

УДК 624.012

М. О. Кропива,  
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННОЇ ПЛИТИ ПРИ ПОЖЕЖІ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДА КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

В статті наведені відомості щодо параметрів напружено-деформованого стану та механізму руйнування сталезалізобетонної плити в умовах впливу пожежі із стандартним температурним режимом.

**Ключові слова:** вогнестійкість, «стандартна пожежа», сталезалізобетонна плита, метод кінцевих елементів.

**Постановка проблеми.** Для зменшення ризику значних соціально-економічних втрат під час пожеж в будівлях і спорудах існує необхідність забезпечення живучості сталезалізобетонних конструкцій за умов температурного впливу пожежі. Живучість конструкцій має відповідати існуючим нормативно-технічним нормам, які регламентують межі їх вогнестійкості [1]. При оцінці вогнестійкості будь-яких будівельних конструкцій вважається найбільш надійнішим і достовірним метод натурних вогневих випробувань [1]. Метод вогневих випробувань полягає в нагріві зразка елемента досліджуваної конструкції, розміри якого повністю або частково відповідають розмірам реальному елементу даної конструкції, в спеціальній вогневій печі при температурному режимі, який визначений в нормативах [1 - 3] і відповідає стандартній температурній кривій пожежі, з прикладенням відповідного механічного навантаження. Випробування сталезалізобетонних плит на вогнестійкість відбувається у відповідності до чинних стандартів України [2, 3]. Згідно із цими стандартами стале залізобетонна плита повинна бути піддана вогневій дії в умовах її навантаження і спірання у відповідності до розрахункової схеми конструкції будівлі. При реалізації таких умов виникають певні технічні складності, які полягають у невідповідності умов закріплення і навантаження цієї плити у конструкції, невідповідності габаритних розмірів зразка для випробувань і реальної плити і т.д. Крім цього метод вогневих випробувань є затратним і трудомістким.

Альтернативою експериментальним методам є застосування розрахункових методів. На даний час теоретична та методична база щодо такого підходу міститься у серії нормативних документів [4], чинних в Україні. Дані методи є гнучкими, дозволяють врахувати все розмаїття граничних умов, матеріалів, геометричних розмірів та ін. параметрів плит, а також вони є набагато менш трудомісткими та вартісними.

Багато цих методів засновані на гіпотезах опору матеріалів і добре працюють тоді, коли є чітке уявлення про поведінку елемента конструкції в умовах пожежі. Відсутність такої інформації накладає обмеження на застосування розрахункових методів, адже її отримання пов'язане з проведенням масштабних експериментів. Для рішення цих задач ефективним є застосування математичного моделювання зі залученням комп'ютерних систем автоматизованого інжиніринга, заснованих на методі кінцевих елементів, оскільки дозволяє отримати великий обсяг даних щодо поведінки стале залізобетонних плит під час пожежі. З огляду на викладене можна зазначити важливість та актуальність задач вивчення поведінки сталезалізобетонних плит під час пожежі.

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** В роботі [5] запропонований підхід вивчення поведінки залізобетонних конструкцій під час пожежі, що полягає у проведенні математичного моделювання за методом кінцевих елементів (далі – МКЕ), доповненим математичними моделями пластичного деформування, теорії міцності, моделі зміни механічних властивостей матеріалу за наявності тріщини у точці інтегрування і т.п. Даний підхід відноситься до уточнених розрахункових методів і дозволяє дуже точно описати

поведінку елементів залізобетонних конструкцій в умовах пожежі. В даній роботі було багато уваги приділено поведінці залізобетонних плит. Робота стале залізобетонних плит детально розглянута у рекомендаціях [6]. Але досі залишаються відкритими питання розподілень параметрів напружено-деформованого стану (далі – НДС) у перерізі, деформаційні схеми, розподілення дефектів, а також відомості щодо механізму та причин руйнування сталезалізобетонних плит під час пожежі.

У зв'язку з цим сформульована мета дослідження.

**Постановка задачі та її розв'язання.** Мета роботи полягає у визначенні основних параметрів напружено-деформованого стану, схем деформування, розподілення дефектів, а також відомості щодо механізму та причин руйнування сталезалізобетонних плит під час пожежі при застосуванні методу кінцевих елементів.

На рис. 1 подана схема конструктивних елементів сталезалізобетонної плити, що розглядається.

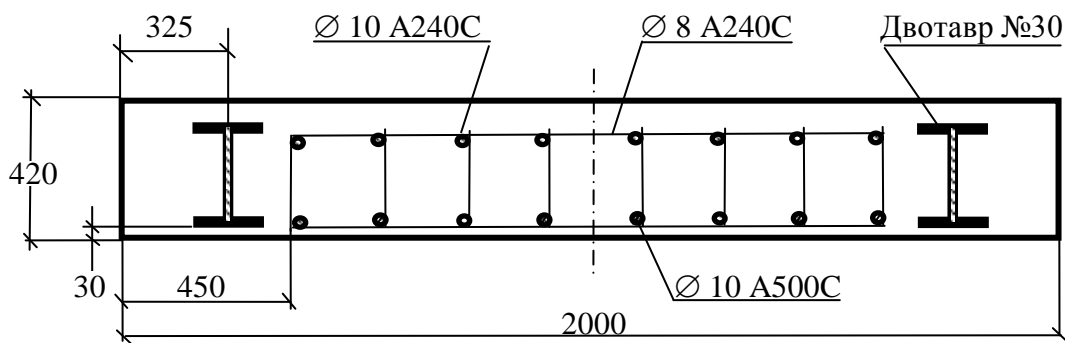


Рисунок 1 – Схема перерізу сталезалізобетонної плити.

Для вивчення поведінки залізобетонних несучих стін була розглянута залізобетонна стіна, основні технічні параметри якої наведені у табл. 1.

Таблиця 1 - Основні параметри сталезалізобетонної плити.

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Тип бетону	Важкий на гранітному заповнювачі	Клас С 40/45 (В40)	
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

Для описання поведінки сталезалізобетонної плити під час пожежі були проаналізовані підходи до розв'язку подібних задач [4, 5]. Аналіз підходів у даних джерелах дозволив сформулювати основні передумови й допущення, які повністю відповідають положенням, сформульованим у роботі [6].

Для розв'язку поставленої задачі необхідне завдання комплексу початкових даних, до яких відносяться властивості компонентів матеріалу стале залізобетонної плити, параметри граничних умов, що враховують прикладенні навантаження, та теплову дію. На рис. 2 наведені теплофізичні характеристики бетону, з якого виготовлена плита, що описані у

чинному стандарті України [4] щодо розрахунку сталезалізобетонних конструкцій на вогнестійкість. Дані характеристики являють собою температурні залежності ефективних характеристик, які описують матеріал як однорідний та ізотропний, що є допустимим при таких розрахунках [4, 5].

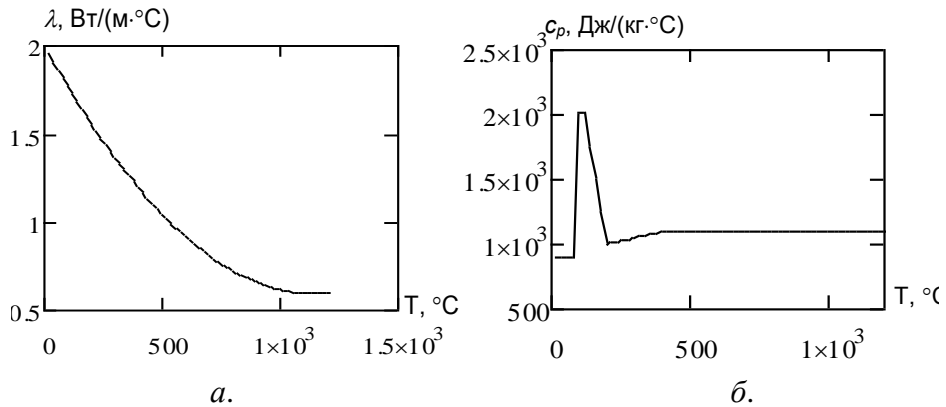


Рисунок 2 – Теплофізичні характеристики важкого бетону: коефіцієнт теплопровідності (а), питома теплоємність (б).

На рис.3 подані термомеханічні властивості бетону, що були використані для розрахунку.

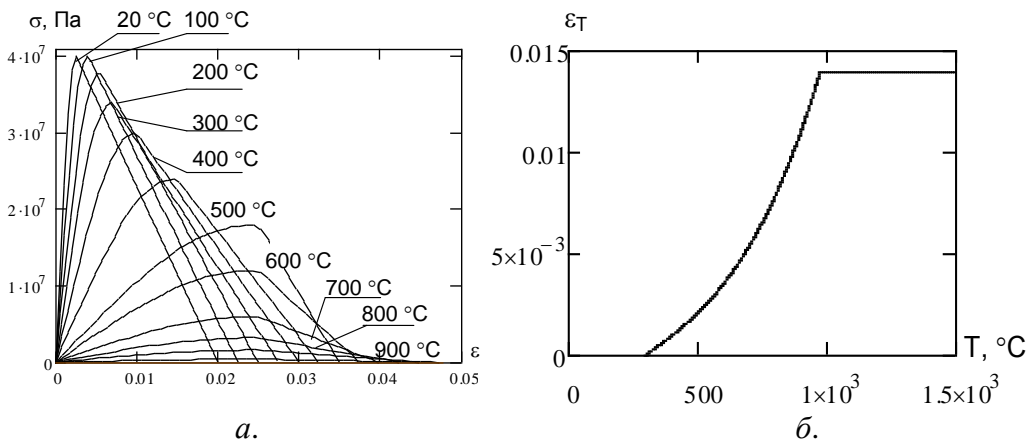


Рисунок 3 – Термомеханічні характеристики бетону: діаграми деформування (а), температурні деформації (б).

На рис.4 подані термомеханічні властивості арматурної сталі

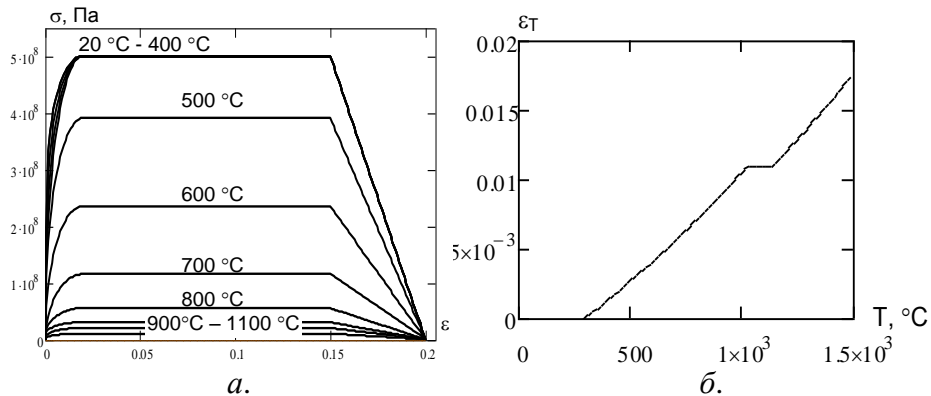


Рисунок 4 – Термомеханічні характеристики арматурної сталі А500С: діаграми деформування (а), температурні деформації (б).

Для проведення розрахунку були використані математичні моделі, параметри яких подані у табл. 2.

Таблиця 2 - Основні математичні моделі для розрахунків стіни на вогнестійкість.

Особливість поведінки матеріалу стіни	Використана математична модель (метод)	Дж-ло
Теплотехнічна задача		
Теплопровідність	Рівняння нестационарної теплопровідності разом з МКЕ	[5]
Граничні умови	III роду	
Фізична нелінійність	Ітеративний метод Ньютона-Рафсона	[5]
Статична задача		
НДС	МКЕ	[5]
Пластичне деформування	Асоціативна теорія пластичного деформування Бесселінга	[5]
Тріщиноутворення	Складений критерій міцності бетону Віллема і Варнке	[5]
Нелінійність	Ітеративний метод Ньютона-Рафсона	[5]

При проведенні розрахунку були прийняті розрахункові схеми до теплотехнічної та статичної задач, що наведені на рис. 5.

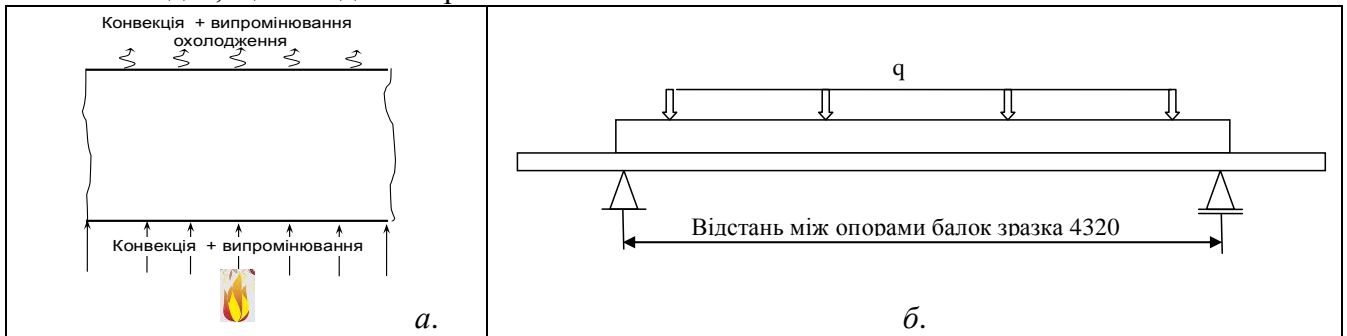


Рисунок 5 – Розрахункові схеми: до теплотехнічної задачі (а); до статичної задачі (б).

Використані характеристики відповідають вимогам стандарту України [5]. Міцнісні характеристики являють собою набір діаграм «напруження-деформація» із спадними гілками для певних значень температури нагріву матеріалу. Також на цьому рисунку подані температурні деформації бетону і арматурної сталі.

Для завдання граничних умов були використані параметри, спираючись на чинні стандарти України щодо розрахунку будівельних конструкцій на вогнестійкість. Величини вибраних параметрів наведені у табл. 3.

Таблиця 3 – Параметри граничних умов

Характеристика	Одиниці виміру	Величина	Джерело
Параметри граничних умов теплотехнічної задачі			
Номінальний тепловий вплив		Стандартний температурний режим пожежі	
Коефіцієнт конвекційного теплообміну на поверхні, що обігривається	Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	25	[4]
Коефіцієнт конвекційного теплообмін на поверхні, що не обігривається	Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	6	[4]
Ступінь чорноти	-	0.7	[4]
Постійна Стефана-Больцмана	Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )	5.67·10 <sup>-8</sup>	[6]
Параметри граничних умов статичної задачі			
Діюче навантаження	т/м <sup>2</sup>	150	-
Коефіцієнт Пуасона	-	0,2	[4]

Для проведення розрахунку були побудовані сіткові моделі сталезалізобетонної плити, вигляд яких поданий на рис. 6.

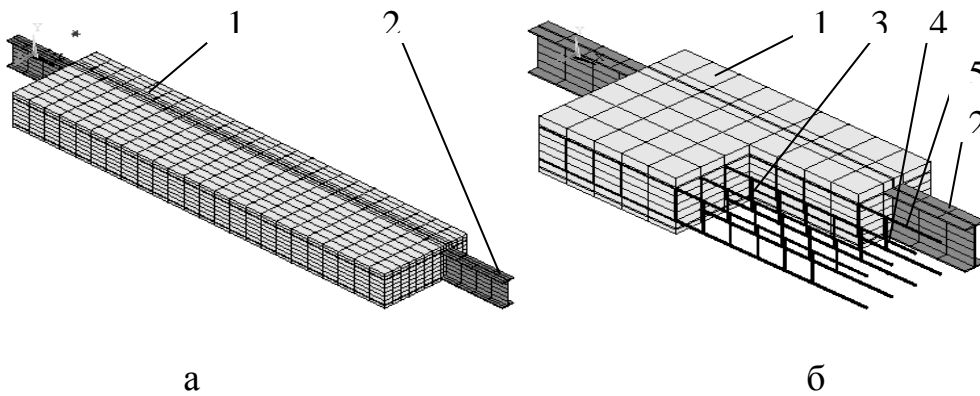


Рисунок 6 – Сіткові моделі: до теплотехнічної задачі (а); до статичної задачі (б): 1 – кінцевий елемент бетону, 2 – кінцевий елемент сталевій двотавровій балки, 3 – кінцевий елемент арматури  $d=8$  мм, 4 – кінцевий елемент арматури  $d=10$  мм, 5 – кінцевий елемент арматури  $d=12$  мм.

При побудуванні сіткових моделей було враховано, що сітка для вирішення теплової задачі відповідно до розрахункової схеми (див. рис. 3) є одномірною і повинна бути набагато гущішою. Сітка для статичної задачі повинна бути більш грубою і враховувати місцеву особливість більшого нагрівання внутрішніх шарів, прилеглих до обігрівної поверхні. Для переносу температурних значень у вузлові точки міцнісної задачі була використан лінійна інтерполяція.

З метою зменшення обсягу розрахунків розглядається 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. Такі умови забезпечуються встановленням відповідних односторонніх механічних в'язів. Накладання температур у вузлові точки відбувається шляхом лінійної інтерполяції.

В результаті вирішення теплотехнічної задачі були отримані температурні розподілення, які наведені на рис. 7.

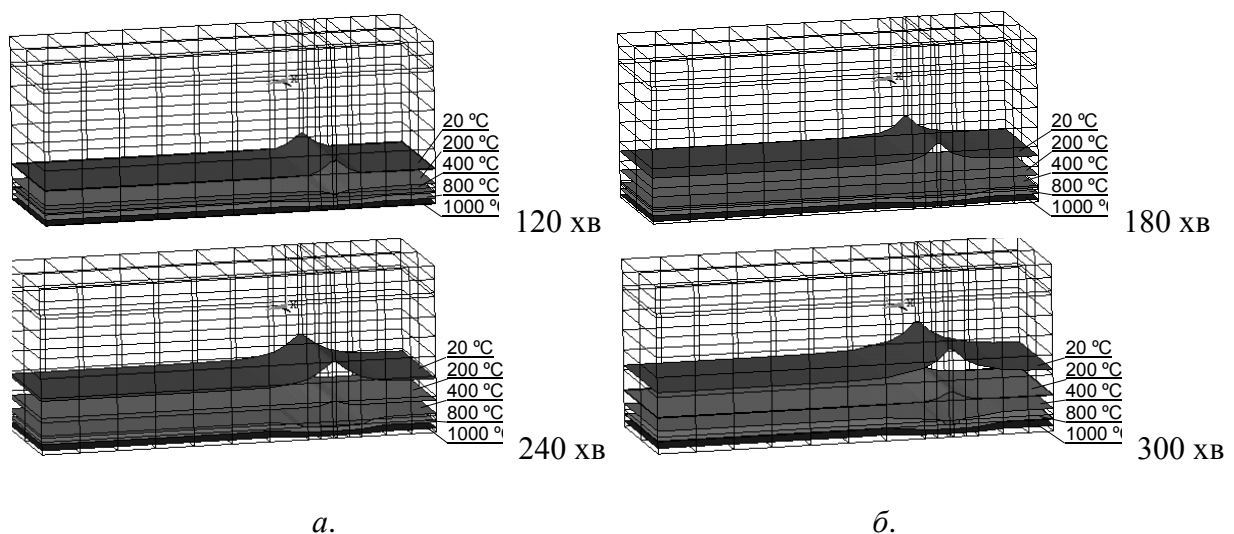


Рисунок 7 – Результати вирішення теплотехнічної задачі: температурні розподілення у перерізі сталі залізобетонної плити у різні моменти часу.

Після вирішення статичної задачі були отримані графіки максимального прогину сталезалізобетонної плити та його швидкості наростання у залежності від часу випробування. Отримані графіки наведені на рис. 8.

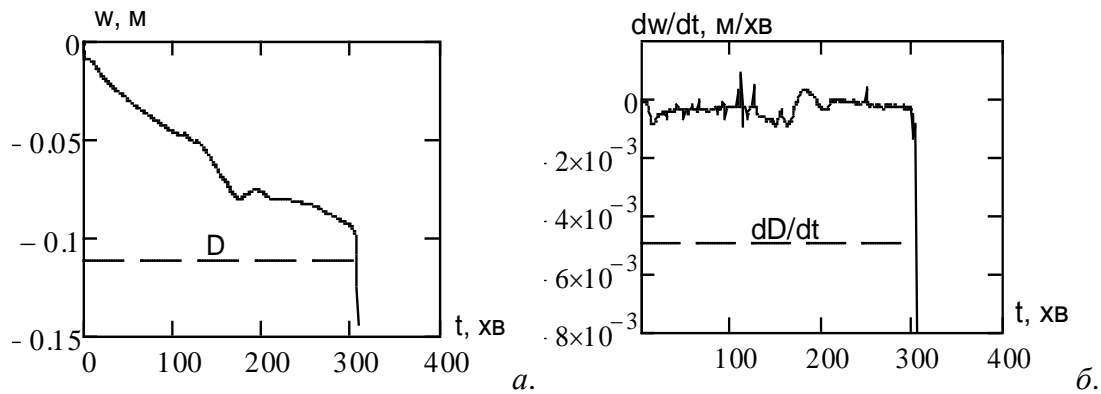


Рисунок 8 – Графік максимального прогину сталезалізобетонної плити (а) та його швидкості наростання (б) у залежності від часу випробування.

Згідно з отриманим графіком видно що його можна розділити на декілька ділянок. Перша ділянка відповідає початковому навантаженню плити. Це ділянка майже вертикального стрибка на початку кривої. Наступна ділянка до 140 хв випробування помірного наростання прогину коли нагрівання не спричиняє суттєвих деформацій арматури та сталевго двотавра. Після цього до 178 хвилини іде більш інтенсивне нарощення прогину. Наступна ділянка є дещо нетиповою для поведінки зігнутих елементів під впливом пожежі, оскільки на ній іде явне зменшення деформації, що продовжується протягом майже 17 хв. Після цього протягом майже 100 хв максимальний прогин зберігає своє значення. Після 300 хв випробування деформації суттєво наростають і приводять до швидкої деструкції плити в умовах стандартного випробування на вогнестійкість.

Отримані графіки дозволяють отримати дані про настання граничного стану втрати несучої здатності шляхом порівняння поточних значень переміщень і швидкостей з гранично допустимими, що відповідно визначаються за формулами [2, 3]:

$$D = \frac{L^2}{400 \cdot b} = 111 \text{ мм}; \quad \frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9000 \cdot b} = 5 \text{ мм/хв.} \quad (1)$$

де  $L$  – довжина плити між опорами, мм, а  $b$  – висота перерізу, мм.

Аналіз отриманих графіків показує, що за критеріями (1) граничний стан втрати несучої здатності настає на 311 хв. Аналіз рис. 7 показує, що стан втрати тепло ізолювальної здатності не настає. Це означає, що клас вогнестійкості досліджуваної сталезалізобетонної плити є не меншим за REI 300. Даний клас вогнестійкості є найбільшим з регламентованих стандартом [1]. Такий високий клас вогнестійкості може бути зумовлений напружено-деформованим станом сталевго двотавра під тепловим впливом під час випробування. Ділянка інтенсивного нарощування прогину графіку на рис. 8 а на 178 хв замінюється на ділянку зменшення прогину із подальшою стабілізацією його значення протягом майже півтори години. Це означає, що напружено-деформований стан двотавра внаслідок розширення його нижніх шарів при нагріванні спричиняє його вигин вверх. При стабілізації максимального прогину плити досягається баланс між вигином вверх двотаври подальшим розкриттям тріщин і зменшенням стиснутої зони бетону. Все вищевикладене дозволяє стверджувати, що наявність у залізобетонних плитах сталевих елементів у вигляді стержнів із стандартними профілями дозволяє істотно підвищити вогнестійкість даних плит за ознакою втрати несучої здатності.

**Висновки.** З огляду на проведені дослідження можна зробити такі висновки:

1. Виконане чисельне дослідження поведінки сталезалізобетонної плити під час дії пожежі із стандартним температурним режимом.
2. Показано, що сталезалізобетонна плита на певному часовому інтервалі зменшує свій максимальний прогин після чого його значення стабілізується протягом майже 100 хв.
3. Показано, що наявність зменшення максимального прогину сталезалізобетонної плити на певному часовому інтервалі і подальша його стабілізація зумовлена температурним розширенням нижніх шарів двотавра.
4. Виявлено, що наявність у залізобетонних плитах сталевих елементів у вигляді стержнів із стандартними профілями, дозволяє істотно підвищити вогнестійкість даних плит за ознакою втрати несучої здатності до класу вогнестійкості REI 300.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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).
2. 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).
3. ДСТУ Б В.1.1-13: 2007. Захист від пожежі. Балки. Метод випробування на вогнестійкість. – К.: Укрархбудінформ, 2008. 7 с – (Національний стандарт України).
4. EN 1994-1-2:2005 Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: General rules - Structural fire design, Brussels, 2004.
5. 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.
6. Милованов А.Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций / Милованов А.Ф. – М.: Стройиздат, 1986. – 224 с.