

**ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ  
ЧЕРКАСЬКИЙ ІНСТИТУТ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ  
ІМЕНІ ГЕРОЇВ ЧОРНОБИЛЯ  
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ**

На правах рукопису



**КРОПИВА МИХАЙЛО ОЛЕКСАНДРОВИЧ**

УДК 624.012

**УДОСКОНАЛЕННЯ РОЗРАХУНКОВОГО МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ  
ВОГНЕСТІЙКІСТІ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ ІЗ ВНУТРІШНІМИ  
ДВОТАВРОВИМИ СТАЛЕВИМИ БАЛКАМИ**

Спеціальність 21.06.02 – пожежна безпека

Дисертація  
на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Науковий керівник –  
Поздєєв Сергій Валерійович,  
доктор технічних наук, професор

Черкаси – 2016

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ТА СТАЛЕБЕТОННИХ ПЛИТ І МЕТОДІВ ЇЇ ОЦІНЮВАННЯ.....	13
1.1. Статистичні дані щодо пошкодження будівель та споруд унаслідок пожеж.....	13
1.2. Нормування вогнестійкості сталебетонних та сталезалізобетонних плит.....	16
1.3. Поведінка сталебетонних та сталезалізобетонних плит в умовах пожежі ...	20
1.4. Методи визначення фактичної межі вогнестійкості сталебетонних та сталезалізобетонних плит.....	22
1.4.1. Метод вогневих випробувань сталезалізобетонних плит на вогнестійкість.....	26
1.4.2. Розрахункові методи оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит.....	28
1.5. Математичні моделі теплопередачі для розрахункових методів оцінки вогнестійкості сталезалізобетонних плит.....	31
1.6. Математичні моделі напружено-деформованого стану для розрахункових методів оцінки вогнестійкості сталебетонних та сталезалізобетонних плит .....	37
1.7. Мета і задачі дослідження.....	42
РОЗДІЛ 2. РЕЗУЛЬТАТИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ ЗА ВПЛИВУ СТАНДАРТНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ПОЖЕЖІ.....	44
2.1. Дослідження температурних розподілень у перерізах сталезалізобетонних плит при пожежі із стандартним температурним режимом за обчислювальним експериментом.....	44
2.1.1. Математична модель теплопередачі у перерізах сталезалізобетонних плит за впливу стандартного температурного режиму пожежі .....	44

2.1.2. Числовий метод розв'язку задачі теплопровідності.....	48
2.1.3. Розрахункові схеми досліджуваних сталезалізобетонних плит.....	51
2.1.4. Кінцево-елементна схема сталезалізобетонної плити для теплотехнічного розрахунку.....	52
2.1.5. Результати розв'язку задачі теплопровідності для сталезалізобетонної плити за дії стандартного температурного режиму пожежі.....	53
2.2. Дослідження напружено-деформованого стану у сталезалізобетонній плиті в умовах термосилового впливу пожежі.....	56
2.2.1. Математична модель напружено-деформованого стану у сталезалізобетонній плиті за умов термосилового впливу стандартного температурного режиму пожежі.....	56
2.2.2. Математичні моделі напружено-деформованого стану залізобетону і їх числова реалізація.....	57
2.2.3. Розрахункові схеми досліджуваних сталезалізобетонної плити для міцнісної задачі.....	63
2.2.4. Кінцево-елементна схема сталезалізобетонної плити для теплотехнічного розрахунку.....	64
2.2.5. Алгоритм розрахунку напружено-деформованого стану сталезалізобетонної плити за дії стандартного температурного режиму пожежі.....	66
2.2.6. Результати розрахунку напружено-деформованого стану сталезалізобетонної плити за дії стандартного температурного режиму пожежі.....	68
РОЗДІЛ 3. ОБЛАДНАННЯ І МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	79
3.1. Експериментальне обладнання та засоби вимірювання.....	79
3.2. Методика виготовлення та формування сталезалізобетонних плит-зразків для випробувань.....	84
3.2.1. Виготовлення залізобетонного ригеля-зразку для високотемпературних випробувань.....	84

3.2.2. Розташування термопар у сталезалізобетонній плиті-зразку для високотемпературних випробувань.....	89
3.3. Методика високотемпературних випробувань сталезалізобетонних плит-зразків.....	91
3.3.1. Методика підготовки обладнання та зразка до випробувань.....	91
3.3.2. Методика проведення випробувань.....	91

#### РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ВОГНЕВИХ ВИПРОБУВАНЬ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ.....96

4.1. Результати попередніх експериментальних досліджень сталезалізобетонних плит.....	96
4.2. Результати експериментальних досліджень сталезалізобетонних плит в умовах вогневого впливу під час випробувань на вогнестійкість.....	99
4.2.1. Результати температурних вимірювань сталезалізобетонних плит-зразків.....	99
4.2.2. Результати вимірювань деформацій сталезалізобетонних плит-зразків.....	105
4.2.3. Результати дослідження ушкоджень сталезалізобетонних плит при вогневих випробуваннях.....	107
4.3. Дисперсія отриманих експериментальних даних.....	110
4.4. Оцінка адекватності результатів розрахунку вогнестійкості сталезалізобетонних плит за методом кінцевих елементів.....	113

#### РОЗДІЛ 5 ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....119

5.1. Обґрунтування методики створення таблиць для оцінювання класу вогнестійкості сталезалізобетонних плит.....	119
5.1.1. Побудування плану повного факторного експерименту.....	120
5.1.2. Результати розрахунку вогнестійкості за створеною математичною моделлю.....	124
5.1.3. Перевірка адекватності результатів.....	125

5.2. Розробка удосконаленого табличного методу для оцінювання класу вогнестійкості сталезалізобетонних плит.....	125
ВИСНОВКИ.....	128
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	130
ДОДАТКИ.....	144

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ГУ – граничні умови

МКЕ – метод кінцевих елементів

ОЗТ – обернена задача теплопровідності

ПЗТ – пряма задача теплопровідності

СЛАР – система лінійних алгебраїчних рівнянь

ТФХ – теплофізичні характеристики

## ВСТУП

Статистика пожеж та нещасних випадків, які пов'язані із пожежами, показує що одним з найбільш небезпечних чинників є підвищення ризику руйнації несучих сталобетонних та сталезалізобетонних будівельних конструкцій при їх невідповідності вимогам норм щодо вогнестійкості. Одним з ефективних напрямків щодо забезпечення вогнестійкості таких конструкцій є впровадження сучасних розрахункових методів, у тому числі тих, що рекомендовані сучасними європейськими будівельними нормативними документами – єврокодами.

Одним з найбільш продуктивних розрахункових методів при інженерній оцінці класу вогнестійкості сталезалізобетонних конструкцій, є табличний метод. Застосування такого методу є обмеженим оскільки на даний час не існує відповідних таблиць для багатьох типів сталезалізобетонних конструкцій, до яких відносяться також і сталезалізобетонні плити із сталевими двотавровими елементами усередині. Зважаючи що останнім часом сталезалізобетонні плити такої конструкції зазнали широкого розповсюдження з огляду на їх високу несучу здатність та підвищену вогнестійкість інженерна оцінка вогнестійкості для них на основі табличного методу дозволяє підвищити ефективність проектування при забезпеченні вимог будівельних норм щодо їх вогнестійкості.

При розробці таблиць для інженерної оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій використовується метод стандартних випробувань на вогнестійкість. Але його застосування пов'язано із суттєвими матеріальними та трудовими затратами. Більш ефективним для цього є застосування розрахункових методів підвищеної точності, до яких відноситься метод кінцевих елементів. З огляду на викладене удосконалення табличного розрахункового методу оцінки вогнестійкості сталезалізобетонних плит із двотавровим сталевим елементом усередині на основі математичного моделювання за допомогою методу кінцевих елементів є актуальною науковою задачею

**Актуальність теми.** В роботах А.І. Яковлєва, В.П. Бушева, В.А. Пчелінцева, В.М. Ройтмана, А.Ф. Мілованова, С.Л. Фоміна, В.Л. Страхова, П.Г. Круковського, С.В. Новака, О.В. Некори, С.В. Поздєєва, Т. Lie, V. Bartelemi, G. Kruppa, T. Harmathy, M. Schäfer, D. Bernhart, Семерак М.М., Демчина Б.Г., Гивлюд М.М., Ковалишин В.В. широко розглянуті методи визначення фактичних меж вогнестійкості залізобетонних та сталезалізобетонних плит експериментальним та розрахунковим шляхом.

На даний час існують два підходи до оцінки вогнестійкості несучих будівельних конструкцій, зокрема і сталезалізобетонних плит. Перший підхід заснований на проведенні вогневих випробувань, які відбуваються з використанням зразків, розміри і діючі навантаження яких відповідають або близькі до реальних. Цьому підходу надається перевага при нормуванні вогнестійкості будівельних конструкцій, оскільки цей підхід дозволяє конкретні параметри даного елемента конструкції. Недоліком цього підходу є висока вартість і підвищена трудомісткість робіт щодо реалізації цих випробувань..

Другий підхід базується на розрахункових методах. Даний підхід є достатньо розвиненим і у результаті його застосування можна отримати достовірні і вичерпні дані щодо меж вогнестійкості елементів будівельних конструкцій для різних типів поєднань граничних і початкових умов. При цьому не накладаються обмеження щодо габаритів, складності конфігурації і умов роботи конструкції. Розрахункові методи мають різну структуру початкових припущень і відповідно базового математичного описання. Існують спрощені інженерні методи, які засновані на використанні спеціальних таблиць, в яких вказуються мінімальні розміри елементів конструкцій для забезпечення необхідного класу вогнестійкості. Переваги такого методу полягає у його високій продуктивності і відсутності особливих умов, що робить його надзвичайно доступним для інженерного аналізу конструкцій щодо їх вогнестійкості. Поширення цього методу обмежуються відсутністю таблиць для певних типів елементів будівельних конструкцій, у тому числі вогнестійкості сталезалізобетонних плит із двотавровим сталевим елементом усередині. Дані таблиці, як правило, складаються на основі



великого обсягу експериментальних даних щодо їх стандартних випробувань на вогнестійкість. Зважаючи на високу вартість та трудомісткість вогневих випробувань для створення довідникових таблиць перспективним є використання розрахункових методів підвищеної точності на основі методу кінцевих елементів.

Враховуючи викладене вище, можна сказати, що вивчення закономірностей залежності межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит із сталевим двотавровим елементом усередині від їх геометричних характеристик та діючого механічного навантаження в умовах впливу пожежі із стандартним температурним режимом як підґрунтя для створення довідникових таблиць щодо оцінки вогнестійкості для даних конструкцій з огляду на їх підвищену міцність на вогнестійкість, є актуальною технічною задачею, що дозволить суттєво збільшити ефективність даного табличного методу.

### ***Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.***

Дослідження проводилися відповідно до таких програм:

- 1) Концепції наукового забезпечення діяльності МНС України (2012 р.);
- 2) Концепції Державної цільової соціальної програми забезпечення пожежної безпеки на 2012 – 2015 роки;
- 3) Науково-дослідної роботи «Прогнозування технічного стану будівельних конструкцій при дії силових, деформаційних та високотемпературних впливів» (номер державної реєстрації 0113U004019), що виконувалася в Академії пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля, в якій автор був виконавцем.

Враховуючи вищевикладене були сформульовані ідея, мета роботи і основні задачі дослідження.

***Ідея роботи*** полягає у забезпеченні нормованої вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками шляхом застосування удосконаленого розрахункового методу оцінювання класу їх вогнестійкості на підставі розроблених довідникових таблиць з переліком

необхідних параметрів, визначених за результатами моделювання з використанням методу кінцевих елементів

**Мета роботи** розкриття закономірностей залежності межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками від їх геометричних характеристик та діючого механічного навантаження в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі як підґрунтя удосконалення табличного методу її оцінювання.

#### **Основні задачі дослідження.**

1. Провести аналіз сучасного стану забезпечення і методів оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит та виявити шляхи їх удосконалення.

2. Розробити методику і провести математичне моделювання поведінки сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками за впливу стандартного температурного режиму пожежі.

3. Розробити методику і провести експериментальні дослідження поведінки сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками за впливу стандартного температурного режиму пожежі.

4. Провести перевірку адекватності результатів математичного моделювання процесів деформації, руйнування з втратою вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками шляхом порівняння з даними експериментальних досліджень.

5. З урахуванням виявленої залежності межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками від їх геометричних параметрів, товщини захисного шару і механічного навантаження побудувати математичну модель, провести повний факторний експеримент та створити довідникову таблицю для визначення класу їх вогнестійкості.

6. Розробити удосконалений табличний метод оцінювання класу вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками.

**Об'єкт дослідження** – процеси деформації, руйнування з втратою вогнестійкості, що відбуваються у сталезалізобетонних плитах із внутрішніми двотавровими сталевими балками під час впливу на них стандартного температурного режиму пожежі.

**Предмет дослідження** – закономірності змінення значення межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками від їх геометричних параметрів, товщини захисного шару та механічного навантаження під час впливу стандартного температурного режиму пожежі.

**Методи дослідження.** дослідження процесів деформування, руйнування та втрати вогнестійкості сталезалізобетонних плитах із внутрішніми двотавровими сталевими балками проводили розрахунковим, а також експериментальним методом із застосуванням випробувальної вогневої печі. для встановлення основних закономірностей змінення значення межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками від їх геометричних параметрів, товщини захисного шару та механічного навантаження був використаний метод математичного моделювання. для розробки довідникової таблиці визначення класу їх вогнестійкості проведено повний факторний експеримент. вивчення достовірності та адекватності результатів експериментів і моделювання поведінки сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками за впливу стандартного температурного режиму пожежі використані методи математичного моделювання.

**Наукова новизна дисертаційної роботи** полягає у розкритті закономірностей залежності межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками від їх геометричних характеристик та діючого механічного навантаження в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі. при цьому:

- уперше виявлена закономірність залежності межі вогнестійкості сталезалізобетонної плити із внутрішніми двотавровими сталевими балками ( $y$ )

від висоти двотавра ( $x_1$ ), товщини його захисного шару ( $x_2$ ) та прикладеного до плити механічного навантаження ( $x_3$ ), яка виражається залежністю

$$y = 254.25 + 148.25x_1 + 24x_2 - 55.75x_3 + 8.5x_1x_2 - 20.75x_1x_3 + 2.5x_2x_3 + 4x_1x_2x_3;$$

- удосконалено табличний метод оцінювання класу вогнестійкості сталезалізобетонної плити із внутрішніми двотавровими сталевими балками шляхом створення довідникових таблиць з вимогами щодо необхідних геометричних параметрів, товщини захисного шару та механічного навантаження для забезпечення нормованої вогнестійкості;

- отримало подальшого розвитку застосування розрахункових інженерних методик оцінювання межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій** підтверджується логічним викладенням та відповідністю поставлених для досягнення визначеної мети досліджень і завдань і методів їх розв'язання, заснованих на загальноновизнаних методах наукових досліджень; застосуванням методів теорії теплопровідності та механіки деформованого твердого тіла, регресійного аналізу, поліноміальної та експоненціальної апроксимації і найменших квадратів, а також теорії математичної статистики. Максимальне значення відносної похибки між отриманими експериментальними та розрахованими даними при визначенні температурних розподілів і меж вогнестійкості не перевищує 14 %, критерій Фішера не перевищує табличних значень при рівні значущості 0.05. Усі припущення, прийняті у роботі, а також результати досліджень не суперечать законам тепломасообміну, механіки та відповідають сучасним фізичним уявленням про досліджувані процеси.

**Практичне значення отриманих результатів.** Практична цінність дисертаційних досліджень полягає у розробці удосконаленого табличного методу оцінки вогнестійкості сталезалізобетонних плит із сталевим двотавровим елементом усередині в умовах теплового впливу пожежі із стандартним

температурним режимом, що дозволяє встановити мінімальні проектні розміри для забезпечення необхідного класу вогнестійкості. Це дозволяє уникнути матеріальних та трудових затрат на проведення вогневих випробувань або здійснення великого обсягу розрахунків при використанні уточнених розрахункових методів. Отримана таблиця мінімальних розмірів сталезалізобетонних плит із сталевим двотавровим елементом усередині може доповнити табличні дані нормативних документів, що регламентують розрахункові табличні методи оцінки вогнестійкості сталевих залізобетонних конструкцій.

Розроблені методики впроваджені у технологічний процес випробувань у Випробувальному центрі «Пожтест» с.м.т. Любарці Київської обл., діяльність Управління ДСНС України у Черкаській обл., а також у навчальний процес Академії пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля при викладанні дисципліни «Будівлі і споруди та їх поведінка в умовах пожежі».

**РОЗДІЛ 1**

**СУЧАСНИЙ СТАН ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ**

**СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ТА СТАЛЕБЕТОННИХ ПЛИТ І МЕТОДІВ ЇЇ**

**ОЦІНЮВАННЯ**

**1.1 Статистичні дані щодо пошкодження будівель та споруд унаслідок пожежі**

Статистичні дані [1] щодо пожеж в Україні показують, що кількість пожеж у будівлях та спорудах складає 55 % від загальної їх чисельності. Кількість випадків загибелі людей на даних пожежах складає близько 95 %. В табл. 1.1 зібрані статистичні дані щодо наслідків пожеж у будівлях та спорудах за період з 2009 по 2014 рік на території України.

Таблиця 1.1

**Дані про пожежі, що сталися у будівлях та спорудах**  
**за період з 2009 по 2014 рік**

<b>Показник</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>Середнє значення</b>
Кількість пожеж	32993	34290	34501	37525	33697	36742	<b>35428</b>
Загинуло людей	3051	2719	2729	2628	2392	2138	<b>2910</b>
Травмовано людей	1363	1327	1301	1469	1398	1265	<b>1399</b>
Збитки прямі, тис. грн.	363703	541258	677006	696297	554031	1161340	<b>596387</b>

Дані табл. 1.1 показують, що кількість пожеж щорічно зростає а кількість травмувань за загибелі людей помітно зменшується. Не дивлячись на таку тенденцію, вона залишається ще досить високою.

Крім цього, можна зазначити, що найбільша кількість травмування та загибелі людей спостерігаються для пожеж, які трапилися у будівлях та спорудах, оскільки у даному випадку існує суттєвий ризик обвалення та ушкодження будівельних конструкцій.

За період, що був підданий аналізу, у середньому було знищено або пошкоджено 22137 будівель та споруд різних типів та призначення, з яких 4137 будівель і споруд було зруйновано повністю. У табл. 1.2 наведені статистичні дані щодо руйнування та ушкодження будівельних конструкцій унаслідок пожежі.

Таблиця 1.2

**Кількість знищених та пошкоджених будівель та споруд  
за період з 2009 по 2014 рік**

Показник	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Середнє значення
Знищено та пошкоджено будівель	2077	2113	2159	2361	2182	2570	<b>22137</b>
із них знищено	0	6	6	3	5	6	<b>4137</b>
	3997	3696	3779	4025	3543	5933	<b>4137</b>

Статистичні дані щодо пожеж [1] у період, що був розглянутий показує, що за 2014 рік 53,3 % всіх пожеж в Україні, а саме 36742, трапилося у будівлях та спорудах; 6,2 % (4272) – на транспорті; 35,9 % (24754) припадає на місця відкритого зберігання матеріалів, відкриті території, зовнішні установки тощо; 4,6 % (3108) – на інші об'єкти, що не ввійшли до переліку. На рис. 1.1 представлений розподіл кількості пожеж за об'єктами.

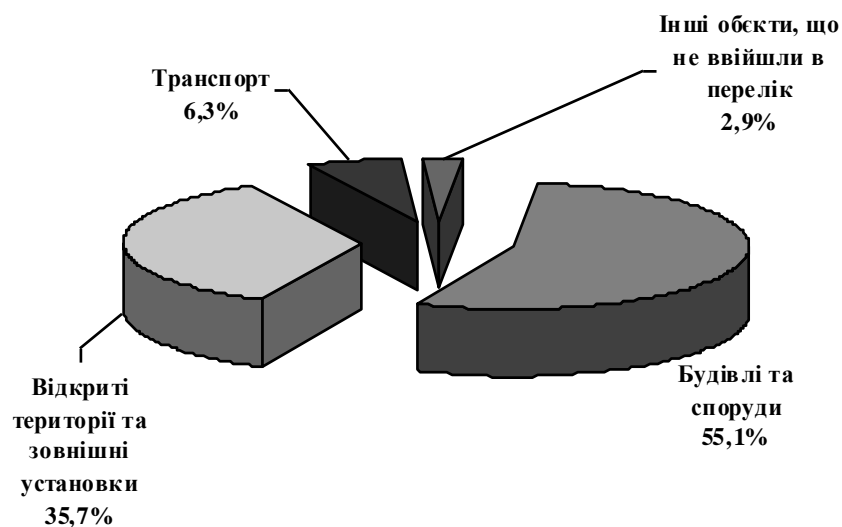


Рис. 1.1. Розподіл кількості пожеж, що сталися у 2014 році, за об'єктами їх виникнення

Протягом 2014 року [1] унаслідок пожежі знищено або пошкоджено 25706 будівель та споруд різних типів та призначення, з яких 5933 було зруйновано повністю. Кількість повного руйнування конструкцій житлових будинків складає 1635.

Згідно із статистичними даними [1, 2] щодо пожеж у будівлях і спорудах у 2014 році (рис. 1.2) – 12924 (50,3 %) пожеж сталася у будівлях, які мали III ступінь вогнестійкості, 4294 (16,7 %) пожеж сталася у будівлях із V ступенем вогнестійкості, 1293 (5,0 %) пожеж сталася у будівлях із II ступенем вогнестійкості.

У 2014 році [1] були повністю знищені 5933 (33,3 %) будівлі із III ступенем вогнестійкості, 1654 (27,9 %) будівлі із V ступенем вогнестійкості, 533 (9,0 %) випадки знищення пожежею будівель із III б ступенем вогнестійкості та 254 (4,3 %) повністю зруйновані будівлі унаслідок мали III а ступінь вогнестійкості. На рис. 1.2 наведені результати аналізу статистичних даних щодо руйнування та ушкодження будівель та споруд унаслідок пожежі.



Рис. 1.2 Аналіз кількості знищених або пошкоджених будівель та споруд за ступенем їх вогнестійкості у 2014 році.

Дані, які наведені на рис. 1.2 показують, що випадки руйнування будівельних конструкцій будівель та споруд найбільш за все припадають на будівлі III ступенем вогнестійкості відповідно до класифікації, наведеної у ДБН В.1.1-7-2002 «Пожежна безпека об'єктів будівництва» до будівельних конструкцій яких встановлені досить високі вимоги вогнестійкості.



## **1.2. Нормування вогнестійкості сталебетонних та сталезалізобетонних плит**

Сталебетонні та сталезалізобетонні плити виокремлюються як зігнуті сталезалізобетонні елементи конструкції. Дослідження поведінки сталезалізобетонних конструкцій здійснювали Ю.Г. Аметов, В.М. Барабаш, М.К. Бородіч, Є.Є. Гібшман, Ф.Є. Клименко, О.І. Лапенко, А.А. Потапкін, О.В. Семко, Л.І. Стороженко, М.М. Стрелецький, Ю.М. Фабрика, N.M. Neumark, C.P. Siesa, J.M. Viest, A.W. Wegmuller та ін. Дані конструкції [3 – 20] відрізняються високою відповідальністю, оскільки можуть сприймати більші навантаження. При цьому вони зберігають високу міцність та жорсткість. Однак, їх застосування, враховуючи їх властивості, пов'язане із великими навантаженнями. Тому при обваленні сталебетонних та сталезалізобетонних плит внаслідок їх руйнування, збиток може сягати найбільшого рівня [1, 2]. Такі наслідки пов'язані із можливими людськими жертвами, пошкодженням майна та цінностей, знищенням конструкцій будівель та споруд. Дослідження вогнестійкості залізобетонних та сталезалізобетонних конструкцій описані у роботах А.І. Яковлева, В.П. Бушева, В.А. Пчелінцева, В.М. Ройтмана, А.Ф. Мілованова, С.Л. Фоміна, В.Л. Страхова, П.Г. Круковського, С.В. Новака, О.В. Некори, С.В. Поздєєва, T. Lie, V. Barteleml, G. Kruppa, T. Harmathy, M. Schäfer, D. Bernhart З іншого боку надійність роботи сталебетонних та сталезалізобетонних плит в умовах пожежі дозволяє провести безпечну евакуацію та підвищити безпеку діяльності аварійно-рятувальних підрозділів, тому гарантування відповідності даних конструкцій вимогам норм є актуальною науково-технічною задачею.

Згідно із нормативною базою України [21 – 24] вогнестійкість сталебетонних та сталезалізобетонних плит визначається часом настання одного з трьох граничних станів – втрати несучої здатності, втрати цілісності та втрати теплоізолявальної здатності. Відповідно зазначені граничні стани позначаються літерами R, E та I. Граничний стан втрати несучої здатності сталебетонними та сталезалізобетонними плитами пов'язується із втратою стійкості або повної руйнації. Ознакою цього стану [22 –

24] є випучування та оголення робочої арматури та сталевих елементів, досягнення критичних значень прогину та швидкості його наростання, повна, або часткова деструкція шару бетону. В даному випадку згідно із вимогами норм [22 – 24] критичні значення прогину та швидкості його наростання відповідно у мм та у  $\text{мм}\cdot\text{хв}^{-1}$  визначаються за формулами:

$$D = \frac{L^2}{400h}, \quad \frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9000h} \quad (1.1)$$

де  $L$  – довжина плити,  $h$  – висота перерізу плити, мм.

Згідно із вимогами стандарту [22 – 24] настання стану втрати цілісності супроводжується такими ознаками: загоряння або тління зі свіченням ватного тампона, що піднесений до необігрівної поверхні зразка в місця тріщин на відстань від 20 мм до 30 мм протягом проміжку часу не менше ніж 30 с; виникнення тріщини, через яку можна вільно (без додаткових зусиль) ввести в піч щуп діаметром 6 мм і перемістити його вздовж цієї тріщини на відстань не менше 150 мм; виникнення тріщини (або отвору), через яку можна вільно ввести в піч щуп діаметром 25 мм; полум'я на необігрівній поверхні зразка спостерігається протягом проміжку часу не менше ніж 10 с.

Втрата теплоізолювальної здатності настає при виникненні таких ознак: температура на необігрівній поверхні стіни протягом контрольного часу для плит досягає значення 140 °С, або в певній будь-якій точці температура сягає значення 180 °С.

Межа вогнестійкості сталобетонних для сталезалізобетонних плит визначається настанням одного з трьох граничних станів. Час, що відповідає чисельному значенню межі вогнестійкості, визначається тим граничним станом, що настає першим.

Вимоги до вогнестійкості елементів будівельних конструкцій у тому числі і для сталобетонними та сталезалізобетонними плитами визначаються згідно з

умовними класами будівель та споруд які називаються ступенями вогнестійкості. У свою чергу ступені вогнестійкості визначаються мірою відповідальності та типом використаних будівельних конструкцій. У табл. 1.3 показані приклади застосованих будівельних конструкцій у залежності від ступеня вогнестійкості [21].

Таблиця 1.3

**Конструктивні характеристики будівель залежно від їх ступеня вогнестійкості**

Ступінь вогнестійкості	Конструктивні характеристики
I, II	Будівлі з несучими каркасними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону, сталобетону та сталезалізобетону.
III	Будівлі з несучими каркасними конструкціями з бетону, залізобетону, сталобетону, стале залізобетону, природних або штучних кам'яних матеріалів та деревини, що піддана вогне- та біозахисній обробці.
IIIa	Будівлі з каркасними несучими конструкціями. Елементи каркасів виконуються з металевих вогнезахисних елементів.
IIIб	Будівлі переважно з одним або двома поверхами з каркасними несучими конструкціями. Елементи каркаса можуть бути виготовлені з вогнезахисного металу або деревини, підданій вогнезахисній обробці.
IV	Будівлі з несучими конструкціями з деревини із вогнезахистом або інших горючих матеріалів, захищених від дії вогню штукатуркою та іншими вогнезахисними матеріалами.
IVa	Будівлі переважно одноповерхові та двоповерхові з каркасними несучими конструкціями. Використовуються металеві елементи каркаса із вогнезахистом.
V	Будівлі з несучих і захищених конструкцій до яких не висуваються вимоги щодо меж вогнестійкості.

Для аналізу вогнестійкості використовують поняття фактичного і необхідного ступеня вогнестійкості елементів будівельних конструкцій будівлі. Необхідний ступінь вогнестійкості будівлі  $B_n$  визначається як мінімальний ступінь вогнестійкості, який має бути забезпечений згідно із вимогами відповідних нормативних документів [21].

Згідно із стандартами України [21] необхідний ступінь вогнестійкості визначає мінімальні межі вогнестійкості з урахуванням призначення будівель, поверховості, місткості, категорії виробництва щодо вибухопожежної небезпеки, наявності автоматичних установок пожежогасіння і інших чинників. В табл. 1.4 показані приклади встановлення необхідної межі вогнестійкості сталобетонних та сталеазалізобетонних плит різних будівель за їх функціональним призначенням [21].

Таблиця 1.4

**Необхідні межі вогнестійкості сталобетонних та сталеазалізобетонних плит  
перекрыттів для різних типів будівель**

Ступінь вогнестійкості	Типи будівель	Вимагаєма межа вогнестійкості REI (хв)
	Висотні суспільні, житлові (заввишки до 100 м). Паркінги, суміщені із житловими, офісними та багатофункційними будівлями	180
I	Виробничі, суспільні, житлові (до 16 поверхів).	60
II	Виробничі, суспільні, житлові (до 16 поверхів).	45
III	Виробничі, суспільні (до 5 поверхів), житлові	45
IIIa	Суспільні, (до 5 поверхів) школи, культурно-видовищні установи (в 1 поверх)	15
IIIб	Суспільні, (до 5 поверхів) школи, культурно-видовищні установи (в 1 поверх)	45
IV	Виробничі, суспільні (до 2 поверхів)	15
IVa	Виробничі, суспільні (в 1 поверх)	15

Перевірка відповідності елементів будівельних конструкцій вимогам щодо вогнестійкості здійснюється порівнянням значення фактичної межі вогнестійкості із значенням необхідної мінімальної межі вогнестійкості.

При такому підході мінімальні межі вогнестійкості встановлюються набагато простіше аніж фактичні межі вогнестійкості. Фактичні межі вогнестійкості визначаються при застосуванні експериментальних досліджень, розрахунковими методами, або методами, що поєднують обидва зазначені підходи у різному співвідношенні. Згідно нормативною базою, що чинна в Україні [21 – 24], перевага при визначенні фактичних меж вогнестійкості сталобетонних та сталезалізобетонних плит надається вогневим випробуванням.

### **1.3. Поведінка сталобетонних та сталезалізобетонних плит в умовах пожежі**

Поведінку сталезалізобетонних та сталобетонних плит в умовах високих температур можна прослідкувати при розгляді декількох стадій [25 – 66]. При першій стадії початкового розвитку пожежі при порівняно невисоких температурах (до 250 °С сталезалізобетонна плита не відчуває істотних змін при цьому деформації згину відповідають деформаціям, які були набуті при початковому навантаженні відповідним діючим механічним навантаженням. При цьому температурні деформації на призводять до суттєвих напружень.. На другому етапі при швидкому нарощуванні температури і досягненні нею високих значень (близько 1000 °С) відбуваються утворення та розкриття великої кількості тріщин і пришвидшення нарощування прогинів. Наявність таких ознак показує, що плита набуває незворотних змін і має суттєві ушкодження. На третьому етапі виникає стан втрати стійкості. Поздовжні переміщення у стиснутій зоні швидко зростають, утворюється зона локальної руйнації у серединній зоні плити та її прогин лавиноподібно зростає. У зоні локального ушкодження, стиснута зона бетону роздроблюється а сталевий елемент набуває великих значень пластичної деформації не обернено порушує початкову форму рівноваги у самому перерізі. У

даному випадку відбувається втрата стійкості даного елемента конструкції, тобто її перехід до іншої форми рівноваги. Зовнішній шар бетону, коли сталеві елементи знаходяться усередині бетонної матриці, обвалюється, оголюючи ці елементи. Наявність цих ознак вказує на настання граничного стану, за яким відбувається обвалення плити, або досягнення нею критичних значень її прогину або швидкості його нарощування. Тобто в цей момент і фіксується втрата несучої здатності сталезалізобетонних та сталебетонних плит. На рис. 1.3 показані приклади сталезалізобетонних та сталебетонних плит з ознаками настання втрати несучої здатності внаслідок високотемпературного впливу.



Рис. 1.3. Ознаки втрати несучої здатності залізобетонних ригелів унаслідок дії високих температур.

При вичерпанні сталебетонною плитою ресурсу опору можливо кілька сценаріїв його руйнування.

1. Напруження в сталевому елементі досягаючи границі текучості приводить утворення великих прогинів, більших за максимально допустимі;

2. Руйнування відбувається внаслідок розриву арматури, і елемент випробовує повну деструкцію;

3. Фіброві деформації стиснутого бетону досягають граничних значень, і дані шари руйнуються, у цьому випадку можливий утворення подоби пластичного шарніра у наслідок втрати стійкості сталевим елементом.

4. Зменшення стиснутої зони вже не компенсується збільшенням плеча внутрішньої пари сил, при цьому теж можливе утворення пластичного шарніра;

5. Уздовж арматури та сталевих елементів відбувається розколювання бетону внаслідок втрати їх взаємного зчеплення.

Як показують роботи [67 – 87], досягнення межі міцності в шарах бетону або арматурою не виключає плити подальшої роботи тому, що тріщина, що утворювався, не дозволяє бетону сприймати деформації тільки в одному або більше напрямків, інші напрямки деформації можуть їм сприйматися внаслідок взаємодії берегів тріщини. Крім цього окремі шари при їхнім вимиканні в певному напрямку при утворі тріщини можуть відновлюватися внаслідок змикання її берегів під впливом температурного розширення цього шару.

#### **1.4. Методи визначення фактичної межі вогнестійкості сталебетонних та сталезалізобетонних плит**

При обваленні зігнутих стале- та сталезалізобетонних елементів несучих конструкцій, зокрема плит, виникає найбільший ризик загибелі та травмування людей, а збиток досягає максимальних значень тому, що при втраті їхньої несучої здатності відбувається руйнування технологічного оснащення й знищення приміщень.

Зігнуті сталебетонні та сталезалізобетонні елементи при дії високих температур руйнуються із дробленням бетону у стиснутому шарі бетону та розтріскуванням у розтягнутому шарі, при цьому заголюється арматура та сталеві елементи. У граничному стані при високих температурах несуча здатність

сталобетонних та сталезалізобетонних плит обумовлена несучими спроможностями бетону й внутрішніми сталевими та арматурними включеннями [88 – 94]. У масивних сталобетонних та сталезалізобетонних плитах при настанні граничного стану, внаслідок нерівномірного прогріву перерізу, навантаження сприймається тільки у стиснутому шарі бетону, за рахунок чого і відбувається дроблення.

Оцінка вогнестійкості сталобетонних та сталезалізобетонних плит відбувається в умовах, що усереднюють температурний вплив пожежі з врахуванням найбільш жорстких умов. Всі перераховані підходи мають у своїй основі специфічні умови пожежі, що мають повністю відповідати вимогам світових стандартів та стандартів, чинних в Україні [21 – 24]. Згідно з цими стандартами основною умовою є застосування температурного режиму (°C) пожежі, що визначається функціональною залежністю:

$$\theta_p = 20 + 345 \cdot \lg(8t + 1) \quad (1.2)$$

де час  $t$  визначається у хв.

Дана залежність визначає тільки один етап пожежі, що відтворює тільки зростання температури в інтенсивному режимі, що відповідає стадії вже розвинутої пожежі із високою тепловою енергією, що не у повній мірі відповідає реальній температурній кривій при пожежах [21 – 66]. Такий температурний режим прийнятий світовим співтовариством для відтворюваності стандартних експериментальних досліджень залізобетонних конструкцій в умовах високотемпературного впливу із використанням відкритого вогню. На рис. 1.4 наведені реальні температурні режими пожеж, що визначені експериментальним шляхом [30 – 39].

Дослідження розвитку аварійних ситуацій і пов'язаних із ними пожеж у спорудах [30 – 39] показало, що їх інтенсивність і тривалість залежить від типу і кількості пожежного навантаження, площі та конфігурації проємів, наявності



пожежної автоматики та інших подібних чинників. При цьому пожежа зазвичай протікає у три стадії. Перша стадія є початковою і в цей час температура газів у приміщенні не досягає  $200^{\circ}\text{C}$ . Вважається, що цей період не позначається на вогнестійкості елементів конструкцій. Друга стадія пов'язана із швидким ростом вигорання матеріалів при суттєвому збільшенні тепловиділення, що веде до швидкого зростання температури в приміщенні й відповідного йому теплового впливу на елементи будівельних конструкцій. Третя стадія – це стадія зменшення температури, але, оскільки вона якийсь час залишається досить високою, її вплив на конструкції також має враховуватись.

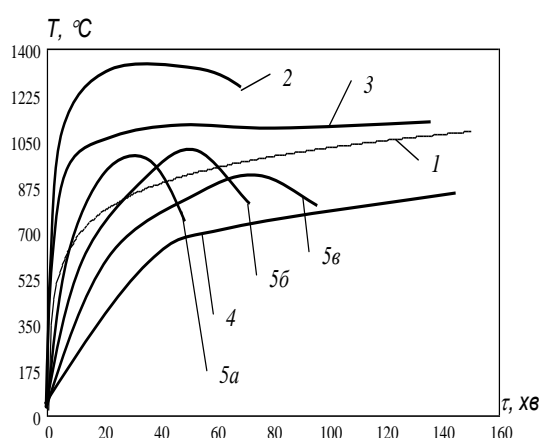


Рис. 1.4. Температурні режими аварійних ситуацій, пов'язаних із техногенними надзвичайними ситуаціями в приміщеннях будівель і споруд різного призначення:

1 – стандартна температурна крива пожежі; 2 – для пожеж у тунелях; 3 – для пожеж у будівлях нафтопереробної й хімічної промисловості; 4 – для пожеж у підвалах; 5 – режими пожеж у житлових приміщеннях з різними площами прорізів (від а до в – площу прорізів зменшується від  $2\text{ м}^2$  до  $1\text{ м}^2$ ).

Для більш точного відтворення температурних режимів пожежі із врахуванням різних особливостей приміщень та врахування всіх стадій пожежі в роботах [30 – 39] пропонуються різні функціональні залежності. В табл. 1.5 показані залежності температурних режимів вогневих випробувань будівельних

конструкцій у залежності від пожежонебезпечних матеріалів, що в них обертаються, та специфіки технологічних процесів у даних будівельних об'єктах. Але коли немає специфічних вимог для визначення температурного режиму використовується формула (1.2). З огляду на такі припущення дана функціональна залежність [21 – 24] повсюдно називається стандартною температурною кривою і є основою, що рекомендує вітчизняна та закордонна нормативна база

Таблиця 1.5

**Температурні режими випробувань будівельних конструкцій  
на вогнестійкість**

Вираз температурної залежності режиму пожежі	Типу режиму пожежі
$T_p(\tau) = 345 \cdot \lg(8\tau + 1) + T_0$	Стандартна температурна крива пожежі
$T_p(\tau) = 1080[1 - 0,325 \exp(-0,176\tau) - 0,675 \exp(-2,5\tau) + 20]$	«Вуглеводнева» температурна крива пожежі
$T_p(\tau) = 154\tau^{0,25} + 20$ при $0 < \tau \leq 21$ ; $T_p(\tau) = 345 \lg(8(\tau - 20) + 1) + 20$ при $\tau > 21$	Температурна крива «тліючої пожежі»
$T_p(\tau) = 504\tau^{0,141}$ ; $T_p(\tau) = 925 + 150 \ln \tau$ $T_p(\tau) = 20 + 22,2\sqrt{\tau} + 774[1 - \exp(-0,49\sqrt{\tau})]$ $T_p(\tau) = 524 + 10^{0,14 \lg \tau}$	Різні температурні режими для вогневих випробувань, чинні у різні часи і у різних державах

Для більш точного відтворення температурного режиму пожежі можуть бути застосовані інші методи, що засновані на застосування теоретичної бази газодинаміки та термодинаміки [33]. З огляду на складність розрахункової реалізації цих методів, для цього застосовується спеціальне програмне забезпечення, що призначене для симуляції розвитку, поширення й вгасання високотемпературних процесів у приміщеннях [32]. В алгоритми цих програм закладені сучасні чисельні методи.. Всі ці комп'ютерні системи поєднуються в спеціальну групу, що називається Computational Fluid Dynamics (CFD). До таких комп'ютерних систем відносяться програмні комплекси STAR-CD, FLUENT, SOFIE, FDS, SAFIR, C-FAST та ін. Результати розрахунків по цих програмах мають дуже високу відповідність із експериментальними дослідженнями

високотемпературних процесів у приміщеннях і можуть бути використані для побудови температурних кривих з максимальним ступенем правдоподібності й обліком всіх можливих факторів, які можуть впливати на температурний режим при такій ситуації. У цей момент часу відомі розрахункові дослідження температури в приміщеннях під час високотемпературних процесів у приміщеннях будівель вчених зі США, Франції, Швеції, Англії, Німеччини, Польщі, Росії та інших країн [45 – 56].

й вірогідності їхніх результатів.

**1.4.1. Метод вогневих випробувань сталезалізобетонних плит на вогнестійкість.** Високотемпературні випробування сталобетонних та сталезалізобетонних плит відбувається у відповідності до стандартів [22 – 24]. Згідно із цими стандартами плита має бути піддана тепловій дії разом із прикладенням механічного навантаження, що повинно бути рівним діючому навантаженню на цю плиту згідно із конструкторською документацією. Прикладання навантаження відбувається, як правило, за рахунок встановлення на них бетонних блоків, що грають роль тягарів. На рис. 1.5 показана схема подібних випробувань. Теплова дія забезпечується спаленням рідкого пального – гасу, або мазуту у форсунках. Температурний режим за відсутності особливих вимог має відповідати стандартному температурному режимові пожежі.

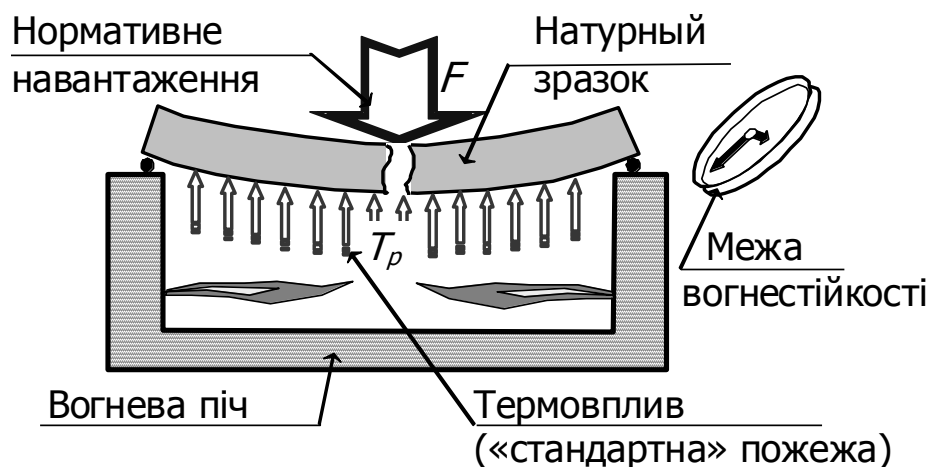


Рис. 1.5. Схема проведення високотемпературних випробувань залізобетонних ригелів та балок

Установка для випробувань складається з вогневої печі, що є її основою. Огородження печі має витримувати відповідні навантаження з боку випробовуваного елемента та тягарів, які встановлені на нього. Також установка має бути оснащена паливно-форсунковою системою, контрольно-вимірною системою, та програмним забезпеченням для впорядкування та обробки вимірювань. На рис. 1.6 показані приклади діючих випробувальних установок в нашій державі та за кордоном.



Рис. 1.6. Зображення установок для випробувань сталобетонних та сталезалізобетонних плит на вогнестійкість.

Вимірювання переміщення плити відбувається у місці найбільшого прогину, тобто посередині цієї плити.

Зразки не менше ніж за 15 хв до початку випробування мають бути навантажені тягарями відповідно до конструкторської документації на плити. Навантаження зразків потрібно здійснювати за методикою [22, 23].

Підготовку установки до випробувань потрібно проводити згідно з відповідними інструкціями з експлуатації. Деформації, що виникають в результаті прикладання навантаження, після їх стабілізації необхідно виміряти та зареєструвати.

Згідно з чинними стандартами дозволяється одночасне випробування двох зразків сталобетонних та сталезалізобетонних плит.

При проведенні випробувань за описаними методиками можуть з'явитися істотні похибки. Серед причин, що ведуть до появи похибки слід віднести те, що замовнику надається можливість випробувати зразки без навантаження. При випробуванні плит також замовнику надається можливість здійснювати зміну діючих навантажень. До істотної похибки може привести обмежені вимоги до розташування плит, способу прикладення навантажень.

При цьому схема встановлення термопар має гарантувати, що факели пальників не будуть їх торкатися.

За узгодженням з випробувальною лабораторією термопари встановлюють у відповідних місцях під час виготовлення зразка у спеціальних трубках або через спеціальні отвори, які передбачаються в необхідних місцях на зразку.

Вказані недоліки можуть привести до появи похибки близько 30 % [53 – 54].

Крім вказаних недоліків метод вогневих випробувань є трудомістким, дорого вартісним та екологічно небезпечним.

#### **1.4.2. Розрахункові методи оцінки вогнестійкості сталезалізобетонних плит.**

Недоліки, що має експериментальний метод, не властиві розрахунковим методам, оскільки вони не обмежені величиною і типом навантаження, типом закріплення плит, їх розмірами та конфігурацією [25 – 66]. Крім цього, розрахунковий метод є менш вартісним, не потребує додаткових спеціальних умов та є менш трудомістким.

Розрахункові методи мають різну обчислювальну базу. Умовно їх можна розділити на спрощені методи і уточнені методи.

Спрощені методи – це методи, що використовують напівемпіричний підхід, а також спрощений інженерний підхід, що має у основі комплекс гіпотез, які не мають суворого теоретичного обґрунтування. Це дозволяє використовувати нескладні алгебраїчні формули і рівняння. На рис. 1.7. подана структура спрощених розрахункових методів оцінки вогнестійкості сталобетонних та сталезалізобетонних плит в умовах пожежі із стандартною температурною кривою.

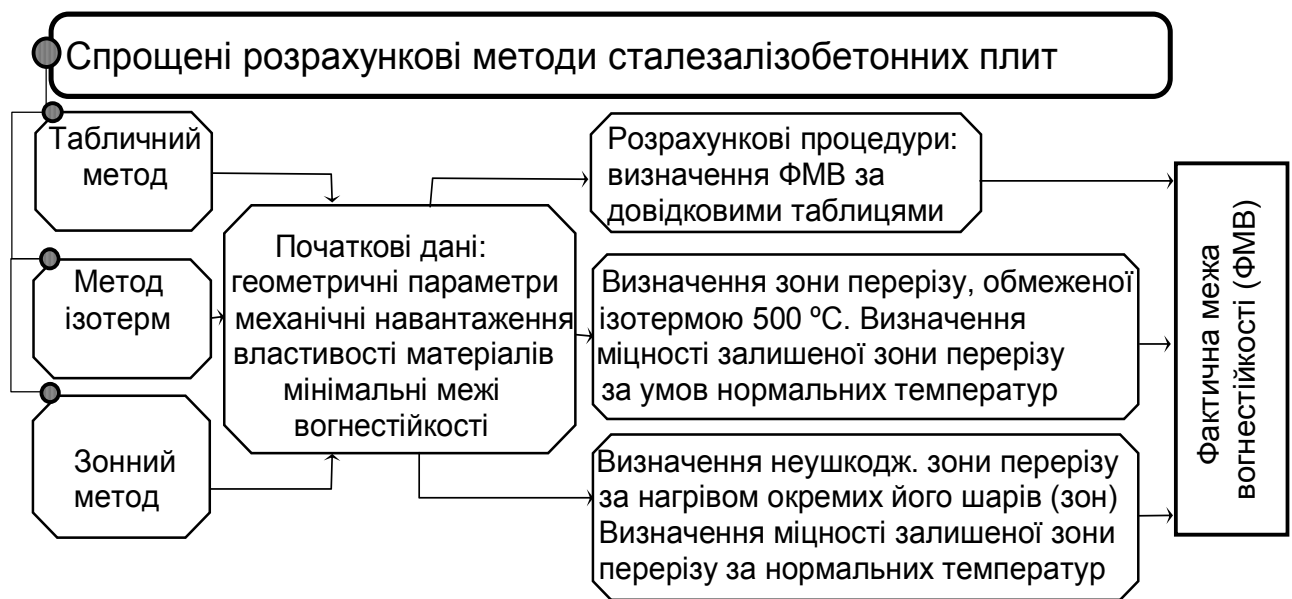


Рис. 1.7. Структурна схема спрощених розрахункових методів прогнозування функціонування сталобетонних та сталезалізобетонних плит в умовах пожежі із стандартним температурним режимом.

Спрощені методи засновані на використанні спеціальних таблиць, де вказані мінімальні розміри товщини плит та захисного шару. При цьому вони не потребують складних розрахунків, а їх методика увійшли до відповідних норм багатьох держав [25, 26, 31].

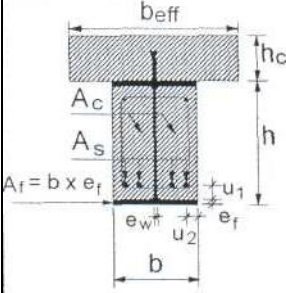
Табличні методи мають суттєвий недолік, що полягає у невисокій точності результатів (похибка біля 30 – 40%) [81]. Вказана похибка пояснюється тим, що дані таблиці узагальнюють великий емпіричний досвід із великим розкидом геометричних параметрів плит, їх навантаження та умов закріплення. Тому

табличний метод застосовується тільки у випадку, коли необхідно швидко оцінити клас вогнестійкості, при цьому не звертається увага на можливий суттєвий запас міцності, який можна отримати.

Для застосування табличного методу застосовуються таблиці типу табл. 1.6 [25].

Таблиця 1.6

**Розміри сталезалізобетонних плит  
для забезпечення заданого класу вогнестійкості**

 <p align="center">УМОВИ застосування</p> <p>плита <math>h_c \geq 120\text{мм}</math>  <math>b_{\text{eff}} \leq 5\text{ м}</math>          сталевий переріз  <math>b/e_w \geq 15</math> <math>e_f/e_w \geq 2</math>          площа додаткової          арматури/загальна площа між          полицями <math>A_s/(A_c+A_s) \leq 5\%</math></p>	Стандартні межі вогнестійкості				
	R30	R60	R90	R120	R180
Мінімальні розміри перерізу для рівня навантаження $\eta_{fi,t} \leq 0,3$					
мінімальна $b$ (мм) та відношення площі додаткової арматури $A_s$ до площі полиці $A_s/A_f$					
$h \geq 0,9 \times \text{мін } b$	70/0,0	100/0,0	170/0,0	200/0,0	260/0,0
$h \geq 1,5 \times \text{мін } b$	60/0,0	100/0,0	150/0,0	180/0,0	240/0,0
$h \geq 2,0 \times \text{мін } b$	60/0,0	100/0,0	150/0,0	180/0,0	240/0,0
Мінімальні розміри перерізу для рівня навантаження $\eta_{fi,t} \leq 0,5$					
мінімальна $b$ (мм) та відношення площі додаткової арматури $A_s$ до площі полиці $A_s/A_f$					
$h \geq 0,9 \times \text{мін } b$	80/0,0	170/0,0	250/0,4	270/0,5	-
$h \geq 1,5 \times \text{мін } b$	80/0,0	150/0,0	200/0,2	240/0,3	300/0,5
$h \geq 2,0 \times \text{мін } b$	70/0,0	120/0,0	180/0,2	220/0,3	280/0,3
$h \geq 3,0 \times \text{мін } b$	60/0,0	100/0,0	170/0,2	200/0,3	250/0,3

Продовження табл. 1.6

Мінімальні розміри перерізу для рівня навантаження $\eta_{fi,t} \leq 0,7$					
мінімальна $b$ (мм) та відношення площі додаткової арматури $A_s$ до площі полиці $A_s/A_f$					
$h \geq 0,9 \times \text{мін } b$	80/0,0	270/0,4	300/0,6	-	-
$h \geq 1,5 \times \text{мін } b$	80/0,0	240/0,3	270/0,4	300/0,6	-
$h \geq 2,0 \times \text{мін } b$	70/0,0	190/0,3	210/0,4	270/0,5	320/1,0
$h \geq 3,0 \times \text{мін } b$	70/0,0	170/0,2	190/0,4	270/0,5	300/0,8

В табл. 1.6 наведені мінімальні розміри сталезалізобетонної плити та товщина захисного шару сталевих елементів ребра плити.

Всі інші розрахункові методи зазвичай розділяються на дві автономні задачі – теплотехнічну та статичну [25 – 66]. Теплотехнічна задача вирішується з використанням полумпіричних, або теоретичних методів. Статична задача вирішується за допомогою застосування різних моделей напружено-деформованого стану (НДС) бетону та арматурної сталі.

При застосуванні теоретичного підходу, який заснований на базових континуальних рівняннях теплопровідності та НДС у часткових похідних і їх реалізації одним із чисельних методів з врахуванням температурних деформацій та деформації текучості, повзучості у сталевих елементах та шарі бетону, називається уточненими методами.

### **1.5. Математичні моделі теплопередачі для розрахункових методів оцінки вогнестійкості сталобетонних та сталезалізобетонних плит**

Для розв'язку теплотехнічної задачі необхідно застосувати одну з математичних моделей теплопровідності. Для комбінованої конструкції бетонної плити та сталевих двотавра температура може визначатися як показано на схемі, що наведена на рис. 1.8 [25].



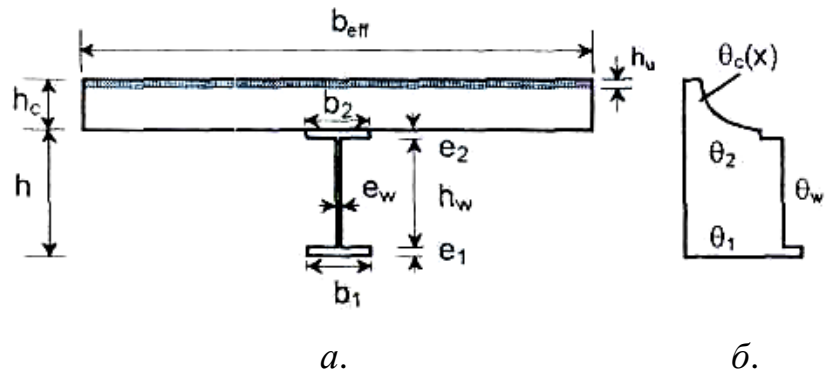


Рис. 1.8. Поперечний переріз сталобетонної плити (а) та епюра розподілу температури у ньому (б).

Підвищення температури  $\Delta\theta_{a,t}$  окремих частин незахищеної сталевий балки протягом інтервалу часу  $\Delta t$  може визначатися за формулою [25]:

$$\Delta\theta_1 = k_{sh} \left( \frac{1}{c_a \rho_a} \right) \left( \frac{A_i}{V_i} \right) \dot{h}_{net} \Delta t, \quad (1.3)$$

де  $k_{sh}$  – поправочний коефіцієнт затемнення даної конструкції іншими;

$c_a$  - питома теплоємність сталі згідно, [Дж/кг К];

$\rho_a$  - густина сталі згідно, [кг/м<sup>3</sup>];

$A_i$  - площа незахищеної поверхні частини  $i$  сталевий поперечного перерізу на одиницю довжини, [м<sup>2</sup>/м];

$A_i/V_i$  – коефіцієнт поперечного перерізу [м<sup>-1</sup>] частини  $i$  сталевий поперечного перерізу;

$V_i$  – об'єм частини  $i$  сталевий поперечного перерізу на одиницю довжини [м<sup>3</sup>/м];

$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r}$  – розрахункове значення чистого теплового потоку на одиницю площі за [25], [Вт/м<sup>2</sup>];

$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c(\theta_t - \theta_{\alpha,t})$ , – розрахункове значення теплового потоку на одиницю площі за рахунок конвекції, [Вт/м<sup>2</sup>];

$\dot{h}_{net,c} = 5,67 \cdot 10^{-8} \varepsilon_m \varepsilon_f [(\theta_t + 273)^4 - (\theta_{\alpha,t} + 273)^4]$  – розрахункове значення теплового потоку на одиницю площі за рахунок променистого теплообміну, [Вт/м<sup>2</sup>];

$\varepsilon_m$  – ступінь чорноти матеріалу конструкції;

$\varepsilon_f$  – ступінь чорноти випромінювання вогню за [25, 26];

$\theta_t$  – температура пожежного середовища у даний момент часу  $t$ , [°C];

$\theta_{\alpha,t}$  – температура сталі у даний момент часу  $t$ , [°C], вважається однаковою в кожній частині сталевого поперечного перерізу

$\Delta t$  – інтервал часу, [сек];

Коефіцієнт затемнення може бути визначений за формулою [25]:

$$k_{sh} = 0,9 \frac{e_1 + e_2 + 0,5b_1 + \sqrt{h_w^2 + 0,25(b_1 - b_2)^2}}{h_w^2 + b_1 + 0,5b_2 + e_1 + e_2 - e_w}, \quad (1.4)$$

де  $e_1, b_1, e_w, h_w, e_2, b_2$  – розміри поперечного перерізу згідно з рис. 1.7.

Підвищення температури  $\Delta\theta_{\alpha,t}$  різних частин сталевієї балки з ізолюючим покриттям за інтервал часу  $\Delta t$  можна отримати за формулою [25]:

$$\Delta\theta_{\alpha,t} = \left[ \left( \frac{\lambda_p / d_p}{c_a \rho_a} \right) \left( \frac{A_{p,i}}{V_i} \right) \left( \frac{1}{1 + w/3} \right) (\theta_t - \theta_{\alpha,t}) \Delta t \right] - [(e^{w/10} - 1) \Delta\theta_t], \quad (1.5)$$

$$w = \left( \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} \right) d_p \left( \frac{A_{p,i}}{V_i} \right),$$

де:  $\lambda_p$  – теплопровідність вогнезахисного матеріалу, [Вт/м·°C]

$d_p$  – товщина вогнезахисного покриття, [м]

$A_{p,i}$  – площа внутрішньої поверхні вогнезахисного матеріалу на одиницю довжини частини  $i$  сталевого елемента, [м<sup>2</sup>/м]

$c_p$  – питома теплоємність вогнезахисного матеріалу, [Дж/кг·°C]

$\rho_p$  – густина вогнезахисного матеріалу, [кг/м<sup>3</sup>]

Температура у бетонній плиті визначається за допомогою положень що викладені в стандартах [26]. Для цього може бути використана номограма, що наведена на рис. 1.9.

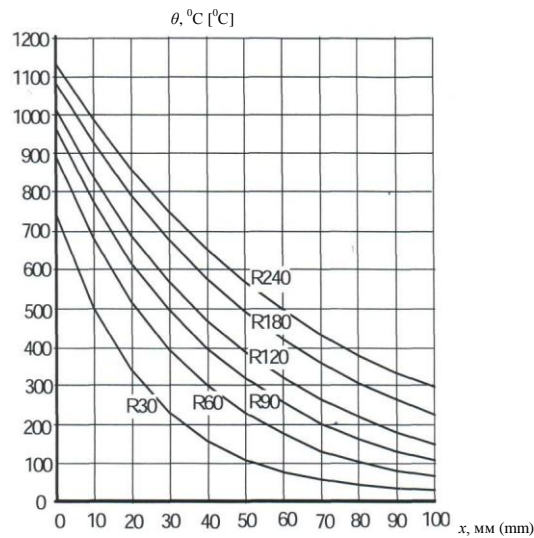


Рис. 1.9. Номограма для визначення температурного розподілення у залізобетонній плити товщиною більше за 200 мм.

Для вивчення розподілень температури по перерізах бетону сталезалізобетонних плит використовується розрахункова методика, заснована на розв'язку рівняння теплопровідності із граничними умовами (ГУ) III роду встановлена чинними стандартами України і детально описана у роботах [1]. Крайова задача при цьому формулюється з використанням розрахункової схеми, яка подана на рис. 1.10.

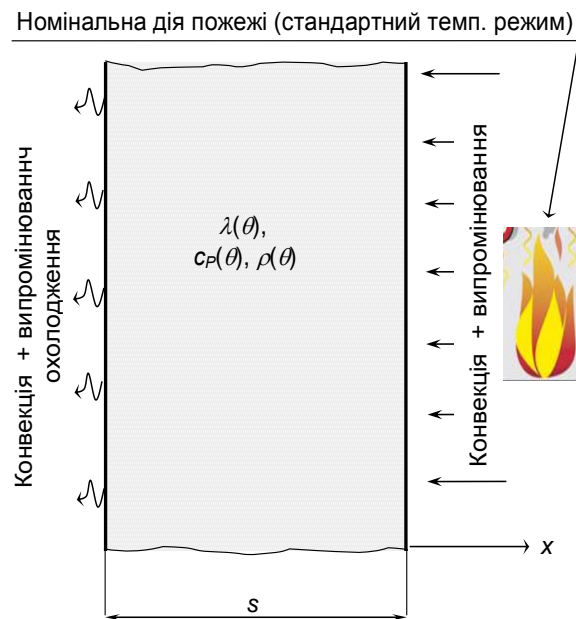


Рис. 1.10. Розрахункова схема при односторонньому нагріву сталезалізобетонної плити.

Математична модель теплопередачі у цьому випадку добре описана у роботах [25 – 66]. При цьому використовується рівняння теплопровідності у такому вигляді:

$$c(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial x}\right), \quad (1.6)$$

де  $c(\theta) = \rho(\theta)c_p(\theta)$  - питома об'ємна теплоємність

Вираз, який відповідає ГУ III роду на обігрівній поверхні записується у вигляді:

$$-\lambda(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial x}\Big|_{x=b} = \alpha_p(\theta_p - \theta_w). \quad (1.7)$$

де  $\theta_p$ ,  $\theta_w$  - температури відповідно пожежного середовища та поверхні елемента з обігрівної сторони.

На не обігрівній поверхні елемента вираз для ГУ III роду записується у вигляді:

$$-\lambda(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial x}\Big|_{x=0} = \alpha_n(293 - \theta_n), \quad (1.8)$$

де  $\alpha$ ,  $\alpha_k$  - коефіцієнти теплообміну на обігрівній та не обігрівній поверхні відповідно.

Для чисельного розв'язку рівняння теплопровідності застосовується метод кінцевих різниць.

Для рівняння теплопровідності у запису (1.6) при його лінеаризації застосовується інтегро-інтерполяційний метод [93 – 108].

Ліва частина рівняння теплопровідності у кінцевих різницях записується у вигляді виразу [93 – 108]:

$$c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = c \left( \frac{\theta_{i,k} + \theta_{i,k+1}}{2} \right) \cdot \frac{\theta_{i,k+1} - \theta_{i,k}}{\Delta t}. \quad (1.9)$$

Права частина рівняння (1.6) з точністю  $O(h^2 + \Delta t)$  у кінцевих різницях має такий вигляд [93 – 108]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) = a_x \theta_{i-1,k}^x - (a_x + b_x) \theta_{i,k}^x + b_x \theta_{i+1,k}^x \quad (1.10)$$

При залежності від температури коефіцієнту теплопровідності останній визначається з використанням інтегро-інтерполяційного методу [93 – 108] за такими виразами:

$$a = \frac{\lambda(\theta_{i-1})\lambda(\theta_i)}{(\lambda(\theta_{i-1}) + \lambda(\theta_i))h^2}, \quad b = \frac{\lambda(\theta_{i+1})\lambda(\theta_i)}{(\lambda(\theta_{i+1}) + \lambda(\theta_i))h^2} \quad (1.11)$$

При використанні виразів (1.9) – (1.11) рівняння теплопровідності записується у вигляді рекурентних формул у вузлових точках для  $k+1$ -го часового шару попередньо визначеними температурами  $k$ -того часового шару. Рекурентні формули записується в неявному вигляді і розв'язуються як нелінійні рівняння.

ГУ III роду у кінцевих різницях записуються у вигляді [109]:

$$\frac{\lambda(\theta_{w_k})\lambda(\theta_{1,k})}{\lambda(\theta_{w_k}) + \lambda(\theta_{1,k})} \cdot \frac{\theta_{w_k} - \theta_{1,k}}{h} + \frac{h \cdot c(\theta_{1,k})}{2 \cdot \Delta t} \cdot (\theta_{1,k} - \theta_{1,k-1}) = \alpha_k (\theta_{1,k} - \theta_{p,k}) \quad (1.12)$$

де  $\theta_p$  – температура пожежі, що відповідає стандартному температурному режимові і визначається за формулою (1.2);

$\alpha$  – коефіцієнт теплообміну;

$h \sim 0.02$  м – крок розбиття перерізу;

$\Delta t = 60$  с – часовий крок.

Часовий і просторовий крок вибирається за умовою збіжності вибраної кінцево-різницевої схеми. Також часовий крок за можливістю вибирається рівним

1 хв, відповідно до контрольного проміжку часу при проведенні вогневих випробувань.

### 1.6. Математичні моделі напружено-деформованого стану для розрахункових методів оцінки вогнестійкості сталобетонних та сталезалізобетонних плит

При розв'язку статичної задачі для сталезалізобетонних плит використовується метод граничних станів, що полягає у визначенні несучої здатності за критичними деформаціями у її перерізі [3 – 19, 25]. Для цього використовується розрахункова схема перерізу представлена на рис. 1.11. На даній схемі показана еюра граничних деформацій і відповідна їй силова схема.

Використовуючи розрахункові схеми, що представлені на рис. 1.11 визначається несуча здатність у вигляді моменту пари сил, відповідному силовій схемі за критичними деформаціями [25].

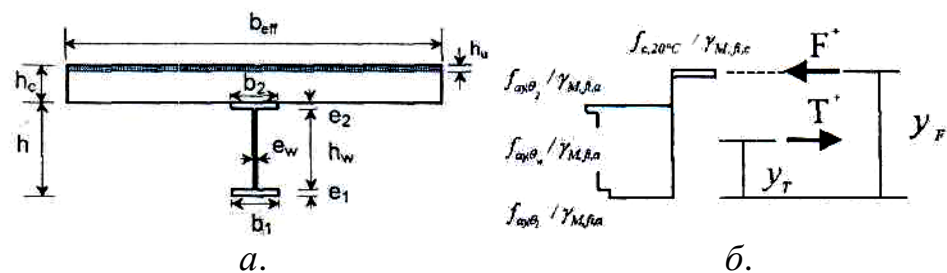


Рис. 1.11. Розрахункова схема перерізу стале залізобетонної плити (а) та еюра граничних напружень у сталевому елементі и стиснутому шарі бетону разом із силовою схемою (б).

Розтягуюча сила у сталевому елементі для схеми на рис. 1.10 визначаються за формулою [25]:

$$T^+ = [f_{ay, \theta_1} \cdot (b_1 e_1) + f_{ay, \theta_w} \cdot (h_w e_w) + f_{ay, \theta_2} \cdot (b_2 e_2)] / \gamma_{M, fi, a}$$

$$y_T = [f_{ay, \theta_1} \cdot (0,5 b_1 e_1^2) + f_{ay, \theta_w} \cdot (h_w e_w) (e_1 + 0,5 h_w) + f_{ay, \theta_2} \cdot (b_2 e_2) (h - 0,5 e_2)] / (T^+ \cdot \gamma_{M, fi, a}) \quad (1.13)$$

де  $f_{ay,\theta}$  – максимальний рівень напруження у двотаврі за температури  $\theta$  згідно із схемою на рис. 1.11, [МПа];

$\gamma_{M,\bar{f}_i,a}$  – коефіцієнт запасу міцності конструкційної сталі при пожежі

З огляду на схему рис. 1.11 та формулу (1.13) можна визначити товщину стиснутої зони бетону за формулою [25]:

$$h_u = T^+ \cdot \gamma_{M,\bar{f}_i,c} \cdot b_{eff}^{-1} f_c^{-1}, \quad (1.14)$$

де  $\gamma_{M,\bar{f}_i,c}$  – коефіцієнт запасу міцності бетону плити за нормальних умов;

$f_c$  – міцність бетону плити на стискання, [МПа].

За значенням розтягуючою силою визначається граничний момент у перерізі сталобетонної плити за формулою [25]:

$$M_{\bar{f}_i,Rd^+} = T^+ (y_F - y_T), \quad (1.15)$$

де відстань до середини стиснутої зони бетону визначається як [25]

$$y_F \approx h + h_c - (h_u / 2). \quad (1.16)$$

Даний спрощений підхід має недоліки, що полягають у неможливості врахування арматури у бетонній плиті, неможливості врахування зниження міцнісних та деформативних властивостей бетону внаслідок його деградації під впливом нагрівання, крім цього спрощення, що були прийняті для створення даних методик, можуть вести до суттєвої похибки і завищення запасу ресурсу структуру при її аварійній роботі в умовах пожежі.

Уникнути даних недоліків дозволяє більш суворий підхід до вирішення статичної задачі, що полягає у розгляданні розрахункової області як масивного об'єкту. Для цього розглядається система диференціальних рівнянь НДС елемента конструкції у часткових похідних [119 – 121].

У загальному випадку до системи рівнянь НДС має входити рівняння рівноваги у елементарному об'ємі у матричній формі у такому вигляді [81, 122]:

$$\mathbf{D}^T \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{p} = \mathbf{0}; \quad (1.17)$$

Також до системи диференціальних рівнянь НДС входить рівняння перетворення вектора довільних напружень до напружень, що діють на нормальній площадці і граничні умови на поверхні масиву:

$$\mathbf{q} = \mathbf{T}_n^T \boldsymbol{\sigma}, \quad \mathbf{q}|_{S_q} = \bar{\mathbf{q}}; \quad (1.18)$$

Ще одне рівняння с системи НДС елемента конструкції у матричній формі називається кінематичним рівнянням сумісності деформацій з граничними умовами на поверхні елементарного об'єму тіла записується у вигляді:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{D}\mathbf{u} + \boldsymbol{\varepsilon}_t, \quad \mathbf{u}|_{S_u} = \mathbf{u}; \quad (1.19)$$

Для встановлення зв'язку між векторами напруженнями та векторами деформацій у системі диференціальних рівнянь записується рівняння стану у вигляді:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E}(\boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\varepsilon}_t) + \boldsymbol{\sigma}_0. \quad (1.70)$$

У данні рівняння входять наступні параметри:



$$\mathbf{D}^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} - \text{матриця диференціального оператора};$$

$\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_x \sigma_y \sigma_z \tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx})^T$  – вектор напружень;

$\mathbf{p} = (X Y Z)^T$  – вектор об'ємних сил;

$$\mathbf{T}_n^T = \begin{bmatrix} n_x & 0 & 0 & n_y & 0 & n_z \\ 0 & n_y & 0 & n_x & n_z & 0 \\ 0 & 0 & n_z & 0 & n_y & n_x \end{bmatrix} - \text{матриця направляючих косинусів до нормалі заданої}$$

площинки;

$\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_x \sigma_y \sigma_z \tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx})^T$  – вектор напружень;

$\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z \gamma_{xy} \gamma_{yz} \gamma_{zx})^T$  – вектор деформацій;

$\mathbf{E}$  – матриця коефіцієнтів пружності;

$\boldsymbol{\varepsilon} = (\alpha_l T \alpha_l T \alpha_l T 0 0 0)^T$  – вектор температурних деформацій

$\boldsymbol{\sigma}_0$  – вектор діючих напружень при навантаженні відповідно до розрахункової схеми конструкції;

Наведені рівняння визначають НДС твердих тіл в умовах пружних деформацій, які підкоряються закону Гука. При використанні нелінійних математичних моделей бетону й арматури, а також в умовах спільної роботи при загальному деформуванні їх композиції є актуальним питання про побудову коректних математичних моделей зв'язку між деформаціями й напруженнями, тобто модифікації рівнянь (1.19) з урахуванням реальних законів деформування. Згідно з роботами [81, 119 – 123] при використанні рівняння (1.20) існує ряд особливостей, пов'язаних з обліком специфічних для бетону й залізобетону явищ, які відбуваються при його деформуванні. До таких явищ ставиться усадка, повзучість, дилатація й деякі інші, які зв'язуються із процесами утворення й розвитку тріщин у бетоні. Крім цього необхідно враховувати особливості спільної роботи арматури й бетону особливо в умовах нагрівання, враховуючи, що

терморозширення бетону й арматури відрізняється практично на порядок. Дана обставина викликає необхідність розгляду приарматурних шарів бетону, що мають при нагріванні локальні неоднорідності НДС. Усі ці особливості враховуються при формуванні матриці  $E$ . На даний час розвинено два основні підходи [119 – 123] для формування цієї матриці.

При першому підході, який розвинений у роботах [119 – 123] бетон розглядається як ортотропний матеріал внаслідок неоднорідності, що виникає при утворенні й розвитку макротріщин. Дана модель дозволяє описати спільну роботу бетону й арматури, розвиток дилатації, а також урахувати спадаючу ділянки діаграми деформування бетону. Розвиток такого підходу пов'язане з розв'язком дискретних моделей залізобетону при застосуванні МКР і МКЕ.

Другий підхід, розвинутий у роботах [119 - 121] заснований на представленні бетону ізотропною моделлю, у якій наявність неоднорідності властивостей бетону усереднюються по об'єму матеріалу. При цьому використовується пружнопластична модель деформування матеріалу. При використанні цього підходу виникають труднощі, пов'язані із застосуванням його для опису тривісного напруженого стану при реалізації його за допомогою МКЕ [81, 119 – 123].

Дослідженнями великої кількості авторів [81, 119 – 123] доведене, що деформування й руйнування бетону супроводжується розвитком мікро- і макротріщин, орієнтованих головним чином уздовж головних осей напружень і деформацій. Це приводить до анізотропії властивостей матеріалу й говорить про те, що використання першого підходу є кращим. Крім цього даний підхід реалізований у більшості розрахункових комп'ютерних систем, що реалізують методи розрахунків залізобетону на основі дискретних моделей МКЕ.

Даний підхід є більш точним, оскільки при його застосуванні можливо врахувати всі особливості поведінки бетону та сталевих елементів в умовах термосилового впливу пожежі, але є недоліки, що полягають у складності моделей, що застосовуються, і відповідно підвищеним вимогам до обчислювальної техніки та фахівців, які виконують розрахунок. Результати,

отримані таким чином, потребують ретельних перевірок та верифікації з використанням експериментальних даних.

### **1.7. Мета і задачі досліджень**

Враховуючи вищевикладене були сформульовані ідея, мета роботи і основні задачі дослідження.

*Мета роботи* полягає у розкритті закономірностей залежності межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками від їх геометричних характеристик та діючого механічного навантаження в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі як підґрунтя удосконалення табличного методу її оцінювання.

#### ***Основні задачі дослідження.***

1. Провести аналіз сучасного стану забезпечення і методів оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит та виявити шляхи їх удосконалення;
2. Розробити методику і провести математичне моделювання поведінки сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками за впливу стандартного температурного режиму пожежі;
3. Розробити методику і провести експериментальні дослідження поведінки сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками за впливу стандартного температурного режиму пожежі;
4. Провести перевірку адекватності результатів математичного моделювання процесів деформації, руйнування з втратою вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками шляхом порівняння з даними експериментальних досліджень;

5. З урахуванням виявленої залежності межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками від їх геометричних параметрів, товщини захисного шару і механічного навантаження побудувати математичну модель, провести повний факторний експеримент та створити довідникову таблицю для визначення класу їх вогнестійкості;
6. Розробити удосконалений табличний метод оцінювання класу вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками.

## РОЗДІЛ 2

### РЕЗУЛЬТАТИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ ЗА ВПЛИВУ СТАНДАРТНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ПОЖЕЖІ

#### 2.1. Дослідження температурних розподілень у перерізах сталезалізобетонних плит при пожежі із стандартним температурним режимом за обчислювальним експериментом

**2.1.1. Математична модель теплопередачі у перерізах сталезалізобетонних плит за впливу стандартного температурного режиму пожежі.** Для теплотехнічного розрахунку сталезалізобетонних плит, при їх роботі в умовах вогневого впливу пожежі, в більшості робіт пропонується узагальнений інженерний підхід, який базується на наступних положеннях [81].

1. Для розрахунку використовується квазілінійне параболічне рівняння теплопровідності з граничними умовами (ГУ) III роду при врахуванні конвекційного і радіаційного теплообміну із середовищем пожежі.

2. Температурний режим пожежного середовища визначається за стандартною температурною кривою пожежі.

3. Враховуючи велику різницю теплопровідностей арматурної сталі і бетону, теплообмін враховується тільки в бетоні.

4. Теплофізичні характеристики (ТФХ) бетону представляються температурними залежностями згідно Eurocode 4 EN 1994-1-2: 2004.

5. Рівняння теплопровідності вирішується із застосуванням методу кінцевих елементів (МКЕ) з використанням комп'ютерної системи ANSYS Mechanical.

Рівняння теплопровідності має наступний вигляд [69 – 77, 81]:

$$c_p(\theta)\rho(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial t} = \nabla(\lambda(\theta)\nabla\theta), \quad (2.1)$$

де  $\rho(\theta)$  - густина,

$c_p(\theta)$  – питома теплоємність,

$\lambda(\theta)$  – коефіцієнт теплопровідності, залежні від температури  $T$ .

При вирішенні рівняння теплопровідності були використані граничні умови III роду [69 – 77, 81]:

$$-\lambda(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial r} = \alpha(\theta_p - \theta_w), \quad (2.2)$$

де  $\theta_p$  – температура температура пожежного середовища у пристінковому шарі,

$\theta_w$  – температура поверхні елемента,

$\alpha$  - коефіцієнт теплообміну.

Коефіцієнт теплообміну враховує дію конвекції та інфрачервоного випромінювання. При спрощеному підході, коефіцієнт теплообміну дорівнює:

$$\alpha = \alpha_p + \alpha_k, \quad (2.3)$$

де  $\alpha_p$  – коефіцієнт теплообміну випромінюванням.

Відповідно до рекомендацій [25, 26] конвективну и радіаційну складові можна визначити з виразів:

$$\begin{aligned} \alpha_k &= 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \text{ – обігрівна поверхня;} \\ \alpha &= 9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \text{ – необігрівна поверхня;} \\ \alpha_p &= \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{T_w^4 - T_p^4}{T_w - T_p} \end{aligned} \quad (2.4)$$

де  $\varepsilon_c = 0.7$  – ступінь чорноти поверхні бетону [25, 26];

$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  – константа Стефана-Больцмана,

Температура пожежної середовища визначається стандартною температурною кривою згідно з формулою (1.2).

Для теплотехнічних розрахунків сталобетонної плити були прийняті теплофізичні властивості бетону згідно із другою частиною Eurocode 4 [25]. Даний стандарт рекомендує використовувати для бетону температурні залежності коефіцієнта теплопровідності та питомої теплоємності за формулами, що наведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1

### Теплофізичні характеристики бетону сталезалізобетонної плити

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>
Важкий бетон на силікатному заповнювачі EN 1994-1-2:2012		
$2 - 0,2451 \frac{\theta}{100} + 0,0107 \left( \frac{\theta}{100} \right)^2$	$900\rho$ при $20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100^\circ\text{C}$ , $(900 + (\theta - 100))\rho$ при $100^\circ\text{C} < \theta \leq 200^\circ\text{C}$ , $(1000 + 0,5(\theta - 100))\rho$ при $200^\circ\text{C} < \theta \leq 400^\circ\text{C}$ , $1100\rho$ при $400^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}$	2300

Графіки температурних залежностей теплофізичних характеристик бетону наведені на рис. 2.1.

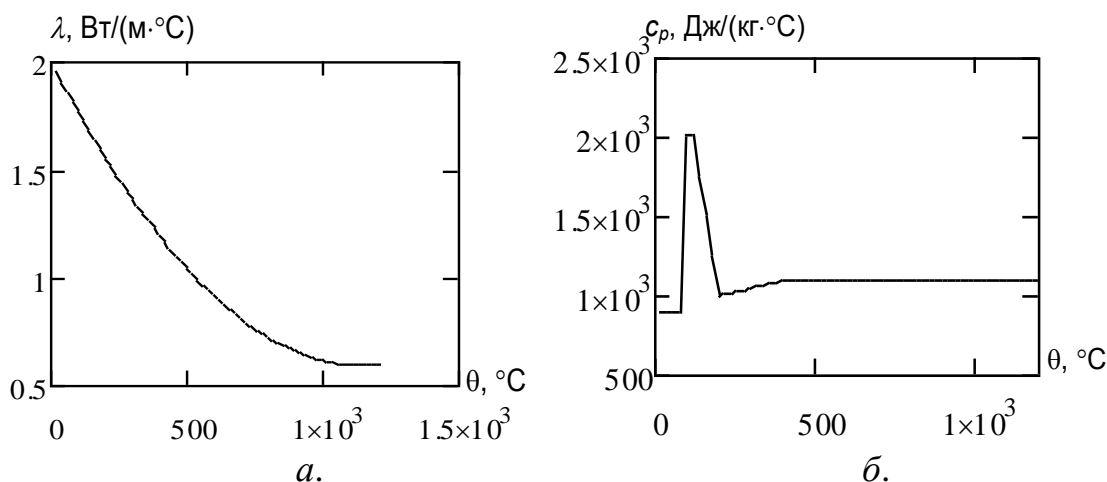


Рис. 2.1. Теплофізичні характеристики бетону: а – коефіцієнт теплопровідності; б – питома теплоємність.

Теплофізичні характеристики сталі арматурних стержнів та сталевому елементу двотаврового профілю визначаються згідно із рекомендаціями,

наведеними у другій частині Eurocode 4 [25]. В табл. 2.2 наведені формули, що визначають температурні залежності теплофізичних характеристик.

Таблиця 2.2

### Теплофізичні характеристики арматурної сталі сталезалізобетонної плити

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 EN 1994-1-2:2012		
$54 - 3,33 \cdot 10^{-2} \theta$ при $20\text{ °С} \leq \theta \leq 800\text{ °С}$ , 27,3 при $\theta > 800\text{ °С}$ .	$425 + 0,773\theta - 1,69 \cdot 10^{-2} \theta^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} \theta^3$ при $20\text{ °С} \leq \theta \leq 600\text{ °С}$ , $666 - 13002/(\theta - 738)$ при $600\text{ °С} < \theta \leq 735\text{ °С}$ , $545 + 17820/(\theta - 731)$ при $735\text{ °С} < \theta \leq 900\text{ °С}$ , 650 при $900\text{ °С} < \theta \leq 1200\text{ °С}$	7850

Графіки температурних залежностей теплофізичних характеристик сталі наведені на рис. 2.2.

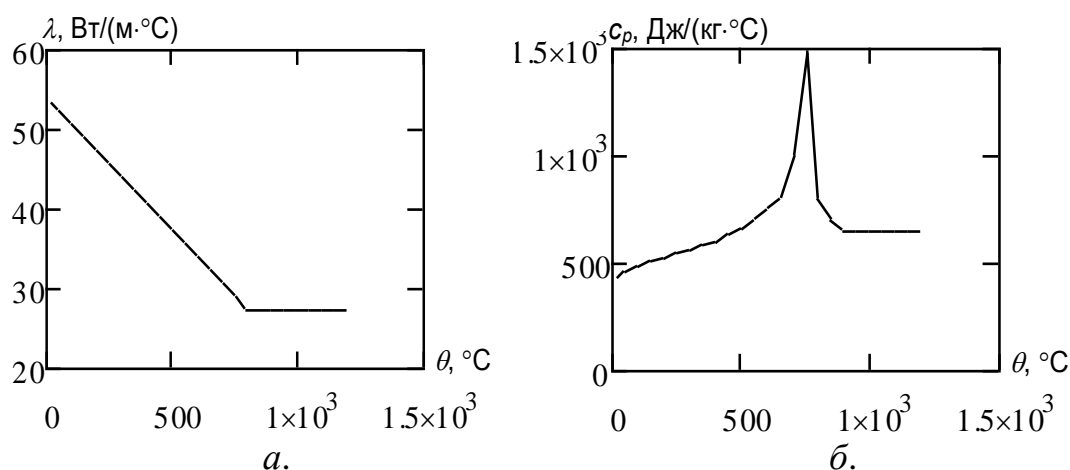


Рис. 2.2. Теплофізичні характеристики арматурної сталі та сталі двотаврового профілю: *a* – коефіцієнт теплопровідності; *б* – питома теплоємність.

Параметри граничних умов наведені у табл. 2.3. Величини даних параметрів приймалися з огляду на рекомендації других частин Eurocode 1 та Eurocode 4 [25].



**Параметри граничних умов для залізобетонної стіни**

Параметр	Позн.	Од.вим.	Вел.	Посилання
<b>Обігрівна сторона</b>				
Конвективна складова коефіцієнту теплообміну	$\alpha_c$	Вт/(м <sup>2</sup> °С)	25	EN 1991-1-2 Eurocode 1
Ступінь чорноти	$\varepsilon$		0,7	EN 1992-1-2 Eurocode 4
<b>Необігрівна сторона</b>				
Коефіцієнт теплообміну	$\alpha$	Вт/(м <sup>2</sup> °С)	9	EN 1991-1-2 Eurocode 1

**2.1.2. Числовий метод розв'язку задачі теплопровідності.** Вираження для апроксимації рівняння теплопровідності при використанні МКЕ має такий вид [81]:

$$[C_e] \{\theta_e\} + [K_e] \{\theta_e\} = \{Q_e\}, \quad (2.5)$$

де  $[C_e] = \rho \cdot C_p \int_V \{N\} dV$  – матриця теплоємності кінцевих елементів (КЕ);

$[K_e] = \int_V [B]^T [D] [B] dV$  – матриця теплопровідності КЕ;

$[B] = \{L\} \{N\} \theta$  – матриця розподілу температур в області, обмеженої КЕ;

$\theta = \{N\}^T \{\theta_e\}$  – температура усередині області, обмеженої КЕ;

$\{\theta_e\}$  – вектор вузлових температур КЕ;

$[D] = \begin{pmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix}$  – матриця теплопровідності;

$\{L\} = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \quad \frac{\partial}{\partial z} \right\}^T$  – вектор диференціального оператора;

$\{Q_e\} = q_w \int_s \{N\} ds$  – матриця граничних теплових потоків КЕ;

$\{N\}$  - вектор форми кінцевих елементів, який визначає інтерполяційні функції в області, обмеженої КЕ.

Для нестационарного рівняння теплопровідності можна записати визначну систему нелінійних рівнянь у матричному вигляді:

$$[K]\{\theta\} = \{Q_e\}, \quad (2.6)$$

де  $[K]$  – еквівалентна матриця теплопровідності, що залежить від об'ємної теплоємності й коефіцієнта теплопровідності матеріалу;

В узагальненому виді вираження (2.6) можна записати:

$$\{P(\theta)\} = \{Q_e\}, \quad (2.7)$$

де  $\{P(\theta)\}$  – вектор внутрішніх вузлових теплових потоків, обумовлений густиною теплових потоків елемента.

Дана система рівнянь вирішується ітераційним методом, відомим як метод Ньютона - Рафсона [81]. При використанні цього методу мінімізується нев'язність:

$$\{\Phi\} \equiv \{Q_e\} - \{P(\theta)\} \rightarrow \{0\}. \quad (2.8)$$

Метод Ньютона - Рафсона заснований на застосуванні усічених рядів Тейлора для залишкового вектора нев'язності. Цим система рівнянь (2.6) лінеаризується й записується у вигляді:

$$[K_T^{(i-1)}]\{\Delta\theta_e^{(i)}\} = \{Q^{(i)}\} - \{P^{(i)}\}. \quad (2.9)$$

При цьому виконуються рівноважні ітерації ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ), у результаті чого визначаються нові значення температур на кожній ітерації з виразу:

$$\{\theta^{(i)}\} = \{\theta^{(i-1)}\} + \{\Delta\theta^{(i)}\}. \quad (2.10)$$

Процес виконання ітерацій триває доти, поки не досягається прийнятна збіжність.

У рівнянні (2.10) коефіцієнти дотичної матриці  $[K_T]$  визначаються з виразу:

$$[K_T^{(i-1)}] \equiv \left( \frac{d\{\Phi\}}{d\{\theta\}} \right)_{i-1}. \quad (2.11)$$

Розкладання вектора  $\{\Phi\}$  в усічений ряд Тейлора має вигляд:

$$\{\Phi^{(i)}\} \cong \{\Phi^{(i-1)}\} + [K_T^{(i-1)}] \{\Delta\theta^{(i)}\}, \quad (2.12)$$

де  $\{\Delta\theta^{(i)}\} = \{\theta^{(i)}\} - \{\theta^{(i-1)}\}$  – визначуваний вектор збільшення температури для проведення наступної ітерації..

У рівнянні (2.9)  $\{Q^{(i)}\}$  – вектор вузлових теплових потоків, що розраховується при перевизначенні вектора зовнішнього заданого теплового потоку  $\{Q_{0n}\}$  і еквівалентної матриці теплопровідності  $[K]$ ;  $\{\bar{P}\}$  – еквівалентний вектор вузлових внутрішніх теплових потоків, що обчислюється при перевизначенні еквівалентної матриці теплопровідності, які визначаються шляхом чисельного інтегрування за часом вектора  $\{\Delta\theta^{(i)}\}$  методом Ейлера з використанням виразу:

$$\{\theta_{n+1}\} - \{\theta_n\} = \Delta t_n (1 - \zeta) \{\dot{\theta}_n\} + \Delta t_n \zeta \{\dot{\theta}_{n+1}\}, \quad (2.13)$$

де  $\Delta t_n$  – крок інтегрування за часом;

$\zeta$  - параметр Ейлера, рівний 0,5, що означає реалізацію неявної обчислювальної схеми Кранка - Николсона.

Еквівалентна матриця теплопровідності  $[K]$  визначається з виразу:

$$[K] = \frac{1}{\zeta \Delta t_n} [C_e] + [K_e], \quad (2.14)$$

Для перевизначення  $\{Q(\theta)\}$  використовується вираз:

$$\{Q_n(\theta)\} = \{Q_e\} + \frac{1-\zeta}{\zeta} [C_e] \{\dot{\theta}\}_n - [K_e] \{\theta_n\}. \quad (2.15)$$

### 2.1.3. Розрахункові схеми досліджуваних сталезалізобетонних плит.

Аналіз конструкторської документації показав, що останнім часом великого поширення набуло використання сталезалізобетонних плит із стандартним двотавровим профілем усередині плити. На рис. 2.3 подана схема армування даної сталезалізобетонної плити. Згідно із цією схемою особливістю цієї плити є те, що в неї крім сталевого двотаврового елемента ще застосовується сталеві арматура.

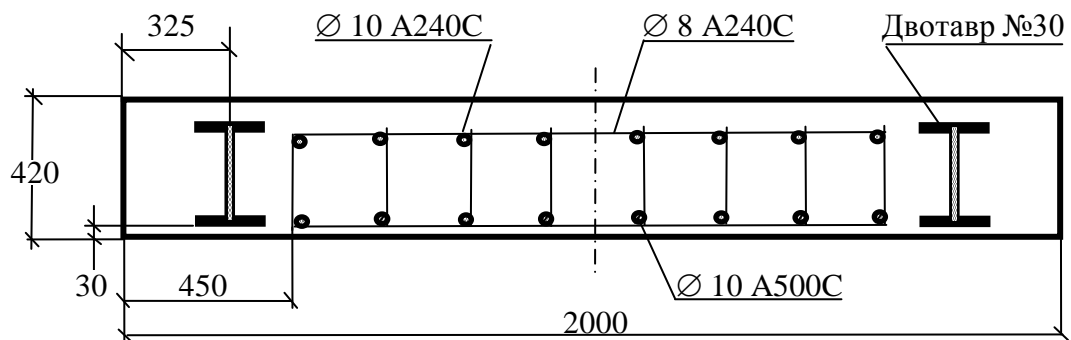


Рис. 2.3. Схема армування сталезалізобетонної плити.

При проведенні розрахунку були прийнята розрахункова схема до теплотехнічної задачі, що наведена на рис. 2.4.

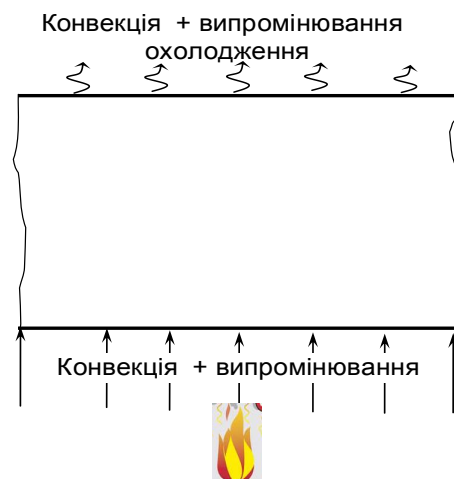


Рис. 2.4. Схема теплового впливу на сталезалізобетонну плити.

**2.1.4. Кінцево-елементна схема сталезалізобетонної плити для теплотехнічного розрахунку.** Для розв'язку задачі теплопровідності за методом кінцевих елементів нами був вибраний гексаедричний КЕ лагранжевого типу [119 – 122], форма якого представлена на рис. 2.5.

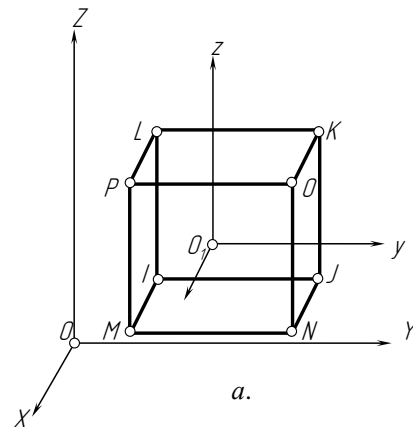


Рис. 2.5. Форма кінцевого елемента:

Інтерполяційні полиноми Лагранжа визначаються виразами [81, 119 – 121]:

$$\begin{aligned}
 u_X &= \frac{1}{8}(u_{LX}(1-x)(1-y)(1-z) + u_{KX}(1-x)(1-y)(1-z) + \dots + u_{IX}(1-x)(1-y)(1-z)); \\
 u_Y &= \frac{1}{8}(u_{LY}(1-x)(1-y)(1-z) + u_{KY}(1-x)(1-y)(1-z) + \dots + u_{IY}(1-x)(1-y)(1-z)); \\
 u_Z &= \frac{1}{8}(u_{LZ}(1-x)(1-y)(1-z) + u_{KZ}(1-x)(1-y)(1-z) + \dots + u_{IZ}(1-x)(1-y)(1-z));
 \end{aligned}
 \quad (2.16)$$

Кінцево-елементна схема сталезалізобетонної плити у відповідності з рис. 2.1 - рис. 2.3 представлена на рис. 2.6. На даному рисунку різними кольорами показані типи матеріалів, з яких вона виготовлена у відповідності з рис. 2.3.

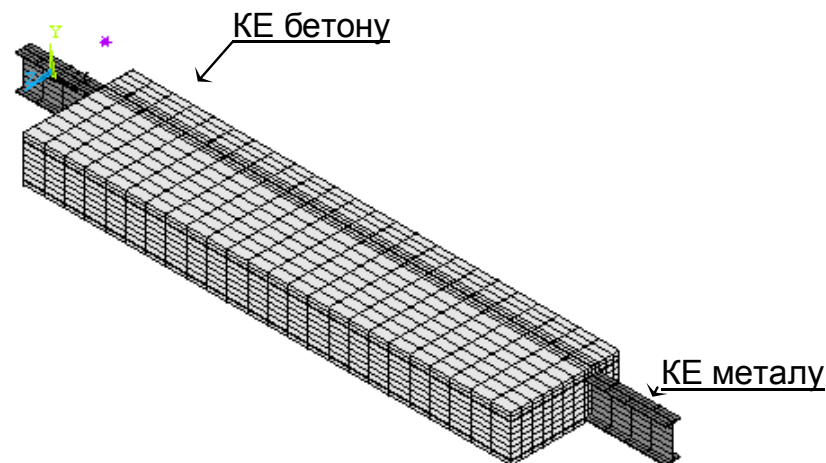


Рис. 2.6. Кінцево-елементна схема сталезалізобетонної плити

Згідно із п. 2.1.1 даної роботи до кінцево-елементної схеми були прикладені ГУ, схема прикладення яких наведена на рис. 2.7.

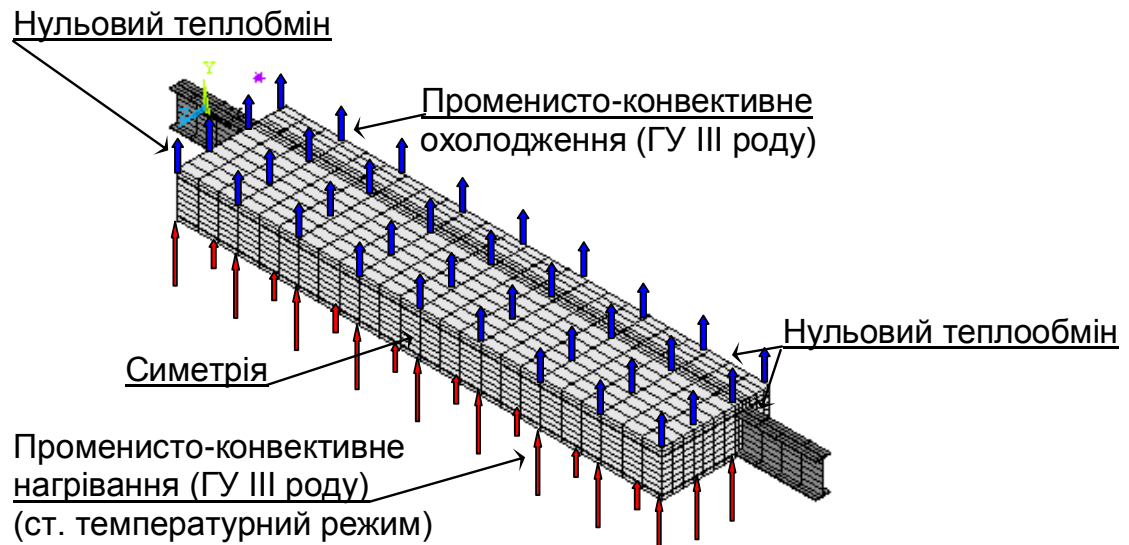


Рис. 2.7. Схема прикладання граничних умов до кінцево-елементної схеми сталезалізобетонної плити

**2.1.5. Результати розв'язку задачі теплопровідності для сталезалізобетонної плити за дії стандартного температурного режиму пожежі.** З метою зменшення обсягу розрахунків розглядалася симетрична половина плити при розв'язку теплотехнічної задачі і симетрична її чверть при розгляді міцнісної задачі. Робота вибраних фрагментів у складі всієї конструкції враховується за допомогою встановлення граничних умов симетрії по її боковій площині симетрії у теплотехнічній задачі і боковій та торцевій площинах симетрії у міцнісній задачі. Накладання температур у вузлові точки відбувається шляхом лінійної інтерполяції.

В результаті вирішення теплотехнічної задачі були отримані температурні розподілення, які наведені на рис. 2.8. Розподіли на рис. 2.8. видно, що наявність сталевих елементів у бетоні приводить до підвищення температури у бетоні у зоні, що прилягає до сталевих елементів.

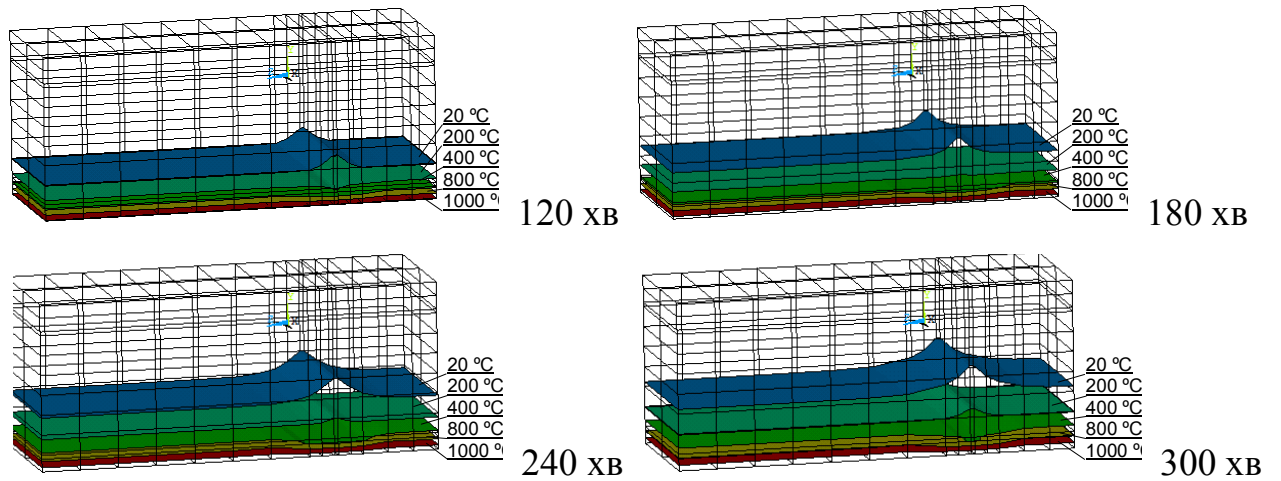


Рис. 2.8. Результати вирішення теплотехнічної задачі: температурні розподілення у перерізі сталезалізобетонної плити у різні моменти часу

Для більш детального розгляду температури були побудовані температурні розподілення по всьому об'єму плити. Дані температурні поля наведені на рис. 2.9.

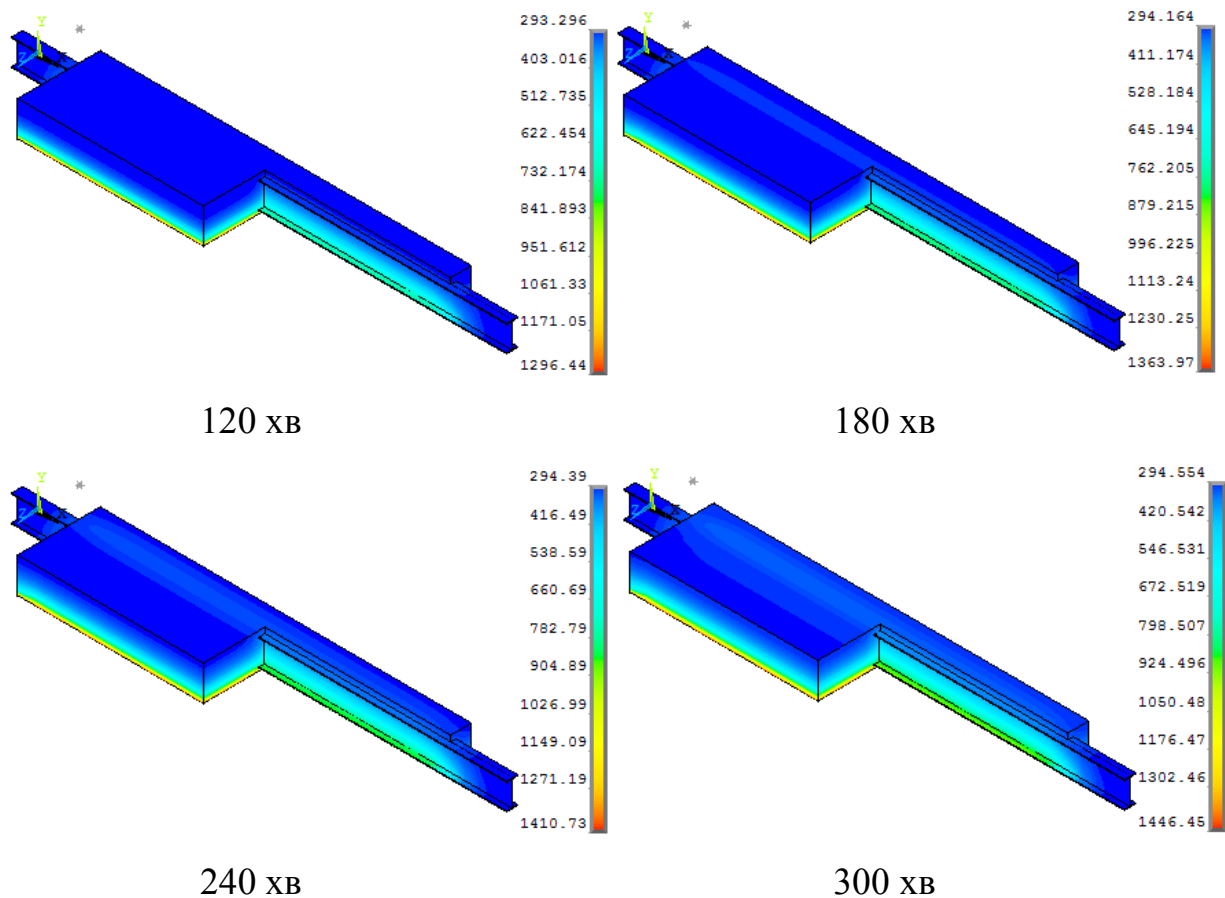


Рис. 2.9. Температурні розподіли у сталезалізобетонній плиті при пожежі.

Розподіли температури у плиті у зоні, що є прилеглою до сталевого елемента наведені на рис. 2.10.

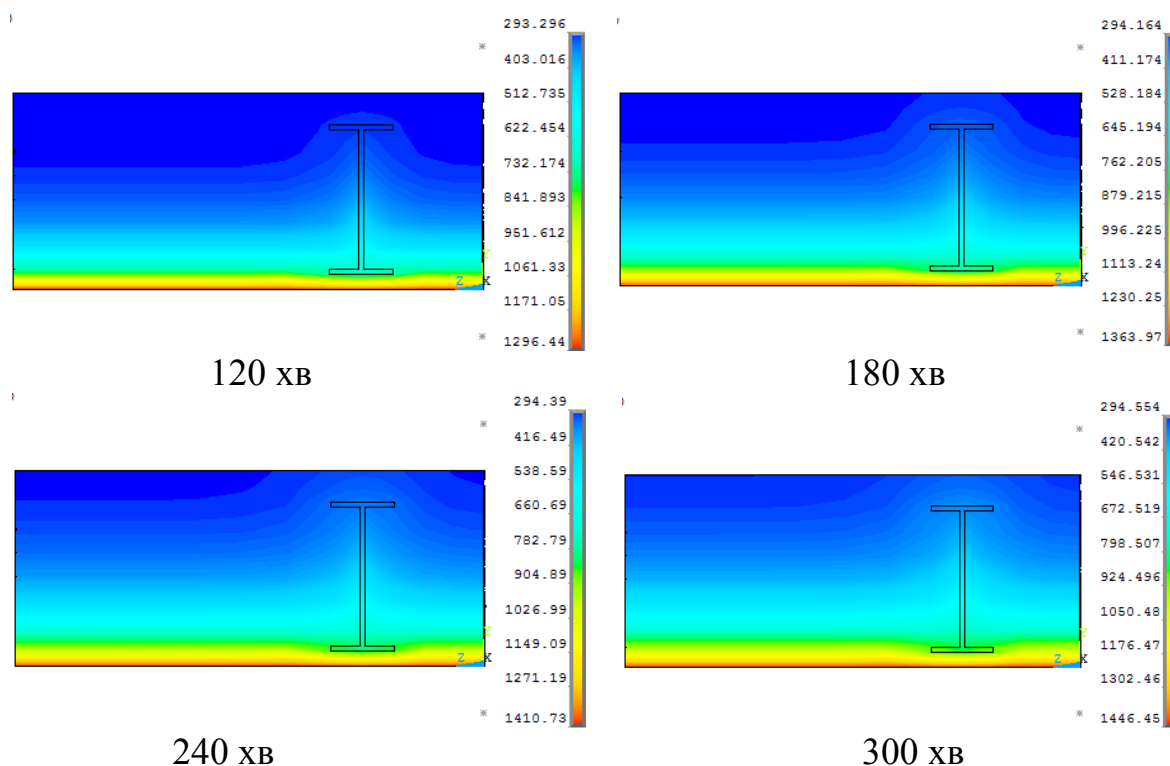


Рис. 2.10. Температурні розподіли у перерізі сталезалізобетонній плиті при пожежі у різні моменти часу.

На рис. 2.11 представлені графіки залежностей температури прогріву різних точок перерізу сталезалізобетонної плити від часу.

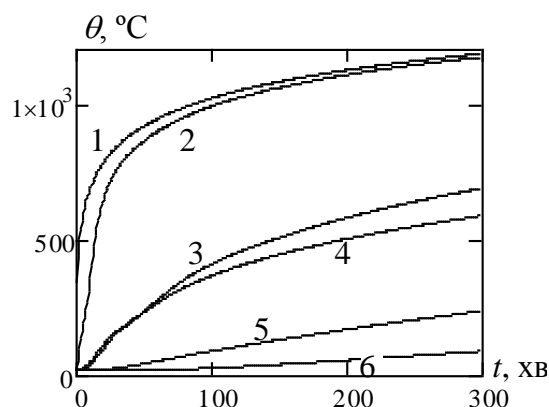


Рис. 2.11. Температури прогріву різних точок перерізу сталезалізобетонної плити від часу: 1 – стандартний температурний режим пожежі; 2 – обігрівна поверхня



плити; 3 – верхня поверхня полки двотавра; 4 – нижня поверхня полки двотавра; 5 – середина стінки двотавра; 6 – верхня поверхня двотавра.

Аналіз температури прогрівання сталезалізобетонної плити показав, що двотавр прогрівається набагато швидше бетонної матриці і суттєво впливає на температуру прилеглої зони бетону. Це вказує на додаткові градієнти температури всередині плити. Використовуючи результати розв'язку теплотехнічної задачі, можна вирішувати міцнісну задачу.

## **2.2. Чисельне дослідження напружено-деформованого стану у сталезалізобетонній плиті в умовах термосилового впливу пожежі**

**2.2.1. Математична модель напружено-деформованого стану у сталезалізобетонній плиті за умов термосилового впливу стандартного температурного режиму пожежі.** Для моделювання НДС у сталезалізобетонній плиті, нами пропонується узагальнений інженерний підхід, який базується на наступних положеннях.

1. Для розрахунку використовується система рівнянь НДС твердого тіла (1.17) – (1.20), що апроксимується за допомогою МКЕ.

2. Властивості матеріалу залежать від поточної деформації і температури нелінійно, а також допускаються великі деформації елементів конструкцій, що співставляються з їх розмірами.

3. Для визначення температурного впливу використовуються температурні розподіли, що є результатами попередньо вирішеної теплотехнічної задачі для стандартної температурної кривої пожежі.

4. Система рівнянь вирішується чисельно, методом кінцевих елементів у комбінації з методом Ньютона - Рафсона, шляхом покрокового додавання діючого механічного навантаження на початковому етапі і покрокового додавання температурних навантажень на заключному етапі з інтервалом 1 хв.

5. Для моделювання НДС сталезалізобетону при пожежі використовуються повні діаграми деформування для бетону та арматури з спадаючої гілкою.

6. Робота пошкодженого елемента і умови його пошкодження визначається відповідною теорією міцності бетону.

7. Критерієм глобального руйнування елемента залізобетонної будівельної конструкції є:

- поява незбіжності обчислювального процесу через порушення геометричної незмінюваності системи;
- досягнення критичних пластичних деформацій в кінцевих елементах моделі;
- досягнення критичних величин глобальних переміщень точок елементів залізобетонних будівельних конструкцій.
- досягнення критичних величин швидкості наростання глобальних переміщень точок елементів залізобетонних будівельних конструкцій

**2.2.2. Математичні моделі напружено-деформованого стану залізобетону і їх числова реалізація.** Використані моделі для вирішення міцнісної задачі вибиралися виходячи з сучасного підходу до моделювання НДС залізобетону [81]. У табл. 2.3 зведені основні математичні моделі НДС залізобетону.

Таблиця 2.3

**Моделі НДС бетону**

Особливість поведінки залізобетону	Використовувана матмодель (метод)	Автор
Базові рівняння НДС	Дозволяють рівняння МКЕ	
Пластичне деформування бетону та арматури	Багатошарова модель асоційованої теорії пластичного течії (кінетичне зміцнення)	Besseling
тріщиноутворення	Складовою критерій міцності бетону	Willem, Warnke
Фізич. і геом. нелінійність	Ітеративний метод	Newton, Raphson
Механічні властивості бетону та арматури при нагріві	Eurocode 2 EN 1994-1-2: 2004 баз.,	

Для вивчення напружено деформованого стану плити були прийняті основні технічні параметри, що наведені у табл. 2.4.

Таблиця 2.4

### Основні параметри сталезалізобетонної плити

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Тип бетону	Важкий на гранітному заповнювачі	Клас С 30/35 (В30)	
Густина бетону	$\rho_B$	2300	кг/м <sup>3</sup>
Гранична вологість	$u$	< 3	%
Робоча арматура нижня: • діаметр	$d_1$	Клас А500С 0,012	м
Робоча арматура верхня: • діаметр	$d_2$	Клас А240С 0,01	м
Каркасна арматура: • діаметр	$d_3$	Клас А240С 0,008	м
Сталевий двотавр висота	$h$	0,30	м

При врахуванні нелінійності механічних властивостей бетону та арматурної сталі використовуються рекомендації другої частини Eurocode 4 [25].

Відповідно до характеристик сталевих елементів у плиті характеристики міцності матеріалів плити наведені у табл. 2.5.

Таблиця 2.5

### Міцнісні параметри матеріалів стале залізобетонної плити

Матеріал	Міцність, МПа	Модуль пружності, МПа	Коеф. Пуассона
Бетон	40	$1,4 \cdot 10^4$	0,2
Робоча арматура	500	$2,1 \cdot 10^5$	0,3
Поперечна арматура	240	$2,1 \cdot 10^5$	0,3
Сталевий двотавр	240	$2,1 \cdot 10^5$	0,3

Користуючись рекомендаціями другої частини Eurocode 4 [25], приймаємо температурні залежності механічних властивостей матеріалів з використанням таких формул:

Для врахування зниження міцності бетону під час його нагрівання початкова міцність помножується на коефіцієнт зниження міцності:

$$f_{ck,t}(\theta) = k_{c,t}(\theta) f_{ck,t}, \quad (2.17)$$

де  $k_{c,t}(\theta)$  – коефіцієнт зниження міцності бетону у залежності від температури.

Залежність коефіцієнту зниження міцності наведена на рис. 2.12.

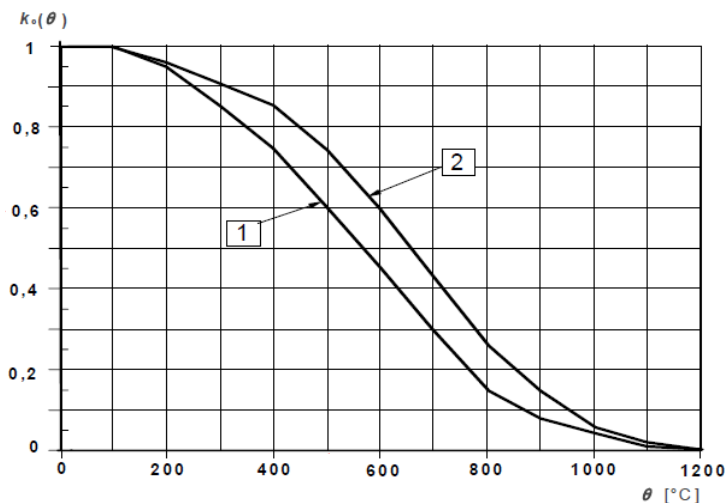


Рис. 2.12. Залежність коефіцієнту зниження міцності бетону на силікатному заповнювачі (1) та карбонатному заповнювачі (2) від температури нагрівання.

При врахуванні нелінійності деформування бетону застосовується спеціальна діаграма, яка визначається формулами [25, 26]:

$$\text{при } 0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c1,T}, \quad \sigma(\varepsilon_c) = \frac{3\varepsilon_c f_{ck,t}(\theta)}{\varepsilon_{c1,T} \left( 2 + \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1,T}} \right)^3 \right)}, \quad (2.18)$$

$$\text{при } \varepsilon_{c1,T} < \varepsilon_c < \varepsilon_{cu1,\theta}, \quad \sigma(\varepsilon_c) = f_{ck,t}(\theta) \frac{(\varepsilon_c - \varepsilon_{c1,T})}{\varepsilon_{cu1,t} - \varepsilon_{c1,T}},$$

$\varepsilon_c$  – відносна деформація бетону,

$\varepsilon_{c1,T}$  – відносна деформація, до якої діаграма деформування зростає,

$\varepsilon_{cu1,\theta}$  – гранична відносна деформація.

Дані параметри можна визначити за табл. 2.6.

Таблиця 2.6

**Значення типових параметрів діаграми «напруження – деформація» для звичайного бетону на силікатному та карбонатному заповнювачі при підвищених температурах**

Температура бетону, $\theta$	Силікатний заповнювач			Карбонатний заповнювач		
	$k_{c,t}(\theta)$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$	$k_{c,t}(\theta)$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$
[°C]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	2	3	4	5	6	7
20	1,00	0,0025	0,0200	1,00	0,0025	0,0200
100	1,00	0,0040	0,0225	1,00	0,0040	0,0225
200	0,95	0,0055	0,0250	0,97	0,0055	0,0250
300	0,85	0,0070	0,0275	0,91	0,0070	0,0275
400	0,75	0,0100	0,0300	0,85	0,0100	0,0300
500	0,60	0,0150	0,0325	0,74	0,0150	0,0325
600	0,45	0,0250	0,0350	0,60	0,0250	0,0350
700	0,30	0,0250	0,0375	0,43	0,0250	0,0375
800	0,15	0,0250	0,0400	0,27	0,0250	0,0400
900	0,08	0,0250	0,0425	0,15	0,0250	0,0425
1000	0,04	0,0250	0,0450	0,06	0,0250	0,0450
1100	0,01	0,0250	0,0475	0,02	0,0250	0,0475
1200	0,00	-	-	0,00	-	-

Для врахування зниження міцності арматурної сталі під час її нагрівання початкова міцність помножується на коефіцієнт зниження міцності:

$$f_{sy,t}(\theta) = k_s(\theta) f_{yk,t}, \quad (2.19)$$

де  $k_s(\theta)$  – коефіцієнт зниження міцності бетону у залежності від температури.

При врахуванні нелінійних деформацій арматурної сталі також визначається зміна межі пропорційності у залежності від температури. Всі дані параметри можна визначити з табл. 2.7.

**Значення параметрів діаграми «напруження – деформація» гарячекатаної та холодно тягнутої арматурної сталі при підвищених температурах**

Температура а сталі $\theta$ [°C]	$f_{sy,\theta}/f_{yk}$		$f_{sp,\theta}/f_{yk}$		$E_{s,\theta}/E_s$	
	гарячеката- на	холоднтяг- нута	гарячеката- на	холоднтяг- нута	гарячеката- на	холоднтяг- нута
1	2	3	4	5	6	7
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	0,96	1,00	1,00
200	1,00	1,00	0,81	0,92	0,90	0,87
300	1,00	1,00	0,61	0,81	0,80	0,72
400	1,00	0,94	0,42	0,63	0,70	0,56
500	0,78	0,67	0,36	0,44	0,60	0,40
600	0,47	0,40	0,18	0,26	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,07	0,08	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,05	0,06	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,04	0,05	0,07	0,05
1000	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,03
1100	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02
1200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Для діаграм деформування арматурної сталі робочі формули мають такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 &\text{при } 0 < \varepsilon_s < \varepsilon_{s0} && \sigma_s = E_{s,\theta} \varepsilon_s \\
 &\text{при } \varepsilon_{s0} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} && \sigma_s = f_{sp,\theta} - c + (b/a)[a^2 - (\varepsilon_{sy} - \varepsilon_s)^2]^{0,5}, \\
 &\text{при } \varepsilon_{sy} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{st} && \sigma_s = f_{sy,\theta}, \\
 &\text{при } \varepsilon_{st} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s2} && \sigma_s = f_{sy,\theta} [1 - (\varepsilon_s - \varepsilon_{st})/(\varepsilon_{s0} - \varepsilon_{st})], \\
 &\text{при } \varepsilon_{s2} < \varepsilon_s && \sigma_s = 0,
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

де  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – параметри, визначувані за формулами:

$$\begin{aligned}
 a^2 &= (\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp})(\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp} + c/E_{s,\theta}), \quad b^2 = c(\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp})E_{s,\theta} + c^2 \\
 c &= \frac{(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})^2}{(\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp})E_{s,\theta} - 2(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})}
 \end{aligned} \tag{2.21}$$

де  $\varepsilon_{sy}$  – деформація, при якій настає межа текучості,

$\varepsilon_{st}$  – деформація, при якій починається спадна ділянка діаграми,

$f_{sp,\theta}$  – границя пропорційності сталі,

$E_{s,\theta}$  – модуль пружності сталі, залежний від температури нагрівання.

Використовуюючи дані щодо міцності, були побудовані діаграми деформування бетону та арматурної сталі. Побудовані діаграми наведені на рис. 2.13.

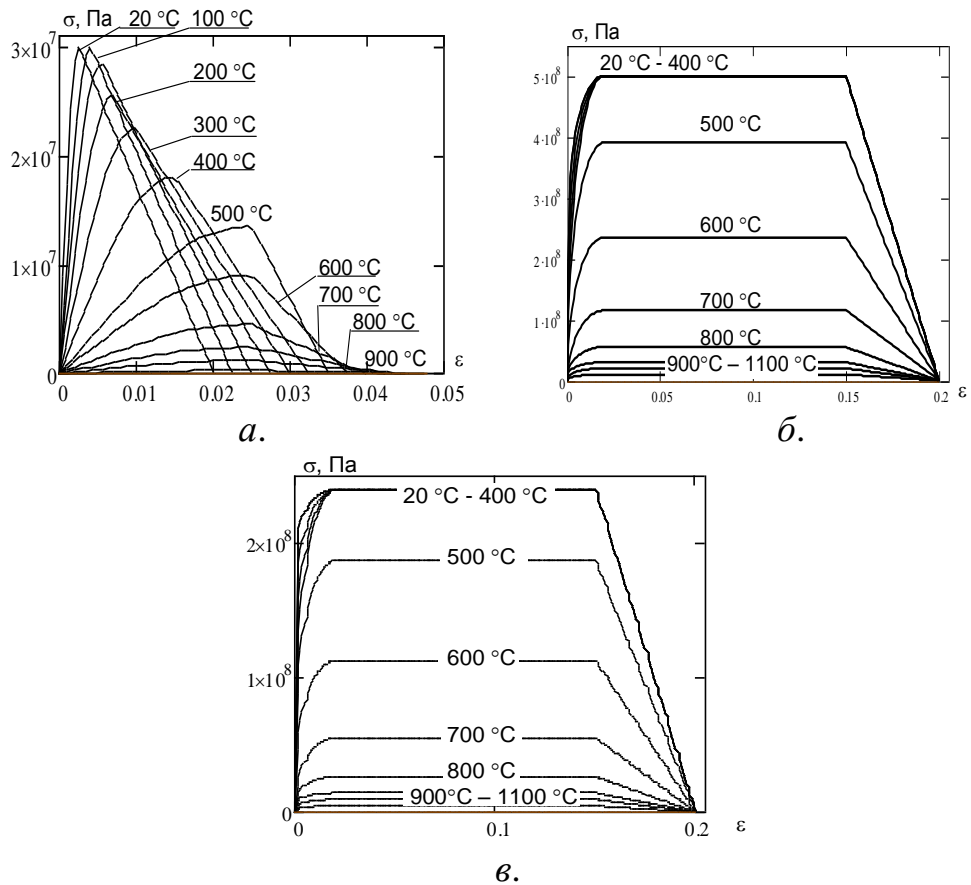


Рис. 2.13. Діаграми деформування бетону (а), арматурної сталі (б) робочої арматури та сталі додаткової арматури та сталевого елемента (в).

Також, для врахування температурної деформації бетону та арматурної сталі застосовуються температурні залежності, рекомендовані у другій частині Eurocode 4. Дані залежності подані у вигляді температурних кривих на рис. 2.14.

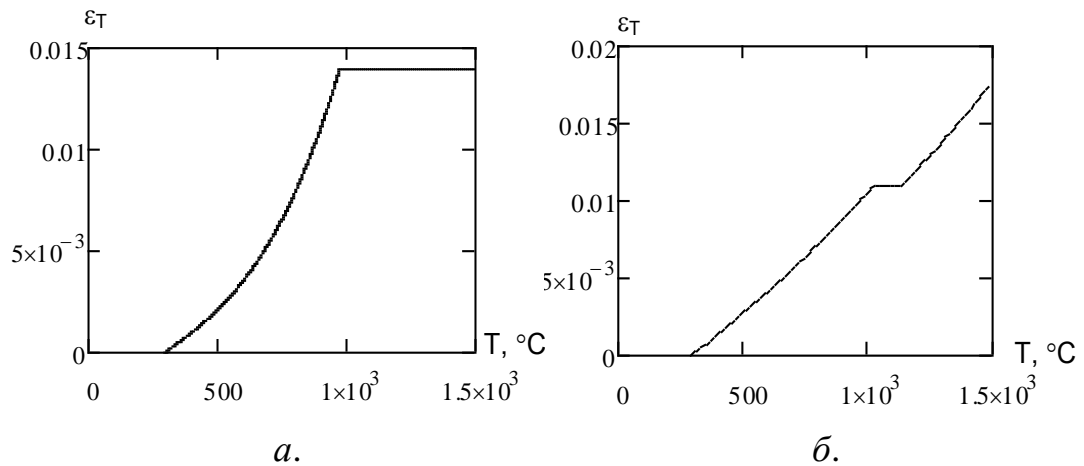


Рис. 2.14. Залежність температурної деформації від температури бетону (а) та арматурної сталі (б).

**2.2.3. Розрахункові схеми досліджуваних сталезалізобетонної плити для міцнісної задачі.** На рис. 2.15 подана розрахункова схема закріплення та навантаження досліджуваної сталезалізобетонної плити. Згідно із цією схемою плита навантажена розподіленим навантаженням і закріплена шарнірно з обох боків.

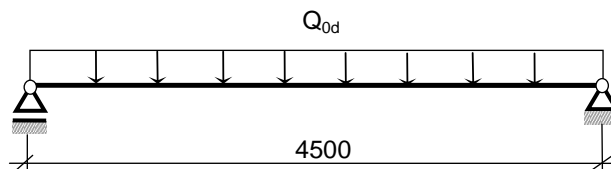


Рис. 2.15. Розрахункова схема закріплення та навантаження досліджуваної сталезалізобетонної плити

Навантаження, що має бути прикладене до сталезалізобетонної плити повинно визначатися за типовими навантаженнями, що зазвичай прикладаються до подібних елементів будівельних конструкцій. Дане робоче навантаження визначається як руйнуюче навантаження, що помножується на коефіцієнт безпеки. Зазвичай він становить від 0,3 до 0,5 [3 – 15].



**2.2.4. Кінцево-елементна схема сталезалізобетонної плити для теплотехнічного розрахунку.** Для здійснення розрахунку нами було застосовано два типи кінцевих елементів. Кінцеві елементи для моделювання шару бетону та сталевому елементу двотаврового профілю мають форму гексаедричного твердотільного елемента лагранжевого типу. Тип даного елемента вибраний з огляду на рекомендації, що відомі з робіт [81, 119 - 122]. На рис. 2.5 наведений вигляд його геометричної конфігурації. Інтерполяційні функції для даного елемента мають вигляд виразів (2.16). Даний тип елементів у точках інтегрування визначає характеристики НДС, які наведені у табл. 2.8.

Таблиця 2.8

**Характеристики напружено-деформованого стану у точках інтегрування кінцевих елементів бетону та сталевому двотавру**

Параметр напружено-деформованого тіла	Одиниці виміру
Поточні нормальні напруження	Па
Поточні дотичні напруження	Па
Головні напруження	Па
Максимальні дотичні напруження	Па
Напруження Мізеса	Па
Гідростатичні напруження	
Пружні деформації	
Пластичні деформації	
Головні пружні та головні пластичні деформації	
Деформації Мізеса	
Загальні деформації	
Температурні деформації	
Переміщення	м

Для моделювання арматурних стержнів застосований стержньовий кінцевий елемент з двома точками інтегрування. Даний елемент також є елементом лагранжевого типу. Геометрична конфігурація даного елемента подана на рис. 2.16.

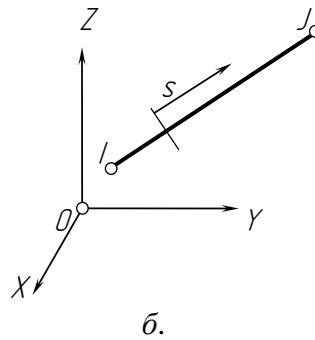


Рис. 2.16. Геометрична конфігурація кінцевого елемента для моделювання арматурних стержнів.

Інтерполяційні поліноми для даного типу елемента визначаються виразами [81, 119 – 122]:

$$\begin{aligned}
 u_X &= \frac{1}{2}(u_{IX}(1-s) + u_{JX}(1-s)); \\
 u_Y &= \frac{1}{2}(u_{IY}(1-s) + u_{JY}(1-s)); \\
 u_Z &= \frac{1}{2}(u_{IZ}(1-s) + u_{JZ}(1-s)).
 \end{aligned}
 \tag{2.22}$$

Стержньовий елемент має жорсткість тільки в одному напрямку – при розтязі.

Використовуючи дані КЕ були побудовані кінцево-елементні схеми, застосовуючи такі принципи для зменшення обсягу розрахунків та покращення збіжності обчислювальних процесів:

- розглядається тільки симетрична чверть досліджуваної плити;
- для накладання властивостей симетрії до вузлів КЕ прикладаються одинарні механічні в'язі у напрямку симетричної частини;

- у точках накладання опорних в'язів передбачаються сталеві пластини із з першого типу КЕ для зменшення впливу на тріщино утворення у шарі бетону.

Враховуючи все викладене, була побудована кінцево-елементна схема сталезалізобетонної плити наведена на рис. 2.17.

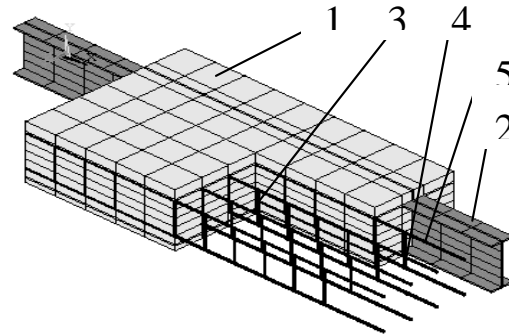


Рис 2.17. Кінцево-елементна схема до статичної задачі: 1 – кінцевий елемент бетону, 2 – кінцевий елемент сталевого двотаврового елемента, 3 – кінцевий елемент арматури  $d=8$  мм, 4 – кінцевий елемент арматури  $d=10$  мм, 5 – кінцевий елемент арматури  $d=12$  мм.

**2.2.5. Алгоритм розрахунку напружено-деформованого стану сталезалізобетонної плити за дії стандартного температурного режиму пожежі.** Для здійснення розрахунку нами був використаний алгоритм, що заснований на виконанні таких процедур.

1. На початку визначається значення розподіленого навантаження при якому досліджувана стале залізобетонна плита руйнується з використанням даних, наведених у п. 2.2.1 – п. 2.2.4.

2. Вирішується теплова задача із використанням даних п. 2.1 із фіксацією температурного розподілу у плиті через кожну 1 хв.

3. Отримані температури вузлових точок сітки при розв'язку теплової задачі переносяться на сітку кінцево-елементної схеми для розв'язку міцнісної задачі при використанні лінійної інтерполяції.

4. До робочої кінцево-елементної схеми прикладається робоче навантаження, що визначається як добуток руйнуючого навантаження на коефіцієнт запасу.

5. До робочої кінцево-елементної схеми у вузлових точках прикладаються температури, отримані шляхом інтерполяції і проводиться розрахунок для кожної хвилини впливу пожежі.

6. За параметрами напружено-деформованого стану визначається межа вогнестійкості сталевих залізобетонних плит.

Блок-схема алгоритму обчислювального процесу наведена на рис. 2.18 та на рис. 2.19.

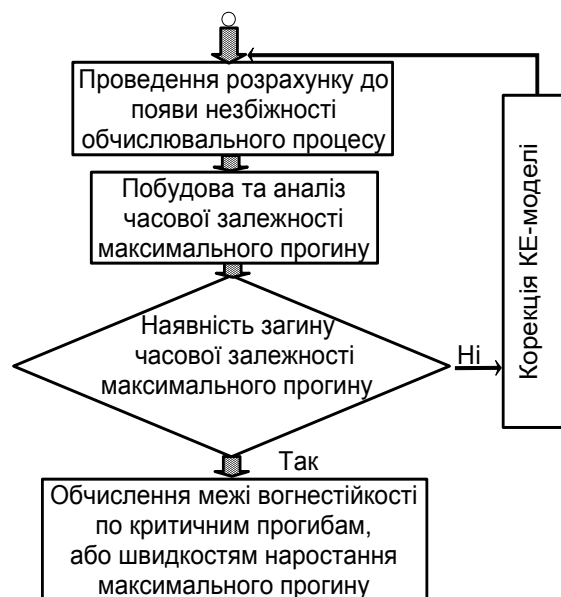
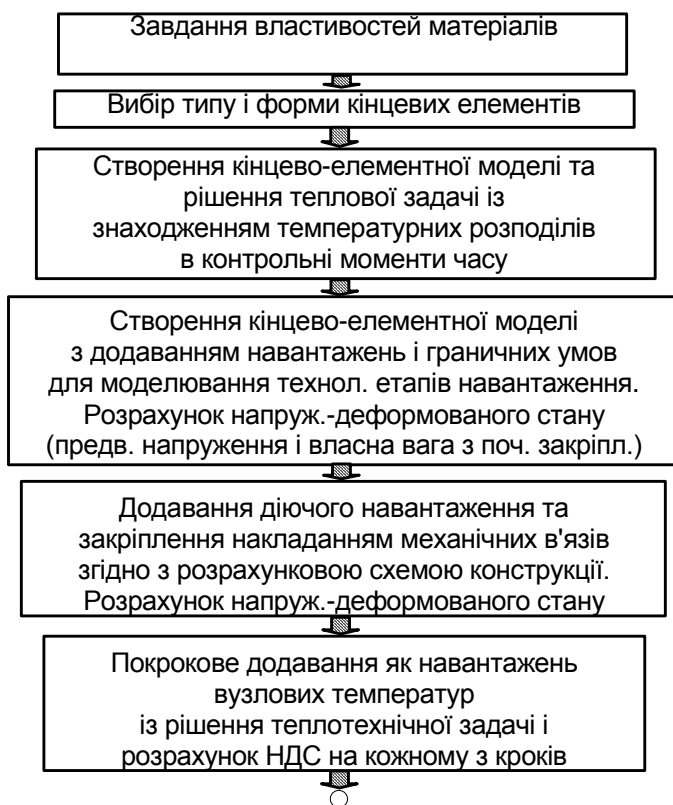


Рис. 2.18. Структурна схема розрахункових процедур щодо визначення параметрів напружено-деформованого стану сталевих залізобетонних плит.

Рис. 2.19. Структурна схема визначення межі вогнестійкості за розрахованими параметрами напружено-деформованого стану.

При реалізації даного алгоритму був використаний основний математичний апарат методу кінцевих елементів, який складається із математичних моделей, та

алгоритму обчислення, що дозволяють врахувати фізичну та геометричну нелінійність. Крім цього, використані моделі мають врахувати тріщиноутворення у бетоні. Тріщиноутворення у бетоні враховується при застосуванні відповідної теорії міцності бетону та модифікації матриць властивостей матеріалу при введенні нульової або ослабленої жорсткості у напрямках по відношенню до берегів утвореної тріщини. Математичні моделі, які були використані для розрахунку наведені у табл. 2.9.

Таблиця 2.9

**Основні математичні моделі для розрахунку  
напружено-деформованого стану сталезалізобетонної плити в умовах пожежі**

Особливість поведінки матеріалу плити	Використана математична модель (метод)	Джерело
НДС	МКЕ	[81]
Пластичне деформування	Асоціативна теорія пластичного деформування Бесселінга	[81]
Тріщиноутворення	Складений критерій міцності бетону Віллема і Варнке	[81]
Геометрична нелінійність	Ітеративний метод Ньютона-Рафсона	[81]

**2.2.6. Результати розрахунку напружено-деформованого стану сталезалізобетонної плити за дії стандартного температурного режиму пожежі.** Для визначення величини робочого навантаження на стале залізобетонну плиту з використанням прийнятої математичної моделі напружено-деформованого стану був проведений чисельний експеримент щодо руйнування плити під дією механічного навантаження. Умовою чисельного експерименту було поступове збільшення розподіленого навантаження у декілька кроків до його руйнуючого значення. Ознаками настання граничного стану були ознаки, наведені у п. 2.2.1. Після проведення розрахунку були отримані результати, що включають дані відповідно до табл. 2.9. На рис. 2.20 наведені розподіли нормальних напружень вздовж вісі  $x$  при настанні граничного стану у шарах бетону та у сталевому елементі.

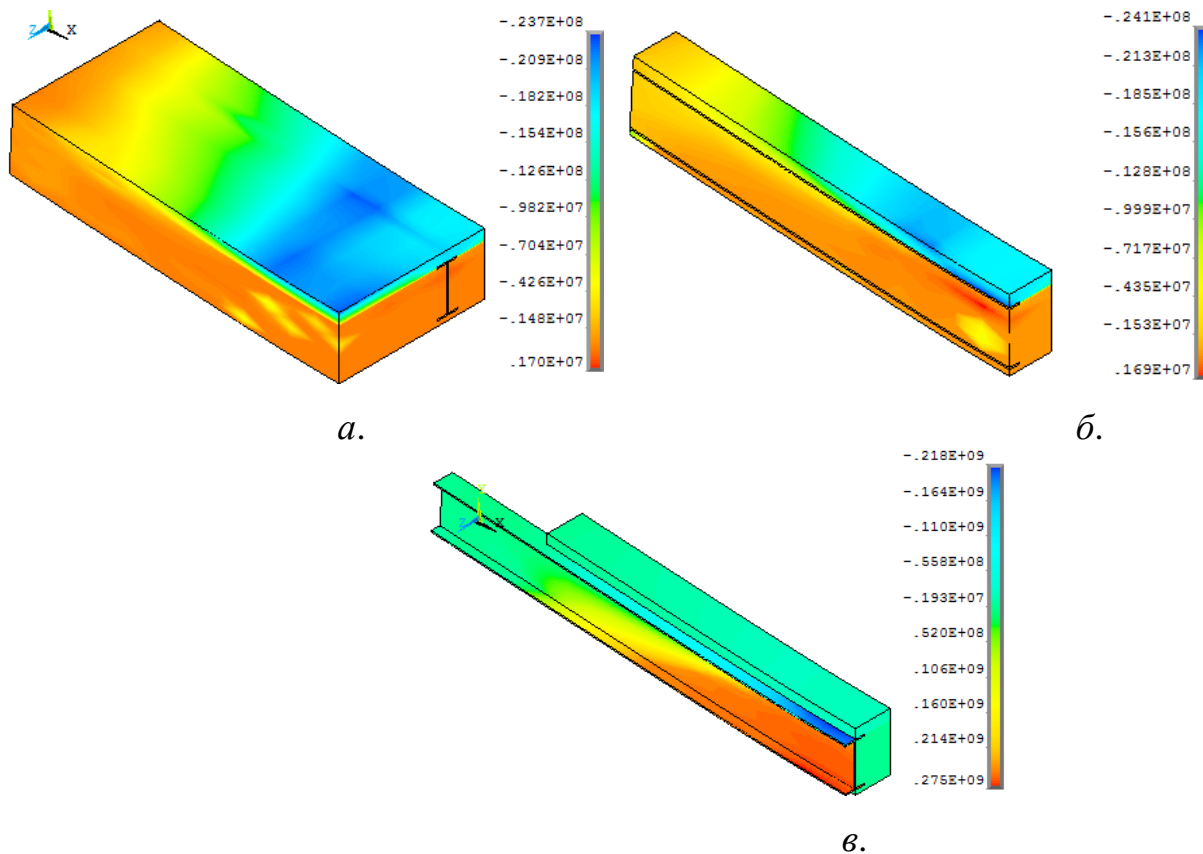


Рис. 2.20. Розподіли нормальних напружень вздовж осі  $x$  у момент руйнування: *a* – у шарах бетону сталезалізобетонної плити; *б* – у шарах бетону біля двотавра; *в* – у сталевому двотаврі.

На рис. 2.21 представлений розподіл повністю роздроблених КЕ у шарі бетону сталезалізобетонної плити в момент руйнування.

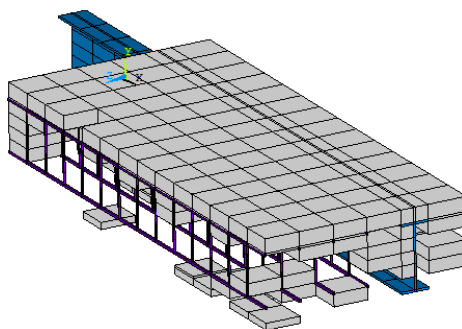


Рис. 2.21. Розподіл повністю роздроблених КЕ у шарі бетону сталезалізобетонної плити в момент руйнування

На рис. 2.22 представлений графік максимального прогину плити при її поступовому завантаженні розподіленим навантаженням до її руйнування.

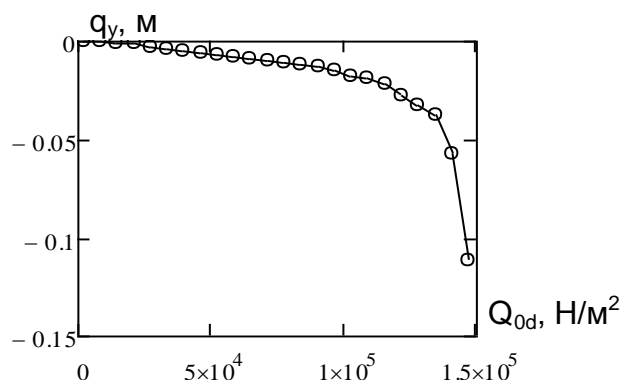


Рис. 2.22. Графік максимального прогину сталезалізобетонної плити у залежності від прикладеного розподіленого навантаження.

Аналізуючи дані щодо НДС сталезалізобетонної плити, можна зазначити, що руйнування плити настає при навантаженні  $Q_{\max} = 147 \text{ кН/м}^2$ .

Цікаво прослідкувати за розподілом деформації у різних областях сталезалізобетонної плити для його визначення в момент руйнування. На рис. 2.23 наведений розподіл повної деформації за віссю  $x$  у сталезалізобетонній плиті у різних її областях.

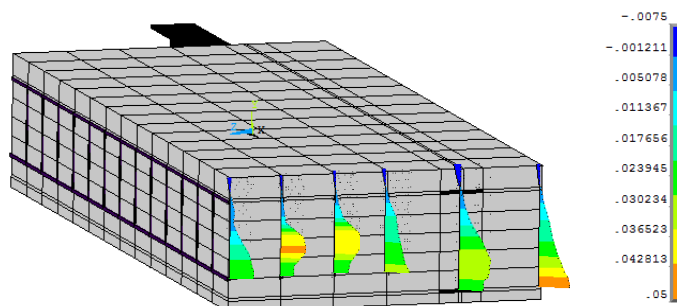


Рис. 2.23. Розподіл повної деформації за віссю  $x$  у сталезалізобетонній плиті у різних її областях

З рис. 2.23 можна побачити такі особливості деформування сталезалізобетонної в момент її руйнування. У стиснутій зоні бетону деформація суттєво (у деяких випадках майже удвічі) перевищує граничну деформацію, що рекомендована у стандартах [22 – 24]. Найбільша деформація у сталевому елементі спостерігається поблизу нижньої полки двотавра. Також треба відмітити особливість зміни від найменшої до найбільшої деформації у місці розташування

двотавра, яка полягає у майже лінійній її залежності у залежності від вертикальної координати.

Для розрахунку згідно з розрахунковою схемою, зображеною на рис. 2.15 було прикладене робоче навантаження величиною  $0,5Q_{\max}$ .

Після проведення розрахунку при нагріванні сталезалізобетонної плити за стандартним температурним режимом пожежі були отримані результати. На рис. 2.24 зображені розподіли нормальних напружень за віссю  $x$  у шарі бетону поблизу розташування двотаврового сталевго елемента. Згідно із отриманими розподілами напружень можна побачити, що вони в деяких областях мають перепади, що викликані наявністю тріщин та повністю роздроблених елементів. Характер зміни картини розподілення напружень із часом показав, що стиснута зона бетону знаходиться зверху плити і поступово зменшується до малої області унаслідок росту тріщин у нижній частині зони бетону.

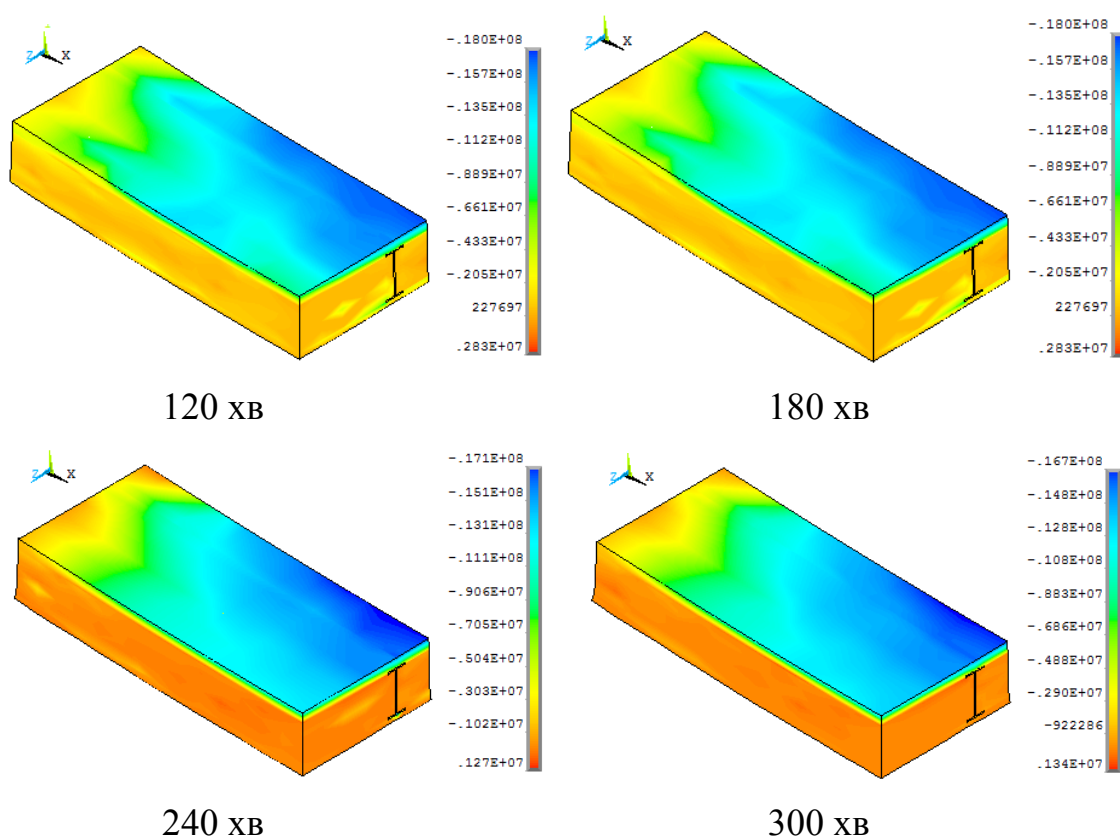


Рис. 2.24 Розподіли нормальних напружень за віссю  $x$  у шарі бетону поблизу розташування двотаврового сталевго елемента у різні моменти часу впливу пожежі із стандартним температурним режимом.



Також були досліджені розподіли нормальних напружень за віссю  $x$  у сталюму двотавровому елементі сталезалізобетонної плити у різні моменти часу теплового впливу пожежі із стандартним температурним режимом. На рис. 2.25 наведені результати розрахунку даних напружень.

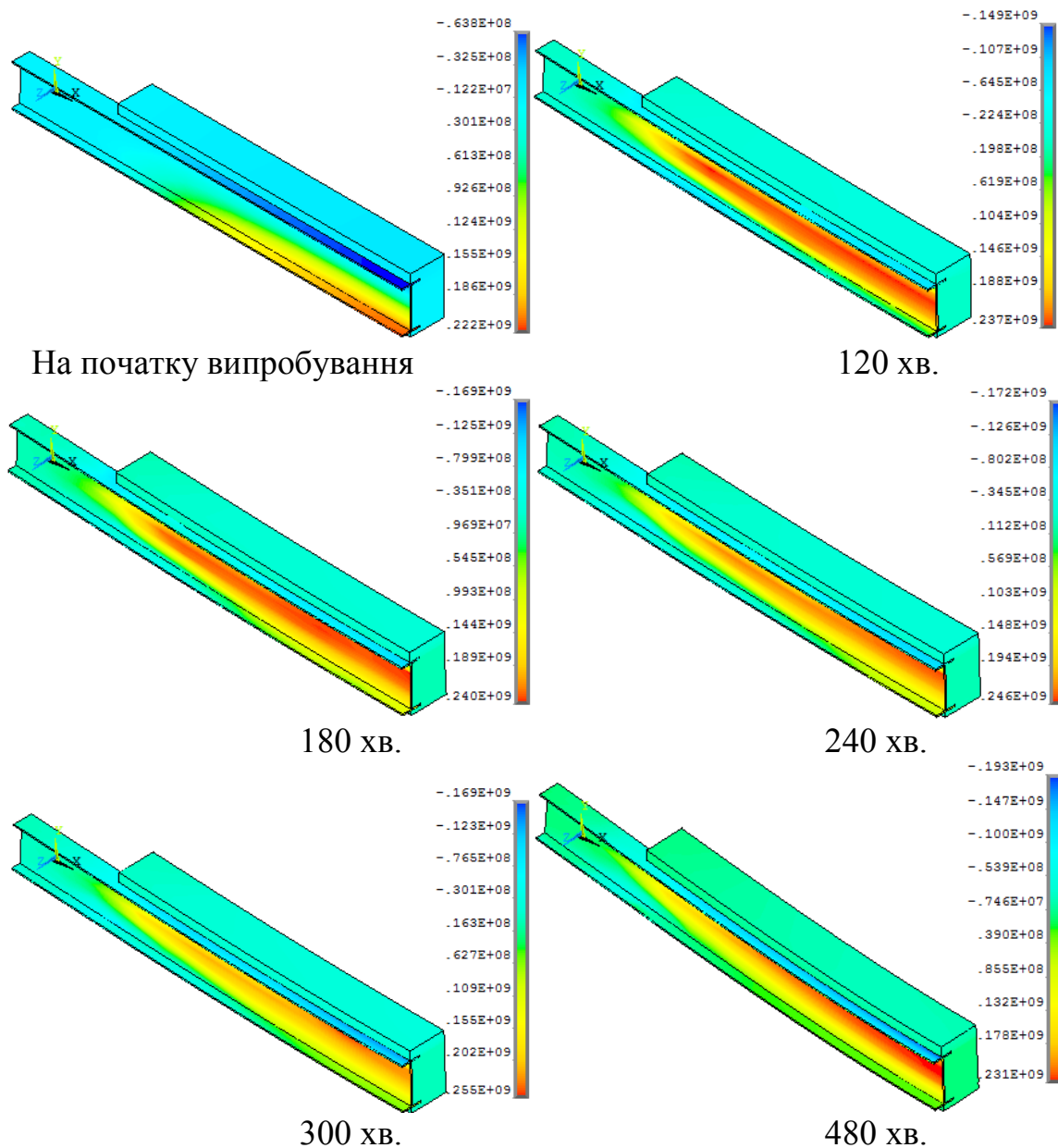


Рис. 2.25 Розподіли нормальних напружень за віссю  $x$  у сталюму двотавровому елементі сталезалізобетонної плити у різні моменти часу теплового впливу пожежі із стандартним температурним режимом

Картини розподілень нормальних напружень вздовж вісі  $x$  показують, що найбільші нормальні напруження припадають на двотавровий сталевий елемент.

Зона найбільших розтягуючих напружень у двотаврі локалізується у його стінці у кожний момент часу на певній висоті. З часом вогневої дії пожежі зона стискальних напружень переміщується від нижньої полки двотавра до верхньої полки по мірі його прогрівання.

Величина максимальних напружень поступово зменшується. Дані явища пояснюються тим, що під впливом температури нагріву величина максимальних напружень опору відповідно до діаграм деформування, представлених на рис. 2.13 також зменшуються. Крім цього, певні шари бетону роздроблюються і відбувається перерозподіл напружень.

Для вивчення руйнування шарів бетону нами були визначені розподілення елементів, які мають не менш як в трьох точках інтегрування наявність розкритих тріщин не менш як в трьох напрямках. Розподіли роздроблених елементів наведені на рис. 2.26.

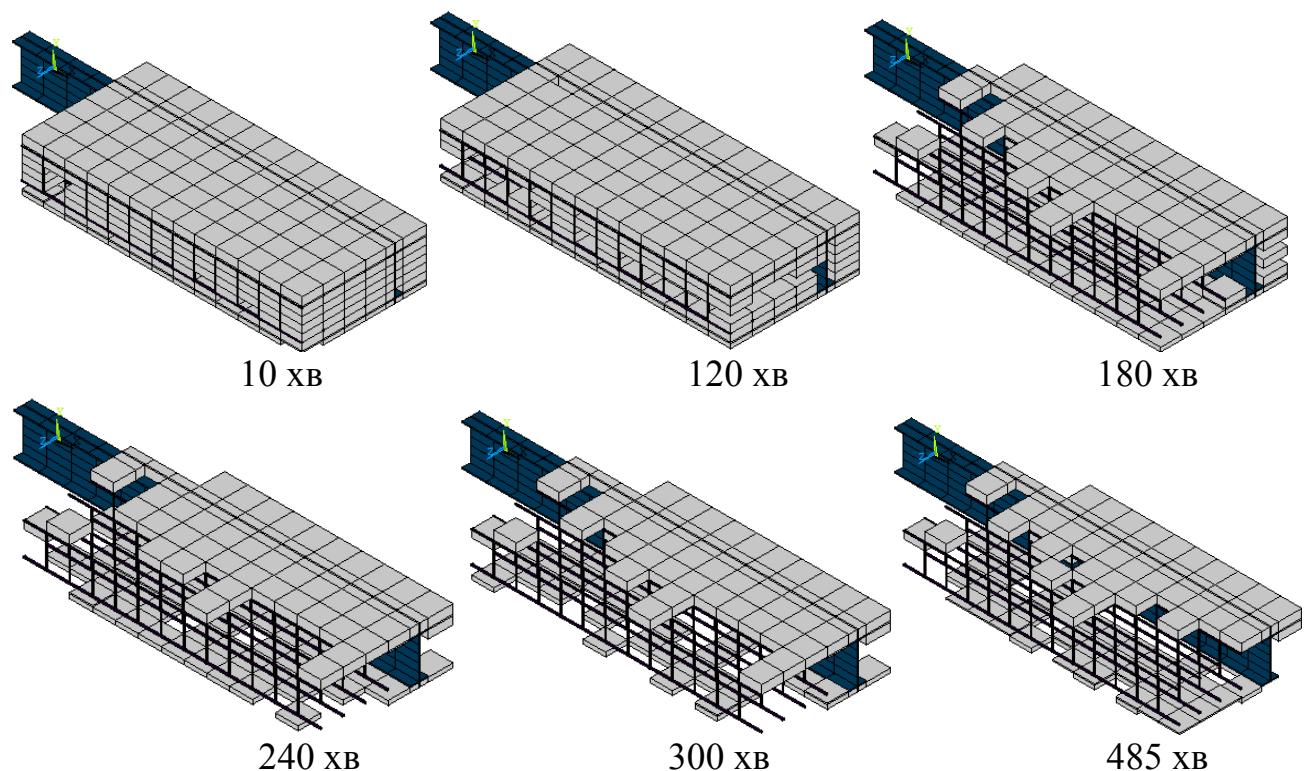


Рис. 2.26. Розподіли роздроблених елементів у шарах бетону сталезалізобетонної плити в умовах пожежі із стандартним температурним режимом у різні моменти часу.

Аналіз розподілів роздроблених елементів показують, руйнація плити настає унаслідок повної деструкції елементів навколо двотаврового сталевого елемента.

Згідно із проведеними розрахунками визначено, що втрата несучої спроможності настає на 485 хв. При цьому важливою є інформація про деформації на границях розрахункової області. Епюри деформацій у різних точках середнього перерізу сталезалізобетонної плити у момент часу втрати несучої здатності наведені на рис. 2.27.

Дані, що наведені на рис. 2.27 показують, що характер зміни деформацій у місці розташування сталевого двотавра є близьким до лінійного. Найбільша відносна повна деформація у бетоні на верхній границі у середньому складає 0.0037 і не перевищує значення 0.005, що є близьким до рекомендованого у другій частині Eurocode 4 [25].

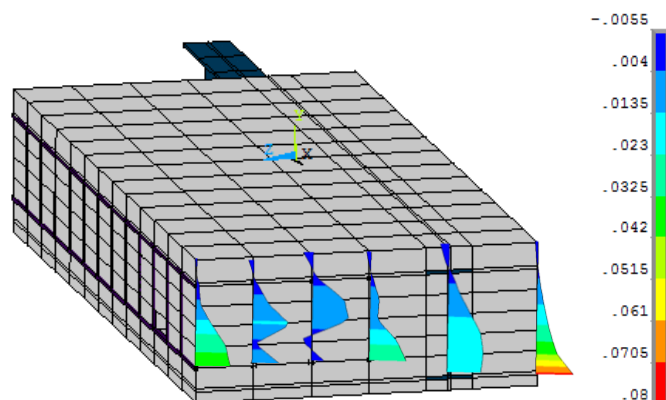


Рис. 2.27. Розподіл повної деформації за віссю  $x$  у сталезалізобетонній плиті у різних її областях

Суттєво нелінійний розподіл деформації у точках перерізу, віддалених від сталевого двотавра викликаний великим обсягом роздроблених елементів бетону сталезалізобетонної плити в умовах теплового впливу пожежі. Для більш детального розгляду сценарію руйнації сталезалізобетонної плити при пожежі в прийнятих умовах навантаження був побудований графік максимального прогину плити у залежності від часу температурного впливу пожежі із стандартним температурним режимом. На рис. 2.28 показаний даний графік.

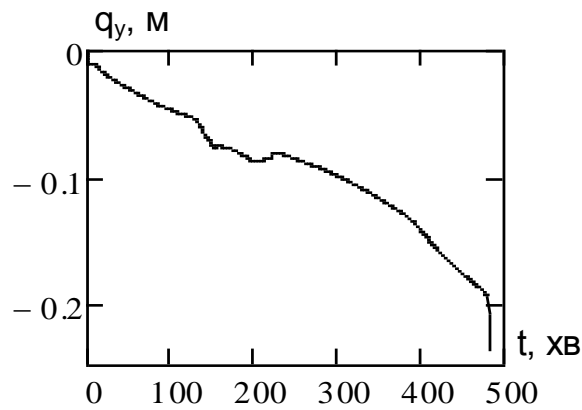


Рис. 2.28. Графік максимального прогину сталезалізобетонної плити від часу її експонування за стандартним температурним режимом пожежі.

Важливою особливістю кривої прогину є наявність ділянки де прогин зменшується. Це свідчить про те, що унаслідок температурного розширення сталевий двотавр у часовий інтервал з 200 хв по 244 хв долає тиск навантаження і його середина має переміщення вгору. Такий стан позначається на загальній несучій спроможності плити і приводить до підвищення її вогнестійкості за граничним станом втрати несучої здатності.

Для дослідження впливу механічного навантаження на сталезалізобетонну плиту були проведені її дослідження під впливом пожежі із стандартним температурним режимом за умов різного рівня прикладеного навантаження. Результати наведені на рис. 2.29 у вигляді графіків найбільшого прогину плити у залежності від часу її експонування в умовах пожежі із стандартним температурним режимом.

На графіках рис. 2.29 відмічена величина найбільшого прогину плити, при якому наступає граничний стан втрати несучої здатності згідно із [22 – 24]. Величина найбільшого прогину визначена за формулою (3).

Для аналізу настання граничного стану також був проаналізований випадок досягнення критичної швидкості наростання прогину, значення якої визначена за формулою (3).

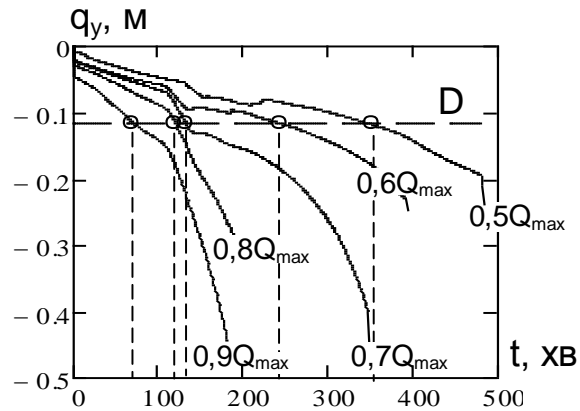


Рис. 2.29. Графіки найбільшого прогину плити у залежності від часу її експонування в умовах пожежі із стандартним температурним режимом для різних умов навантаження.

На рис. 2.30 наведені графіки зміни швидкості наростання прогину сталезалізобетонної плити у залежності від часу впливу пожежі із стандартним температурним режимом.

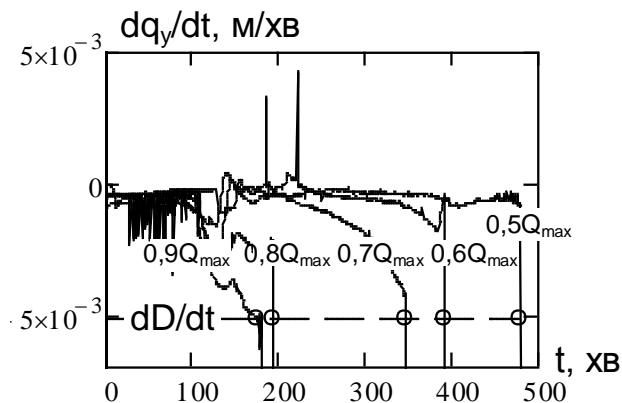


Рис. 2.30. Графіки швидкості наростання найбільшого прогину сталезалізобетонної плити у залежності від часу її експонування в умовах пожежі із стандартним температурним режимом для різних умов навантаження.

За даними графіками, які подані на рис. 2.29 та рис. 2.30 визначається настання граничний стан втрати несучої здатності. У табл. 2.10 наведені дані щодо вогнестійкості сталезалізобетонної плити, отримані за критеріями найбільшого прогину та найбільшої швидкості його наростання у залежності від рівня навантаження сталезалізобетонної плити

**Значення межі вогнестійкості сталезалізобетонної плити у залежності від рівня її навантаження**

Критерій настання граничного стану втрати здатності	Рівень навантаження						
	$0,9Q_{\max}$	$0,8Q_{\max}$	$0,7Q_{\max}$	$0,6Q_{\max}$	$0,5Q_{\max}$	$0,4Q_{\max}$	$0,3Q_{\max}$
Вогнестійкість за критичним прогином, хв	72	121	133	247	352	422	477
Вогнестійкість за критичною швидкістю наростання прогину, хв	178	194	347	394	483	453	497

За даним щодо вогнестійкості сталезалізобетонної плити були побудовані її графіки у залежності від рівня навантаження, що наведені на рис. 2.32.

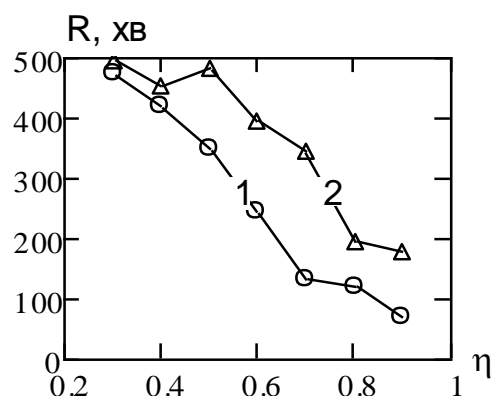


Рис. 2.32. Графіки межі вогнестійкості сталезалізобетонної плити у залежності від рівня її навантаження: 1 – за критерієм критичного найбільшого прогину; 2 – за критерієм критичної швидкості наростання найбільшого прогину.

Відповідно до отриманих даних можна побачити, що за критерієм критичного прогину межа вогнестійкості за граничним станом втрати несучої здатності настає скоріше.

З огляду на проведені дослідження можна зробити такі висновки:

- визначені межі вогнестійкості сталезалізобетонної плити за несучою здатністю при різних режимах навантаження у інтервалі часу впливу пожежі із стандартним температурним режимом від 0 до 500 хв.
- найбільша межа вогнестійкості за несучою здатністю для сталезалізобетонної плити із рівнем навантаження  $0,3Q_{\max}$  склала 477 хв.;
- при визначенні межі вогнестійкості були досліджені температурні розподіли у перерізі сталезалізобетонної плити при її нагріванні за стандартним температурним режимом пожежі і з'ясовано, що межа вогнестійкості за граничним станом теплоізолювальної здатності склала 378 хв.;
- при дослідженні сталезалізобетонної плити були визначені параметри її напружено-деформованого стану в умовах механічного навантаження та температурного впливу пожежі, у результаті чого було з'ясовано, що на певному етапі при навантаженнях менше рівня  $0,7Q_{\max}$  є інтервал часу протягом 30 хв, коли прогин плити зменшується;
- досліджений сценарій руйнування сталезалізобетонної плити в умовах пожежі, що полягає у руйнуванні шару бетону у області поблизу двотавра та утворенні локальної зони деформації у ньому;
- розроблені алгоритми визначення параметрів напружено-деформованого стану плити можуть бути застосовані у комплексних чисельних дослідженнях для встановлення меж вогнестійкості сталезалізобетонних плит із двотавровим сталевим елементом у їх середині.

## РОЗДІЛ 3

### ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1. Експериментальне обладнання

Для випробувань використано вогневу піч ГП-3 (атестат № 24-2/4379, чинний до жовтня 2012 року), приміщення для кондиціонування зразків ПКЗ-2 (атестат № 24-2/0442, чинний до лютого 2013 року) і засоби вимірювальної техніки, описані в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

#### Засоби вимірювальної техніки

№ з/п	Найменування обладнання або приладу	Заводський номер	Діапазон вимірювання	Похибка вимірювань
1.	Лінійка вимірювальна.	-	від 0 до 1000 мм	± 1 мм
2.	Секундомір СОСпр-2б-2-010.	3187	від 0 до 60 хв,	Середній клас точності
3.	Система контролю температури «СКОРАД» на основі блоків Вега-5.	-	від -5 до 1300°C	Межі допустимої похибки вимірювання ± 1,5 °C
4.	Термопары ТХА, 6 одиниць.	-	від -50 до 450 °C	Клас 2
5.	Термопары N (1450 мм), 8 одиниць.	-	від 0 до 1200 °C	Клас 2
6.	Термогігрометр АРТ-06917.	1045	від 25 до 90 % від 0 до 50 °C	± 5 % ± 1,0 °C
7.	Штангенциркуль ШЦ-Па.	0711110	від 0 до 300 мм	± 0,05 мм
8.	Мановакуумметр цифровий ММЦ-200.	20	від 0 до +200 Па	± 0,5 %
9.	Сушильна шафа.	Б/н	від 20 до 100 °C	± 2,5 °C
10.	Ваги електронні ULTRA.	021	від 0 до 200 г	± 0,1 г
11.	Щупи діаметром: 6 мм, 25 мм.	Б/н Б/н	6 мм 25 мм	± 0,1 мм ± 0,1 мм



Продовження табл. 3.1

№ з/п	Найменування обладнання або приладу	Заводський номер	Діапазон вимірювання	Похибка вимірювань
12.	Ваги кранові електронні OCS-M-lt.	1504	від 10 кг до 1000 кг	Клас точності – середній
13.	Віддалемір лазерний ручний Disto D3a BT.	902830600	від 0,05 до 100 м	$\pm 1$ мм

На рис. 3.1 подана схема випробувальної печі, а її загальний вигляд поданий на рис 3.2.

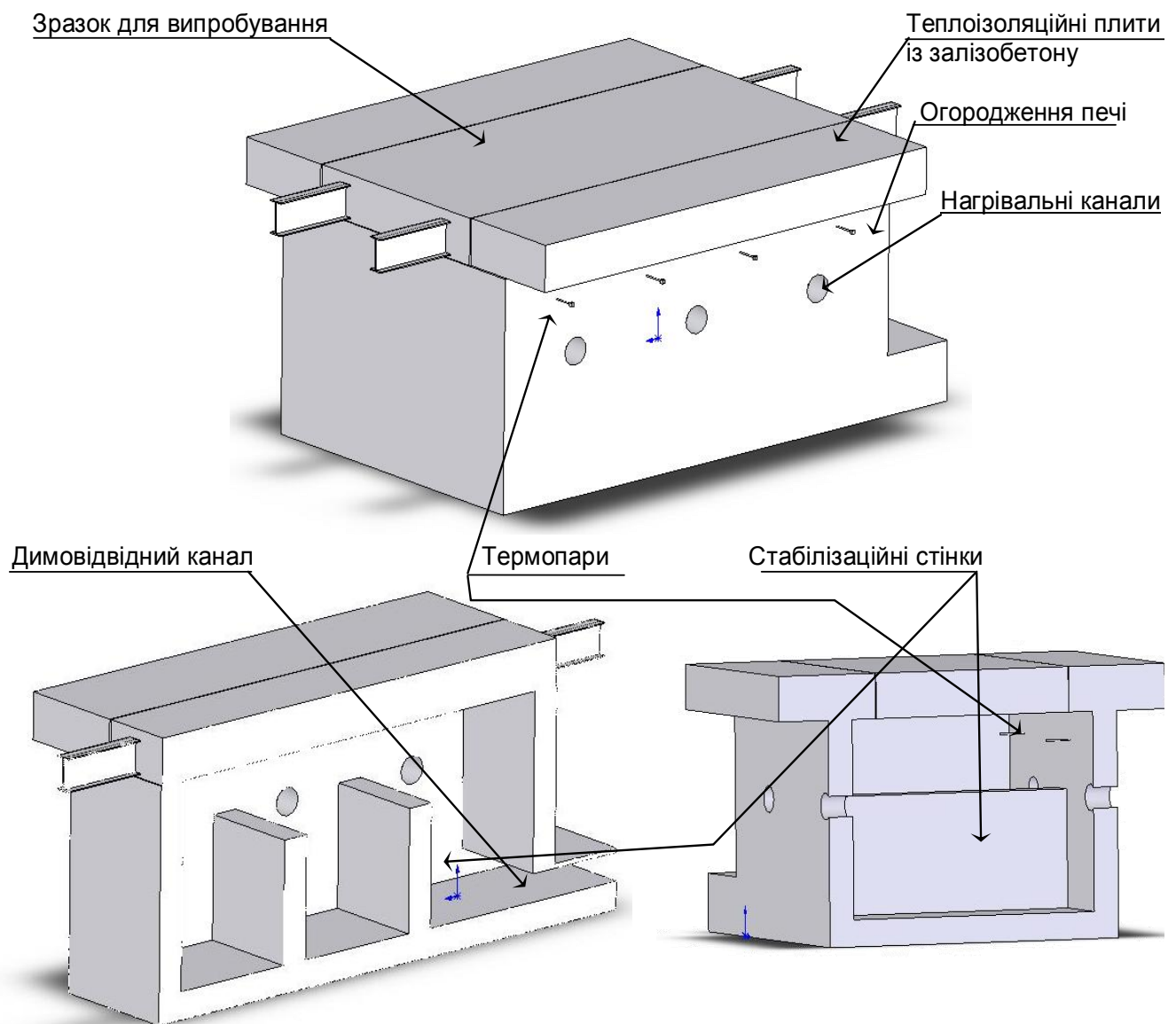


Рис. 3.1. Схема випробувальної установки.

На рис. 3.1 представлена схема розташування сталезалізобетонних плит із відповідним огородженням, що перешкоджає виходу пічних газів. Це огородження складається з залізобетонних плит. На рис. 3.2 показана установка для випробувань разом із встановленими на неї зразком сталобетонної плити, навантажувальними тягарями і огородженням.



Рис. 3.2. Зовнішній вигляд зразка конструкції, що встановлений на горизонтальній випробувальній установці.

Навантаження на плиту представляють собою залізобетонну плиту та фундаментні залізобетонні блоки, що встановлені на неї. Їх маса розрахована таким чином, щоб вони разом забезпечували тиск відповідний розподіленому навантаженню  $0,4Q_{\max}$ , як це було визначено у 2 розділі даної роботи.

Паливно-форсункова система розрахована на рідке паливо (гас) і керується автоматично.

На рис. 3.3 подана система для вимірювання температур. На рис 3.4 наведений інтерфейс програмного забезпечення, щодо обробки даних та керування подачі палива до форсункової системи.



Рис. 3.3. Система контролю температури.

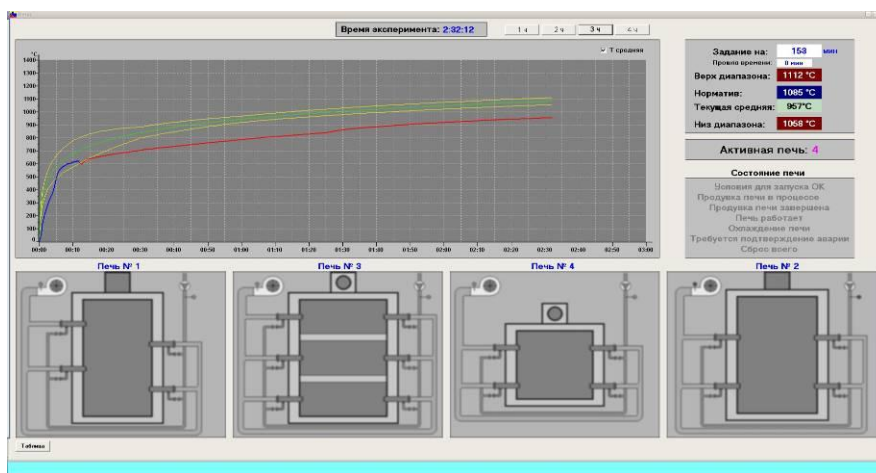


Рис. 3.4. Интерфейс программного забезпечення системи контролю температури.

На рис. 3.5 показана термопара для вимірювання температур у робочому просторі печі, а також її устрій.

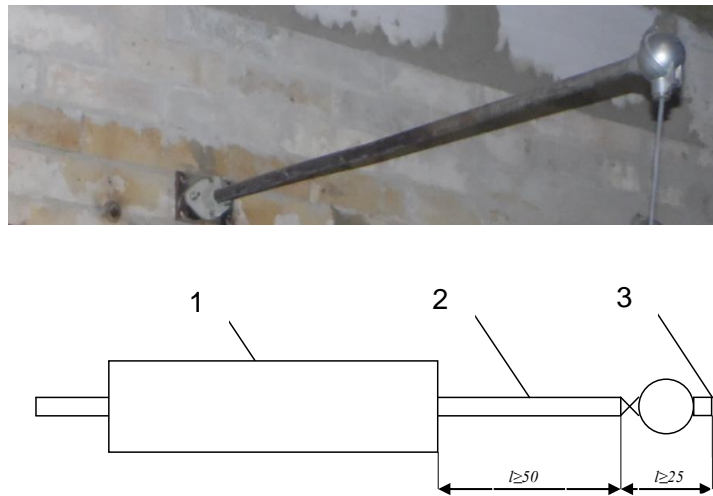


Рис. 3.5. Термопара для вимірювання температури в печі:

1 – теплозахисна оболонка; 2 – захисний кожух; 3 – вимірювальний спай.

На рис. 3.6 показана схема розташування температурних датчиків (термопар) при проведенні експерименту щодо високотемпературних випробувань залізобетонних ригелів.

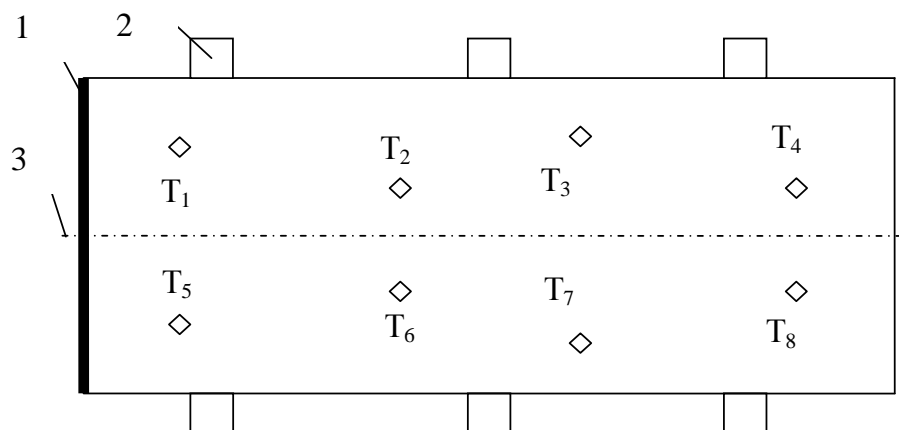


Рис. 3.6. Схема розміщення термопар для контролю температурного режиму в камері вогневої печі:  $T_1$ – $T_8$  – термопари; 1 – розташування отворів для відводу продуктів горіння; 2 – пальник, 3 – вісь симетрії.

### 3.2. Методика виготовлення та формування сталезалізобетонних плит-зразків для випробувань

**3.2.1. Виготовлення залізобетонного ригеля-зразку для високотемпературних випробувань.** Для вивчення адекватності даних, що отримані у попередньому розділі були досліджені зразки із різними геометричними параметрами. Для вивчення правдоподібності результатів, які були отримані за математичними моделями, запропонованими для вивчення НДС сталезалізобетонних плит при тепловому впливі на них пожежі із стандартним температурним режимом, було розглянуто два типи зразків. Дані зразки розрізнялися своєю товщиною та розміром двотавру. У табл. 3.2 подані основні характеристики та технічне описання сталезалізобетонних плит вибраного типу.

Таблиця 3.2

#### Технічні характеристики сталезалізобетонних плит для дослідження

Тип зразку	Матеріал ригеля	Конструктивні характеристики
Стале-залізобетонна плита	Бетон – важкий на гранітному заповнювачі (клас міцності Клас С 30/35 (В30))	Несучі збірні каркаси із колонами 400×400 з високим рівнем механічного навантаження, що призначені для виконання несучих функцій для покриттів та перекриттів 2 – 3 поверхових будівель. Використовуються для залізобетонних каркасів складських, виробничих приміщень з високим рівнем пожежного навантаження
	Робоча арматура – гарячекатаний сталевий ребристий пруток класу міцності А500С	
	Додаткова арматура – гарячекатаний сталевий гладкий пруток класу міцності А240С	
	Сталевий внутрішній елемент-двотавровий профіль №30 (зразок 1 типу) та двотавровий профіль № 22 (зразок 2 типу) класу міцності А240С	

Конструкція плити перекриття першого типу розмірами 4500 мм х 2000 мм х 420 мм, двох несучих плити перекриття сталевих двотаврових балок Балки розташовані на відстані 1350 мм (покрівельна частина зразка). Залізобетонна плита перекриття складається з бетону марки БСГ В30 Р4 F200 W6 М5 та арматури діаметрами 8 мм, 10 мм і 12 мм ( див. рис. 3.7). Плита другого типу має товщину 320 мм, а всі інші параметри ті ж самі.

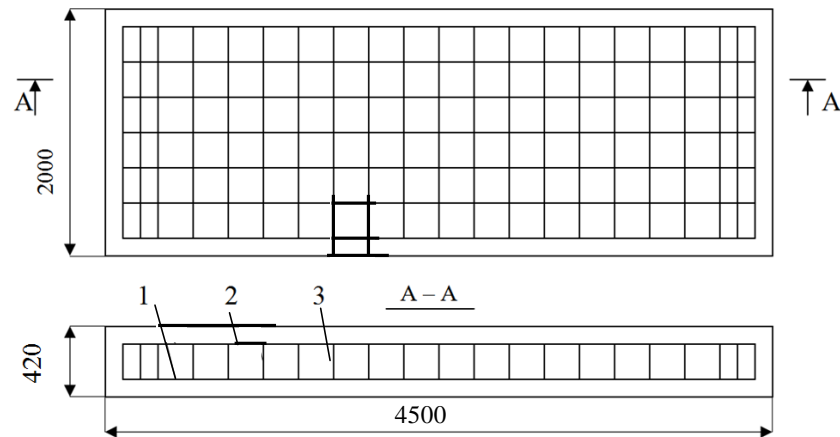


Рис. 3.7. Схема досліджуваної сталеві залізобетонної плит: 1 – арматура  $d = 12$  мм А500С; 2 – арматура  $d = 10$  мм А240С; 3 – арматура  $d = 8$  мм А240С.

На рис. 3.8. наведені схеми армування зразків сталезалізобетонних плит для випробування та розташування внутрішніх сталевих двотаврових елементів.

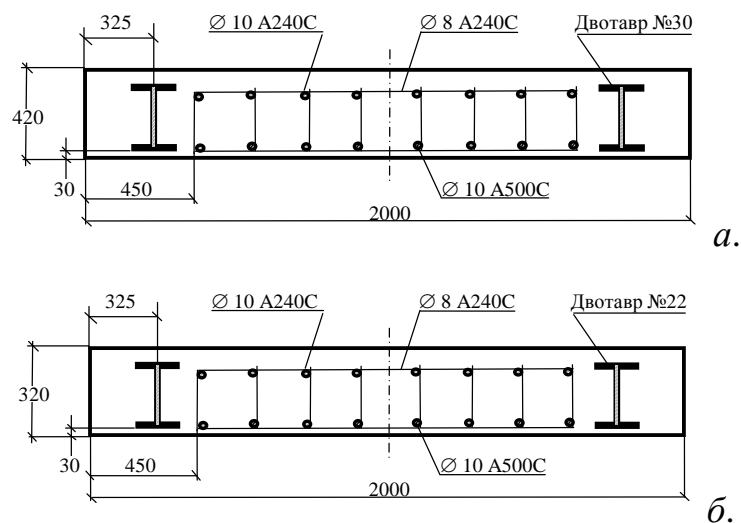


Рис. 3.7. Геометричні параметри та схема армування перерізу сталезалізобетонної плити-зразку для випробування: *а* – зразок 1 типу; *б* – зразок 2 типу.

У табл. 3.3 зведені величини основних параметрів сталезалізобетонних плит-зразків. Відповідно до вимог програми експерименту стале залізобетонна плита має бути виготовлена з бетону С 30/35 (В30).

Таблиця 3.3

**Основні параметри сталезалізобетонних плит-зразків для випробувань**

Параметр	Позначення	Значення		Одиниця виміру
		Зразок 1 типу	Зразок 2 типу	
Геометричні розміри				
• ширина перерізу	$s$	0,2	0,2	м
• висота перерізу	$h$	0,42	0,32	
• ширина захисного шару	$w$	0,03	0,03	
• довжина	$l$	4,5	4,5	
Тип бетону	Важкий на гранітному заповнювачі	Клас С 30/35 (В30)	Клас С 30/35 (В30)	
Густина бетону	$\rho_B$	2300	2300	кг/м <sup>3</sup>
Водоцементне відношення	В/Ц	0,36	0,36	
Гранична вологість	$u$	< 3	< 3	%
Робоча арматура нижня:				
• діаметр	$d_1$	0,012	0,012	м
• клас міцності		A500C	A500C	
Робоча арматура верхня:				
• діаметр	$d_3$	0,01	0,01	
• клас міцності		A240C	A240C	
Каркасна арматура:				
• діаметр	$d_4$	0,008	0,008	м
• клас міцності		A240C	A240C	
Сталевий елемент				
• двотавр №		30	22	
• висота стінки	$s_1$	0,3	0,22	м
• ширина полки	$s_2$	0,135	0,110	м
• ширина стінки	$s_3$	0,0065	0,0054	м
• клас міцності		A240	A240	

Для виготовлення плити була застосована бетонна суміш, склад якої мав параметри, які наведені у табл. 3.4.

**Склад бетонної суміші для виготовлення сталезалізобетонних плит-зразків для випробувань**

Назва компоненту	Вміст у пропорціях на 1 м <sup>3</sup> , кг	Допустиме відхилення, кг
Портландцемент марки «400»	460	10
Пісок кварцовий річкової	660	
Щебінь гранітний	1150	
Вода водопровідна	165	

Склад виготовлених зразків відповідає важкому бетону на гранітному заповнювачі з якого зроблені сталезалізобетонні плити-зразки для випробування, що досліджуються і є найпоширенішим при виготовленні залізобетонних та сталезалізобетонних конструкцій будівель [3 – 19], а також досліджуваних зразків елементів конструкцій і моделей елементів конструкцій для високотемпературних випробувань, відомих з [3 – 19].

Виготовлення зразків для випробувань, відбувалося за типовою технологією заводів-виробників залізобетонних та сталезалізобетонних конструкцій. При виготовленні сталезалізобетонних плит-зразків для випробувань передбачалися глухі отвори для термопар згідно зі схемою, що передбачена нами для дослідження температур у їх перерізах. Після заповнення опалубочних форм, бетон зразків ущільнювався на вібростендах. Твердіння і сушіння зразків відбувалося на повітрі протягом 28 діб у приміщенні для кондиціонування зразків ПКЗ-2 при температурі у ньому  $20^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$  та вологості  $55\pm 2\%$ . Перед випробуванням була проведена перевірка зразка на відповідність технічній документації.

З використанням бетонної суміші, з якої були виготовлені фрагменти залізобетонних ригелів, виготовлені зразки-куби, за допомогою яких була визначена міцність зразка за методикою, відповідною до ГОСТ 10180-90 разом із ригелями-зразками для випробування. При формуванні зразків-кубів були використані стандартні форми ФК-100, вигляд яких показаний на рис. 3.9.





Рис. 3.8. Форма кубів 2 ФК-100

Бетон заливався у форми, після чого ущільнювався на вібростолі ВМ-6.4 (80кг/2900/0,35...0,55), призначеному для бетонних, асфальтобетонних розчинів сумішей у формах за ДСТУ 10180, ДСТУ 12801 і ДСТУ 310.4.

Надалі зразки витримувалися в сушильній шафі протягом 28 діб. Для сушіння зразків використовувалася сушильна шафа СНОЛ 3,5.35.3,5/3М.

Означені дослідження проводилися для дослідження відповідності класу міцності бетону, який був визначений в програмі випробувань залізобетонних ригелів-зразків. Для армування залізобетонних ригелів-зразків була використана арматура виробництва ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Технічні характеристики бетону й арматурної сталі згідно із технічними характеристиками зразків для випробувань наведені у табл. 3.5.

Таблиця 3.5

**Технічні характеристики компонентів сталезалізобетонних плит-зразків  
для випробувань**

Найменування	Клас	Властивості	Параметри
Бетон важкий	С 30/35 (В30)	рядовий, гідротехнічний	Кубікова міцність – не менше за 30 МПа
Арматура $d_3 = 8$ мм	A240С	арматурна сталь	Площа поперечного перерізу 50.265 мм <sup>2</sup> Міцність – 240 МПа
Арматура $d_2 = 10$ мм	A500С	термомеханічно-зміцнена арматурна сталь	Площа поперечного перерізу 78.54 мм <sup>2</sup> Міцність – 500 МПа

Продовження табл. 3.5

Арматура $d_1 = 12$ мм	A500C	термомеханічно-зміцнена арматурна сталь	Площа поперечного перерізу 113.097 мм <sup>2</sup> Міцність – 500 МПа
Двотавр №30	A240	конструкційна сталь	Площа поперечного перерізу 7238 мм <sup>2</sup> Міцність – 240 МПа
Двотавр №22	A240	конструкційна сталь	Площа поперечного перерізу 3060 мм <sup>2</sup> Міцність – 240 МПа

**3.2.2. Розташування термопар у сталезалізобетонній плиті-зразку для високотемпературних випробувань.** На рис. 3.9 та рис. 3.10 представлені схеми розташування термопар у перерізі залізобетонної плити-зразку для випробування. Схема розташування термопар відповідає вимогам стандартів ДСТУ Б В.1.1-4-98 і ДСТУ Б В.1.1-13:2007 [22 – 24]. Термопары розташовані таким чином, щоб можна було дослідити температурні розподілення на необігрівній стороні плити, у сталевих двотаврових елементах, а також у арматурі.

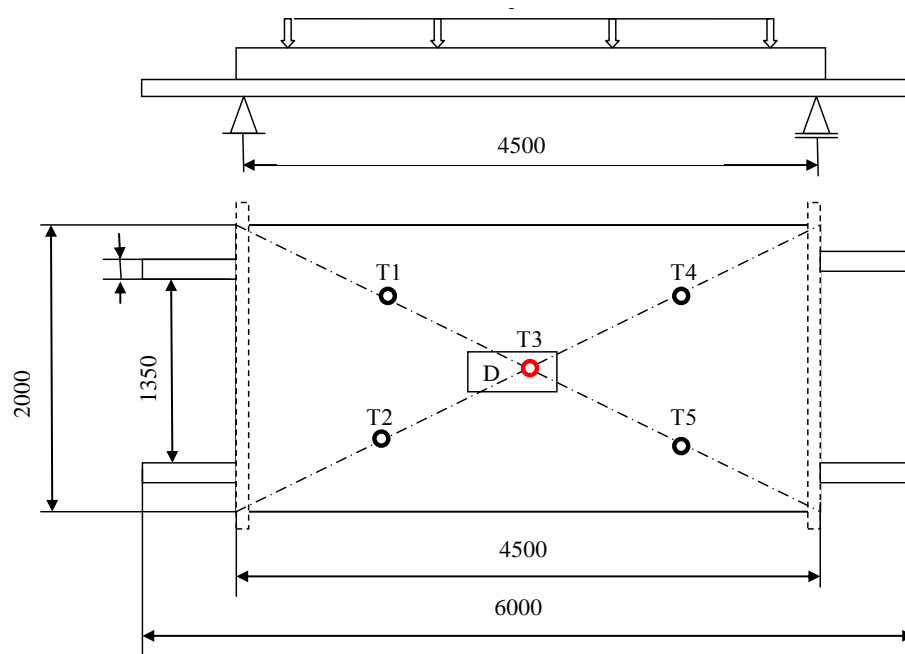


Рис. 3.9. Схема розташування термопар у перерізі сталезалізобетонної плити-зразку для випробувань.

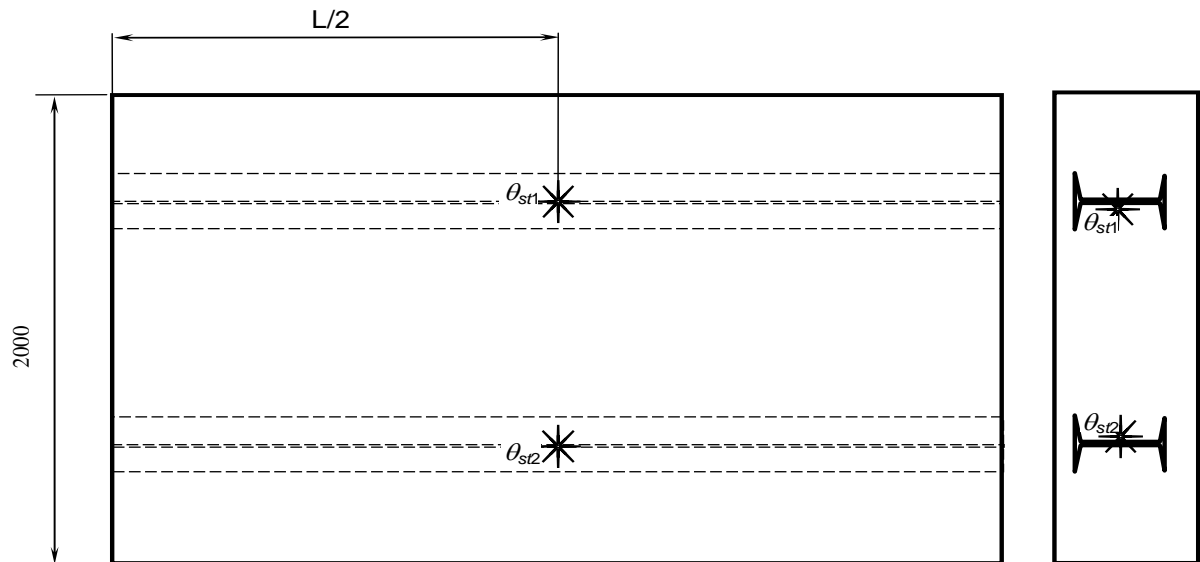


Рис. 3.10. Схема розташування термопар у сталевих двотаврових елементах сталезалізобетонної плити-зразку для випробувань.

За описаною методикою були виготовлені сталезалізобетонні плити-зразки для проведення випробувань, зображення одної з них подано на рис. 3.11.



Рис. 3.11. Вигляд сталезалізобетонної плити-зразку для випробувань

На рис. 3.11 видно канали, через які проходять дроти термодатчиків у перерізі ригеля-зразка згідно зі схемою на рис. 3.10. Для знімання температур з цих датчиків використовувався інтерфейс програмного забезпечення, який контролює та керує температурою у робочому просторі печі, забезпечуючи температурний режим пожежі. Для контролю температур у перерізі стале

залізобетонних плит використане програмне забезпечення, що розроблене персоналом випробувального центру «Пожтест».

### **3.3. Методика високотемпературних випробувань сталезалізобетонних плит-зразків**

**3.3.1. Методика підготовки обладнання та зразка до випробувань.** В процесі підготовки до випробувань, згідно з п.7.3 ДСТУ Б В.1.1-13:2007 зразок був шарнірно закріплений на стінках печі, як це показано на рис. 3.1. Для запобігання виходу гарячих газів з печі на полках ригелів були встановлені залізобетонні плити. Щілини та отвори між плитами та стінками печі були ізольовані цегляною кладкою та шаром мінеральної вати завтовшки 120 мм та густиною  $120 \text{ кг/м}^3$ . Отвори оглядових люків були закриті пінобетонними плитами товщиною 150 мм та густиною  $450 \text{ кг/м}^3$ .

**3.3.2. Методика проведення випробувань.** Випробування проводились при температурі  $18^{\pm 1} \text{ }^\circ\text{C}$  та відносній вологості повітря 55%, що відповідає вимогам [40, 41]. Для здійснення випробування було прикладене розподілене навантаження, що дорівнює  $0,4Q_{\text{max}}$ . Величини навантажень та технологічні дані для його реалізації наведені у табл. 3.6.

Таблиця 3.5

#### **Технічні характеристики компонентів сталезалізобетонних плит-зразків для випробувань**

Тип зразків досліджуваних сталезалізобетонних плит	Величина розподіленого навантаження, $Q$ , $\text{кН/м}^2$	Сумарна вага навантажувальних тягарів, т
1 тип	59	32
2 тип	41	22

Руйнуюче навантаження на другий тип сталезалізобетонної плити був визначений так само, як було визначене руйнуюче навантаження для

сталезалізобетонної плити першого типу. Методика визначення руйнуючого навантаження описана у п. 2.2.6 даної роботи.

Проведення випробувань зразків сталі залізобетонних плит здійснювалося за методом, що регламентований [40, 41]. Метод випробувань полягає у визначенні проміжку часу від початку випробування за температурним режимом згідно з [40] за високотемпературного впливу з обігрівної сторони фрагменту зразка [41].

Час настання граничного стану конструкції визначається за формулою [40]:

$$t_{fr} = t_{mes} - \Delta t, \quad (3.1),$$

де:  $t_{fr}$  – час настання граничного стану елемента конструкції, хв.,  $t_{mes}$  – значення часу від початку випробувань до досягнення граничного стану,  $\Delta t$  – похибка випробування.

Похибку випробувань визначають таким чином:

Для інтервалу часу від 0 до  $t_{mes}$  визначають інтегральне значення  $A_f$  середньої температури  $T_f$  в печі під час випробування за такою формулою:

$$A_f = \sum_{i=1}^n 0,5 (\theta_{fi} + \theta_{fi-1}) (t_i - t_{i-1}), \quad (3.2),$$

де:  $T_{fi}$  - значення середньої температури в печі, що відповідає часу  $t_i$ , °C;  $t_i$  - 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  $t_i = t_{mes}$ .

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

$$A_f = \sum_{i=1}^n 0,5 (\theta_{si} + \theta_{si-1}) (t_i - t_{i-1}), \quad (3.3)$$

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

Формулу для розрахунку значень температури  $T_s$  залежно від часу наведено в [40].

- Якщо  $A_f \geq A_s$ , то  $t=0$ .
- Якщо  $A_f < A_s$ , то похибку  $\Delta t$  визначають за формулою:

$$\Delta t = (0,015 t_{mes} + 3) (A_s - A_f)/(A_s - A_{min}), \quad (3.4),$$

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 формулам (3.3) і (3.4):

$$A_f = \sum_{i=1}^n 0,5 (\theta_{min i} + \theta_{min i-1}) (t_i - t_{i-1}), \quad (3.5),$$

де:  $\theta_{min i}$  - значення мінімально допустимої температури  $T_{min}$ , що відповідає часу  $t_i$ , °C.

Температуру  $\theta_{min}$  визначають за формулою:

$$\theta_{min} = \theta (1 - |0,01d|), \quad (3.6),$$

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

Момент настання граничного стану визначається за критичними значеннями максимального прогину та швидкості наростання прогину.

Найбільші прогини зразків визначалися в двох точках по одній з кожного краю зразка. Також додатково вимірювались всі суттєві горизонтальні деформації

(такі, що перевищують 5 мм) в центрі зразка та посередині висоти вертикального краю зразка на відстані 50 мм від краю.

Випробування припиняються у випадку досягнення одного з граничних станів. Настання граничного стану визначаються згідно з вимогами стандартів [22, 23], і які описані у першому розділі дисертаційної роботи. Для визначення критичних значень переміщень та швидкості наростання переміщень використані формули (1.1). Згідно з розрахунками отримані такі значення: поперечне зміщення середини прольоту зразків сталезалізобетонних плит першого типу складає 116 мм, граничне значення швидкості наростання вертикальної деформації 5.17 мм/хв, а для зразків сталезалізобетонних плит другого типу складає відповідно 153 мм та 6.783 мм/хв.

Відповідно до ДСТУ Б В.1.1-4-98\*, ДБН В.1.1-7-2002, EN 1992-1-2:2012, критерій теплоізолювальної здатності вважається забезпеченим, коли підвищення середньої температури по всій необігрітій поверхні обмежене 140 °С, а підвищення максимальної температури у будь-якій точці поверхні не перевищує 180 °С. Тому будемо вважати, коли температура на необігрітій поверхні досягає температури 140 °С настає граничний стан втрати теплоізолювальної здатності. Якщо за контрольний час стан втрати теплоізолювальної здатності не настає, це означає що за цим станом елемент, що розглядається відповідає нормованому класу вогнестійкості.

Втрата цілісності настає у той час, коли утворюються наскрізні отвори або тріщини через які можуть поширюватись продукти горіння, полум'я і т.п. Стан втрати цілісності контролюється за трьома ознаками: загоряння або тління зі свіченням ватного тампона, що піднесений до необігрітій поверхні зразка в місця тріщин на відстань від 20 мм до 30 мм протягом проміжку часу не менше ніж 30 с; виникнення тріщини, через яку можна вільно (без додаткових зусиль) ввести в піч щуп діаметром 6 мм і перемістити його вздовж цієї тріщини на відстань не менше 150 мм; виникнення тріщини (або отвору), через яку можна вільно ввести в піч щуп діаметром 25 мм; полум'я на необігрітій поверхні зразка спостерігається протягом проміжку часу не менше ніж 10 с.

Підсумовуючи все вищесказане, можна узагальнити:

- об'єктами для вивчення є дві серії по два зразки-близнюки серійні сталезалізобетонних плит першого та другого типів із сталевим елементом з двотавру № 30 та двотавру №22 міцністю 240 МПа відповідно з важкого бетону однакового складу на гранітному заповнювачі (щебенях) класу міцності С 30/35 (В30) і робочою арматурою класу А500С діаметром 12 мм та 10 мм, та додатковою А240С діаметром 8 мм;
- основні дослідження зразків відбуваються за допомогою установки, що складається з вогневої печі з паливно-форсунковою системою на дизельному паливі з автоматичним керуванням з прикладанням відповідного механічного навантаження за допомогою бетонних фундаментних блоків;
- для попереднього дослідження механічних властивостей бетону зразків для випробування була застосована стандартна методика;
- експеримент проводиться протягом контрольного часу, який відповідає найбільшому часові настання граничного стану для сталезалізобетонних плит згідно з ДБН 1.1.7 – 2002 Пожежна безпека об'єктів будівництва;
- висновок про настання граничного стану втрати несучої здатності ригелів робиться на основі критеріїв що описані у стандарті щодо випробувань на вогнестійкість ДСТУ Б В.1.1-4-98\* та ДСТУ Б В.1.1-20:2007;
- для досліджуваних сталезалізобетонних плит була розроблена схема розташування температурних датчиків у їх перерізі;



## РОЗДІЛ 4

### РЕЗУЛЬТАТИ ВОГНЕВИХ ВИПРОБУВАНЬ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ

#### 4.1. Результати попередніх експериментальних досліджень сталезалізобетонних плит

Для визначення відповідності міцності бетону, що вказаний у технічній документації на досліджуваний зразок сталезалізобетонної плити була використана стандартна методика випробувань на міцність згідно із стандартом, чинним в Україні [130]. При цьому використовувались випробування бетонних зразків-кубів на гідравлічному пресі МС-1000, що зображений на рис.4.1.



Рис. 4.1. Зовнішній вигляд гідравлічного пресу МС-1000 для випробувань на стискання

Для випробувань використовувались кубічні бетонні зразки шириною ребра 100 мм. Зразки бетону для випробувань на міцність наведені на рис. 4.2.

Процес випробувань бетонних зразків-кубів показаний на рис. 4.3.



Рис. 4.2. Вигляд бетонних кубічних зразків для випробувань на міцність.



Рис. 4.3. Вигляд кубічного бетонного зразку після випробувань на міцність.

Результати випробувань бетону сталезалізобетонної плити наведені у табл. 4.1. Результати випробувань подані у вигляді значень кубічної міцності зразків, отриманих за даними вимірювань сили, що руйнує бетонний зразок. Також у даній таблиці подані отримані відхилення кубічної міцності.

Таблиця 4.1.

**Результати випробувань на міцність бетонних зразків**

Зразок	Початковий модуль пружності, $E_b$ , $\times 10^4$ МПа	Кубічна міцність бетону, $f_{cd}$ , МПа	Відповідний клас міцності бетону	Імовірність вимірювання міцності, %
№ 1	1,73	34	C30/35	100
№ 2	1,15	34	C30/35	
№ 3	1,35	30	C30/35	
№ 4	1,09	33	C30/35	
№ 5	1,13	31	C30/35	
№ 6	1,56	31	C30/35	

Дані табл. 4.1 показують, що бетон, з якого були виготовлені сталезалізобетонні плити-зразки для випробування відноситься до класу міцності С 30/35 (В30). Клас міцності бетону відповідає класу міцності, що зазначений у технічній документації на зразок

Густина бетонних зразків була визначена при використанні зважування бетонних зразків-кубів, що були призначені для випробування на міцність, на електронних вагах ACS-15A. Дані, щодо зважування наведені у табл. 4.2. Також у табл. 4.2 наведені дані щодо густини бетону зважених зразків.

Таблиця 4.2.

**Результати визначення густини бетону зразків для випробування на міцність**

Зразок	Вага бетонного зразка, кг	Густина бетонного зразка, $\text{кг/м}^3$	Середня густина бетону, $\text{кг/м}^3$
№ 1	2,321	2321	2308
№ 2	2,325	2325	
№ 3	2,291	2291	
№ 4	2,301	2301	
№ 5	2,305	2305	
№ 6	2,307	2307	

У результаті проведених досліджень, наведених у табл. 4.2 визначено, що середня густина бетону зразків для випробувань на міцність складала  $2308 \text{ кг/м}^3$ . Оскільки бетонні зразки для попередніх досліджень виготовлялися з бетону, склад якого є повністю ідентичний до бетону сталезалізобетонних плит, підданих випробуванням, робимо висновок що бетон сталезалізобетонних плит відповідає вимогам табл. 3.3 розділу 3 даної роботи.

## 4.2. Результати експериментальних досліджень сталезалізобетонних плит в умовах вогневого впливу під час випробувань на вогнестійкість

### 4.2.1. Результати температурних вимірювань сталезалізобетонних плит-зразків.

Результати вимірювання температури у камері печі при послідовних випробуваннях плит-зразків першого типу (див. рис. 3.7 а) показані на рис. 4.4.

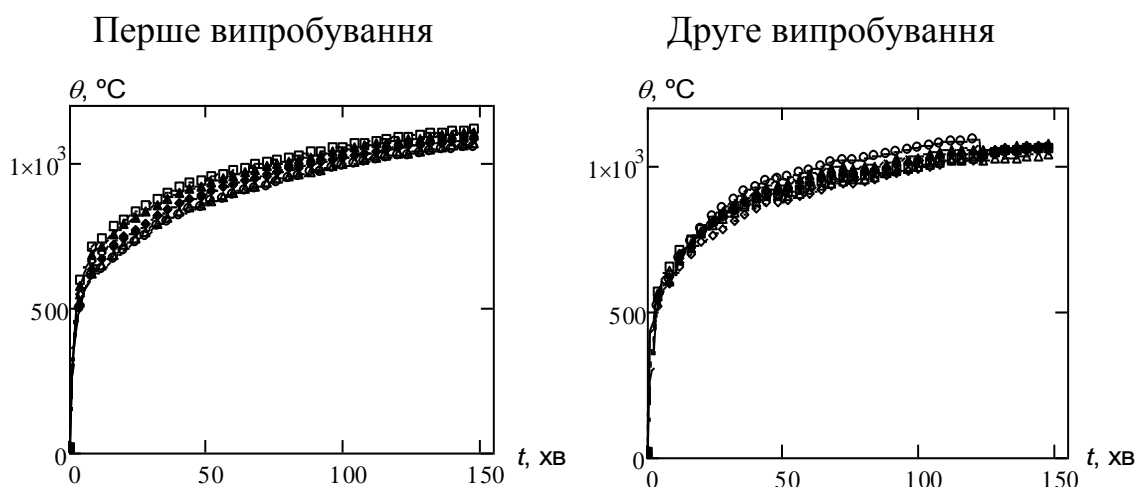


Рис. 4.4. Показники термопар у камері печі при випробуваннях зразків сталезалізобетонних плит першого типу:

- – показники 1 термопар; ○○○ – показники 2 термопар;
- △△△ – показники 3 термопар; ◇◇◇ – показники 4 термопар;
- ◆◆◆ – показники 5 термопар; ●●● – показники 6 термопар;

Результати вимірювання температури у камері печі при послідовних випробуваннях плит-зразків другого типу (див. рис. 3.7 б) показані на рис. 4.5.

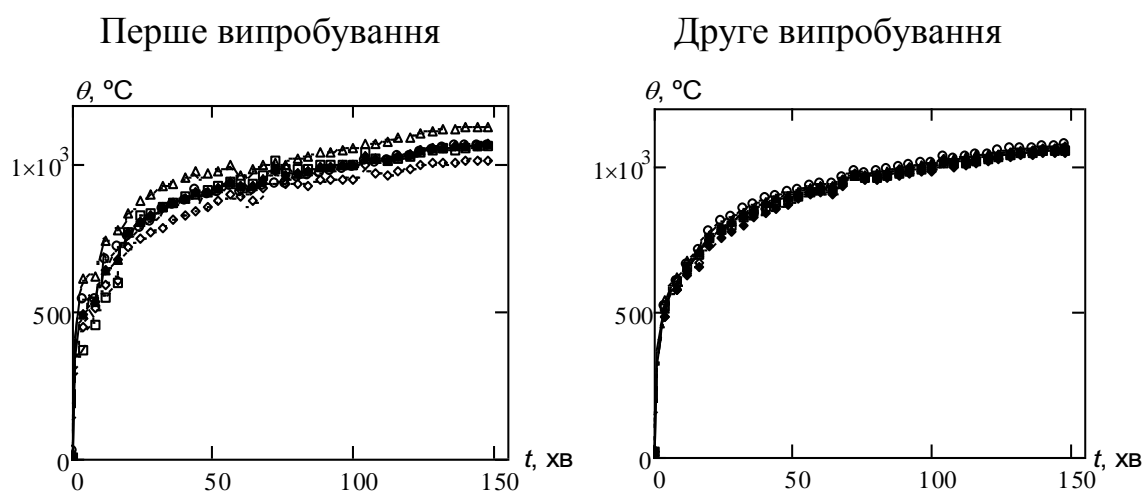


Рис. 4.5. Показники термопар у камері печі при випробуваннях зразків сталезалізобетонних плит першого типу:

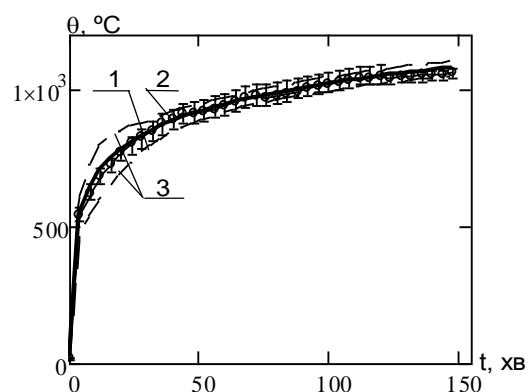
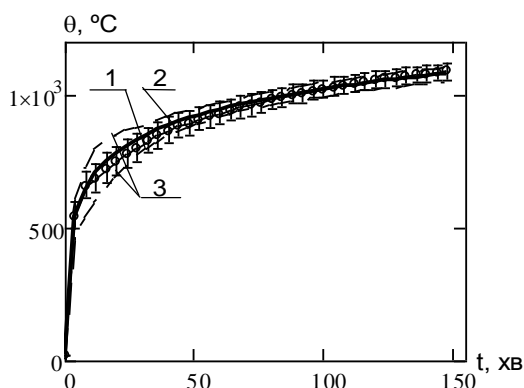
- – показники 1 термопарі; ○○○ – показники 2 термопарі;
- △△△ – показники 3 термопарі; ◇◇◇ – показники 4 термопарі;
- ◆◆◆ – показники 5 термопарі; ●●● – показники 6 термопарі;

Графіки на рис. 4.4 та рис. 4.5 показують те, що температура у камері печі при всіх чотирьох випробуваннях у різних точках контролю має близькі значення і відрізняється несуттєво, не має помітних викидів. Це вказує на умови експерименту, які відповідають необхідним вимогам. Для аналізу відповідності температурного режиму у печі до стандартного режиму пожежі згідно зі стандартом [22] використовують середнє значення температури за показниками всіх термопар у просторі печі.

За даними вимірювання термопар у просторі печі була побудована залежність середньооб'ємної температури режиму випробувань, яка наведена на рис. 4.6. Графік середньої температури на рис. 4.6 побудований разом із максимальним та мінімальним відхиленнями для того, щоб оцінити його відповідність вимогам стандартів, регламентуючим випробування на вогнестійкість плит перекриттів [23].

Графіки, наведені на рис. 4.6 показують, що режим випробувань забезпечує відповідність його вимогам стандартів, чинних в Україні.

Перше випробування плити 1 типу      Друге випробування плити 1 типу



Перше випробування плити 2 типу      Друге випробування плити 2 типу

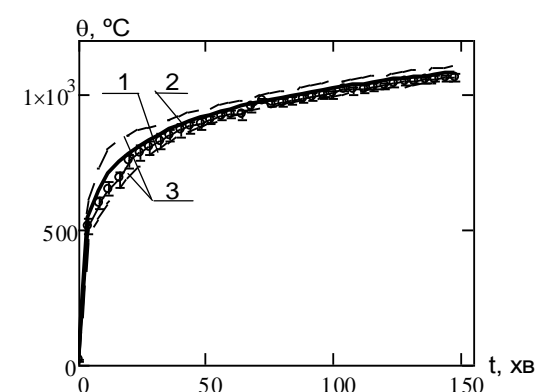
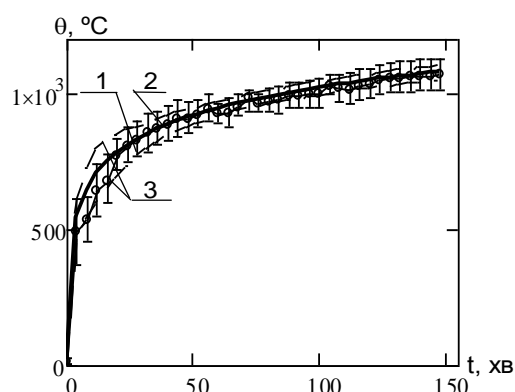


Рис. 4.6. Температурний режим випробувань в печі:

1 – середня температура в печі, 2 – стандартна температурна крива, 3 – допустимі відхилення температурного режиму.

Згідно із методикою експерименту щодо проведених вогневих випробувань, описаною у 3 розділі даної роботи вимірювання проводилися на сталевому елементі та не обігрівної поверхні плити. На рис. 4.7 наведені графіки залежностей температури сталевих елементів досліджуваних сталезалізобетонних плит.

Аналізуючи графіки, наведені на рис. 4.7 можна побачити, що швидкість наростання температури у сталевому елементі зразків сталезалізобетонних плит другого типу більша за таку ж саме швидкість для зразків сталезалізобетонних плит першого типу. Також можна зазначити, що спостерігається суттєва розбіжність температур між сталевими елементами одного зразка сталезалізобетонної плити.

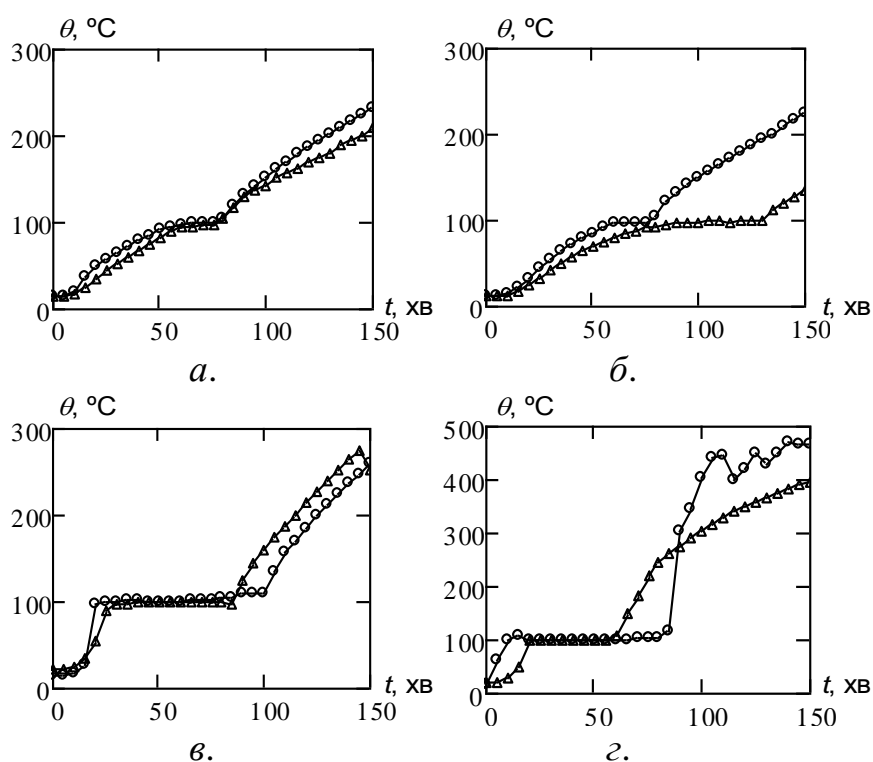


Рис. 4.7. Показники термопар посередині стінки сталевого двотаврового елемента сталезалізобетонних плит: *а* – першого зразка першого типу плит; *б* – другого зразка першого типу плит; *в* – першого зразка другого типу плит; *г* – другого зразка другого типу плит;

На рис. 4.8 наведені графіки температури у середньому арматурному стержні плити у залежності від часу.

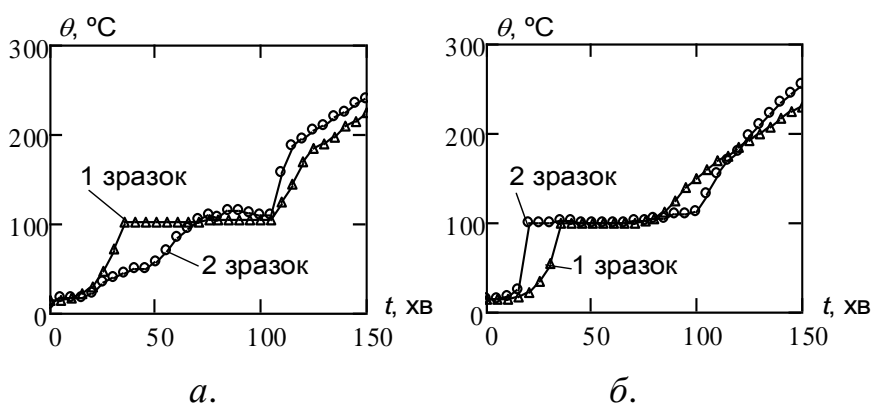


Рис. 4.8. Показники термопар у середньому арматурному стержні посередині сталезалізобетонних плит: *а* – зразків першого типу плит; *б* – зразків другого типу плит.

Стосовно графіків температури у залежності від часу для арматурних стержнів можна зазначити, що вони також мають суттєві відмінності для зразків одного і того ж типу. Тим не менше максимальна температура за вказаний проміжок часу відрізняється несуттєво.

Для аналізу якості експериментальних даних, отриманих при вимірюваннях температури у сталевих елементах сталезалізобетонних плит були побудовані графіки залежності середньої температури у сталевих двотаврових елементах від часу разом із відхиленнями. Побудовані графіки подані на рис. 4.9.

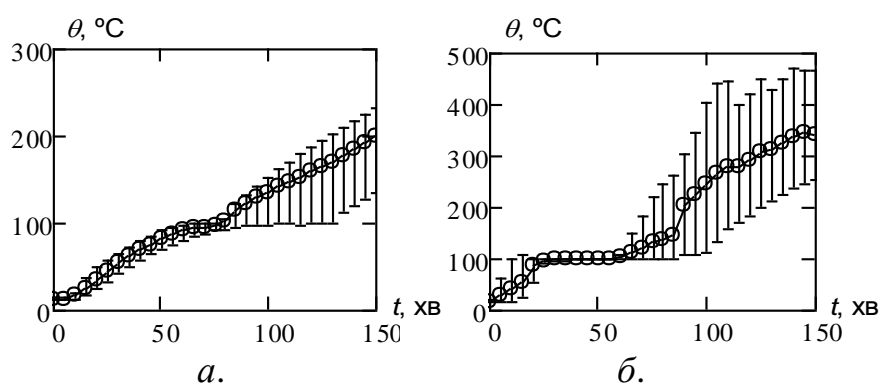


Рис. 4.9. Середня температура середини стінки сталевого двотаврового елемента сталезалізобетонних плит із відхиленнями: *а* – зразків першого типу плити; *б* – зразків другого типу плити;

Також була проаналізована якість отриманих експериментальних даних щодо вимірювання температури в арматурних стержнях. Для цього були побудовані графіки залежності середньої температури у середньому арматурному стержні плити від часу разом із відхиленнями. Побудовані графіки подані на рис. 4.10.

Температури в арматурних стержнях різних зразків нагріваються до однакової температури, оскільки захисний шар для цих зразків співпадає. Однак є ділянки де відхилення є найбільшими. Дані ділянки спостерігаються у часовому інтервалі з 30 хв по 50 хв.



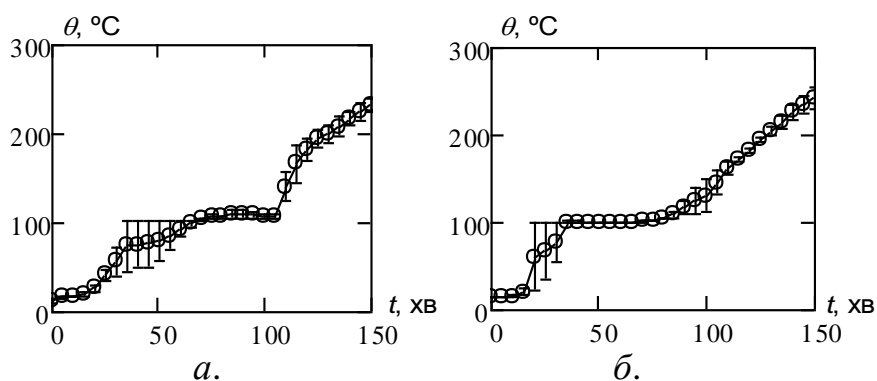


Рис. 4.10. Середня температура середнього арматурного стержня сталезалізобетонних плит із відхиленнями: *а* – зразків першого типу плити; *б* – зразків другого типу плити;

На рис. 4.11 наведені графіки залежностей температури у різних контрольних точках необігрівної поверхні сталезалізобетонних плит, що були отримані за результатами проведених вимірювань при випробуваннях.

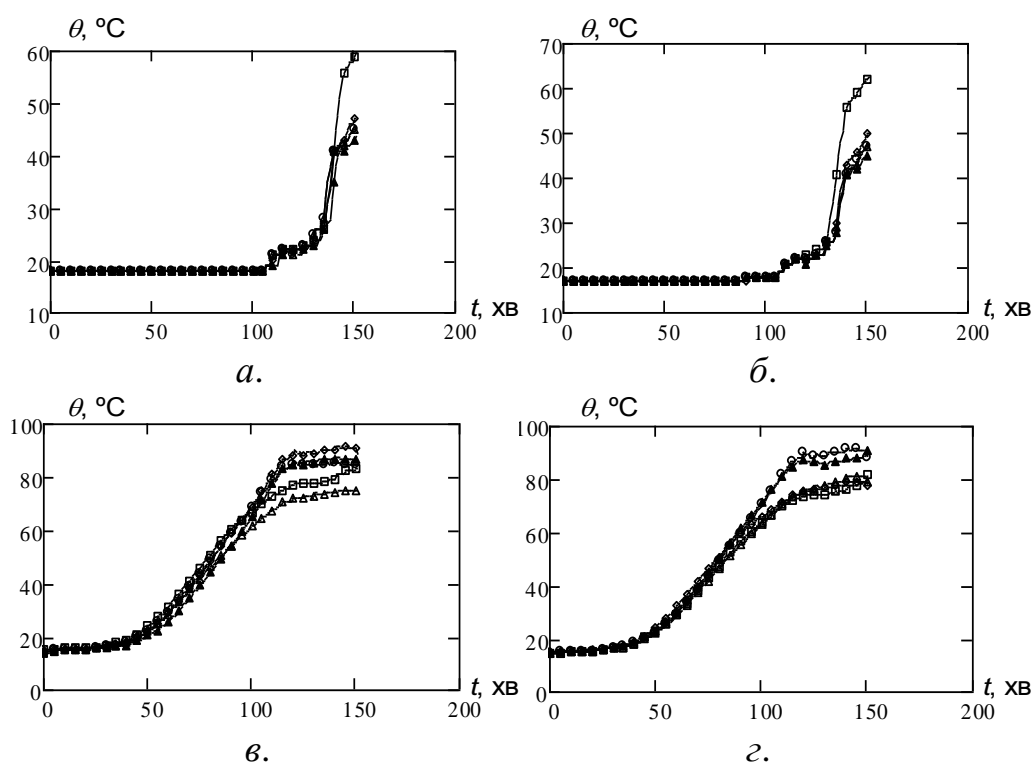


Рис. 4.11. Показники терморпар на необігрівній поверхні сталезалізобетонних плит першого типу зразків №1 (*а*) та №2 (*б*), сталезалізобетонних плит другого типу зразків №1 (*в*) та №2 (*з*): □□□ – показники 1 терморпар; ○○○ – показники 2 терморпар; △△△ – показники 3 терморпар; ●●● – показники 4 терморпар; ◆◆◆ – показники 5 терморпар.

На рис. 4.12 подані графіки розкиду температур необігрівній стороні досліджуваних сталезалізобетонних плит разом із відхилення при порівнянні результатів випробувань між зразками одного й того ж типу.

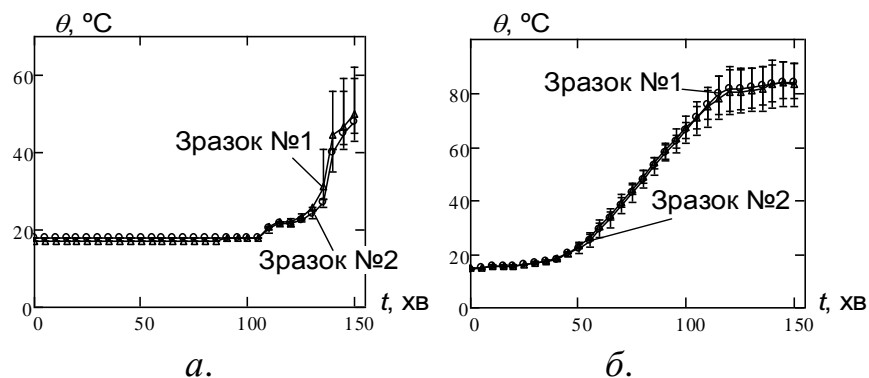


Рис. 4.12. Середня температура необігрівної поверхні сталезалізобетонних плит із відхиленнями: *а* –зразків першого типу плити; *б* –зразків другого типу плити;

Аналізуючи графіки на рис. 4.12, можна побачити, що отримані графіки середньої температури у залежності від часу випробувань для зразків сталезалізобетонних плит одного типу є подібними і розрізняються на 5-6 °С. При цьому найбільші відхилення виникають на інтервалі з 120 хвилини по 150 хвилину випробування. Це пов'язано з тим, що унаслідок нагрівання внутрішніх шарів зразків до високої температури та збільшення унаслідок цього діючого навантаження відбувається інтенсивне розтріскування та роздроблення бетону. Враховуючи те, що температура у всіх контрольних точках не перевищує значень 140 °С, можна зафіксувати відсутність настання граничного стану втрати теплоізолювальної здатності.

**4.2.2. Результати вимірювань деформацій сталезалізобетонних плит-зразків.** Використовуючи дані вогневих випробувань сталезалізобетонних плит, були досліджені переміщення середини плити під час її нагрівання за стандартним температурним режимом. На рис. 4.13 наведені побудовані графіки залежностей найбільшого прогину сталезалізобетонної плити від часу випробування. На

графіках, наведених на рис. 4.13 також показані у вигляді горизонтальної лінії критичні значення прогину, визначені за формулами (1.3).

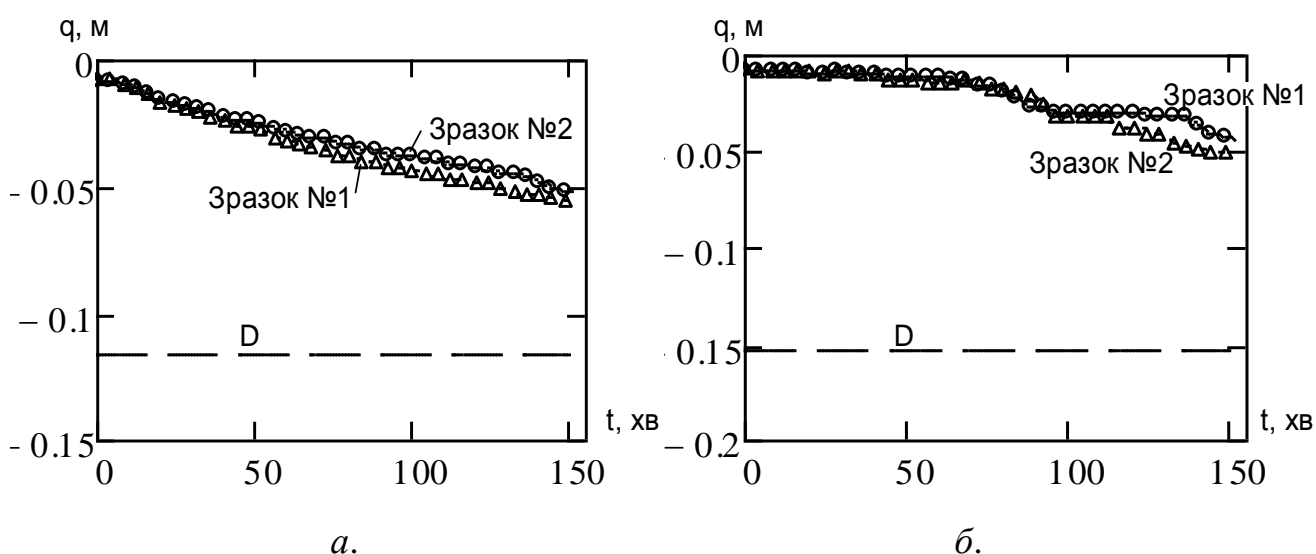


Рис. 4.13. Залежність найбільшого прогину сталезалізобетонних плит першого типу (а) та сталезалізобетонних плит другого типу (б).

На рис. 4.14 наведені графіки залежностей швидкості наростання максимального прогину у досліджуваних сталезалізобетонних плитах від часу випробувань.

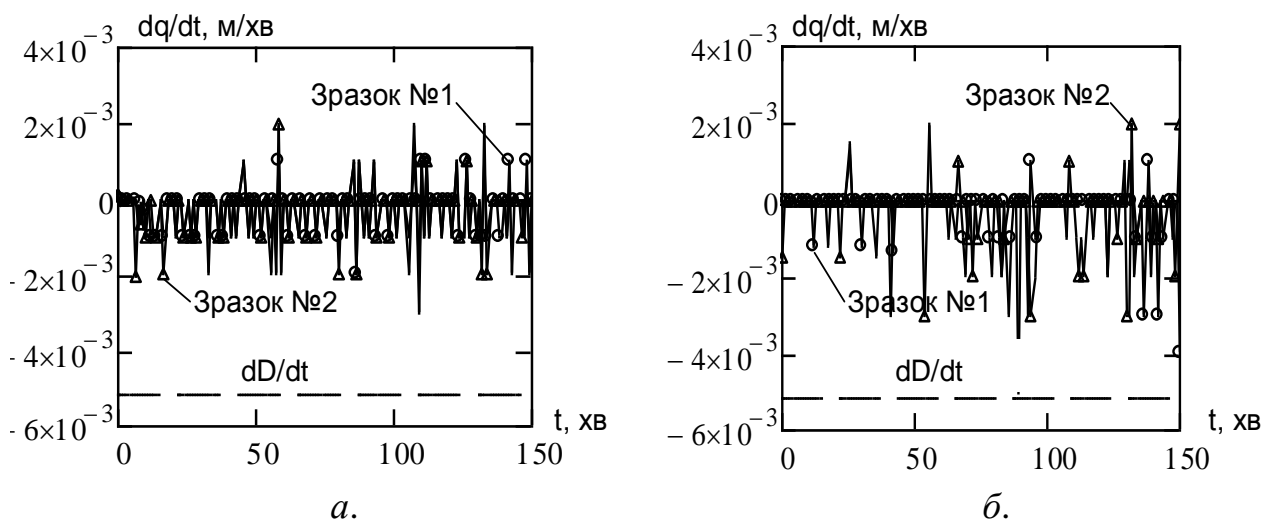


Рис. 4.14. Залежність швидкості наростання найбільшого прогину сталезалізобетонних плит першого типу (а) та сталезалізобетонних плит другого типу (б).

Аналізуючи результати досліджень поданих на рис. рис. 4.13 та 4.14 можна відзначити такі особливості. Під час випробувань настання граничного стану за ознакою втрати несучої здатності, що наведена у відповідних стандартах України [22 – 24] щодо випробувань плит перекриттів не спостерігалось.

Також слід зазначити, що контроль займання ватного тампону та контроль утворення тріщин за методикою, описаною у 3 розділі даної роботи, показав відсутність настання граничного стану втрати цілісності.

Таким чином, проведені випробування показали, що досліджувана плита відповідає класу вогнестійкості REI 150.

На рис. 4.15 наведені графіки середніх значень найбільшого прогину досліджуваних сталезалізобетонних плит разом із відхиленнями.

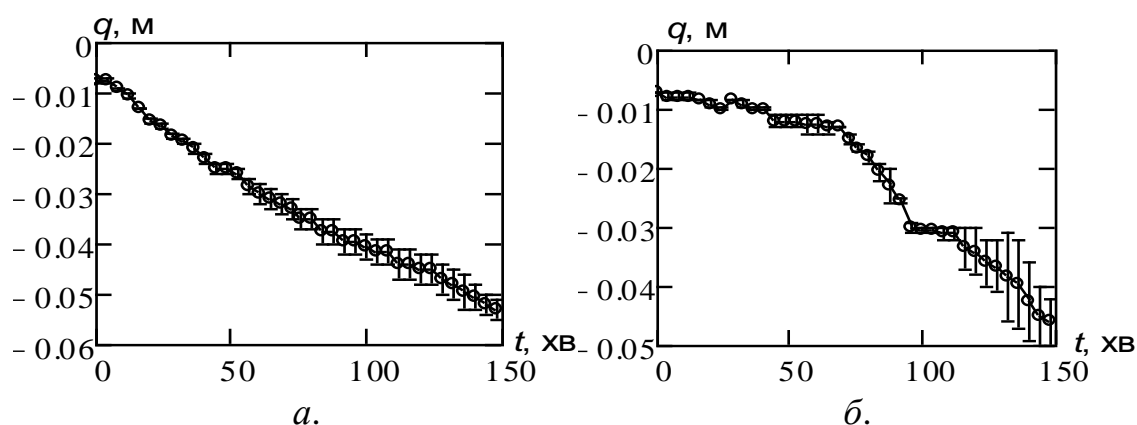


Рис. 4.15. Залежність середнього значення максимального прогину сталезалізобетонних плит із відхиленнями: *а* –зразків першого типу плити; *б* – зразків другого типу плити;

**4.2.3. Результати дослідження ушкоджень сталезалізобетонних плит при вогневих випробуваннях.** Використовуючи фотоматеріали отримані під час випробування, було проаналізовано процес тріщиноутворення та роздроблення бетону досліджуваних сталезалізобетонних плит. На рис. 4.15 показані фотографії сталезалізобетонних плит в умовах випробувань.



Рис. 4.15. Зовнішній вигляд тріщин, що виникли у досліджуваних сталезалізобетонних плитах під час випробувань.

У шарі бетону досліджуваних сталезалізобетонних плит виникали тріщини характер розподілу яких наведений на рис. 4.16.

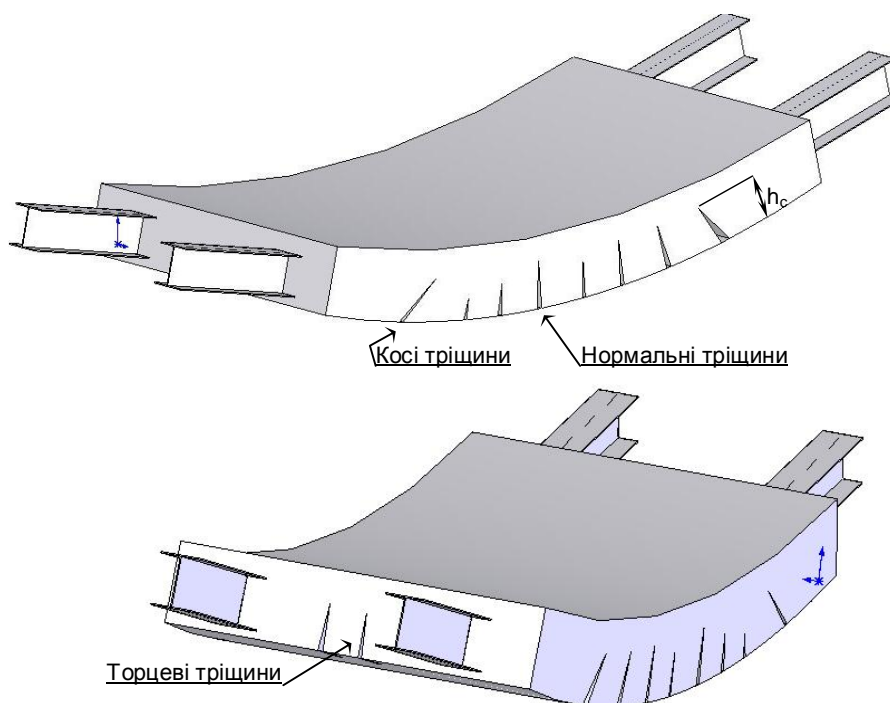


Рис. 4.16. Розташування тріщин у бетонній основі сталезалізобетонної плити.

Для оцінки розвитку дефектів у бетонній основі сталевозалізобетонної плити була виміряна середня висота тріщин. Висота тріщин вимірювалася за допомогою лазерного дальноміру під час випробувань. На рис. 4.17 наведені графіки висоти візуальних тріщин.

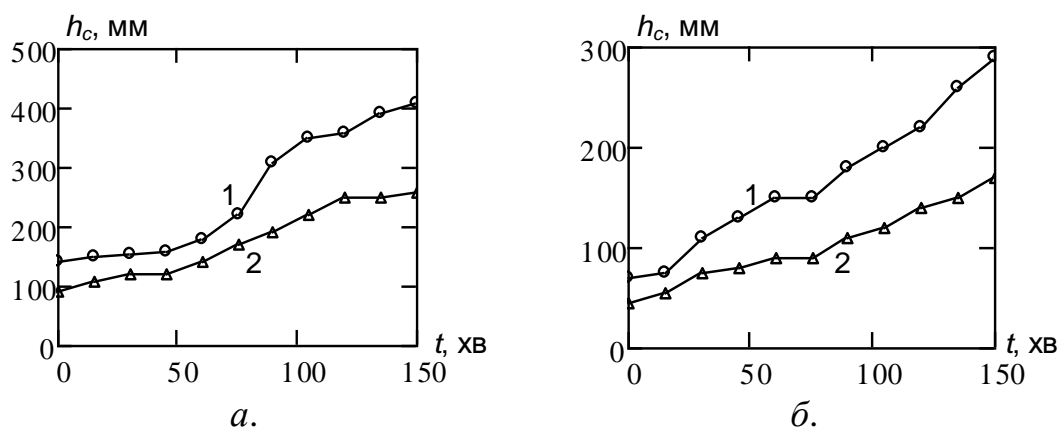


Рис. 4.17. Залежність середньої висоти нормальних тріщин (а) та торцевих тріщин (б): 1 - сталевозалізобетонних плитпешого типу; 2 – сталевозалізобетонних плит другого типу.

Результати вимірювань, які були проведені під час випробувань сталевозалізобетонних плит показали, що процеси що відбувалися відповідають теоретичним уявленням та експериментальним даним, що отримані для залізобетонних плит. В процесі випробувань досліджувані сталевозалізобетонні плити згиналися, причому прогин постійно збільшувався донизу у бік температурного впливу печі. Температурні криві нагрівання необігрівної поверхні сталевозалізобетонних плит другого типу мали горизонтальну ділянку із сталим значенням температури близько 100 °С, пов'язану із випаровуванням вільної вологи у порах бетону, сталевозалізобетонні плити першого типу мали температуру необігрівної поверхні, яка протягом часу випробування не досягла значення 100 °С.

Температури, які вимірювалися у печі мали невеликий розкид, що підтверджують добру відтворюваність температурного режиму випробувань. Це

означає що рух пічних газів та інтенсивне пароутворення несуттєво впливає на процес вимірювання.

Також незначний розкид значень спостерігався при вимірюваннях температури на необігрівній поверхні.

Помітний розкид мав місце при вимірюваннях температури у сталевому двотавровому елементі та на арматурних стержнях. Це пояснюється суттєвою залежністю результатів вимірювання від процесів деградації цементного каменю та його розтріскуванням.

Також, слід зазначити, що розкид значень максимального прогину досліджуваних сталі залізобетонних плит мав невелике значення.

### 4.3. Дисперсія отриманих експериментальних даних

Маючи описаний вище комплекс результатів вимірювань для двох зразків-близнюків сталезалізобетонних плит першого та другого типів було визначено статистичні показники отриманих результатів. У якості основного статистичного показника була визначена дисперсія відтворюваності за формулою [121]:

$$S_{\text{сер}}^2 = \frac{1}{d(n-1)} \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^d \left[ \frac{y_{kj}^e - \bar{y}_k^e - \delta_{\text{вим}}}{\bar{y}_k^e} \right]^2. \quad (4.1)$$

$y_{kj}^e$  – поточне експериментальне значення з вибірки;

$\bar{y}_k^e$  – середнє поточне значення вибірки;

$d$  – кількість експериментальних ситуацій;

$n$  – кількість вимірювань у вибірці;

$\delta_{\text{вим}}$  = допустима похибка вимірювання згідно з [81].

У табл. 4.3 подані значення дисперсії температурних показників для контрольних шарів.

Дані табл. 4.2 вказують на помітну розбіжність експериментальних даних, проте вона є несуттєвою у межах допустимої похибки. Отримані дані щодо дисперсії відтворюваності були використані для дослідження результатів розрахунку, що описані у 2 розділі даної роботи.

Таблиця 4.3

### Параметри відтворюваності вимірювань температури

Параметр	Вимірювання температури			
	Сталевий елемент	Простір у печі	Необігрівна поверхня	Арматурні стержні
Сталезалізобетонна плита першого типу				
Максимальне відхилення від середнього значення, °C	47,5	123,7	12,4	49
Середнє відносне відхилення від середнього значення, %	10,7	13,06	3,5	10,94
Дисперсія відтворюваності, $S_{сер}^2$	0,2	0,17	0,63	0,22
Сталезалізобетонна плита другого типу				
Максимальне відхилення від середнього значення, °C	75	153,2	10,3	77
Середнє відносне відхилення від середнього значення, %	10,8	13,2	3,77	7,9
Дисперсія відтворюваності, $S_{сер}^2$	0,23	0,28	1,01	0,43

У табл. 4.4 подані значення дисперсії показників максимального прогину досліджуваних стале залізобетонних плит.



Таблиця 4.4

**Параметри відтворюваності вимірювань максимального прогину**

Сталезал. плита	Максимальне відхилення від середнього значення, мм	Середнє відхилення від середнього значення, %	Дисперсія відтворюваності, $S_{сер}^2$
Першого типу	3,05	5,26	0,254
Другого типу	3,6	7,07	0,457

У табл. 4.5 подані значення дисперсії показників швидкості наростання максимального прогину досліджуваних стале залізобетонних плит..

Таблиця 4.5

**Параметри відтворюваності швидкості наростання максимального прогину**

Сталезал. плита	Максимальне відхилення від середнього значення, мм/хв	Середнє відхилення від середнього значення, %	Дисперсія відтворюваності
Першого типу	5,22	5,04	0,311
Другого типу	6,3	6,88	0,504

Дані табл. 4.4 та табл. 4.5 показують добру відтворюваність результатів вимірювання і те що їх можна вважати достовірними.

Проведені дослідження показали, що експеримент, щодо визначення температур у контрольних точках простору печі для випробувань досліджуваних сталезалізобетонних плит, їх необігрівних поверхнях, сталевих двотаврових елементів плит та арматурних стержнях проведених у відповідності до вимог стандартів щодо проведення випробувань несучих стін на вогнестійкість. Результати, що отримані при проведенні випробувань є достовірними. Таким чином, отримані результати випробувань можна використовувати для оцінки адекватності результатів розрахунків, отриманих у 2 розділі.

#### 4.4. Оцінка адекватності результатів розрахунку вогнестійкості сталезалізобетонних плит за методом кінцевих елементів

За результатами випробувань, наведеними в даному розділі та за результатами, що отримані при проведенні розрахунку за методиками розділу 2 цієї роботи, був проведений аналіз адекватності розрахункових даних щодо досліджуваних сталезалізобетонних плит. На рис. 4.18 наведені розрахункові та експериментальні показники температури у середньому арматурному стержні при випробуванні сталезалізобетонних плит першого типу та другого типу.

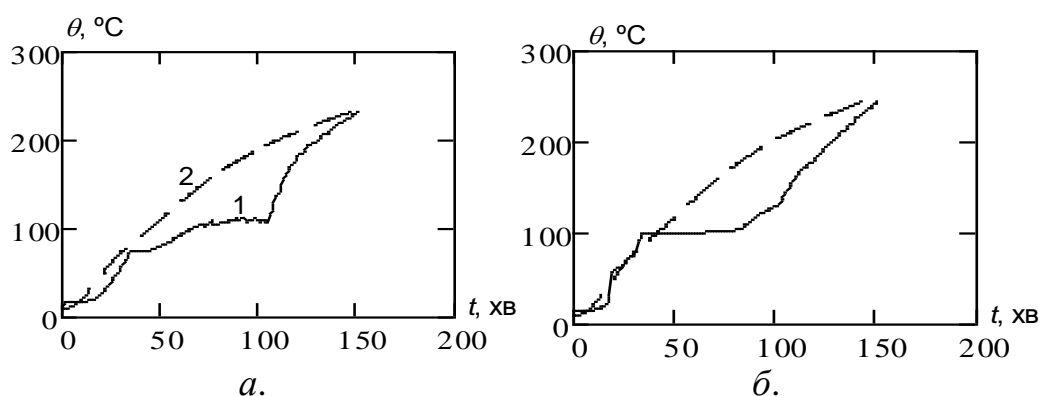


Рис. 4.18. Експериментальні (1) та розрахункові (2) показники температури у середньому арматурному стержні при випробуванні сталезалізобетонних плит: *a* – першого типу; *б* – другого типу.

На рис. 4.19 наведені розрахункові та експериментальні показники температури у середині двотавра при випробуванні сталезалізобетонних плит першого типу та другого типу.

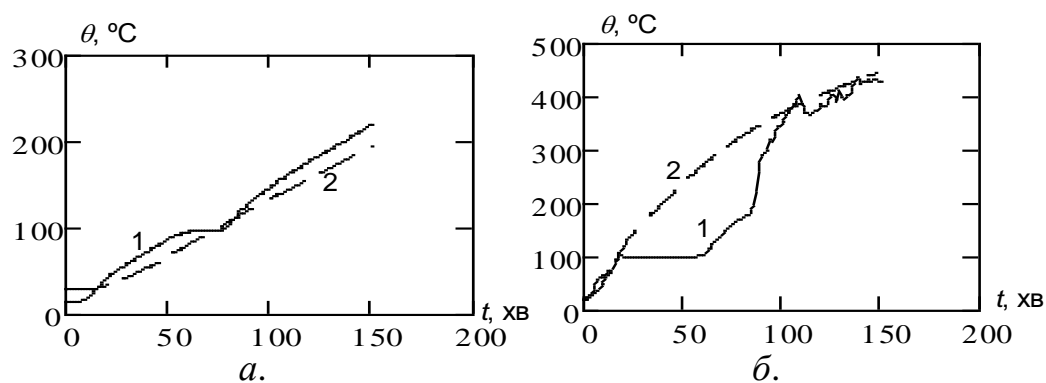


Рис. 4.19. Експериментальні (1) та розрахункові (2) показники температури у середині двотавра при випробуванні сталезалізобетонних плит: *a* – першого типу; *б* – другого типу.

На рис. 4.20 наведені розрахункові та експериментальні показники температури у на необігрівній стороні при випробуванні сталезалізобетонних плит першого типу та другого типу.

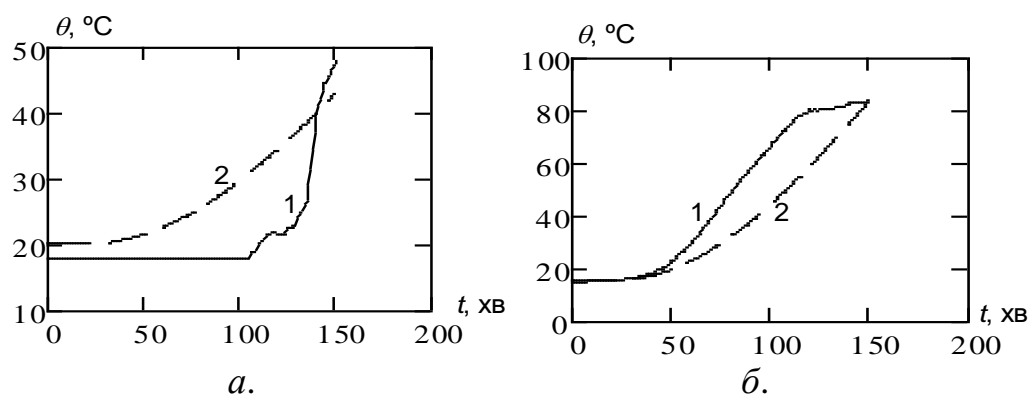


Рис. 4.20. Експериментальні (1) та розрахункові (2) показники температури на необігрівній поверхні при випробуванні сталезалізобетонних плит: *а* – першого типу; *б* – другого типу.

На рис. 4.21 наведені розрахункові та експериментальні показники максимального прогину при випробуванні сталезалізобетонних плит першого типу та другого типу.

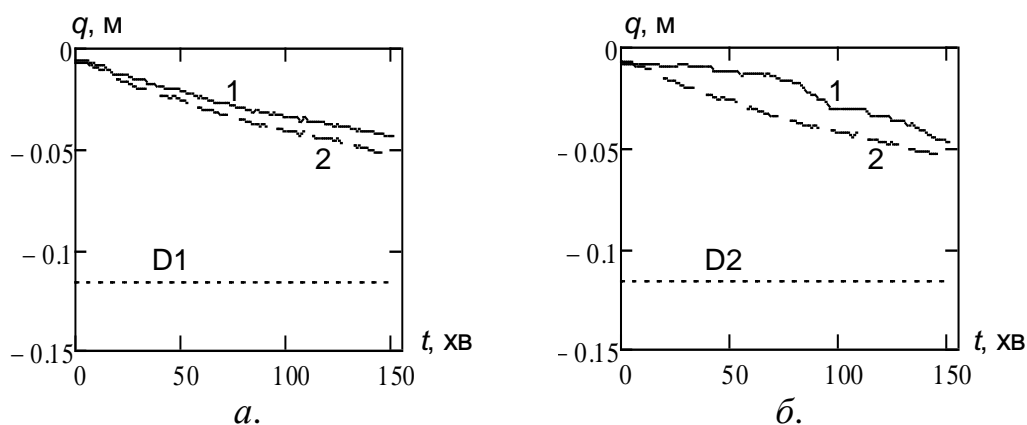


Рис. 4.21. Залежність середнього експериментального (1) та розрахункового (2) значень максимального прогину сталезалізобетонних плит із відхиленнями: *а* – зразків першого типу плити; *б* – зразків другого типу плити;

Аналізуючи графіки, подані на рис. 4.18 – рис. 4.21, можна побачити, що експериментальні значення та розрахункові значення відрізняються несуттєво і є близькими між собою. Попередньо можна сказати, що результати розрахунків правдоподібно описують процес випробувань сталі залізобетонних плит на вогнестійкість.

Для більш детального аналізу адекватності результатів в кожній контрольній точці стін-зразків був проведений розрахунок F-критерію за формулою [81, 121]:

$$F_c = \frac{S_{ad}^2}{S_{cp}^2} \leq F(v_1, v_2, \alpha), \quad (4.2)$$

де  $S_{ad}^2$  - дисперсія адекватності,

$S_{cp}^2$  - дисперсія відтворюваності експериментальних даних, що визначається за формулою (4.1),

$v_1 = d$  – число ступенів вільності чисельника,

$v_2 = n - 1$  – число ступенів вільності знаменника.

$\alpha = 0.05$  – рівень значущості.

Тут  $n$  – кількість вимірювання в одному експерименті,

$d$  – кількість експериментів.

Дисперсія адекватності визначається за формулою:

$$S_{ad}^2 = \frac{d}{n-1} \sum_{k=1}^n \left[ \frac{\bar{y}_k^e - y_k}{\min(|\bar{y}_k^e|, |y_k|)} \right]^2, \quad (4.3)$$

де  $\bar{y}_k^e$  - середнє значення вимірюваної величини за вибіркою,

$y_k$  – поточне розрахункове значення.

Як окрема експериментальна ситуація розглянуто випробування одного із зразків-близнюків стінових фрагментів. Результати розрахунку адекватності температурних розрахункових даних щодо обігрівної поверхні сталезалізобетонних плит наведені у табл. 4.6.

Таблиця 4.6

**Статистичні параметри, отримані при дослідженні адекватності результатів розрахунку температури необігрівної сторони у сталезалізобетонних плитах**

Число ступенів вільності чисельника, $\nu_1$	Число ступенів вільності знаменника, $\nu_2$	Кількість експериментів, $d$	Кількість вимірювань в експерименті, $n$	Дисперсія відтворюваності, $S_{\text{сп}}^2$	Дисперсія адекватності, $S_{\text{ад}}^2$	Розрахункове значення F-критерію.	Табличне значення F-критерію. [121].	Середнє відносне відхилення, %	Середньоквадратичне відхилення, °C
Сталезалізобетонні плити першого типу									
2	304	2	153	0,63	0.598	0,949	1,01	13,8	15,3
Сталезалізобетонні плити другого типу									
2	304	2	153	1,01	0.958	0,954	1,01	11,5	14,5

Результати розрахунку адекватності розрахункових даних щодо максимального прогину під час випробувань сталезалізобетонних плит наведені у табл. 4.7.

Висновок про адекватність робився на основі розрахункового значення з табличним при рівні значущості 0,05.

Дані табл. 4.6 та табл. 4.7 показують, що результати, отримані за розрахунковими методиками з використанням МКЕ є адекватними, оскільки значення критерію Фішера в обох випадках не перевищує табличного значення.

Таким чином, дослідження адекватності результатів розрахунку, що проведена за запропонованими нами алгоритмами з використанням метода

кінцевих елементів, показали, що статистичні критерії, вибрані нами, задовольняються. Це показує адекватність отриманих результатів розрахунку.

Таблиця 4.7

**Статистичні параметри, отримані при дослідженні адекватності результатів розрахунку максимального прогину сталезалізобетонних плит**

Число ступенів вільності чисельника, $\nu_1$	Число ступенів вільності знаменника, $\nu_2$	Кількість експериментів, $d$	Кількість вимірювань в експерименті, $n$	Дисперсія відтворюваності, $S_{\text{сп}}^2$	Дисперсія адекватності, $S_{\text{ад}}^2$	Розрахункове значення F-критерію.	Табличне значення F-критерію. [121].	Середнє відносне відхилення, %	Середньоквадратичне відхилення, мм
Сталезалізобетонні плити першого типу									
2	304	2	153	0.254	0.185	0,73	1,01	7,3	2,8
Сталезалізобетонні плити другого типу									
2	304	2	153	0,457	0.37	0,81	1,01	10,9	3,4

Отримані результати можна використовувати для проведення аналізу міцності сталезалізобетонних плит, підданих випробуванням на вогнестійкість, у якості початкових даних.

З огляду на проведені дослідження можна зробити такі висновки:

- обчислені статистичні параметри результатів вогневих випробувань, які показали допустиму відтворюваність експериментальних даних і відповідність умов експерименту вимогам діючих стандартів;
- результати експерименту показали, що випробувані сталезалізобетонні плити має межу вогнестійкості більшу за 150 хв;
- використовуючи дані експерименту, був виконаний аналіз статистичних характеристик якості експериментальних даних в ході якого доведено, що

експериментальні дані мають високу достовірність, оскільки середні відносні відхилення не перевищують 14 %;

- була проведена оцінка адекватності результатів розрахункових даних за критерієм Фішера, яка показала що отримані результати є адекватними, оскільки в жодному з випадків розрахований критерій Фішера не перевищив табличного значення;
- в результаті аналізу ефективності розрахункового методу на основі МКЕ за надійністю алгоритму, адекватністю результатів, наближеністю розподілів температур до теоретичних уявлень, а також гладкістю отриманих поверхонь температурних розподілень з'ясовано, що розроблений метод є ефективним і може бути використаний для визначення меж вогнестійкості за граничними станами втрати тепло ізолювальної та несучої здатностей.

## РОЗДІЛ 5

### ОБГРУНТУВАННЯ РОЗРАХУНКОВОГО МЕТОДУ ОЦІНКИ КЛАСУ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ НА ОСНОВІ ТАБЛИЦЬ

#### 5.1. Обґрунтування методики створення таблиць для оцінки класу вогнестійкості сталезалізобетонних плит

Табличний метод, що описаний у стандарті щодо [25] розрахунку сталезалізобетонних елементів будівельних конструкцій на вогнестійкість при використанні таблиць типу табл. 1.6 не містить відомостей про сталезалізобетонні плити із сталевим елементом усередині. Враховуючи високу вогнестійкість сталезалізобетонних плит такої конструкції, як це було показано у попередніх розділах даної роботи, для отримання інформації щодо вогнестійкості таких плит застосування методу вогневих випробувань не є ефективним. Для цього було запропоновано використання розрахункового методу на основі МКЕ. Ефективність цього методу та достатня його точність підтверджена результатами вогневих випробувань, як це показано у 4 розділі даної роботи.

Створення таблиць типу табл. 1.6 п. 1.3.2 даної роботи було запропоновано здійснювати за методикою, що розуміє виконання таких процедур.

1. Вибираються найбільш визначні параметри сталезалізобетонних плит, що впливають на їх вогнестійкість

2. Будується універсальні кінцево-елементні моделі для розв'язку теплотехнічної та міцнісної задач для сталезалізобетонної плити із змінними параметрами, які є визначними щодо впливу на клас вогнестійкості.

3. Створюється математична модель на основі прийнятої регресійної залежності.

4. Складається план повного факторного експерименту.

5. Проводиться повний факторний експеримент з використанням створених плану експерименту та кінцево-елементних моделей із змінним параметрами.



6. Визначаються коефіцієнти регресійної залежності та будується математична модель залежності межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит із сталевим елементом усередині від вибраних параметрів.

7. На основі побудованої математичної моделі складається таблиця типу табл. 1.6 п. 1.3.2 стосовно мінімальних проектних параметрів сталезалізобетонних плит із сталевим елементом у середині для забезпечення потрібного класу вогнестійкості.

**5.1.1. Побудування плану повного факторного експерименту.** Для побудування плану повного факторного експерименту були проаналізовані незалежні і найбільш впливові параметри, що позначаються на вогнестійкості сталезалізобетонної плити. При цьому встановлені три незалежних фактори – висота двотавра  $H$ , товщина захисного шару двотавру та арматурних стержнів  $w$ , а також коефіцієнт діючого навантаження по відношенню до руйнуючого навантаження  $k$ . У табл. 5.1 вказані інтервали параметрів в експерименті, що вибрані в якості факторів.

Таблиця 5.1

#### Інтервали варіювання факторів у чисельному експерименті

Висота двотавру, мм			Товщина захисного шару, мм			Коефіцієнт навантаження		
Найменше значення, $H_{-1}$	Середнє значення, $H_0$	Найбільше значення, $H_1$	Найменше значення, $w_{-1}$	Середнє значення, $w_0$	Найбільше значення, $w_1$	Найменше значення, $k_{-1}$	Середнє значення, $k_0$	Найбільше значення, $k_1$
100	200	300	10	30	50	0,3	0,5	0,7

В якості критерію настання граничного стану розглядалися втрата теплоізолювальної здатності та втрата несучої здатності. При цьому втрата теплоізолювальної здатності не залежить від навантаження та товщини захисного шару

сталезалізобетонної плити. Основним параметром від якого вона залежить є висота плити, що пов'язана із висотою двотавра. Від вибраних нами параметрів комплексно залежить тільки несуча здатність. Втрата цілісності нами не розглядається.

Аналіз графіків на рис. 2.35 показує, що межа вогнестійкості наростає за законом, що є близьким до лінійної залежності. Це дозволяє припустити, що регресійна залежність межі вогнестійкості за граничним станом втрати несучої здатності також буде лінійною.

Вибрані параметри є незалежними за їх природою.

Математична модель за зробленим нами припущенням відповідає лінійній залежності межі вогнестійкості за граничним станом втрати несучої здатності та факторами, яка має такий вигляд [135].

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1x_2x_3, \quad (5.1)$$

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

Для визначення коефіцієнтів регресії відповідно до формули (5.1) необхідно провести 8 чисельних експериментів за складеною для цього матриці планування, що записана у вигляді табл. 5.2.

Таблиця 5.2

**Типова матриця планування повного факторного експерименту для побудування математичної моделі**

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

Для проведення повного факторного експерименту були розроблені кінцево-елементні моделі для вирішення теплової та міцнісної задач. Дані схеми мають вигляд такий самий як і схеми, що були розроблені у розділі 2 даної роботи (див. рис. 2.6 та рис. 2.17). Геометричні параметри сталезалізобетонних плит та міцнісні характеристики арматурних стержнів та сталевих елементів наведені у табл. 5.3.

Таблиця 5.3

### Основні параметри сталезалізобетонних плит-зразків для випробувань

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Геометричні розміри <ul style="list-style-type: none"> <li>• ширина перерізу</li> <li>• висота перерізу</li> <li>• ширина захисного шару</li> <li>• довжина</li> </ul>	$s$ $h$ $w$ $l$	0,2 (див. табл. 5.1) 4,5	м
Тип бетону	Важкий на гранітному заповнювачі	Клас С 20/25 (В20)	
Густина бетону	$\rho_B$	2300	кг/м <sup>3</sup>
Водоцементне відношення	В/Ц	0,36	
Гранична вологість	$u$	< 3	%
Робоча арматура нижня: <ul style="list-style-type: none"> <li>• діаметр</li> <li>• клас міцності</li> </ul>	$d_1$	0,012 A240С	м
Робоча арматура верхня: <ul style="list-style-type: none"> <li>• діаметр</li> <li>• клас міцності</li> </ul>	$d_3$	0,01 A240С	
Каркасна арматура: <ul style="list-style-type: none"> <li>• діаметр</li> <li>• клас міцності</li> </ul>	$d_4$	0,008 A240С	м

Варіюючи параметри згідно із табл. 5.1 та табл. 5.2, і проводячи розрахунки за методикою розділу 2 даної роботи (див. рис. 2.18 та рис. 2.19), були отримані

межі вогнестійкості досліджуваних сталезалізобетонних плит. Отримані дані наведені у табл. 5.4.

Таблиця 5.4

**Межі вогнестійкості сталезалізобетонної плити, отримані в умовах повного факторного експерименту згідно із прийнятою матрицею планування**

Експериментальна ситуація	1	2	3	4	5	6	7	8
Межа вогнестійкості сталезалізобетонної плити для даної експериментальної ситуації, $y_i$ , хв	365	85	287	57	505	158	453	124

Використовуючи дані табл. 5.4 мають бути визначені коефіцієнти регресійної залежності (5.1) за формулами [135]:

$$\begin{aligned}
 b_0 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i ; b_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 y_i ; b_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_2 y_i ; \\
 b_3 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_3 y_i ; b_4 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_2 y_i ; \\
 b_5 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_3 y_i ; b_6 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_2 x_3 y_i ; b_7 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_2 x_3 y_i ,
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

де  $N = 8$  – кількість експериментальних ситуацій згідно із планом експерименту;

$x_i$  – значення параметру згідно із матрицею плану (див. табл. 5.2);

$y_i$  – значення межі вогнестійкості стале залізобетонної плити згідно із табл. 5.4.

Використовуючи формули (5.2), були визначені коефіцієнти регресії, які наведені у табл. 5.5.

Таблиця 5.5

**Коефіцієнти регресії для математичної моделі залежності межі вогнестійкості сталезалізобетонної плити від її конструктивних параметрів**

Коефіцієнт	$b_0$ ,	$b_1$ ,	$b_2$ ,	$b_3$ ,	$b_4$ ,	$b_5$ ,	$b_6$ ,	$b_7$
Значення	254.25	148.25	24	-55.75	8.5	-20.75	2.5	4

### 5.1.2. Результати розрахунку за створеною математичною моделлю.

Використовуючи побудовану регресійну залежність, були побудовані відповідні поверхні залежності межі вогнестійкості від геометричних параметрів сталезалізобетонної плити для різного значення діючого навантаження, які наведені на рис. 5.1.

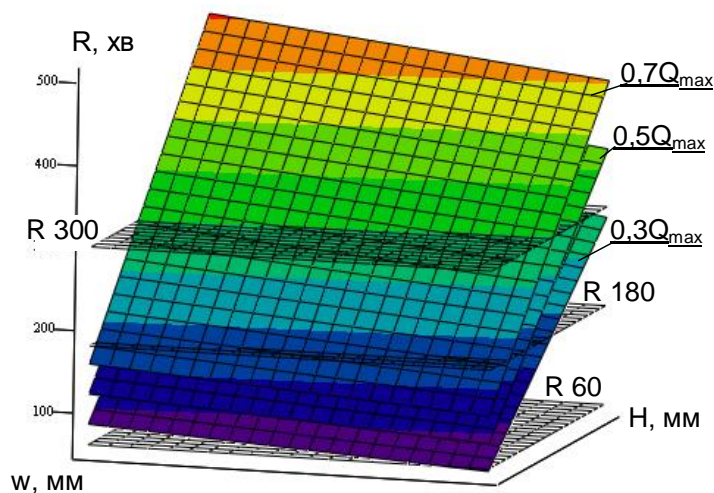


Рис. 5.1. Поверхні залежності межі вогнестійкості від геометричних параметрів сталезалізобетонної плити для різного значення діючого навантаження

Для аналізу впливу геометричних параметрів на межу вогнестійкості були побудовані взаємні залежності даних геометричних параметрів в умовах дії навантажень із різним рівнем. На рис. 5.2 наведені побудовані відповідні графіки.

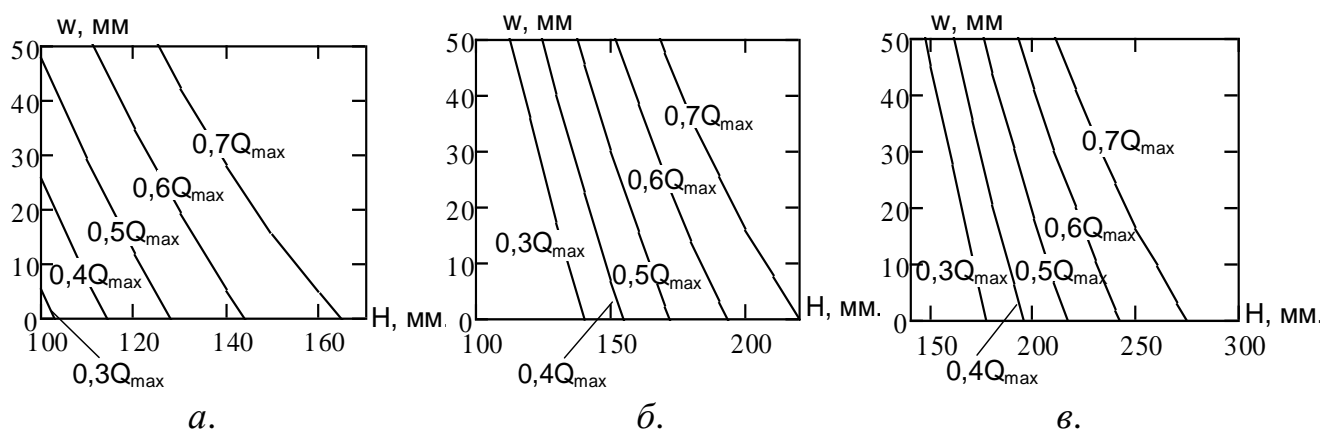


Рис. 5.2. Залежності захисного шару бетону від висоти двотаврового сталевго елемента сталезалізобетонної плити для забезпечення межі вогнестійкості: *a* –  $R 120$ ; *б* -  $R 180$ ; *в* -  $R 240$

Отримані дані дозволяють провести визначення мінімальних розмірів сталезалізобетонних плит для забезпечення необхідної вогнестійкості.

**5.1.3. Перевірка адекватності результатів.** Використовуючи дані щодо розрахунку для сталезалізобетонної плити другого типу (див рис. 3.7 та табл. 3.3) була визначена її межа вогнестійкості за настанням граничного стану втрати несучої здатності. В якості критеріїв адекватності результатів, визначених за регресійною моделлю розглянуті абсолютне та відносне відхилення.

Таблиця 5.6

**Адекватність результатів, визначених за регресійною залежністю для сталезалізобетонної плити другого типу з двотавром № 22**

Межа вогнестійкості за МКЕ, хв	Межа вогнестійкості за регресійною залежністю, хв	Абсолютне відхилення, хв	Відносне відхилення, %
Рівень навантаження $0,3Q_{max}$			
238	254	16	6,3
Рівень навантаження $0,5Q_{max}$			
303	310	7	2,3
Рівень навантаження $0,7Q_{max}$			
188	198,5	10,5	5,3
Середнє значення			
-	-	11,2	4,6

Дані табл. 5.6 показують, що похибка результатів, отриманих за регресійною моделлю є незначною і дана регресійна залежність може бути використана для обґрунтування конструктивних параметрів сталезалізобетонних плит для забезпечення необхідного класу їх вогнестійкості

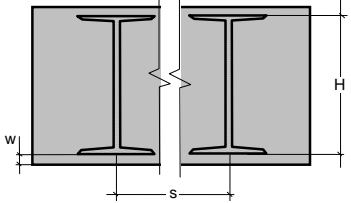
**5.2. Розробка удосконаленого табличного методу для оцінювання класу вогнестійкості сталезалізобетонних плит**

Використовуючи побудовані регресійні залежності було використано для створення таблиці мінімальних розмірів сталезалізобетонних плит для

забезпечення необхідної вогнестійкості. Для цього були визначені мінімальні розміри, що наведені у табл. 5.7.

Таблиця 5.7

**Розміри сталезалізобетонних плит  
для забезпечення заданого класу вогнестійкості**

		Умови застосування Плита висота $h \geq 120$ мм товщина з.ш. $w \leq 10$ мм відстань між двотаврами $s \leq 2$ м площа додаткової арматури/загальна площа між полицями $A_s/(A_c+A_s) \leq 5\%$		Стандартні межі вогнестійкості				
				REI 30	REI 60	REI 90	REI 120	REI 180
1	Мінімальні розміри перерізу для рівня навантаження $\eta_{fi,t} \leq 0,3$  Номер двотавра/товщина захисного шару (мм)	10/10	10/10	10/10 12/10 14/10	10/10 12/10 14/10	12/40 14/10 16/10		
	Мінімальні розміри перерізу для рівня навантаження $\eta_{fi,t} \leq 0,5$  Номер двотавра/товщина захисного шару (мм)	10/10	10/10	10/10 12/10 14/10	12/15 14/10 16/10	16/20 18/10 20/10		
	Мінімальні розміри перерізу для рівня навантаження $\eta_{fi,t} \leq 0,7$  Номер двотавра/товщина захисного шару (мм)	10/10	10/15 12/10	12/25 14/10 16/10	14/30 16/10 18/10	18/40 20/20 22/10		

Отримання даних, які наведені у табл. 5.7, можна прийти до висновку, що розроблений удосконалений табличний метод, що дозволяє ефективно визначити проектні дані сталезалізобетонних плит для забезпечення необхідного класу вогнестійкості. Дані табл. 5.7. визначені з врахуванням похибки 14 % при збільшенні мінімальних розмірів. Таким чином табличні дозволяють спроектувати

стале залізобетонні плити з гарантованим класом вогнестійкості, що вказаний у табл. 5.7. Розрахунки на втрату тепло ізолювальної здатності показали, що втрата несучої здатності настає скоріше. Це дозволяє доповнити другу частину Eurocode 4 додатковими даними для проектування сталезалізобетонних плит із сталевими двотаврами усередині із гарантованою вогнестійкістю.

З огляду на проведені дослідження можна зробити такі висновки:

- проведений повний факторний експеримент з використанням методу кінцевих елементів на основі чого встановлені закономірності і побудована математична модель зміни межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит із сталевим двотавром усередині від його номеру згідно із стандартним сортаментом, величини захисного шару та рівня навантаження;
- доведено, що побудована математична модель дозволяє отримувати адекватні результати, оскільки їх середня похибка складає 4,6 %
- обґрунтований розрахунковий табличний метод оцінки класу вогнестійкості сталезалізобетонних плит із сталевим двотавром усередині на основі побудованої математичної моделі;
- показано, що удосконалений табличний метод оцінки класу вогнестійкості сталезалізобетонних плит із сталевим двотавром усередині є ефективним має більш низьку трудомісткість ніж інші розрахункові методи.



## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, яка є завершеним науковим дослідженням, наведено розв'язання актуальної наукової задачі розкриття закономірностей залежності межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками від їх геометричних характеристик та діючого механічного навантаження в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі як наукового підґрунтя удосконалення табличного методу оцінювання класу вогнестійкості зазначених будівельних конструкцій. При цьому одержано такі основні наукові та практичні результати.

1. За результатами проведеного аналізу літературних джерел щодо сучасного стану забезпечення і методів оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит висунуто ідею що забезпечення нормованої вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками може бути досягнуто шляхом застосування удосконаленого розрахункового методу оцінювання класу їх вогнестійкості на підставі розроблених довідникових таблиць з переліком необхідних параметрів, визначених за результатами моделювання з використанням методу кінцевих елементів.

2. Розроблено методику і проведено математичне моделювання поведінки сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками за впливу стандартного температурного режиму пожежі.

3. Розроблено методику і проведено експериментальні дослідження поведінки сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками за впливу стандартного температурного режиму пожежі.

4. Шляхом порівняння результатів математичного моделювання процесів деформації, руйнування з втратою вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками з даними експериментальних досліджень показано, що отримані результати математичного моделювання є адекватними, оскільки середня відносна похибка визначення температури не

перевищує 13,8 %, середня відносна похибка визначення максимального прогину не перевищує 10,9 %, а критерій Фішера не перевищує табличного значення при рівні значущості 0.05.

5. Виявлена залежність межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками від їх геометричних параметрів, товщини захисного шару і механічного навантаження, а також побудована відповідна математична модель на основі проведеного повного факторного експерименту, яка виражається регресійною залежністю  $y = 254.25 + 148.25x_1 + 24x_2 - 55.75x_3 + 8.5x_1x_2 - 20.75x_1x_3 + 2.5x_2x_3 + 4x_1x_2x_3$ .

6. Доведено, що результати, отримані за побудованою регресійною залежністю є адекватними, оскільки їх середня похибка є не вищою за 4,6 %.

7. З використанням отриманої математичної моделі створено довідникову таблицю для визначення класу вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками.

8. Розроблено удосконалений табличний метод оцінювання класу вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками, який має більш низьку трудомісткість ніж інші розрахункові методи.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Аналіз методів проектування кам'яних конструкцій та їх вплив на розвиток пожежі / А. П. Половко[та ін. ]// Пожежна безпека : зб. наук.пр. – Л., 2010. – № 17 – С. 132-137
2. Травматизм на виробництві в Україні: національний профіль протягом 2009-2013 років // Інформаційно-аналітична профспілкова доповідь
3. Стороженко Л.І. Досвід будівництва будівель та споруд зі сталезалізобетонними конструкціями / Л.І. Стороженко, О.В. Семко, О.В. Нижник та ін. // Буд. конструкції: Міжвідом. наук.-техн. зб. / НДІБК.– К.: НДІБК, 2006. – Вип. 65. – С. 3–6.
4. Клименко Ф.Є. Металеві конструкції / Ф.Є. Клименко, В.М. Барабаш, Л.І. Стороженко. – Львів: Вид-во «Світ», 2002. – 311 с.
5. Стороженко Л.И. Изгибаемые трубобетонные конструкции / Л.И. Стороженко, В.И. Ефименко, П.И. Плахотный. – К.: Будівельник, 1994. – 104 с.
6. Стороженко Л.І. Сталезалізобетонні конструкції: Навч. посібник / Л.І. Стороженко, О.В. Семко, В.Ф. Пенц. – Полтава: ПолНТУ ім.. Ю. Кондратюка, 2005. – 181 с.
7. Стороженко Л.І. Сталезалізобетонні структурні конструкції / Л.І. Стороженко, В.М. Тимошенко, О.В. Нижник. – Полтава: Гадяч, 2006. – 144 с.
8. Стороженко Л.І. Сталезалізобетонні часторебристі перекриття / Л.І. Стороженко, О.В. Нижник, О.А. Крупченко. – Полтава: «АСМІ», 2008. – 164 с.
9. Стороженко Л.І. Дослідження і проектування сталезалізобетонних структурних конструкцій / Л.І. Стороженко, В.М. Тимошенко, О.В. Нижник та ін. – Полтава: «АСМІ», 2008. – 262 с.
10. Стороженко Л.І. Залізобетонні конструкції в незнімній опалубці / Л.І. Стороженко, О.І. Лапенко. – Полтава: «АСМІ», 2008. – 312 с.
11. Іванюк А.В. Експериментальні дослідження таврових сталезалізобетонних балок з армуванням листами / А. В. Іванюк // Збірник наукових праць. Сер.: Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава:

ПолтНТУ, 2010. – Вип. 2 (27). – С. 95–100.

12.Стороженко Л.І. Дослідження сталезалізобетонних балок з армуванням трубами за допомогою методу скінченних елементів / Л.І. Стороженко, Т.П. Куч // Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. – Полтава, 2011. – Випуск 2 (30). – С. 53–57.

13.Монолитные перекрытия зданий и сооружений / И.В. Санников, В.А. Величко, С.В. Сломонов, Г.Е. Бимбад, М.Г. Томильцев. – К.: Будівельник, 1991. – 152 с.

14.Голоднов К.А. Жесткость сталежелезобетонных изгибаемых элементов реконструируемых зданий и сооружений / К.О. Голоднов // Вісн. Донбас. держ. академії будівництва і архітектури: Зб. наук. праць: Будівельні конструкції, будівлі та споруди – Баштові споруди: матеріали, конструкції, технології. – Макіївка: ДонДАБА, 2005. – Вип. 2005–8 (56). – С. 65–69..

15.Голоднов К.А. Деформируемость сталежелезобетонных балок при различных нагрузениях // Дороги і мости: Зб. наук. праць / ДДНДІ ім. М.П. Шульгіна. – К.: ДДНДІ ім. М.П. Шульгіна, 2007. – Вип. 7. — Том I. - С. 104–110.

16.Голоднов К.А. Экспериментальное обоснование метода расчета сталежелезобетонных балок при повторных и знакопеременных режимах нагружения / К.О. Голоднов, А.М. Бамбура / Зб. наук. праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Вид-во ЛНАУ, 2007. – № 71 (94). – С. 70–75.

17.Голоднов К.А. Экспериментальные исследования сталежелезо-бетонных балок при повторных и знакопеременных нагружениях / К.О. Голоднов, А.М. Бамбура / Буд. конструкції: Міжвідом. наук.–техн. зб. / НДІБК. – К.: НДІБК, 2007. – Вип. 67. – С. 134–147.

18.Голоднов К.А. Методика и результаты экспериментальных исследований сталежелезобетонных балок при длительном знакопеременном нагружении / К.А. Голоднов, А.Н. Бамбура // Вестник БрГТУ: Серия "Строительство и архитектура". – 2014. – №1(85). – С. 89–92.

19.Металлические конструкции. Общий курс: Учебник для ВУЗов / Е.И.

Беленя, В.А. Балдин, Г.С. Веденников и др./ Под общ. ред. Е.И. Белени. – 6 изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1985. – 560 с.

20.Голоднов К.А. Напряженно-деформированное состояние сталежелезобетонных балок при знакопеременном нагружении // Наук. вісн. будівництва / ХДТУБА, ХОТВ АБУ. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2005. – Вип. 33. – С. 94–97.

21.Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва. ДБН В.1.1-7-2002 [Чинний від 2003-05-01.]. – К.: Видавництво “Лібра”, 2003. – 87 с – (Національний стандарт України).

22. Мосалков И.Л. Огнестойкость строительных конструкций / Мосалков И.Л., Плюснина Г.Ф., Фролов А.Ю. – М.: ЗАО «СПЕЦТЕХНИКА», 2001. – 496 с.

23. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий / Ройтман В.М.– М.: Ассоциация «Пожарная безопасность и наука». 2001. – 382 с.

24. Бартелеми Б. Огнестойкость строительных конструкций / Бартелеми Б., Крюппа Ж. – М.: Стройиздат, 1985. – 216 с.

25.Рекомендации по расчету пределов огнестойкости бетонных и железобетонных конструкций : [пособие к СнИП II-2-80 / зав. ред. Бальян Л.Г. и др.] – М.: НИИЖБ, 1986. – 40 с.

26.Рекомендации по обследованию зданий и сооружений, поврежденных пожаром : – М.: Стройиздат, 1987. – 80 с.

27.Огнестойкость зданий / Бушев В.П., Пчелинцев В.А., Федоренко В.С., Яковлев А.И. / Под общ. ред. В.А. Пчелинцева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1970. – 262 с.

28.Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1988. – 144 с.

29.Милованов А.Ф. Расчет жаростойких железобетонных конструкций / Милованов А.Ф. –М.: Стройиздат, 1975. – 128 с.

30.Милованов А.Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций / Милованов А.Ф. – М.: Стройиздат, 1986. – 224 с.

31. Милованов А.Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре / Милованов А.Ф. – М.: Стройиздат, 1998. – 304 с.
32. Милованов А.Ф. Огнесохранность железобетонных конструкций после пожара / Милованов А.Ф. – М.: Стройиздат, 2005. – 120 с.
33. Соломин В.М. Высокотемпературная устойчивость материалов и элементов конструкций / Соломин В.М. – М.: Машиностроение, 1980. – 128 с.
34. Ильин Н.А. Техническая экспертиза зданий, поврежденных пожаром / Ильин Н.А. – М.: Стройиздат, 1983. – 200 с.
35. Ильин Н.А. Последствия огневого воздействия на железобетонные конструкции / Ильин Н.А. – М.: Стройиздат, 1979. – 128 с.
36. Яковлев А.И. Огнестойкость железобетонных конструкций / Яковлев А.И. // Пожарная профилактика и тушение пожаров : [информац. сб. ВНИИПО]. – М.: Стройиздат, 1970. – № 6. – С. 18–26.
37. Зенков Н.И. Строительные материалы и поведение их в условиях пожара [учебн. для слуш-лей вузов] / Зенков Н.И. – М.: ВИПТШ, 1974. – 176 с.
38. Fischer R. Uber Verhalten von Entmortel und beton bei hoheren temperaturen. Berlin, 1970, Deutscher Ausschuss fur Stahlbeton. – P. 214.
39. Fischer R., Welgler H. Beton bei temperaturen von 100 bis 750 °C, Darmstadt, 1967. – P. 283.
40. Lea F.C. Comportement du beton entre 80 et 300 °C, 1976, № 18. – P. 136.
41. Gerhardt H. Design Method of Smoke and Heat exhaust Systems in construction Works. – Materiały V Międzynarodowy Konferencji “Bezpieczeństwo pożarowe budowli. – 2005. – С. 127–140.
42. Kowalski R., Górska B. Badanie zmian strukturalnych betonu narażonego na działanie wysokich temperatur. Materiały V Międzynarodowy Konferencji “Bezpieczeństwo pożarowe budowli. – 2005. – С. 315–322.
43. Lie T.T. Characteristic temperature curves for various fire severities. "Fire Tachnol", 1974, 10, № 4. – P. 315–326.

- 44.Lie T.T. A Procedure to Calculate Fire Resistance of Structural Members. International Seminar on Three Decades of Structural Fire Safety, 22/23, February 1983/pp.139-153.
- 45.Sundstrom B. Test Methods and Their use for Fire Safety Engineering. – Materiały V Międzynarodowy Konferencji “Bezpieczeństwo pożarowe budowli. – 2005. – С. 141–150.
- 46.Harmathy T.Z. Fire resistance versus flame spread resistance. – Fire Technol., 1976, v. 12, N 4. – P. 290–302.
47. K. Oden. – Fire resistance of glued, laminated timber structures. Fires. Res. Org. Simp. n°3. Paper n° 2. H.M. Stationery Offise. London England pp. 7–15, 1970.
- 48.Яковлев А.И. Расчетная оценка поведения железобетонных колонн при режимах пожара, отличных от «стандартного»/ Яковлев А.И., Григорян Б.Б. // Тепло- и массообмен в технологических процессах производства и при пожарах : [сб. науч. тр.] – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1983. – С. 147–153.
- 49.Стрельчук Н.А. Взрывобезопасность и огнестойкость в строительстве / Стрельчук Н.А. – М.: Стройиздат, 1970. – 128 с.
50. Ройтман М.Я. Противопожарное нормирование в строительстве : [2-е изд., перераб. и доп.] / Ройтман М.Я. – М.: Стройиздат, 1985. – 596 с.
- 51.Романенков И.Г. Огнестойкость строительных конструкций из эффективных материалов / Романенков И.Г., Зигерн-Корн В.Н. -М.: Стройиздат, 1984. – 240 с.
- 52.Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва. ДБН В.1.1-7-2002 [Чинний від 2003-05-01.]. – К.: Видавництво “Лібра”, 2003. – 87 с – (Національний стандарт України).
- 53.Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. Пожежна безпека. (ISO 834: 1975) ДСТУ Б В.1.1-4-98. [Чинний від 1998-10-28.] – К.: Укрархбудінформ, 2005. – 20 с – (Національний стандарт України).
- 54.ДСТУ Б В.1.1-13-98. Захист від пожежі. Балки. Метод випробування на вогнестійкість. [Чинний від 2005-06-15.] – К.: Укрархбудінформ, 2005. – 12 с – (Національний стандарт України).

55. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. (ISO 834: 1975) ГОСТ 30247.0-94. [Введен в действие 1996-01-01] – М.: Стройиздат, 2003. – 7с. – (Национальный стандарт РФ)

56. ISO 834-75 Fire resistance test. Elements of building constructions. European Committee for Standardization, Brussels, 2000.

57. EN 13501-1:2002 “Fire classification of construction products and building elements” – Part 1.2. European Committee for Standardization, Brussels, 2002.

58. EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-2: General rules - Structural fire design, Brussels, 2004.

59. Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций. СТО 36554501-006-2006 – [Введен в действие 1996-01-01] – М.: Стройиздат, 2006. – 77 с. – (Национальный стандарт РФ).

60. Методические рекомендации по расчету огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций. МДС 21.2 -2000 [Введен в действие 2000-01-01] – М.: Стройиздат, 2000. – 49 с. – (Национальный стандарт РФ).

61. Круковский П.Г. Обратные задачи тепломассопереноса (Общий инженерный подход) / Круковский П.Г. – К.: НАНУ Институт технической теплофизики, 1998. – 224 с.

62. Грасник А. Предупреждение дефектов в строительстве. Защита материалов и конструкций / Грасник А., Грюн Э., Фикс В., Хольцапфель В., Ротер Х.; Пер. с англ. В.П. Самойлова – 1981. – 184 с.

63. Страхов В.Л. Оптимальное проектирование огнестойких строительных конструкций. / Моделирование пожаров и взрывов [под ред. Н.Н. Брушлинского и А.Я. Корольченко]. – М.: Пожнаука, 2000. – С. 365 – 442.

64. Кричевский А.П. Расчет железобетонных инженерных сооружений на температурные воздействия / Кричевский А.П. – М.: Стройиздат, 1984. – 148 с.

65. Яковлев А.И. Пожарная профилактика / Яковлев А.И., Сорокин А.Н. – М.: ВНИПО. – 1979. – Вып. 7. – С. 37–41.



66.Яковлев А.И. Огнестойкость одноэтажных производственных зданий в зависимости от пожарной нагрузки / Яковлев А.И., Стороженко Т.Е. // Промышленное строительство. – 1979. № 9. - С. 37-39.

67.Яковлев А.И. Расчет предела огнестойкости сжатых армосиликатобетонных конструкций с учетом деформативности нагретого бетона на основе использования ЭВМ. / Яковлев А.И., Апостолов А.Т. // Огнестойкость строительных конструкций. – Вып. 2. – 1974. – С. 3–24.

68.Фомин С.Л. Огнестойкость центрально сжатых железобетонных элементов / Фомин С.Л., Стельмах О.А., Джафар Шакер Шахин // Пожарная безопасность: Организационно техническое обеспечение – Х.: ХИПБ МВД Украины, 1996. – С. 78–81.

69.Фомин С.Л. Робота залізобетонних конструкцій при впливі кліматичного, технологічного і пожежного середовища: автореф. дис-ї на здоб. наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 21.06.02 «Пожежна безпека». / С.Л. Фомін. – Харків, 1997. – 38 с.

70.Фомин С.Л. Моделирование тепло- и влагопереноса в железобетонных конструкциях при воздействии климатической, технологической и пожарной сред / Фомин С.Л. // Электронное моделирование. – 1999. – Т.21. – № 4. – С. 28–32.

71.Фомин С.Л. Полная диаграмма “ $\sigma$ - $\epsilon$ ” бетона и арматуры при нагреве / Фомин С.Л. // Коммунальное хозяйство городов. Республик. [межведомственный науч.-техн. сб.] – К.: Техніка, 1997. – Вып. 8. – С. 27–29.

72.Фомин С.Л. Огнестойкость и остаточная прочность железобетонных конструкций / Фомин С.Л. // Материалы первой всеукраинской научно-технической конференции «Научно-практические проблемы современного железобетона». – К.: 1996. – С. 183–185.

73.Фомин С.Л. Диаграмма состояния арматуры для расчета железобетонных конструкций при нормальных и высоких температурах / Фомин С.Л. // Будівельні конструкції : [міжвідомч. наук.-техн. збірник] — К.: НДІБК, 2005. – Т. 1 – С. 372–379.

74. Фомин С.Л. Огнестойкость многоэтажных каркасных зданий/ Фомин С.Л. // Будівельні конструкції : [міжвідомч. наук.-техн. збірник] – К.: НДІБК, 2005. – Т. 2 – С. 310–315.

75. Фомин С.Л. Расчет железобетонных конструкций на температурно-влажностные воздействия технологической и климатической среды : [учеб. пособие] / Фомин С.Л. – К.: УМК ВО, 1992. – 164 с.

76. Григорян Б.Б. Огнестойкость сжатых железобетонных элементов при температурных режимах близких к реальным: дис. ... кандидата техн. наук : 05.23.01 / Борис Бахшиевич Григорян. – Х., 2001. – 168 с.

77. Измаилов А.С. Оценка поведения железобетонных колонн при температурных режимах пожара, учитывающих стадию затухания / Измаилов А.С., Демехин В.Н., Григорян Б.Б. // Горючесть материалов и обнаружение пожаров. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1986. – С. 33–46.

78. Касперов Г.И. Нормативная база по определению огнестойкости железобетонных конструкций / Касперов Г.И., Полевода И.И. // Сб. мат-лов междунар. науч.-практ. конф-и «Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация». – Минск: КИИ, 2001. – С. 38–39.

79. Гейтвуд Б.Н. Температурные напряжения / Гейтвуд Б.Н.; пер. с англ. В.Р. Аконова. – М.: Машгиз 1959. – 268 с.

80. Поздеев С.В. Развитие научных основ определения пределов огнестойкости несущих железобетонных конструкций: дис. ... докт. техн. наук : 21.06.02 / Поздеев Сергей Валерьевич. – Черкассы, 2012. – 360 с.

81. Поздеев С.В. Математическое моделирование поведения железобетонной балки во время пожара при помощи метода конечных элементов / Поздеев С.В., Тищенко И.Ю. // Пожаровзрывобезопасность. Научно-технический журнал. – ООО «Издательство «Пожнаука», 2010 – Том 19 – №1. – С. 20-27.

82. Поздеев С.В. Дослідження ефективності математичних моделей теплопередачі для розв'язку теплотехнічної задачі при визначенні вогнестійкості залізобетонних конструкцій / Поздеев С.В., Тищенко О.М. // Черкаси: Збірник

наукових праць. Пожежна безпека: теорія і практика. Академія пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля. – Випуск № 5. – 2010. – С. 122-129.

83. Поздеев С.В. Дослідження ефективності математичних моделей напружено-деформованого стану при визначенні вогнестійкості залізобетонних плит. / Поздеев С.В. // Черкаси: Збірник наукових праць. Пожежна безпека: теорія і практика. Академія пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля. – Випуск № 6. – 2010. – С. 125-133.

84. Поздеев С.В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния железобетонной балки при пожаре. / Поздеев С.В. // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: НУГЗУ. – Вып. 27. – 2010. – С. 163–174.

85. Поздеев С.В. Экспериментально-расчетный метод определения механических характеристик бетона в условиях нагрева. / Поздеев С.В. // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: НУГЗУ.–Вып. 28.– 2010. – С. 133–140.

86. Поздеев С.В. Исследование эффективности расчетных методов для определения предела огнестойкости преднапряженной ребристой железобетонной плиты. / Поздеев С.В. // Науковий вісник Українського науково-дослідного інституту пожежної безпеки. –К.: УкрНДІПБ, 2010. – № 2 (24). – С.5 – 11.

87. Поздеев С.В. Дослідження ефективності вогнезахисної обробки залізобетонних балок покриттями, що спучуються. / Поздеев С.В. // Вісник житомирського державного технологічного університету. – Житомир: ЖДТУ, 2010. - №3(54). – С.12 – 16.

88. Поздеев С.В. Дослідження ефективності математичних моделей напружено-деформованого стану при визначенні вогнестійкості залізобетонних балок. / Поздеев С.В. // Пожежна безпека : [зб. наук. праць]. – Л.: ЛДУБЖД. – № 17. – 2010. – С. 115–122.

89. Поздеев С.В. Дослідження адекватності результатів математичного моделювання тепломасообміну у вогневій печі при випробуваннях залізобетонної плити на вогнестійкість. / Поздеев С.В. // Черкаси: Збірник наукових праць. Пожежна безпека: теорія і практика. Академія пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля. – Випуск № 6/1. – 2010. – С. 60 – 65.

90. Поздеев С.В. Розробка уточненого розрахункового методу для визначення межі вогнестійкості несучих залізобетонних конструкцій. / Поздеев С.В., Левченко А.Д. // Науковий вісник національного технічного університету «Львівська політехніка». – Львів: НТУ «Львівська політехніка». – 2011. – С. 264 - 269

91. Поздеев С.В. Определение предела огнестойкости преднапряженной ребристой железобетонной плиты уточненным расчетным методом. / Поздеев С.В. // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – Минск.: КИИ МЧС Республики Беларусь. – № 1(13). – 2011. – С. 53–60.

92.Ройтман В.М. Решение теплотехнической задачи огнестойкости конструкций с учетом процессов влагопереноса на ЭВМ по неявной конечно-разностной схеме / Ройтман. В.М., Зырина Г.Н. // Огнестойкость строительных конструкций : [сб. тр. ВНИИПО МВД СССР]..– М.: ВНИИПО, 1974. – Вып. 2. – С. 58–71.

93.Ройтман В.М. Возможности прогнозирования и регулирования огнестойкости строительных материалов и конструкций на основе кинетического подхода / Ройтман В.М. // Пути повышения огнестойкости строительных материалов и конструкций. – М.: Знание, 1982. – С. 63–67.

94.Кошмаров Ю.А. Новые методы расчета огнестойкости и огнезащиты современных зданий и сооружений / Кошмаров Ю.А. // Пожарная безопасность. – М.: ВНИИПО, 2002. – № 2. – С. 91–98.

95.Страхов В.Л. Пути повышения эффективности огнезащиты строительных конструкций и воздуховодов / Страхов В.Л., Мельников А.С., Рудаков А.П., Смирнов Н.В. // Пожарная безопасность. – М.: ВНИИПО, 2004. – № 3. – С. 64-68.

96. Давыдкин Н.Ф. Оценка огнестойкости зданий и сооружений на основе компьютерного моделирования / Давыдкин Н.Ф., Каледин В.О., Страхов В.Л. // Математическое моделирование. – 2000. – С. 27–32.

97. Мацевитый Ю.М. Обратные задачи теплопроводности : [в 2-х т.] / Мацевитый Ю.М. – Т. 1 : Методология. – К.: Наукова думка, 2002. – 408 с.

98. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем / Самарский А.А. – М.: Наука, 1971. – 554 с.
99. Самарский А.А. Вычислительная теплопередача / Самарский А.А., Вабищевич П.Н. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.
100. Власова Е.А. Приближенные методы математической физики : [учебн. для вузов / под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко] / Власова Е.А., Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н. – М.: МГТУ им. Баумана, 2001. – 700 с.
101. Огнестойкость зданий / Бушев В.П., Пчелинцев В.А., Федоренко В.С., Яковлев А.И. / Под общ. ред. В.А. Пчелинцева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1970. – 262 с.
102. Жакин И.А. Несущая способность сталебетонных колонн при силовых и интенсивных температурных воздействиях: дис. ... кандидата техн. наук : 05.23.01 / Жакин Иван Анатольевич. - Х., 2004. – 194 с.
103. Поздеев С.В. Удосконалення експериментально-розрахункової методики визначення залишкової несучої здатності залізобетонних колон після пожежі / Поздеев С.В., Григорян Б.Б., Поздеев А.В. // Системи обробки інформації : [збірник наукових праць]. – Х.: ХУПС, 2005. – Випуск 7(47). – С. 133 – 143.
104. Поздеев С.В. Методика определения режимов нагрева бетонных образцов, моделирующих состояние элементов строительных конструкций при пожаре / Поздеев С.В., Некора О.В., Поздеев А.В. // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: АГЗУ. – Вып. 19. – 2006. – С. 111–116.
105. Поздеев С.В. Обґрунтування вибору режимів нагріву зразків для експериментально-розрахункового методу визначення вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій / Поздеев С.В., Некора О.В., Поздеев А.В. // Пожежна безпека : [зб. наук. праць]. – Л.: ЛДУБЖД. – № 9. – 2006. – С. 125–132.
106. Поздеев С.В. Обоснование методики расчета температурных режимов прогрева камеры печи при комбинированных испытаниях бетонных образцов / Поздеев С.В., Григорян Б.Б., Некора О.В., Поздеев А.В. // Науковий вісник Українського науково-дослідного інституту пожежної безпеки. –К.: УкрНДІПБ, 2006. – № 2 (14). – С.140–147.

107. Поздеев С.В. Обоснование экспериментально-расчетной методики определения несущей способности железобетонной колонны при пожаре / Поздеев С.В., Некора О.В., Поздеев А.В. // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: УГЗУ. – Вып. 21. – 2007. – С. 201–207.
108. Некора О.В. Определение несущей способности железобетонной колонны при пожаре расчетно-экспериментальным методом / Некора О.В. // Вісник ЧДТУ. – Черкаси: ЧДТУ, 2006. – № 4. – С. 15–20.
109. Некора О.В. Расчетно-экспериментальный метод определения огнестойкости сжатых элементов железобетонных строительных конструкций: дис. ... кандидата техн. наук : 21.06.02 / Некора Ольга Валерьевна. – Черкассы, 2008. – 147 с.
110. Бек Дж. Некорректные обратные задачи теплопроводности / Бек Дж., Блакуэлл Б., Сент-Клер Ч. ; пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 319 с.
111. Алифанов А.М. Обратные задачи теплообмена / Алифанов А.М. – М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.
112. Поршнева С.В. Численные методы на базе Mathcad / Поршнева С.В., Беленкова И.В. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 464 с.
113. Дьяконов В.П. MATHCAD 8/2000 : [спец. справочник.] / Дьяконов В.П. – СПб: Питер, 2000. – 592 с.
114. Очков В.Ф. Mathcad 7 Pro для студентов и инженеров / Очков В.Ф. – М.: Компьютер Press, 1988. – 128 с.
115. Макаров Е.Г. Инженерные расчеты в Mathcad : [учебн. курс] / Макаров Е.Г. – СПб: Питер, 2003. – 448 с.
116. Соппротивление материалов / [Писаренко Г.С., Агарев В.А., Квитка А.Л. и др.] ; под ред. Г.С. Писаренко. – [5-е изд., перераб. и доп.] – К.: Вища школа, 1986. – 775 с.
117. Бахвалов Н.С. Численные методы / Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. – М.: Высшая школа, 1991. – 630 с.

118. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона / Карпенко Н.И. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.

119. Клованич С.Ф. Метод конечных элементов в механике железобетона : [монография] / Клованич С.Ф., Мироненко И.Н. – Одесса: ОНМУ, 2007. – 110 с.

120. Перельмутер А.В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / Перельмутер А.В., Сливкер В.И. – К.: Изд-во «Сталь», 2002. – 600 с.

121. Бамбура А.Н. Развитие методов оценки напряженно-деформированного состояния и несущей способности железобетонных конструкций на основе реальных диаграмм деформирования материалов / Бамбура А.Н. // Материалы первой всеукраинской научно-технической конференции «Научно практические проблемы современного железобетона». – К., 1996. – С. 36 – 39.

122. Григорян Б.Б. Расчет огнестойкости сжатых железобетонных колонн со случайным эксцентриситетом при заданном режиме пожара / Григорян Б.Б. // Науковий вісник будівництва. – Х.: ХДТУБА, 2000. – Вип. 10. – С. 211 – 216.

123. Григорян Б.Б. Нормирование требуемых пределов огнестойкости сжатых железобетонных колонн при реальном режиме пожара на экспериментальной основе / Григорян Б.Б. // Республиканский межведомственный научно-технический сборник «Коммунальное хозяйство городов». – К.: Изд-во «Техника», 2000. – Вып. 8 – С. 27 – 29.

124. Григорян Б.Б. Метод приведения реального температурного режима к стандартному для определения огнестойкости железобетонных конструкций / Григорян Б.Б. // Проблемы пожарной безопасности : [сб. науч. трудов]. – Х.: «Фолио», 2000. – С.53 – 56.

125. Гринчик Ю.А. Поведение железобетонных конструкций в условиях реальных температурных режимов пожара / Гринчик Ю.А., Измаилов А.С., Григорян Б.Б. // Огнестойкость строительных конструкций. – Вып. 5. – 1983. – С. 91–96.

126. Жуков В.В. Термостойкость железобетонных конструкций / Жуков В.В., Панюков Э.Ф. – К.: Будівельник, 1991. – 224 с.

127. Пат. 85695 Україна, МПК(2009) G01 N 33/38. Спосіб визначення несучої здатності стиснутих елементів залізобетонних конструкцій в умовах пожежі / Поздєєв С.В., Некора О.В., Вітько М.М., Поздєєв А.В., заявник і патентовласник Поздєєв С.В. - №а200607816 ; заявл. 12.07.06 ; опубл. 25.02.09, Бюл. №4, 2009 р.

128. Пат. 87295 Україна, МПК(2009) G01 N 33/38, G01 N 25/00. Установка для визначення несучої здатності залізобетонних колон в умовах високотемпературного нагріву/ Поздєєв С.В., Некора О.В., Тищенко Є.О., Поздєєв А.В., Поклонський В.Г., заявник і патентовласник Поздєєв С.В. - №а200607814 ; заявл. 12.07.06 ; опубл. 10.07.09, Бюл. №13, 2009 р.

129. Поздєєв С.В. Експериментально-розрахунковий метод оцінки вогнестійкості залізобетонних колон на основі їх вогневих випробувань / С.В. Поздєєв, В.К. Словінський, С.Д. Щіпець // Пожежна безпека : теорія і практика : зб. наук. праць. – Черкаси: АПБ, 2013. – № 14. – С. 88 – 93.

130. Поздєєв С.В. Дослідження адекватності математичної моделі тепломасообміну випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій / С.В. Поздєєв, В.К. Словінський, А.Н. Омельченко, М.А. Кропива // Збірник наукових праць Української державної академії. – Х: УДАЗТ, 2013. – № 142. – С. 220 – 227.



## ДОДАТКИ

ЗАТВЕРДЖУЮ  
 Директор ТОВ «Пожтест»  
 І. Р. Василенко  
 «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 р.



## АКТ

## впровадження результатів дисертаційної роботи

**Кропиви Михайла Олександровича «Удосконалення розрахункового методу оцінювання вогнестійкості стале залізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками»**

Комісія в складі: голови комісії – начальника випробувальної лабораторії Гаврилова І. С., членів комісії – заступника начальника випробувальної лабораторії Бондара А. М., доцента кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, кандидата технічних наук Словінського В. К. склали цей акт про те, що результати дисертаційних досліджень Кропиви М. О. апробовано та впроваджено у роботу ТОВ «Пожтест» шляхом застосування запропонованого алгоритму визначення межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит за допомогою створеної таблиці мінімальних розмірів у якості допоміжного альтернативного засобу.

Результати дисертаційних досліджень Кропиви М. О. також будуть використовуватись під час комплексної оцінки вогнестійкості сталезалізобетонних плит експериментальним та розрахунковим методом.

Голова комісії:

І. С. Гаврилов

Члени комісії:

А. М. Бондар

В. К. Словінський



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Начальник  
Управління ДСНС України  
у Черкаській області  
кандидат технічних наук,  
професор, генерал-майор  
служби цивільного захисту

В.М. Гвоздь

«\_\_\_\_\_» 2016 року

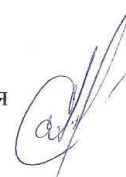
**АКТ**

**впровадження результатів дисертаційної роботи Кропиви М.О. за темою  
«Удосконалення розрахункового методу оцінювання вогнестійкості  
сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками»**

Комісія у складі: начальника дослідно-випробувальної лабораторії Аварійно рятувального загону спеціального призначення Управління ДСНС у Черкаській області, ст. лейтенанта служби цивільного захисту Сука С. А. – голови комісії та членів комісії – завідувача кафедри організації техногенно-профілактичної роботи та охороні праці Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, кандидата технічних наук, доцента Заїки П.І.; начальника науково-дослідної лабораторії метрологічних випробувань екологонебезпечних середовищ, кандидата технічних наук Нуянзіна В.М. склала цей акт, яким засвідчує, що результати дисертаційних досліджень Кропиви М.О. впроваджено у діяльність дослідно-випробувальної лабораторії Управління ДСНС України у Черкаській області, а також навчально-випробувальної лабораторії «Будівельні матеріали та конструкції» Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України шляхом застосування запропонованого за результатами роботи алгоритму розрахунку значень меж вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками табличним методом. Крім того створено передумови забезпечення вимог будівельних норм щодо пожежної безпеки сталезалізобетонних плит шляхом створення таблиці необхідних мінімальних розмірів даних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками.

Голова комісії:

Начальник дослідно-випробувальної лабораторії  
Аварійно рятувального загону спеціального призначення  
У ДСНС у Черкаській області



С. А. Сук

Члени комісії:



П. І. Заїка



В. М. Нуянзін

ЗАТВЕРДЖУЮ

В. о. начальника Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, кандидат технічних наук, професор



О.М. Тищенко

\_\_\_\_\_ 2016 р.

**АКТ**

**впровадження результатів дисертаційної роботи  
Кропиви Михайла Олександровича «Удосконалення розрахункового  
методу оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит із  
внутрішніми двотавровими сталевими балками»**

Комісія у складі: голови комісії – начальника відділу науково-дослідної роботи кандидата педагогічних наук майора служби цивільного захисту Гуріненко Інни Юріївни, членів комісії – кандидата технічних наук, доцента Ступака Дениса Олеговича, кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника майора служби цивільного захисту Мельник Ольги Григорівни склали цей акт про те, що результати дисертаційних досліджень Кропиви Михайла Олександровича впроваджено у навчальний процес Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України на кафедрі будівельних конструкцій під час викладання навчальних дисциплін «Будівлі і споруди та їх поведінка в умовах пожежі», «Матеріалознавство та технологія матеріалів» курсантам та студентам денної форми навчання.

Результати дисертаційної роботи використовуються на практичних заняттях та лабораторних роботах під час викладання вищевказаних дисциплін для розрахункової оцінки вогнестійкості сталезалізобетонних плит з використанням Єврокодів. Матеріали дослідження враховують специфіку професійної підготовки майбутніх фахівців пожежної безпеки та цивільного захисту.

Голова комісії:

І. Ю. Гуріненко

Члени комісії:

Д. О. Ступак

О. Г. Мельник