих ламелей; балки з вигнутих планок з радіусом 1000 мм; балки з вигнутих планок з радіусом 500 мм. Всього було виготовлено по 6 балок кожного типу.

При проведенні випробувань підтримувалася постійна температура 20° С і вологість RH 65%.

### 3.3. Методика випробувань

Всі балки випробовувалися на трьох точечний вигин. Визначення межі міцності досліджуваних композиційних матеріалів з деревини на вигин проводилися згідно з ГОСТ 10635-88 (Додаток Ж).

Устаткування для проведення експериментів.

Всі випробування проводилися на розривної машині P5-M2 при постійній швидкості деформації 2 мм/хв за допомогою спеціального пристосування для випробування деревини на вигин. Загальний вигляд і налагодження випробувань зразка № 334 показана на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Загальний вигляд (зліва) і налагодження випробувань зразка № 334 (праворуч)

Випробування проводилися в автоматичному режимі за допомогою спеціального програмного забезпечення (Додаток Е).

#### 3.4. Результати і обговорення

Результати експериментів в залежності від конструкції балки (змінний фактор експерименту) представлений в табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Результати натурних експериментів в залежності від конструктивних особливостей досліджуваних балок

Тип	Номер зразка	Постійні чинники			Результати експериментів	
		l, mm	b, mm	h, mm	Максимальне навантаження, (F), Н	Предел прочности (MOR), МПа
ННЦБ <sup>а</sup>	1	160	20,1	20,2	2210	64,67

	2	160	19,8	20,1	2236	67,09
	3	160	20,1	20,1	2230	65,91
	4	160	20,2	19,9	2111	63,33
	5	160	19,9	20,1	2213	66,06
	6	160	19,9	20	2130	64,22
	Середнє	160	20	20	2188	65,21
	ННКБ <sup>b</sup>	1	160	20,0	20,4	2267
2		160	20,0	20,1	2348	69,56
3		160	20,4	19,7	2332	70,97
4		160	20,0	19,5	2307	72,88
5		160	19,9	19,8	2316	70,94
6		160	19,9	20,0	2319	69,97
Середнє		160,00	20,04	19,91	2314,86	69,95
ПНБ500 <sup>c</sup>	1	160	19,6	19,7	3197	101,19
	2	160	19,8	20,0	3813	115,74
	3	160	20,0	20,1	3593	106,51
	4	160	19,5	19,6	3510	112,12
	5	160	20,5	19,8	3563	106,63
	6	160	19,8	19,6	3546	112,07
	Середнє	160,00	19,87	19,79	3536,92	109,04
ПНБ1000 <sup>d</sup>	1	160	19,6	20,1	2675	81,36
	2	160	20,0	20,0	2483	74,69
	3	160	19,6	19,8	2836	88,51
	4	160	20,0	19,8	2702	82,88
	5	160	19,8	19,8	2757	85,19
	6	160	19,5	20,2	2714	82,02
	Середнє	160,00	19,74	19,94	2694,58	82,44

ННЦБ<sup>a</sup> – ненапружена суцільна балка;

ННКБ<sup>b</sup> – ненапружена клеєна балка;

ПНБ500<sup>c</sup> – попередньо напружена балка з радіусом вигину 500 мм;

ПНБ1000<sup>d</sup> – попередньо напружена балка з радіусом вигину 1000 мм;

Графіки залежності сили від переміщень і деформацій при випробуванні балок різної конструкції представлені на рис. 3.2.–3.9.



Рис. 3.2. Графік залежності зусилля - переміщення для попередньо напруженої балки ПНБ1000

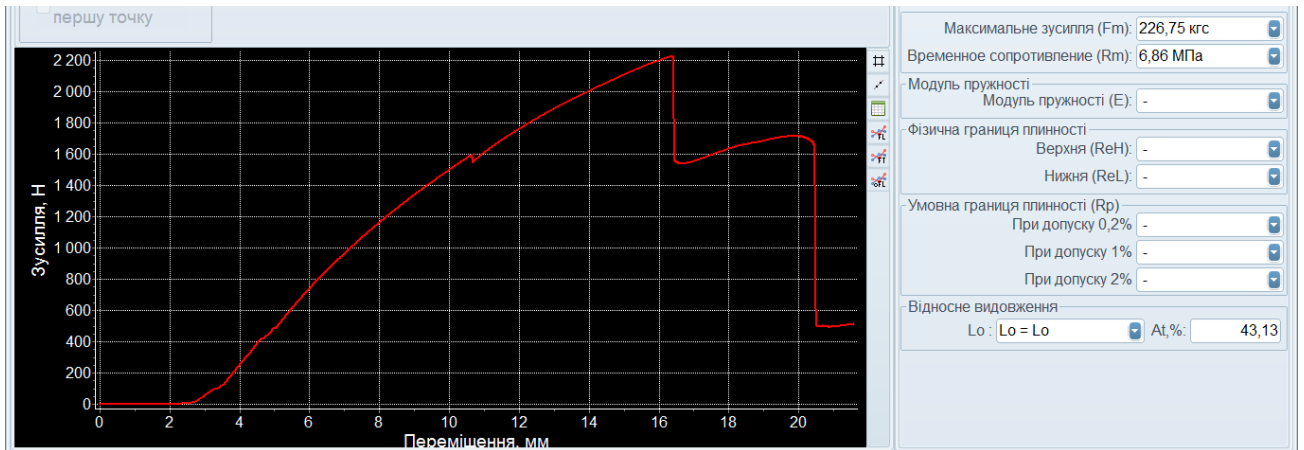


Рис. 3.3. Графік залежності зусилля - переміщення для не напруженої клеєної балки (ННКБ)

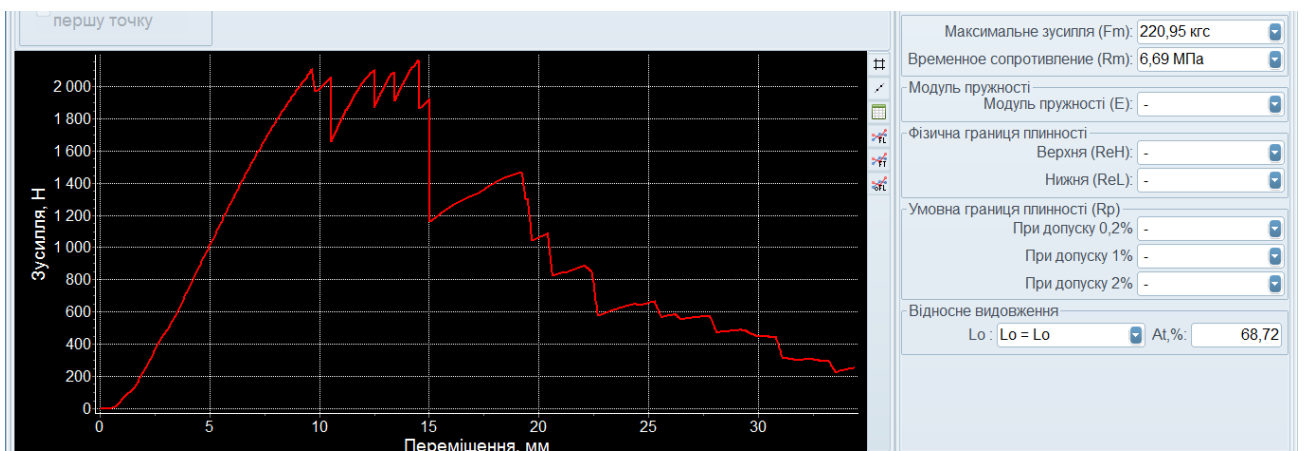


Рис. 3.4. Графік залежності зусилля - переміщення для не напруженої цільної балки (ННЦБ)

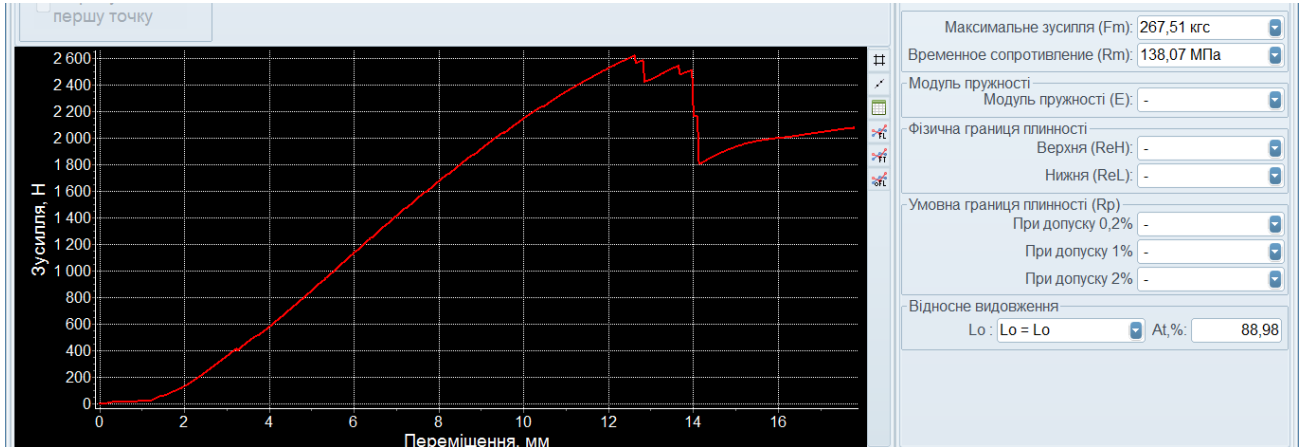


Рис. 3.5. Графік залежності зусилля - переміщення для попередньо напруженої балки ПНБ500

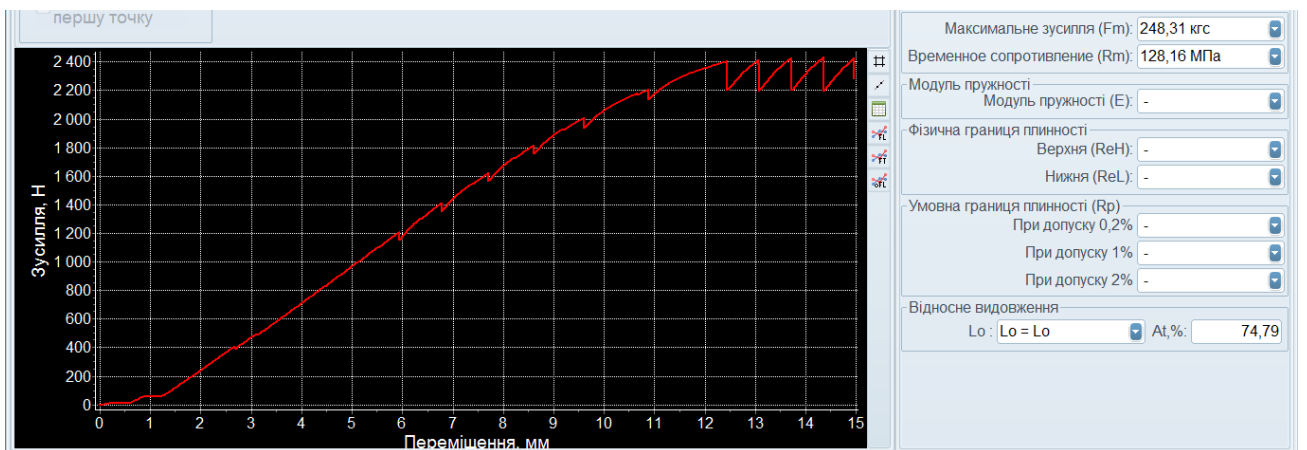


Рис. 3.6. Графік залежності зусилля - переміщення для попередньо напруженої балки ПНБ500

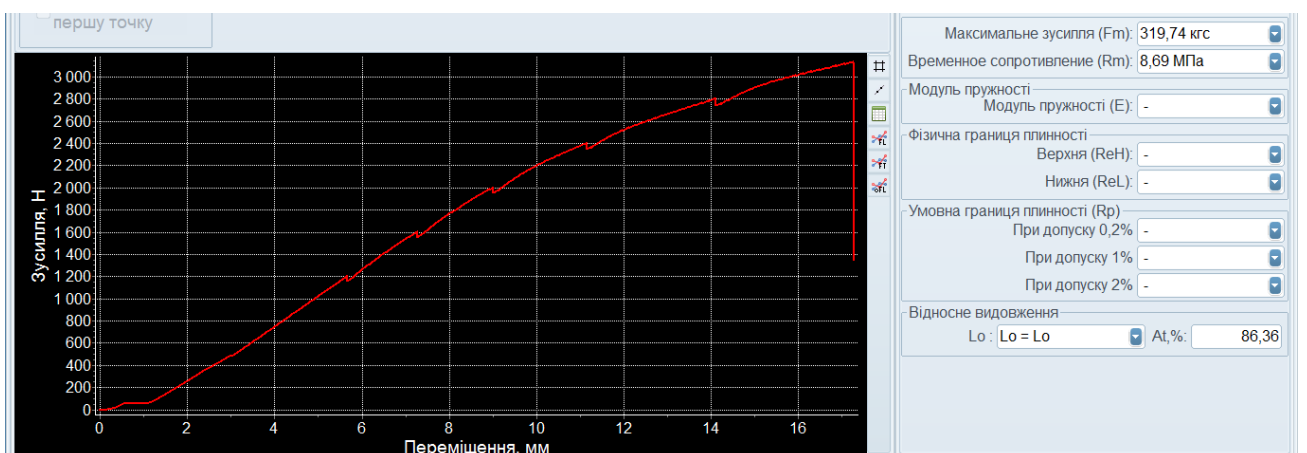


Рис. 3.7. Графік залежності зусилля - переміщення для попередньо напруженої балки ПНБ1000



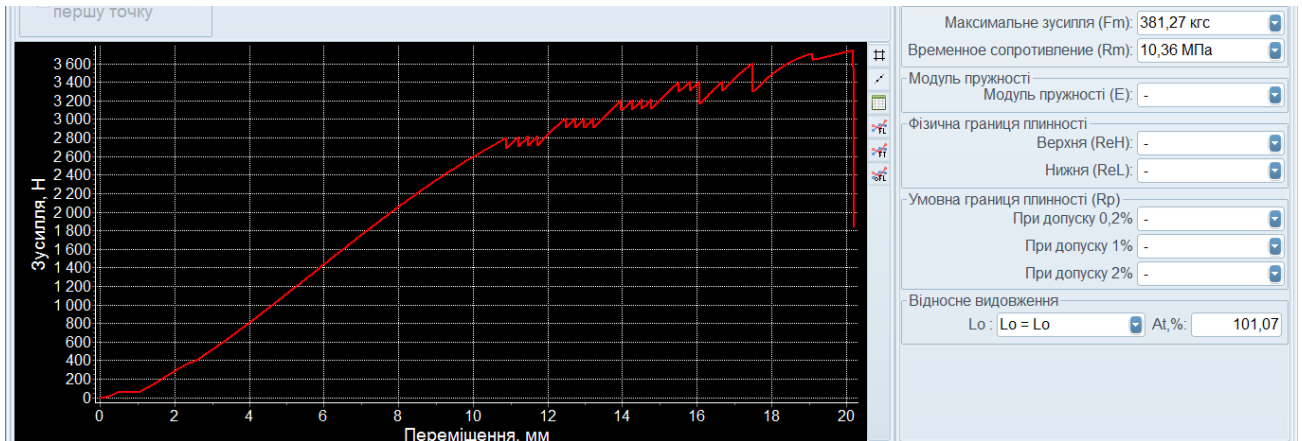


Рис. 3.8. Графік залежності зусилля - переміщення для попередньо напруженої балки ПНБ1000

На підставі проведених досліджень показаних в табл. На рис. 3.9 показана графічна залежність межі міцності при вигині від конструктивних особливостей дерев'яних балок.

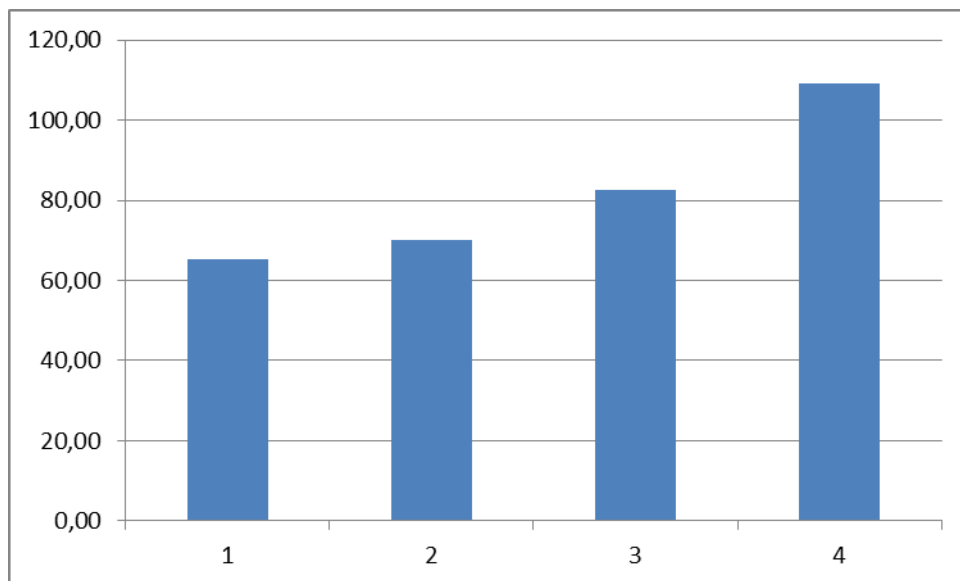


Рис. 3.9. Порівняльна гістограма середніх значень меж міцності (MOR, МПа) при вигині дерев'яних балок в залежності від конструкції:

- 1 - ННЦБ - ненапружена суцільна балка;
- 2 - ННКБ - ненапружена клеєна балка;
- 3 - ПНБ500- попередньо напружена балка з радіусом вигину 500 мм;

4 - ПНБ1000- попередньо напружена балка з радіусом вигину 1000 мм;

На підставі результатів натурних експериментів можна стверджувати, що попередньо напружені дерев'яні балки, виготовлені за пропонуваним способом мають згинальну жорсткість більше, ніж такі ж клеєні балки з прямолінійних ламелей, на 40 ... 50% більше. Причому це в багато залежить від радіуса вигину ламелей при склеюванні.

Результати як обчислювальних, так и натурних експериментів свідчать про те, що, застосовуючи попереднє напруження, згинаючи ламель в напрямку протилежному вигину від робочого навантаження ми можемо компенсувати вплив робочого навантаження. А значить підвищувати згинальну жорсткість клеєної дерев'яної балки. Використання способу забезпечення підвищення несучої здатності прямолінійної балки прямокутного січення при заданій висоті, дозволить розширити технологічні можливості та спростити конструкцію балки.

### 3.5. Висновки

На основі аналізу отриманих результатів симуляційного моделювання та експерименту *in situ* можна зробити такі висновки:

1. Застосування феномена попередньої напруги дозволяє створювати конструкції прямолінійних клеєних дерев'яних балок зниженої матеріалоемності.
2. При цьому ефект підвищення несучої здатності дерев'яної балки буде обмежений межею міцності на стиск матеріалу з якого вона виготовлена.
3. Підвищення згинальної міцності багато в чому залежить від радіуса вигину ламелей.
4. Для отримання більш точних значень збільшення коефіцієнта підвищення несучої здатності пропонуваної конструкції дерев'яної балки в залежності від

радіуса вигину планується провести додаткові експерименти на спеціальному програмно-апаратному комплексі лабораторії механічних випробувань кафедри експлуатації лісових ресурсів та деревообробних технологій Поліського національного університету.

### **Загальні висновки**

1. В роботі дан аналіз останніх досліджень способів підвищення изгибной жёсткости дерев'яних клеєних балок. Описано основні існуючі конструкції дерев'яних клеєних балок, їх особливості та способи підвищення їх несучої здатності.
2. Застосування явища попереднього напруження дозволяє створювати конструкції прямолінійних клеєних дерев'яних балок зменшеного вмісту матеріалу. У цьому випадку ефект збільшення несучої здатності дерев'яних балок буде обмежений силою стиснення матеріалу, з якого він виготовлений.
3. Досліджено екологічну стійкість при застосуванні клеєних дерев'яних балок. Результати аналізу програми розрахунку впливу продукту на навколишнє середовище дозволили зробити висновок, що виготовлення продукту з деревини сосни набагато вигідніше, ніж з дуба. Таким чином, ми ще раз підтвердили правильність використання саме сосни в дерев'яному житловому будівництві.
4. На основі аналізу отриманих результатів симуляційного моделювання та експерименту *in situ* можна говорити що застосування феномена попередньої напруги дозволяє створювати конструкції прямолінійних клеєних дерев'яних балок зниженої матеріалоемності.
5. Підвищення згинальної міцності багато в чому залежить від радіуса вигину ламелей. Для отримання більш точних значень збільшення коефіцієнта підвищення несучої здатності запропонованої конструкції

дерев'яної балки в залежності від радіуса вигину планується провести додаткові експерименти на спеціальному програмно-апаратному комплексі лабораторії механічних випробувань кафедри експлуатації лісових ресурсів та деревообробних технологій Поліського національного університету.

### Список використаних джерел

1. Кульман С. М., Бугаєнко Я. П., Бойко Л. М., Загурський Й. В. Дослідження феномену попереднього напруження дерев'яних клеєних балок. Науковий вісник НЛТУ України. 2019, т. 29, № 5. С. 97–102. <https://doi.org/10.15421/40290519>
2. Кириченко К. Ю. Клеєні дерев'яні балки - основні несучі елементи дерев'яних домобудівель. Проблеми ведення та експлуатації лісових і мисливських ресурсів: матеріали II Всеукраїнської науково-практичної конференції присвяченої пам'яті професора А.І. Гузія. (Житомир, 25 вересня 2020 р.). Житомир, 2020, с. 173.
3. Кириченко К. Ю., Кульман С. М. Исследование возможностей концепции рационального проектирования в деревянном домостроении. Тези Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих вчених «Сталий розвиток країни в рамках Європейської інтеграції», 12 листопада 2020 року. – Житомир: «Житомирська політехніка», 2020. – с. 110.
4. Кириченко К. Ю., Кульман С. М. Исследование экологической устойчивости при применении клееных деревянных балок. III Всеукраїнська науково-практична конференція Сучасні екологічні проблеми урбанізованих територій. (Житомир, 10-11 листопада 2020 р.). Житомир, 2020, с. 41-42.