МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

ПЕЛЕХ АНДРІЙ БОГДАНОВИЧ

УДК 624.011.14+624.046+ 624.044

НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ ТА ДЕФОРМАТИВНІСТЬ СТИСНУТИХ ДЕРЕВ'ЯНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИ ЛОКАЛЬНОМУ ВПЛИВІ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2021

Дисертацією є рукопис.
Робота виконана в Національному університеті «Львівська політехніка» (НУ«ЛП») м. Львів.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Демчина Богдан Григорович,
професор кафедри будівельних конструкцій та мостів.
Національний університет «Львівська політехніка»,
МОН України (м. Львів)

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Поздєєв Сергій Валерійович ,
головний науковий співробітник ,
Національний університет цивільного захисту України
(м. Черкаси).

кандидат технічних наук, доцент
Гомон Святослав Святославович ,
доцент кафедри міського будівництва та господарства
Національний університет водного господарства та
природокористування (м. Рівне).

Захист відбудеться «28» вересня 2021 р. о 13-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.17 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Карпінського, буд. 6 (ІІ-й навчальний корпус), ауд. 212.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, буд. 1.

Автореферат розіслано «27» серпня 2021 року.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д. 35.052.17, к.т.н., доц. Холод П.Ф.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Деревина, як будівельний матеріал століттями використовується для зведення будівель і споруд. Незважаючи на пожежну небезпеку, деревина широко використовується в сучасному будівництві. Невелика теплопровідність деревини, її масивність і цілісність перерізів дає можливість дерев'яним конструкціям зберігати несучу здатність при пожежі набагато довше, ніж металевим, які втрачають її при температурі 450-500°С. Основною причиною руйнування дерев'яних конструкцій при пожежі є обвуглювання деревини, що призводить до зменшення їх перетинів. Протягом пожежі навантаження сприймається необвугленою частиною перетину, і несуча здатність зменшується в результаті зменшення площі перетину. Відповідно на межу вогнестійкості конструкції впливає швидкість обвуглювання деревини. На межу вогнестійкості також впливає зміна міцності та деформативності деревини при її нагріванні в діапазоні температур 20-300°С.

Межу вогнестійкості дерев'яних конструкцій можна визначити методом випробувань або розрахувати теоретично. Дослідження дерев'яних конструкцій на вогнестійкість досить складні та вимагають значних фінансових затрат, крім того, в процесі випробувань складно визначити характеристики міцності і деформативності перерізу через високі температури в випробувальних печах. На сьогодні в Україні недостатньо досліджень напружено-деформованого стану дерев’яних колон з вимірюванням деформацій деревини та можливої втрати стійкості при одночасному впливі навантаження та високої температури особливо в умовах її локального впливу. Тому, дані дослідження допоможуть вирішити проблему випробувань дерев’яних колон на вогнестійкість при локальному впливі високої температури та статичного навантаження, яка є актуальною для наукових працівників, проектантів та навчального процесу студентів.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи відповідає науковому напряму кафедри будівельних конструкцій та мостів Національного університету «Львівська політехніка». Дисертація виконана в межах науково-дослідної роботи «Теоретичні та експериментальні дослідження звичайних та попередньо напружених залізобетонних, металевих, дерев’яних та інших конструкцій будівель, споруд, мостів і фундаментів та методів їх підсилення» (номер державної реєстрації 0117U007366, замовник – Міністерство освіти і науки України, 2017-2022 рр.), державна реєстрація № 0117U007366.

Мета роботи – дослідити напружено-деформований стан стиснутих дощатоклеєних колон при локальному впливі високих температур та розробити рекомендації щодо їх проектування та вогнезахисту.

Для досягнення цієї мети були поставлені такі завдання:

- розробити методику експериментальних досліджень напружено-деформованого стану стиснутих дощатоклеєних колон при локальній дії високих температур;

- виконати експериментальні дослідження з вивчення напружено-деформованого стану стиснутих колон при локальній дії високих температур від початку навантаження до моменту руйнування;

- визначити ефективність застосування вогнезахисту дощатоклеєних конструкцій гіпсокартонними листами при дії високої температури, в лабораторних умовах та в натурному експерименті;

- на основі отриманих експериментальних даних дослідити вплив локального вигорання деревини в стиснутих дерев'яних колонах на їх несучу здатність через швидкість вигорання, зміну вологості та міцності деревини;

- розробити математичну модель розрахунку температурної та силової задачі при локальному впливі високих температур на незахищений та захищений переріз деревини колон та розробити практичні рекомендації з розрахунку несучої здатності стиснутих дощатоклеєних колон в умовах локальної дії високих температур.

Об'єкт дослідження – несуча здатність та деформативність дерев'яних дощатоклеєних колон при одночасній дії стиску та локальному односторонньому високотемпературному нагріві.

Предмет дослідження – дерев'яні дощатоклеєні колони при одночасній дії стиску та локальному односторонньому високотемпературному нагріві.

Методи дослідження: експериментальне випробування моделей колон з визначенням несучої здатності та деформативності при дії стиску та одностороннього високотемпературного нагріву, аналітичні та чисельні методи розрахунку процесів нагрівання, горіння і руйнування деревини та її вогнезахисту

Наукова новизна одержаних результатів. Основні наукові результати, представлені на захист, полягають в тому, що:

- вперше виконано випробування дерев'яних дощатоклеєних колон на спільну дію вертикального навантаження та локального впливу високої температури;

- розроблено методику для випробувань дерев'яних колон в лабораторних умовах на силову дію та вплив високої температури з можливістю вимірювання деформацій в зоні горіння конструкції;

- розроблено методику розрахунку температурних полів в перерізі дерев'яних колон на основі числових математичних методів;

- розроблено методику врахування зміни поперечного перерізу колон від вигорання деревини та зміни механічних характеристик деревини від високотемпературних впливів в розрахунку їх несучої здатності.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

- розроблено стенд для випробувань конструкцій в лабораторних умовах на силову дію та вплив високої температури з можливістю моделювання умов стандартної пожежі та можливістю заміру деформацій в зоні горіння та по висоті колон;

- розроблено рекомендації з проектування та розрахунку несучої здатності стиснутих дощатоклеєних колон в умовах дії зовнішнього навантаження та локальному високотемпературному впливі.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень впроваджені в будівництво наступними організаціями:

- ТОВ «КАРАТ БУД ПЛЮС» при проектуванні та будівництві житлового будинку на вул. Ів. Франко-Великогірній у м. Мукачево за системою Wolf;

- ФОП Ткач А.І. при проектуванні об'єкта «Реконструкція з розширенням нежитлових приміщень за рахунок надбудови мансардного поверху на вул. Шота Руставелі,12 у м. Львові»

Особистий внесок здобувача.

Безпосередньо автором здійснені:

- організація та планування проведення експериментальних випробувань;

- всі основні наукові результати, висновки, рекомендації, отримані автором особисто;

- розробка методики випробувань конструкцій в лабораторних умовах на силову дію та вплив високої температури з можливістю вимірювання деформацій в зоні горіння конструкції;

- розробка методики розрахунку температурних полів в перерізі колони на основі числових математичних методів.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи були оприлюднені та обговорені на міжнародних науково-технічних конференціях: міжнародному симпозіумі «Сучасні металеві та дерев'яні конструкції (нормування, проектування та будівництво) (Брест, Білорусь, червень 2009); шостій всеукраїнській науково-технічній конференції «Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону» (Одеса, 2011), наукових семінарах кафедри «Будівельні конструкції та мости» Національного університету «Львівська політехніка» (2006-2020 рр.).

У повному обсязі результати роботи були представлені та обговорені на розширеному засіданні кафедри будівельних конструкцій та мостів Національного університету «Львівська політехніка» (11.02.2021 р.)

Публікації. Основні наукові результати за темою дисертаційної роботи опубліковані в 7 наукових працях, серед них: 6 статей у наукових фахових виданнях України; 1 стаття у науковому періодичному виданні іншої держави. Зареєстровано 3 патенти на корисну модель в рамках проведених наукових досліджень.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів основної частини, загальних висновків, списку використаних літературних джерел та додатків. Повний об'єм дисертації 176 сторінок (основна частина – 156 ст.). Дисертація містить 12 таблиць, 69 рисунків, 108 найменувань використаної літератури, а також 4 додатки на 20 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано вибір теми дослідження, сформульовано мету та завдання дослідження, описано методи дослідження, представлено отримані автором основні положення, що мають наукову новизну та практичне значення, наведено дані про апробацію результатів дисертації.

У першому розділі проведено огляд наукової та нормативної літератури за тематикою досліджень. Проаналізовано останні наукові роботи за темою вогнезахисту та вогнестійкості дерев’яних конструкцій. Проаналізовано наявні методи аналітичного та чисельного розрахунку таких конструкцій.

Хоча деревина являється горючим матеріалом, вона широко використовується в сучасному будівництві. Невелика теплопровідність деревини, її масивність і цілісність перерізів дає можливість дерев'яним конструкціям зберігати несучу здатність при пожежі набагато довше ніж металевим, що дозволяє їй конкурувати з металевими конструкціями, а за рахунок своєї незначної ваги також і з залізобетонними конструкціями. Основною причиною руйнування дерев'яних конструкцій при пожежі є обвуглювання деревини, що призводить до зменшення їх перерізів. Вологість також має прямий вплив на фізичні характеристики деревини – знижує міцність та швидкість обвуглювання деревини.

Левову частку впливів на фізичні характеристики деревини вносять – щільність, вологість, орієнтація волокон та температура навколишнього середовища. Дослідженнями впливу вологості на міцність та деформативність деревини подані у роботах Яснія П.А. та Гомона С.С. Ними експериментально було доведено що при зменшенні вологості від 30% до 12%, міцність деревини всіх порід збільшується, критичні деформації зменшуються.

Теплотехнічна задача вогнестійкості та оцінювання теплоізолюючої здатності будівельних елементів являє собою визначення зміни теплопровідності із зростанням температури. Згідно досліджень Шаффера – низька теплопровідність деревини знижує швидкість, з якою тепло передається всередину, і виводить залежність про те, що теплопровідність є обернено пропорційною до об’єму порожнин у деревині. Більша кількість вільних порожнин та пор збільшує швидкість деградації матеріалу внаслідок локального перенагрівання поверхні.

Значний вклад в дослідження роботи дерев’яних конструкцій зробили – Кліменко В.З., Найчук А.Я., Михайловский Д.В., Коваленко М.С., Коваль А.В., Kúdela J., Slaninka R., Escalantea M., Rougier V., Rosales M.B., Haksever A., Savaş S.

Питанням вогнестійкості та вогнезахисту дерев’яних конструкцій присвячені роботи багатьох вчених – Шналя Т.М., Schaffer E.L., König J., Lau P.W.C., White R., Brandon D., Асеева Р.М., Серкова Б.Б., Сивенкова А.Б., Östman B., Brandon D., Frantzich H., Фещука Ю.Л., Поздєєва С.В., Ніжника В.В. та інших авторів.

На основі аналізу наявних джерел можна стверджувати, що дослідження несучої здатності та деформативності стиснутих дерев’яних колон при локальному впливі високих температур є актуальною проблемою з широким колом недостатньо вивчених питань.

В другому розділі розроблено програму та методику експериментальних досліджень дощатоклеєних колон на спільну дію вертикального навантаження та локальний вплив високої температури, яка передбачала сім серій випробувань (табл.1).

Таблиця 1

Серія	Марка зразка	Кіль-кість, шт.	Навантаження N, кН або вид випро-бування	Вид навантаження	Задачі досліджень	Примітки
I	С-1-С-8	8	До руйнування	Центральний стиск	Визначення міцності деревини на стиск	-
II	Р-1-Р-8	8	До руйнування	Центральний розтяг	Визначення міцності та деформативності деревини на розтяг	
III	Зг-1-Зг-8	8	До руйнування	Згин	Визначення міцності деревини на згин	
IV	К1.1-К1.5	5	До руйнування	Центральний стиск	Визначення несучої здатності колон та вивчення напружено-деформованого стану при центральному стиску. Визначення деформативності деревини на стиск	
V	К-2.1-К 2.6	4	90	Центральний стиск та локальний нагрів	Визначення несучої здатності та деформацій зразка до і під час дії локального нагріву Розподіл температури в об'ємі зразка під час дії локального нагріву	Без захисного покриття
VI	К-3.1-К-3.4	4	90	Центральний стиск та локальний нагрів		Із захисним покриттям
VII	РМ-1	1	Власна вага	Натурне випробування в умовах реальної пожежі	Швидкість горіння незахищеної деревини. Ефективність вогнезахисного покриття з гіпсокартоних листів	

При виконанні досліджень I, II та III серій, була поставлена мета отримати результати, необхідні для визначення несучої здатності і деформацій деревини при нормальних температурах (20 ^{o}C), а також початкових значень розрахункової міцності і модулів пружності, що входять у відомі залежності цих властивостей від температури. Ці результати були необхідні для виконання теоретичних досліджень з використанням представлених в ДСТУ-Н-П Б В.2.6-157-2010 даних та графіків залежності властивостей деревини від температури. Відбір зразків виконували згідно ГОСТ 9620-94. Випробування виконували згідно стандартної методики.

Зразки, що були випробувані у серіях IV, V та VI – це дощатоклеєні колони перерізом 10х10см, довжиною 100см виготовлені з соснових дошок товщиною 2,5±0,05 см, при цьому було використано загальновідому технологію склеювання деревини. Колони серії IV були випробувані на стенді, загальний вигляд якого представлено на рис. 1. Методика випробувань дерев'яних колон на даному стенді полягала в наступному:

1. Повздовжнє центральне навантаження прикладали на колону 2 через опорні шарніри 3.

2. Навантаження повздовжньою силою здійснювали за допомогою 50-тонного гідравлічного домкрата 4 в комплексі з насосною станцією.

3. Контроль за навантаженням виконували за допомогою попередньо протарованого манометра на насосній станції.

4. Навантаження зразка проводили ступенями по 10 кН з витримкою по 5 хвилин на кожній стадії навантаження. При цьому навантаження за відліком манометра підтримували постійним від моменту завантаження до кінця витримки на відповідній стадії.

5. Вимірювання повздовжніх деформацій дощатоклеєної колони виконували за допомогою шістьох мікроіндикаторів 5, з базою 200 мм. та точністю вимірювання 0,001 мм. Прилади знімалися та вимірювання припинялося після збільшення нерівномірності в напруженнях з двох протилежних сторін колони (більше 15%), або збільшення вигину колони більше 0,5мм.

6. Деформацію вигину колони вимірювали за допомогою трьох прогиномірів Аістова 6, закріплених біля верхньої та нижньої опори колони, а також по центру колони. Вигин колони фіксувався до завершення експерименту, тобто до руйнування колони.

7. Експеримент вважався закінченим після повного руйнування колон.

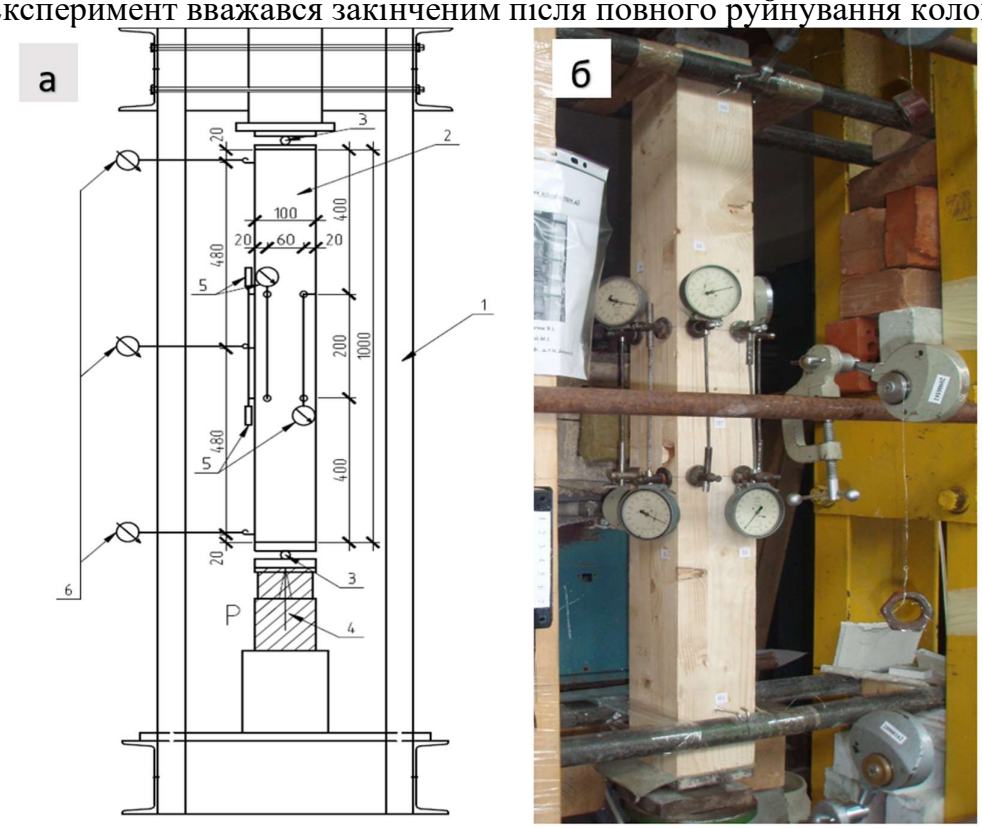

Рис. 1. Випробувальний стенд для центрально–стиснутої дощатоклеєної колони на центральний стиск: а) схема стенду: 1-випробувальний стенд, 2-дощатоклеєна колона, 3-опорний шарнір, 4-гідравлічний домкрат, 5-мікроіндикатори, 6-прогиноміри “Аістова”; б) загальний вигляд.

Для серії V під час дослідження поведінки дерев'яних клеєних колон (рис.2.), при їх локальному нагріванні без вогнезахисту, вирішувалися такі завдання:

- визначення несучої здатності навантажених дерев'яних колон при їх односторонньому локальному високотемпературному нагріві;
- визначення деформативних характеристик дерев'яних колон при їх односторонньому локальному високотемпературному нагріві;
- визначення розподілу температури всередині дерев'яних колон в розрахункових перерізах.

У процесі випробувань фіксувалися такі параметри: вертикальні деформації, горизонтальні деформації (вигини), температура на поверхні нагріву, температура у тілі колони в розрахункових перерізах.

Схему випробування колон серії V та VII показано на рис.2.

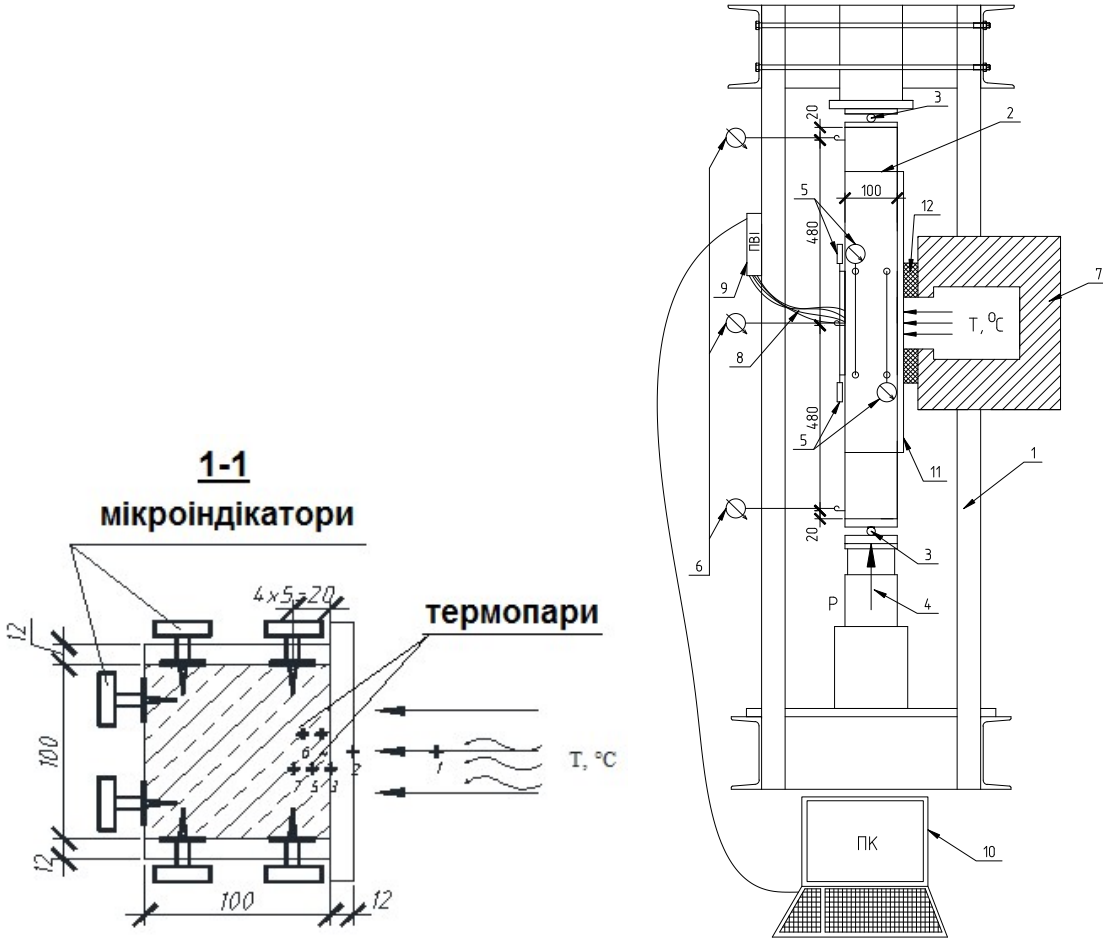

Рис. 2. Стенд для випробувань центрально – стиснутої дощатоклеєної колони на дію локального високотемпературного нагріву

Локальний високотемпературний нагрів дослідних колон проводився за допомогою муфельної печі 7, що попередньо нагрівалася до 500^0C-550^0C, яка через спеціально сконструйований перехідник 12 контактувала з боковою поверхнею колони.

Перехідник 12 був виконаний з жорсткої мінеральної вати товщиною 5см таким чином, що нагрів зразка відбувався лише в чітко обмеженій зоні (100мм×100мм). Така конструкція перехідника практично виключала нагрів інших ділянок колони конвективним теплом, що виділялося з муфельної печі .

Нагрівальним елементом муфельної печі служила ніхромова спіраль, яка була розміщена в пазах керамічних пластин печі.

Температура нагріву печі з точністю $\pm 1^0$C регулювалася за допомогою реле, вмонтованого у корпусі печі.

Контроль температури в колоні та печі здійснювався за допомогою хромель-алюмелевих термопар 8 , що були вмонтовані в тіло колони та на її поверхні, а також в муфельній печі.

Покази з термопар фіксувалися за допомогою інтелектуального вимірювального перетворювача ПВІ, що передавав дані до персонального комп'ютера 11, який виводив значення температур на екран кожних 5с.

Згідно розробленої методики, випробування центрально–стиснутих дощатоклеєних колон при дії локального високотемпературного нагріву без вогнезахисного покриття проводились в два етапи.

На першому етапі зразки поступово навантажували повздовжньою силою ступенями від 10 кН до 90 кН, що відповідало експлуатаційній величині навантаження. В процесі навантаження колон, фіксували повздовжні деформації перерізу колони і вигини на кожному етапі навантаження. Після досягнення величини стискаючої сили 90 кН навантаження підтримували на досягнутій величині.

На другому етапі до колони через перехідник з жорсткої мінеральної вати, присували муфельну піч, яка попередньо була розігріта до температури 500^0C-550^0C. Таким чином джерело нагріву розміщували з однієї сторони колони. Повздовжні деформації деревини на необігрітих поверхнях та вигини колони фіксували кожні 3 хв. При значному збільшенні швидкості наростання деформацій мікроіндикатори були зняті, натомість прогиноміри Аістова залишалися до кінця експерименту, покази з яких фіксувалися відеокамерою через надто швидку зміну показників.

Зміну температури спостерігали в режимі реального часу за допомогою вимірювального перетворювача ПВІ-0289, який паралельно архівував інформацію на персональний комп'ютер. Частота зчитування інформації з термопар становила 5 секунд.

Колони доводили до руйнування від дії високої температури при постійному зовнішньому навантаженні 90 кН. Після руйнування колон піч відсувалася і зону обвуглювання деревини охолоджували водою для запобігання продовження процесу горіння. Після демонтажу колони її розрізали по досліджуваному перерізі та фіксували глибину обвуглювання деревини.

Колони серії VI випробовувались на міцність при дії одностороннього локального високотемпературного нагріву із використанням вогнезахисту в різних температурних режимах.

Методика випробування колон на центральний стиск при дії одностороннього локального високотемпературного нагріву із використанням вогнезахисту аналогічна як для випробування колон V серії.

Метою натурних випробувань серії VII було дослідження поведінки конструкції дерев'яної рами в умовах пожежі (із застосуванням систем вогнезахисту з використанням гіпсокартоних листів), а саме дослідження:

- процесів обвуглювання захищеної та незахищеної деревини;

- розподіл температур в перерізі елементів рами в режимі реальної пожежі;
- оцінка ефективності запропонованих систем вогнезахисту.

Випробування конструкції дерев'яної рами проводились в рамках дослідження поведінки будівельних конструкцій в умовах реальної пожежі. Конструкція рами була виготовлена з клеєних дерев'яних брусів з частковим захистом її елементів вогнетривким гіпсокартоном.

Дерев'яна рама складалася з балки прольотом 2,6 м та двох стійок висотою 2,5 м і виготовлена з клеєного дерев'яного брусу перерізом 16×18 см. Матеріал брусу – клеєна деревина з соснових брусків поперечним перерізом 3×5см, щільністю 510 кг/м3 та вологістю 15%. Фрагмент конструкції підготовленої до випробувань показано на рис.3.

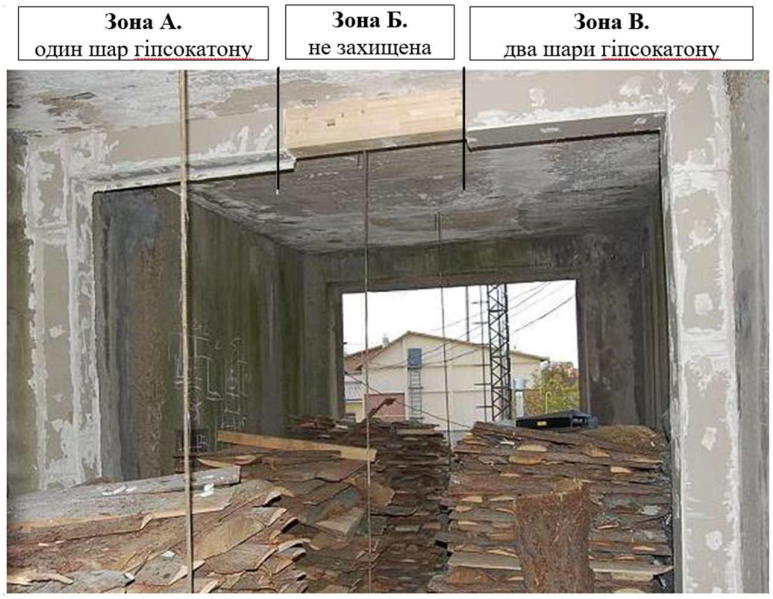

Рис. 3. Конструкція рами підготовлена до випробувань в приміщені з встановленим пожежним навантаженням

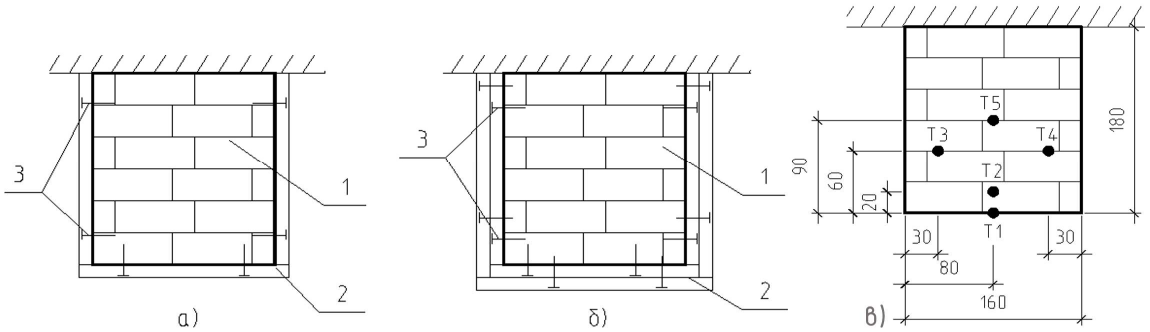

Рис. 4. Поперечний розріз дерев'яних елементів захищених гіпсокартонними листами: а) зона А – один шар гіпсокартону; б) зона В – два шари гіпсокартону; в) схема розташування термопар в перерізі незахищеного дерев'яного елемента.

Через складність виконання зовнішнього навантаження та з умов безпеки експерименту дерев'яна рама не була завантажена.

Одна стійка і частина балки була захищена одним шаром вогнестійкого гіпсокартону товщиною по 12 мм (зона А), інша частина мала вогнезахист із

застосуванням двох шарів гіпсокартоних листів товщиною 12 мм (зона В). Гіпсокартоні листи кріпилися до балки за допомогою самонарізів, а щілини між листами були зароблені гіпсовою шпаклівкою.

Середня частина балки була не захищена (Зона Б). Саме в цій частині проводились заміри температур в перерізі елемента. Температура в приміщені та в перерізі елементів конструкції визначалася за допомогою термопар встановлених згідно схеми зображеної на рис. 4. Реєстрація показів термопар здійснювалась приладами ПКРТ-0103.

У третьому розділі представлено результати експериментальних досліджень семи серій випробувань.

На першому етапі досліджень (серії I, II та III) були отримані результати випробувань деревини на стиск, розтяг та згин

За результатами першої серії випробувань стандартних зразків на стиск вздовж волокон, було встановлено середнє значення міцності деревини на стиск вздовж волокон – 38,2 Н/мм^2 (мПа)

За результатами випробувань другої серії стандартних зразків на розтяг вздовж волокон, було встановлено наступне:

- середнє значення міцності деревини на розтяг вздовж волокон $f_{t,0,k}$ = 79,3 Н/мм^2 (МПа);
- середнє значення модуля пружності деревини на розтяг вздовж волокон $E_{0,mean}$ = 13 800 Н/мм^2 (МПа).

За результатами випробувань стандартних дослідних зразків III серії на згин було встановлено середнє значення міцності деревини на згин - 65 Н/мм^2 (мПа);

Згідно із методикою описаною в розділі 2 було випробувано колони із суцільно клеєної деревини, рис. 5. Основна ціль випробувань визначити несучу здатність колон на центральний стиск, та проаналізувати напружено-деформований стан перерізу колони в місці її руйнування.

К-1.1 *К-1.2* *К-1.3* *К-1.4* *К-1.5*

Рис. 5. Вигляд стиснутих дощатоклеєних колон після руйнування:

У ході випробувань було встановлено що деформації колон протягом проведення замірів (навантаження 60-85% від руйнівного навантаження), зростали прямо-пропорційно навантаженню.

Результати випробувань дерев'яних колон на стиск подано в табл. 2.

Таблиця 2.

№ п.п	Характеристика	Од. вим.	Номер зразка				
			1	2	3	4	5
1	Руйнівне навантаження, F_{crit}	кН	340	318	285	320	340
2	Модуль пружності деревини на стиск вздовж волокон E_0	кН/мм^2 (Мпа)	11880	13450	14120	13570	13940
3	Критичний вигин, u_{crit}	мм	0.6	0.49	0.48	0.4	0.44

На рис. 6 відображено наростання відносних деформацій на двох протилежних сторонах колони марки К1.3. На основі характеру руйнування (див. рис. 5) і графіків зміни максимальних та мінімальних відносних деформацій в перерізах колон (рис .6), було визначено закономірність втрати стійкості колони, яка полягала у тому , що колона вигиналася (втрачала стійкість) в сторону де були менші відносні деформації грані колони.

Модуль пружності деревини для кожної колони був визначений за середніми відносними деформаціям на лінійних ділянках залежності графіків напружень та відносних деформацій (див. рис. 6, табл. 2).

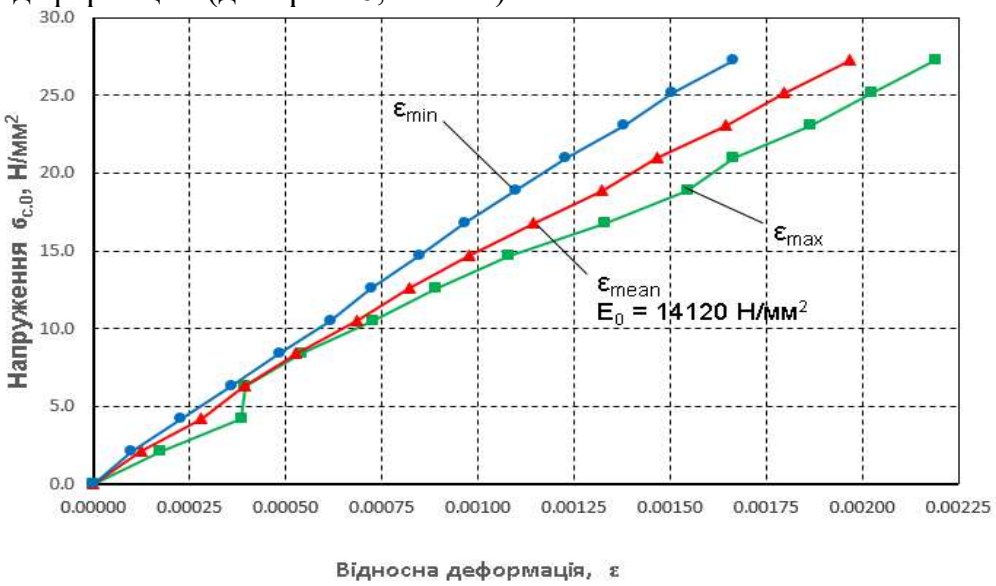

Рис. 6. Залежність відносних деформацій ε деревини від напруження в перерізі (на прикладі колони К1.3).

Вигини колон мали здебільшого лінійний характер (рис.7). У двох випадках, для колон К1.2 та К1.3 вигин був дещо збільшений при досягнені навантаження 220…240 кН, а перед руйнуванням колон було зафіксовано максимальний вигин 0,5…0,6 мм.

Отримані експериментальні значення нормальних напружень були порівняні із теоретичними значеннями отриманими за допомогою методики описаної у ДБН

В.2.6-161:2017. Результати порівняння показані на прикладі колони К1.3 та зображені на рис. 8.

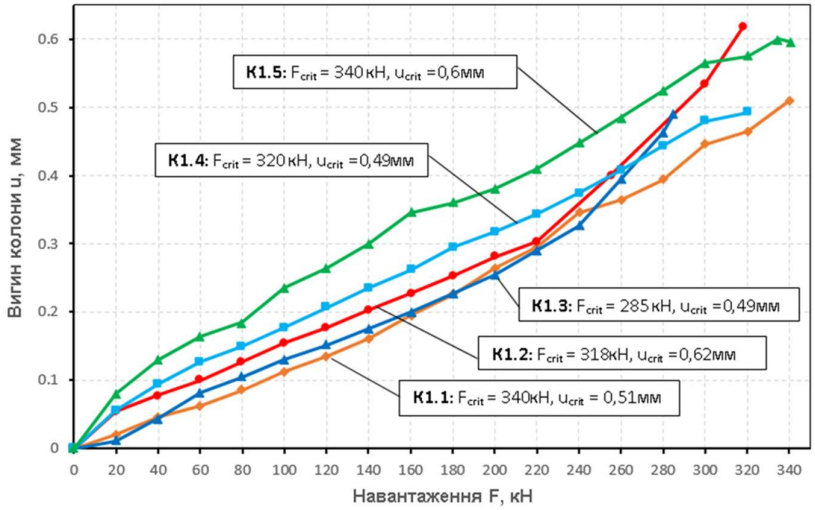

Рис. 7. Залежність вигину колон u від навантаження F. F_{crit} – максимальне навантаження на колону; u_{crit} – критичний вигин перед руйнуванням зразка.

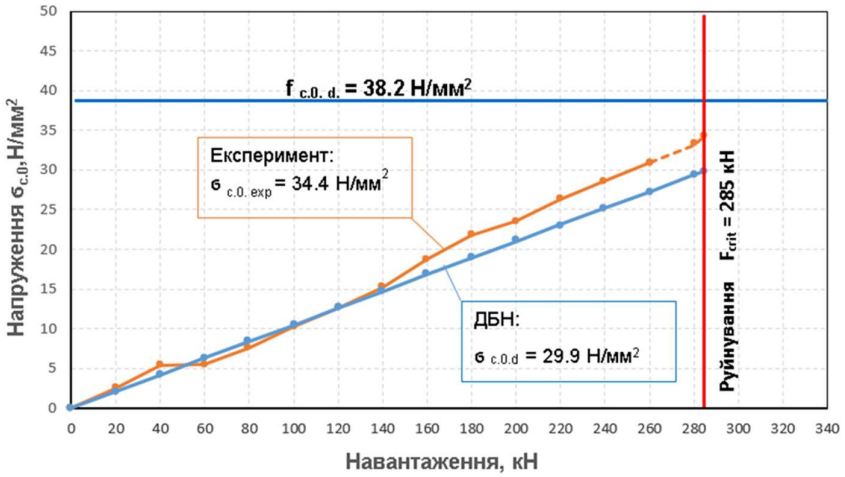

Рис. 8. Залежність найбільших напружень $\sigma_{c.0}$. в перерізі колони К1.3 від навантаження F.

За результатами дослідження навантажених колон на локальний високотемпературний нагрів без вогнезахисту та з вогнезахистом були отримані наступні результати:

- Розподіл температур в перерізі зразка з фіксацією глибини обвуглювання деревини;
- Деформації поперечного вигину колони;
- Розподіл відносних деформацій в перерізі колони від дії вертикального навантаження та високотемпературного нагріву;
- Модуль пружності деревини для кожної колони.

Колони навантажувались центрально осьовим навантаженням величиною в 90 кН, а далі за допомогою попередньо нагрітої муфельної печі до температури

500-550 ^{O}C до них прикладалося температурне навантаження з подальшим збільшенням температури.

Для випадку колон без вогнезахисту (колони К2.1…К2.4), обвуглювання деревини розпочиналось при температурі близько 300 ^{O}C. Початок обвуглювання зафіксований на 13-тій хвилині у термопарі Т2 (рис. 9), що знаходилася на поверхні деревини. Така ж температура була зафіксована у інших термопарах, що свідчило про досягнення глибини обвуглювання до 20 мм. Руйнування колони К2.1 відбулося на 38 хвилині. На термопарі Т6 температура піднялася дещо вище 100 ^{O}C, тобто до руйнування деревина навколо термопари не була повністю піддана впливу високої температури.

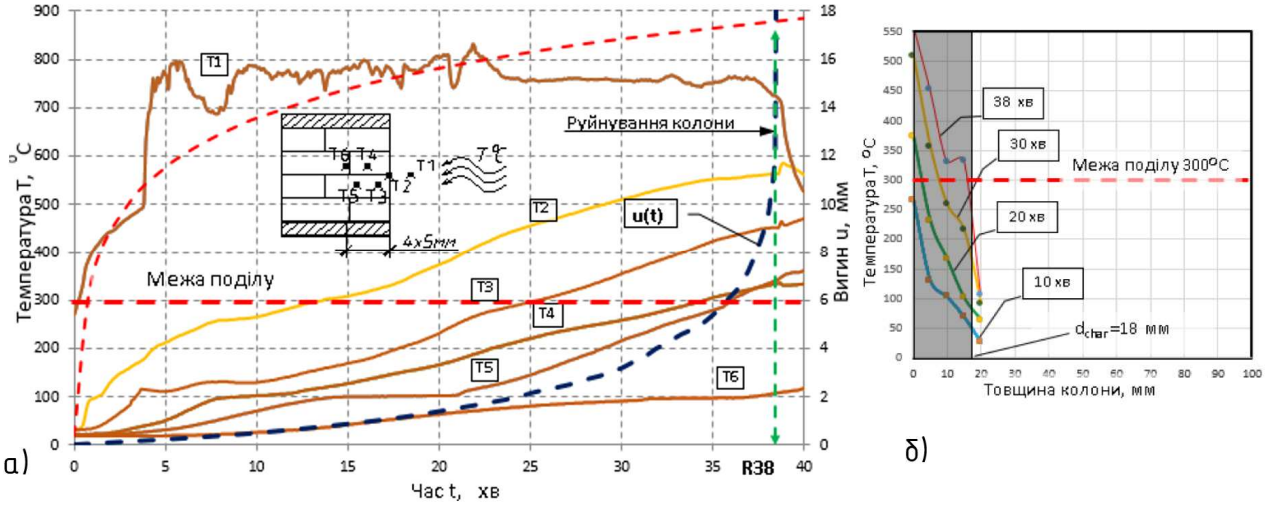

Рис. 9. Результати досліджень колон без вогнезахисту на локальний вплив високих температур на прикладі колони К2.1. а) покази термопар Ті в перерізі дощатоклеєної колони К2.1 і графік кривої деформацій вигину u(t).1… 6 – графіки Т(t) термопар згідно схеми. б) розподіл температур в перерізі колони на різних етапах руйнування.

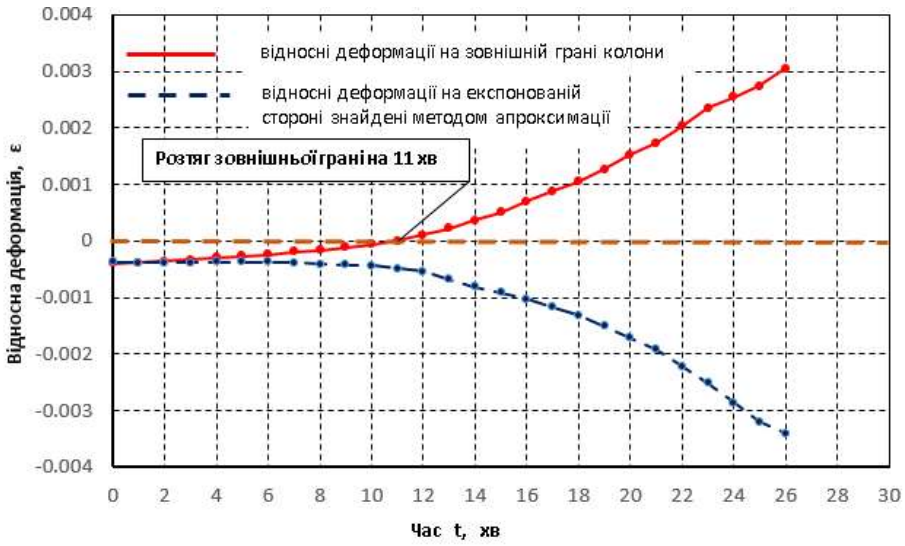

Рис. 10 Залежність відносних деформацій деревини ε від часу нагріву на експонованій та протилежній до неї сторонах для колони К2.1

Відносні деформації по середині висоти колон визначалися за результатами вимірювання 6 мікроіндикаторів, які були встановлені з трьох неекспонованих сторін колони. Відносна деформація експонованої сторони визначалася методом апроксимації за результатами вимірювання деформацій на двох суміжних гранях. Відносні деформації колони К2.1 (див. рис.10.), протягом випробування на спільну дію навантаження та локального нагріву змінювались з моменту нагріву поверхні колони, спочатку лінійно до 10 хвилини, а потім не лінійно до моменту зняття приладів. На 11 хвилині на поверхні протилежній до експонованої появився розтяг.

Для колон із вогнезахистом (колони К3.1…К3.4), було використано звичайний гіпсокартоний лист з метою утворення вогнезахисту. Термопара Т1 фіксувала температуру в печі, термопара Т0 - на поверхні гіпсокартону, а термопара Т2 - на поверхні деревини під гіпсокартоном (рис. 11). На графіках зміни температури у термопарах Т3, Т4, Т5, Т6 відмічена чітка зона затримки зростання температури в деревині при значенні 100 ^{O}C, зумовлена процесом перетворення вологи, яка є в деревині, в пару. На 69 хв експерименту відбулося руйнування колони К3.1.

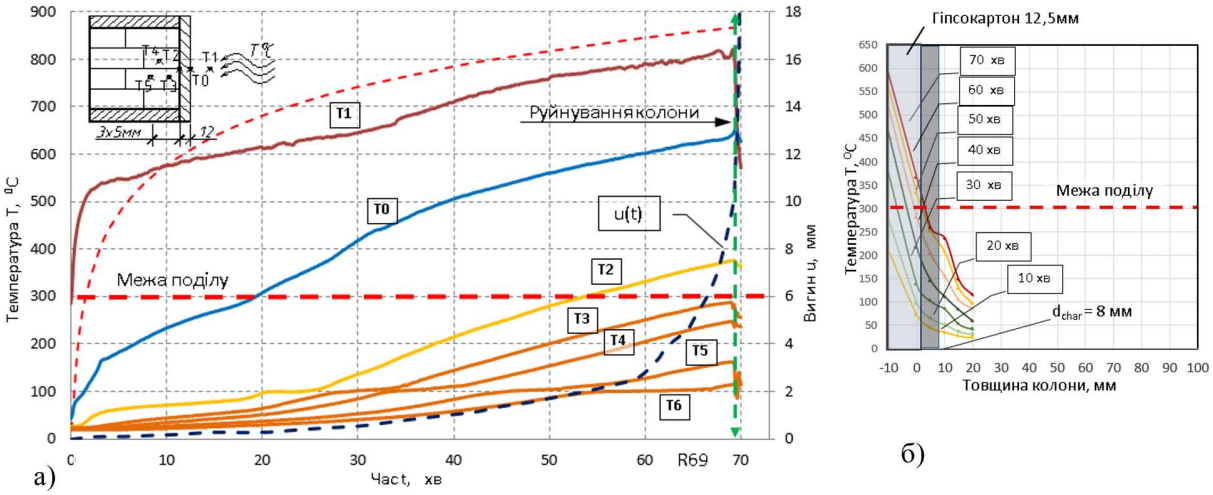

Рис. 11. Результати досліджень колон з вогнезахистом на локальний вплив високих температур на прикладі колони К3.1. а) покази термопар Ті в перерізі дощатоклеєної колони К3.1 і графік кривої деформацій вигину u(t).0… 6 – графіки T(t) термопар згідно схеми.

б) розподіл температур в перерізі колони на різних етапах руйнування.

Відносні деформації колони К3.1 (рис.12.), протягом випробування на спільну дію навантаження та локального нагріву змінювались з 9 хвилини нагріву колони, спочатку лінійно до 35 хвилини, а потім не лінійно до моменту зняття приладів. На 43 хвилині на поверхні протилежній до експонованої появився розтяг. Мікроіндикатори були зняті з колони на 60 хвилині, а колона повністю зруйнувалася на 69 хвилині.

В ході експерименту для серії VII, фіксували час горіння незахищеної деревини, та деревини покритої гіпсокартоними листами. Також проводились заміри температур в перерізі дерев'яного елементу.

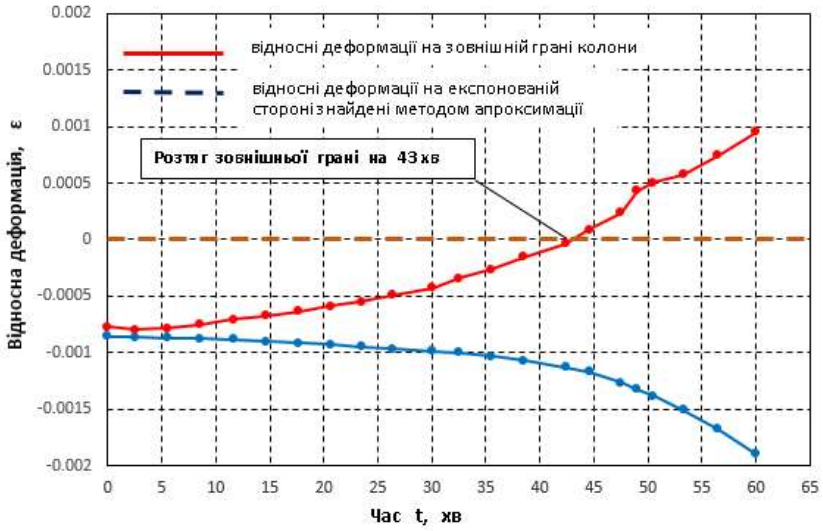

Рис. 12. Залежність відносних деформацій деревини ε від часу нагріву на експонованій та протилежній до неї сторонах на прикладі колони К3.1

За результатами натурного експерименту була визначена швидкість горіння деревини (рис. 13) в умовах реальної пожежі від 0,5 до 0,9 мм/хв, що відповідає запропонованій величині згідно ДСТУ-Н-П Б В.2.6-157-2010. Застосування вогнезахисту з вогнестійких гіпсокартонних листів приблизно на 35% затримує процес обвуглювання деревини і відповідно підвищує межу вогнестійкості у порівнянні з незахищеною деревиною. Вогнезахист конструкції з вогнестійких гіпсокартоних листів зберігався до 70 хв пожежі.

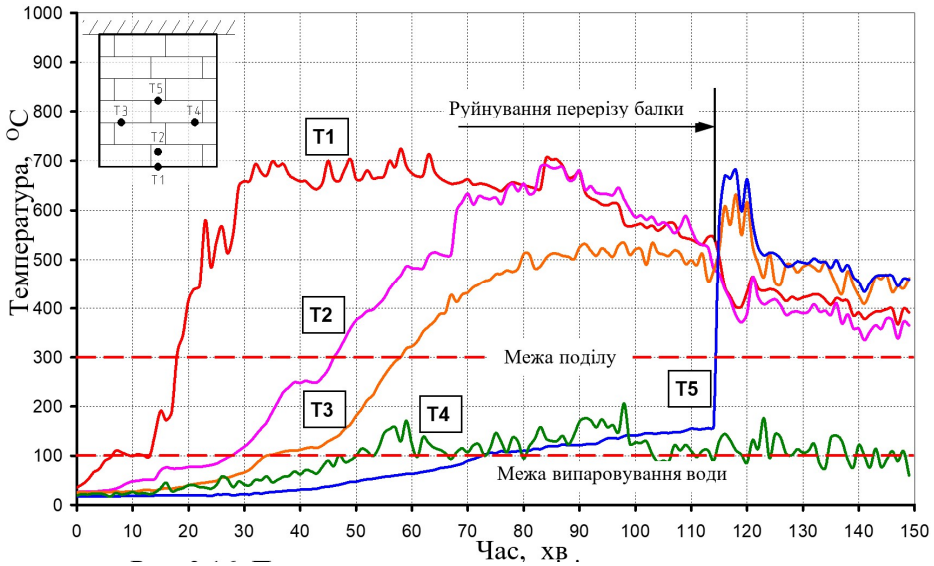

Рис. 13. Покази термопар в перерізі не захищеного елемента дерев'яної рами РМ-1.

У четвертому розділі представлено результати температурної та силової задачі розрахунку дерев'яних колон на локальний вплив високих температур, отримано аналітичний розв'язок задачі про зміну характеристик міцності деревини на стиск та розтяг і розв'язок задачі щодо зміни деформаційних властивостей в тілі нерівномірно

односторонньо нагрітої дерев'яної колони. Отримано розрахунок напружено-деформованого стану дерев’яних колон під час дії локального високотемпературного впливу та зовнішнього навантаження. Виконано порівняння розрахункових і експериментальних результатів випробування дерев’яних колон під час їхнього високотемпературного локального нагрівання. Виконаний розрахунок температурної задачі методом скінчених елементів та порівняно його із розрахунком представленим в діючих нормах.

Вплив локального нагріву на несучу здатність та деформативність колон виражений у постановці двох типів задач: температурної та силової.

Для розрахунку напружено-деформованого стану дерев’яних колон під час локального високотемпературного впливу та зовнішнього навантаження було побудовано скінчено елементу модель в програмному комплексі «Ліра». Задачу було поділено на задачі окремого впливу факторів навантаження та сумісну дію даних факторів. Отримано результати деформацій для кожного окремого випадку. Результати представлені на рис.14.

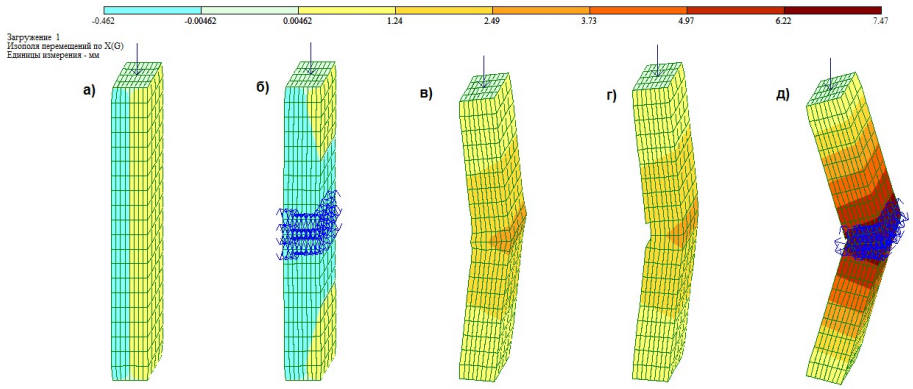

Рис. 14. Ізополя горизонтальних переміщень колон. а) без нагріву; б) при локальному нагріві з урахуванням температурного розширення матеріалу колони; в) з урахуванням зміни модуля пружності деревини від температури; г) з урахуванням вигоряння деревини; д) з урахуванням перерахованих в пунктах «а»-«г» факторів.

Окремо подано розрахунок адаптації методу приведеного перерізу за допомогою інструментів методу скінчених елементів у програмному комплексі «Ліра». Виконано порівняння даного розрахунку із результатами отриманими за допомогою методів наведених в сучасних нормативних документах. Фрагмент розрахункового перерізу моделі відображений на рис.15.

а) б)

Рис.15. Вилучення скінченних елементів у інструменті «Монтаж»:
а) елемент без пошкодження; б) моделювання пошкодження глибиною 2 см.

Елементи моделі поетапно вилучались за допомогою модуля «Монтаж», що дозволяло виконати моделювання поступового обвуглювання шарів деревини. Після кожного вилучення шарів відбувався перерахунок напружень та деформацій в моделі.

За результатами виконаних експериментальних та теоретичних досліджень розроблено рекомендації з проектування та розрахунку несучої здатності стиснутих дощатоклеєних колон в умовах дії зовнішнього навантаження та локальному високотемпературному впливі.

Результати дисертаційного дослідження застосовані під час проектування та виконання дерев'яних конструкцій на реальних об'єктах.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1.Розроблено методику вогневих досліджень, яка дала можливість дослідити напружено-деформований стан в зоні горіння стиснутих дощатоклеєних колон при локальній дії високої температури;

2. Отримано експериментальні результати зміни напружено-деформованого стану стиснутих колон при локальній дії високих температур та зовнішнього навантаження і встановлені закономірності їх руйнування .

3. Визначена ефективність застосування вогнезахисту дощатоклеєних конструкцій вогнезахисними гіпсокартоними листами при дії високої температури, та встановлено:

- за результатами лабораторних досліджень захист одним шаром гіпсокартону збільшує вогнестійкість конструкції більше ніж на 30хв.

- за результатами натурного експерименту із застосуванням вогнезахисту гіпсокартоними листами було встановлено, що руйнування вогнезахисту відбувається від вигорання деревини в місцях кріплення саморізів, тому рекомендовано при виконанні такого вогнезахисту додаткове приклеювання шарів гіпсокартону вогнетривкими клеями та використання скловолокнистої сітки поверх гіпсокартоних листів

4. За результатами натурного експерименту була визначена швидкість горіння деревини в умовах реальної пожежі від 0,5 до 0,9 мм/хв, що відповідає запропонованій величині згідно ДСТУ-Н-П Б В.2.6-157-2010

5. Виконано порівняння експериментальних несучих здатностей колон з теоретичними згідно методик ДСТУ-Н-П Б В.2.6-157-2010 і встановлено наступне :

- розрахунок за методом приведеного поперечного перерізу завищує результат в 1,15 рази в порівнянні з експериментом, ,тому рекомендовано збільшити величину товщини шару з нульовими показниками міцності та жорсткості d_0 до 8 мм, ;

- розрахунок за приведеними характеристиками перерізу завищує результат в 1,13 рази в порівнянні з експериментом, тому рекомендовано змінити формулу розрахунку коефіцієнту $k_{\mathrm{mod},fi} = 1{,}0 - \frac{1}{105}\frac{p}{A_r}$.

6. Розроблено математичний метод розв'язку температурної та силової задачі при локальному впливі високої температури на дерев'яні колони методом кінцевих елементів.

7. Розроблено рекомендації з проектування та розрахунку несучої здатності стиснутих дощатоклеєних колон в умовах дії зовнішнього навантаження та локальному високотемпературному впливі які використані в реальному проектуванні.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Дослідження вогнестійкості металевих елементів, захищених гіпсокартонними листами / А. Б. Пелех, Б. Г. Демчина, Р. М. Світий, В. С. Фіцик. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". 2004. № 520 : Теорія і практика будівництва. С. 213–217.
2. Натурні випробування конструкції дерев'яної рами на вогнестійкість в умовах реальної пожежі / А. Б. Пелех, Б. Г. Демчина, Т. М. Шналь, С. С. Була, О. В. Крочак. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". 2008. № 627 : Теорія і практика будівництва. С. 167–172.
3. Поведінка дощатоклеєних колон при місцевому впливі високої температури / Б. Г. Демчина, А. Б. Пелех, Г. М. Олексин, М. І. Сурмай. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". 2009. № 655 : Теорія і практика будівництва. С. 71–74.
4. Особливості розподілу температури у залізобетонному перерізі при дії місцевого нагріву / С. С. Була, А. Б. Пелех, О. М. Бадло, П. О. Лесюк, Б. І. Мальків. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". 2009.
5. Демчина Б. Г., Сурмай М. І., Пелех А. Б. Підходи до визначення критеріїв меж вогнестійкості вертикальних конструкцій. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". 2010. № 662 : Теорія і практика будівництва. С. 155–160.
6. Пелех А.Б., Сурмай М. І., Олексин Г.М. Зниження міцності дерев'яних дощатоклеєних конструкцій внаслідок дії високих температур. Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Макіївка, 2010. Вип. 5 (85) : Сучасні будівельні матеріали, конструкції та інноваційні технології зведення будівель і споруд, т. 2. С.268–274.

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав:

7. Пелех А. Напружено деформований стан дерев'яних колон при нерівномірному локальному нагріві Stress-strain state of wooden columns under uneven local heating // Intellectual Archive. 2020. Vol. 9, № 3. P. 196–203.

Патенти:

1. Пат. № 64102 UA, МПК: G01N 33/46, G01N 3/08 Пристрій для визначення питомого опору висмикуванню сталевих нагелів з деревини. /Демчина Х.Б., Сурмай М.І., Пелех А.Б., Демчина Б.Г. Опубліковано: 25.10.2011
2. Пат. № 49549 UA, МПК: F23M 5/00, Піч для теплофізичних випробувань малогабаритних фрагментів будівельних конструкцій та окремих вузлів їх стикових сполучень /Фіцик В.С., Пелех А.Б., Демчина Б.Г., Половко А.П., Демчина Х.Б. Опубліковано: 26.04.2010
3. Пат. № UA, МПК: F23M 5/00, Піч для теплофізичних випробувань малогабаритних фрагментів будівельних конструкцій та окремих вузлів їх стикових з'єднань / Демчина Б.Г., Фіцик В.С., Пелех А.Б., Половко А.П. Опубліковано: 15.09.2006

АНОТАЦІЯ

Пелех А. Б. «Несуча здатність та деформативність стиснутих дерев'яних елементів при локальному впливі високих температур» – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 5.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Національний університет «Львівська політехніка», Міністерство розвитку громад та територій України, Львів, 2021.

Дисертація присвячена експериментальним та теоретичним дослідженням напружено деформованому стану стиснутих дощатоклеєних колон при локальному впливі високих температур. Дослідні зразки відрізнялись ступенем вогнезахисту.

Виконано натурний експеримент дослідження роботи дерев'яних конструкції під час реальної пожежі. Отримані аналітичні результати розрахунку температурної задачі та виведені рівняння для визначення локального впливу температур на несучу здатність та деформативність дерев'яних центрально стиснутих колон. Виконано розрахунок дерев'яних колон методом приведеного перерізу із використанням інструментарію методу скінчених елементів в програмному комплексі «Ліра».

Результати дисертаційного дослідження застосовані під час проектування та виконання дерев'яних конструкцій на реальних об'єктах. На основі отриманих результатів експериментальних та теоретичних досліджень розроблено практичні рекомендації із розрахунку несучої здатності стиснутих дощатоклеєних колон, що працюють в умовах локальної дії високих температур.

Ключові слова: межа вогнестійкості, високотемпературний локальний нагрів, критичний вигин, дерев'яні дощатоклеєні колони, дія високої температури, дерев'яні конструкції.

АННОТАЦИЯ

Пелех А. Б. «Несущая способность и деформативность сжатых деревянных элементов при локальном воздействии высоких температур» – на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 5.23.01 - строительные конструкции, здания и сооружения. - Национальный университет «Львовская политехника», Министерство развития общин и территорий Украины, Львов, 2021.

Диссертация посвящена экспериментальным и теоретическим исследованиям напряженно деформированном состояния сжатых колонн из клееной древесины при локальном воздействии высоких температур. Опытные образцы отличались степенью огнезащиты.

Выполнен натурный эксперимент исследования работы деревянных конструкции в условиях реальной пожара. Полученные аналитические результаты расчета температурной задачи и выведены уравнения для определения локального воздействия температур на несущую способность и деформативность деревянных

центрально сжатых колон. Выполнен расчет деревянных колон методом приведенного сечения с использованием инструментария метода конечных элементов в программном комплексе «Лира».

Результаты исследования применены при проектировании и выполнения деревянных конструкций на реальных объектах. На основе полученных результатов экспериментальных и теоретических исследований разработаны практические рекомендации по расчету несущей способности сжатых колонн из клееной древесины, работающих в условиях локального воздействия высоких температур.

Ключевые слова: предел огнестойкости, высокотемпературный локальный нагрев, критический изгиб, колонны из клееной древесины, действие высокой температуры, деревянные конструкции.

ABSTRACT

Pelekh A.B. **"Bearing capacity and deformability of compressed wooden elements under the local influence of high temperatures" -** Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences (Ph.D.) on the specialty 5.23.01 - building structures, buildings and constructions. - National University "Lviv Polytechnic", Ministry of Development of Communities and Territories of Ukraine, Lviv, 2021.

The thesis is devoted to experimental and theoretical studies of the stress-strain state of compressed laminated columns under local exposure to high temperatures. The test specimens were distinguished by the degree of fire protection. Practical recommendations for calculating the load-carrying capacity of compressed boarded laminated columns working in conditions of local action of high temperatures have been developed.

The first chapter reviews the existing experimental studies of wooden structures under the influence of high temperatures. Particular attention is paid to methods of calculation of compressed damaged wooden elements. It is found that the issue of fire resistance and operation of wooden structures under local exposure to high temperatures is not fully disclosed and requires additional research.

The second chapter presents the scope and methodology of the experimental research. The method of determining the characteristics of wooden structures according to the current regulatory documents is described. To investigate the mechanical characteristics of wood in compression, tension, and bending tests were carried out on samples according to current regulations.

The methodology of central compression testing of columns at temperature is described. For the study, there were made planking of the columns of size 100x100x1000 (h) mm, with planks of section 25x100 mm.

The third chapter presents the results of studies of a series of test samples to determine the mechanical properties of wood in compression, tension, and bending. The results of compression tests of the laminated wooden columns under the action of normal temperatures have been obtained and analyzed.

According to the results of tests of 5 and 6 series, studies of strength and deformability of compressed wooden columns on the action of local heating without protection and with the protection of the heating zone with plasterboard sheets were obtained and analyzed. The results of a full-scale test of a wooden frame under conditions of a real fire are processed. The performance of the structures at different stages of the fire was analyzed.

In the fourth chapter, the calculation of wooden columns for the influence of external temperature load is carried out. An analytical solution of the problem of temperature distribution in a wooden column, part of which is in a variable in time temperature field, is obtained.

The analytical solution of the problem of distribution of compressive, tensile, and shear strength of wood in the body of an unevenly, unilaterally heated wooden column has been obtained. The calculation of the stress-strain state of wooden columns during local high-temperature action and external load has been performed.

The practical calculation of a centrally compressed column with a local thermal influence by the finite element method in the program complex "Lira" has been carried out.

The recommendations for the calculation of wooden columns under their local fire action are given.

The conclusions present the main results that reflect the scientific novelty and solution of scientific and technical problems.

Key words: fire resistance limit, high-temperature local heating, critical bending, wooden laminated columns, high-temperature action, wooden structures.