

Державна служба України з надзвичайних ситуацій  
Національний університет цивільного захисту України  
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля

**РОЗРАХУНКОВА ОЦІНКА  
ВОГНЕСТІЙКОСТІ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ  
СТАЛЕВИХ БАЛОК**

*МОНОГРАФІЯ*

**Черкаси 2022**

**УДК 699.812.2**

**Р-64**

*Рекомендовано до друку вченою радою  
Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля  
НУЦЗ України  
(протокол № 9 від «21» червня 2022 року)*

Розрахункова оцінка вогнестійкості вогнезахищених сталевих балок : монографія / О. В. Борсук, С. В. Поздєєв, О. М. Нуянзін, О. В. Некора, В. М. Гвоздь, О. М. Тищенко, Н. П. Заїка – Черкаси: Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022. – 118 с.

**Рецензенти:**

**Т. В. Костенко** – доктор технічних наук, професор;

**В. В. Ніжник** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник.

Проаналізовано нормативну базу, яка регламентує вимоги щодо нормування забезпечення вогнестійкості сталевих балок із мінераловатним вогнезахистом. Розроблено та описано методику експериментальних досліджень з вогневих випробувань сталевих балок з мінераловатним вогнезахисним облицюванням для вивчення температури їх нагрівання під впливом стандартного температурного режиму пожежі та на її основі визначено температурні залежності теплофізичних характеристик мінераловатного облицювання. В результаті виявлено закономірності досягнення критичних температур при використанні даних характеристик у залежності від конструктивних параметрів даного типу балок.

Методами математичного моделювання досліджено поведінку мінераловатного вогнезахисного облицювання та можливість його відшарування в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі. За отриманими результатами розроблено методику розрахункової оцінки вогнестійкості сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним облицюванням із врахуванням можливості його відшарування під час теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Отримано метод розрахункової оцінки вогнестійкості сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним облицюванням. Даний метод доцільно використовувати при викладанні навчальних дисциплін, що передбачають вивчення поведінки будівельних конструкцій при пожежі для курсантів, студентів, аспірантів (ад'юнктів), що володіють відповідним математичним апаратом у межах навчальної програми закладу вищої освіти III-IV рівня акредитації.

© ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	5
<b>РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН НОРМУВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ БАЛОК ТА РОЗРАХУНКОВИХ МЕТОДІВ ЇЇ ОЦІНКИ</b> .....	6
1.1. Статистичні дані щодо пожеж у будівлях і спорудах зі сталевими конструкціями.....	6
2. Нормування вогнестійкості сталевих балок.....	7
1.3. Особливості поведінки сталевих балок в умовах пожежі.....	11
1.3.1. Температурні режими пожежі.....	12
1.3.2. Температурно-силовий відклик у сталевих балок за умов теплового впливу пожежі.....	15
1.3.3. Методи підвищення вогнестійкості сталевих балок.....	16
1.4. Експериментальні методи оцінки вогнестійкості сталевих балок	21
1.4.1. Вогневі випробування балок на вогнестійкість.....	21
1.4.2. Експериментальні методи визначення вогнезахисної здатності вогнезахисних систем сталевих балок.....	24
<b>РОЗДІЛ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ЗНАЧЕНЬ ЗРАЗКІВ КОЛОН ІЗ ВОГНЕЗАХИСНИМ ОБЛИЦЮВАННЯМ МІНЕРАЛОВАТНИМИ ПЛИТАМИ ПІД ЧАС ВИПРОБУВАНЬ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ</b> .....	29
2.1. Експериментальне обладнання для проведення випробувань.....	29
2.2. Методика виготовлення та формування зразків.....	33
2.3. Методика проведення вогневого випробування.....	36
2.3.1. Методика підготовки до початку випробування.....	36
2.3.2. Методика проведення випробування.....	37
<b>РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ФРАГМЕНТІВ СТАЛЕВИХ СТЕРЖНІВ ІЗ ВОГНЕЗАХИСНИМ ОБЛИЦЮВАННЯМ</b> .....	46
3.1. Результати вогневих випробувань фрагментів сталевих стержнів із вогнезахисним облицюванням.....	46
3.2. Математична модель залежності часу досягнення критичної температури сталеву балкою, залежно від товщини вогнезахисного облицювання .....	52
<b>РОЗДІЛ 4. ОСОБЛИВОСТІ ЗМІНИ КОЕФІЦІЄНТУ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ БАЛОК ПРИ НАГРІВАННІ</b> .....	55
4.1. Дослідження коефіцієнта теплопровідності мінераловатного облицювання фрагментів стержнів зі сталевих прокату.....	55
4.2. Дослідження точності та достовірності результатів розрахунку сталевих елементів із вогнезахисним мінераловатним облицюванням, отриманих для його визначених теплофізичних характеристик.....	62
<b>РОЗДІЛ 5. МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ СТАЛЕВИХ БАЛОК ПРИ НАГРІВАННІ</b> .....	66
5.1. Температурний режим нагрівання сталевих балок з	

вогнезахисним облицюванням із мінеральної вати.....	66
5.2. Основні теоретичні положення розрахунку напружено-деформованого стану сталеві балки з вогнезахисним облицюванням із мінеральної вати.....	68
5.2.1. Загальні положення розрахунку напружено-деформованого стану сталеві балки з вогнезахисним облицюванням із мінеральної вати.....	68
5.2.2. Математичні моделі динаміки та напружено-деформованого стану сталеві балки з вогнезахисним облицюванням із мінеральної вати і їх чисельна реалізація.....	69
5.2.3. Кінцево-елементна апроксимація основних рівнянь динамічної взаємодії.....	71
5.2.4. Математична модель для описання контактної взаємодії.....	72
5.2.5. Явний числовий метод розв'язку рівнянь динаміки.....	75
5.2.6. Основні відомості щодо типу та кінцевих елементів.....	76
5.2.7. Основні відомості щодо моделей матеріалів.....	78
<b>РОЗДІЛ 6. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ СТАЛЕВОЇ БАЛКИ З ВОГНЕЗАХИСНИМ ОБЛИЦЮВАННЯМ ІЗ МІНЕРАЛЬНОЇ ВАТИ ЗА УМОВ ВПЛИВУ СТАНДАРТНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ПОЖЕЖІ.....</b>	<b>83</b>
6.1. Початкові дані щодо розрахунку напружено-деформованого стану у сталеві балки з вогнезахисним облицюванням із мінеральної вати.....	83
6.1.1. Геометричні та конструктивні параметри сталеві балки з вогнезахисним облицюванням із мінеральної вати.....	83
6.1.2. Граничні умови та початкові дані до кінцево-елементної моделі.....	84
6.2. Результати чисельного дослідження поведінки сталеві балки з вогнезахисним облицюванням із мінеральної вати в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі.....	87
<b>РОЗДІЛ 7. МЕТОД ОЦІНКИ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ БАЛОК ІЗ МІНЕРАЛОВАТНИМ ВОГНЕЗАХИСНИМ ОБЛИЦЮВАННЯМ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ЙОГО ВТРАТИ ЦІЛІСНОСТІ....</b>	<b>94</b>
7.1. Визначення температурного режиму прогрівання сталеві балки за умови втрати цілісності вогнезахисного покриття.....	94
7.2. Визначення межі вогнестійкості сталеві балки за умови втрати цілісності вогнезахисного покриття.....	97
7.3. Методика проведення повного факторного експерименту.....	101
7.4. Методика розрахункової оцінки вогнестійкості сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним облицюванням, з урахуванням його відшарування.....	106
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>108</b>
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....</b>	<b>110</b>

## ВСТУП

Металеві конструкції під час нагрівання до високих температур в умовах пожежі, як правило, стають надто вразливими, що становить істотну небезпеку та може призвести до їх обвалення. За відсутності вогнезахисту металеві конструкції, зокрема металеві балки, в умовах пожежі можуть зруйнуватися за 10-15 хвилин, що, зазвичай, не відповідає вимогам пожежної безпеки. Тому для підвищення вогнестійкості таких балок застосовуються вогнезахисні системи. Однією із найбільш ефективних вогнезахисних систем, завдяки її низьким показникам теплопровідності, зручності при монтажі, ефективності та надійності, є система на основі мінеральної вати.

Розкриття закономірностей впливу конструктивних параметрів сталевих балок на умови відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання є актуальною науковою задачею, за результатами розв'язання якої встановлено наукове підґрунтя для удосконалення розрахункових методів прогнозування вогнестійкості даних конструкцій, що у свою чергу є частиною передумов забезпечення їх відповідності нормованим класам вогнестійкості та підвищення рівня пожежної безпеки будівель та споруд, зведених на їх основі.

При дослідженні закономірностей впливу конструктивних параметрів сталевих балок на умови відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання досліджено температурні дані та теплофізичні параметри мінераловати, проведені вогневі випробування, результати яких інтерпретовані стандартизованими математичними методами. Під час моделювання поведінки сталеві балки із мінераловатним вогнезахисним облицюванням застосовані математичні методи, засновані на використанні загальних рівнянь динаміки, а також метод кінцевих елементів для апроксимації даних рівнянь. Для розробки математичної моделі прогнозування часу відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання проведено повний факторний експеримент, за результатами якого визначено достовірність та адекватність температурних результатів. З урахуванням виявлених закономірностей розроблено удосконалений метод розрахункової оцінки вогнестійкості елементів конструкцій сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним облицюванням.

Отримана методика в подальшому застосовується у стандартних методах розрахункової оцінки вогнестійкості сталевих балок з вогнезахисним облицюванням з мінеральної вати для визначення відповідних вихідних даних для проектування споруд з їх застосуванням.

## РОЗДІЛ 1

### СУЧАСНИЙ СТАН НОРМУВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ БАЛОК ТА РОЗРАХУНКОВИХ МЕТОДІВ ЇЇ ОЦІНКИ

#### 1.1. Статистичні дані щодо пожеж у будівлях і спорудах зі сталевими конструкціями

За даними аналітичного огляду стану техногенної та природної безпеки в Україні за 2018 рік [1], протягом 2009 – 2018 років у країні зберігається тенденція до виникнення пожеж (див. рис. 1.1). За останнє десятиріччя зареєстровано 730 456 пожеж, що відповідає середньому значенню 73 046 випадків за рік. Упродовж 10 років людські втрати сягнули 28 220 загиблих і 16 884 травмованих, що в середньому дорівнює щорічному показнику 2822 загиблих і 1688 травмованих людей. Матеріальні збитки від цих пожеж становлять більш як 12 мільярдів гривень – безпосередні й понад 50 мільярдів гривень – побічні [1].

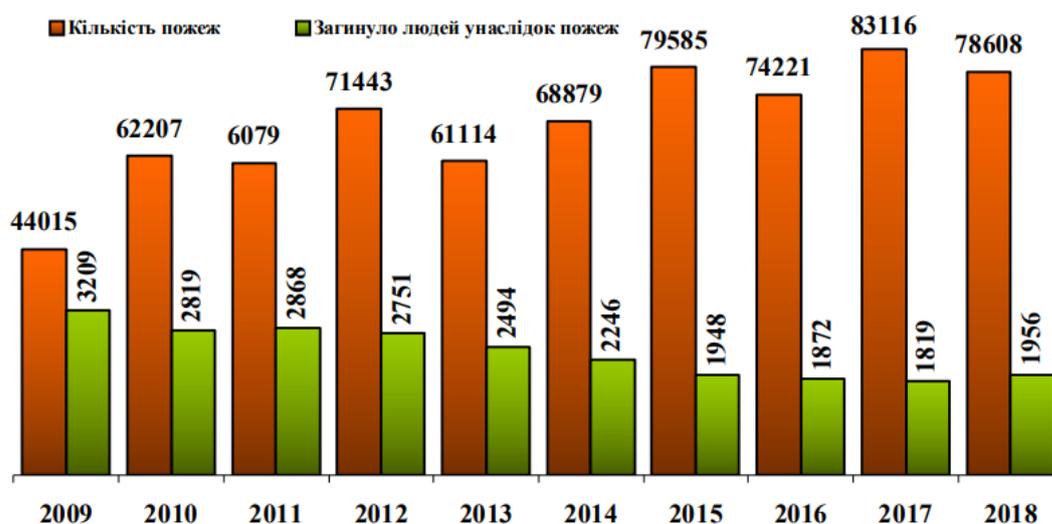


Рис. 1.1 Динаміка кількості пожеж та загибелі людей унаслідок пожеж протягом 2009 – 2018 років

Лише за 10 місяців 2019 року матеріальні втрати від пожеж досягли 8 млрд 279 млн 120 тис. грн. Починаючи з початку року в середньому за добу в Україні виникає 215 пожеж, що призводять до загибелі 5 людей та до травмування 4 осіб, знищення вогнем або пошкодження 70 будівель. Щоденні витрати становлять 22,7 млн гривень [2].

На підставі даних за місцем виникнення пожеж [2], що представлені на рис. 1.2, близько 50 % усіх пожеж стається в будівлях і спорудах.

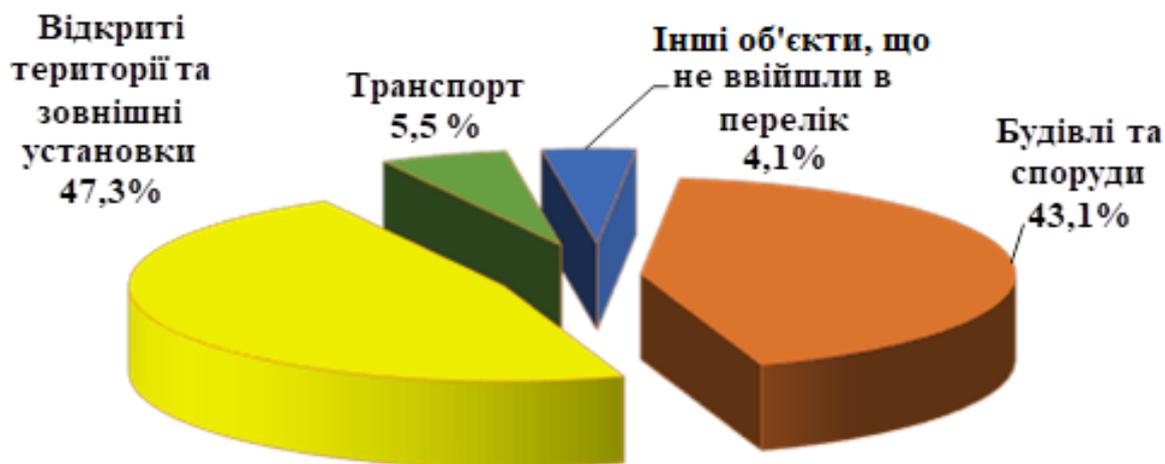


Рис. 1.2 Розподіл пожеж за об'єктами їх виникнення, що сталися протягом 2019 року

Серед основних причин, що призводять до руйнування будівель і споруд під час пожежі, варто назвати дію відкритого вогню, що в разі наявності відкритого полум'я або в умовах дії високих температур спричинює швидке прогрівання. Досягаючи критичної температури 500 °C для сталевих і 300 °C для алюмінієвих сплавів, призводить до деформації та втрати несучої здатності конструкції за 5-20 хвилин [3].

Більшість руйнувань будівель із металевими конструкціями під час пожежі виникає внаслідок втрати несучої здатності, це зумовлене здебільшого недотриманням норм вогнестійкості, незадовільним технічним станом конструкцій чи споруд, порушенням правил пожежної безпеки та технологічних процесів, невиконанням нормативно-планових вогнезахисних робіт (перевищення гарантованих термінів експлуатації конструкцій чи вогнезахисних систем). Зазначені порушення знижують рівень безпеки експлуатації будівель і споруд та створюють небезпеку для людей, що перебувають у них.

## 1.2. Нормування вогнестійкості сталевих балок

У разі виникнення пожежі велике значення для безпеки людей, які перебувають у будівлі та проводять роботи з ліквідації, має ступінь вогнестійкості несучих конструкцій. Особливо це важливо для несучих металевих конструкцій, які мають високу теплопровідність та для яких критичною температурою настання граничного стану з втрати несучої здатності, із подальшим руйнуванням вважають 400-620 °C [4].

Несуча здатність конструкцій – важливий показник, що забезпечує міцність і стійкість конструкцій будівельних об'єктів, їхню здатність витримувати постійні та тимчасові навантаження, не втрачаючи своєї працездатності. Особливості забезпечення несучої здатності металевих конструкцій потрібно брати до уваги як на стадії проектування, так і під час експлуатації [5].

Сьогодні в Україні чинними є 4 основні нормативні документи, відповідно до яких проводять розрахунки вогнестійкості несучих металевих конструкцій: ДБН В.1.1-7-2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги» [3], ДСТУ-Н EN 1993-1-2: 2010 «Єврокод 3: Проектування сталевих конструкцій – Частина 1-2: Загальні правила – Розрахунок на вогнестійкість» [6], ДСТУ Б В.1.1-4-98\* «Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробування на вогнестійкість» [7], ДСТУ Б В.1.1-17-2007 «Захист від пожежі. Вогнезахисне покриття для будівельних несучих металевих конструкцій. Метод визначення вогнезахисної здатності (ENV 13381-4:2002, NEQ)» [8]. Згідно з нормативними документами [3, 6–8], регламентовано умови експериментальних випробувань, коли визначають межу вогнестійкості металевих конструкцій, а саме: показники температурного режиму, методики проведення випробувань й обчислень. Відповідно до ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010 [6], для визначення критичної температури втрати несучої здатності пропонують диференціальний підхід. Значення температури залежить від навантаженості конструкції й може становити як для ненавантаженої (самонесучої) 650 °С, так і 400 °С – для перевантаженої. Середнє значення для нормовано навантаженої конструкції становить 500-550 °С [6].

Таблиця 1.1

Конструктивні характеристики будівель залежно від ступеня вогнестійкості

Ступінь вогнестійкості	Конструктивні характеристики
I, II	Будівлі з несучими й захищеними конструкціями з натуральних або зі штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону, із використанням листових і плиткових негорючих матеріалів.
III	Будівлі з несучими й захищеними конструкціями з натуральних або зі штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону.
IIIa	Будівлі переважно з каркасною конструктивною схемою. Елементи каркаса – із металевих захищених конструкцій.

## Продовження таблиці 1.1

IIIб	Будівлі переважно одноповерхові з каркасною конструктивною схемою. Елементи каркаса – з деревини, що зазнала вогнезахисного оброблення.
V	Будівлі з несучими й захищеними конструкціями з деревини або з інших горючих матеріалів, захищених від дії вогню та високих температур штукатуркою чи іншими листовими, плитковими матеріалами.
IVa	Будівлі переважно одноповерхові з каркасною конструктивною схемою. Елементи каркаса – із металевих незахищених конструкцій.
V	Будівлі з несучих і захищених конструкцій, до яких немає вимог щодо меж вогнестійкості.

Один з основних керівних документів, що регламентує загальні вимоги пожежної безпеки до будинків і споруд будь-якого призначення, – ДБН В.1.1-7-2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги» [3]. Залежно від конструктивних характеристик (табл. 1.1), визначають необхідний ступінь вогнестійкості будівлі, конструктивні елементи яких повинні відповідати класу вогнестійкості та межі поширенню вогню (М) за табл. 1 [1].

Таблиця 1.2

**Ступінь вогнестійкості будинку та класи вогнестійкості будівельних конструкцій**

Ступінь вогнестійкості будинків	Мінімальні значення класів вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) і максимальні значення груп поширення вогню по них								
	Стіни				колони	сходові площадки, косоури, сходи, балки, марші сходових кліток	перекриття міжповерхові (зокрема горючі та над підвалами)	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	само-несучі	зовнішні ненесучі	внутрішні ненесучі (перегородки)				плити, настили, прогони	балки, ферми, арки, рами
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>I</b>	REI 150 M0	REI 75 M0	E30 M0	EI 30 M0	R 150 M0	R 60 M0	REI 60 M0	RE 30 M0	R 30 M0
<b>II</b>	REI 120 M0	REI 60 M0	E15 M0	EI 15 M0	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M0	RE 15 M0	R 30 M0
<b>III</b>	REI 120 M0	REI 60 M0	E15, M0 E30, M1	EI 15 M1	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M1	<b>Ненормовані</b>	
<b>IIIa</b>	REI 60 M0	REI 30 M0	E15 M1	EI 15 M1	R 15 M0	R 60 M0	REI 15 M0	RE 15 M1	R 15 M0
<b>IIIб</b>	REI 60 M1	REI 30 M1	E15, M0 E30, M1	EI 15 M1	R 60 M1	R 45 M0	REI 45 M1	RE 15, M0 RE 30, M1	R 45 M1

Продовження таблиці 1.2

<b>IV</b>	REI 30 M1	REI 15 M1	E15 M1	EI 15 M1	R 30 M1	R 15 M1	REI 15 M1	<b>Ненормовані</b>	
<b>IVa</b>	REI 30 M1	REI 15 M1	E15 M2	EI 15 M1	R 15 M0	R 15 M0	REI 15 M0	RE 15 M2	R 15 M0
<b>V</b>	<b>Ненормовані</b>								

До металевих конструкцій, що застосовують у вигляді балок, висувають низку вимог стосовно збереження одного з граничних станів – несучої здатності (R), яку потрібно брати до уваги вже на стадії проектування та забезпечити її виконання протягом певних проміжків часу від 0 до 150 хвилин в умовах пожежі. Важливий показник для визначення ступеня вогнестійкості за будівельними конструкціями – показник групи поширення вогню, що за [1] поділяють на три групи M0, M1, M2. Це відповідає відстані поширення вогню поверхнею будівельної конструкції та вимірюване за горизонтального й вертикального розміщення. Для показника M0 поширення полум'я для обох напрямків становить 0 м, а для M1 ці показники за вертикальним напрямком не повинні перевищувати 0,4 м та за горизонтальним розміщенням – до 0,25 м, у випадку M2 дані перевищують граничні значення, зафіксовані для M1.

За групою поширення вогню металеві (сталеві) конструкції належать до негорючих матеріалів із межею поширення вогню M0, однак складність використання таких конструкцій полягає в основному в недоліку металу – високій теплопровідності, що призводить до втрати несучої спроможності сталевої конструкції вже протягом 5-20 хвилин високої теплової дії в умовах пожежі.

Нормативні документи, що використовують під час проектування сталевих будівельних конструкцій та з огляду на політику країни стосовно увідповіднення вимог нормативних документів у багатьох галузях із єдиними європейськими стандартами, – ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010 «Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість» (EN 1993-1-2:2005, IDT) [6] та ДСТУ-Н Б.В.2.6-211:2016 «Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість» [5]. Зазначені документи регламентують основний вплив пожежі на сталеві конструкції, зумовлюють загальні положення розрахунку конструкцій на вогнестійкість, описують проектні сценарії пожежі із зазначенням температурних режимів, регулюють порядок теплотехнічного розрахунку й методи перевірки.

Сферою застосування [6] є проектування сталевих конструкцій за умов виникнення пожежі, з урахуванням відмінностей чи доповнень проектування за нормальних температур. Це поширюється

на металеві конструкції з пасивним вогнезахистом, що повинні зберігати несучу здатність протягом визначеного часового проміжку під впливом вогню та запобігати їх передчасному руйнуванню. У ході проектування вимоги вогнестійкості будуть дотримані в разі задоволення таких умов [6]:

- параметр часу  $t_{fi,d} \geq t_{fi,requ}$ ; (1.1)

- параметр міцності  $R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}$ ; (1.2)

- параметр температури  $\theta_d < \theta_{cr,d}$ , (1.3)

де  $t_{fi,d}$  – розрахункова межа вогнестійкості;

$t_{fi,requ}$  – нормативна межа вогнестійкості;

$R_{fi,d,t}$  – розрахункова несуча здатність елемента в ході пожежі в момент часу  $t$ ;

$E_{fi,d,t}$  – розрахунковий результат впливу в процесі пожежі в момент часу  $t$ ;

$\theta_d$  – розрахункова температура матеріалу;

$\theta_{cr,d}$  – розрахункова критична температура матеріалу [6].

Забезпечення зазначених умов – основний принцип розрахунку конструкцій на вогнестійкість, що передбачає виконання алгоритму: вибір можливих проектних сценаріїв пожежі, визначення температурних режимів, розрахунок підвищення температури в конструкціях (теплотехнічний розрахунок), розрахунок механічних характеристик конструктивної системи в умовах пожежі (статичний розрахунок) [1–2, 9].

Визначаючи вогнестійкість будівлі, до уваги беруть групу горючості й межі вогнестійкості основних її будівельних конструкцій. Розрахунок вогнестійкості сталевих конструкцій можуть проводити за спрощеною розрахунковою моделлю або ж за розвинутою, для деяких випадків передбачено застосування методу випробування [10].

### 1.3. Особливості поведінки сталевих балок в умовах пожежі

Вимоги будівельних норм до проектування несучих металевих конструкцій регламентує як в Україні, так і в країнах Європи нормативний документ – ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010 [6]. Відповідно до [6], визначення вогнестійкості несучих металевих конструкцій залежить від захищеності конструкції, що можуть бути незахищеними, ізольованими вогнезахисним матеріалом, захищеними тепловими екранами. З огляду на наявність і вид захисту, для визначення вогнестійкості застосовують низку методів: спрощену розрахункову модель, уточнену розрахункову модель, випробування.

У разі використання спрощеної розрахункової моделі для металевих конструкцій, що працюють на розтяг, стиск, пі час згину, на стиск зі згином, розрахункову несучу здатність конструкції з нерівномірно розподіленою температурою по ширині поперечного перерізу приймають спрощено, як конструкцію з рівномірним розподілом температури, що дорівнює максимальній температурі сталі в момент часу в процесі пожежі. Важливим чинником у ході розрахунку за спрощеною розрахунковою моделлю є вид захисту, що впливає на значення приросту температури, яке відрізняється для незахищених несучих металевих конструкцій від захищених способом ізоляційних вогнезахисних матеріалів і теплових екранів. У спрощеній розрахунковій моделі показники максимальної температури завищені, тому забезпечують створення запасу несучої здатності будівельних конструкцій в умовах пожежі.

Використання уточнених розрахункових методів передбачає врахування реалістичних умов під час розрахунку конструкцій, що зазнають вогневого впливу. Особливістю такої моделі є можливість її застосування за будь-якого режиму нагрівання в разі, якщо відомі властивості матеріалів для температурної стадії. Методика такої моделі прогнозує розрахунок розвитку та поширення температури в конструкціях (модель температурної реакції), механічної роботи будівлі або будь-якої її частини (модель механічної реакції), що регламентоване [6, 11].

### **1.3.1. Температурні режими пожежі.**

Другий етап для розрахунку вогнестійкості конструкції після вибору проектного сценарію пожежі – визначення температурного режиму пожежі, що зумовлює температурно-часову залежність розвитку пожежі. Серед температурних режимів розрізняють номінальні й параметричні. Для номінальних температурних режимів характерний усталений режим розвитку пожежі. Згідно з [11], до номінальних режимів належать:

- стандартний температурний режим;
- температурний режим зовнішньої пожежі;
- температурний режим вуглеводневої пожежі.

Температурний режим пожежі являє собою температурно-часову залежність розвитку пожежі (з урахуванням умов обмеження простору та типу протипожежного відсіку).

У ході розгляду сценаріїв умовної пожежі використовують стандартний температурний режим у температурних межах від 20 до 700 °С, випробування в такому режимі можуть тривати до 1200 °С згідно з [7, 8]. За цих умов температурно-часову залежність визначають за виразом:

$$T = 345 \lg(8t+1) + 20, \quad (1.4)$$

де  $T$  – температура газу в пожежному відсіці, °C;  
 $t$  – часовий показник тривалості теплового впливу від початку випробування, хв.

Графік стандартного температурного режиму відображений у вигляді кривої температура-час на рис. 1.3.

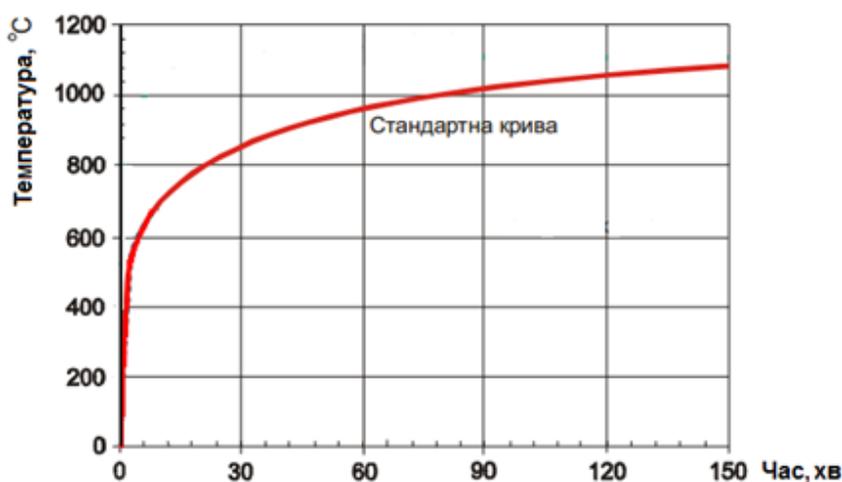


Рис. 1.3 Залежність температура-час стандартного температурного режиму (відношення зростання температури до часу)

Розгляд температурного режиму зовнішньої пожежі засвідчує меншу інтенсивність теплового впливу, порівняно зі стандартним температурним режимом. Такий температурний режим можливий у разі визначення вогнестійкості будівельних елементів, експлуатація яких передбачена ззовні будівель. У цьому випадку криву температура-час зовнішньої пожежі описують залежністю:

$$T = 660 [ 1 - 0,687 e^{-0,32t} - 0,313 e^{-3,8t} ] + 20, \quad (1.5)$$

де  $T$  – температура середовища пожежі біля будівельного елемента, °C.

Ще один температурний режим – режим вуглеводневої пожежі, що вирізняється найвищим тепловим наростанням і стосується проектування об'єктів, пов'язаних зі зберіганням, транспортуванням, переробленням нафто-газових та хімічних речовин [4, 6]. Крива температури-часу вуглеводної пожежі описана виразом:

$$T = 1080 [ 1 - 0,325 \exp (- 0,167 t) - 0,675 \exp (-2,5 t) ] + 20. \quad (1.6)$$

Графік температурного режиму вуглеводневої пожежі відображений у вигляді кривої температура-час на рис. 1.4.

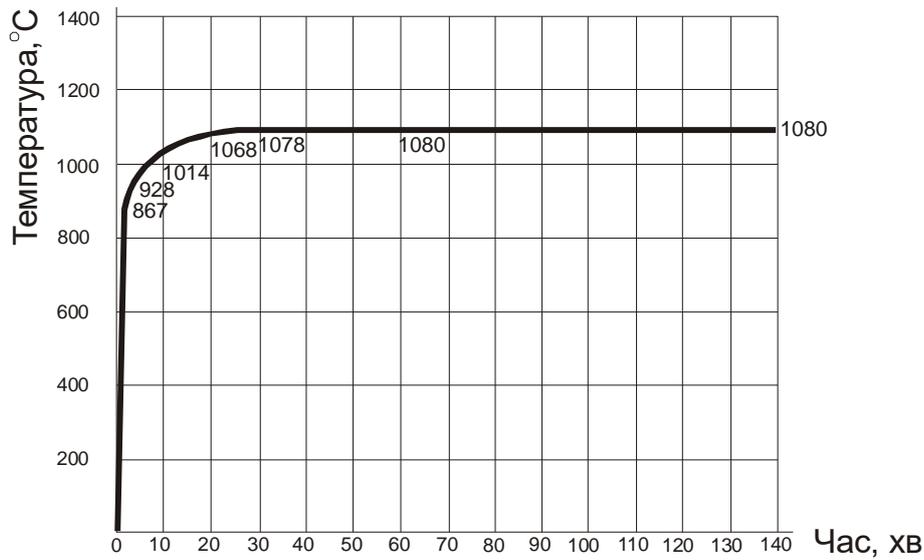


Рис. 1.4. Графік температура-час режиму вуглеводневої пожежі (відношення зростання температури до часу)

На рис. 1.5 представлено всі три криві залежностей температура-час основних номінальних температурних режимів [10, 12].

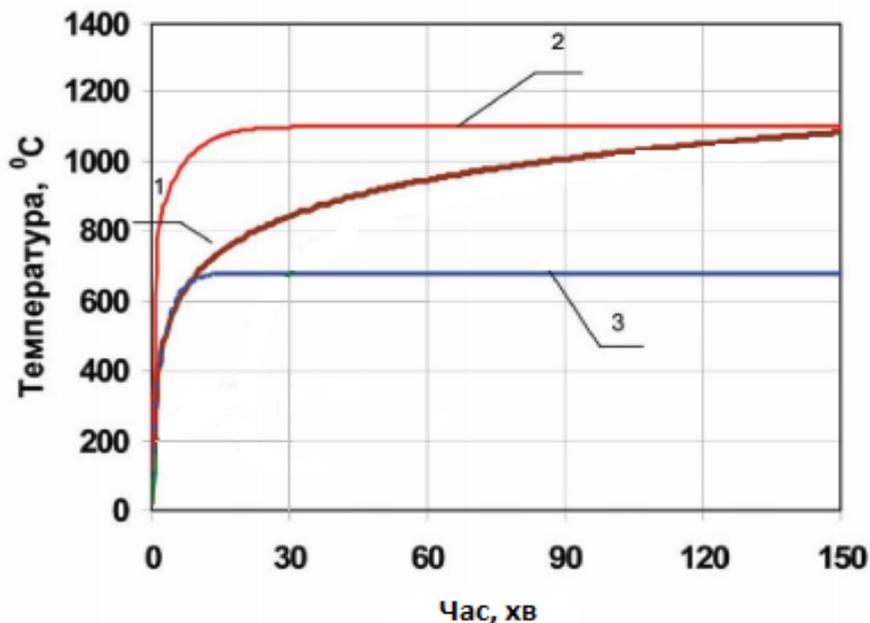


Рис. 1.5 Криві температура-час номінальних температурних режимів: 1 – крива стандартної пожежі; 2 – крива вуглеводневої пожежі; 3 – крива зовнішньої пожежі

Параметричні режими пожеж – це ще одна група температурних режимів, що належать до принципів розгляду сценаріїв реальних

пожеж. Параметричні температурні режими відрізняються від номінальних врахуванням низки параметрів, що впливають на результати визначення вогнестійкості. Серед таких параметрів: фізичні параметри приміщення (пожежного відсіку), температура навколишнього газового середовища, час розвитку пожежі, пожежне навантаження (тип, кількість матеріалів і їхня швидкість горіння).

Розрізняють параметричні температурні режими об'ємних і локалізованих пожеж, що відрізняються за рівномірністю розподілу температури залежно від часу (для об'ємних – рівномірний; для локальних – нерівномірний).

Перший із видів параметричних режимів – об'ємний, застосовують для пожежних відсіків із максимальною площею до  $500\text{ м}^2$  і висотою до 4 м. Під час розрахунку цього режиму обов'язковим є прийняття умови про повне вигорання пожежного навантаження.

Тепловий режим локалізованих пожеж на практиці рідко застосовуваний, однак допустимий [11]. Основні його параметри – довжина полум'я й висота приміщення, відповідно до яких розглядають два варіанти розвитку локалізованої пожежі (див. рис. 1.6).

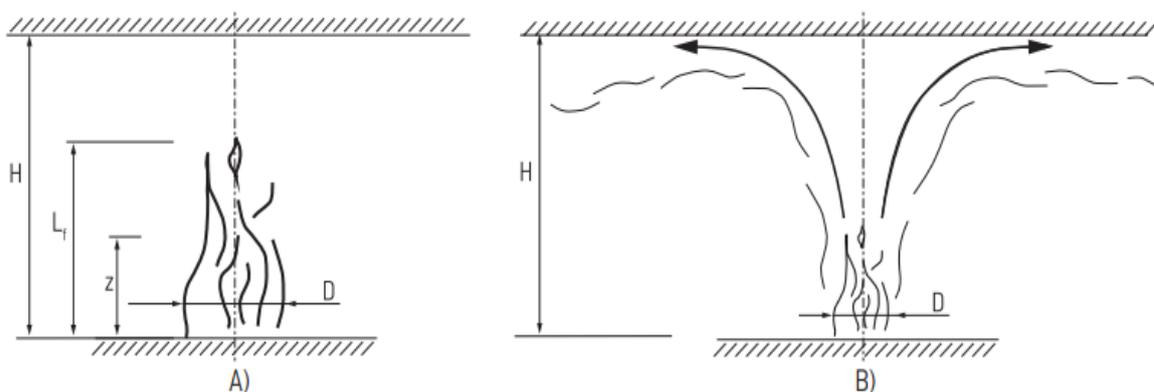


Рис. 1.6 Варіанти розвитку локалізованих пожеж

Моделі локалізованих пожеж із заданими параметрами найчастіше застосовують під час розрахунку теплових впливів на горизонтальні елементи сталевих конструкцій у ході розрахунку їхньої вогнестійкості [6, 11].

### 1.3.2. Температурно-силовий відклик у сталевих балок за умов теплового впливу пожежі.

Під час загального розрахунку конструктивної системи зі сталевих конструкцій в умовах пожежі варто брати до уваги характерні види руйнування, зміну властивостей матеріалу в разі дії

підвищених температур, зміни жорсткості, появи деформацій (розширень).

Проектуючи вогнестійкість сталевих конструкцій, зважають на запас несучої здатності за умов силових і високотемпературних навантажень. За високої теплової дії на сталеву конструкцію відбувається перерозподіл внутрішніх зусиль, що призводить до змін параметрів міцності й деформацій.

Важливі показники підвищення температури для міцності й деформаційних властивостей, що є одними з основних властивостей несучої здатності конструкції, – значення коефіцієнтів: розрахункової границі текучості, границі пропорційності та нахилу лінійної пружної ділянки сталі. На рис. 1.7 [5, 11] представлено криві залежності зниження до граничних значень коефіцієнтів, від яких залежить несуча здатність конструкції в разі підвищення температури.

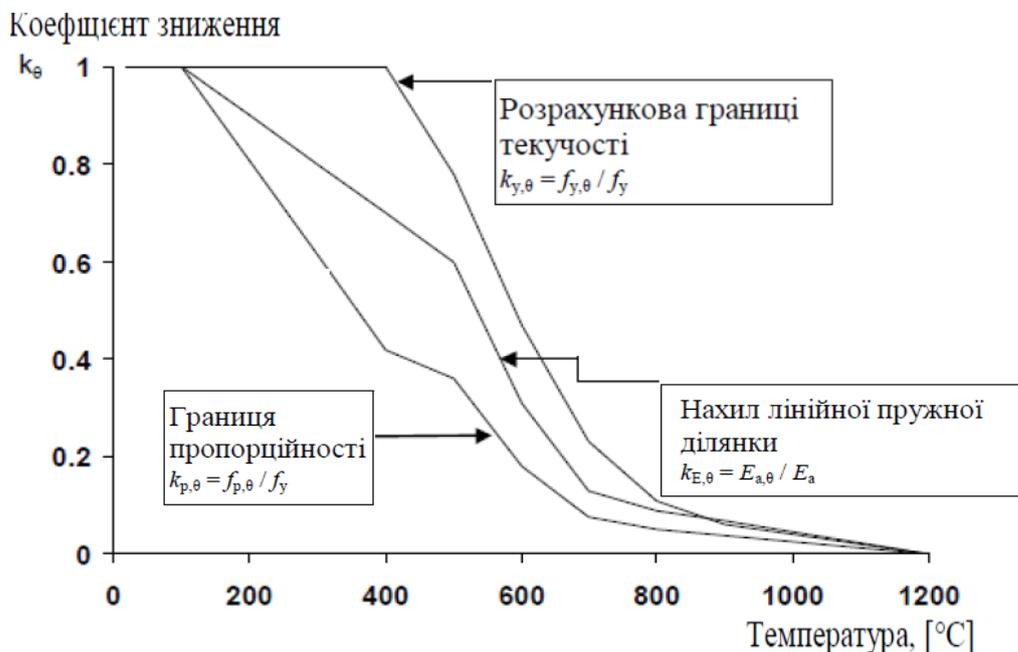
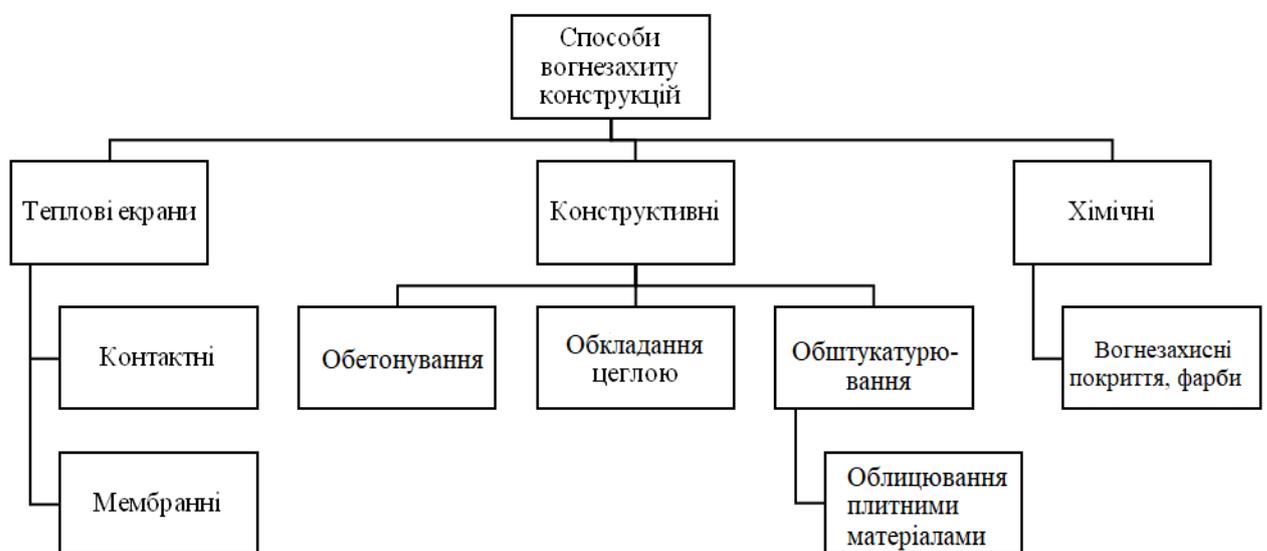


Рис. 1.7 Залежність зниження коефіцієнтів напруження-деформації в разі підвищення температури: 1 – коефіцієнт зниження границі текучості; 2 – коефіцієнт зниження границі пропорційності; 3 – коефіцієнт зниження модуля пружності.

### 1.3.3. Методи підвищення вогнестійкості сталевих балок.

Вразливість металевих конструкцій до дії підвищеної температури зумовлює небезпеку для всієї будівлі, тому цей факт аргументує необхідність спеціальних підходів до оцінювання пожежно-технічних характеристик, що зумовлене швидким

прогріванням і досягненням критичної температури в 500 °С для сталевих і 300 °С для алюмінієвих сплавів, втратою несучої здатності конструкції вже за 5-20 хвилин, що за [3] відповідає R 15. Такий показник недостатній для проведення евакуації людей під час пожежі та проведення робіт оперативно-рятувальними підрозділами з ліквідації, що регульоване Директивою № 89/106/ЄЕС [14]. Це доводить необхідність застосування будівельних матеріалів, що відповідають вимогам пожежної безпеки та мають нормовані показники межі вогнестійкості табл. 1.2 [1], досягнення яких можливе в разі використання спеціальних вогнезахисних засобів. Останні набули широкого застосування, їхні різновиди класифіковані на рис. 1.8 [18].



*Рис. 1.8 Класифікація способів вогнезахисту*

Більшість способів застосовують до різних конструктивних матеріалів, найчастіше – для підвищення межі вогнестійкості металевих конструкцій. Серед теплових екранів і хімічних видів вогнезахисту поширені різноманітні терморозширювальні (спучувальні) фарби, покриття як на водній, так і на органічній основі. Вони мають численні переваги, серед яких – естетичний вигляд, незначна товщина (від 0,5 мм до 3 мм – фарби, від 2 мм до 10 – 13 мм – покриття), можливість забарвлення до необхідного відтінку, нанесення на конструкції різної форми, широкий температурний режим експлуатації від – 40 до + 50 °С тощо. Порівнюючи зовнішній вигляд такого виду вогнезахисту зі звичайними фарбами й покриттями, фіксують, що різниця малопомітна та полягає в тому, що одні за дії температур вище від + 200 °С починають спінюватися, тобто утворюється пінистий шар на обробленій поверхні, що забезпечує теплоізоляційний бар’єр, деякі з них виділяють газу, які додатково

пригнічують процес горіння (ОЗК-01). Крім того, такі засоби мають позитивні властивості: корозійна стійкість (Ендотерм ХТ-150, Sika® Unitherm® ACE), висока адгезія до поверхонь інших матеріалів (Ендотерм ХТ-150, Nullifire S 607, ОЗК-01, Interchar 973, Dossolan Ноесо FII/1), стійкість до кліматичних умов (Sika® Unitherm® ACE, «Unitherm 38091», «Solvetherm 3FR»). Термін захисної дії таких вогнезахисних засобів становить від 5 до 10 років, деяких – 20 років, що є достатньо тривалим. За допомогою цього захисту можна збільшити межу вогнестійкості металевих конструкцій до R 45 – R 60, деякими з них навіть до R 90 – R 120 (Dossolan Ноесо FII/1, Феникс СТВ, Interchar 973). Перевага покриттів і фарб також полягає в тому, що поверхні, які захищають, можуть мати будь-яку за складністю форму й розміри, це створює проблеми під час оброблення іншими вогнезахисними засобами (штукатурка, обмазка, базальтування (Ізовент-М, Піроізол-базальт) та різних видів конструктивного вогнезахисту. Поряд із низкою переваг існують і недоліки, серед яких найбільшими є необхідність попереднього ґрунтування поверхонь, нанесення поверхневого захисного покриття для надання стійкості до атмосферних чинників, малий час захисної дії, постійний контроль за цілісністю шару покриття чи фарби, необхідність нанесення в декілька шарів, висока вартість матеріалу та витрат на роботу, яку проводять тільки працівники спеціальних установ, підприємств [12–22].

Конструктивні види вогнезахисту, відповідно до рис. 1.8, поділяють на чотири способи. Вогнезахисні штукатурки (Неоспрей, Преградин) – універсальні для конструкцій споруд і будівель різного експлуатаційного призначення, за винятком тих, що у своєму складі містять гіпс і вапняк, слугують одним із дешевих способів вогнезахисту. У разі їх нанесення показник класу вогнестійкості становить R 150 – R 180, а довговічність захисної дії – від 10 до 25 років. Використання названого виду вогнезахисту не ефективно для металевих конструкцій складної форми, на зразок балок, ферм і зв'язків, особливо тих, які зазнають вібраційного впливу, що спричинює утворення тріщин, обсіпання. Це досить кропітка робота, оскільки потребує постійного контролю за цілісністю поверхні [23].

Метод облицювання цеглою працює за принципом теплоізоляційних матеріалів і має такі позитивні характеристики: додаткове посилення для несучої металевої конструкції, надійний захист від усіх видів атмосферних опадів, естетичний вигляд – залежно від типу, марки цегли, ефективність – кладка товщиною в одну цеглу (65 мм) забезпечує межу вогнестійкості до 120 хвилин [24]. До недоліків цього виду вогнезахисту належать: висока вартість і трудомісткість, неможливість застосування для горизонтальних

конструкцій, додаткове навантаження на фундамент конструкції, зменшення корисної площі приміщень, застосування цементного в'язучого розчину, що утворює «містки холоду» у разі використання ззовні.

Обетонування металевих будівельних конструкцій – ще один вид вогнезахисту, який збільшує час захисної дії до R 120 – R 240. Цей вид досить ефективний завдяки фізико-хімічним процесам у структурі бетону, що спричинені пластичними деформаціями й зростанням міцності в разі нагріву до 500 – 600 °C, має широку варіацію як у видах бетонів, так і в його заповнювачах. Бетони не горять і не поширюють полум'я [16]. Обетонування застосовують здебільшого для підсилення дефектних та уражених корозією металевих конструкцій. Основні недоліки цього методу – необхідність устанавлення опалубки, значна площа для виконання, зменшення корисної площі приміщень та мінімальна товщина обетонування (не менше як 8 см) [25–28].

Серед способів застосування бетонних матеріалів варто назвати системи облицювання плитними ніздрюватобетонними матеріалами. Основні причини використання цієї системи теплової оболонки пов'язані з низкою позитивних характеристик, а саме: низька теплопровідність, теплосасвоєння, механічне оброблення подібне до деревини, високі показники повітропроникності й паропроникності, невелика вага (порівняно з цегляною кладкою або бетоном, у 1,5 – 2 рази легше, оскільки об'ємна частка повітря може досягати 85 %), негорючість і непоширюваність полум'я, довговічність, надійність протягом усього розрахункового терміну експлуатації споруд [29–32].

Високий показник термічного опору легкого бетону засвідчує ефективність аналізованого матеріалу як теплоізоляційного, але для застосування ніздрюватих бетонів як вогнезахисного матеріалу потребує випробування на вогнестійкість, особливо відношення товщини легкого бетону до показника вогнезахисної здатності – класу вогнестійкості [33–39]. Попри переваги ніздрюватих бетонів, варто назвати недоліки: велике просідання (стосується переважно неавтоклавних ніздрюватих бетонів – пінобетонів) і невисокі показники міцності на стиск. Частково ці недоліки знайшли хімічне й конструктивно-технологічне вирішення, наприклад, через додавання модифікованих добавок та армування [40]. Застосування такого способу вогнезахисту обмежене, підходить здебільшого для вертикальних простих конструкцій, що зумовлене можливістю кріплення.

Облицювання плитними матеріалами – сучасний поширений вид вогнезахисту для металевих конструкцій, від усіх інших вирізняється легкістю заміни, відсутністю мокрих процесів (без розчинів) під час виконання, незначною вагою на конструкцію та середньою за часом

захисною дією – R 60 – R 180, що залежить від товщини захисного шару стосовно товщини металу, який підлягає вогнезахисному обробленню. До недоліків такого виду вогнезахисту належать негативна дія на матеріал вологи й необхідність захисту від неї, погана циркуляція повітря в приміщеннях, товщина захисного шару в одну плиту, без урахувань штукатурки становить 62,5 мм (12,5 мм товщина плити гіпсокартону й 50 мм теплоізоляційного матеріалу – мінераловати), забезпечує межу вогнестійкості REI 60 (зменшення корисної площі), складність конструкцій і велику вартість [22].

У випадку плитних матеріалів основним наповнювачем є мінеральна (базальтова) вата, що за своїми теплоізоляційними характеристиками набула широкого застосування не тільки в утепленні будинків і споруд, а також як негорючий, здатний витримувати температуру до 600 °C вогнезахисний матеріал. Основні виробники мінеральної вати: BauGut, Knauf, Парок, Белтеп, Техноніколь, ROCKWOOL, IZOVAT, URSA, Termolife та інші, що випускають її у вигляді плит (матів) і рулонів. У плитному варіанті матеріал застосовують для всіх напрямів, як у рулонному типі зазвичай використовують для горизонтальних конструкцій. За матеріалом виробництва розрізняють кам'яну (базальтову) мінеральну вату, основною сировиною для якої є гірські породи, та скловату, що отримують у процесі плавлення кварцового піску чи склобою. З огляду на показники теплопровідності, базальтова вата є більш вогнестійкою. Завдяки невеликій вазі мінеральна вата не створює великих навантажень на конструкцію.

Вибір способу вогнезахисту металевих будівельних конструкцій серед великої різноманітності залежить переважно від умов експлуатації, вартості та додаткових властивостей. Завдяки низьким показникам теплопровідності, мінеральну вату використовують як ефективний вид вогнезахисту самостійно, а також у складі вогнезахисних систем із гіпсокартонними плитами чи тепловідбивними покриттями, де базальтова вата виконує функцію основного теплоізоляційного наповнювача [21]. У разі використання мінераловатних матеріалів як способу вогнезахисту виокремлюють кілька переваг: негорючість, незначна вага на конструкції, низька теплопровідність, високі показники тепло- й звукоізоляції, паропроникність, екологічність (виробництво з натуральних сировин), можливість застосування в комплексі інших вогнезахисних систем. Поряд із перевагами існують недоліки, до яких належать: спосіб кріплення та зменшення корисної площі через значну товщину – від 50 мм.

## 1.4. Експериментальні методи оцінки вогнестійкості сталевих балок

### 1.4.1. Вогневі випробування балок на вогнестійкість.

Відповідно до регламентованих вимог [5–9], експериментальні методи випробувань передбачають визначення часового проміжку піддавання високотемпературним впливам зразків сталевих конструкцій до настання втрати несучої здатності. Основне обладнання для проведення експериментальних досліджень на вогнестійкість – випробувальна піч, у якій потрібно створити умови стандартного температурного режиму та надлишкового тиску. Конструктивні складники повинні містити обладнання для спирання зразка та його навантаження, що імітує реальну роботу конструкції.

Для горизонтальних конструкцій проведення вогневих випробувань [7–8] використовують вогневі печі, що забезпечують нагрівання зразка з трьох боків. Розміри печі повинні давати змогу розмістити й закріпити в ній зразки проектних розмірів, однак у випадках, коли це не можливо, допускають проведення випробувальних робіт на фрагментах конструкції, що працюють під навантаженням із мінімальною довжиною не менше як 4000 мм, а для зразків без навантаження – регламентований розмір повинен становити не менше від 1000 мм.

Температурні умови у вогневій печі забезпечують через виконання умов збереження теплового ефекту за температури 500 °С і більше, що досягають через застосування теплоізоляційних матеріалів під час облаштування стінок вогневої камери. Це увідповіднено з виразом (1.7):

$$\sqrt{\lambda \rho c} = 500 \text{ Вт с}^{1/2} \text{ м}^{-2} \text{ °С}^{-1}, \quad (1.7),$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м °С;

$\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;

$c$  – питома теплоємність, Дж/кг °С.

Унаслідок нагнітання температури всередині вогневої камери відбувається згорання рідкого палива з утворенням факелу полум'я, що не повинно торкатися до поверхні випробувального зразка. Для умов стандартного температурного режиму пожежі характерний рівномірний розподіл температури по об'єму камери. Розрахунок показників стандартного температурного режиму проводять за (1.4), що представлено в таблиці 1.3 [7].

Таблиця 1.3

Показники зростання температури за зміною часу  
при стандартному температурному режимі пожежі

Час $t$ , хв	Температура $T_s$ , °C
0	20
5	576
10	678
15	739
30	842
60	945
90	1006
120	1049
150	1082
180	1110
240	1153
360	1214

Проводячи вогневі випробування горизонтальних конструкцій (балок, ферм), до уваги беруть вимоги [7–8] до створення навантаження, на зразок конструкції. Загальна площа дотику зразка з навантаженням й обладнанням не повинна перевищувати 10 %. Як навантаження застосовують тягарі у вигляді бетонних блоків, що встановлені на металеві траверси й забезпечують фіксацію навантаги з її беззмінним положенням протягом усього часу випробування, незалежно від деформаційних процесів у зразку, до настання втрати несучої здатності.

Без навантаження можна випробовувати зразки металевих балок із вогнезахисним покриттям чи з облицюванням. Такі металеві конструкції мають відповідати державному стандарту ДСТУ Б.В. 1.1-17:2007 [7], згідно з яким основним критерієм настання граничного стану втрати несучої здатності в металевих конструкціях є критична температура. Критичну температуру для кожної окремої конструкції визначають розрахунковим шляхом із використанням стандартів [5–6].

Кріплення балки у вогневій камері відбувається за проектним технічним регламентом, у всіх інших випадках керуються умовою, за якої зразок конструкції кріплять до вертикальної опори способом спирання та приймають як вільно обперту балку. Приклад шарнірного кріплення навантажених балок зображено на рис. 1.9.



а.

б.

Рис. 1.9. Вигляд навантажень балок а – до початку випробувань, б – після випробувань

Для уникнення тепловтрат кінці випробовуваного зразка, що виходять за межі вогневої камери, ізолюють шаром із мінераловати товщиною  $100 \text{ мм} \pm 10 \text{ мм}$  та середньою густиною  $90\text{-}150 \text{ кг/м}^3$ .

На рис. 1.10 схематично зображено розміщення й кріплення випробовуваного конструктивного елемента у вогневій печі [4]:

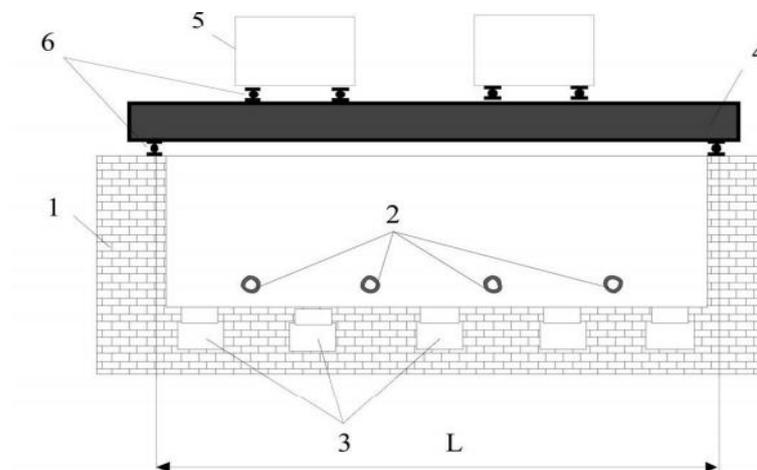


Рис. 1.10 Схема розміщення та кріплення горизонтального елемента у вогневій печі: 1 – стіни печі; 2 – пальники; 3 – канали для видалення продуктів згорання навантаження; 4 – зразок випробувань; 5 – навантаження; 6 – опори (шарнірні); L – довжина зразка, що зазнає вогневого впливу.

Важливий елемент проведення вогневих випробувань – контрольно-вимірювальні прилади, що поділяють на дві групи. Перша група представлена приладами для вимірювання показників температури в контрольних точках вогневої камери, на

необігрівальній поверхні й усередині зразка, в навколишньому середовищі. Допустимий діапазон похибок термопар –  $\pm 4-15$  °С. До другої групи належать прилади для вимірювання: надлишкового тиску в печі з допустимою похибкою до  $\pm 2$  Па, навантаження випробуваного зразка –  $\pm 5$  % (динамометр силового пресу), деформаційних змін –  $\pm 2$  мм (градуйована планка або лінійка, лазерний дальномір).

Процес випробування безпосередньо розпочинається з підготовчого етапу, до якого входять кріплення зразка та його навантаження, що повинно бути реалізованим не менше як за 15 хв. до початку. Перед початком встановлюють вихідні показники: температуру на всіх термопарах і навколишнього середовища в приміщенні, де працює випробувальна піч, стан деформації й навантаження сталеві балки. Час випробування розпочинається з моменту ввімкнення пальників у вогневій печі. Упродовж усього процесу фіксують значення показників усіх вимірювальних приладів з інтервалом не менше хвилини.

Значення надлишкового тиску для горизонтальних конструкцій вимірюють на відстані 100 мм від обігрівальної поверхні зразка через 5 хв. після початку випробування, до закінчення він повинен становити  $(10 \pm 2)$  Па [7].

Для визначення деформації зразків горизонтальних конструкцій вимірювання проводять поблизу геометричного центра та в місцях, де поява таких змін найбільш очікувана. За можливості весь процес випробування також фіксують за допомогою фото- та відеознімання.

Випробування проводять до настання граничного стану за ознакою втрати несучої здатності – обвалення зразка або досягнення граничного значення прогину (деформації). У першому випадку часом закінчення випробування є момент обвалення [4, 12]. Закінчення досліджень за показниками деформації настає в разі досягнення граничного значення швидкості наростання деформації. Це визначають за (1.8) та (1.9).

$$D = \frac{L^2}{400b} \text{ мм}; \quad (1.8)$$

$$\frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9000b} \frac{\text{мм}}{\text{хв}}, \quad (1.9)$$

де  $D$  – граничне значення прогину;

$L$  – прогін, мм;

$b$  – розрахункова висота перерізу конструкції, мм.

При значенні прогину не більше  $L/30$ , граничною деформацією є тільки граничне значення прогину. Проводячи вогневі випробування зразків металевих конструкцій із вогнезахисним покриттям, що випробовують без навантаження, перевищення середньої температури зразка над його початковою температурою на  $480\text{ }^{\circ}\text{C}$  приймають за граничний стан за ознакою втрати несучої здатності.

#### 1.4.2. Експериментальні методи визначення вогнезахисної здатності вогнезахисних систем сталевих балок.

Відповідно до [10], проводять вогневі випробування сталевих балок. У разі використання вогнезахисних систем у вигляді покриття (нанесення фарб, покриттів, обмазок, штукатурок) та облицювань, що підвищують клас вогнестійкості металевого конструктивного елемента, керуються ДСТУ Б В.1.1-17:2007 [8]. Згідно з [8], важливим показником вогнезахисної здатності покриття для несучої сталеві конструкції є залежність мінімальної товщини від коефіцієнта перерізу металевого профілю та забезпечуваної ним нормованої межі вогнестійкості.

Залежно від способу нанесення вогнезахисного покриття, облицювання за площею поперечного перерізу розрізняють профільні та коробчасті перерізи – рис. 1.11. Коефіцієнт перерізу розраховують із виразу 1.10. Це значення беруть до уваги в подальших розрахунках.

$$A/V_m = \frac{\text{периметр обігрівної поверхні}}{\text{площа} \cdot \text{поперечного} \cdot \text{перерізу}} \quad (1.10)$$

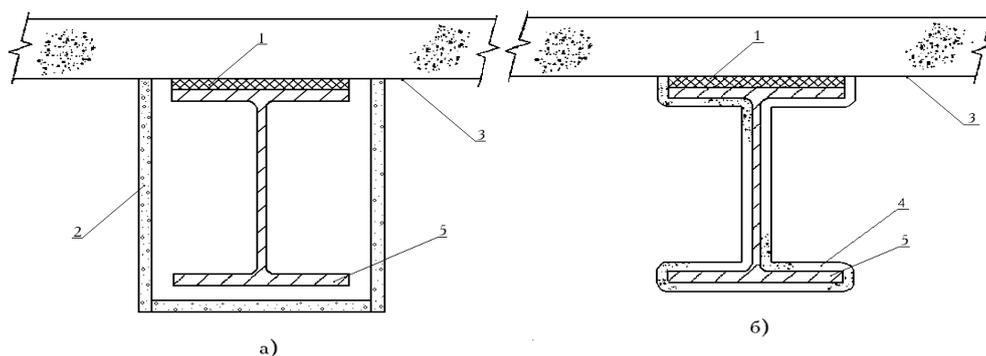


Рис. 1.11 Схематичне зображення перерізів сталеві балки з вогнезахисним покриттям (облицюванням), що обігрівають із трьох сторін (а – коробчастий переріз, б – профільний переріз): 1 – теплоізоляційний матеріал; 2, 4 – вогнезахисне покриття; 3 – верхня плита вогневої печі; 5 – сталеві балка.

Випробування для горизонтальних конструкцій із нанесеною або з облаштованою вогнезахисною системою проводять за [8], досліджують здатність покриття до адгезії (злипання) із поверхнею зразка в режимі стандартної пожежі. Для перевірки злипання, відповідно до табл. 1.4, використовують набір зразків балок в умовах навантаження та без нього. Отримані дані випробування враховують у вигляді коефіцієнтів злипань під час проведення математичного аналізу, з'ясування характеристики вогнезахисної здатності покриття.

Таблиця 1.4

Стандартний набір зразків для проведення експериментальних випробувань сталевих балок із вогнезахистом для оцінювання здатності до злипання (зчеплення)

Кількість зразків	Навантаження	Типорозмір і сталевих профілів, мм	Профільний коефіцієнт $A_m/V, \text{ м}^{-1}$	Коробчастий коефіцієнт $A_m/V, \text{ м}^{-1}$	Товщина вогнезахисного покриття $d_p, \text{ мм}$
1 балка	Під навантаженням	IPE 400 (40Б2)	153	116	Максимальна $d_p$ (max)
1 балка	Під навантаженням	IPE 400 (40Б2)	»	»	Мінімальна $d_p$ (min)
1 балка	Без навантаження	IPE 400 (40Б2)	»	»	Максимальна $d_p$ (max)
1 балка	Без навантаження	IPE 400 (40Б2)	»	»	Мінімальна $d_p$ (min)

Для горизонтальних несучих металевих конструкцій, які захищають із трьох чи з чотирьох сторін, випробування проводять на 2 балках із навантаженням (довжиною не менше як 4000 мм та не більше як 4700 мм), 2 балках без навантаження (1000 ±50 мм).

Для проведення експериментальних досліджень використовують вогневі печі за стандартом [7], що забезпечують нагрів зразків із трьох сторін. Показники й умови навколишнього середовища, створення температурного режиму та надлишкового тиску, утворення й фіксування прогину балок відповідають ДСТУ Б В.1.1-4.98\*.

Для вогнезахисних покриттів необхідно також контролювати вологість та густину, показники яких визначають із вимірювання маси. Допустимою похибкою для значень густини й вологості вогнезахисного покриття вважають ±0,1 г, або ±0,1 % від загальної маси.

Значення навантаження зразків не повинно перевищувати 60 % граничних величини, що визначають без урахування ваги балки та

ваги вогнезахисного покриття. Навантаження на горизонтальні конструкції прикладають у двох місцях (з улаштуванням на балці двох елементів жорсткості), рівномірно розподіляючи за зразком.

Зразок сталеві балки з вогнезахистом, що проходить випробування під навантаженням у вогневій печі, розміщений на двох шарнірних опорах: рухому та нерухому. Його довжина повинна становити не менше як 4000 мм, із глибиною спирання не більше від 250 мм із кожного краю. Для балок без навантажень прийнятний спосіб кріплення за допомогою спеціальних болтів діаметром 10 мм, що приварені до колони та плит розміром 100 мм х 100 мм х 6 мм зі стопорною гайкою. На рис. 1.11 це зображено як кріпильні елементи.

Показники зміни температури як усередині вогневої камери, так і на зразках знімають за допомогою термопар, кількість яких залежить від навантаження зразка. Для сталевих балок, що випробовують без навантаження, фіксують температурні показники:

- у вогневій камері печі 2 термопар по центру на відстані 90–110 мм від поверхні зразка;
- на профілі балки 12 термопар на відстані 1/3 і 2/3 довжини зразка: по центру внутрішньої сторони нижньої та верхньої полиці та по центру стінки балки симетрично з обох боків рис. 1.12.

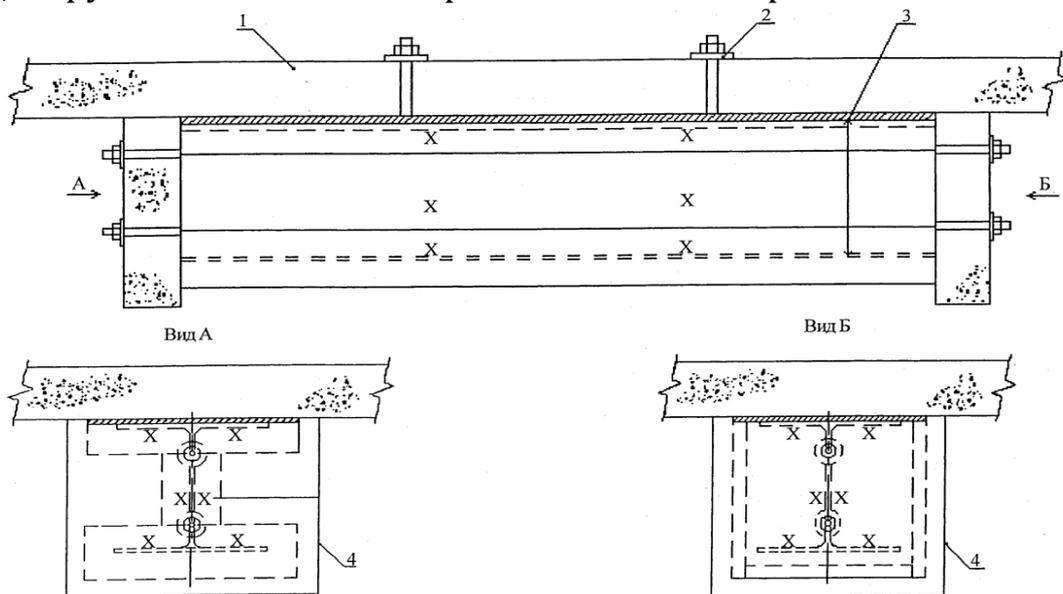


Рис. 1.12. Схема розміщення термопар для зразка ненавантаженої сталеві балки: 1 – плита печі верхня, 2 – кріпильні елементи, 3 – випробовуваний зразок, 4 – ізоляція кінців балки, х – термопара (вид А – із профільним перерізом, вид Б – коробчастий переріз)

Для балок, що випробовують під навантаженням, встановлюють:

- у вогневій камері печі 8 термопар по довжині зразка на відстані 1/5, 2/5, 3/5 і 4/5 симетрично одна до одної, на відстані 90–110 мм від поверхні зразка;

- на профілі балки 30 термопар на відстані  $1/4$ ,  $3/8$ ,  $1/2$ ,  $5/8$ ,  $3/4$  довжини зразка з протилежних боків стінки балки з боку вогневого впливу; від місць навантаження термопар розміщують на відстані, не меншій за 150 мм від елементів жорсткості (рис. 1.13);

- на верхній поверхні нижнього фланця балки додатково розміщують 12 термопар, що розташовують по одній посередині між основними термопарами та по одній посередині відстані між крайніми основними термопарами й центрами опор балок [40–58].

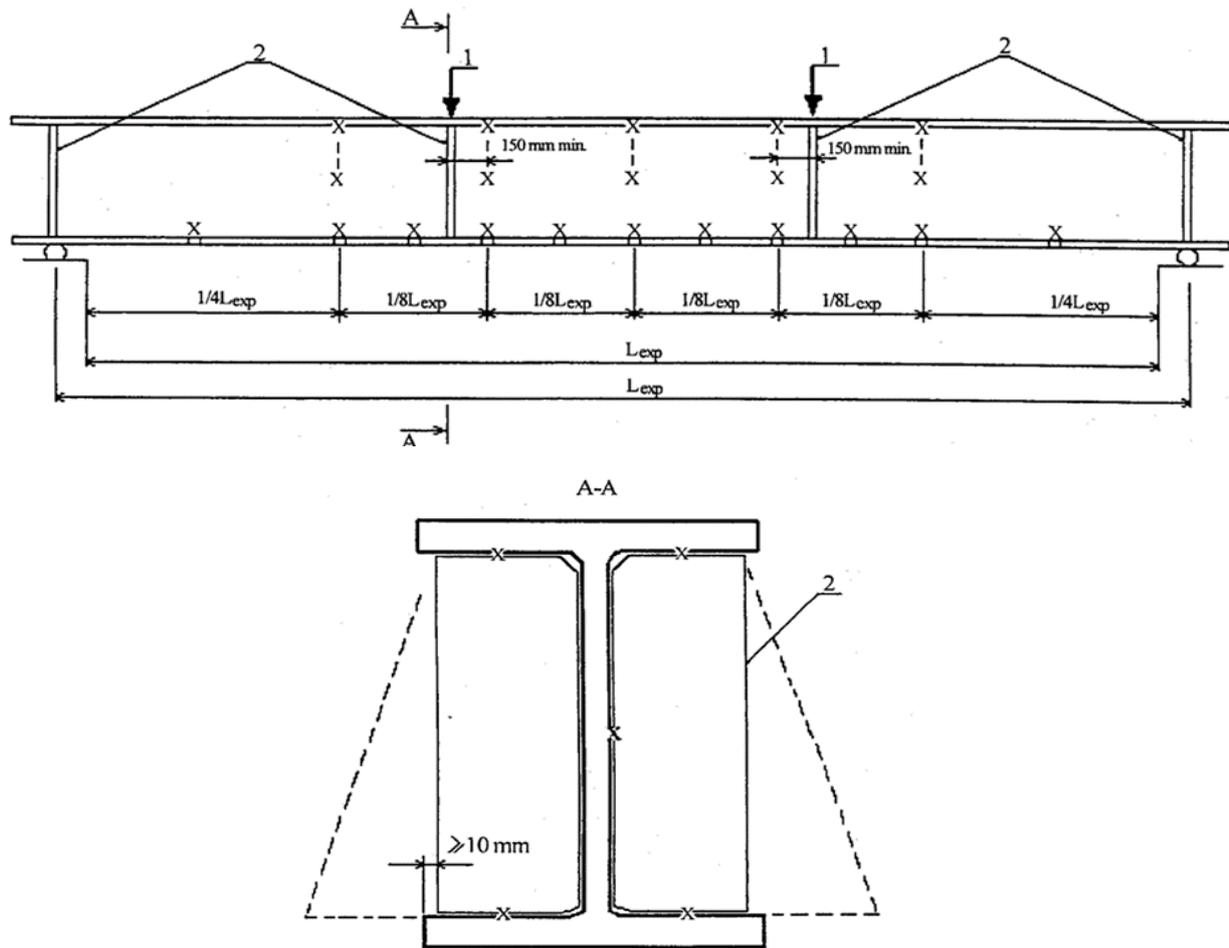


Рис. 1.13 Схема розміщення термопар для зразка навантаженої сталевій балки: 1 – навантаження, 2 – елементи жорсткості, виконані зі сталевих пластин, x – термопара (A-A – поперечний переріз балки з елементами жорсткості)

Початок та процес випробування, періодичність фіксації показників відповідають [7]. Температуру в печі контролюють і реєструють за всіма термопарами з проміжком часу до 1 хвилини.

Граничний стан для сталевих балок із вогнезахисним покриттям чи з облицюванням, що проходять вогневі експериментальні випробування без навантаження, – перевищення початкової

температури несучої металевої конструкції на 480 °С. Температуру визначають за показниками трьох термопар, що встановлені в центрі прогону та за 300 ± 25 мм від нього [8].

Експериментальні досліді припиняють у разі досягнення температури несучої металевої конструкції з навантаженням 750°С [8].

Для визначення достовірності результатів експерименту порівнюють температурні показники термопар, їх вважають достатніми для проведення аналізу випробування, якщо зняті значення з мінімальної допустимої кількості термопар, що зафіксовані на сталюму зразку табл. 1.5. Для аналізу потрібно обов'язково визначати коригувальні коефіцієнти, що залежать від середніх значень температури металу зразків, їхньої навантаженості, адгезивності покриття.

Таблиця 1.5

Мінімальна допустима кількість показників термопар для проведення аналізу випробування

Місце розміщення термопар на балці	Балка без навантаження		Балка під навантаженням	
	Загальна кількість термопар	Мінімальна кількість термопар	Загальна кількість термопар	Мінімальна кількість термопар
На верхній полиці	4	2	10	6
На стінці	4	2	5	3
На нижній полиці	4	2	16	12

Результати вимірювань показників у вигляді середніх значень температури у вогневій печі, температури на поверхні сталюого зразка та деформаційних змін подають у табличному й графічному вигляді.

Характеристики вогнезахисного покриття сталюих балок оцінюють поетапно. Початковою стадією передбачене розв'язання диференційного рівняння або проведення методу числової регресії даних випробувань, для яких необхідна мінімальна кількість точок для інтерполяції [8].

**РОЗДІЛ 2**  
**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ЗНАЧЕНЬ**  
**ЗРАЗКІВ КОЛОН ІЗ ВОГНЕЗАХИСНИМ ОБЛИЦЮВАННЯМ**  
**МІНЕРАЛОВАТНИМИ ПЛИТАМИ**  
**ПІД ЧАС ВИПРОБУВАНЬ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ**

**2.1. Експериментальне обладнання для проведення випробувань.**

Експериментальне вогневе випробування для визначення межі вогнестійкості сталевих стержнів із вогнезахисним облицюванням мінераловатним покриттям проведено відповідно до [6–8, 40–41]. Для експерименту використано вогневу піч, що пройшла атестацію згідно з ГОСТ 24555-81 (атестат № 24-2/1918), та вимірювальне обладнання, представлене в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

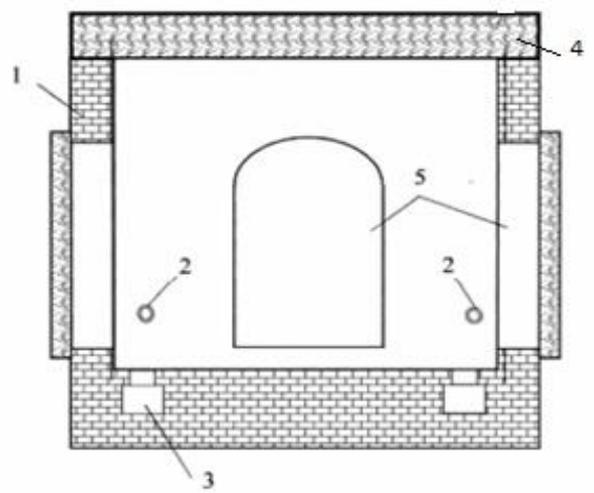
Технічні засоби вимірювання під час проведення випробування

№ з/п	Вимірювальний прилад	К-сть	Застосування та діапазон вимірів	Допустима похибка точність
1.	Термопари ТХА (за ГОСТ 3044-84)	30 од.	Вимірювання температури в печі та на поверхні зразка (температурний діапазон від 0 до 1300 °С)	$\pm 0,0075 \times T_{\text{вим.}} \text{ } ^\circ\text{C}$
2.	Вимірювально-реєструвальний комплекс «TEST-SERT»	1 од.	Від 0 до 1300 °С до 180 хв.	$\pm(0,5+0,0009T) \text{ } ^\circ\text{C}$ $\pm 1 \text{ с}$
3.	Прилад виміру надлишкового тиску в печі ПНЖ-Н	1 од.	До 100 Па	Кл. 1,5
4.	Психрометр аспіраційний МВ-4М	1 од.	Від 10 до 100 % до 50 °С	$\pm 3 \%$ $\pm 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$
5.	Секундомір	1 од.	Від 0 до 60 с Від 0 до 60 хв	$\pm 0,4 \text{ с}$ $\pm 1 \text{ с}$
6.	Лінійка металева	1 од.	До 1000 мм	$\pm 1 \text{ мм}$
7.	Штангенциркуль	1 од.	Від 0 до 250 мм	ціна поділки 0,05 мм

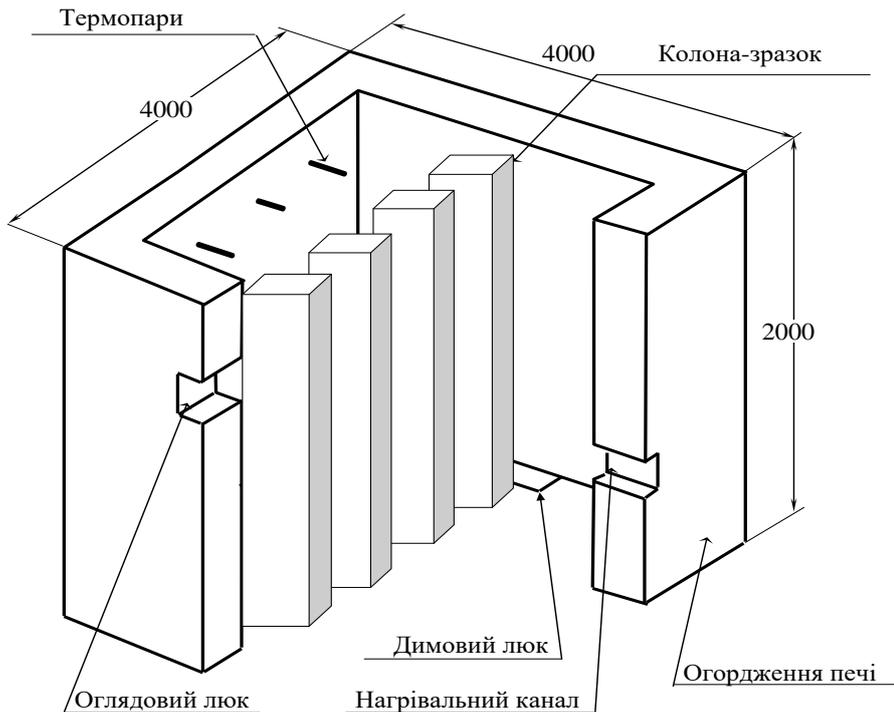
На рис. 2.1, 2.2 зображено фото зовнішнього вигляду та схему установки випробувальної вогневої печі з прикладом установлення

випробувальних зразків і термоелектричних перетворювачів (термопар) для вимірювання температури повітря всередині вогневої камери й навколишнього середовища. За вимогами [7], вогневу піч розташовують у приміщенні, розміри якого забезпечують максимальну зміну температурних показників повітряного простору до 10 °С, порівняно з початковими значеннями. Випробування проводять за температури навколишнього середовища від 5 до 40 °С і показників вологості повітря в межах від 45 до 75 %.

На рис. 2.1 зображено систему підведення пальної суміші, що подається до форсунок пальників та яка через нагрівний канал створює вогневу дію з нагнітанням температури всередині камери печі.



*Рис. 2.1 Загальний вигляд та схема вогневої печі: 1 – корпус печі; 2 – пальники; 3 – канали видалення продуктів згорання; 4 – кришка печі; 5 – люки з дверима*



*Рис. 2.2 Схема установки випробувальної вогневої печі*

Температуру у вогневій камері печі фіксують зварними термопарами з діаметром дроту не більше ніж 1,5 мм типу ТХА з неізованими проводами та покритими захисним кожухом, що відповідають ГОСТ 3044-84 [59]. Високу чутливість термопар забезпечують спаєм, що розміщений на кінці дроту, завдяки якому зміни температури передають на вимірювально-реєструвальний прилад (рис. 2.3).



*Рис. 2.3 Зовнішній вигляд схеми під'єднання термопар до вимірювально-реєструвального приладу*

На відстані не менше ніж 25 мм від вимірювального спаю термопар захисний кожух термопар має бути видалений (знятий), що схематично зображене на рис. 2.4.

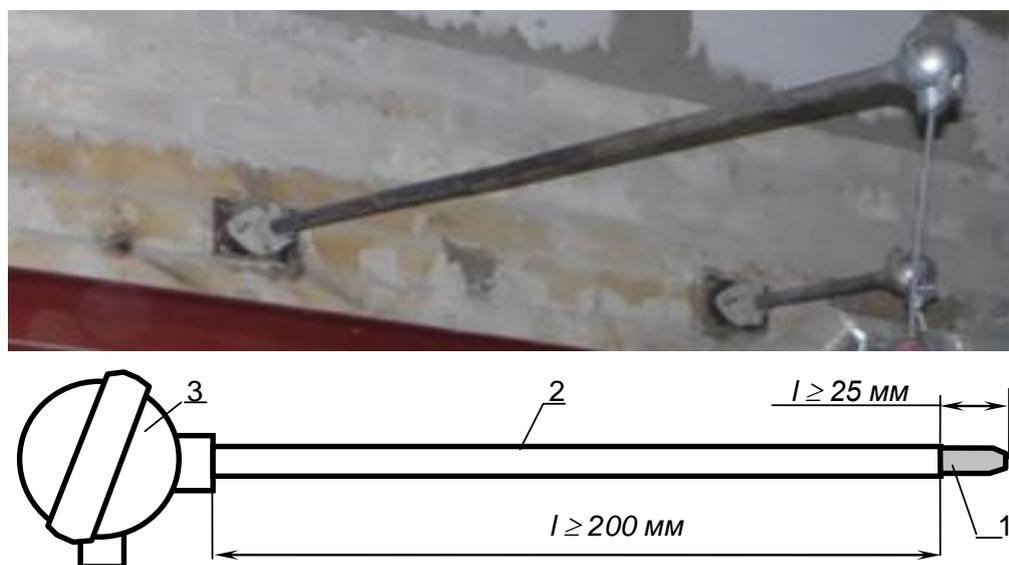


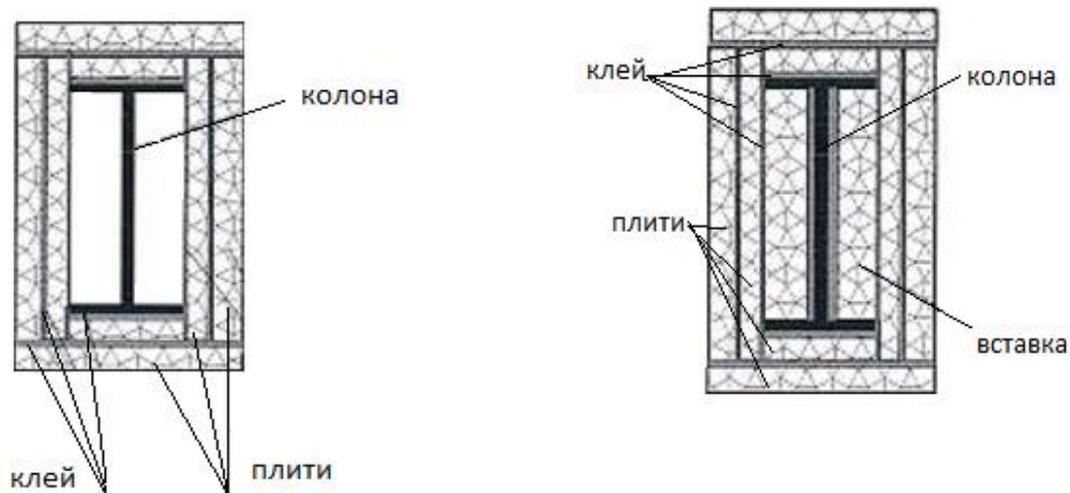
Рис. 2.4. Зовнішній вигляд та схема термопар для вимірювання температури у вогневій камері печі: 1 – вимірювальний спай термопар; 2 – захисний кожух; 3 – теплозахисна оболонка.

Встановлюємо 6 термопар через кожні 0,5 м довжини зразка ( $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{4}$ ), щоб вимірювальний спай термопар перебував на відстані від 90 до 110 мм від поверхні зразка та не менше ніж 200 мм – до стінок печі [7].

Температуру навколишнього середовища визначають за показниками термопар, вимірювальний спай яких розташований на відстані від 0,5 до 1,5 м від стінок печі (див. рис. 2.1).

## 2.2. Методика виготовлення та формування зразків

Відповідно до [40–41], для проведення випробувань сталевих стержнів із вогнезахисним покриттям передбачене виконання двох однакових зразків сталевих стержнів із вогнезахисним покриттям однієї товщини висотою не менше як 1000 мм. З огляду на вимоги [6–8, 40–41], для проведення випробувань виготовлено 4 пари зразків сталевих колон із двотаврового перерізу профілю № 20 за ГОСТ 8239-89 [60], зі зведеної товщини металу 3,4 мм, шириною полиці 100 мм та відстанню між зовнішніми поверхнями полиць 200 мм, висотою 2000 мм.



а – переріз зразків № 1, 2, 5, 6

б – переріз зразків № 3, 4, 7, 8

Рис. 2.5 Схема перерізу зразків відповідно до схеми вогнезахисту

Вогнезахисне облицювання виконане з мінераловатних плит, виготовлених за ТУ У В.2.7-26.8-35492904-004:2010 [61] із кам'яної вати на основі гірських порід базальтової групи. Облицювання представлено у двох виглядах: із вставками в простір між полицями двотавра (№ 3, 4, 7, 8) та без вставок (№ 1, 2, 5, 6) (рис. 2.5), із різними товщинами мінераловатних плит, що зазначено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Параметри й товщини облицювання на зразках

Профіль	Вид	Зведена товщина $\delta$ , мм	Зведена товщина коробчаста $\delta_k$ , мм	Коефіцієнт перерізу коробчастий $A_{mk}/V$ , м <sup>-1</sup>	Густина мінвати, кг/м <sup>3</sup>	Товщина облицювання $d$ , мм	Товщина мінвати (ном.) $d_b$ , мм	№ зразка
№ 20	Колона, 2 м	3,4	4,5	222,2	154	24	20	6
№ 20	Колона, 2 м	3,4	4,5	222,2	154	25	20	5
№ 20	Колона, 2 м	3,4	4,5	222,2	154	35	30	2
№ 20	Колона, 2 м	3,4	4,5	222,2	154	36	30	1
№ 20	Колона, 2 м	3,4	4,5	222,2	154	52	30+15	8
№ 20	Колона, 2 м	3,4	4,5	222,2	154	55	30+15	7
№ 20	Колона, 2 м	3,4	4,5	222,2	154	73	30+30	4
№ 20	Колона, 2 м	3,4	4,5	222,2	154	75	30+30	3

Зразки для випробування виготовлені поетапно [40–41]. Спочатку були зняті розміри та відповідно до них підготовлений (нарізаний) теплоізоляційний матеріал (рис. 2.6 а).

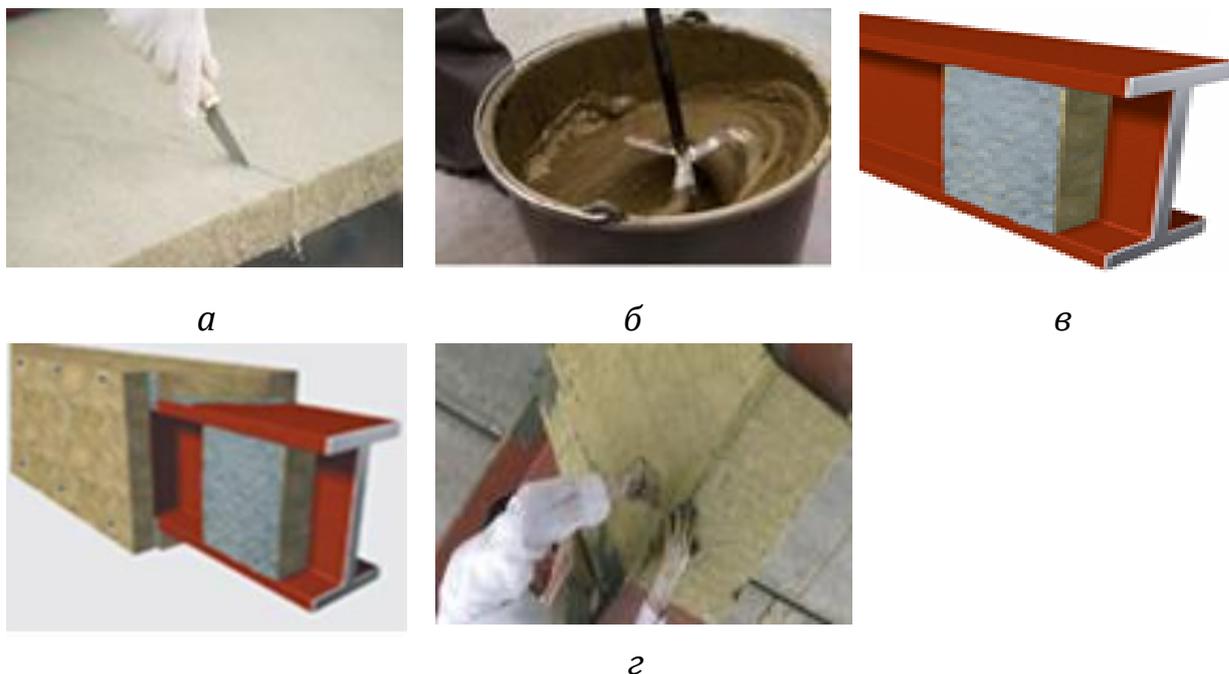


Рис. 2.6 Етапи виготовлення експериментальних зразків: а – розрізання теплоізоляційних плит за розмірами й товщиною; б – приготування клеєвої суміші «Ceresit CM-17»; в – закріплення мінераловатних вставок клеєвою сумішшю; г – закріплення мінераловатного облицювання клеєвою сумішшю.

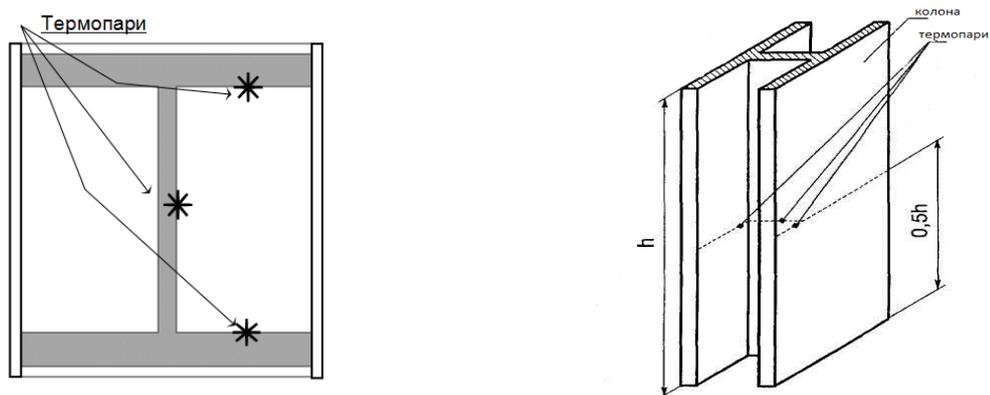


Рис. 2.7 Схема розміщення термопар на зразках сталевій колони з коробчастим перерізом

У ході виготовлення зразків відразу були розміщені й закріплені термопари на зразках сталевих конструкцій по центру стінок і на внутрішній поверхні полиць двотаврів, що зображено на рис. 2.7 та відповідає [7, 40–41]. Для ненавантажених зразків розміщення термопар передбачено  $\frac{1}{2}$  висоти.

Наступний етап після розміщення термопар – закріплення мінераловатного облицювання до стінок колони та між плитами, що реалізоване за допомогою клею «Ceresit» CM-17, нанесеного за допомогою шпателя шаром у 3-5 мм (рис. 2.6 б, в, г). Для надійності кріплення й фіксації плит між собою протягом застигання клеєвої суміші, на стиках використано будівельні цвяхи 3 x 75; 5,5 x 150; 6 x 200 мм із кроком скріплювання 400–500 мм (рис. 2.6 г), що демонтуються після застигання.

Для визначення нормованих значень межі (класу) вогнестійкості в межах діапазону випробуваних товщин облицювання допустиме відхилення значень до  $\pm 5\%$ . Різниця товщин облицювання зразків у таблиці 2.2 виникла внаслідок невеликих неточностей під час виготовлення (розрізання теплоізоляційних плит і товщини шару клеєвої суміші), це допустимо, оскільки не перевищує 5 %.

Відповідно до [7, 40–41], верхній торець зразка повинен бути захищеним від нагрівання. У ході виготовлення зразка встановлено теплоізоляційне ущільнення з мінераловати завтовшки 60 мм та густиною 156 кг/м<sup>3</sup>.

## 2.3. Методика проведення вогневого випробування

**2.3.1. Методика підготовки до початку випробування.** Готові до випробування зразки з облаштуванням теплоізоляцією верхньої частини стержнів встановлено до камери вогневої печі. Зразки закріплено через фіксацію нижнього краю колони за допомогою металевих кутників, що зображено на рис. 2.8.



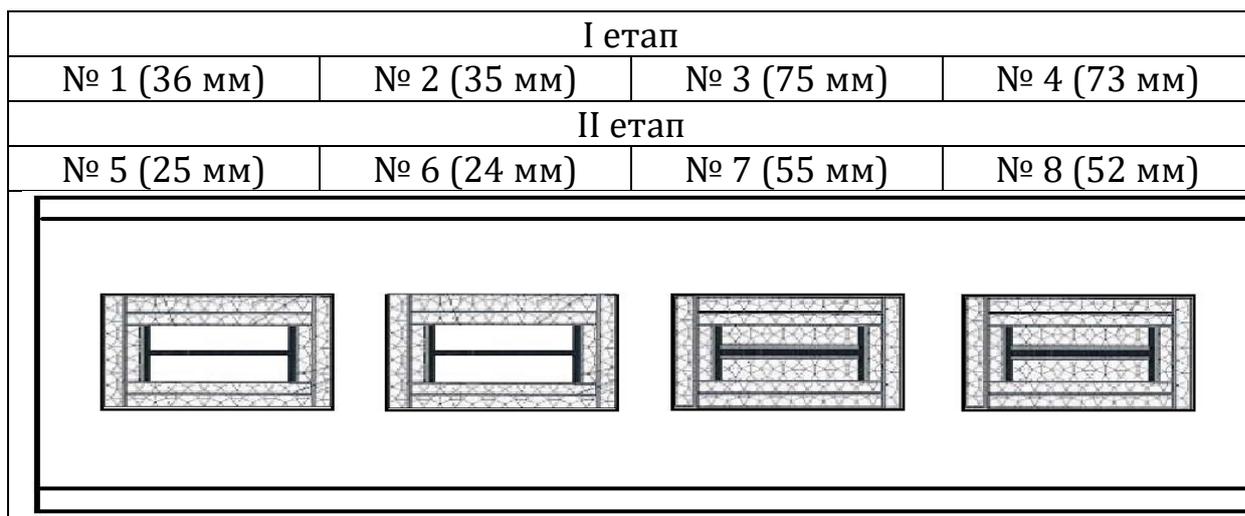
№ 1 – № 4

№ 5 – № 8

*Рис. 2.8 Вигляд зразків до початку випробувань*

Відповідно до [40–41], випробування металевих стержнів із вогнезахисним облицювання можна проводити без навантаження на двох однакових зразках заввишки не менше 1 м.

Згідно з [40–41], мінімальна відстань від зразка до стінок печі та між зразками повинна становити не менше як 200 мм. Розміри печі створюють умови для випробування 8 зразків стержнів у два етапи з одночасним установленням по 4 зразки в камеру печі. Протягом першого етапу досліджено зразки № 1 – № 4, упродовж другого – № 5 – № 8. Зразки встановлені за схемою, зображеною на рис. 2.9.



*Рис. 2.9 Схема встановлення зразків стержнів за способом нанесення вогнезахисного облицювання (зразки № 1, 2, 5, 6 – без вставок; зразки № 3, 4, 7, 8 – зі вставками)*

Після розміщення випробувальних зразків і налаштування вимірювальних приладів (термопар) в установці вогневої печі проходить закриття та ізоляція всіх отворів (оглядових люків і люків із дверима). За 5 хвилин до початку визначають вихідні показники температури на всіх термопарах у вогневій камері та навколишнього середовища в приміщенні, де працює випробувальна піч. Відлік початку випробування розпочинається з моменту ввімкнення пальників у вогневій печі.

### **2.3.2. Методика проведення випробування.**

Під час випробувань у печі створено стандартний температурний режим. З інтервалом в 1 хвилину впродовж усього періоду випробування проведено вимірювання температури в камері печі та на поверхні сталевих зразків, організовано спостереження за поведінкою (зміщенням) конструкції зразків. Значення надлишкового

тиску виміряно на відстані 100 мм від нижньої поверхні стелі печі. На 5 хвилині випробувань зафіксовано 8 Па, із 10 хвилини й до закінчення випробування – 12 Па.

На початку випробування встановлено температуру навколишнього середовища та відносну вологість повітря. Для перших чотирьох зразків значення температури повітря дорівнювало 27 °С із вологістю 48 %, а для зразків № 5 – № 8 – 23 °С і вологістю 56 %.

Відповідно до [40–41], для зразків металевих конструкцій із вогнезахисними покриттями, що випробовують без навантаження, граничним станом за ознакою втрати несучої здатності є перевищення середньої температури зразка сталеві конструкції над його початковою температурою на 480 °С або досягнення граничного значення поздовжнього зміщення – деформації.

Сутність методу проведення випробування полягає у визначенні межі (класу) вогнестійкості металеві конструкції, а саме проміжку часу від початку випробування до настання граничного стану [3, 7].

За результатами випробувань визначають межу вогнестійкості конструкції згідно з формулою:

$$t_{fr} = t_{mes} - \Delta t, \quad (2.1)$$

де  $t_{fr}$  – межа вогнестійкості конструкції, хв.;

$t_{mes}$  – найменше значення часу від початку випробування до досягнення граничного стану з вогнестійкості, що зафіксоване за результатами випробувань однакових зразків, хв.;

$\Delta t$  – похибка випробування, хв.

За [7], значення похибки  $\Delta t$  визначають за формулою:

$$\Delta t = 0,015t_{mes} + 3 \quad (2.2)$$

Однак за умов [3] значення похибки визначають для інтервалу часу від 0 до  $t_{mes}$ . Інтегральне значення  $A_f$  середньої температури  $T_f$  у печі під час випробування визначають за такою формулою:

$$A_f = \sum_{i=1}^n 0,5 (T_{fi} + T_{fi-1}) (t_i - t_{i-1}), \quad (2.3)$$

де  $T_{fi}$  – значення середньої температури в печі, що відповідає часу  $t_i$ , °С;

$t_i$  – час  $i$ -го циклу вимірювання середньої температури;

$i$  – номер циклу вимірювання середньої температури (дорівнює часу  $t_i$ , якщо вимірювання проводять через 1 хв.);

$n$  – номер циклу вимірювання, для якого  $t_i = t_{mes}$ .

Аналогічно для інтервалу часу від 0 до  $t_{mes}$  визначають інтегральне значення  $A_s$  стандартної температури  $T_s$  за формулою:

$$A_f = \sum_{i=1}^n 0,5 (T_{si} + T_{si-1}) (t_i - t_{i-1}), \quad (2.4)$$

де  $T_{si}$  – значення стандартної температури, що відповідає часу  $t_i$ , °C.

Формулу для розрахунку значень температури  $T_s$  залежно від часу наведено в [6].

Якщо  $A_f \geq A_s$ , то  $t=0$ .

Якщо  $A_f < A_s$ , то похибку  $\Delta t$  визначають за формулою:

$$\Delta t = (0,015 t_{mes} + 3) (A_s - A_f) / (A_s - A_{min}), \quad (2.5)$$

де  $A_{min}$  – інтегральне значення мінімально допустимої температури  $T_{min}$  для інтервалу часу від 0 до  $t_{mes}$ , °C · хв.

Значення  $A_{min}$  визначають за формулою, аналогічною до формул (2.3) і (2.4):

$$A_f = \sum_{i=1}^n 0,5 (T_{min i} + T_{min i-1}) (t_i - t_{i-1}), \quad (2.6)$$

де  $T_{min i}$  – значення мінімально допустимої температури  $T_{min}$ , що відповідає часу  $t_i$ , °C.

Температуру  $T_{min}$  визначають за формулою:

$$T_{min} = T (1 - |0,01d|), \quad (2.7),$$

де  $d$  – допустиме відхилення середньої температури в печі від температури  $T_s$ , %.

Настання граничного стану описано у [7], для зразків вертикальних сталевих конструкцій це визначають за формулами (2.8) та (2.9):

$$C = \frac{h}{100}, \quad (2.8)$$

де  $C$  – граничне значення поздовжнього зміщення зразка вертикальної конструкції, мм;

$h$  – початкова висота зразка, мм.

Значення швидкості наростання вертикальної деформації зразка визначають за виразом:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{3h}{1000}, \quad (2.9)$$

Для оцінювання результатів дослідів вогнестійкості сталевих конструкцій із вогнезахисним облицюванням, відповідно до [7], можуть застосовувати кілька методів, в основі яких – розв’язання диференційного рівняння теплопровідності зі сталими або зі змінними значення коефіцієнта теплопровідності. Вихідний вираз диференційного рівняння теплопровідності полягає у визначенні приросту температури за проміжок часу та представлений так:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p}{V d_p c_a \rho_a} \cdot \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1 + \phi/3)} \cdot \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \cdot \Delta\theta_{g,t} \quad (2.10)$$

( $\Delta\theta_{a,t} \geq 0$  при  $\Delta\theta_{g,t} > 0$ ),

де  $\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} \cdot d_p A_p / V$ ,

$A_p / V$  – коефіцієнт перерізу для сталевих конструкцій, ізольованих вогнезахисним матеріалом;

$c_a$  – питома теплоємність сталі, що залежить від температури (Дж/(кг·°C));

$c_p$  – питома теплоємність матеріалу, що не залежить від температури (Дж/(кг·K));

$d_p$  – товщина вогнезахисного матеріалу (м);

$\Delta t \leq 30$  – інтервал (проміжок) часу (с), для обчислення за значення  $\Delta t$  більше як 30 с приймають значення рівне 30 с;

$\theta_{a,t}$  – температура сталі в момент часу  $t$  (°C);

$\theta_{g,t}$  – температура навколишнього газу в момент часу  $t$  (°C);

$\Delta\theta_{g,t}$  – збільшення температури навколишнього газу за проміжок часу  $\Delta t$  (°C);

$\lambda_p = 0,2$  – коефіцієнт теплопровідності вогнезахисної системи (Вт/(м·°C));

$\rho_a = 7850$  – густина сталі (кг/м<sup>3</sup>);

$\rho_p = 1355$  – густина вогнезахисного матеріалу (кг/м<sup>3</sup>).

$$\Delta t = 0,8 \cdot \frac{c_a \rho_a}{\lambda_{p,t} / d_p} \cdot \frac{V}{A_p} \cdot (1 + \phi/3) \quad (2.11)$$

Виконуючи розрахунки за результатами вимірювання температури ненавантажених зразків сталевих стержнів, для врахування розбіжностей розподілу температури застосовують коригувальні коефіцієнти.

Для оцінювання характеристики вогнезахисної здатності покриття завжди використовують середнє значення температури сталевого елемента зразка колони для всіх часових інтервалів, що визначають за показниками термопар.

Розбіжності температурних даних через різницю товщин вогнезахисного покриття коригують відповідно до виразу:

$$k_d(\theta) = \left[ \frac{k_{max}(\theta) - k_{min}(\theta)}{(d_{max} - d_{min})} \right] (d - d_{min}) + k_{min}(\theta), \quad (2.12)$$

де  $k_d(\theta)$  – коригувальний коефіцієнт для ненавантаженої колони.

Середні значення температури кожної короткої колони коригують за:

$$\theta_{m(SC)} = k_d(\theta) \cdot \theta_{SC}, \quad (2.13)$$

де  $\theta_{m(SC)}$  – відкоригована температура короткої сталевієї ненавантаженої колони;

$\theta_{SC}$  – середні значення температури для зразків коротких колон;

$\theta_{LC}$  – характеристична температура сталі.

У методі з  $\lambda_p$  – змінна, яку першочергово розраховують для кожного зразка ефективної теплопровідності покриття, що має вигляд функції часу  $\lambda_{p,t}$  (t) за виразом:

$$\lambda_{p,t}(t) = \left[ d_p \cdot \frac{V}{A} \cdot c_a p_a \cdot \left( 1 + \frac{\phi}{3} \right) \cdot \frac{1}{(\theta_t - \theta_{a,t}) \Delta t} \right] \left[ \Delta \theta_{a,t} + \left( e^{\frac{\phi}{10}} - 1 \right) \Delta \theta_t \right] \quad (2.14)$$

Визначають середню температуру вогнезахисного покриття  $\theta_p$  для кожної колони й для кожного інтервалу часу за формулою (принципом):

$$\theta_p = \frac{(\theta_1 + \theta_2)}{2} \quad (2.15)$$

Для подальшого розв'язання застосовують приведення  $\lambda_p$  від t на  $\lambda_p$  від  $\theta_p$ .

Для розрахунків також проводять обчислення середніх арифметичних значень  $\lambda_p$  для кожної колони ( $\lambda_{pm}$ ) (у діапазоні  $\theta_p$  від 0 до 1000 °С) та для всіх коротких стержнів ( $\lambda_{ave}$ ) (у діапазоні  $\theta_p$  від 250 до 1000 °С). Максимальний крок температур – 50 °С.

Визначаючи температурний розподіл по товщині вогнезахисного покриття, проводять розрахунок функції втрати вологи покриття в його товщині, що реалізують за проміжками часу (як згладжена крива залежність тривалості ділянки зменшення вологості від товщини вогнезахисного покриття) згідно з формулою:

$$D_p = C \cdot d_p^3 \quad (2.16)$$

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n d_p^3 D_p}{\sum_{i=1}^n d_p^6}, \quad (2.17)$$

де  $n$  – кількість зразків;

$D_p$  – тривалість ділянки зменшення вологості у хвилинах для кожної короткої сталеві колони, обчислена з інтервалом 1 хв.;

$d_p$  – товщина вогнезахисного матеріалу на кожній короткій колоні, мм.

Для визначення тривалості ділянки зменшення вологості проводять:

- обчислення  $\theta_a$  за (2.10) до значень  $\theta_a = 100$  °С, отримане для часу  $t_1$ ;
- обчислення  $D_p$  як функції товщини вогнезахисного покриття  $d_p$ ;
- обчислення  $\theta_a$  за (2.10) для проміжку часу суми  $(t_1 + D_p)$ .

У подальшому проводять розрахунок максимального часу  $t_{max}$ , необхідного для досягнення проектної температури металу від 350 °С до максимальної температури сталі  $\theta_{max}$  з інтервалом у 50 °С.

Якщо виконуються усі критерії прийнятності:

- для кожної колони розрахункове значення часу досягнення проектної температури (температури, відкоригованої за розбіжностями за товщиною покриття) не повинно перевищувати 30 % значення часу досягнення проектної температури в ході випробувань;
- середнє значення величини розбіжностей (%) у часі досягнення проектної температури для кожної короткої колони повинно бути меншим від нуля;
- максимальний відсоток індивідуальних значень усіх розбіжностей не повинен перевищувати 20 %, але не бути меншим чи

дорівнювати нулю [7].

Якщо хоча б один із критеріїв не задоволений, проводять подальше обчислення й коригування.

Остаточними діями за методами є побудова таблиць і кривих (рис. 2.11).

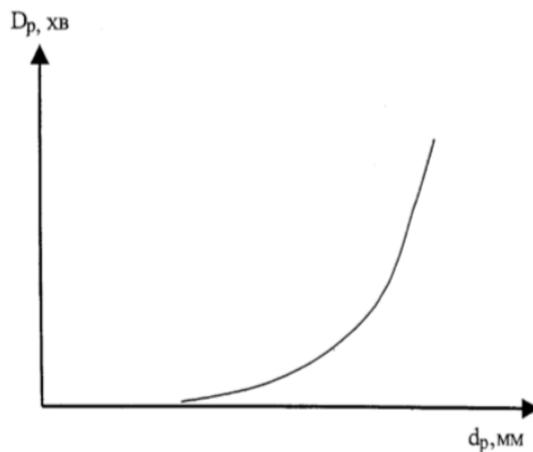
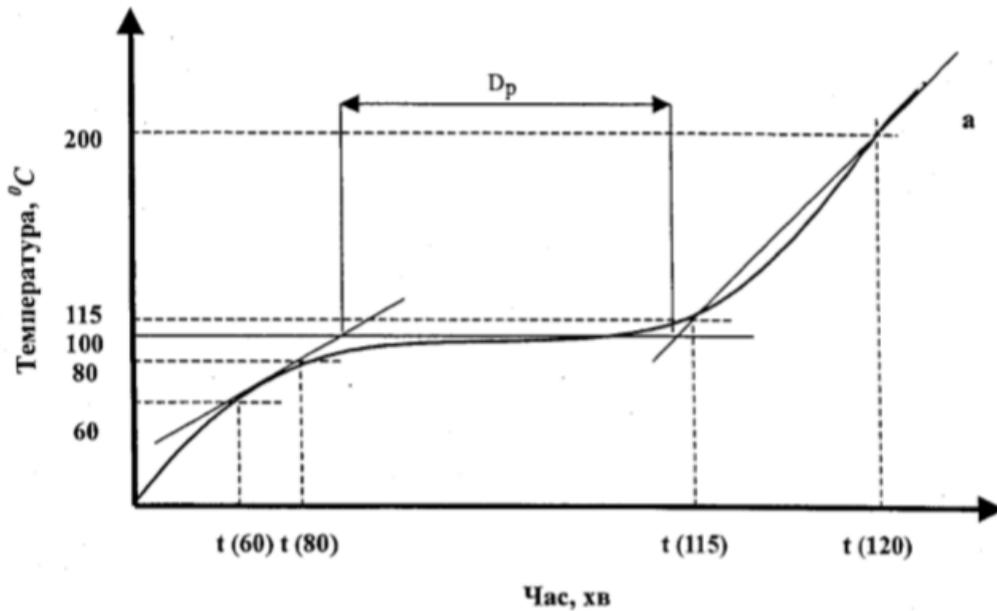


Рис. 2.10. Криві тривалості ізотермічної ділянки, на якій зменшується вологість покриття: а – оцінювання тривалості ізотермічної ділянки, де зменшується вологість покриття під час випробування; б – залежність тривалості ізотермічної ділянки, на якій зменшується вологість покриття від його товщини.

Застосовуючи метод оцінювання вогнезахисної здатності покриття, що засноване на розв'язанні диференційного рівняння теплопровідності (2.10) із  $\lambda_p$  – стала, розрахунок розпочинають із

перевірки критеріїв прийнятності та модифікації початкової теплоємності, що пов'язане з використанням середніх значень показників температури й потребує коригування в ході розподілу температури по товщині вогнезахисного покриття.

Цей метод спрямований на визначення ефективної теплопровідності  $\lambda_p(\theta_d; d_p)$ , щоб час, за який розрахована температура сталі  $\theta_{a,t}$  досягає проектного значення  $\theta_d$ , став відповідати вимірюваному часу досягнення цієї температури для кожної короткої сталеві колони та для проектних температур сталі  $\theta_d$  (від 350 °С до максимальних для проведення аналізу з інтервалом 50 °С).

Для всіх використаних значень  $\lambda_p(\theta_d; d_p)$ , керуються усередненими значеннями, відповідно до комбінацій за проектною температурою сталі та товщиною вогнезахисного покриття.

Підбіркові значення теплопровідності за температурою сталі й товщиною покриття  $\lambda_p(\theta_d; d_p)$  визначають за методом найменших квадратів, що розраховують за 2.18 та використовують у ході розв'язання диференційного рівняння теплопровідності (2.10).

$$\lambda = C_0 + (C_1 \cdot \theta_d) + (C_2 \cdot d_p) \quad (2.18)$$

За розрахунками перевіряють критерії прийнятності, які є тими самими, що й для методу зі змінною [7].

Для вогнезахисних систем із повітряним прошарком менше від 5 мм для оцінювання захисної спроможності ефективним застосовувати метод числової регресії. За результатами випробувань сталевих зразків із різною товщиною вогнезахисного покриття визначають константи, що в подальшому допоможуть з'ясувати час прогрівання конструкції до настання граничного стану для конструкцій із такими самими параметрами (перерізом, марки сталі), у ході виконання різного діапазону товщин вогнезахисного облицювання. Цей метод заснований на визначенні температурного розподілу у двотавровому перерізі з вогнезахисним шаром під час застосування методу кінцевих різниць.

Для роботи за вихідні дані приймають товщини вогнезахисного покриття на зразках стержнів і температурні дані; скориговані за 2.12, 2.13 –  $\theta_{m(SC)}$  підлягають розрахунку за багаточленним лінійним рівнянням числової регресії:

$$t = a_0 + a_1 d_p + a_2 \frac{d_p}{A_{iIV}} + a_3 \theta_{SC} + a_4 d_p \theta_{SC} + a_5 d_p \frac{\theta_{SC}}{A_{iIV}} + a_6 \frac{\theta_{SC}}{A_{iIV}} + a_7 \frac{1}{A_{iIV}}, \quad (2.19)$$

де  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$  – константи, що визначають через розв'язання рівняння регресії, використовуючи дані випробувань для температур від 350 °С до максимальної з інтервалом у 50 °С.

Отримані дані перевіряють відповідно до критеріїв прийнятності. Результати є характеристикою вогнезахисної здатності застосованого покриття (облицювання).

### РОЗДІЛ 3

## РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ФРАГМЕНТІВ СТАЛЕВИХ СТЕРЖНІВ ІЗ ВОГНЕЗАХИСНИМ ОБЛИЦЮВАННЯМ

### 3.1. Результати вогневих випробувань фрагментів сталевих стержнів із вогнезахисним облицюванням

За описаними в розділі 2 методиками експериментальних досліджень проведено вогневі випробування зразків фрагментів сталевих стержнів зі стандартного двотаврового профілю, що завершені за умови перевищення початкової температури металевої конструкції на 480 °С, тобто досягнення значення, усередненого за показниками термопар у зразках, величини 500 °С. Це значення середнє, за якого частою стає втрата несучої здатності в несучих сталевих конструкціях. Конструктивні характеристики зразків та час досягнення критичної температури подано в табл. 3.1.

Таблиця 3.1  
Показники часу щодо втрати несучої здатності випробовуваних зразків

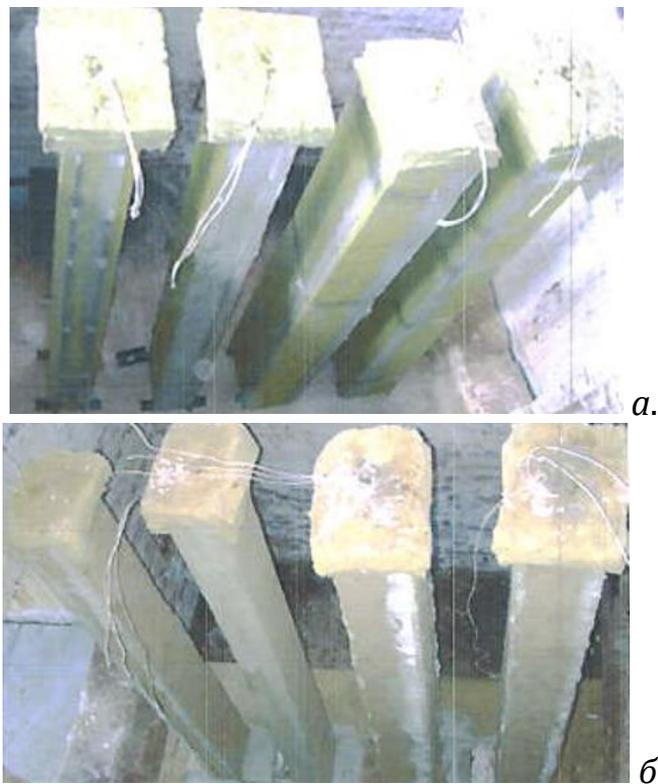
І тип зразків		ІІ тип зразків	
№ зразка (товщина облицювання, мм)	Час втрати несучої здатності, хв.	№ зразка (товщина облицювання, мм)	Час втрати несучої здатності, хв.
№ 1 (36 мм)	89	№ 5 (25 мм)	68
№ 2 (35 мм)	86	№ 6 (24 мм)	63
№ 3 (75 мм)	192	№ 7 (55 мм)	147
№ 4 (73 мм)	185	№ 8 (52 мм)	138

Для визначення впливу температури на щільність з'єднання плит вогнезахисного облицювання був проведений візуальний огляд поверхні зразків після випробувань. Вигляд зразків після завершення випробування зображено на рис. 3.1 та 3.2.





*Рис. 3.1 Вигляд зразків № 1 – № 4: а – до початку випробувань; б – після випробувань*



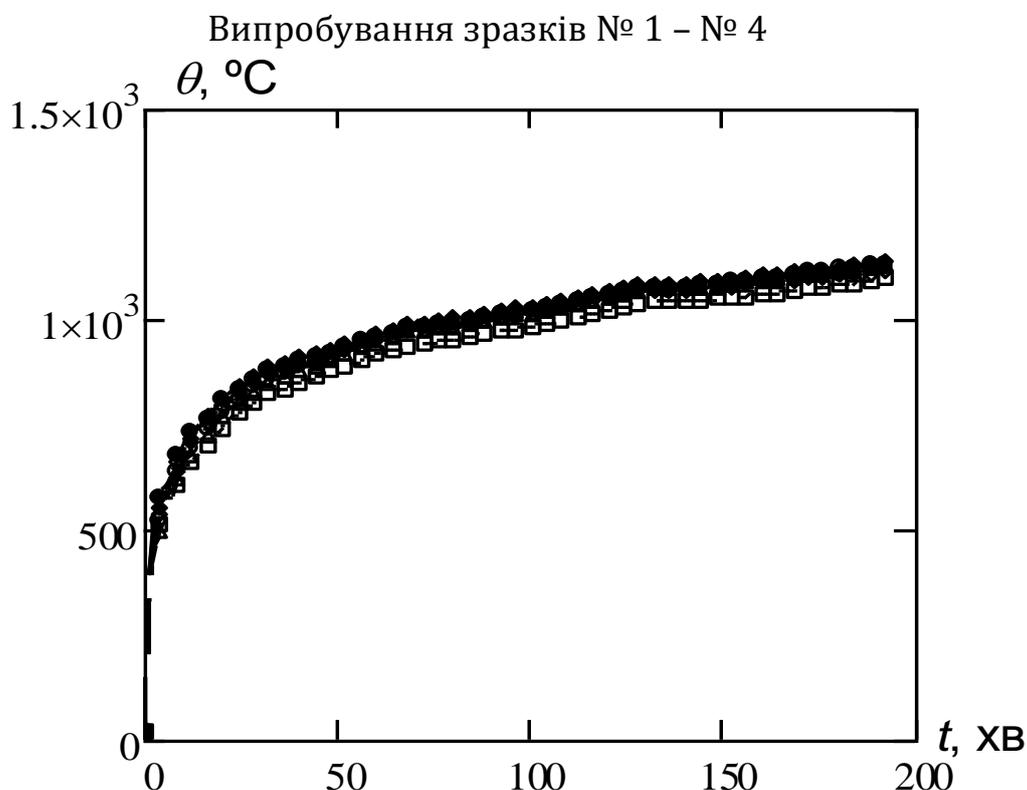
*Рис. 3.2 Вигляд зразків № 5 – № 8: а – до початку випробувань; б – після випробувань*

Згідно з результатами візуального огляду, на стиках теплоізоляційних плит, з'єднаних клеєвою сумішшю, унаслідок дії високої температури відбулася дегідратація клеєвої суміші й з'явилися тріщини. Під час перебігу пожежі висока температура негативно впливає на цілісність вогнезахисного облицювання, це може призвести до передчасного настання граничного стану втрати несучої здатності. Контроль за ознакою зберігання цілісності вогнезахисної системи є важливим для гарантування нормальної роботи

вогнезахисної системи під час забезпечення певного класу вогнестійкості, на який вона розрахована. Загалом, у процесі обстеження зовнішнього вигляду випробовуваних зразків помітних руйнувань вогнезахисного облицювання не зафіксовано, що підтверджує високу вогнезахисну здатність облицювання (див. табл. 3.1).

Відповідно до часу досягнення критичної температури у випробовуваних зразках (табл. 3.1), який визначений з урахуванням похибки за методикою, описаною в розділі 2 та рекомендаціях [3, 10], критична температура 500 °C найшвидше була досягнута на 63 хвилині в зразку з найтоншим вогнезахисним облицюванням 36 мм і найпізніше в зразку з найтовщим вогнезахисним облицюванням 73 мм на 192 хв. Такий стан доводить високу вогнезахисну здатність вогнезахисного облицювання, оскільки за цієї товщини облицювання можна досягти найвищого класу вогнестійкості R 180.

За результатами вимірювань температури в печі побудовано графіки середніх показників, що були розраховані за даними 6 термопар для кожного з двох заходів, це представлено на рис. 3.3. Усі значення відповідають значенням з урахуванням мінімальних і максимальних відхилень, оскільки функції перебувають у зоні між  $T_{ст\ min}$  та  $T_{ст\ max}$ . На рис. 3.4 на графіках подано середні значення для всіх термопар у просторі печі, а також похибки, що визначені для двох експериментальних ситуацій.



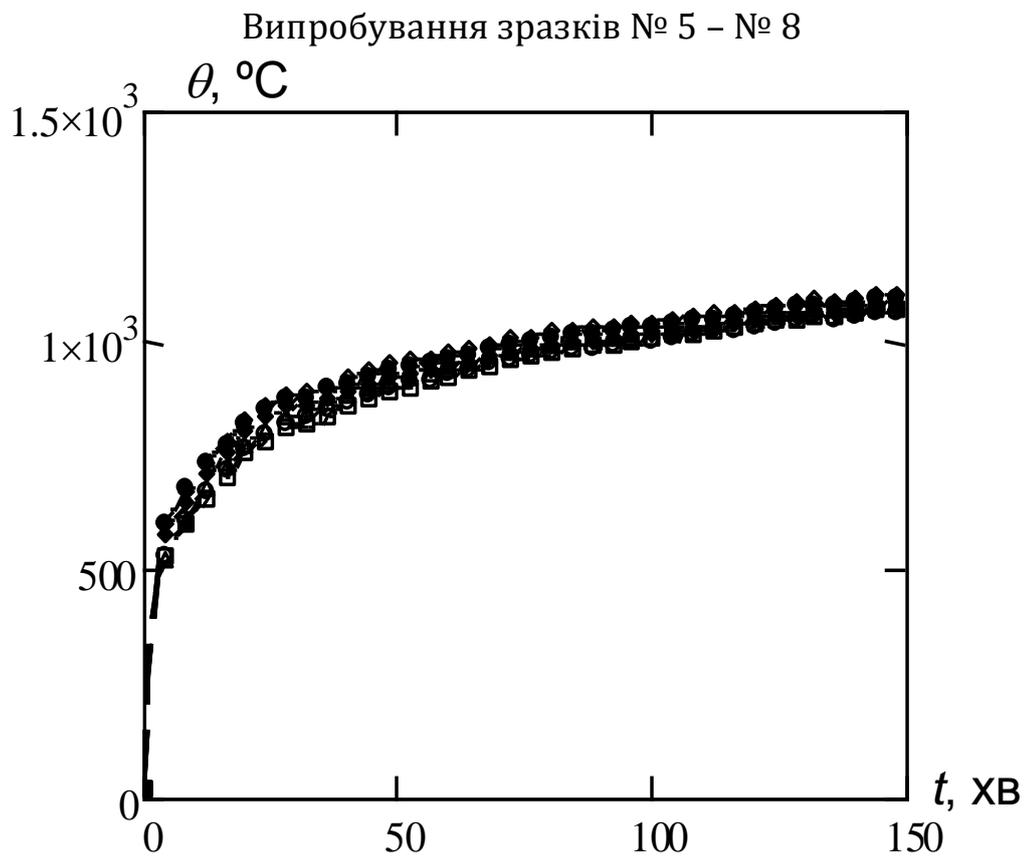
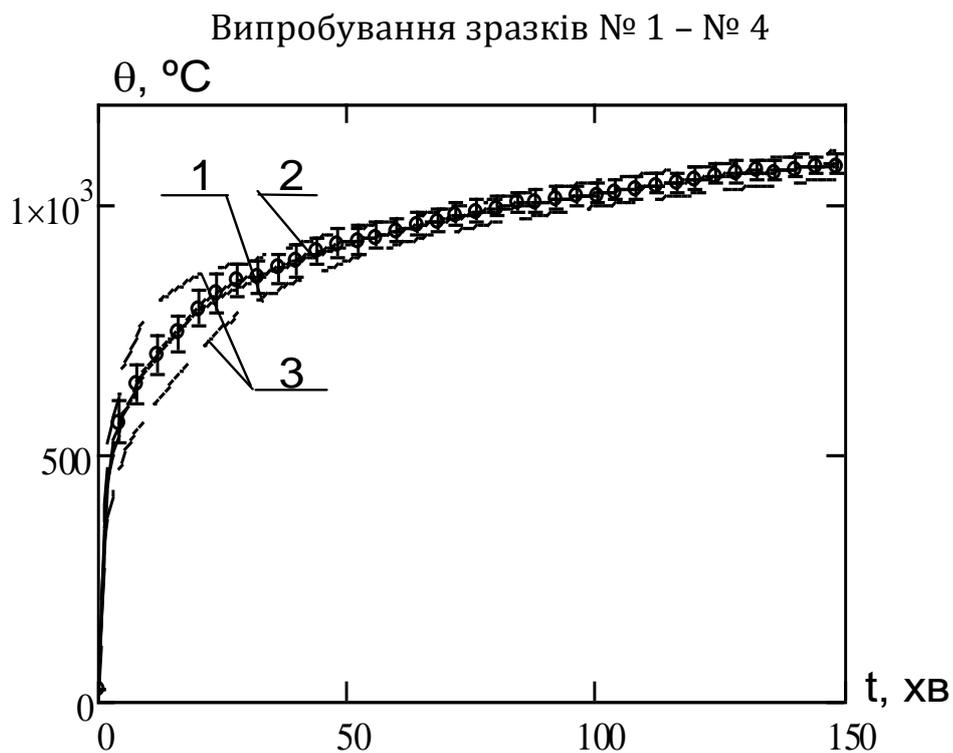


Рис. 3.3 Показники термопар у камері печі під час випробування зразків фрагментів сталевих стержнів:  
 □□□ – показники 1 термопар; ○○○ – показники 2 термопар;  
 △△△ – показники 3 термопар; ◇◇◇ – показники 4 термопар;  
 ◆◆◆ – показники 5 термопар; ●●● – показники 6 термопар.



### Випробування зразків № 5 – № 8

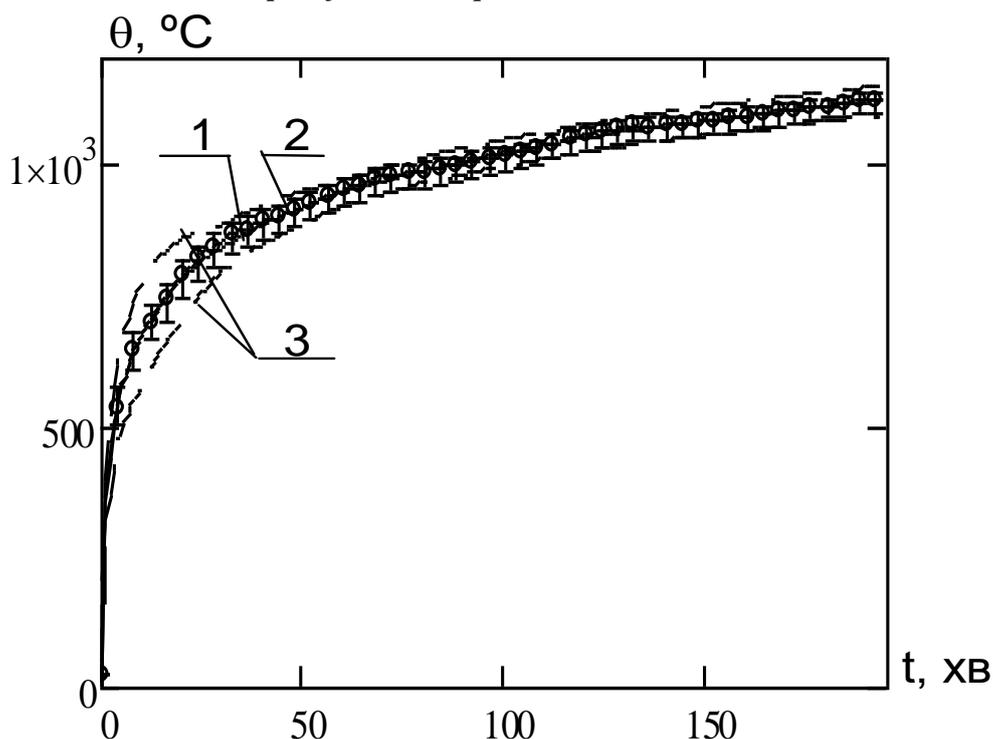


Рис. 3.4 Температурний режим випробувань у печі: 1 – середня температура в печі; 2 – стандартна температурна крива; 3 – допустимі відхилення температурного режиму.

Аналізуючи графіки, представлені на рис. 3.3 і рис. 3.4, зазначимо, що в камері печі температурний режим відповідає стандартному температурному режиму пожежі, оскільки відхилення не має суттєвих відхилень та викидів.

На рис. 3.5 подано графіки показників середньої температури для кожного зразка за показниками з трьох термопар, встановлених на металевій поверхні, залежно від часу проведення випробувань. На цих графіках також зображено відхилення показників виміряної температури від математично очікуваного значення, тобто середньої за показниками трьох термопар температури.

Аналіз графіків на рис. 3.5 дає підстави стверджувати, що вимірювання проведені коректно, оскільки відхилення показників та викиди результатів вимірювання є несуттєвими.

Для попереднього аналізу закономірності залежності часу настання граничного стану втрати несучої здатності сталевими конструкціями побудовано криву часу досягнення критичної температури 500 °C, залежно від товщини вогнезахисного облицювання. Для цього використано дані, систематизовані в табл. 3.2.

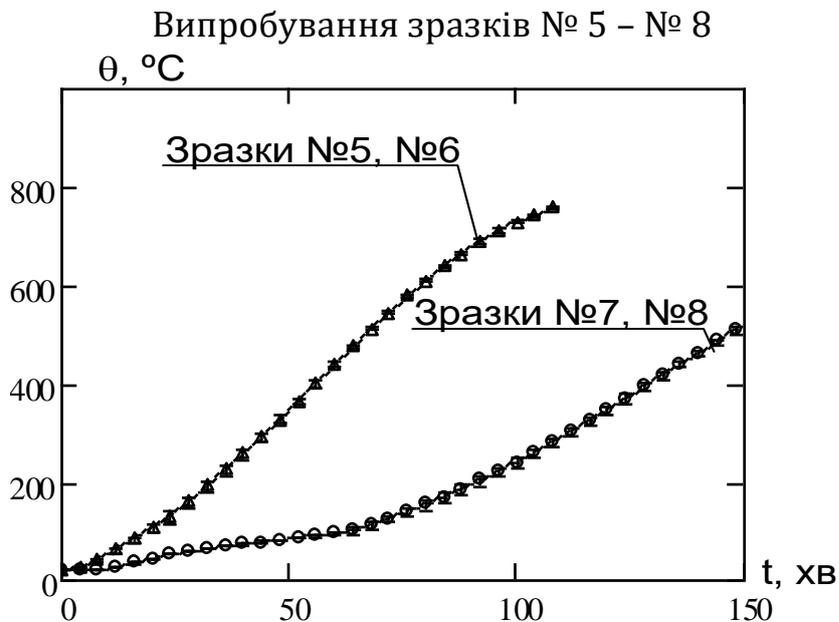
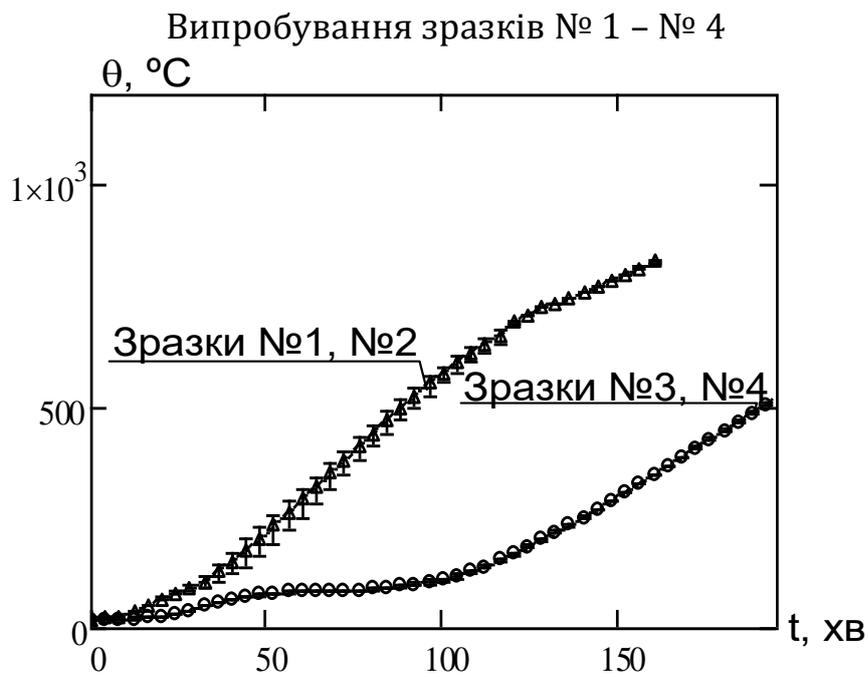


Рис. 3.5 Графіки показників середньої температури для кожного зразка за показниками з трьох термопар, встановлених на металевій поверхні залежно від часу випробувань

Таблиця 3.2

Час досягнення критичної температури 500 °C у вогнезахищеній сталевій конструкції залежно від товщини облицювання

Товщина облицювання, $d_p$ , мм	24	25	35	36	52	55	73	75
Час досягнення критичної температури, $U$ , хв	62	67	85	87	137	146	184	191

На рис. 3.6 зображено побудовану криву за даними табл. 3.2.

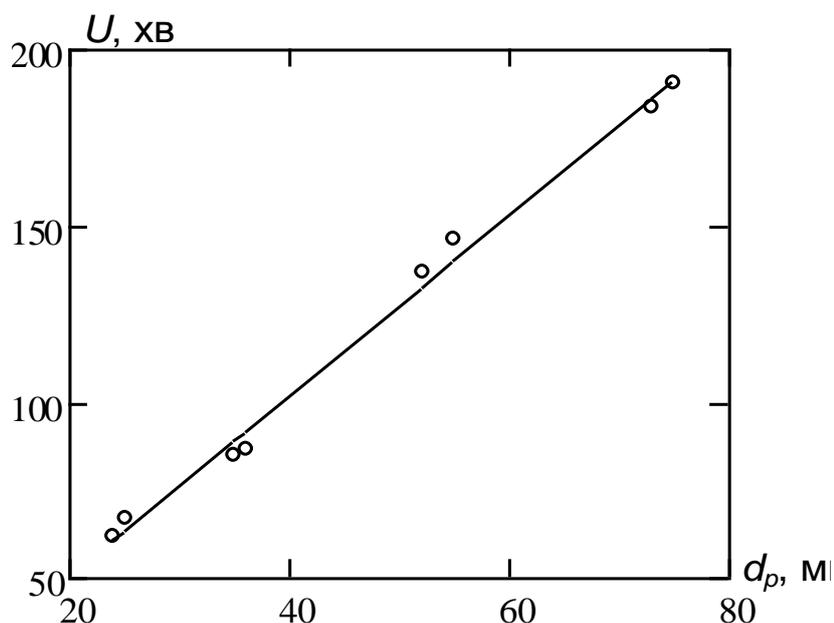


Рис. 3.6 Крива часу досягнення критичної температури 500 °С, залежно від товщини вогнезахисного облицювання

Крива, представлена на рис 3.6, відповідає лінійній залежності, тож для опису залежності часу досягнення критичної температури може бути використана лінійна регресійна модель.

### 3.2. Математична модель залежності часу досягнення критичної температури сталевую балкою, залежно від товщини вогнезахисного облицювання

Аналіз даних табл. 3.2 і рис. 3.6 доводить можливість математичного опису залежності часу досягнення критичної температури, згідно з найбільш значущими параметрами: величина товщини вогнезахисного облицювання та значення критичної температури. Це може бути реалізоване за допомогою лінійної регресійної моделі, відповідно до [62–68]:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1x_2 \quad (3.1)$$

Такий тип регресійної залежності можливо отримати на основі найпростішого плану I порядку, матриця якого наведена в табл. 3.3 згідно з [69–70].

Таблиця 3.3

Матриця плану першого порядку для проведення повного факторного експерименту відповідно до прийнятої регресійної моделі

№	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>
1	+	+	+
2	+	-	-
3	-	+	-
4	-	-	+

Крім того, можливий повний факторний експеримент для встановлення регресійної залежності типу (3.1) [71–75].

Згідно з планом експерименту, діапазон варіювання найбільш значущих факторів представлено в табл. 3.4. Цей діапазон реалізують за даними вимірювань, які відображено на рис. 3.6.

Таблиця 3.4

Інтервали варіювання факторів у чисельному експерименті

Товщина вогнезахисного облицювання, d <sub>p</sub> , мм			Критична температура, θ <sub>кр</sub> , °С		
Найменше значення, d <sub>p-1</sub>	Середнє значення, d <sub>p0</sub>	Найбільше значення, d <sub>p+1</sub>	Найменше значення, θ <sub>-1</sub>	Середнє значення, θ <sub>0</sub>	Найбільше значення, θ <sub>+1</sub>
25	50	75	350	550	750

На основі варіювання параметрів, згідно з табл. 3.3 і табл. 3.4, за результатами проведених експериментів щодо визначення температури були отримані значення часу досягнення критичних температур. Одержані результати подано в табл. 3.5.

Таблиця 3.5

Параметри пожеж у модельних приміщеннях в умовах повного факторного експерименту, згідно з матрицею планування

Експериментальна ситуація	1	2	3	4
Час досягнення критичної температури, t, хв	264	161	106	50

Із застосуванням результатів повного факторного експерименту, які подані в табл. 3.5, обчислюють коефіцієнти регресійної залежності (3.1) за такими формулами (3.2):

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i; a_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 y_i; a_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_2 y_i; a_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_2 y_i, \quad (3.2)$$

де  $N = 4$  – кількість експериментальних дослідів, відповідно до матриці плану повного факторного експерименту;

$x_i$  – значення фактору, згідно з матрицею плану повного факторного експерименту (див. табл. 3.3);

$y_i$  – значення часу досягнення критичної температури за табл. 3.5.

Обчислені коефіцієнти регресійної моделі за формулами подано в табл. 3.6.

Таблиця 3.6

Коефіцієнти регресії для вибраної моделі часу досягнення критичної температури

Модель	$a_0$ ,	$a_1$ ,	$a_2$ ,	$a_3$ ,
$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1x_2$	145,25	67,25	39,75	11,75

Із використанням одержаної регресійної залежності часу досягнення критичної температури побудовано поверхню його залежності від найбільш значущих параметрів вогнезахищеного елемента сталеві конструкції, що зображено на рис. 3.7.

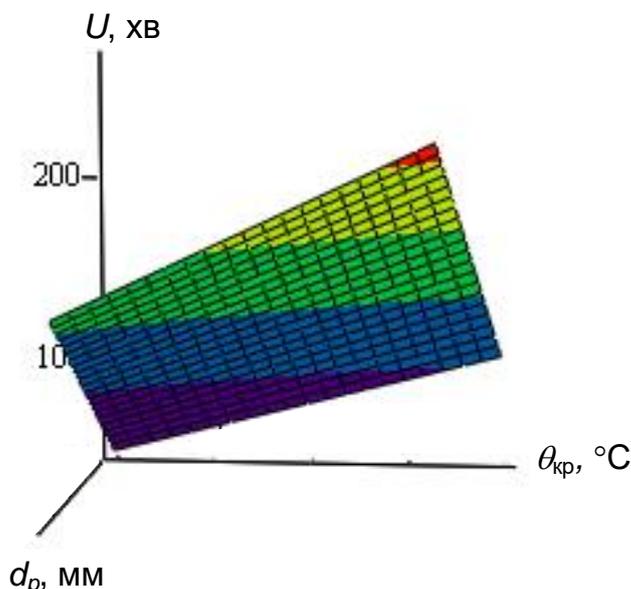


Рис. 3.7 Поверхня залежності часу досягнення критичної температури від найбільш значущих параметрів вогнезахищеного елемента сталеві конструкції

Для опису залежності часу досягнення критичної температури від найбільш значущих параметрів вогнезахищеного елемента сталеві конструкції застосовують вираз:

$$U = 33,938 + 1,397 \cdot d_p - 0,081 \cdot \theta_{кр} + 2,35 \cdot 10^{-3} d_p \cdot \theta_{кр} \quad (3.3)$$

Для більшої наочності й можливості застосування отриманих результатів під час використання номографічного методу побудовано номограму (див. рис. 3.8).

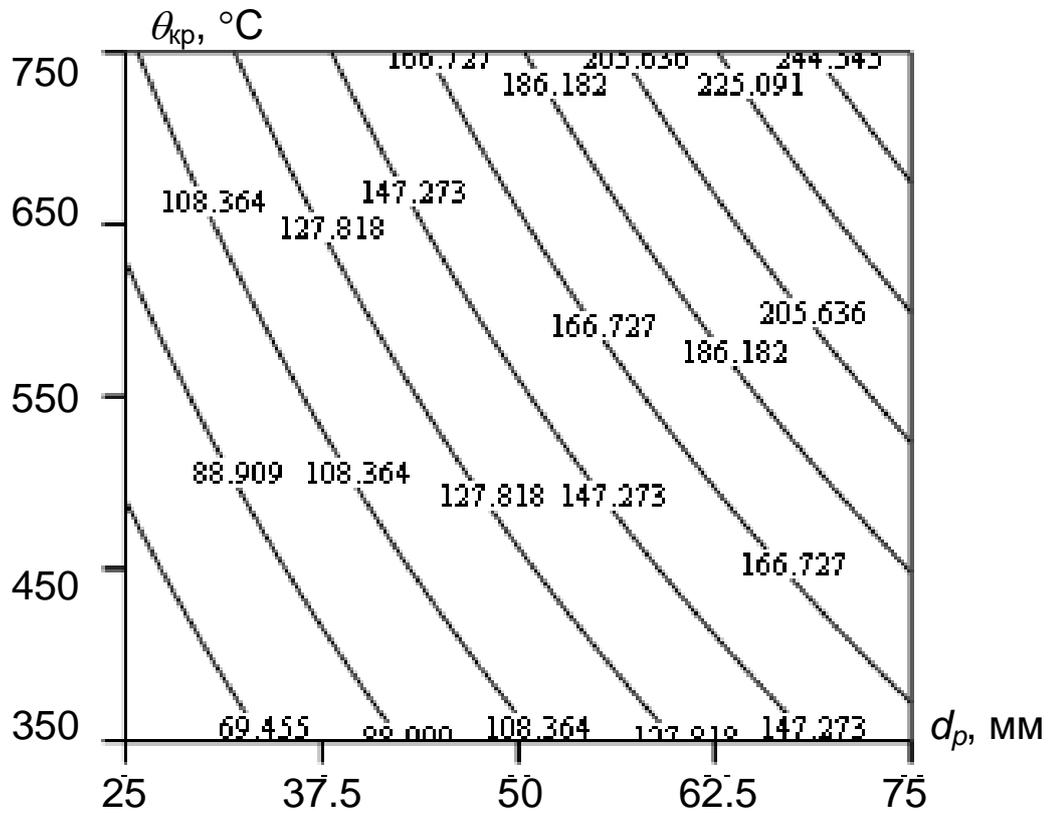


Рис. 3.8 Номограма для визначення межі вогнестійкості, що розрахована за умови досягнення критичної температури, з врахуванням товщини вогнезахисного мінераловатного облицювання

## РОЗДІЛ 4

### ОСОБЛИВОСТІ ЗМІНИ КОЕФІЦІЄНТУ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ БАЛОК ПРИ НАГРІВАННІ

#### 4.1. Дослідження коефіцієнта теплопровідності мінераловатного облицювання фрагментів стержнів зі сталевого прокату

На підставі використання даних, отримані у ході вогневих випробувань фрагментів сталевих стержнів із вогнезахисним облицюванням на основі мінеральної вати, а також методики розрахунку коефіцієнта теплопровідності виконано розрахунки із застосуванням формули (2.14) [82–84].

Для розв'язання рівняння (2.14) потрібно задати температурні залежності теплофізичних характеристик сталі. У табл. 4.1 представлено зазначені теплофізичні характеристики.

Згідно з рекомендаціями ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2012 Eurocode 1 [47] та за умов застосування методу додатка Д ДСТУ Б. В. 1.1.7 – 17:2007 [8], теплоємність вважають сталою й рівною  $c_p = 1000$  Дж/(кг·°С). Густина вогнезахисного покриття також стала та дорівнює  $\rho_p = 200$  кг/м<sup>3</sup>, згідно з довідниковими даними [85–88]. Для окреслення можливих значень виконано прямий розрахунок для зразків 1 та 2, відповідно до табл. 3.1, із використанням значення коефіцієнта теплопровідності  $\lambda(\theta) = 0.2$  Вт/(м·°С), а також довідникових даних [85].

Таблиця 4.1

Теплофізичні характеристики матеріалів будівельних  
конструкцій

Коефіцієнт теплопровідності, $\lambda(\theta)$ , Вт/(м·°С)	Об'ємна питома теплоємність, $c_p(\theta) \cdot \rho$ , Дж/(м <sup>3</sup> ·°С)	Густина, кг/м <sup>3</sup>
Сталь ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2012 Eurocode 2 [7]		
$54 - 3,33 \cdot 10^{-2} \theta$ за $20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 800^\circ\text{C}$ , 27,3 за $\theta > 800^\circ\text{C}$ .	$425 + 0,773\theta - 1,69 \cdot 10^{-2} \theta^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} \theta^3$ за $20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 600^\circ\text{C}$ , $666 - 13002/(\theta - 738)$ за $600^\circ\text{C} < \theta \leq 735^\circ\text{C}$ , $545 + 17820/(\theta - 731)$ за $735^\circ\text{C} < \theta \leq 900^\circ\text{C}$ , 650 за $900^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}$	7850

Після виконання розрахунків був отриманий температурний режим нагрівання зразка 1 (див. табл. 3.1), який зображений на рис. 4.1.

Графіки, представлені на рис. 4.1, спонукають до висновку, що прийняте значення достатньо наближає до реального температурного режиму нагрівання зразка 1, що отримано експериментально. Отже,

пошук коефіцієнта теплопровідності можна проводити зі значеннями, близькими до прийнятого попередньо.

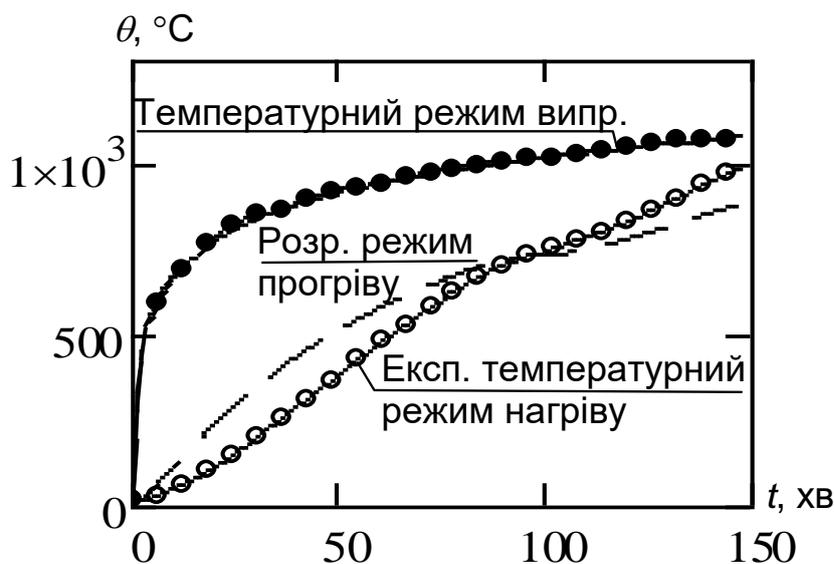


Рис. 4.1 Температурний режим нагрівання зразка 1, що отриманий розрахунковим та експериментальним способом

На основі даних табл. 3.1, табл. 4.1 та з використанням формули (2.14) виконано розрахунок коефіцієнта теплопровідності мінераловатного облицювання. Отримані результати подано у вигляді графіків залежностей коефіцієнта теплопровідності, відповідно до часу випробування (рис. 4.2).

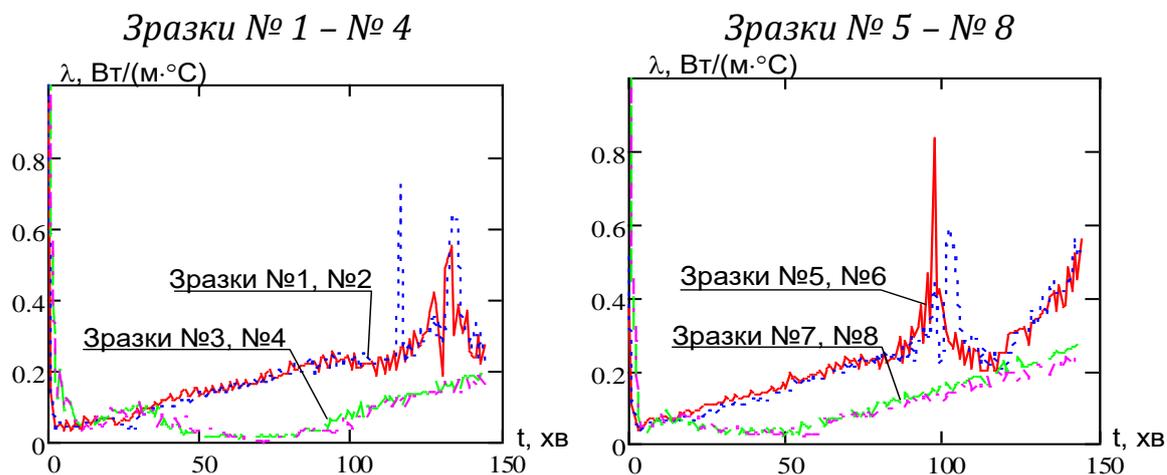


Рис. 4.2 Графіки залежностей коефіцієнта теплопровідності мінераловатного облицювання зразків фрагментів сталевих стержнів, відповідно до часу випробування

Графіки на рис. 4.2 мають певні особливості, які полягають у помітній відмінності характеру зміни коефіцієнта теплопровідності з товстим і тонким шаром облицювання. Відмінність пов'язана з наявністю максимуму кривої коефіцієнта теплопровідності

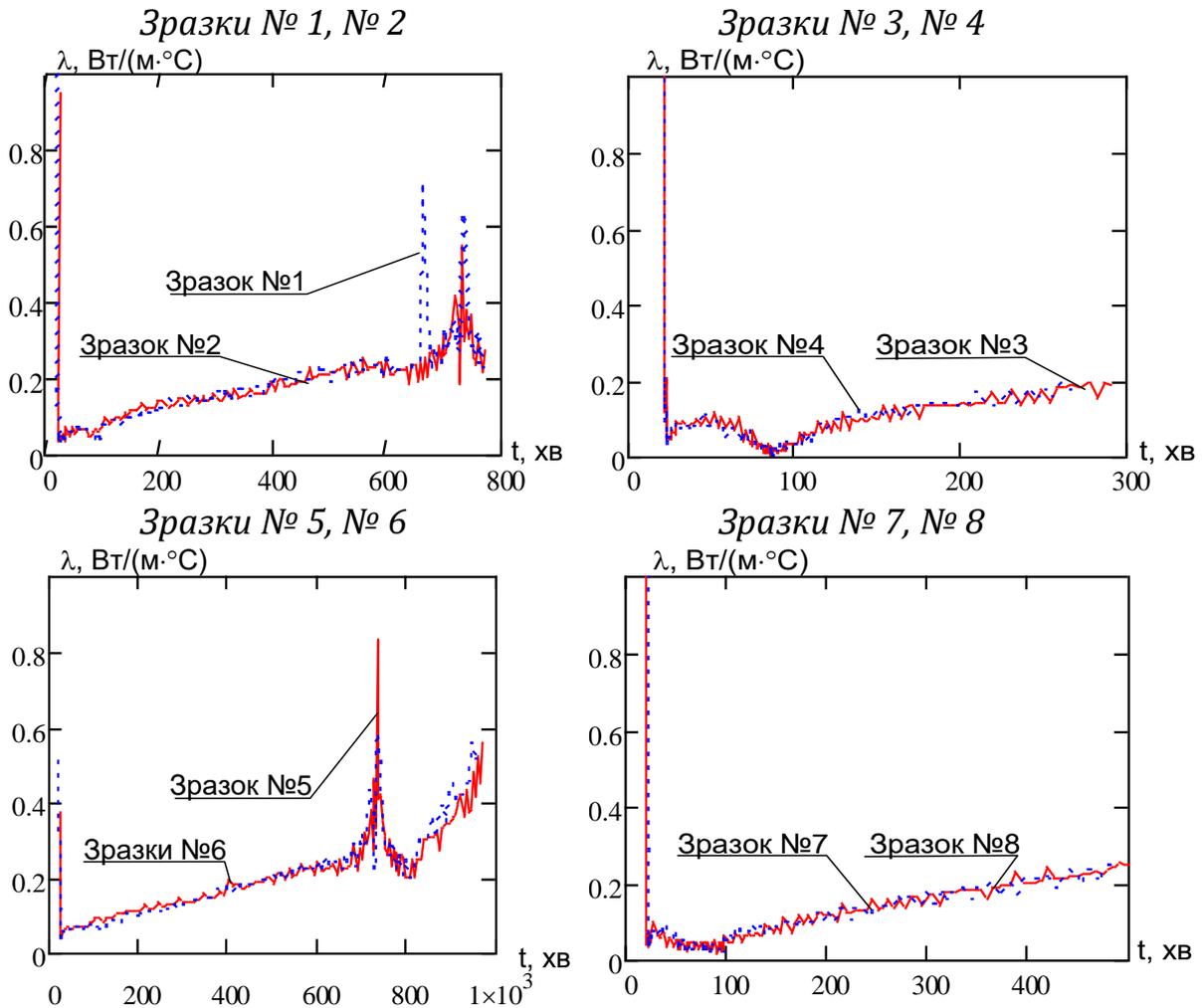
мінераловатного облицювання з малою товщиною, коли такий максимум для зразків із порівняно товстішим шаром мінераловатного облицювання відсутній. Наявність максимуму може бути пояснена тим, що за певної температури нагріву вогнезахисного мінераловатного облицювання в його внутрішніх шарах відбувається реакція окислення, що має ендотермічний характер, тобто виділяється додаткове тепло. У випадку вогнезахисного мінераловатного облицювання з найменшою товщиною ~ 25 мм після часткового зменшення після максимуму коефіцієнт теплопровідності знов починає зростати. Такий стан може бути пояснений тим, що спочатку окислюється речовина включень, які містяться між волокнами мінеральної вати. Такими включення можуть бути певні забруднення в мінераловатному матеріалі, що залишаються внаслідок технологічних процесів під час його виготовлення. Після повного вигорання включень коефіцієнт теплопровідності спадає. Зростання коефіцієнта теплопровідності на останніх стадіях випробування зразків із вогнезахисним мінераловатним облицюванням із найменшою товщиною ~ 25 мм можна аргументувати тим, що починають термічно розкладатися волокна мінераловатного матеріалу. Відсутність такого ефекту в зразках із мінераловатним вогнезахисним облицюванням товщиною ~ 36 мм, а також відсутність максимуму в зразках із мінераловатним вогнезахисним облицюванням товщиною більше за 50 мм спричинені тим, що в таких зразках температури термічного розкладання включень та волокон мінераловати не досягають.

Існує також цікава особливість коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного облицювання товщиною більше за 50 мм випробуваних зразків, що полягає в досягненні певного мінімуму на початкових стадіях із 30 хв. до 60 хв. Така особливість умотивована тим, що в зразках із більшою товщиною вогнезахисного облицювання існує більша кількість вологи, яка міститься між волокнами мінеральної вати. Унаслідок поступового нагрівання облицювання, волога випаровується, уповільнюючи процес нагрівання, що впливає на характер часових кривих коефіцієнта теплопровідності.

Для вивчення залежності коефіцієнта теплопровідності від температури нагрівання були побудовані графічні залежності, подані у вигляді кривих на графіках рис. 4.3.

Аналіз графіків на рис. 4.3 доводить, що сформульовані вище припущення підтверджені, оскільки максимуми на графіках залежностей коефіцієнта теплопровідності від температури нагрівання фрагмента сталевого стержня повторюються за температури близько 750 °С. За цієї температури починають термічно розкладатися з виділенням теплової енергії включення, що

залишилися між волокнами мінеральної вати внаслідок технологічних процесів її виготовлення. Початок термічного розкладання волокон мінеральної вати фіксують за температури 800°C, оскільки цій температурі відповідає мінімум у разі випробування зразків № 5 та № 6.



*Рис. 4.3 Графіки залежностей коефіцієнта теплопровідності мінераловатного облицювання зразків фрагментів сталевих стержнів, згідно з температурою нагрівання фрагменту сталевого стержня*

Підтвержене й припущення, що мінімум коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного мінераловатного облицювання товщиною більше як 50 мм зразків для випробування № 3, № 4, № 7, № 8 (див. табл. 3.1) фіксують за температури близько 100 °С, оскільки відбувається випаровування вільної вологи, яка міститься між волокнами мінеральної вати.

За методикою, описаною в стандарті ДСТУ Б. В. 1.1.7 – 17: 2007 [8], числова залежність коефіцієнта теплопровідності від часу для

кожного зразка перетворюється на залежність від температури та усереднюється для кожних 50 °С для всіх зразків. Для визначення коефіцієнта теплопровідності за певним значенням температури використовують лінійну інтерполяцію.

Після цього перевіряють критерії адекватності (прийнятності) за рекомендаціями п. 2.6.1 ДСТУ Б. В. 1.1.7 – 17: 2007 [8]:

- час досягнення проектної температури для кожної проектної температури не має перевищувати реальний час, отриманий у ході випробування, більше як на 30 %;

- середнє значення відхилення розрахункового й експериментального часу досягнення проектної температури має бути меншим за нуль;

- максимум 20 % окремих розбіжностей має бути більшим за нуль.

Дані, отримані внаслідок розрахунків, послугували підставою для побудови графіків залежностей усередненого значення коефіцієнта теплопровідності від температури (див. рис. 4.4).

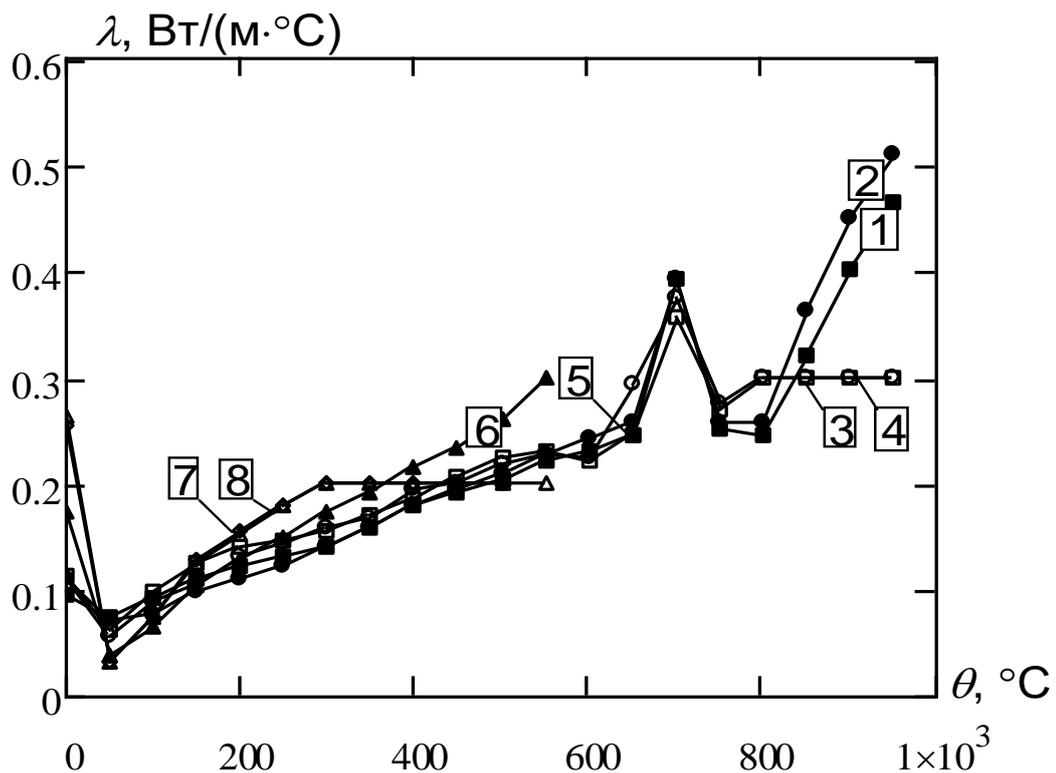


Рис. 4.4 Залежність усередненого значення коефіцієнта теплопровідності від температури зразків фрагментів сталевих стержнів із вогнезахисним облицюванням (1, 2, 3, ... – номери зразків)

Відповідно до графіків, коефіцієнт теплопровідності суттєво залежить від товщини вогнезахисного мінераловатного облицювання, але всі залежності є подібними. Це означає, що для аналізу теплової

задачі нагрівання сталевій конструкції з вогнезахисним покриттям можна використовувати загальну спільну залежність. Крім того, наведена залежність (Е.3) додатка Е [8] для визначення коефіцієнта теплопровідності через температуру та товщину вогнезахисного покриття також не може бути використана ДСТУ Б. В. 1.1.7 – 17: 2007, оскільки залежність коефіцієнта теплопровідності від температури та товщини є суттєво нелінійними.

Для виведення загальної залежності варто використовувати звичайне усереднення за всіма отриманими залежностями, визначеними дискретно для значень температур через інтервал 50 °С.

Отримана залежність коефіцієнта теплопровідності подана у вигляді графіка на рис. 4.5.

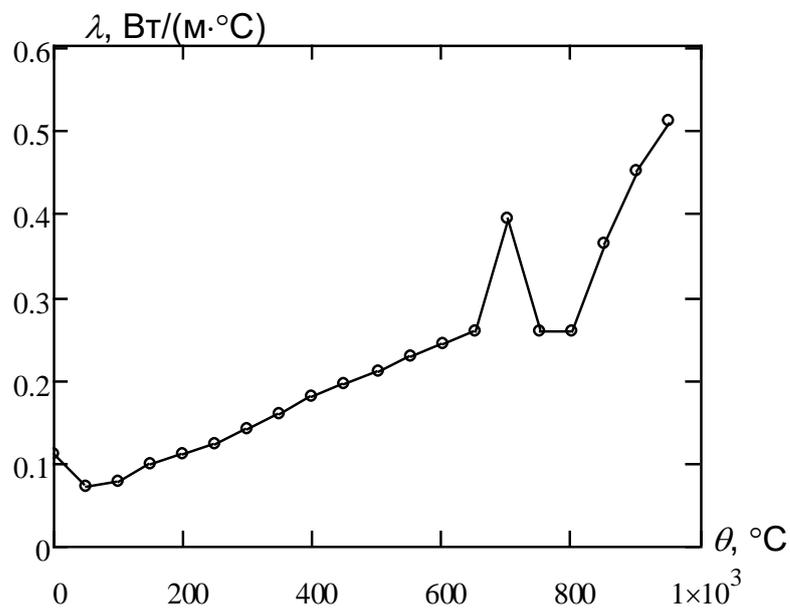


Рис. 4.5 Залежність усередненого значення коефіцієнта теплопровідності від температури зразків фрагментів сталевих стержнів із вогнезахисним облицюванням

Для розрахунків зручно використовувати залежність коефіцієнта теплопровідності від температури у вигляді числової послідовності, яка представлена в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Теплофізичні характеристики мінераловатного вогнезахисного облицювання

Коефіцієнт теплопровідності		Об'ємна питома теплоємність	Густина, кг/м <sup>3</sup>
$\theta$ , °С	$\lambda(\theta)$ , Вт/(м·°С)	$c_p(\theta)$ , Дж/(кг·°С)	
20	0,11	1000	200
50	0,11		
100	0,071		

Продовження таблиці 4.2

150	0,077		
200	0,1		
250	0,111		
300	0,123		
350	0,141		
450	0,158		
500	0,18		
550	0,195		
600	0,209		
650	0,228		
700	0,242		
750	0,258		
800	0,393		
850	0,257		
900	0,259		
950	0,363		
1000	0,45		
1050	0,509		

Отримано залежність коефіцієнта теплопровідності мінераловатного вогнезахисного облицювання товщиною до 80 мм, що є відповідною попереднім значенням питомої теплоємності та густини (див. табл. 4.2).

#### **4.2. Дослідження точності та достовірності результатів розрахунку сталевих елементів із вогнезахисним мінераловатним облицюванням, отриманих для його визначених теплофізичних характеристик**

Дані щодо теплофізичних характеристик (див. табл. 4.2) вогнезахисного мінераловатного облицювання, які отримані за результатами вогневих випробувань фрагментів сталевих стержнів, покладено в основу розрахування температурних режимів прогрівання випробуваних фрагментів. Для розрахунку температурних режимів нагрівання використано формулу (2.10).

Результати розрахунку подано у вигляді графіків температурних режимів прогрівання сталевих елементів фрагментів разом із графіками, що отримані експериментально. Побудовані графіки температурних режимів представлено на рис. 4.6.

Графіки на рис. 4.6 демонструють невелику розбіжність між експериментальними й розрахунковими даними, що отримані за узагальненою температурною залежністю коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного мінераловатного облицювання.

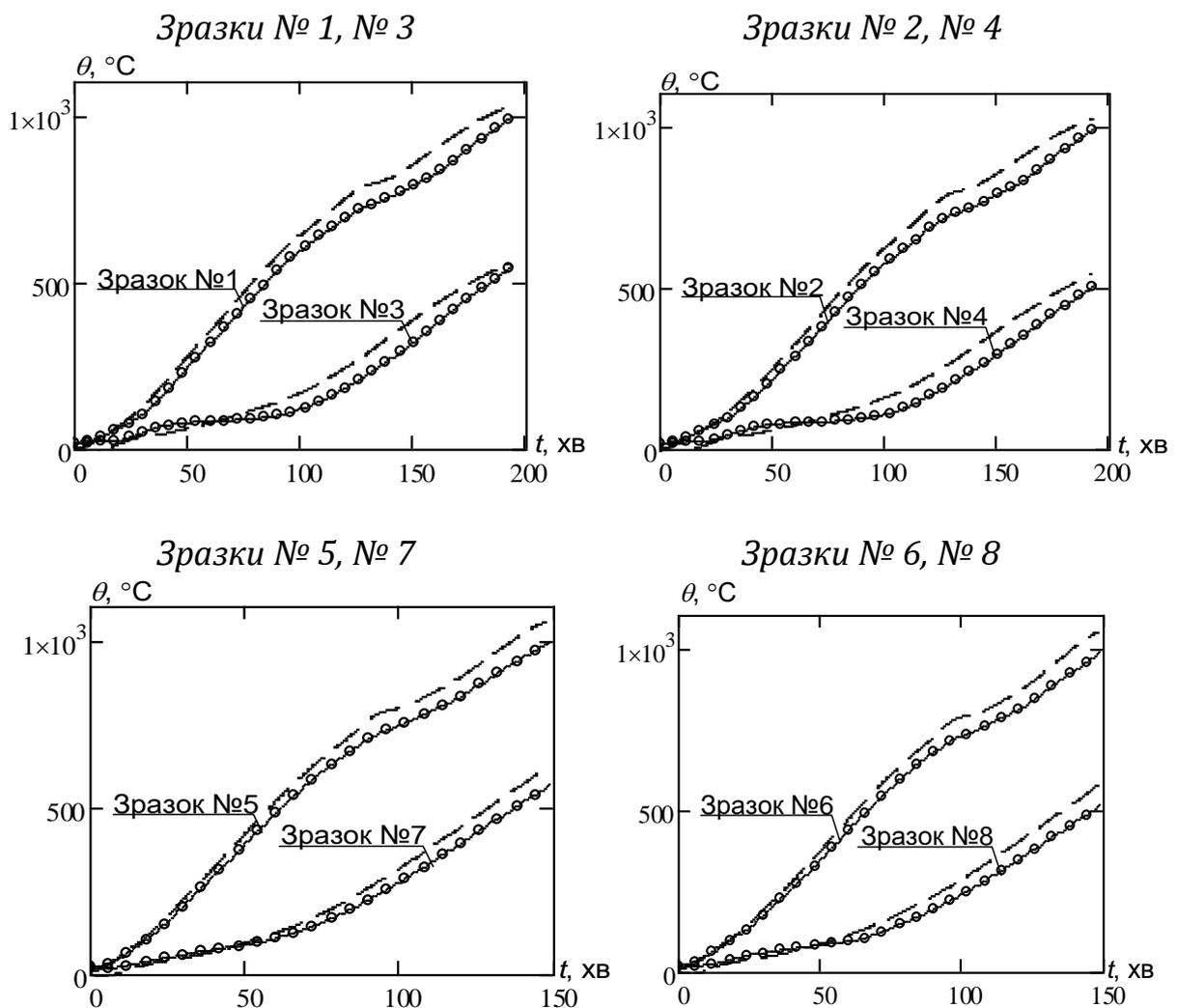


Рис. 4.6 Графіки температурних режимів прогрівання залежностей сталевих елементів стержнів із мінераловатним вогнезахисним облицюванням:  $\circ\text{---}\circ$  - експериментальні дані;  $\text{---}$  - розрахункові дані.

Для оцінювання адекватності (прийнятності) отриманих даних щодо коефіцієнта теплопровідності мають бути розраховані критерії адекватності згідно з п. 2.6.1 ДСТУ Б. В. 1.1.7 - 17: 2007 [8]. Температура нагрівання елемента сталеві конструкції розрахована відповідно до формули (2.10), за умов стандартного температурного режиму пожежі. Результати розрахунку представлено в табл. 4.3. За умови невідповідності критеріям адекватності (прийнятності) у розрахунок уведено коефіцієнт безпеки для множення отриманих температур та забезпечення критеріїв. Отримані коефіцієнти безпеки були використані для визначення товщини покриття й забезпечення необхідного класу вогнестійкості.

Дані табл. 4.3 отримані внаслідок використання коефіцієнта безпеки  $K = 1,05$ , на який помножена температура, одержана через прямий розрахунок за формулою (2.10). За таких умов критерії

адекватності (прийнятності) п. 2.6.1 ДСТУ Б. В. 1.1.7 – 17: 2007 [8] збігаються.

Таблиця 4.3

Критерії адекватності (прийнятності) отриманих значень коефіцієнта теплопровідності

№ зр.	Розб. досягн. значення норм. ряду температур, %								Середня розбіжн., %	Частка дод. значень розкиду, %
	400.°C	450.°C	500.°C	550.°C	600.°C	650.°C	700.°C	750.°C		
1	-8,621	-5,882	-3,846	-2,273	-1,02	-0,926	0,862	0	-2,713	12,5
2	-10	-7,317	-7,447	-5,769	-6,897	-7,813	-5,224	-5,479	-6,993	0
3	-25	-25	-22,222	-21,667	-23,529	-21,622	-22,619	-15,957	-22,202	0
4	-8,974	-7,609	-6,731	-6,034	-5,469	-4,348	-3,378	-0,633	-5,397	0
5	-17,391	-11,538	-11,667	-10,606	-9,722	-10	-6,977	0	-9,738	0
6	-12,791	-8,824	-6,897	-3,906	-3,521	-1,948	0	0,568	-4,665	0
7	-6,25	-3,571	0	-1,429	-2,564	0	-1,064	6	-1,11	12,5
8	0	-13,043	-8,974	-5,294	-3,226	-0,5	0,463	0	-3,822	12,5
9	-17,742	-11,429	-6,41	-2,326	-1,064	0	-0,893	0	-4,983	0
10	-8,163	-6,14	-3,125	-2,113	-1,282	-0,588	0	1,905	-2,438	12,5
11	-13,043	-9,259	-8,871	-7,246	-5,921	-4,268	-2,841	0	-6,431	0

Для дослідження достовірності розрахунку температури та прийнятності результатів визначення параметрів теплового впливу пожежі на фрагменти сталевих стержнів із вогнезахисним мінераловатним облицюванням залучено статистичні характеристики отриманих розрахункових показників. Розраховані показники середнього абсолютного відхилення, середнього відносного відхилення, середнього квадратичного відхилення, порівняно з експериментальними значеннями, подано в табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Абсолютні відхилення, відносні відхилення, квадратичні відхилення для порівнюваних термопар

№ зразка	Абсолютні відхилення, °C	Відносні відхилення, %	Середньоквадратичні відхилення, °C
1	44,6	13,2	16,7
2	32,8	11,4	9,8
3	26,3	9,9	6,3
4	42,8	14,2	15,4
5	16,4	5,9	4,9
6	22,1	8,9	8,6
7	41,6	12,6	15,1
8	24,4	9,4	8,3
Середні значення	31,4	10,7	10,6

Дані табл. 4.4 засвідчили, що похибка під час порівняння розрахункових та експериментальних показників температур у зразках-фрагментах сталевих стержнів із вогнезахисним

мінераловатним облицюванням істотного впливу на точність обчислення температури не має, оскільки величина відносної похибки не перевищує 10,7 %, а величина середньоквадратичного відхилення не перевищує 10,6 °С. Це означає, що за виконаним аналізом статистичних показників розрахункових значень температури отримана залежність коефіцієнта теплопровідності може бути використана як загальна для прогнозування нагрівання в сталевих конструкціях із вогнезахисним мінераловатним облицюванням.

Показники щодо статистичних критеріїв температурних даних для досліджуваних зразків представлено в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

Статистичні критерії показників температури серій випробувань

№ зразка	Критерій Кохрена	Критерій Стьюдента	Критерій Фішера
1	0,465	0,633	0,846
2	0,446	0,660	0,861
3	0,615	0,748	0,945
4	0,623	0,765	0,984
5	0,794	0,816	1,008
6	0,746	0,881	1,004
7	0,581	0,645	0,901
8	0,622	0,687	0,904

Згідно з табл. 4.5, показники статистичних критеріїв, які характеризують розкид відхилень температур у досліджуваних зразках, не перевищують табличних значень. Отже, отримана залежність коефіцієнта теплопровідності може бути використана як загальна для прогнозування нагрівання в сталевих конструкціях із вогнезахисним мінераловатним облицюванням.

## РОЗДІЛ 5 МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ СТАЛЕВИХ БАЛОК ПРИ НАГРІВАННІ

### 5.1. Температурний режим нагрівання сталевієї балки з вогнезахисним облицюванням із мінеральної вати

Для вивчення цілісності мінераловатного облицювання в разі деформування сталевієї балки найбільш значущим є температурне навантаження, що виникає як реакція на тепловий вплив стандартного температурного режиму пожежі. У ході визначення й прикладання температурного навантаження використано низку припущень [89–92].

1. Нагрівання враховують тільки в шарі матеріалу сталевієї балки, тоді як підвищення температури у вогнезахисному облицюванні не беруть до уваги, оскільки показник модуля пружності мінеральної вати є дуже малим.

2. Температура по сталевій балці є ізопараметричною, тобто такою, що розподілена по балці рівномірно.

3. Температура в балці змінюється за режимом, що розраховують за формулою (2.10), представленою в другому розділі, із використанням стандартної температурної кривої пожежі як режиму нагріву зовнішнього середовища.

4. Як теплофізичні характеристики сталі у формулі (2.10) використано вирази, що подані в табл. 4.1.

5. Теплофізичними характеристиками мінеральної вати у формулі (2.10) слугують дані, представлені в табл. 4.2.

6. Клейові з'єднання, які фіксують вогнезахисне мінераловатне облицювання, також не зазнають температурного впливу.

Для розв'язання теплової задачі прийняті основні геометричні параметри, що подано на рис. 5.1 а. Схема тристороннього теплового впливу пожежі на досліджувану балку представлена на рис. 5.1 б.

Основні параметри для розрахунку подано в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Основні характеристики сталевієї балки з мінераловатним вогнезахисним облицюванням для теплотехнічного розрахунку

Параметр	Познач.	Од. виміру	Величина
Товщина вогнезахисного покриття	$d_p$	м	0.020
Відношення питомої площі до питомого об'єму	$A_m / V$	м <sup>-1</sup>	222.2
Крок за часом	$\Delta t$	с	30

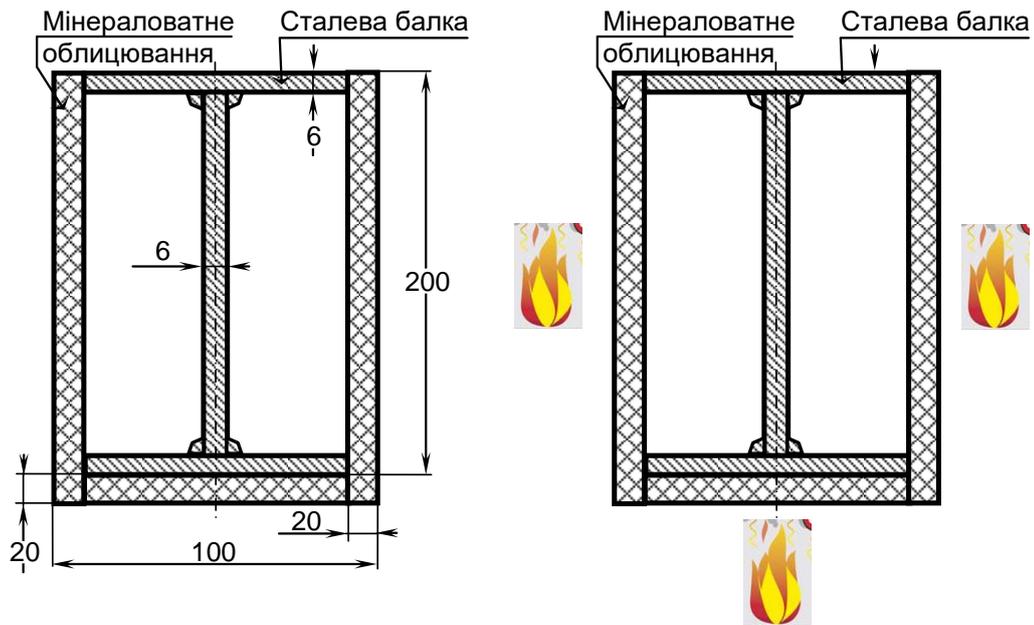


Рис. 5.1 Геометрична схема перерізу сталеві балки з мінераловатним вогнезахисним облицюванням (а) та схема теплового впливу пожежі на переріз балки (б)

Унаслідок виконання необхідних розрахунків, отримано температурну криву нагрівання досліджуваної сталеві балки з мінераловатним вогнезахисним облицюванням (рис. 5.2).

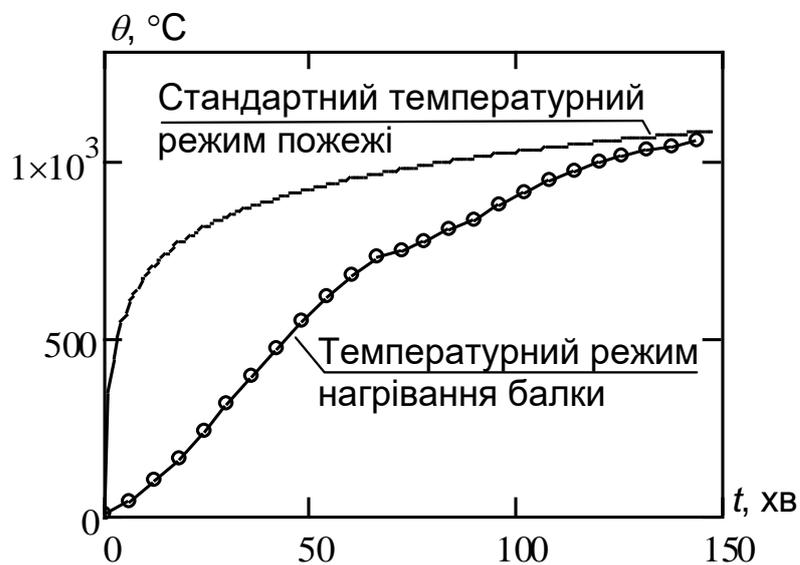


Рис. 5.2 Температурний режим нагрівання сталеві балки з мінераловатним вогнезахисним облицюванням за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі

Отриманий температурний режим може бути використаний як температурне навантаження під час розв'язання структурної задачі.

## **5.2. Основні теоретичні положення розрахунку напружено-деформованого стану сталевій балки з вогнезахисним облицюванням із мінеральної вати**

**5.2.1. Загальні положення розрахунку напружено-деформованого стану сталевій балки з вогнезахисним облицюванням із мінеральної вати.** Для моделювання напружено-деформованого стану (НДС) сталевій балки з вогнезахисним облицюванням із мінеральної вати використано узагальнений інженерний підхід, базований на положеннях [89, 93–96].

1. Для розрахунку НДС деформованого тіла застосовують загальний теоретичний підхід, в основі якого – ініціація переміщень точок системи деформованих тіл із використанням системи узагальнених рівнянь динаміки та рівнянь НДС як реакція на переміщення, що апроксимується за допомогою методу кінцевих елементів (МКЕ).

2. Для моделювання сталевій балки використовують двовимірні оболонкові кінцеві елементи (КЕ) прямокутної форми типу Беличка – Цая [93–94] із чотирма вузловими точками та п'ятьма точками інтегрування по товщині.

3. Для моделювання мінераловатних пластин вогнезахисного облицювання використовують тривимірні масивні КЕ гексаедричної форми з вісьма вузловими точками.

4. Як модель матеріалу сталевій балки використовують термопружний матеріал із можливістю пластичних деформацій, діаграми деформування якого відповідають рекомендаціям другої частини Eurocode 3, форма яких охоплює тільки ділянку зростання й горизонтальну ділянку. Спадну гілку не беруть до уваги, оскільки її наявність суттєво не впливає на характер деформування сталевій балки, унаслідок переважання поперечних переміщень за умов втрати стійкості перерізу.

5. Для опису нелінійної поведінки матеріалу мінераловатних пластин вогнезахисного облицювання застосовують модель матеріалу Блатц – Ко [94].

6. Висловлено припущення, що порушення щільності з'єднання між пластинами мінераловатних пластин вогнезахисного облицювання та поверхнею балки відбувається за умови розшарування мінеральної вати, оскільки за технічними умовами виробника клей має належну адгезію та стійкий до впливу високих температур, тоді як міцність на розшарування в разі відриву та зсуву мінеральної вати набагато менша [95–96].

7. Для опису роботи з'єднання між пластинами мінераловатних пластин вогнезахисного облицювання й поверхнею використовують

модель контактної взаємодії з його порушенням, за умови досягнення міцності на зсув і відрив між контактними поверхнями, що дорівнюють міцності мінеральної вати як найменш міцного матеріалу.

8. Прикладання навантаження має динамічну історію й відбувається поступово з початковим додаванням власної ваги, діючого навантаження та прикладанням температурного навантаження, згідно з обчисленнями на останній стадії.

**5.2.2. Математичні моделі динаміки та напружено-деформованого стану сталеві балки з вогнезахисним облицюванням із мінеральної вати і їх чисельна реалізація.** На рис. 5.3 подано схему руху твердого тіла, що зазнає деформації від моменту часу  $t = 0$  до поточного моменту часу.

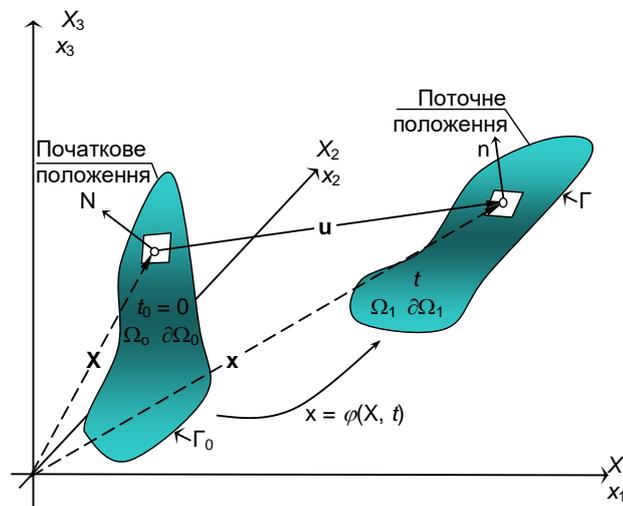


Рис. 5.3 Початковий деформований стан і поточний деформований стан твердого тіла

На схемі рис. 5.3 деформоване тіло позначене як  $\Omega_0$ , а границя тіла – як  $\Gamma_0$ . Поточне положення й конфігурація деформованого тіла в поточний час  $t$  позначено як  $\Omega_1$  із границею, позначеною як  $\Gamma$ . Під час руху тіла з початкового положення та конфігурацією  $\Omega_0$  у поточне положення в конфігурацію  $\Omega_1$ , довільна точка з вектором координат  $X$ , у початковому стані виділена в ділянці  $\Omega_0$  переміститься в ділянку  $\Omega_1$  і буде мати вектор координат  $x$ .

Основне рівняння руху, що описує динаміку взаємодії твердих деформованих тіл, записують у разі комплексного врахування законів збереження та замкнення, згідно з працями [96–103].

За введених позначень як основне рівняння записують рівняння збереження імпульсу, що має такий вигляд:

$$\sigma_{ij,i} + \rho \cdot f_i = \rho \cdot \ddot{x}_i, \quad (5.1)$$

де  $\sigma_{ij,i}$  – тензор напружень Коши в певній точці тіла;

$\rho$  – густина матеріалу в точці тіла;

$\rho \cdot f_i$  – зовнішні сили, що діють на тіло в цій точці;

$\ddot{x}_i$  – пришвидшення точки тіла.

Рівняння балансу маси записують у вигляді виразу:

$$\rho \cdot \det(\mathbf{J}) = \rho_0, \quad (5.2)$$

де  $\rho_0$  – густина матеріалу в початковому стані;

$\det(\mathbf{J})$  – визначник дотичної матриці жорсткості (Якобіан).

Рівняння для закону збереження енергії включає суму кінетичної та внутрішньої енергій, що має дорівнювати сумі робіт зовнішніх сил.

$$P^{int} + P^{kin} = P^{ext} + P^{heat} \quad (5.3)$$

Кінетичну енергію обчислюють за формулою:

$$P^{kin} = 0.5 \frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} d\Omega \quad (5.4)$$

Внутрішню енергію обчислюють за виразом:

$$P^{ext} = \int_{\Omega} \mathbf{v} \cdot \rho \mathbf{b} d\Omega + \int_{\Gamma} \mathbf{v} \cdot \mathbf{t} d\Gamma \quad (5.5)$$

За умови, коли джерела теплової енергії відсутні, рівняння балансу енергії, відповідно до праць [96–103], записують у вигляді виразу:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho w^{int} + (0.5 \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}) d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{v} \cdot \rho \mathbf{b} d\Omega + \int_{\Gamma} \mathbf{v} \cdot \mathbf{t} d\Gamma \quad (5.6)$$

Рівняння збереження енергії в перетвореному вигляді для деформованого твердого тіла записують у вигляді формули:

$$\rho \dot{w}^{int} = 0.5 \sigma_{ij} \left[ \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right] \quad (5.7)$$

Граничні умови обмежень руху тіла  $\Gamma_f$  можуть бути записані у вигляді виразу:

$$\sigma_{ij} n_j = t_i(t), \quad (5.8)$$

де  $n_j$  – нормаль до границі твердого тіла, направлена назовні.

Для граничних умов, що описують деформацію на границі твердого тіла, записують рівняння:

$$x_i(\mathbf{X}, t) = \bar{x}_i(t) \quad (5.9)$$

У разі утворення контактної взаємодії між тілами граничні умови записують через вираз:

$$(\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-) n_j = 0 \quad (5.10)$$

На можливих переміщеннях  $\delta x_i$  стан твердих деформованих тіл, які взаємодіють між собою, може бути виражений через рівняння балансу віртуальних робіт:

$$\int_{\Omega} [\rho \ddot{x}_i + \sigma_{ij,j} - \rho f_i] \delta x_i d\Omega + \int_{\Gamma_f} [\sigma_{ij} n_j - t_i] \delta x_i d\Gamma + \int_{\Gamma_c} (\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-) n_j \delta x_i d\Gamma = 0 \quad (5.11)$$

Сума можливих робіт, що еквівалентна нулю, із виконанням перетворень рівняння (5.11) має бути записана у вигляді [96–103]:

$$\int_{\Omega} \rho \ddot{x}_i \delta x_i d\Omega + \int_{\Omega} \sigma_{ij,j} \delta x_i d\Omega - \int_{\Omega} \rho f_i \delta x_i d\Omega - \int_{\Gamma_f} t_i \delta x_i d\Gamma - \int_{\Gamma_c} t_i^c \delta x_i d\Gamma = 0 \quad (5.12)$$

**5.2.3. Кінцево-елементна апроксимація основних рівнянь динамічної взаємодії.** Формулу для виконання інтерполяції розподілів параметрів у внутрішніх межах простору кінцевого елемента (КЕ) записують у такому вигляді:

$$x_i(\mathbf{X}, t) = \bar{x}_i(\mathbf{X}(\xi, \eta, \zeta), t) = \sum_{j=1}^m \phi_j(\xi, \eta, \zeta) x_i^j(t), \quad (5.13)$$

де  $\phi_j$  – параметрична функція форми (параметри  $\xi, \eta, \zeta$ );

$m$  – кількість вузлових точок, що визначають за формою КЕ;

$x_i^j$  – координата вузлової точки за однією з трьох осей координат.

Віртуальну потенціальну енергію для КЕ записують у вигляді виразу:

$$\delta \Pi_e = \int_{\Omega_e} \rho \ddot{x}_i \Phi_i^e d\Omega + \int_{\Omega_e} \sigma_{ij} \Phi_{ij}^e d\Omega - \int_{\Omega_e} \rho f_i \Phi_i^e d\Omega - \int_{\Gamma_e} t_i \Phi_i^e d\Gamma, \quad (5.14),$$

де  $\Phi_i^e = (\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_k)_i^e$ .

Для всього комплексу КЕ має бути врахований принцип віртуальних переміщень. За таких міркувань рівняння балансу повної енергії тіла, дискретизованого сіткою КЕ, записують у вигляді:

$$\sum_{e=1}^{en} \left[ \int_{\Omega_e} \rho \ddot{x}_i \Phi_i^e d\Omega + \int_{\Omega_e} \sigma_{ij} \Phi_{ij}^e d\Omega - \int_{\Omega_e} \rho f_i \Phi_i^e d\Omega - \int_{\Gamma_e} t_i \Phi_i^e d\Gamma \right] = 0 \quad (5.15)$$

У матричній формі рівняння (5.15) записують так:

$$\sum_{e=1}^{en} \left[ \int_{\Omega_e} \rho \mathbf{N}^T \mathbf{N} \mathbf{a}_e d\Omega + \int_{\Omega_e} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} d\Omega - \int_{\Omega_e} \rho \mathbf{N}^T \mathbf{b} d\Omega - \int_{\Gamma_e} \mathbf{N}^T \mathbf{t} d\Gamma \right] = 0 \quad (5.16)$$

де  $\mathbf{N}$  – інтерполяційна матриця параметричних функцій форми КЕ;

$\boldsymbol{\sigma}$  – вектор напружень;

$\mathbf{B}$  – матриця жорсткості;

$\mathbf{a}_e$  – вектор вузлових прискорень;

$\mathbf{b}$  – вектор навантажень;

$\mathbf{t}$  – вектор тягових сил.

#### 5.2.4. Математична модель для опису контактної взаємодії.

На рис. 5.4 подано схему контактної взаємодії двох твердих деформованих тіл у разі їх дотику в умовах зіштовхування або взаємного проникнення.

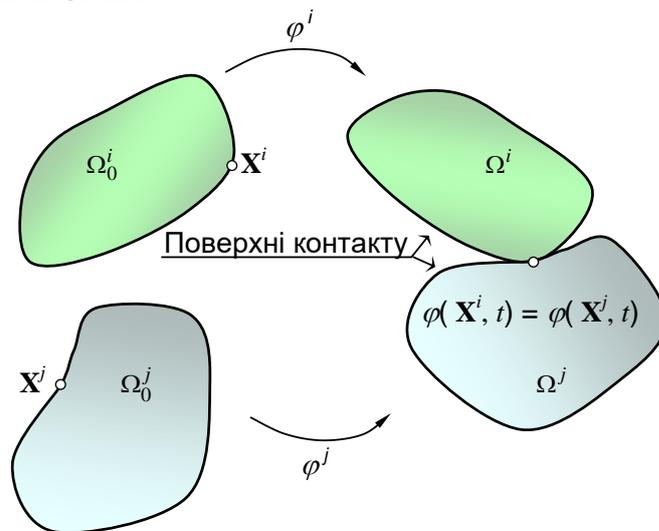


Рис. 5.4 Схема контактної взаємодії двох твердих деформованих тіл

В окремих випадках для спрощення розрахунку вводять припущення, що два тіла приходять до контакту за відсутності абсолютно твердих тіл.

У разі фіксування моменту, коли розпочинається контактна взаємодія тіл, перевіряють виконання умови Герца – Синьорині – Мора [96–103]:

$$g \geq 0, \lambda \geq 0, g\lambda \geq 0, \quad (5.17)$$

де  $g$  – параметр зазору, що визначають за формулою:

$$g(\mathbf{x}^i, t) = (\mathbf{x}^i - \mathbf{x}^j)^T \mathbf{n} \quad (5.18)$$

Схему позначень геометричних параметрів контактних тіл подано на рис. 5.5.

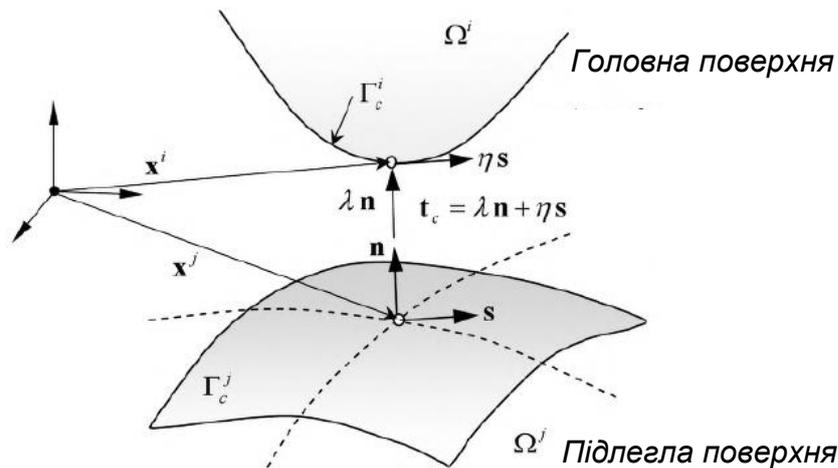


Рис. 5.5 Схema визначення геометричних параметрів контакту

Для врахування сил тертя в разі контактної взаємодії застосовують закон Кулона в узагальненій формі. Величину тангенціальної швидкості визначають так:

$$\dot{u}(\mathbf{x}^i, t) = (\dot{\mathbf{u}}^i - \dot{\mathbf{u}}^j)^T \mathbf{s} \quad (5.19)$$

Узагальнена форма закону Кулона має вигляд виразу:

$$\begin{cases} |\tau| \leq 1 \\ \text{якщо } |\tau| < 1 \text{ приймається } \dot{u} = 0 \\ \text{при } |\tau| < 1 \text{ приймається } \text{sign}(\dot{u}) = \text{sign}(\tau) \end{cases} \quad (5.20)$$

Параметр  $\tau$  визначають за виразом:

$$\tau = \frac{\eta}{\mu\lambda}, \quad (5.21)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт опору тертя.

Для математичного опису контакту між поверхнями КЕ застосовують метод штрафних функцій і метод множення Лагранжа [96–103]. Для сегменту поверхні, який міститься між чотирма вузлами, використовують послідовність процедур, що викладена нижче.

1. Виділення пари «підлеглий вузол – головний сегмент КЕ поверхні тіла з виконанням умови положення проекції підлеглого вузла на головний сегмент у першому або в четвертому квадранті локальної системи координат, встановленої на головному сегменті. Проекцію вузла на сегмент визначають як контактну точку, а відстань між підлеглим вузлом і контактною точкою називають проекційною відстанню. У разі взаємного розгляду вузла й сегменту площа останнього збільшується на незначну величину (близько 2 %) для надійності обчислень за контактним алгоритмом.

2. Обчислення координат контактної точки в локальній системі координат, пов'язаній із головним сегментом.

3. Визначення проекційної відстані в локальній системі головного сегменту.

4. За умови, коли проекційна відстань набуває негативного значення, його сприймають як глибину проникнення. За цим значенням обчислюють силу, яка впливає на підлеглий вузол, згідно з формулою [96–103]:

$$f_s = K_c \cdot \delta \quad (5.22)$$

де  $f_s$  – контактна сила, що діє в контактній точці;

$K_c$  – контактна жорсткість;

$\delta$  – глибина проникнення.

5. У вузлах головного сегменту обчислюють контактні сили за функцією форми КЕ, що залежать від положення точки контакту в локальній системі координат сегменту. Вирази для обчислення функції форми подано нижче [97].

$$f_m^i = N_i(\xi, \eta) \cdot f_s \quad \text{де} \quad \begin{cases} N_1 = 0.25(1 + \xi)(1 + \eta) \\ N_2 = 0.25(1 + \xi)(1 - \eta) \\ N_3 = 0.25(1 - \xi)(1 + \eta) \\ N_4 = 0.25(1 - \xi)(1 - \eta) \end{cases} \quad (5.23)$$

Контактну жорсткість обчислюють за виразом:

$$K_c = \frac{f_s A^2 k}{V_e}, \quad (5.24)$$

де  $f_s$  – величина штрафного фактору;  
 $A$  – площа головного сегменту;  
 $k$  – об'ємний модуль пружності;  
 $V_e$  – об'єм КЕ, до якого прилеглий сегмент.

### 5.2.5. Явний числовий метод розв'язання рівнянь динаміки.

Обчислення швидкостей у вузлових точках КЕ під час реалізації явного методу інтегрування рівнянь динаміки відбувається з використанням формули [98]:

$$\mathbf{v}^{n+0.5} = (\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^n) / \Delta t^{n+0.5} \Rightarrow \mathbf{u}^{n+1} = \mathbf{u}^n + \Delta t^{n+0.5} \mathbf{v}^{n+0.5} \quad (5.25)$$

Переміщення вузлових точок КЕ обчислюють із використанням формули:

$$\mathbf{x}^{n+1} = \mathbf{x}^0 + \mathbf{u}^{n+1} \quad (5.26)$$

Базовою формулою для обчислення прискорень вузлових точок КЕ (у разі апроксимації похідної за часом) кінцевими різницями є:

$$\mathbf{a}^n = (\mathbf{v}^{n+0.5} - \mathbf{v}^{n-0.5}) / \Delta t^n \Rightarrow \mathbf{v}^{n+0.5} = \mathbf{v}^{n-0.5} + \Delta t^n \mathbf{a}^n \quad (5.27)$$

У разі застосування поданих вище формул записують рівняння (5.11):

$$\mathbf{M} \mathbf{a}^n = \mathbf{F}^n; \quad \mathbf{F}^n = \sum_{e=1}^{en} (\mathbf{F}_e^{ext} - \mathbf{F}_e^{int}) \quad (5.28)$$

Прискорення вузлових точок КЕ обчислюють під час розв'язування системи лінійних алгебраїчних рівнянь із використанням оберненої матриці  $\mathbf{M}$ :

$$\mathbf{a}^n = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{F}^n \quad (5.29)$$

Поточний часовий крок обчислюють за допомогою числа Куранта – Фрідрікса – Леві, що визначають за формулою:

$$\Delta t \leq \Delta t_{crit} = \min \frac{l_e}{c_e}, \quad (5.30)$$

де  $c_e$  – параметр, який отримують за виразом:

$$c_e = \sqrt{E_e / \rho_e},$$

$l_e$  – просторовий крок сітки КЕ.

### 5.2.6. Основні відомості щодо типу та кінцевих елементів.

Для моделювання поведінки мінераловатного облицювання застосовують масивні гексаедричні КЕ типу SOLID із вісьма вузлами. Геометричну схему елемента представлено на рис. 5.6.

КЕ рівняння для визначення координат вузлів форми (5.16) записують так:

$$x_i(\mathbf{X}, t) = \bar{x}_i(\mathbf{X}(\xi, \eta, \zeta), t) = \sum_{j=1}^8 \phi_j(\xi, \eta, \zeta) x_i^j(t), \quad (5.31)$$

де  $\phi_j$  – параметрична функція форми для  $j$ -того вузла, що для КЕ цього типу обчислюють за формулою:

$$\phi_j = 0.125(1 + \xi\xi_j)(1 + \eta\eta_j)(1 + \zeta\zeta_j), \quad (5.32)$$

Параметри  $\xi_j, \eta_j, \zeta_j$  приймають згідно зі схемою на рис. 5.6.

Для цього типу КЕ інтерполяційну матрицю записують через вираз:

$$\mathbf{N}(\xi, \eta, \zeta) = \begin{bmatrix} \phi_1 & 0 & 0 & \phi_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \phi_1 & 0 & 0 & \phi_2 & \dots & \phi_8 & 0 \\ 0 & 0 & \phi_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & \phi_8 \end{bmatrix}, \quad (5.33)$$

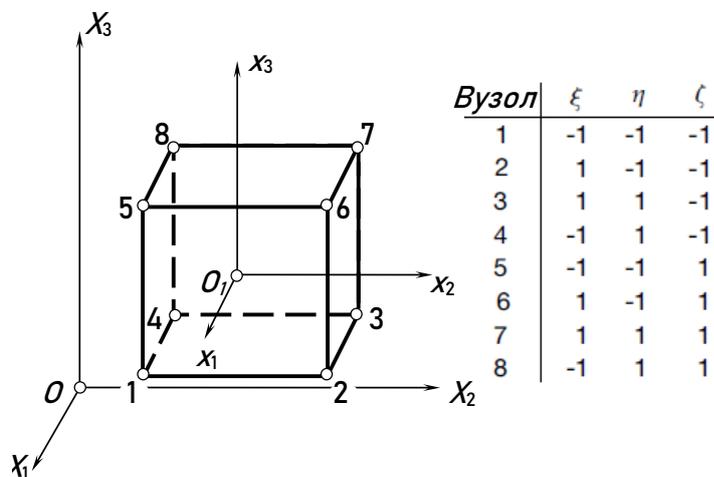


Рис. 5.6 Геометрія кінцевого елемента гексаедричного кінцевого елемента типу SOLID із вісьма вузлами

Вектор напружень записують у вигляді виразу:

$$\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yz} \quad \tau_{zx})^T \quad (5.34)$$

КЕ типу оболонки Беличка – Цая (Беличка – Ліна – Цая) [93–94] базовані на описі процесу динамічної взаємодії в КЕ на комбінацію обертання та лінійного зміщення точок разом із деформуванням. Ефективності застосування такого елемента досягають через математичне спрощення як результат двох кінематичних припущень, унаслідок уведення локальної системи координат, пов'язаної з КЕ цього типу. Швидкість деформації зумовлена тензором напружень Коши, що дає змогу уникнути труднощів під час врахування нелінійності процесу деформування.

Для формулювання основних геометричних та силових співвідношень у КЕ типу оболонки Беличка – Цая вводять локальну систему координат  $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ , орти якої  $\hat{e}_1, \hat{e}_2, \hat{e}_3$  визначають згідно зі схемою на рис. 5.7 [93–94].

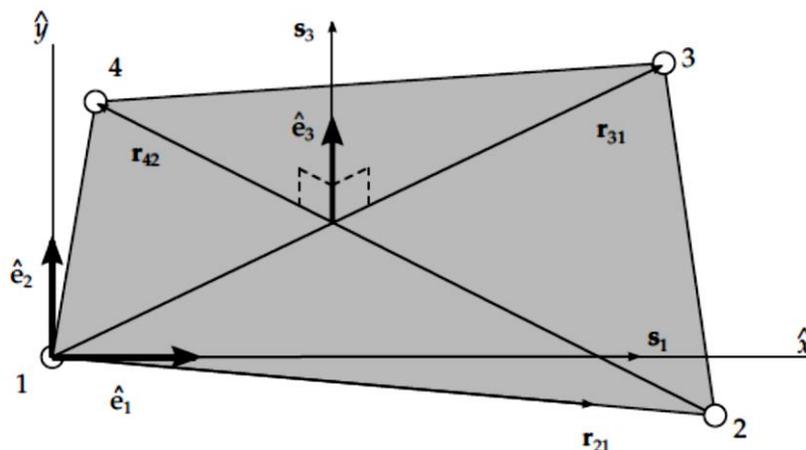


Рис. 5.7 Схема геометричних параметрів КЕ типу чотиривузлової оболонки Беличка – Цая

Описуючи основні співвідношення для КЕ типу оболонки Беличка – Цая, використовують теорію Міндліна [104], згідно з якою швидкість будь-якої точки, належної до КЕ цього типу, визначають за виразом:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}^m - \hat{z} \mathbf{e}_3 \times \boldsymbol{\theta}, \quad (5.35)$$

де  $\mathbf{v}^m$  – вектор швидкості серединної точки КЕ;  
 $\hat{z}$  – координата точки вздовж осі локальної системи координат;  
 $\boldsymbol{\theta}$  – вектор кутової швидкості.

**5.2.7. Основні відомості щодо моделей матеріалів.** Як модель матеріалу сталеві балки використовують термопружний матеріал із можливістю пластичних деформацій, діаграми деформування якого відповідають рекомендаціям другої частини Eurocode 3, форма яких охоплює тільки ділянку зростання й горизонтальну ділянку. Спадну гілку не беруть до уваги, оскільки її наявність суттєво не впливає на характер деформування сталеві балки, унаслідок переважання поперечних переміщень за умов втрати стійкості перерізу. Згідно з теоретичними положеннями для моделі матеріалу цього типу, що сформульовані в працях [105–108], пружні реакції, що виникають унаслідок поворотних деформацій перерізів обчислюють за формулою:

$$\sigma_{ij}^{\nabla} = C_{ijkl}(\dot{\varepsilon}_{kl} - \dot{\varepsilon}_{kl}^{\theta}) + \dot{\chi}_{ij}d\theta \quad (5.36)$$

Похідна параметру  $\dot{\chi}_{ij} = \frac{dC_{ijkl}}{d\theta} C_{klmn}^{-1} \dot{\sigma}_{mn}$ ,

$C_{ijkl}$  – утворювальна матриця, що визначають через вираз, до якого входить коефіцієнт Пуасона  $\mu$ :

$$C_{ijkl} = \frac{E}{(1+\mu)(1-\mu)} \begin{bmatrix} 1-\mu & \mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 1-\mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & \mu & 1-\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5-\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-\mu \end{bmatrix} \quad (5.37)$$

Швидкість температурної деформації визначають за коефіцієнтом температурного розширення  $\alpha$  з використанням формули:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{\theta} = \alpha \dot{\theta} \delta_{ij}, \quad (5.38)$$

де  $\delta_{ij}$  – елементи ідентифікаційного тензора.

Для ідентифікації настання пластичних деформацій використовують ізотропну функцію піддатливості:

$$\phi = 0.5 s_{ij} s_{ij} - \sigma_y(\theta)^2 3^{-1}, \quad (5.39)$$

де  $s_{ij}$  – елементи девіатора напружень;

$\sigma_y(\theta)$  – залежна від температури функція пластичного зміцнення.

Елементи девіатора напружень на наступному кроці інтегрування визначають за формулою:

$$s_{ij}^{n+1} = \frac{\sigma_y s_{ij}^*}{\sqrt{1.5 s_{ij}^* s_{ij}^*}} \quad (5.40)$$

На кожному кроці інтегрування значення ефективної пластичної деформації оновлюють за формулою:

$$\Delta \varepsilon_{\text{eff}}^p = \frac{\left(1 - \frac{\sigma_y}{\sqrt{1.5 s_{ij}^* s_{ij}^*}}\right) \sqrt{1.5 s_{ij}^* s_{ij}^*}}{G + 3E_p}, \quad (5.41)$$

де  $G$  – модуль зсуву;

$E_p$  – модуль зміцнення.

Для остаточної побудови моделі матеріалу були використані залежності механічних характеристик сталі відповідно до температури. У табл. 5.2 представлено коефіцієнти зниження основних механічних характеристик, згідно з рекомендаціями стандарту [108–117].

Таблиця 5.2

Коефіцієнти зниження механічних характеристик сталі

Температура сталі $\theta$ , °C	Коефіцієнт зниження розрахункової границі текучості, $k_{y,\theta} = \sigma_{y,\theta} / \sigma_y$	Коефіцієнт зниження межі пружності $k_{p,\theta} = \sigma_{p,\theta} / \sigma_y$	Коефіцієнт зниження для похилої лінійної ділянки пружних деформацій, $k_{e,\theta} = E_\theta / E$
20	1,000	1,000	1,000
100	1,000	1,000	1,000
200	1,000	0,807	0,900
300	1,000	0,613	0,800
400	1,000	0,420	0,700
500	0,780	0,360	0,600
600	0,470	0,180	0,310
700	0,230	0,075	0,130
800	0,110	0,050	0,090
900	0,060	0,0375	0,0675
1000	0,040	0,0250	0,0450
1100	0,020	0,0125	0,0225
1200	0,000	0,0000	0,0000

Коефіцієнт температурної деформації визначають на основі формули, залежно від температури:

$$\begin{aligned} \text{за } 20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta < 750\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \frac{\Delta l}{l} &= 1.2 \cdot 10^{-5} \theta + 0.4 \cdot 10^{-8} \theta^2 - 2.416 \cdot 10^{-4}, \\ \text{за } 750\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta < 860\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \frac{\Delta l}{l} &= 1.1 \cdot 10^{-2}, \\ \text{за } 860\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 1200\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \frac{\Delta l}{l} &= 2 \cdot 10^{-5} \theta - 6.2 \cdot 10^{-3} \end{aligned} \quad (5.42)$$

На рис. 5.8 подано графік залежності температурної деформації сталі, відповідно до температури.

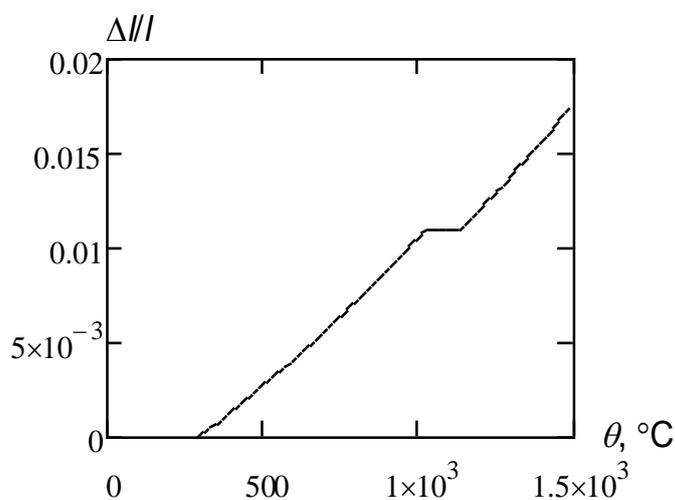


Рис. 5.8 Залежність температурної деформації сталі від температури

У процесі задання параметрів моделі матеріалу потрібно ввести коефіцієнт температурного розширення  $\alpha$ , відповідно до температурної деформації. На рис. 5.9 запропоновано графік залежності коефіцієнта температурного розширення від температури нагрівання, що вводять до моделі матеріалу.

У табл. 5.3 систематизовано основні дані стосовно сталі балки, що взята до розрахунку [108].

Таблиця 5.3  
Механічні характеристики сталі балки

Матеріал	Міцність, МПа	Модуль пружності, МПа	Коеф. Пуассона
Сталь С 245	245	$2,1 \cdot 10^5$	0,3

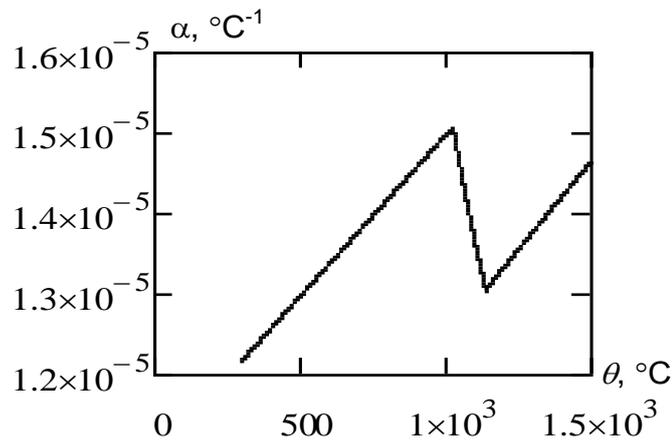


Рис. 5.9 Залежність коефіцієнта температурного розширення сталі від температури

На підставі отриманих даних побудовано діаграми деформування для різних температур нагрівання під впливом теплового режиму пожежі. Діаграми представлено на рис. 5.10.

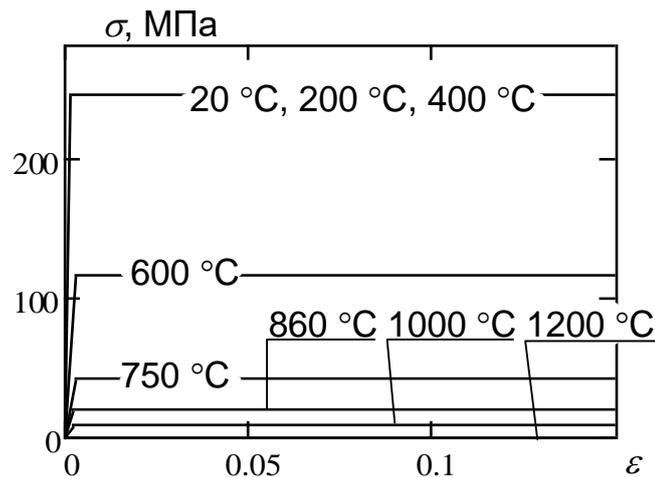


Рис. 5.10 Діаграми деформування сталі S245 залежно від температури нагрівання

Для опису нелінійної поведінки матеріалу мінераловатних пластин вогнезахисного облицювання застосовують модель матеріалу Блатц – Ко [97]. Цей матеріал описує нелінійну поведінку матеріалу типу спіненої гуми за допомогою напружень Піулі – Кірхгофа, що обчислюють за формулою:

$$S_{ij} = G \left( V^{-1} C_{ij} - V^{-\frac{1}{1-2\mu}} \delta_{ij} \right), \quad (5.43)$$

тут  $C_{ij}$  – члени правого тензора деформацій Коши – Гріна, що обчислюють за допомогою виразу:

$$C_{ij} = \frac{\partial x_k}{\partial X_i} \frac{\partial x_k}{\partial X_j} \quad (5.44)$$

Основні механічні характеристики [98], необхідні для зазначення параметрів моделі матеріалу Блатц – Ко, узагальнено в табл. 5.4.

Таблиця 5.4

Механічні характеристики мінераловатного облицювання

Матеріал	Міцність на відрив, МПа	Міцність на зсув, МПа	Модуль пружності, МПа	Модуль зсуву, МПа	Коеф. Пуассона
Мінеральної вата	0,04	0.05	11,704	4	0,463

За напруженнями Піоли – Кірхгофа визначають компоненти тензора напружень Коши:

$$\sigma_{ij} = \frac{\rho}{\rho_0} \frac{\partial x_k}{\partial X_i} \frac{\partial x_k}{\partial X_j} S_{kl} \quad (5.45)$$

Коефіцієнт Пуасона для цього матеріалу становить  $\mu = 0,463$ .

## РОЗДІЛ 6. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ СТАЛЕВОЇ БАЛКИ З ВОГНЕЗАХИСНИМ ОБЛИЦЮВАННЯМ ІЗ МІНЕРАЛЬНОЇ ВАТИ ЗА УМОВ ВПЛИВУ СТАНДАРТНОГО ТЕМПЕРАТИВНОГО РЕЖИМУ ПОЖЕЖІ

### 6.1. Початкові дані щодо розрахунку напружено-деформованого стану сталеві балки з вогнезахисним облицюванням із мінеральної вати

6.1.1. Геометричні та конструктивні параметри сталеві балки з вогнезахисним облицюванням із мінеральної вати. Для моделювання напружено-деформованого стану (НДС) сталеві балки з вогнезахисним облицюванням із мінеральної вати використано геометричні параметри перерізу, що описані в попередніх розділах роботи. Довжина балки – 6 м. На рис. 6.1 подано геометричну схему досліджуваної балки.

Особливістю конструкції є наявність елементів кріплення, що являють собою мінераловатні пластини, до яких приклеюють бокові мінераловатні пластини вогнезахисного облицювання. Нижню мінераловатну пластину приклеюють безпосередньо до нижньої полиці двотаврової сталеві балки. Представлена на рис. 6.1 геометрична схема була дискретизована на кінцеві елементи. Сіткова модель зображена на рис. 6.2.

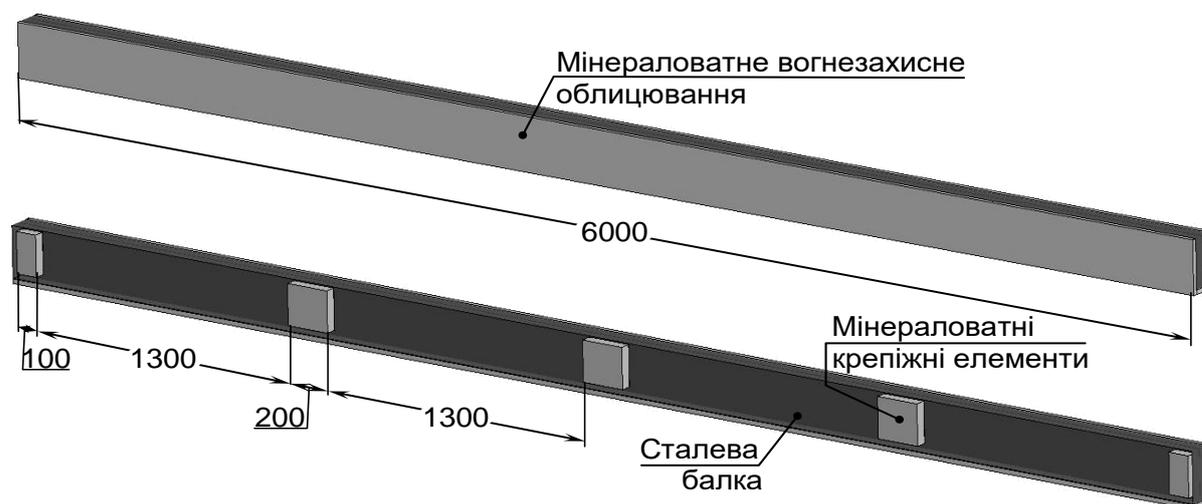


Рис. 6.1 Конструктивна схема сталеві балки з вогнезахисним облицюванням із мінеральної вати

Особливістю кінцево-елементної моделі полягає в тому, що сталеві балка розбита на оболонкові чотири вузлові елементи типу «SHELL» із п'ятьма точками інтегрування по товщині, згідно з формулюванням Беличко – Цая [1, 2, 4]. Розрахункова ділянка, відповідно до вогнезахисного мінераловатного облицювання, була

розбита на восьмивузлові масивні КЕ типу «SOLID». Матеріал сталеві балки – пружно-пластичний матеріал, що дає змогу враховувати температурні деформації [89].

Матеріал мінераловатного облицювання відповідає моделі Блатц – Ко спіненої гуми [98]. У табл. 6.1 репрезентовано кількісні характеристики щодо КЕ кінцево-елементної моделі сталеві балки з вогнезахисним облицюванням із мінеральної вати.

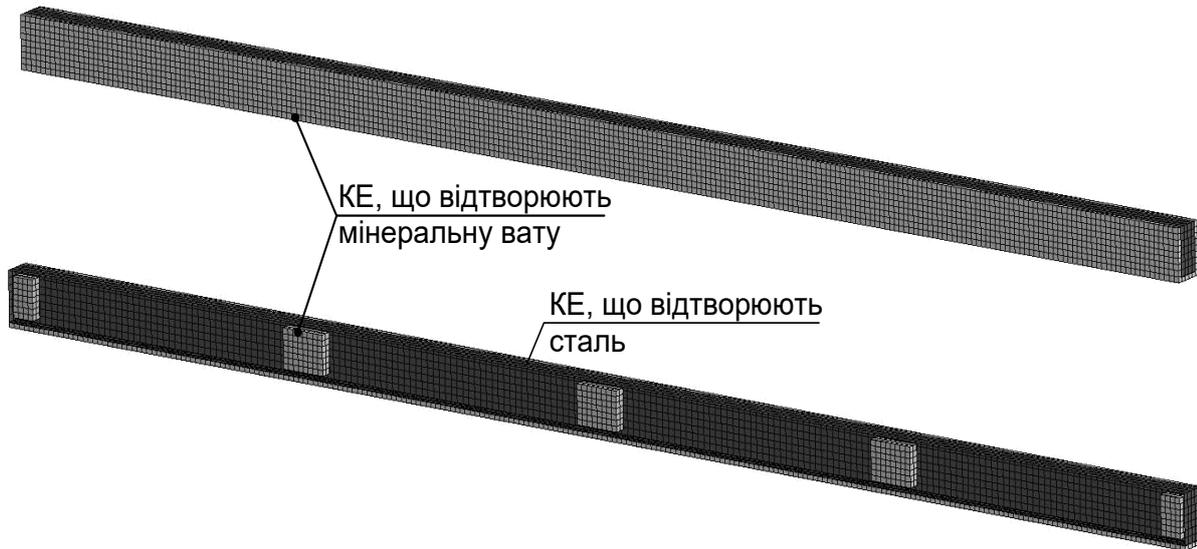


Рис. 6.2 Кінцево-елементна схема сталеві балки з вогнезахисним облицюванням із мінеральної вати

Таблиця 6.1

Кількісні характеристики кінцево-елементної моделі сталеві балки з вогнезахисним облицюванням із мінеральної вати

Кількість КЕ	Кількість оболонкових КЕ типу «SHELL»	Кількість масивних КЕ типу «SOLID»
9232	3056	6176

**6.1.2. Граничні умови й початкові дані щодо кінцево-елементної моделі.** У ході розрахунку прийнято припущення, що ймовірний відрив вогнезахисного облицювання відбувається не по клейовому шву, а по прилеглих шарах мінераловати, тобто руйнування є когезійним. Таке припущення базоване на тому факті, що міцність клейового шва суттєво перевищує міцність на відрив і на зсування мінераловати. Це враховано засобами програмного середовища «LS-DYNA» під час опису контактної взаємодії між елементами моделі. Параметри контактної взаємодії зображено на рис. 6.3.

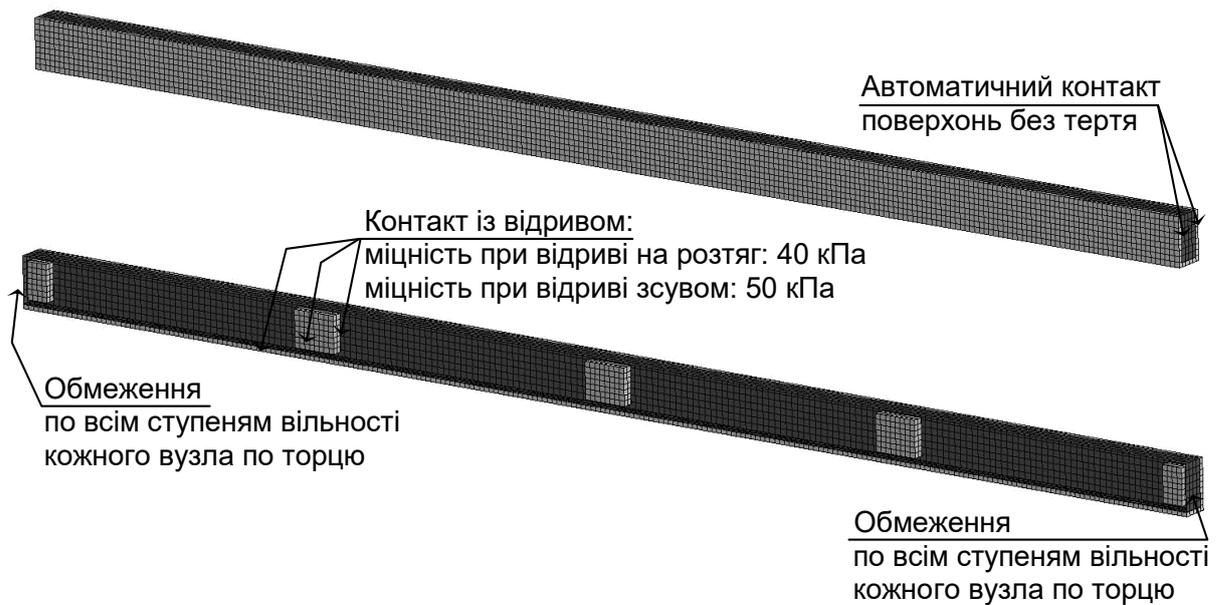


Рис. 6.3 Схема контактної взаємодії між елементами сталеві балки з вогнезахисним облицюванням із мінеральної вати

На схемі рис. 6.2 також наведено умови закріплення балки, що полягають в обмеженні всіх ступенів вільності кожного вузла по обох торцях кінців балки.

Перед прикладанням температурного навантаження сталеву балку навантажують послідовно власною вагою та розподіленим навантаженням, що мають діяти протягом усього часового інтервалу розрахунку (17,5 с). Фактор часу тут має умовну величину, що передбачає перерахунок на реальний час вогневого впливу стандартного температурного режиму пожежі 150 хв.

На схемі прикладення навантажень сталеві балки з вогнезахисним облицюванням із мінеральної вати (рис. 6.3) проілюстровано тип і напрямок прикладеного навантаження.

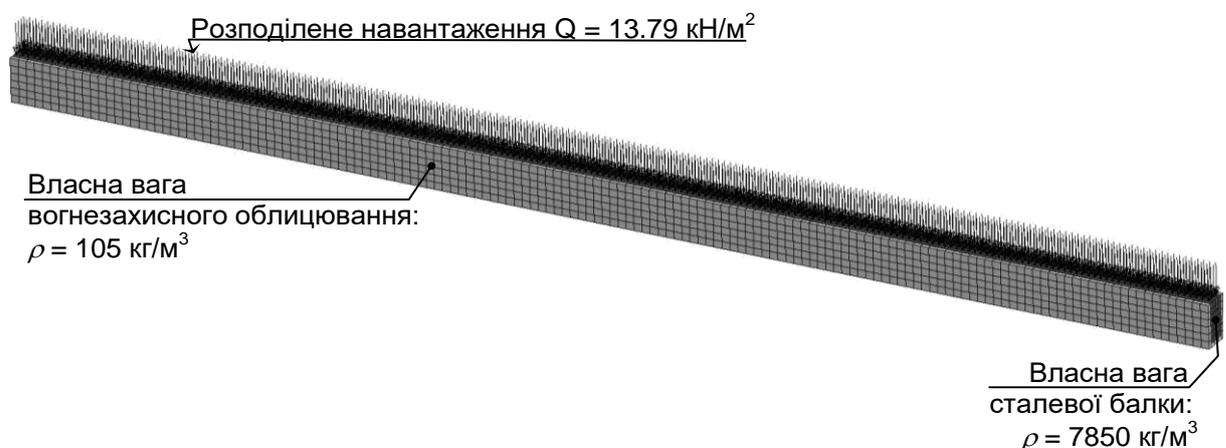


Рис. 6.3 Схема прикладання механічного навантаження до сталеві балки з вогнезахисним облицюванням із мінеральної вати

Величина розподіленого навантаження вибрана за коефіцієнтом навантаження  $\mu = 0,2$  й визначена за формулою:

$$Q = 8 \frac{\mu \cdot f_y \cdot W_x}{B \cdot l^2}, \quad (6.1)$$

де  $l = 6$  м – довжина балки між опорами.

Момент опору перерізу  $W_x$  визначають за формулою:

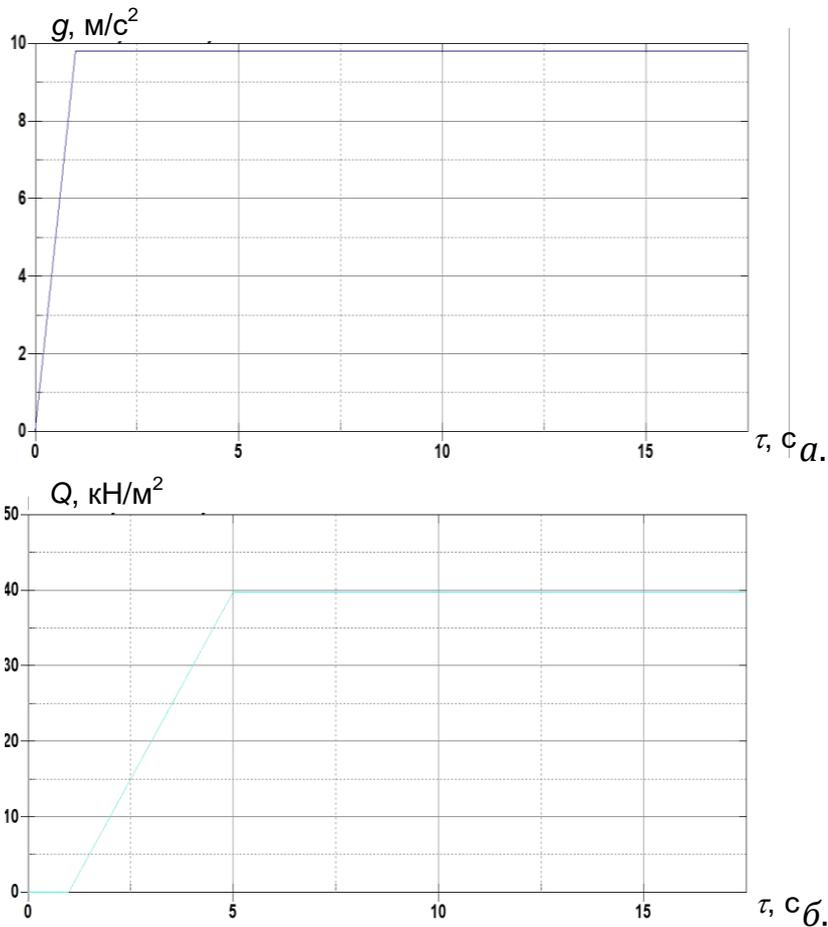
$$W_x = \frac{2J_x}{H}, \quad J_x = \frac{Bt^3}{6} + \frac{B \cdot t \cdot (H - 2t)^2}{2} + \frac{s \cdot (H - 2t)^3}{12}, \quad (6.2)$$

де  $H = 0,2$  м,  $B = 0,1$  м – висота та ширина двотаврового перерізу;

$t = s = 0.006$  м – товщина полиці й стінки двотавра;

$J_x$  – момент інерції двотаврового перерізу балки.

Навантаження прикладене послідовно згідно з графіками, які наведені на рис. 6.4. На графіках помітно, що спочатку протягом 1 с прикладали власну вагу, потім упродовж 4 с – діюче розподілене навантаження, а потім – температурне навантаження.



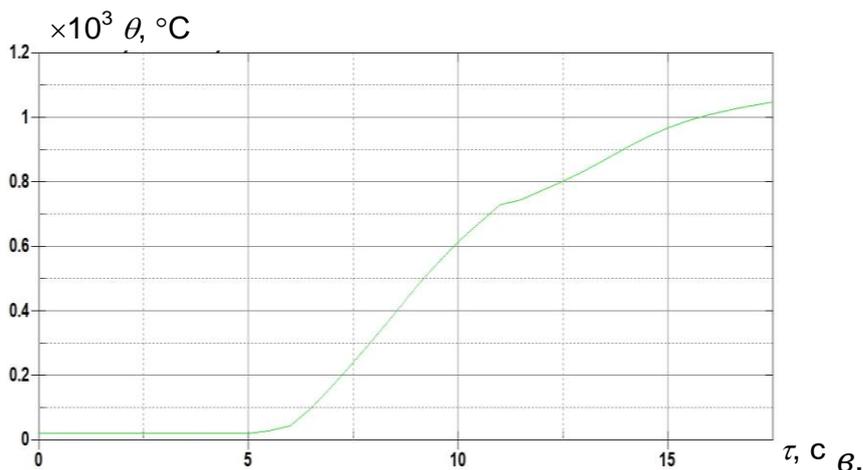


Рис. 6.4 Графіки залежності прикладених навантажень від часу: а – графік прискорення вільного падіння для врахування власної ваги; б – графік прикладення розподіленого навантаження; в – графік прикладення температурного навантаження

Для унеможливлення впливу коливальних динамічних ефектів під час прикладення навантажень на етапі прикладення власної ваги розрахунок відбувався з використанням динамічної релаксації за обчислювальним алгоритмом Пападракакіса [99]. Інші процеси були розраховані з увімкненою опцією глобального демпфування з коефіцієнтом 0,16.

## 6.2. Результати чисельного дослідження поведінки сталеві балки з вогнезахисним облицюванням із мінеральної вати в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі

Після розрахунку отримано результати щодо поведінки сталеві балки з вогнезахисним облицюванням із мінеральної вати в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі.

У разі динамічного розрахунку навантаження прикладають у період 17,5 с, що відповідає пришвидшеному процесу дії пожежі 150 хв., згідно з рис. 6.2. Для компенсації динамічних ефектів, що полягають у наявності зайвих коливальних рухів, використано опцію демпфування, як описано вище. З огляду на криві навантаження, представлені на рис. 6.4, на рис. 6.5, зіставлено шкали розрахункового часу й часу реального впливу пожежі.

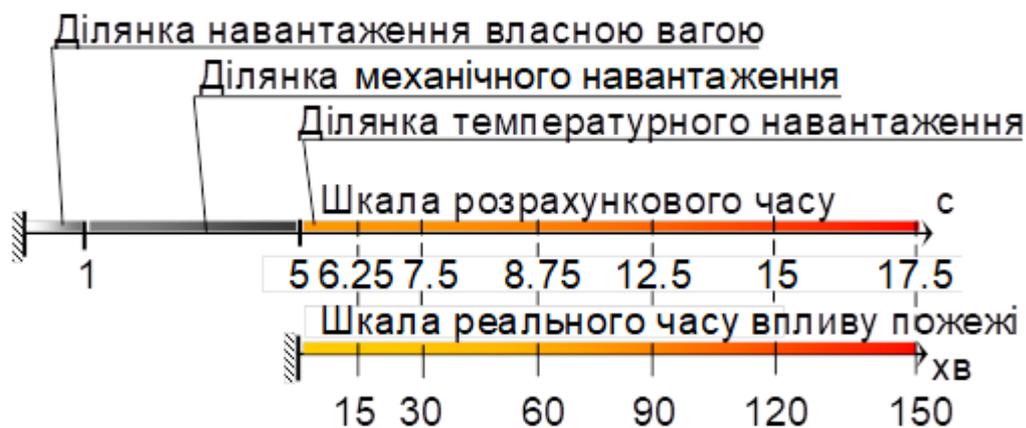


Рис. 6.5 Зіставлення шкал розрахункового часу та реального часу впливу пожежі

На рис. 6.6 зображено розподіл нормальних напружень уздовж поздовжньої осі в досліджуваній балці на етапах прикладення механічного навантаження.

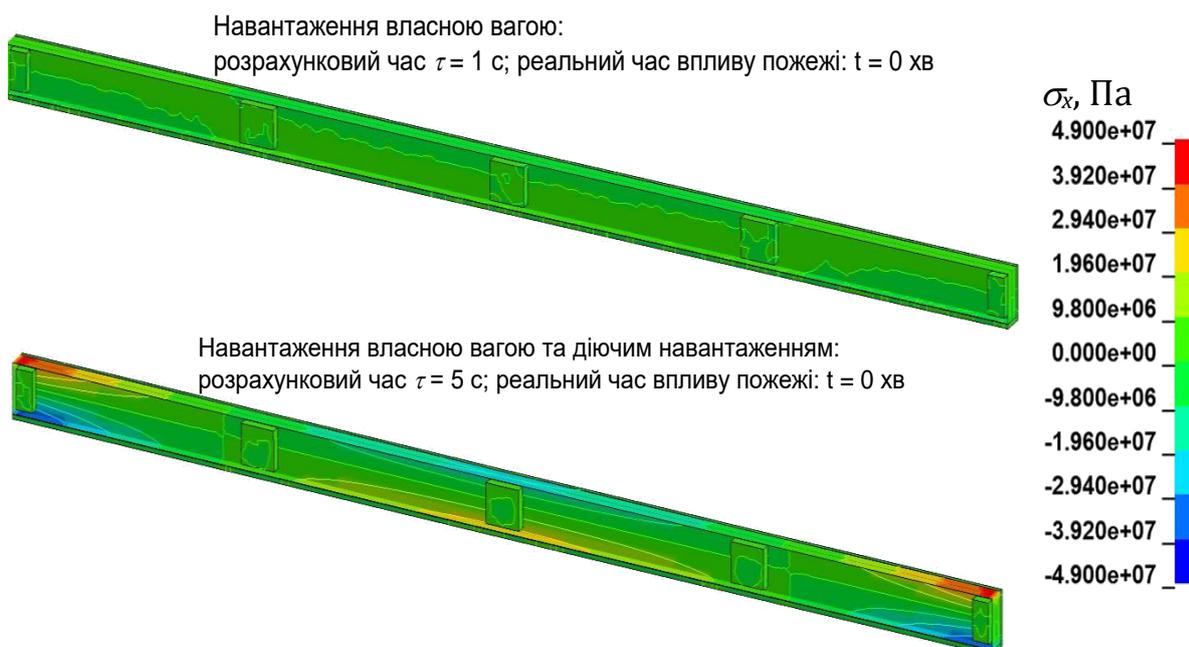


Рис. 6.6 Розподіл поздовжніх нормальних напружень на різних етапах прикладення механічного навантаження

На рис. 6.7 представлено розподіл нормальних напружень на поздовжньої осі в досліджуваній балці на етапах прикладення температурного навантаження.

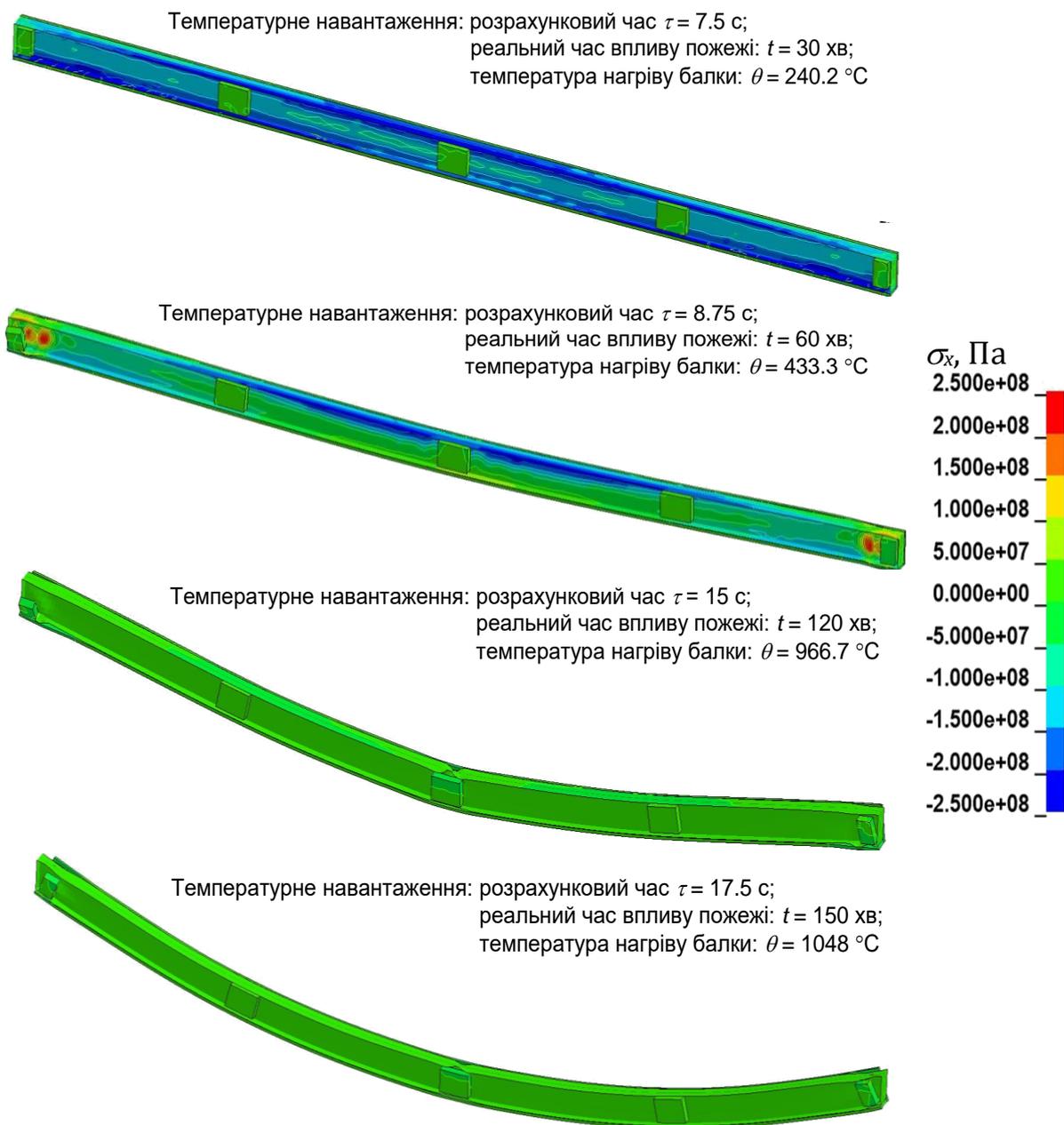


Рис. 6.7 Розподіл поздовжніх нормальних напружень на різних етапах прикладення температурного навантаження

Аналізуючи розподіли поздовжніх напружень, зображених на рис. 6.6 та рис. 6.7, зазначимо, що перед початком дії температурного навантаження найбільший рівень напружень у балці становить близько 50 МПа, тобто близько  $0,2f_y$ . Це підтверджує коректність результатів напружено-деформованого стану, що передуює прикладанню температурного навантаження.

На етапі прикладення температурного навантаження помітно, що найбільшого рівня близько 280 МПа напруження досягають приблизно на 30 хв. за температури нагрівання балки 240 °C. Після цього вони починають локалізуватися у вузьких зонах, засвідчуючи нарощування в наступному етапі пластичних деформацій, які

концентруються поблизу закріплених кінців балки. На 60 хв. впливу пожежі зафіксоване відшарування закріплювальних мінераловатних елементів. За температури 433 °С помітна активна деструкція вогнезахисного облицювання. За температури 967 °С з'являються ознаки місцевої втрати стійкості у вигляді складок у полицях та стінці двотаврової балки посередині й по її закріплених кінцях. Також зафіксоване подальше відшарування закріплювальних елементів мінераловатного вогнезахисного облицювання.

На рис. 6.8 подано графіки зміни максимального прогину балки та швидкості нарощування максимального прогину, залежно від часу впливу стандартного температурного режиму пожежі.

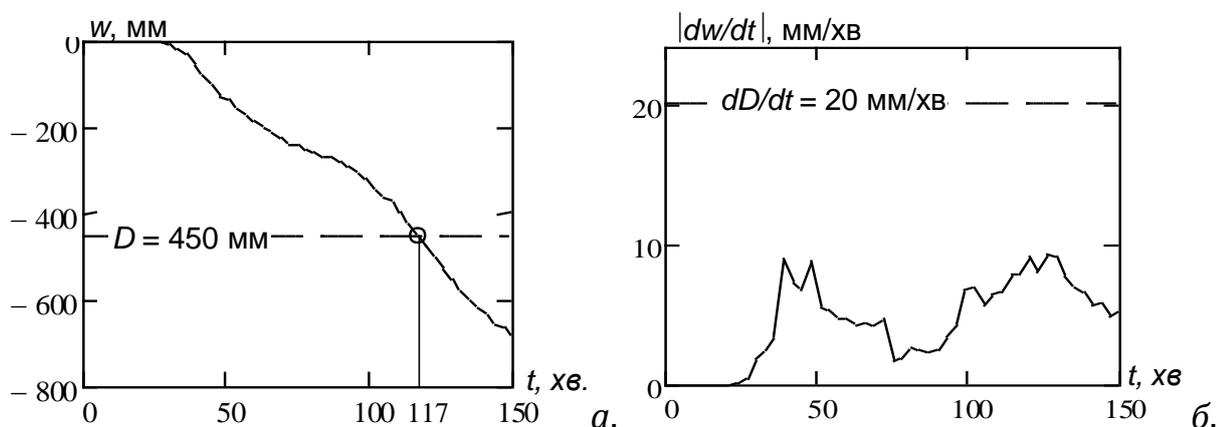


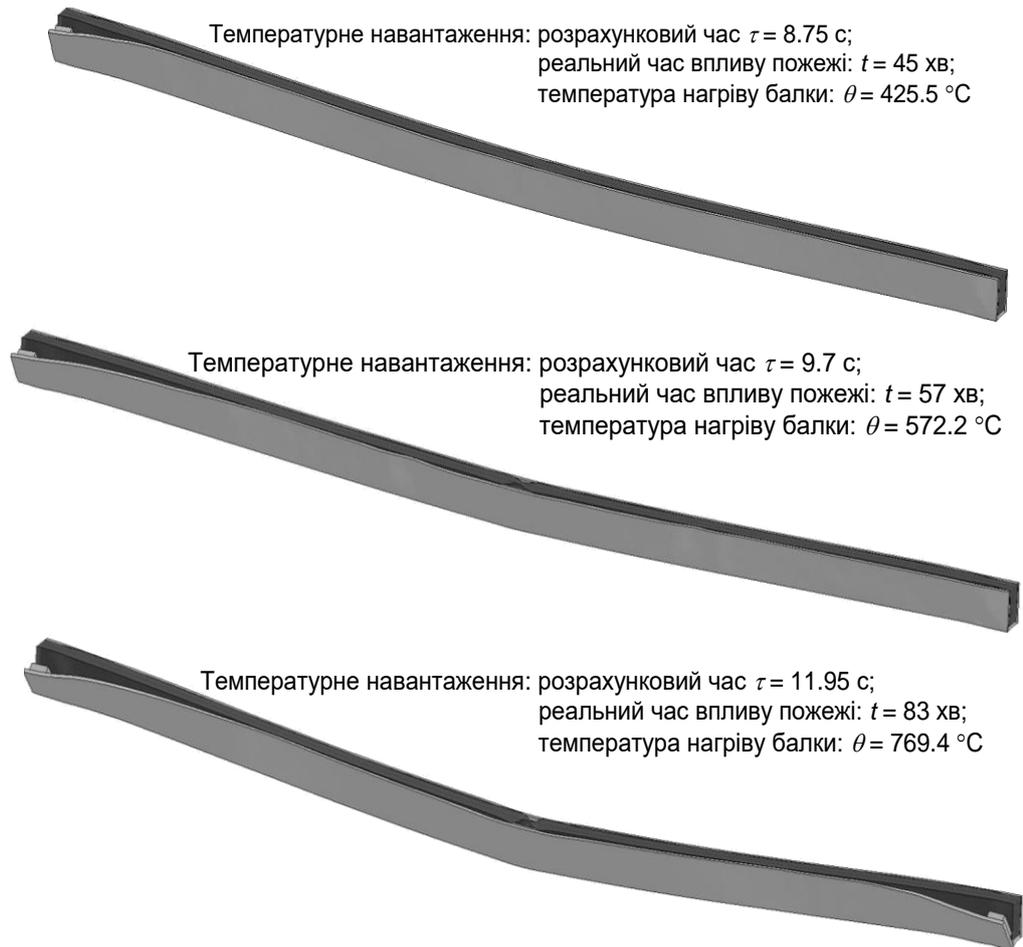
Рис. 6.8 Графіки зміни максимального прогину балки (а) та швидкості нарощування максимального прогину (б), залежно від часу впливу стандартного температурного режиму пожежі

На рис. 6.8 зафіксовано критичні значення максимального прогину  $D$  балки та швидкості нарощування максимального прогину балки, у разі перевищення яких фіксують настання втрати несучої здатності. Критичні значення обчислені за формулами, що рекомендовані в стандарті [7]:

$$D = \frac{l^2}{400H}, \quad \frac{dD}{dt} = \frac{l^2}{9000H} \quad (6.3)$$

Відповідно до графіків, поданих на рис. 6.8, зроблено висновок, що настання стану втрати вогнестійкості за несучою здатністю відбувається на 117 хв. впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Для вивчення цілісності вогнезахисного мінераловатного облицювання сталеві балки досліджено положення й геометричну форму облицювання в різні моменти часу впливу стандартного температурного режиму пожежі, що систематизовано на рис. 6.9.



*Рис. 6.9 Положення та геометрична форма облицювання в різні моменти впливу стандартного температурного режиму пожежі*

Аналіз переміщення частин вогнезахисного мінераловатного облицювання досліджуваної сталеві балки засвідчує, що відшарування облицювання починається після 40 хв. теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі. Для фіксування моменту, коли вогнезахисне покриття втрачає свою цілісність і не може виконувати захисні функції, можна скористатися ознаками втрати цілісності огорожувальних конструкцій. Відповідно до ДСТУ Б В.1.1-4-98\* [7], втрата цілісності настає тоді, коли утворюються наскрізні отвори або тріщини, через які можуть поширюватися продукти горіння, полум'я тощо. Стан втрати цілісності контролюють за трьома ознаками: загорання або тління зі свіченням ватного тампона, що піднесений до необігрівної поверхні зразка в місця тріщин на відстань від 20 мм до 30 мм протягом часу не менше ніж 30 с; виникнення тріщини, через яку можна вільно (без додаткових зусиль) увести в піч щуп діаметром 6 мм і перемістити його вздовж цієї тріщини на відстань не менше як 150 мм; виникнення тріщини (або отвору), через яку можна вільно ввести в піч щуп діаметром 25 мм; полум'я на необігрівній поверхні зразка простежуване протягом проміжку часу не менше ніж 10 с. Із цих ознак природно

використовувати ознаку розкриття тріщини на 25 мм. Такий критерій приймаємо для контролю настання стану, за якого відшарування вогнезахисного покриття є критичним для зберігання вогнезахисної здатності.

Для виявлення критичного стану відшарування вогнезахисного облицювання з втратою вогнезахисної здатності були побудовані графіки зміни координат верхньої крайньої точки вогнезахисного облицювання на лівому кінці балки, що представлено на рис. 6.10. Це місце вибране з огляду на рис. 6.8. За отриманими координатами точок був обчислений зазор між точками балки, що збігаються, та облицюванням за формулою [7]:

$$s = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2}, \quad (6.4)$$

$x_1, y_1, z_1$  – координати поточного положення верхньої крайньої точки вогнезахисного облицювання на лівому кінці балки;

$x_0, y_0, z_0$  – координати поточного положення верхньої крайньої точки лівого кінця балки.

Графіки зазору залежно від часу впливу стандартного температурного режиму пожежі та температури нагріву подано також на рис. 6.10.

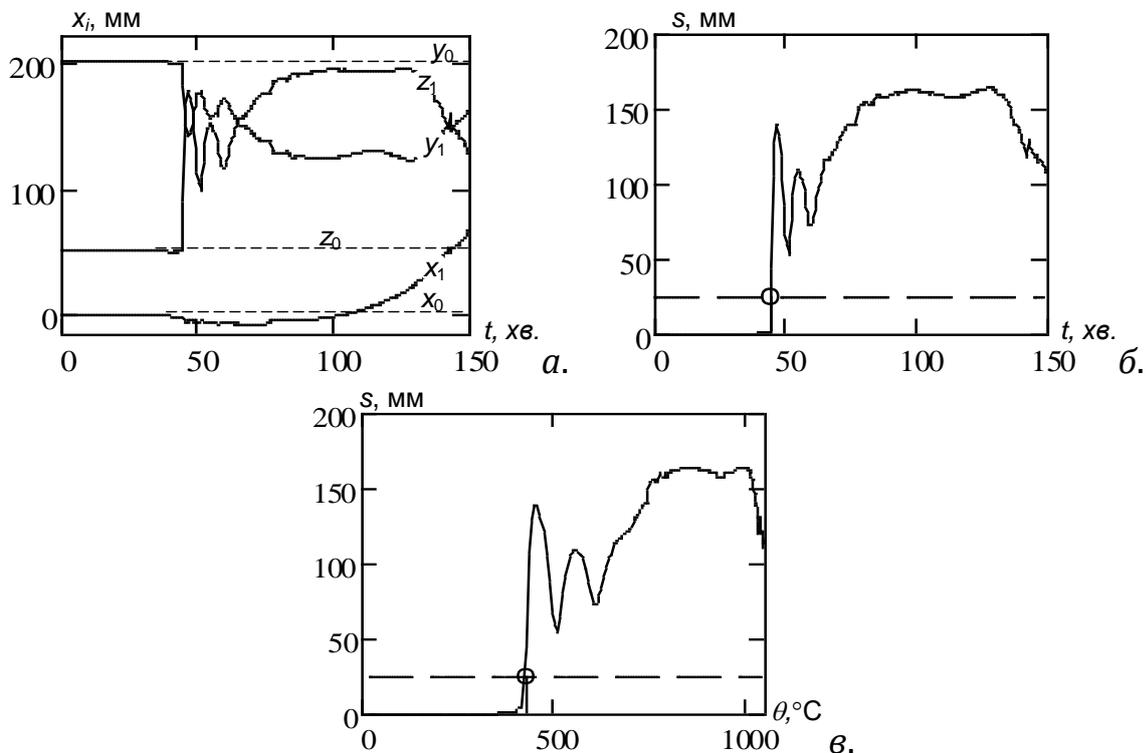


Рис. 6.10 Графіки зміни величини максимального зазору за координатами (а); графік нарощування максимального зазору, залежно від часу пожежі (б); графік нарощування максимального зазору, залежно від температури нагріву балки (в)

На графіках позначений момент розкриття зазору під час відшарування завбільшки 25 мм. Виявлено, що розкриття зазору між балкою й облицюванням завбільшки 25 мм простежуване в момент 44,5 хв. за температури нагрівання сталеві балки 425 °С.

Порівнюючи рис. 6.8 і рис. 6.10, зазначимо, що втрата теплоізолювальної здатності вогнезахисним облицюванням відбувається раніше на 73 хв., за настання граничного стану втрати вогнестійкості за несучою здатністю. Отже, розрахунок потрібно проводити до цього значення, з огляду на дію вогнезахисту. Після цього вогнезахисну дію вогнезахисного облицювання не можна врахувати, оскільки його вважають відшарованим.

**РОЗДІЛ 7**  
**МЕТОД ОЦІНКИ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ БАЛОК ІЗ**  
**МІНЕРАЛОВАТНИМ ВОГНЕЗАХИСНИМ ОБЛИЦЮВАННЯМ ІЗ**  
**ВРАХУВАННЯМ ЙОГО ВТРАТИ ЦІЛІСНОСТІ**

**7.1. Визначення температурного режиму прогрівання сталевієї балки за умови втрати цілісності вогнезахисного покриття**

У ході обчислення температурного режиму пожежі потрібно зважати на факт втрати цілісності вогнезахисного облицювання внаслідок теплового впливу пожежі. Цього можна досягти за умови застосування формули збільшення температури  $\Delta\theta_{a,t}$  за проміжок часу  $\Delta t$ , що має такий вигляд [10]:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p}{V d_p c_a \rho_a} \cdot \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1 + \phi/3)} \cdot \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \cdot \Delta\theta_{g,t} \quad (\Delta\theta_{a,t} \geq 0 \text{ при } \Delta\theta_{g,t} > 0),$$

(7.1)

тут  $\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} \cdot d_p A_p / V$ ,

де  $A_p / V$  – коефіцієнт перерізу сталевієї балки з вогнезахисною системою на основі мінеральної вати;

$c_a$  – температурна залежність питомої теплоємності сталі (Дж/(кг·°C)) (див. табл. 4.1);

$c_p = 1000$  – питома теплоємність мінераловатного вогнезахисного облицювання, що не є температурозалежною (Дж/(кг·K));

$d_p$  – товщина мінераловатної плити вогнезахисної системи (м);

$\Delta t = 30$  – проміжок часу (с);

$\theta_{a,t}$  – поточне значення температури сталі в певний момент часу  $t$  (°C);

$\theta_{g,t}$  – температура газового середовища в приміщенні з пожежею в момент часу  $t$  (°C);

$\Delta\theta_{g,t}$  – зростання поточної температури газового середовища в приміщенні з пожежею за проміжок, рівний кроку за часом  $\Delta t$  (°C);

$\lambda_p$  – температурна залежність коефіцієнта теплопровідності мінераловатного облицювання вогнезахисної системи (Вт/(м·°C));

$\rho_a = 7850$  – густина сталі (кг/м<sup>3</sup>);

$\rho_p = 200$  – густина мінераловатного облицювання вогнезахисної системи (кг/м<sup>3</sup>).

Формулу (7.1) застосовують до моменту, коли мінераловатне облицювання вогнезахисної системи зберігає свою цілісність, тобто до моменту 44,5 хв. впливу стандартного температурного режиму пожежі та за температури нагрівання сталеві балки 425 °С. Після цього вважають, що мінераловатне облицювання втрачає свою цілісність. Тоді потрібно використовувати формулу, яка визначає підвищення температури  $\Delta\theta_{a,t}$  за проміжок часу  $\Delta t$  [10]:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \cdot \frac{A_m}{V_{ca}\rho_a} \cdot \dot{h}_{net} \Delta t, \quad (7.2)$$

де  $k_{sh}$  – коректувальний коефіцієнт, що враховує вплив ефекту затінення балки іншими конструкціями;

$\dot{h}_{net}$  – розрахункове значення сумарного питомого теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>.

Сумарний питомий тепловий потік визначають за виразом [10]:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r}, \quad (7.3)$$

де  $\dot{h}_{net,c}$  – сумарний питомий тепловий потік конвективного теплообміну;

$\dot{h}_{net,r}$  – сумарний питомий тепловий потік променистого теплообміну.

Сумарний питомий тепловий потік конвективного теплообміну, Вт·м<sup>-2</sup>, що обчислюють за виразом [10]:

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m), \quad (7.4)$$

де  $\alpha_c = 25$  – коефіцієнт тепловіддачі під час конвективного теплообміну, Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-1</sup>;

$\theta_g$  – температура навколишнього газового середовища під час пожежі поблизу балки, °С;

$\theta_m$  – температура обігрівної поверхні сталеві балки, °С.

Сумарний тепловий потік у разі променистого теплообміну, Вт·м<sup>2</sup>, що обчислюють за таким виразом [59, 98]:

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot ((\theta_g + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4), \quad (7.5)$$

де  $\Phi = 1$  – форм-фактор опромінення сталеві балки;

$\varepsilon_m$  – ступінь чорноти поверхні сталеві балки;

$\varepsilon_f = 1$  – ступінь чорноти випромінювання газового середовища пожежі;

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$  – константа Стефана – Больцмана.

За такого підходу обчислення виразу (7.2) проводять з огляду на початкову температуру, яка рівна температурі, що обчислена в момент втрати цілісності вогнезахисного мінераловатного облицювання за формулою (7.1).

Унаслідок застосування підходу, проведені розрахунки та побудований режим прогрівання сталеві балки з мінераловатним облицюванням, за умови його втрати цілісності на 44,5 хв. за температури нагрівання сталеві балки 472 °С, згідно з розрахунками, описаними в п. 6.1 роботи. Отриманий температурний режим подано на рис. 7.1.

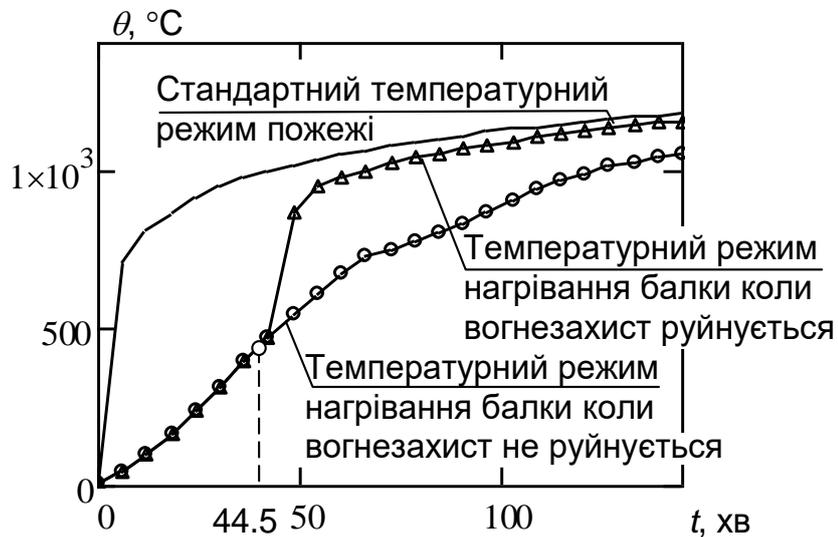


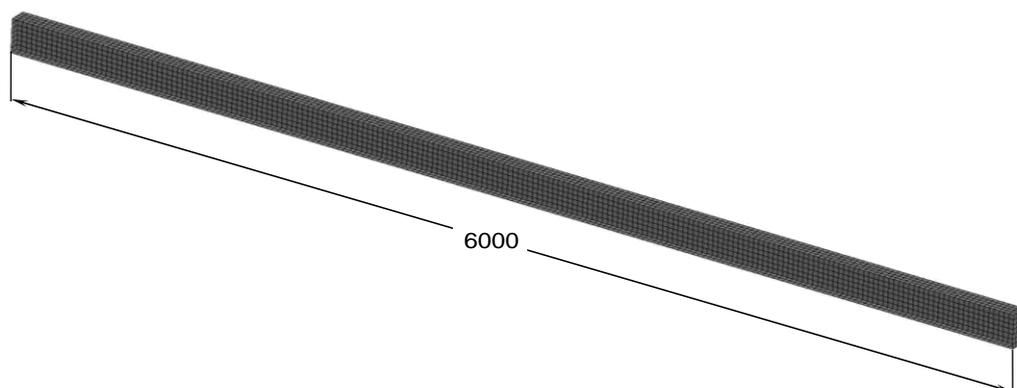
Рис. 7.1 Температурний режим нагрівання сталеві балки з мінераловатним вогнезахисним облицюванням за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі, без урахування та з урахуванням втрати цілісності вогнезахисним мінераловатним облицюванням

Аналізуючи графік на рис. 7.1, помічаємо, що, починаючи з 45 хв., температура сталеві балки підвищується й практично за 5 хв. наближається до температурної кривої стандартного температурного режиму пожежі. Отриманий режим можна використовувати для розрахунку несучої здатності сталеві балки за умов, що розуміють втрату вогнезахисної здатності мінераловатним облицюванням унаслідок порушення його цілісності.

## 7.2. Визначення межі вогнестійкості сталеві балки за умови втрати цілісності вогнезахисного покриття

Для визначення межі вогнестійкості сталеві балки за умови, коли вогнезахисне облицювання втрачає свою вогнезахисну здатність як результат втрати цілісності, були використані положення розрахунку, що представлені в п. 5.2.1. Зникає необхідність моделювати наявне вогнезахисне облицювання, оскільки температурний режим прогрівання сталеві балки визначений.

Для моделювання напружено-деформованого стану (НДС) сталеві балки з вогнезахисним облицюванням із мінеральної вати, що в певний момент часу втрачає свою вогнезахисну здатність унаслідок втрати цілісності, були використані геометричні параметри перерізу, описані в попередніх розділах роботи. Довжина балки, як і в попередньому випадку, становить 6 м. На рис. 7.2 представлено кінцево-елементну схему досліджуваної балки.



*Рис. 7.2 Конструктивна схема сталеві балки у випадку, коли вогнезахисне покриття втрачає свою вогнезахисну здатність у разі втрати цілісності*

Особливість кінцево-елементної моделі полягає в тому, що сталеві балка розбита на оболонкові чотири вузлові елементи типу «SHELL» із п'ятьма точками інтегрування по товщині у формулюванні Белічка – Цая [93–94]. Матеріал сталеві балки – пружно-пластичний, що дає змогу брати до уваги температурні деформації [93–94].

У табл. 7.1 представлено кількісні характеристики щодо КЕ кінцево-елементної моделі сталеві балки.

Таблиця 7.1

Кількісні характеристики кінцево-елементної моделі сталеві балки

Кількість КЕ	Кількість оболонкових КЕ типу «SHELL»
3056	3056

Сталеву балку попередньо перед прикладанням температурного навантаження навантажують послідовно власною вагою та діючим розподіленим навантаженням, що діють протягом усього часового інтервалу розрахунку, який становить 17,5 с. Фактор часу тут також має умовну величину, що перераховують на реальний час вогневого впливу стандартного температурного режиму пожежі 150 хв.

На схемі прикладення навантажень сталевій балці з вогнезахисним облицюванням із мінеральної вати, що представлена на рис. 7.3, зображений тип і напрямок прикладеного навантаження та умови закріплення кінців балки.

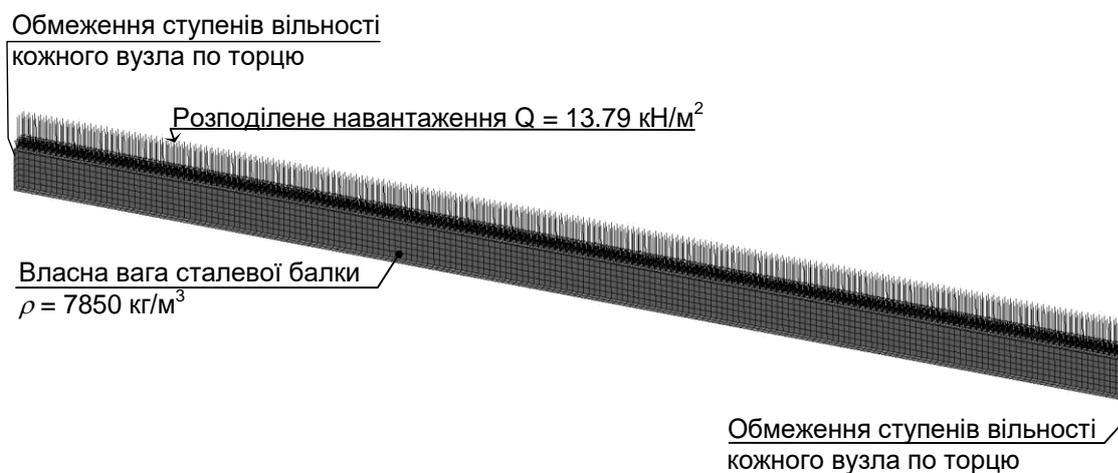


Рис. 7.3 Схема прикладання механічного навантаження до сталеві балки та умови закріплення

Величина розподіленого навантаження прийнята за коефіцієнтом навантаження  $\mu = 0,2$ .

Матеріал балки відповідає даним, зазначеним у п. 5.2.7, у табл. 5.2 і табл. 5.3, а також на рис. 5.9 та рис. 5.10.

Навантаження прикладено послідовно згідно з графіками, які представлені на рис. 6.4. Для унеможливлення впливу коливальних динамічних ефектів під час прикладення навантажень за прийнятий час процесу, на етапі прикладення власної ваги розрахунок проведений із використанням динамічної релаксації за обчислювальним алгоритмом Пападракакіса [95]. Інші процеси були розраховані з увімкненою опцією глобального демпфування з коефіцієнтом 0,16.

Криві навантаження, зображені на рис. 6.4, на рис. 6.5, також використані для цього випадку сталеві балки. Шкали розрахункового часу й часу реального впливу пожежі зіставлені аналогічно, що подано на рис. 6.5.

Після проведення розрахунку отримані результати, систематизовані та представлені на рис. 7.4 у вигляді графіків зміни максимального прогину балки та швидкості нарощування максимального прогину, залежно від часу впливу стандартного температурного режиму пожежі.

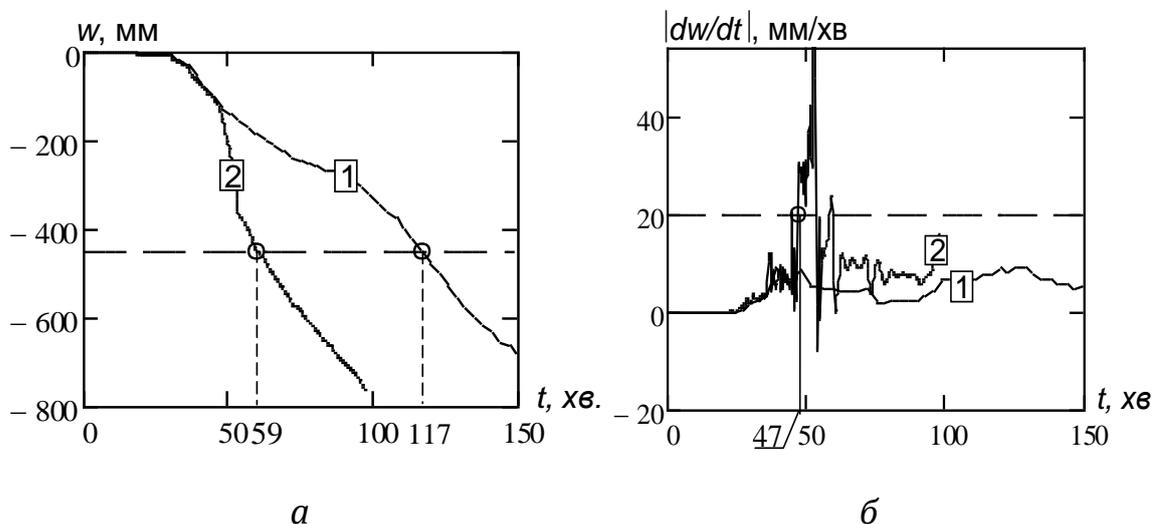


Рис. 7.4 Графіки зміни максимального прогину балки (а) та швидкості нарощування максимального прогину (б) залежно від часу впливу стандартного температурного режиму пожежі: 1 – для балки з мінераловатним вогнезахистом, що не втрачає своєї цілісності; 2 – для балки з мінераловатним вогнезахистом, що втрачає свою цілісність і вогнезахисну здатність.

Критичні значення величин максимального прогину та швидкості нарощення прогину визначені за формулами (6.3). Вони дорівнюють величинам, обчисленим для попереднього випадку, оскільки геометричні параметри балки не змінилися.

На графіках, зображених на рис. 7.4, помітно, що втрата межі вогнестійкості настає на 59 хв. за графіком максимального прогину та на 47 хв. за графіком наростання максимальної швидкості. Останнє настання часу граничного стану втрати несучої здатності на 70 хв. менше за умови неврахування втрати вогнезахисної здатності мінераловатним вогнезахистом, унаслідок втрати цілісності. Це посилює важливість урахування можливої втрати цілісності будь-яким вогнезахисним облицюванням, зокрема мінераловатним, або менше, ніж удвічі. Крім того, у разі втрати цілісності вогнезахисним облицюванням існує ризик шокowego теплового впливу на сталеву балку, що засвідчує графік швидкості наростання максимального прогину сталевій балці під час втрати вогнезахисної здатності мінераловатним облицюванням.

Для вивчення впливу конструктивних параметрів сталевих балок із мінераловатним вогнезахистом на межу вогнестійкості

проведено розрахунки, що охоплюють процедури, які описані у двох останніх розділах та відтворюють подану нижче послідовність.

1. Для балки з певними конструктивними параметрами визначають температурний режим прогріву балки при впливі впливу стандартного температурного режиму пожежі за формулою (7.1).

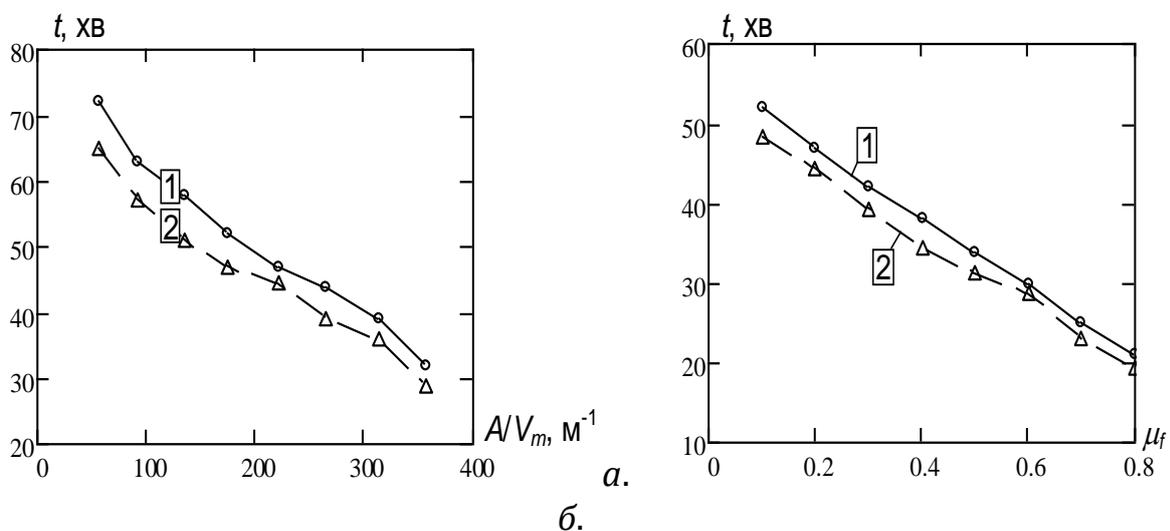
2. На підставі використання математичного апарату (5.2) – (5.44), математичного опису властивостей матеріалів, що представлено в п. 5.2.7, у табл. 7.2, табл. 7.3 і табл. 7.4, а також на рис. 7.9 та рис. 7.10, розраховують момент часу впливу стандартного температурного режиму пожежі, за якого відбувається відшарування вогнезахисного мінераловатного облицювання від балки.

3. Із використанням формул (7.1) – (7.5) будують новий температурний режим нагріву сталеві балки, з урахуванням моменту часу, коли відбувається відшарування вогнезахисного мінераловатного облицювання від балки, що подібне до наведеного на рис. 7.1.

4. З огляду на математичний апарат (5.2) – (5.41) і математичний опис властивостей матеріалів, що запропоновані в п. 5.2.7, у табл. 5.2 та табл. 5.3, а також на рис. 5.9 і рис. 5.10, розраховують межу вогнестійкості, як зображено на рис. 7.4.

Після розрахунку за цією методикою отримано результати у вигляді залежності часу відшарування вогнезахисного облицювання та межі вогнестійкості від конструктивних параметрів сталевих балок із вогнезахистом на основі мінераловатного облицювання: коефіцієнта перерізу балки, рівня навантаження й товщини мінераловатного облицювання. Отримані графіки представлено на рис. 7.5.

Аналіз графіків доводить, що межа вогнестійкості корелює з вибраними параметрами, її залежність від них близька до лінійної.



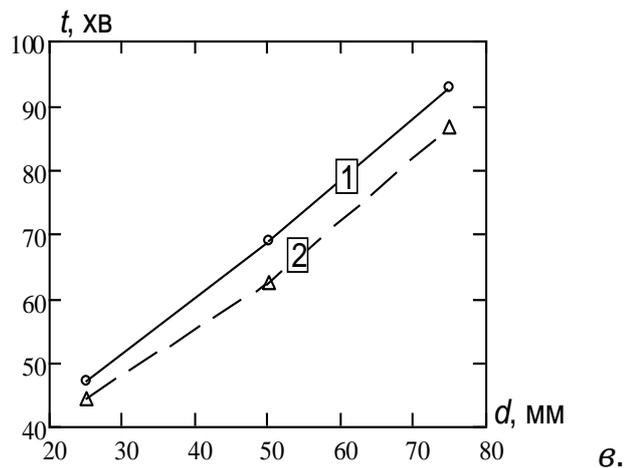


Рис. 7.5 Графіки залежності межі вогнестійкості сталевих балок з вогнезахисним мінераловатним облицюванням (1) та часу настання відшарування вогнезахисного мінераловатного облицювання (2): а – від величини коефіцієнта перерізу балки; б – від рівня прикладеного навантаження; в – від товщини вогнезахисного мінераловатного облицювання.

### 7.3. Методика проведення повного факторного експерименту

Необхідно запропонувати метод проектування сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним облицюванням, що беруть до уваги в разі втрати його цілісності та вогнезахисної здатності внаслідок теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі, потрібно розробити систему поправочних коефіцієнтів, що знижують значення межі вогнестійкості внаслідок раптового руйнування вогнезахисної системи. Доцільно використати регресійну модель, що побудована на основі повного факторного експерименту.

Для побудови регресійної залежності запропоновано план чисельного експерименту зі значущими й незалежними параметрами, що мають найбільший вплив у разі настання відшарування вогнезахисного мінераловатного облицювання. З огляду на виконані дослідження, результати яких подані вище в попередніх розділах роботи, такими незалежними факторами виявилися коефіцієнт перерізу сталевих балок з мінераловатним вогнезахистом  $A/V_m$ , товщина шару вогнезахисного мінераловатного облицювання  $d$  та коефіцієнт навантаження  $\mu_f$ . У табл. 7.2 подано границі інтервалів описаних факторів для здійснення чисельного повного факторного експерименту.

Таблиця 7.2

Діапазони варіювання факторів у чисельному повному факторному експерименті

Коефіцієнт перерізу балки, $A/V_m, \text{м}^{-1}$			Товщина шару вогнезахисного облицювання, мм			Коефіцієнт навантаження		
Найменше значення, $A/V_{m-1}$	Середнє значення, $A/V_{m0}$	Найбільше значення, $A/V_{m1}$	Найменше значення, $d_{-1}$	Середнє значення, $d_0$	Найбільше значення, $d_1$	Найменше значення, $\mu_{-1}$	Середнє значення, $\mu_0$	Найбільше значення, $\mu_1$
56	206	356	25	50	75	0,1	0,5	0,8

Вивчення графіків на рис. 7.5 засвідчило, що залежність межі вогнестійкості й часу настання відшарування вогнезахисного мінераловатного облицювання від найбільш значущих конструктивних параметрів сталеві балки наближена до лінійних. Це слугує основою гіпотези про те, що регресійна залежність межі вогнестійкості за граничним станом втрати несучої здатності для сталевих балок із вогнезахисним мінераловатним облицюванням також може бути прийнята лінійною. Найбільш значущі конструктивні параметри сталеві балки з мінераловатним вогнезахисним облицюванням, визначені для побудови регресійної моделі, є незалежними за фізичною природою.

З огляду на висловлені припущення, регресійна модель, що виявляє залежність межі вогнестійкості сталеві балки з мінераловатним вогнезахисним облицюванням за граничним станом втрати несучої здатності від визначених конструктивних параметрів, має такий вигляд [113]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1x_2x_3, \quad (7.6)$$

де  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7$  – коефіцієнти регресійної залежності.

Для обчислення коефіцієнтів регресійної моделі (7.6) має бути відтворено 8 чисельних експериментальних ситуацій. Результати чисельних експериментів для реалізації розрахунків повинні бути

отримані за ортогональним планом, що відповідає матриці плану, яка представлена в табл. 7.3.

Таблиця 7.3

Матриця ортогонального плану повнофакторного експерименту

№	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$
1	+	+	+	+	+	+	+
2	-	+	+	-	-	+	-
3	+	-	+	-	+	-	-
4	-	-	+	+	-	-	+
5	+	+	-	+	-	-	-
6	-	+	-	-	+	-	+
7	+	-	-	-	-	+	+
8	-	-	-	+	+	+	-

Для розрахунків під час проведення повнофакторного експерименту був застосований математичний апарат, що описаний вище в попередньому та в цьому розділах роботи. Використано методику визначення межі вогнестійкості з урахуванням зміни температурного режиму нагрівання сталеві балки з вогнезахисним мінераловатним облицювання в разі відшарування останнього. Також застосовано обчислювальну методику розрахунку несучої здатності сталевих балок із визначеними конструктивними параметрами, що описана в попередньому пункті розділу. Загальні конструктивні параметри сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним облицюванням та механічні характеристики конструкційної сталі балок систематизовано в табл. 7.4.

Таблиця 7.4

Основні параметри сталевих балок із вогнезахисним облицюванням на основі мінераловатних плит

Параметр	Позначення	Значення	Од. виміру
Геометричні розміри: - ширина перерізу; - висота; - ширина захисного шару; - довжина	$b$ $h$ $d$ $l$	100 200 (див. табл. 5.2) 6000	мм
Матеріал покриття	Мінераловатні пластини		
Густина сталі	$\rho_c$	7860	кг/м <sup>3</sup>
Густина мінераловати	$\rho_v$	200	кг/м <sup>3</sup>

## Продовження таблиці 7.4

Теплофізичні характеристики		(див. табл. 4.1 та табл. 4.2)	
Гранична вологість	$u$	< 3	%
Гранична міцність сталі	$f_{c,0,k}$	245	МПа
Середній модуль пружності сталі	$E$	$2 \cdot 10^5$	МПа

На підставі конструктивних параметрів сталевих балок, що подані в табл. 7.4, відповідно до матриці ортогонального плану за табл. 7.3, виконано обчислення. Одержано межі вогнестійкості досліджуваних сталевих балок із вогнезахисним облицюванням на основі мінераловатних плит. Результати проведених обчислень систематизовано в табл. 7.5.

Таблиця 7.5

Межі вогнестійкості сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним облицюванням за результатами повнофакторного експерименту

Експериментальна ситуація	1	2	3	4	5	6	7	8
Межа вогнестійкості без відшарування, $U_{1i}$ , хв.	122	154	69	119	141	181	102	133
Межа вогнестійкості з відшаруванням, $U_{2i}$ , хв.	48	86	24	56	64	106	35	69
Час відшарування вогнезахисного облицювання, $t_c$ , хв.	44,1	78	22,5	49	52	91	32	57

На основі показників табл. 7.4 визначено коефіцієнти регресійної залежності (7.9) із використанням формул, які наведені нижче [113]:

$$\begin{aligned}
 b_0 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i; \quad b_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 y_i; \quad b_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_2 y_i; \\
 b_3 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_3 y_i; \quad b_4 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_2 y_i; \\
 b_5 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_3 y_i; \quad b_6 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_2 x_3 y_i; \quad b_7 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_2 x_3 y_i,
 \end{aligned}
 \tag{7.7}$$

де  $N = 8$  – кількість експериментів згідно з планом;

$x_i$  – величина параметру відповідно до матриці плану (див. табл. 7.3);

$u_i$  – величина похибки межі вогнестійкості сталевих балок із вогнезахисним мінераловатним облицюванням за табл. 7.5.

Результати обчислень щодо розрахунку коефіцієнтів регресії подано в табл. 7.6.

Таблиця 7.6

Коефіцієнти регресії для часу відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання сталевої балки

Коефіцієнт	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$
Значення (кодовані)	53,2	-15,55	13,075	-4,8	-2,675	0,45	-0,425	0,825
Значення (реальні)	44,4	-0,0599	0,725	-4,813	$-8,76 \cdot 10^{-3}$	-0,0314	-0,178	$6,29 \cdot 10^{-4}$

Унаслідок застосування одержаної регресійної залежності, відтворено поверхні залежності часу відшарування вогнезахисного мінераловатного облицювання сталевих балок від вибраних найбільш значущих конструктивних параметрів, у ході завдання різних значень товщини вогнезахисного облицювання, які подані на рис. 7.6. На побудованих поверхнях зображено рівні, що відповідають різним значенням часу відшарування вогнезахисного мінераловатного облицювання.

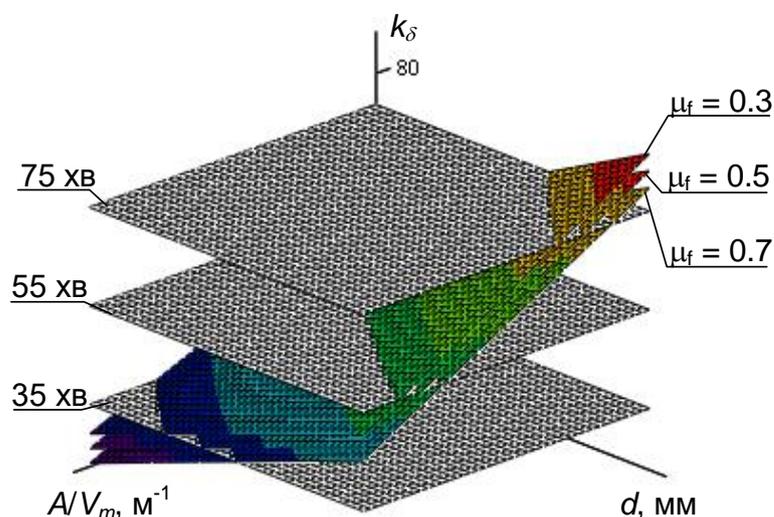


Рис. 7.6 Поверхні залежності часу відшарування вогнезахисного мінераловатного облицювання для визначення межі вогнестійкості сталевих балок для різних значень діючого навантаження

Для вивчення впливу найбільш значущих конструктивних параметрів сталевих балок на час відшарування вогнезахисного мінераловатного облицювання були побудовані взаємні залежності конструктивних параметрів за умови трьох можливих величин

товщини вогнезахисного мінераловатного облицювання: 25 мм, 50 мм та 75 мм, що кратні половині товщини мінераловатної плити. На рис. 5.7 подано одержані номограми.

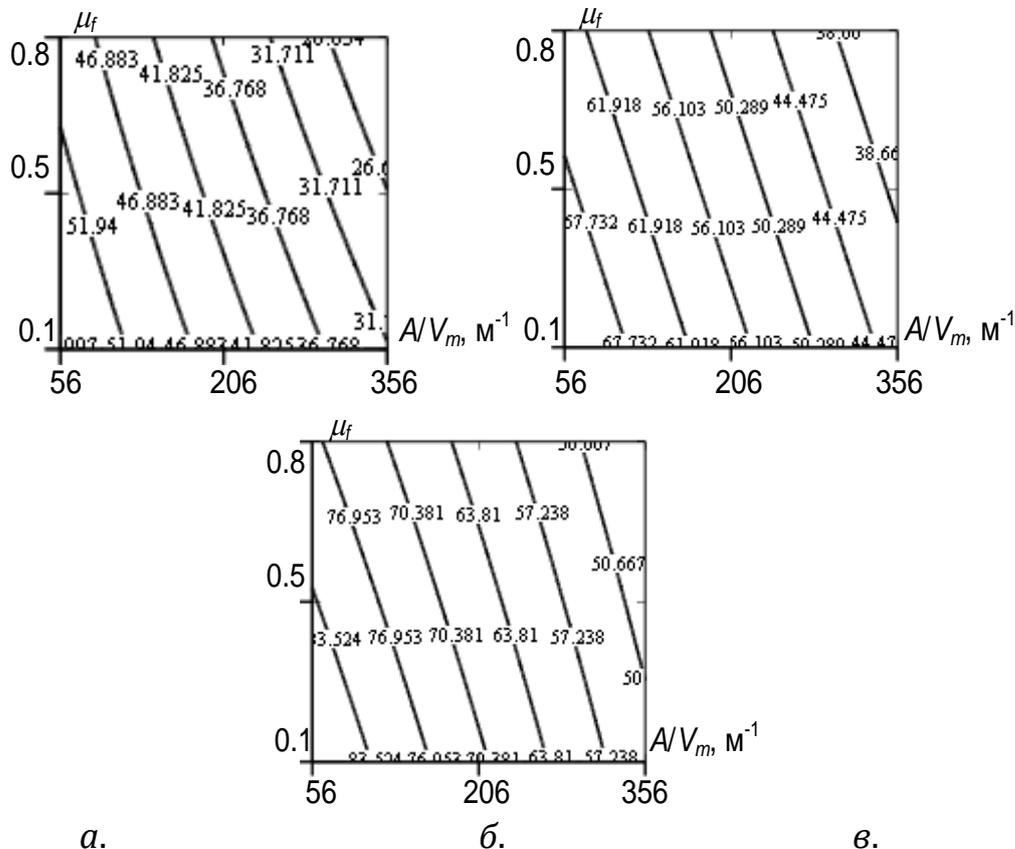


Рис. 7.7 Залежності часу відшарування вогнезахисного мінераловатного облицювання сталеві балки від коефіцієнта перерізу та коефіцієнта навантаження для різних значень його товщини: а – 25 мм; б – 50 мм; в – 75 мм.

Отримані дані дають змогу визначити межі вогнезахисту балок з урахуванням відшарування мінераловатного облицювання для забезпечення необхідної нормованої вогнестійкості.

#### 7.4. Методика розрахункової оцінки вогнестійкості сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним облицюванням, з урахуванням його відшарування

У межах методу проектування сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним облицюванням запропоновано розрахункову методику, що базована на визначенні часу відшарування вогнезахисного облицювання й використанні його в розрахунках. Ця методика передбачає послідовність розрахункових процедур.

1. На підставі використання коефіцієнта перерізу балки, коефіцієнта навантаження й товщини мінераловатного

вогнезахисного облицювання, згідно з номограмами, представленими на рис. 7.7, визначають час відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання.

2. На основі величини часу відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання сталеві балки та формул (7.1) – (7.5) визначають режим нагріву сталеві балки за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі, що подібний до зображеного на рис. 7.1.

3. Із застосуванням отриманого температурного режиму нагріву сталеві балки та методики, рекомендованої EN 1993-1-2:2005, оцінюють клас вогнестійкості досліджуваної сталеві балки.

## ВИСНОВКИ

У науковому дослідженні наведено результати вирішення актуальної науково-практичної задачі щодо удосконалення розрахункового методу оцінки вогнестійкості сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним облицюванням із врахуванням можливості його відшарування під час пожежі, і як наслідок втрати вогнезахисної здатності. Для цього розкрито закономірності залежності часу настання моменту відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання у залежності від конструктивних параметрів сталевих балок із таким типом вогнезахисту. В якості основних результатів винесено такі положення.

1. Аналіз статистичних даних щодо пожеж в Україні показав, що існує високий рівень обвалень будівельних конструкцій внаслідок пожежі, у тому числі з причин їх невідповідності вимогам протипожежних будівельних норм. Джерелом таких невідповідностей може слугувати раптова втрата вогнезахисної здатності вогнезахисних облицювань сталевих балок з причин його відшарування. Точне прогнозування такого стану дозволяє суттєво підвищити пожежну безпеку вогнезахисених сталевих балок, зокрема за допомогою мінераловатного матеріалу.

2. Для вивчення температури нагрівання сталевих балок із вогнезахисним мінераловатним облицюванням було розроблено експериментальну методику вогневих випробувань та проведені відповідні експериментальні дослідження. На основі результатів проведених досліджень було отримано закономірність часу досягнення критичної температури у вигляді регресійної залежності від значення критичної температури  $\theta_{кр}$  та товщини  $d_p$  вогнезахисного мінераловатного облицювання  $U = 33,938 + 1,397 \cdot d_p - 0,081 \cdot \theta_{кр} + 2,35 \cdot 10^{-3} d_p \cdot \theta_{кр}$  і на її основі побудована відповідна номограма. Отримана узагальнена температурна залежність коефіцієнта теплопровідності мінераловатного вогнезахисного облицювання у табличній формі, яка може бути використана для розрахунку температури у сталевих конструкціях із таким вогнезахистом у діапазоні його товщини до 80 мм для питомої теплоємності 1000 Дж/(кг·°С) та густини 200 кг/м<sup>3</sup>.

3. Розроблено методику описання поведінки мінераловатного облицювання сталевої балки на основі рівнянь динаміки та їх реалізації за допомогою метода кінцевих елементів. Використовуючи дану методику була досліджена поведінка сталевої балки із мінераловатним вогнезахисним облицюванням у час впливу стандартного температурного режиму пожежі у період часу від 0 до 150 хв.

4. Виявлено, що розкриття зазору між балкою та мінераловатним вогнезахисним облицюванням завбільшки 25 мм спостерігається у момент часу 44,5 хв. при температурі нагрівання сталеві балки 425 °С при цьому, такий стан виникає раніше на 73 хв. за настання граничного стану втрати вогнестійкості за несучою здатністю, що необхідно враховувати при розрахунках.

5. Розроблена методика розрахунку несучої здатності сталеві балки з мінераловатним вогнезахисним облицюванням, що відшаровується у певний момент часу впливу стандартного температурного режиму пожежі, у результаті чого показано, що межа вогнестійкості балки наступає на 59 хв. за графіком максимального прогину та на 47 хв. за графіком наростання максимальної швидкості, що на 70 хв. раніше, ніж результат отриманий за умови відсутності відшарування.

6. Встановлені закономірності і побудована математична модель зміни часу відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання в залежності від їх коефіцієнту перерізу  $A/V_m$ , товщини мінераловатного облицювання  $d$  та рівня навантаження  $\mu_f$ , що має вигляд

$$t_c = 44,4 - 0,0599 \cdot A/V_m + 0,725 \cdot d - 4,813 \mu_f - 8,76 \cdot 10^{-3} \cdot A/V_m \cdot d - 0,0314 \cdot A/V_m \mu_f - 0,178 \cdot d \cdot \mu_f + 6,29 \cdot 10^{-4} \cdot A/V_m \cdot d \mu_f.$$

7. Побудовані номограми для визначення часу відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання сталевих балок в залежності від їх коефіцієнту перерізу та рівня навантаження при трьох величинах товщини мінераловатного вогнезахисного облицювання.

8. На основі отриманої регресійної залежності та відповідних номограм розроблена розрахункова методика оцінки вогнестійкості сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним облицюванням із використанням величини часу його відшарування та рекомендацій другої частини Єврокоду 3.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Аналітичний огляд стану техногенної та природної безпеки в Україні за 2018.
2. Аналітичний огляд стану техногенної та природної безпеки в Україні за 2019.
3. ДБН В.1.1-7-2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги».
4. Новак С. В., Григор'ян Б. Б., Нефедченко Л. М., Абрамов О. О. Оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій та виробів. Методи випробувань: навч. посіб. Черкаси: АПБ, 2011. 124 с.
5. ДСТУ-Н Б.В.2.6-211:2016 Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість.
6. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1993-1-2:2005, IDT).
7. ДСТУ Б В.1.1-4-98\* «Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробування на вогнестійкість».
8. ДСТУ Б В.1.1-17-2007 «Захист від пожежі. Вогнезахисне покриття для будівельних несучих металевих конструкцій. Метод визначення вогнезахисної здатності (ENV 13381-4:2002, NEQ)».
9. Технічний регламент будівельних виробів, будівель і споруд, затверджений Постановою Кабінету Міністрів України від 20 грудня 2006 р. № 1764.
10. Розрахунок сталевих конструкцій на вогнестійкість відповідно до Єврокоду 3. Практичний посібник до ДСТУ-Н EN 1993-1-2:2010. Український Центр Сталевого Будівництва. Київ, 2016. 81 с.
11. СТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі (EN 1991-1-2:2002, IDT).
12. Шналь Т. М. Вогнестійкість та вогнезахист металевих конструкцій: навч. посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2010. 176 с.
13. ДБН В.1.2-7-2008 «Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Основні вимоги до будівель і споруд пожежна безпека».
14. ДСТУ Б В.1.1-13:2007 (EN 1365-3:1999, NEQ). СТУ Б В.1.1-13:2007 (EN 1365-3:1999, NEQ). Захист від пожежі. Балки. Метод випробування на вогнестійкість.
15. Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва. 2. Директива № 89/106/ЄЕС Ради ЄС про зближення законодавчих, нормативних і адміністративних положень держав-членів ЄС відносно

будівельних матеріалів. Міжнародний документ від 21.12.1988 № 89/106/ЄЕС.

16. Захарченко П. В., Гавриш О. М., Карпенко О. О., Петухов О. М. Технологія та товарознавство систем сухого будівництва: вогнезахист будівельних конструкцій. Навч. посіб. КНУБА. К.: «СПД Павленко», 2012. 392 с.

17. Осипенко В. І., Поздєєв С. В., Тищенко І. Ю. Будівельні матеріали та їх поведінка при дії високих температур: Навч. посіб. Черкаси: 2012. 202 с.

18. Васильченко О. В., Квітковський Ю. В., Луценко Ю. В., Миргород О. В. Безпека експлуатації будівель і споруд та їх поведінка в умовах надзвичайних ситуацій: Навч. посібник. Х.: НУЦЗУ, 2010. 372 с.

19. Беліков А. С., Маладика І. Г., Борсук О. В. Підвищення вогнестійкості металевих конструкцій як шлях забезпечення вогнезахисту будівель. *Збірник наукових праць. Пожежна безпека: теорія і практика* № 18/2014 ст. 38-42.

20. Пушкаренко А. С., Василенко О. В., Квітковський Ю. В., Луценко Ю. В., Миргород О. В. Вогнезахисне оброблення будівельних матеріалів і конструкцій: Навч. посіб. Х.: НУЦЗУ, КП «Міська друкарня», 2011. 176 с.

21. Киреев Ю. И. Строительные материалы: учеб. пособие. Ю. И. Киреева. 2-е изд., стер. Мн.: Новое знание, 2006. 400 с.

22. ДСТУ Б В.1.1-17:2007 (ENV 13381-4:2002, NEQ) Вогнезахисні покриття для будівельних несучих металевих конструкцій. Метод визначення вогнезахисної здатності.

23. Новак С. В., Григор'ян Б. Б., Нефедченко Л. М., Абрамов О. О. Оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій та виробів. Методи випробувань: навчальний посібник. Черкаси: АПБ, 2011. 124 с.

24. Романенков И.Г., Зигерн-Корн В.Н. Огнестойкость строительных конструкций из эффективных материалов. М.: Стройиздат, 1984. 240 с.

25. Ройтман В. М., Серков Б. Б., Шевкуненко Ю. Г., Сивенков А. Б., Барінова Е. Л., Приступюк Д. Н. Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре. Учебник под общей редакцией В. М. Ройтмана. 2-е изд. М.: Академия ГПС МЧС России, 2013. 366 с.

26. Демчина Б. Г., Пелех А. Б., Олексин Г. М., Сурмай М. І. Поведінка дощатоклеєних колон за місцевого впливу температури. *Вісн. Нац. ун-ту «Львів. політехніка»*. 2009. № 655. С. 71–74. Бібліогр.: 3 назв. укр.

27. Пелех А. Б., Демчина Б. Г., Шналь Т. М., Була С. С., Крочак О. В. Натурні випробування конструкції дерев'яної рами на вогнестійкість в умовах реальної пожежі. *Вісн. Нац. ун-ту «Львів. політехніка»*. 2008. № 627. С. 167–171. – Бібліогр.: 4 назв. укр.

28. Summary of the fire protection foundation report - fire safety challenges of tall wood buildings [Електронний ресурс]. URL: <https://firescien>.

29. Змага Я. В. Розрахунковий метод підвищеної точності для оцінки межі вогнестійкості дерев'яних балок з вогнезахисним просоченням: автореф. дис. ... канд. тех. наук: спец. 21.06.02 «Пожежна безпека». Харків, 2016.

30. Демешок В. В. Розрахунковий метод оцінки вогнестійкості дерев'яної плити перекриття за допомогою методу кінцевих елементів. *Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека*. 2016. № 2. С. 67–74.

31. Беликов А. С., Маладыка И. Г., Борсук Е. В. Применение лёгкого бетона в качестве огнезащиты строительных конструкций. *Технології захисту/ПожТех – 2014*: матеріали 16 Всеукр. наук.-практ. конф. Рятувальників. Київ, 2014. С. 36–37.

32. Будинки і споруди. Жиллові будинки. Основні положення. ДБН В.2.2-15-2005. [Чинні від 01.01.2006 ] Держбуд України від 18.05.2005 № 80 45 с. (Державні будівельні норми України).

33. Древесина огнезащищенная. Общие технические требования. Методы испытаний. Транспортирование и хранение: ГОСТ 30219-95 (Межгосударственный стандарт). 45 с.

34. Жартовський В. М., Цапко Ю. В., Соколенко К. І., Ліхнівський Р. В. Дослідження з підвищення ефективності застосування вогнезахищеної деревини. *Науковий вісник УкрНДПБ*. 2006. № 1 (13). С. 55–58.

35. Видимые пороки древесины. Классификация, термины и определения, способы измерения: ГОСТ 2140-81.

36. Горшков В. И. Самовозгорание веществ и материалов. М.: ВНИИПО, 2003. С. 446.

37. Собурь С. В. Огнезащита строительных материалов и конструкций: Справочник. М.: Спецтехника, 2000. 112 с.

38. Максименко Н. А. Новые огнезащитные и огнебиозащитные препараты для пропитки древесины. *Эффективное использование древесины и древесных материалов в строительстве*: Всесоюз. совещ., 18–20 июня 1980 г., Архангельск: тез. докл. М., 1980. С. 384–386.

39. Огнезащита деревянных конструкций [Електронний ресурс]. URL: <http://firesafetyblog.ru/ognezashhita/ognezashhita-derevyannux-konstrukcij.html>.

40. Захист від пожежі. Балки. Метод випробування на вогнестійкість (EN 1365-3:1999, NEQ) ДСТУ Б В.1.1-13:2007 [Чинні від 01.01.2008] Мінрегіонрозвитку та будівництва України від 22.06.2007 № 64. 6 с. (Національний стандарт України).

41. Захист від пожежі. Колони. Метод випробування на вогнестійкість (EN 1365-4:1999, NEQ) ДСТУ Б В.1.1-14:2007 [Чинні від 01.01.2008] Мінрегіонрозвитку та будівництва України від 22.06.2007 № 63. 6 с. (Національний стандарт України).

42. Захист від пожежі. Перекриття та покриття. Метод випробування на вогнестійкість (EN 1365-2:1999, NEQ) ДСТУ Б В.1.1-20:2008.

43. Новак С. В., Нефедченко Л. М., Абрамов О. О. Методи випробувань будівельних конструкцій та виробів на вогнестійкість. Київ: Пожінформтехніка, 2010. 132 с.

44. Матеріали будівельні. Методи випробувань на горючість: ДСТУ Б В.2.7.-19-95 (ГОСТ 30244-94).

45. Матеріали будівельні. Метод випробування на займистість: ДСТУ Б В.1.1-2-97(ГОСТ 30402-96). 28 с.

46. Ройтман М. Я. Противопожарное нормирование в строительстве. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1985. 590 с.

47. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі (EN 1991-1-2:2002, IDT) ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010, [Чинний від 01.07.2013] Мінрегіонбуду України від 27.12.2010 р. № 549. 74 с. (Національний стандарт України).

48. Єврокод 5. Проектування дерев'яних конструкцій. Частина 1-2. Загальні правила. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1995-1-2:2004, IDT) ДСТУ-Н Б EN 1995-1-2:2012 [Чинний від 01.07.2013] Мінрегіонбуду України від 21.12.2012 р. № 652. 90 с (Національний стандарт України).

49. Будинки і споруди. Підприємства торгівлі. ДБН В. 2.2-23:2009 [Чинні від 01.07.2009] Мінрегіонрозвитку та будівництва України від 16.01.2009. №4. 59 с. (Державні будівельні норми України).

50. Будинки і споруди. Культурно-видовищні та дозвіллеві заклади. ДБН В.2.2-16-2005. [Чинний від 01-04-2006] Держбуд України від 27.09.05 № 171. 20 с. (Державні будівельні норми України).

51. Будинки і споруди. Дошкільні навчальні заклади. ДБН В.2.2-4-97. [Чинний від 27-06-1996] Держкоммістобудування України від 06.08.1997 № 136. 48 с. (Державні будівельні норми України).

52. Будинки і споруди. Будинки та споруди навчальних закладів. ДБН В.2.2-3-97. Основні положення. [Чинний від 27-06-1996] Держкоммістобудування України від 6.08.97 р., 37 с. (Державні будівельні норми України).

53. Будинки і споруди. Заклади охорони здоров'я. ДБН В.2.2-10-2001. Основні положення. [Чинний від 04-01-2001]. Держбуд України від 01.04.2001 № 2. 45 с. (Державні будівельні норми України).

54. Будинки та споруди. Підприємства харчування. ДБН В.2.2-25-2009. Основні положення. [Чинний від 01-09-2010]. Міністерство регіонального розвитку та будівництва від 30.12.2009 № 703. 85 с. (Державні будівельні норми України).

55. Будинки та споруди. Спортивні та фізкультурно-оздоровчі споруди. ДБН В.2.2-13-2003. Основні положення. [Чинний від 01-03-2004]. Держбуд України від 10.11.2003 № 184. 105 с. (Державні будівельні норми України).

56. Будинки та споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення. ДБН В.2.2-28-2010. Основні положення. [Чинний від 01-10-2011]. Міністерство регіонального розвитку та будівництва від 30.12.2010 № 570. 28 с. (Державні будівельні норми України).

57. Наказ МНС України від 02.07.2007 № 460 «Про затвердження Правил з вогнезахисту» [Електронний ресурс]. URL: <http://zakon2>.

58. Огнезащита: преимущества и недостатки [Електронний ресурс]. URL: <http://www.polifan-lkm.ru/articles/st-ognezashity-sposoby/>.

59. ГОСТ 3044-84 Преобразователи термоэлектрические. Номинальные статические характеристики преобразований.

60. ГОСТ 8239-89: Балки двутавровые стальные горячекатаные.

61. ТУ У В.2.7-26.8-35492904-004:2010 Теплоизоляционный материал, произведенный из каменной ваты на основе горных пород базальтовой группы и низкофенольного связующего с добавлением гидрофобизирующих добавок.

62. Беліков А. С., Борсук О. В., Тарасов С. С., Дзєцина Є. В. Перспективи підвищення вогнестійкості будівельних конструкцій. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали VIII Міжнар. наук.-практ. конф.* Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2017. С. 171–172.

63. Поздєєв С. В., Нуянзін О. М., Борсук О. В., Неділько І. А., Федченко С. М. Вивчення стану втрати вогнестійкості сталевих балок з вогнезахисним мінераловатним облицюванням. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: матеріали X Всеукр. наук.-практ. конф.* Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. С. 120–122.

64. Поздєєв С. В., Нуянзін О. М., Борсук О. В., Неділько І. А. Дослідження цілісності вогнезахисного мінераловатного облицювання сталеві балки в умовах пожежі. *Енергоефективність на транспорті: міжнар. наук.-практ. конф.* Харків: УкрДУЗТ, 2020. С. 98–100.

65. Пушкаренко А. С., Васильченко О. В. Будівельні матеріали та їх поведінка в умовах високих температур: навчальний посібник [для студ. вищ. навч. закл.]. Харків: АПБУ, 2001. 166 с.

66. Цапко Ю. В., Соколенко К. І. Оцінювання експлуатаційної надійності вогнезахищеної деревини. *Пожежна та техногенна безпека України*: Міжнар. наук.-практ. конф., Київ: УкрНДІПБ, 2005. С. 51.

67. Кисилев Я. С. Физические модели горения в системе предупреждения пожаров. СПб.: Санкт-Петербургский университет МВД России, 2000. 263 с.

68. Соколенко К. І. Підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів із застосуванням вогнезахищеної деревини: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 21.06.02 «Пожежна безпека». Київ, 2005. 22 с.

69. Тычино Н. А. Эксплуатационная надежность огнезащитных древесных материалов. *Пожаровзрывоопасность веществ и материалов*. 2002. Вып. 2. С. 27–30.

70. Зенков Н. И. Строительные материалы и поведение их в условиях пожара: Учебник [для слушателей вузов по специальности «Инженер противопожарной техники и безопасности»]. М.: Высш. инж. пожар.-техн. школа МВД СССР. 1974. 176 с.

71. Страхов В. Л., Крутов А. М., Давыдкин Н. Ф. Огнезащита строительных конструкций. М.: Информационно-издательский центр «ТИМР». 2000. 433 с.

72. Романенков И. Г., Зигерн-Корн В. Н. Огнестойкость строительных конструкций из эффективных материалов. М.: Стройиздат. 1984. 240 с.

73. Поздєєв С. В., Нуянзін О. М., Сідней С. О., Новгородченко А. Ю., Борсук О. В. Дослідження нагрівання сталевих двотаврових стержнів із мінераловатним вогнезахисним облицюванням в умовах стандартного температурного режиму пожежі. *Геотехнічна механіка*. 2020. № 152. С. 116 – 126.

74. Некора О. В. Розрахунково-експериментальний метод визначення вогнестійкості стиснутих елементів залізобетонних будівельних конструкцій: дис. ... канд. техн. наук: 21.06.02. Черкаси, 2008. 147 с.

75. British Standards Institution, BS EN 1991-1-2, Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-2: General actions. Actions on structures exposed to fire, London, November 2002.

76. Шналь Т. М. Вогнестійкість та вогнезахист дерев'яних конструкцій: навчальний посібник [для студ. вищ. навч. закл.]. Львів: НУ «Львівська політехніка», 2006. 220 с.

77. Фещук Ю. Л., Поздєєв С. В., Ніжник В. В., Борис О. П., Долішній Ю. В. Методика експериментальних досліджень поведінки дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням та без нього в

умовах пожежі. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. Київ. 2017. № 1 (3). С. 98–103.

78. Ройтман В. М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. М.: Пожарная безопасность и наука, 2001. 382 с.

79. Макаров Е. Г. Инженерные расчеты в Mathcad: учебный курс. СПб.: Питер, 2003. 448 с.

80. Дьяконов В. П. Mathcad 8/2000: специальный справочник. СПб.: Изд-во «Питер», 2000. 592 с.

81. Борсук О. В., Дзецина Є. В. Ніздрюваті бетони як будівельний матеріал з ефективною вогнезахисною здатністю. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист*: матеріали VI Міжнар. наук.-практ. конф. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2016. С. 97–98.

82. Беликов А. С., Шаломов В. А., Борсук Е. В., Дзецина Е. В. Средство огнезащиты повышения огнестойкости металлических конструкций. *Теорія та практика гасіння пожеж та ліквідація надзвичайних ситуацій*: матеріали VII Міжнар. наук.-практ. конф. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2016 С. 146–149.

83. Пушкаренко А. С., Васильченко О. В. Будівельні матеріали та їх поведінка в умовах високих температур. Харків: АПБУ, 2001. 166 с.

84. Романенко П. Н., Бубырь Н. Ф., Башкирцев М. П. Теплопередача в пожарном деле. М.: Научно-исследовательский и редакционно-издательский отдел, 1969. 425 с.

85. Основы пожарной теплофизики / Башкирцев М. П. [и др.]. [3-е изд., перераб. и доп.]. М.: Стройиздат, 1984. 200 с.

86. Бартелеми Б., Крюппа Ж. Огнестойкость строительных конструкций. М. Стройиздат, 1985. 216 с.

87. Фещук Ю. Л., Поздєєв С. В., Ніжник В. В. Експериментальні дослідження поведінки дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням в умовах пожежі. *Сборник научных трудов: Проблемы пожарной безопасности*. Харків. 2017. № 42. С. 155–164.

88. Бутиков Е. И., Кондратьев С. И. Физика. Том 1. М.: Физматлит, 2008. 352.

89. Метод конечных элементов в механике твердых тел. [Сахаров А. С., Кислокий В. М., Киричевский В. В. и др.]; под. ред. А. С. Сахарова, И. А. Альтенбаха. Київ: Вища школа, 1982. 480 с.

90. Model Code on Fire Engineering. ed. ECCS, 2011.

91. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М.: Высшая школа, 1976. 664 с.

92. Самарский А. А. Введение в теорию разностных схем. М.: Наука, 1971. 554 с.

93. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.

94. Власова Е. А., Зарубин В. С., Кувыркин Г. Н. Приближенные методы математической физики: [учебн. для вузов под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко]. М.: МГТУ им. Баумана, 2001. 700 с.
95. ANSYS, ANSYS 9.0 Manual Set, ANSYS Inc., Southpoint, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, USA.
96. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справ. в 4-х т. Т. 1. Кн. 1. М.: Наука, 1978. 496 с.
97. Korhonen E. S. Natural fire modeling of large spaces. Helsinki University of Technology.
98. Баранов В. М., Коньяков А. Ю. Термодинамика и теплопередача: учебное пособие: 2-е издание, переработанное. Хабаровск: ДВГУПС, 2004. 91 с.
99. Цой П. В. Методы расчета задач тепломассопереноса. М.: Энергоатомиздат, 1984. С. 43–58.
100. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. Киев: Изд-во «Сталь», 2002. 600 с.
101. Авчухов В. В., Паюсте Б. Я. Задачник по процессам тепломассообмена: учеб. пособие. М.: Энергоатомиздат, 1986. 144 с.
102. Ефремов О. Ю. Военная педагогика: учебник для вузов. 2-е изд., испр. и доп. Спб.: Питер, 2017. 640 с.
103. Поздєєв С. В., Словінський В. К., Щіпець С. Д., Омельченко А. М. Визначення температурних полів у перерізі залізобетонної колони при її випробуванні на вогнестійкість. *Зб. наук. праць. Пожежна безпека: теорія і практика*: Черкаси: АПБ, 2013. № 15. С. 130–137.
104. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа Киев: Изд-во «Сталь», 2002. 600 с.
105. Беликов А. С., Маладыка И. Г., Борсук Е. В. Перспективы повышения огнестойкости металлических конструкций огнезащитными влагостойкими покрытиями. *Инновационные технологии защиты от чрезвычайных ситуаций: материалы Междунар. науч.-практ. конф.* Мн.: КИИ, 2013. С. 103.
106. Горбаченко Я. В., Поздєєв С. В., Некора О. В., Тищенко О. М., Гвоздь В. М. Вогнестійкість дерев'яних балок з вогнезахистом. *Збірник наукових праць АПБ ім. Героїв Чорнобиля. Пожежна безпека: теорія і практика*: № 15. С. 63–68. (Серія КВ № 17574-6424 ПР).
107. Поздєєв С. В., Некора О. В., Горбаченко Я. В., Федченко І. В. Геометрія зони обвуглювання у перерізах вогнезахисних дерев'яних балок в умовах пожежі. *Проблеми пожежної безпеки*. Харків: НУЦЗУ, 2015. Випуск 37. С. 168–177 (Серія КВ 16673-5245 ПР).

108. Konig J. A design model for load-carrying timber frame members in walls and floors exposed to fire/Proceedings of CIB W18. Meeting 33. Paper 33-16-1, 2000.

109. Leong Poon J. P. Literature review on the contribution of fire resistant timber constructions to heat release rate / Warrington fire research. WFRA Project No.20633. Version 2b. 77 p.

110. Bednarek Z., Kaliszuk-Wietecka A.: Scientific research on the influence of fireproof wood preservation carried out by the vacuum-pressure method on strength of wood in normal and elevated temperatures. Proceedings of the 8th International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques, Vilnius 2004, 19-21 May, P. 963–967.

111. Silkok G.W.L. and Shields T.G. Relating Char to Fire Severity Conditions. Fire and Materials, 25, 9–11, 2001.

112. Gerhards Ch. C. Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: An analysis of immediate effects. Wood and Fiber 2007, 14(1): 4–36.

113. Крамер Г. Математические методы статистики. М.: Мир, 1975. 648 с.

114. Шведов А. С. Теория вероятности и математическая статистика. М.: Издательский дом ГУ ВШЭ, 2005. 63 с.

115. Хикс Ч. Основные принципы планирования эксперимента. М.: Книга по требованию, 2013. 203 с.

116. Сидняев Н. И. Введение в теорию планирования эксперимента: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 463 с.

117. Поздєєв С. В., Нуянзін О. М., Бінецька О. В., Борсук О. В., Швиденко А. В., Алімов Б. О. Температурний вплив на теплофізичні властивості вогнезахисного мінераловатного облицювання сталевих конструкцій в умовах випробувань на вогнестійкість. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2020. 4/12 (106). С. 39–45.

*Наукове видання*

**О. В. Борсук, С. В. Поздєєв, О. М. Нуянзін, О. В. Некора, В. М. Гвоздь,  
О. М. Тищенко, Н. П. Заїка**

**РОЗРАХУНКОВА ОЦІНКА  
ВОГНЕСТІЙКОСТІ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ  
СТАЛЕВИХ БАЛОК**

*МОНОГРАФІЯ*

Підписано до друку 21.06.2022  
Обл.-вид. арк. 3,80. Ум. друк. арк. 5,88.  
ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України  
вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034