

С.М. Федченко

Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Черкаси, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНИЖЕННЯ МІЦНОСТІ БЕТОНУ ЗАЛІЗОБЕТОННОГО РИГЕЛЯ В УМОВАХ ВОГНЕВИХ ВИПРОБУВАНЬ

У статті викладені результати досліджень змінення міцності бетону залізобетонного ригеля залежно від температури шляхом інтерпретації даних вогневих випробувань. Дані, необхідні для дослідження зниження міцності бетону залізобетонного ригеля, були отримані шляхом вогневих випробувань. За цими даними було одержано закономірність зміни міцності бетону у залежності від температури і показана адекватність отриманих результатів.

Ключові слова: залізобетонний ригель, вогневі випробування, коефіцієнт зниження міцності бетону, вогнестійкість.

Постановка проблеми

Основним недоліком при прогнозуванні ефективного функціонування залізобетонних будівельних конструкцій є закладання недостатнього запасу їх міцності в умовах пожежі. Найбільшу небезпеку обвалення в таких умовах представляють зігнуті елементи конструкцій. До таких елементів відносяться залізобетонні ригелі та балки, оскільки вони мають найбільші габарити і навантаження.

Для підвищення надійності будівель в умовах теплового впливу пожежі одним з найбільш ефективних способів є забезпечення нормованої межі вогнестійкості на основі методів оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій будівлі, зокрема залізобетонних ригелів. Існуючі методи мають достатній розвиток і складають ієрархічну структуру від найпростіших у її основі до складних, що здійснюються із залученням комп'ютерних програмних та апаратних засобів. Проте для реалізації даних методів необхідний комплекс початкових даних, що включає термомеханічні характеристики матеріалів. На сучасному етапі досконалі відомості про міцність бетону залізобетонних ригелів в умовах теплового впливу пожежі потребують уточнення з метою підвищення достовірності даних, отриманих методами розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонних ригелів, оскільки це дозволяє суттєво підвищити точність щодо прогнозних даних при аналізі відповідності залізобетонних ригелів вимогам норм щодо їх вогнестійкості.

Тому дослідження, присвячені визначенню зміни розподілень температури та міцності бетону у перерізах залізобетонних ригелів у залежності від тривалості теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі, є актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для прогнозування поведінки залізобетонних ригелів в умовах пожежі використовують експериментальний та розрахунковий методи оцінки їхньої вогнестійкості [1]. Ці методи нині застосовуються для оцінювання вогнестійкості залізобетонних конструкцій, зокрема залізобетонних ригелів, проте мають переваги та недоліки, що накладають певні специфічні умови при їхньому використанні і актуалізують зусилля, спрямовані на їх удосконалення.

Перший метод ґрунтується на проведенні вогневих випробувань. Високотемпературні випробування залізобетонних ригелів та балок відбуваються у відповідності до стандартів [2]. Згідно із цими стандартами, залізобетонний ригель повинен бути підданий тепловій дії в умовах механічного навантаження, що повністю відповідає діючому навантаженню у них згідно із розрахунковою схемою конструкції будівлі. Міцність бетону змінюється по-різному при підвищених температурах залежно від навантаження і умов нагрівання. В роботах [3, 4] для точнішого описання міцнісних характеристик бетону використовується діапазон значень властивостей матеріалу, які були визначені через варіації в експериментальній ситуації. Метод вогневих випробувань є універсальним для всіх будівельних конструкцій при визначенні всіх типів граничних станів. Проте реалізація даного методу має ряд недоліків, а саме: проведення дослідження потребує значних матеріальних та трудових затрат та існує можливість нещасних випадків при випробуваннях.

Також експериментальний метод прогнозування функціонування залізобетонних ригелів в умовах високих температур на основі високотемпературних випробувань не завжди може бути коректно застосований. Це обумовлено в основному неможливістю

відтворити при експерименті повну відповідність умовам закріплення і навантаження елемента при його роботі як складової частини даної конструкції.

Розрахункові методи прогнозування функціонування залізобетонних конструкцій в умовах пожежі не мають таких обмежень і широко застосовуються на стадії проектування будівель і споруд, які б відповідали вимогам будівельних норм щодо їх вогнестійкості [5]. Такі методи за допомогою комп'ютерного моделювання надають можливість відтворити умови роботи будівельної конструкції при пожежі у повному обсязі [6]. Розрахунки реалізуються за допомогою спеціального програмного забезпечення, безпосередньо призначеного для симуляції розвитку, поширення й вгасання високотемпературних процесів у приміщеннях. В алгоритми цих програм закладені сучасні чисельні методи [7]. Це такі методи, як метод скінчених або граничних елементів, методи нев'язок, метод Галеркіна, оптимізаційні методи й т. д. Тобто методи для рішення систем диференціальних рівнянь безперервних середовищ типу рівнянь Нав'є-Стокса, рівняння теплопровідності, де враховуються всі можливі фактори, опис яких неможливий при застосуванні аналітичних методів рішення. До таких факторів можна віднести будь-яку складність граничних умов, а також різного роду нелінійність у цих рівняннях [8, 9]. Переваги розрахункових методів оцінювання вогнестійкості залізобетонних ригелів полягають в універсальності, гнучкості, можливості врахувати будь-який набір граничних умов та конструктивних особливостей, а також режимів теплового впливу пожежі. Серед недоліків слід вказати на трудомісткість підготовки розрахункових моделей та проведення обчислень, необхідність високої кваліфікації спеціалістів, що проводять розрахунки, підвищені вимоги до розрахункової техніки, необхідність проведення верифікації результатів розрахунків, а також достатня обмеженість початкових даних щодо феноменології поведінки матеріалів в умовах пожежі.

Як початкові дані для розрахункових методів оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій використовують міцнісні характеристики бетону, що наведені у європейських нормах. У Eurocode 2 наведений коефіцієнт зниження характеристичної міцності бетону залежно від температури, що є універсальним та використовується при оцінці вогнестійкості розрахунковим методом для всіх типів залізобетонних конструкцій. Проте дослідження зразків, розміри яких наближені до реальних розмірів елементів будівель, дають більш точні результати.

Для отримання достовірних результатів щодо прогнозування вогнестійкості залізобетонних конструкцій розглядають метод вогневих випробувань і математичну обробку результатів, що надає гнучкість при врахуванні граничних умов для залізобетонних елементів [10]. Цей варіант проведення дос-

ліджень передбачає застосування різних геометричних параметрів конструкцій, прикладання будь-якого рівня навантаження, використовуючи різноманітні теорії міцності матеріалів, що суттєво розкриває можливості обчислювальних експериментів [8]. Цей підхід має перспективу для уточнення характеристик матеріалів, що є компонентами залізобетону, безпосередньо через результати вимірювань при вогневих випробуваннях ригелів як альтернатива отриманню подібних даних через випробування лабораторних зразків відповідних матеріалів.

Методики, запропоновані у роботах [8–10], базуються на припущенні, що міцність бетону внутрішніх шарів ригелів відповідає міцності, що визначається за допомогою випробування лабораторних зразків бетону на стискання, циліндричної форми. Проте аналіз результатів, наведених у роботах [6–9], дає змогу припустити, що характер деформування внутрішніх шарів бетону ригелів при їх нагріванні в умовах пожежі може суттєво відрізнитися, що може позначитися на точності результатів розрахунку. Для підвищення точності розрахункових методів оцінки вогнестійкості перспективним є ідентифікація внутрішніх шарів бетону залізобетонних ригелів за результатами вогневих випробувань їх повнорозмірних зразків в установках для їх експериментального дослідження на вогнестійкість.

Згідно із роботою [10], такий підхід для дослідження міцності бетону за результатами вогневих випробувань можна застосувати шляхом встановлення температурних показників у внутрішніх шарах залізобетонних ригелів у кожному хвилину випробувань за результатами точкових вимірювань температури. Знаючи температурні показники, можна ідентифікувати характеристики міцності бетону на основі вирішення рівнянь, що описують напружено-деформований стан у оберненій постановці. Для цього потрібно розробити методику інтерполяції температур та спосіб складання рівнянь напружено-деформованого стану для реалізації запропонованого підходу. Проте для реалізації даного підходу потрібно дослідити адекватність методів на основі такого підходу, оскільки на етапах його реалізації існують суттєві джерела похибок. Такими етапами є відновлення температурного поля у кожному хвилину випробування та припущення, що вводяться при формуванні математичної моделі, яка описує напружено-деформований стан залізобетонного ригеля в умовах його нагрівання при пожежі. Встановлення таких похибок дозволить обґрунтувати застосування експериментально-розрахункового методу дослідження як ефективного інструмента для дослідження закономірностей зниження міцності бетону в умовах високотемпературного нагріву на основі вогневих випробувань залізобетонних ригелів, що безпосередньо відтворюють вплив пожежі.

Формулювання мети статті

Мета статті полягає у дослідженні закономірності зниження міцності бетону залізобетонного ригеля в умовах нагріву при пожежі за допомогою експериментально-розрахункового методу за результатами вимірювань, отриманих під час вогневих випробувань залізобетонних ригелів.

Для досягнення мети були поставлені такі задачі:

- розробити методику та провести з її використанням вогневі випробування залізобетонного ригеля;
- отримати набір результатів вимірювань під час проведення вогневих випробувань залізобетонних ригелів;
- використовуючи запропонований підхід та дані вогневих випробувань, дослідити закономірність зміни коефіцієнта зниження міцності бетону залізобетонного ригеля залежно від температури нагрівання в умовах вогневих випробувань;
- дослідити адекватність результатів ідентифікації зміни міцності бетону у залежності від температури залізобетонного ригеля шляхом їх порівняння із даними, відомими з літератури.

Виклад основного матеріалу

Об'єкт та гіпотеза дослідження.

Об'єктом дослідження є метод ідентифікації міцності бетону на стискання за результатами вимірювань, здійснених під час вогневих випробувань залізобетонних ригелів на вогнестійкість. Цей метод досліджувався з погляду адекватності отриманих результатів, для того щоб обґрунтувати його використання як інструмента для дослідження нових більш точних даних щодо властивостей бетону, які можуть бути використані як частина початкових даних для розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонних ригелів за уточненими методами.

Для реалізації експериментально-розрахункового методу було висунуто комплекс гіпотез. Основною гіпотезою, що є базою для проведення досліджень, є те, що температурно-силовий відклик у внутрішніх шарах залізобетонного ригеля при його вогневих випробуваннях на вогнестійкість може бути отриманий шляхом розрахунку з використанням апроксимації диференціальних рівнянь математичних моделей теплопровідності та напружено-деформованого стану за методом скінчених елементів. Також було зроблене припущення, що поведінка матеріалів, які є компонентами залізобетону, визначається математичними моделями матеріалів, рекомендованими Eurocode 2. Механічні характеристики бетону та арматурної сталі для моделей їхньої поведінки при різних температурах точно відомі, оскільки є частиною початкових даних для здійснення розрахунку. Ідентифікація міцнісних характеристик здійснюється

тільки для бетону, оскільки хімічний склад та структура тієї чи іншої арматурної сталі контролюється набагато жорсткіше. З огляду на це, показники міцності бетону, які піддаються ідентифікації, можуть бути порівняні із показниками міцності бетону, що були закладені у математичну модель. Тож ідея роботи полягає у порівнянні цих показників для встановлення адекватності результатів, що отримуються за запропонованим методом.

Методика проведення дослідження механічних характеристик бетону.

При проведенні досліджень виконуються такі основні етапи. На першому етапі проводяться вогневі випробування, у результаті чого має бути отримано набір результатів вимірювань у вигляді залежностей від часу температурних показників в окремих точках перерізу та залежність максимального прогину ригеля від часу.

На другому етапі для визначення температур у будь-якій точці перерізів залізобетонних ригелів за точковими вимірюваннями температури у їх внутрішніх шарах, отриманими під час вогневих випробувань, проводиться процедура інтерполяції і встановлюються температури шарів, на які розбивається переріз ригеля.

На третьому етапі з використанням отриманих температурних розподілів та кривої залежності максимального прогину від часу проводиться ідентифікація механічних характеристик бетону на основі рівнянь рівноваги, побудованих з використанням деформаційної моделі. На останньому етапі досліджується адекватність ідентифікованих показників міцності бетону шляхом їхнього порівняння із даними, відомими з літератури.

Методика визначення початкових даних для проведення ідентифікації міцнісних властивостей бетону.

Набір даних, необхідний для здійснення ідентифікації міцнісних характеристик бетону в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі, визначається за допомогою проведення вогневих випробувань. На рис. 1 наведена схема вогневих випробувань.

Особливістю даної установки є можливість відтворення теплового впливу пожежі за стандартною температурною кривою відповідно до [11] за допомогою спалювання дизелю у форсунках, а також прикладання механічного навантаження. Під час проведення експерименту фіксується температура у камері печі за допомогою термодатчиків, температура у внутрішніх шарах зразка залізобетонного ригеля для випробувань та його максимального прогину. Для забезпечення необхідної статистичної стійкості результатів випробуванню одночасно піддаються два зразки.

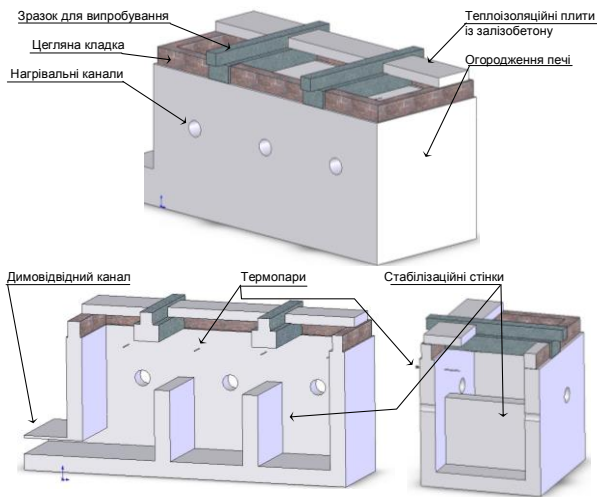


Рис. 1. Схема установки для випробувань

Для дослідження поведінки залізобетонного ригеля в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі в умовах вогневих випробувань розглядається ригель, конструктивна схема якого зображена на рис. 2.

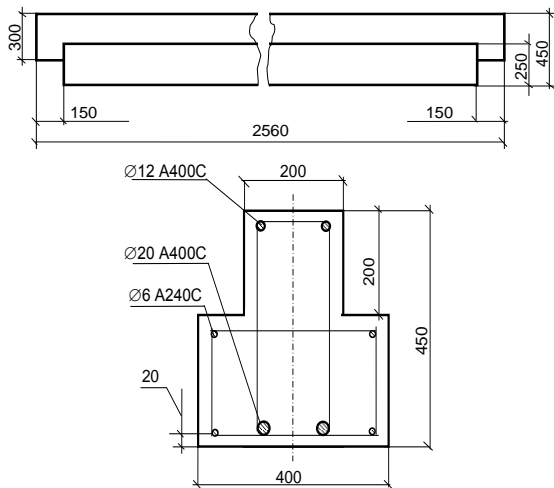


Рис. 2. Конструктивна схема залізобетонного ригеля для досліджень його поведінки в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі

Температура у внутрішніх шарах контролюється за допомогою термопар за схемою на рис. 3.

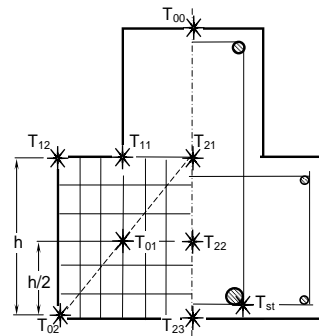


Рис. 3. Схема розташування термопар для контролю температур у внутрішніх шарах залізобетонного ригеля

Після проведення вогневих випробувань було отримано дані щодо температурних показників у камері печі, представлені на рис. 4.

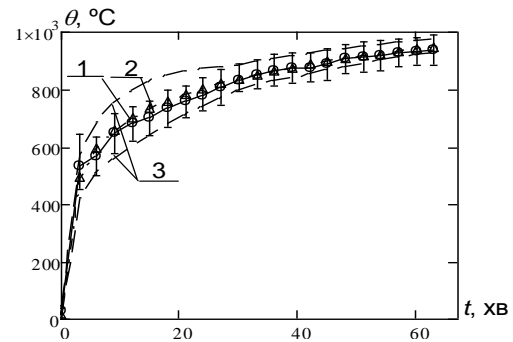


Рис. 4. Температурний режим випробувань залізобетонних ригелів (вісь абсцис – час, вісь ординат – температура): 1 – середня температура в печі; 2 – стандартна температурна крива; 3 – допустимі відхилення температурного режиму

На рис. 5 подані залежності температур у контрольних точках перерізів залізобетонних ригелів-зразків від часу випробувань згідно зі схемою, наведеною на рис. 3.

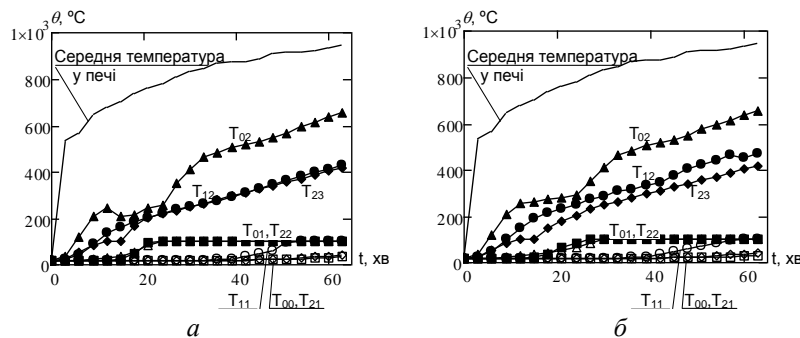


Рис. 5. Скінченно-елементна схема залізобетонного ригеля для теплового розрахунку (а) та схема прикладання граничних умов (б) (вісь абсцис – час, вісь ординат – температура)

У результаті проведення вогневих випробувань було отримано криву залежності максимального прогину від часу (рис. 6).

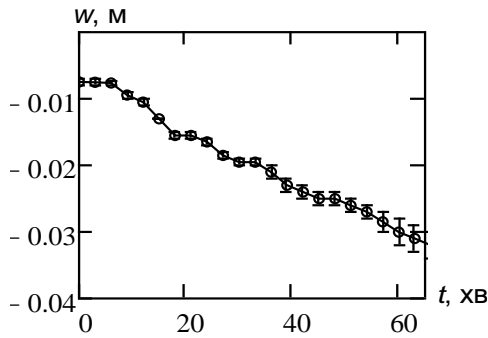


Рис. 6. Залежність величини середнього максимального прогину залізобетонних ригелів із відхиленнями (вісь абсцис – час, вісь ординат – максимальний прогин)

Використовуючи дані, наведені на рис. 5, була проведена інтерполяція за блок-схемою, зображеною на рис. 7, згідно із роботою [10].

Тут $\theta_{dk}, \theta_{gk}, \theta_{vk}$ – температури, що визначені на обігрівних поверхнях відповідно за діагоналю та середніми вертикаллю та горизонталлю перерізу;

θ_0 – температура найменш нагрітої точки перерізу;

Q_d, Q_g, Q_v – показники, які визначені відповідно для діагоналі та середніх горизонталі та вертикалі перерізу;

d_0 – довжина відрізка по діагоналі від початку координат до заданої вузлової точки;

d – довжина радіального відрізка від початку координат до точки із поточними координатами;

h, a – висота і ширина перерізу відповідно.

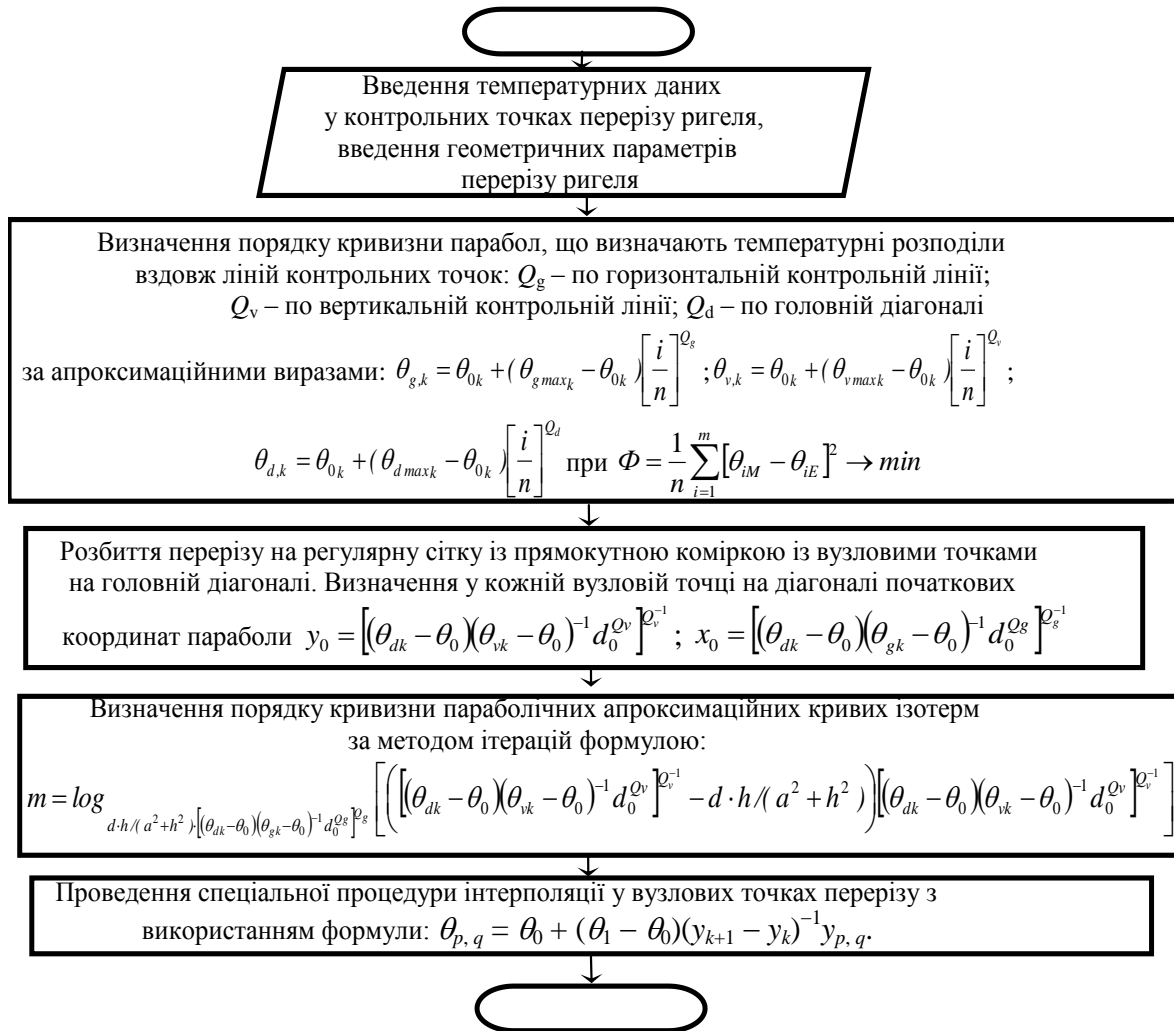


Рис. 7. Блок-схема алгоритму визначення температури у вузлових точках перерізу шляхом інтерполяції температур за температурними показниками у контрольних точках перерізу

Використавши алгоритм, схема якого наведена на рис. 7, були отримані температурні розподіли, відображені на рис. 8.

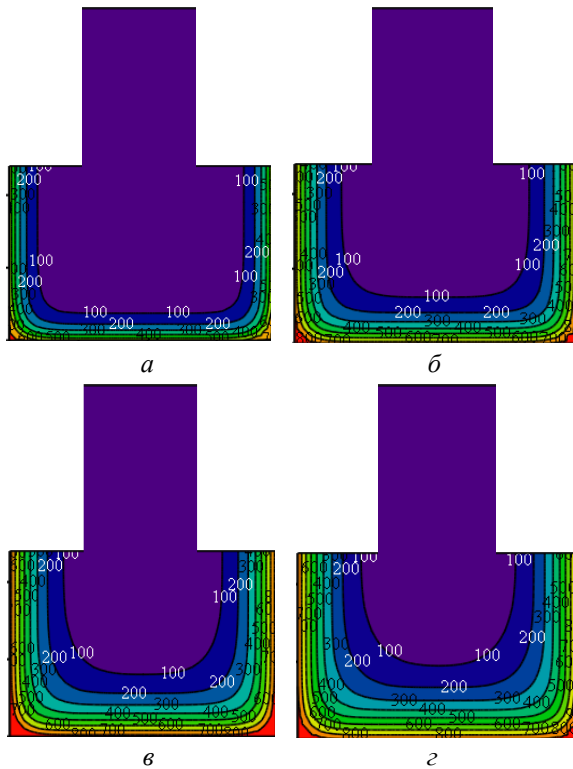


Рис. 8. Температурні розподіли у залізобетонному ригелі, визначені шляхом проведення інтерполяції (°C): а – 15 хв; б – 30 хв; в – 45 хв; г – 60 хв

Для ідентифікації характеристик міцності бетону використовується система лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР), яка має вигляд:

$$[F]\{k\} + \{S\} = M_{Ed}, \quad (1)$$

де $\{k\} = (k_{c1} \dots k_{c2} \dots k_{cm})^T$ – вектор значень коефіцієнтів зниження міцності бетону залізобетонного ригеля відповідних табличним значенням температур $\{\Theta_m\} = (0 \dots 100 \dots 200 \dots \Theta_m)^T$, які є невідомими записаної СЛАР;

$[F]$ – матриця коефіцієнтів СЛАР, що має такий вигляд:

$$[F] = \begin{pmatrix} Z_{11} \dots & Z_{1j} \dots & Z_{1m} \\ Z_{i1} \dots & Z_{ij} \dots & Z_{im} \\ Z_{m1} \dots & Z_{mj} \dots & Z_{mm} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Параметри матриці коефіцієнтів обчислюються за виразами:

$$\begin{aligned} Z_{il} &= \sum_n [1 - 0.01(\theta_{ni} - \theta_l)] F_n(\varepsilon, \theta_{ni}) A_c y_n Z_{im}, \\ Z_{im} &= \sum_n [0.01(\theta_{ni} - \theta_{m-1})] F_n(\varepsilon, \theta_{ni}) A_c y_n, \\ Z_{ij} &= \sum_n [1 - 0.01(\theta_{ni} - \theta_j)] F_n(\varepsilon, \theta_{ni}) A_c y_n + \\ &+ \sum_n 0.01(\theta_{ni} - \theta_{j-1}) F_n(\varepsilon, \theta_{ni}) A_c y_n. \end{aligned} \quad (3)$$

Величина $m = [T_{\max} * 0.01]$ – це кількість рівнянь та перемінних у СЛАР (1), що обчислюється за максимальною температурою нагрівання залізобетонного ригеля під час вогневих випробувань.

При записі рівнянь для конкретних моментів часу випробувань величина максимального прогину встановлюється рівномірно між першим моментом часу випробувань та часом, коли зберігається відповідність епюри деформацій та напружень лінійної залежності.

У СЛАР (1) $\{S\}$ – це вектор зусиль у арматурних стержнях, який обчислюється з використанням наступної формули:

$$\{S\} = (S_1 \dots S_i \dots S_m)^T, \quad (4)$$

де $S_i = \sum_p F_{st,p}(\varepsilon, \theta_{st,p})$

Зусилля у p -тому арматурному стержні в i -тий момент часу обчислюються за виразами, рекомендованими настановами щодо розрахункової оцінки вогнестійкості залізобетонних конструкцій [9, 12–14].

Напруження у внутрішніх шарах бетону і арматурної сталі для обчислення матриць, що є компонентами СЛАР (1), обчислюються з використанням діаграм деформування як функції крайових деформацій та кривизни залізобетонних ригелів за виразами:

$$\begin{aligned} \sigma_{ci} &= f_i(\varepsilon_{ci}), \quad \sigma_{si} = f_2(\varepsilon_{si}), \\ \varepsilon_{ci} &= \varepsilon_0 + y_{ci} \chi_t, \quad \varepsilon_{si} = y_{si} \chi_t, \end{aligned} \quad (5)$$

де ε_0 – відносна деформація верхньої точки перерізу залізобетонного ригеля у поперечному напрямку;

χ_t – кривизна залізобетонного ригеля в певний момент часу.

Відносна деформація верхньої точки та кривизна перерізу залізобетонного ригеля обчислюються з використанням гіпотези плоских перерізів за формулами:

$$\varepsilon_0 = \frac{h^2 \chi_t}{2h - z_0}, \quad \chi_t = \frac{48w_t}{5L^2}, \quad (6)$$

де L – довжина прольоту залізобетонного ригеля;

w_t – максимальний прогин залізобетонного ригеля в певний момент часу;

z_0 – осьова відстань від крайнього арматурного стержня до нижнього краю перерізу залізобетонного ригеля.

Результати ідентифікації міцнісних характеристик залізобетонного ригеля та їх адекватність.

При застосуванні даних вимірювань температурних показників та величини максимального прогину залізобетонного ригеля, які були отримані під час вогневих випробувань, та використанням математичного апарата, описаного формулами (1)–(6), було ідентифіковано залежність коефіцієнта зниження міцності бетону залізобетонного ригеля від температури, що показана на рис. 9.

На рис. 9 також подано графіки залежності значення коефіцієнта зниження міцності бетону, рекомендованого настановами другої частини Eurocode 2.

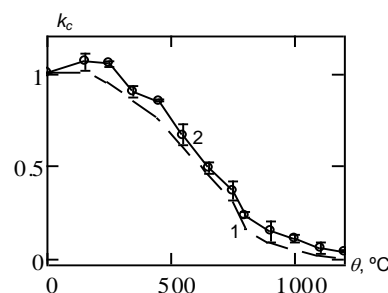


Рис. 9. Залежності коефіцієнта зниження міцності бетону: 1 – стандартна залежність; 2 – усереднена залежність для зразків № 1 та № 2 із відхиленнями (вісь абсцис – температура нагріву, вісь ординат – коефіцієнт зниження міцності бетону)

$$k_c(\theta) = 1 + 1.505 \cdot 10^{-3} \theta - 7.123 \cdot 10^{-6} \theta^2 + 6.655 \cdot 10^{-9} \theta^3 - 1.921 \cdot 10^{12} \theta^4. \quad (7)$$

Обґрунтування удосконаленого методу розрахункової оцінки вогнестійкості залізобетонного ригеля.

На основі використання отриманої закономірності зміни міцності бетону залізобетонного ригеля було запропоновано удосконалений метод розрахун-

ку з метою спрощення автоматизації розрахунку із використанням отриманих даних щодо коефіцієнту зниження бетону отриману закономірність було апроксимовано за допомогою степеневі регресії:

кової оцінки вогнестійкості залізобетонних ригелів та балок на основі деформаційної моделі за рекомендаціями, викладеними у роботі [10]. Згідно з цими рекомендаціями, СЛАР (1) може бути перетворена і записана у вигляді аналітичного виразу для визначення несучої здатності за граничним моментом:

$$M_{lim,fi} = \sum_{i=1}^z \sigma_{si}(\theta, \varepsilon_{si}) A_{si} \cdot \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sigma_{bi,j}(\theta, \varepsilon_{bi,j}) A_{bi,j} d_{bi,j} + \sum_{i=1}^l \sigma_{sdi}(\theta, \varepsilon_{sdi}) A_{sdi} d_{sdi}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sigma_{bi,j}(\theta, \varepsilon_{bi,j}) A_{bi,j} + \sum_{i=1}^l \sigma_{sdi}(\theta, \varepsilon_{sdi}) A_{sdi}}, \quad (8)$$

де $\sigma_{bi,j}(\theta, \varepsilon_{bi,j})$ – напруження у бетоні, які визначаються за рекомендаціями Eurocode 2 за формулою (7), для середнього значення температури поточної зони бетону у перерізі;

$\sigma_{si}(\theta, \varepsilon_{si}), \sigma_{sdi,j}(\theta, \varepsilon_{sdi,j})$ – напруження у робочій та додатковій арматурі;

$d_{bi,j}, d_{sdi}$ – відстані відповідно від центрів зон бетону перерізу, осей додаткових арматурних стержнів до осі, що проходить через центри робочої арматури, причому для стержнів нижче горизонтальної центральної осі відстань має від’ємне значення;

$\varepsilon_{bi,j} = \chi_{bi,j} \cdot \chi$, де $\chi_{bi,j}$ – відстань центру зони до горизонтальної центральної вісі перерізу;

$\varepsilon_{sdi} = \chi_{sdi,j} \cdot \chi$, де $\chi_{sdi,j}$ – відстань осі додаткового арматурного стержня до горизонтальної центральної осі перерізу;

$\varepsilon_{si} = \chi_{si,j} \cdot \chi$, де $\chi_{si,j}$ – відстань осі робочого

арматурного стержня до горизонтальної центральної осі перерізу;

$A_{bi,j}$ – площа зон, на які розбитий переріз балки;

A_{sdi}, A_{sdi} – площі поперечних перерізів стержнів робочої та додаткової арматури.

За формулою (8) будується графік залежності внутрішнього моменту від кривизни балки. При побудуванні графіку фіксується момент з найбільшим значенням, що розглядається як максимальний момент, який здатна витримувати балка у даний контрольний момент часу випробування.

За отриманими значеннями будується графік залежності максимального моменту від часу випробування. Порівнюючи поточне значення максимального моменту випробуваної балки із діючим моментом, що визначається за формулою:

$$M_{0d} = \frac{Q_{0d} L^2}{8}. \quad (9)$$

Формула (8) застосовується з огляду на гіпотезу плоских перерізів з припущенням, що нейтральна лінія проходить через центр тяжіння перерізу балки. Для описання нерівномірності деформування балкового елемента із тріщинами застосовується підхід, що описаний в [2, 8, 12]. Цей підхід полягає у застосуванні середнього значення кривизни. Для цього визначається у кожний момент часу середня кривизна ригеля за формулою:

$$\chi_{m,t} = (\varepsilon_{bm,t} + \varepsilon_{sm,t}) \cdot h_0^{-1}, \quad (10)$$

де $\varepsilon_{bm,t}$ – середня деформація бетону;
 $\varepsilon_{sm,t}$ – середня деформація арматурних стержнів;
 h_0 – відстань між арматурними стержнями та верхнім краєм перерізу ригеля.

Середні деформації бетону та арматурної сталі визначаються згідно із рекомендаціями Eurocode 2 за формулами:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{bm,t} &= \psi_b \varepsilon_b, \\ \varepsilon_{sm,t} &= \psi_s \varepsilon_s, \end{aligned} \quad (11)$$

де коефіцієнт усереднення деформацій $\psi_b = \psi_s = 0.9$;

$\varepsilon_b, \varepsilon_s$ – деформації крайнього стиснутого шару бетону та розтягнутої арматури відповідно.

Для апробації запропонованого уточненого методу було розглянуто залізобетонний ригель, переріз якого та схема його армування наведені на рис. 10.

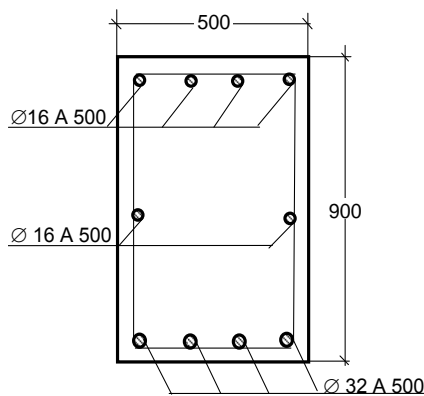


Рис. 10. Параметри перерізу залізобетонного ригеля

Залізобетонний ригель виготовлений з бетону класу міцності С 30/42.

З врахуванням отриманої уточненої температурної залежності коефіцієнта зниження міцності бетону для розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонних ригелів були побудовані відповідні діаграми деформації бетону за умови нагрівання. Побудовані діаграми зображені на рис. 11.

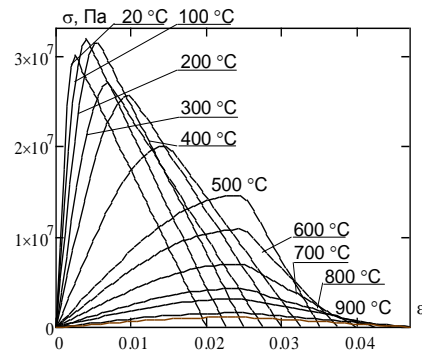


Рис. 11. Діаграми деформування бетону класу С 30/42 (вісь абсцис – відносна деформація, вісь ординат – напруження у бетоні)

Для розрахунку розподілів температур виконано тепловий розрахунок за допомогою розв'язування диференціального рівняння теплопровідності з використанням рекомендацій [11–14] за методом кінцевих різниць. Отримані температурні розподіли наведені на рис. 12.

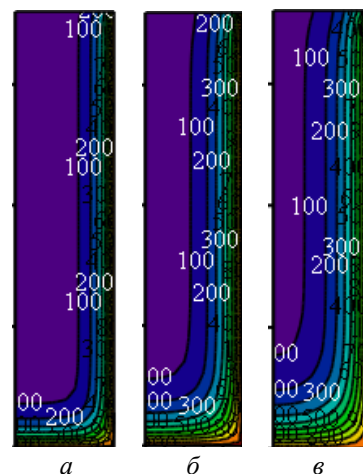


Рис. 12. Результати розв'язку теплової задачі для залізобетонного ригеля 500×900 мм

У результаті виконаного розрахунку був визначений час втрати несучої здатності – 95 хв. Цей час був визначений з огляду на отриманий діючий у цьому ригелі момент. Відповідно до технічних умов $M = 267,5$ кНм (приблизно 0,3 від руйнівального навантаження).

Обґрунтування адекватності результатів ідентифікації міцнісних характеристик бетону залізобетонних ригелів.

Для оцінювання адекватності результатів прогнозування функціонування залізобетонних балок, що отримані за методикою інтерпретації цих температурних вимірювань у результаті високотемпературних випробувань без прикладання механічного навантаження, використовуємо дані експерименту з прикладанням механічного навантаження.

Для проведення аналізу обираємо результати високотемпературних випробувань залізобетонних балок, технічні параметри яких подані у табл. 1.

На рис. 13 наведені схеми перерізів досліджуваних балок.

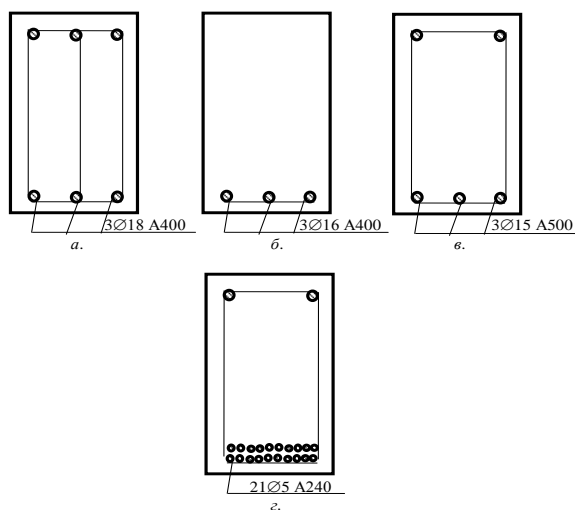


Рис. 13. Схеми перерізів залізобетонних балок

Температурні дані були отримані за показниками термопар, схема розташування яких подана на рис. 14.

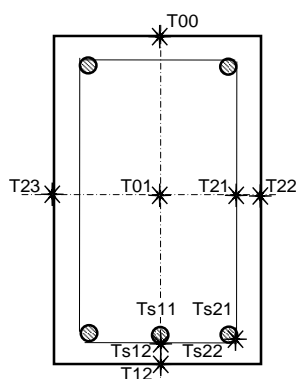


Рис. 14. Схема розташування термопар у перерізі балок

Дійсність отриманих результатів інтерполяції оцінювали за допомогою критерію Фішера.

Дисперсія адекватності визначається за формулою:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^5 (U_i^{met} - \overline{U_i^{test}})^2}{5}, \quad (12)$$

де U_i^{met} та U_i^{test} – відповідно значення часу настання граничного стану балок у хвилиах, отримані за досліджуванням та у результаті проведення

випробувань за даними роботи [2].

Дисперсію відтворюваності визначаємо за формулою:

$$S_{vid}^2 = \frac{\sum_{i=1}^5 (\overline{U_i^{test}} - U_i^{test})^2}{5}. \quad (13)$$

Критичне значення F -критерію обираємо відповідно до ДСТУ ISO 2854:2008.

Результати аналізу наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Параметри залізобетонних балок для перевірки адекватності результатів інтерполяції

Найбільше відхилення, хв	Найбільше середнє відхилення, %	Дисперсія відтворюваності, S_{cn}^2
6	10,9	8,7

Дані табл. 1 вказують на те, що їхня похибка складає не більше 11%, що показує високу ефективність удосконаленого методу. Критерій Фішера не перевищує табличного значення.

Висновки і перспективи подальших досліджень

Шляхом проведених досліджень було вирішено актуальну науково-технічну задачу щодо дослідження закономірності зниження міцності бетону у залежності від температури нагрівання в умовах стандартних вогневих випробувань. При цьому, зокрема, можна виділити такі основні результати:

1. Була розроблена експериментальна методика з обґрунтуванням кількості та параметрів дослідних зразків, системи контрольованих показників для ідентифікації коефіцієнтів зниження міцності бетону та схеми розташування температурних датчиків у внутрішніх шарах ригеля, а також проведені вогневі випробування залізобетонного ригеля при використанні розробленої методики.

2. У результаті проведених вогневих випробувань ригеля шляхом вимірювань температури та деформації зразків було отримано набір контрольованих даних для ідентифікації коефіцієнтів зниження міцності бетону залізобетонного ригеля, піддано-го випробуванням.

3. Використовуючи запропонований підхід та дані вогневих випробувань, було досліджено закономірність зміни коефіцієнта зниження міцності бетону залізобетонного ригеля залежно від температури нагрівання в умовах вогневих випробувань та отримана регресійна залежність, що описує дану закономірність у вигляді: $k_c(\theta) = 1 + 1.505 \cdot 10^{-3} \theta - 7.123 \cdot 10^{-6} \theta^2 + 6.655 \cdot 10^{-9} \theta^3 - 1.921 \cdot 10^{12} \theta^4$.

4. Досліджена адекватність результатів ідентифікації зміни міцності бетону у залежності від температури залізобетонного ригеля шляхом їх порівняння із даними, відомими з літератури, у результаті чого показано, що отримані дані є достатньо точними, оскільки розбіжність з теоретичними та експериментальними даними у середньому становлять 10,9%, а критерій Фішера не перевищує табличного значення.

Література

1. *Analysis and prediction methods for the static properties of reinforced concrete beams under fire* / C. Liu, B. Zhou, X. Guo, C. Liu, L. Wang // *Structures*. – 2023. – Vol. 47. – P. 2319–2330. – DOI: [10.1016/j.istruc.2022.12.041](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.12.041).
2. Поздєєв С. В. Розвиток наукових основ визначення меж вогнестійкості несучих залізобетонних конструкцій : дис. ... д-ра техн. наук : 21.06.02 – пожежна безпека / Поздєєв Сергій Валерійович ; Нац. ун-т цивільного захисту України. – Харків, 2012. – 385 с.
3. Kodur V. Comparative fire behavior of reinforced concrete beams made of different concrete strengths / V. Kodur, S. Banerji // *Proceedings of the 11th International Conference on Structures in Fire (SiF2020)*, Brisbane (Australia), 30 November – 2 December, 2020 yr. – Brisbane (Australia) : The University of Queensland, 2020. – P. 254–261. – DOI: [10.14264/bd10594](https://doi.org/10.14264/bd10594).
4. *Best Practice Guidelines for Structural Fire Resistance Design of Concrete and Steel Buildings*. NIST Technical Note 1681 / ed. by L. T. Phan, T. P. McAllister, J. L. Gross, M. J. Hurley. – Gaithersburg, MD (USA) : National Institute of Standards and Technology, 2010, 199 p. – Regime of access: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/technicalnotes/nist.tn.1681.pdf>, free (date of the application: 20.11.2023).
5. Johnson R. P. *Composite Structures of Steel and Concrete: Beams, Slabs, Columns and Frames for Buildings* / R. P. Johnson, Y. C. Wang. – 4th ed. – Hoboken, NJ (USA) : Wiley-Blackwell, 2018. – 288 p.
6. *Guide for the Design of Fire Resistant Barriers and Structures* / J. P. England, S. A. Young, M. C. Hui, N. Kurban. Melbourne (Australia) : Building Control Commission, 2000. – 254 p.
7. *Probabilistic thermo-mechanical finite element analysis for the fire resistance of reinforced concrete structures* / R. C. S. de Souza, M. Andreini, S. la Mendola, J. Zehfuß, C. Knaust // *Fire Safety Journal*. – 2019. – Vol. 104. – P. 22–33. – DOI: [10.1016/j.firesaf.2018.12.005](https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.12.005).
8. Щіпець С. Д. Метод визначення температурних полів у перерізах несучих стін за результатами їх випробувань на вогнестійкість / С. Д. Щіпець // *Науковий вісник Українського науково-дослідного інституту пожежної безпеки*. – 2014. – № 1 (29). – С. 79–84. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvundipb_2014_1_14, вільний (дата звернення: 20.11.2023).
9. Lie T. T. *Fire Temperature-Time Relations* / T. T. Lie // *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* / ed. by P. J. DiNenno, D. Drysdale, C. L. Beyler, W. D. Walton, R. L. P. Custer, J. R. Hall, J. M. Watts. – 3rd ed. – Quincy, MA (USA) : National Fire Protection Association, 2002. – Ch. 4–8. – P. 4–201–4–208. – Regime of access: <https://rakandotcom.files.wordpress.com/2016/05/sfpe.pdf>, free (date of the application: 20.11.2023).
10. Інтерпретація результатів вогневих випробувань залізобетонних балок для оцінки їхньої межі вогнестійкості / С. В. Поздєєв, Ю. А. Отрош, А. М. Омельченко, С. Д. Щіпець, М. О. Кропива // *Промислове будівництво*

та інженерні споруди. – 2014. – № 2. – С. 14–18. – Режим доступу: https://urdisc.com.ua/ri/info/2_14.pdf#page=14, вільний (дата звернення: 20.11.2023).

11. *Improvement of the Assessment Method for Fire Resistance of Steel Structures in the Temperature Regime of Fire under Realistic Conditions* / T. Shnal, S. Pozdieiev, O. Nuianzin, S. Sidnei // *Materials Science Forum*. – 2020. – Vol. 1006. – P. 107–116. – DOI: [10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.107](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.107).
12. Kovalyshyn V. Concrete walls conduct under the fire influence investigation using final elements method / V. Kovalyshyn, S. Pozdieiev, S. Fedchenko // *Emergency Situations: Prevention and Liquidation : Collection of Scientific Papers*. – Cherkasy : Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Protection of Ukraine, 2018. – Issue 4. – P. 89–98. – Regime of access: <https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/handle/123456789/6482>, free (date of the application: 20.11.2023).
13. Wickström U. A Scheme for Verification of Computer Codes for Calculating Temperature in Fire Exposed Structures. SP Report1999:36 / U. Wickström, J. Pålsson. – Borås (Sweden) : SP Swedish National Testing and Research Institute, 1999. – 31 p. – Regime of access: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:962108/FULLTEXT01.pdf>, free (date of the application: 20.11.2023).
14. Lawson R. M. *Design of Fabsec Cellular Beams in Non-Composite and Composite Applications (for Both Normal Temperature and Fire Engineering Conditions)* / R. M. Lawson, D. Oshatogbe, G. M. Newman. – Wetherby (UK) : Fabsec Limited, 2006. – 89 p.

References

1. Liu, C., Zhou, B., Guo, X., Liu, C., & Wang, L. (2023). Analysis and prediction methods for the static properties of reinforced concrete beams under fire. *Structures*, 47, 2319–2330. DOI: [10.1016/j.istruc.2022.12.041](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.12.041)
2. Pozdieiev, S. V. (2012). *Development of scientific basis for determining fire resistance limits of load-bearing reinforced concrete structures* [Doctoral dissertation]. National University of Civil Protection of Ukraine [in Ukrainian]
3. Kodur, V., & Banerji, S. (2020). Comparative fire behavior of reinforced concrete beams made of different concrete strengths. *Proceedings of the 11th International Conference on Structures in Fire (SiF2020)*, (pp. 254–261). The University of Queensland. DOI: [10.14264/bd10594](https://doi.org/10.14264/bd10594)
4. Phan, L. T., McAllister, T. P., Gross, J. L., & Hurley M. J. (Eds.). (2010). *Best Practice Guidelines for Structural Fire Resistance Design of Concrete and Steel Buildings*. NIST Technical Note 1681. National Institute of Standards and Technology. Retrieved from <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/technicalnotes/nist.tn.1681.pdf>
5. Johnson, R. P., & Wang, Y. C. (2018). *Composite Structures of Steel and Concrete: Beams, Slabs, Columns and Frames for Buildings*. Wiley-Blackwell.
6. England, J. P., Young, S. A., Hui, M. C., & Kurban, N. (2000). *Guide for the Design of Fire Resistant Barriers and Structures*. Building Control Commission.
7. De Souza, R. C. S., Andreini, M., La Mendola, S., Zehfuß, J., & Knaust, C. (2019). Probabilistic thermo-mechanical finite element analysis for the fire resistance of reinforced concrete structures. *Fire Safety Journal*, 104, 22–33. DOI: [10.1016/j.firesaf.2018.12.005](https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.12.005)
8. Shchিপets, S. D. (2014). Method for determining the temperature pattern in the cross section of the load-bearing wall as a result of their fire test. *Scientific Bulletin of the Ukrainian Research Institute of Fire Safety*, 1(29), 79–84. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvundipb_2014_1_14 [in Ukrainian]

9. Lie, T. T. (2002). Fire Temperature-Time Relations. In P. J. DiNunno, D. Drysdale, C. L. Beyler, W. D. Walton, R. L. P. Custer, J. R. Hall, & J. M. Watts (Eds.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (3rd ed., pp. 4–201–4–208). National Fire Protection Association. Retrieved from <https://rakandotcom.files.wordpress.com/2016/05/sfpe.pdf>
10. Pozdieiev, S. V., Otrosh, Yu. A., Omelchenko, A. M., Shchipets, S. D., & Kropyva, M. O. (2014). Interpretation of the results of fire tests of reinforced concrete beams to assess their fire resistance limit. *Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy*, (2), 14–18. Retrieved from https://urdisc.com.ua/tl/info/2_14.pdf#page=14 [in Ukrainian]
11. Shnal, T., Pozdieiev, S., Nuianzin, O., & Sidnei, S. (2020). Improvement of the Assessment Method for Fire Resistance of Steel Structures in the Temperature Regime of Fire under Realistic Conditions. *Materials Science Forum*, 1006, 107–116. DOI: [10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.107](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.107)
12. Kovalyshyn, V., Pozdieiev, S., & Fedchenko, S. (2018). Concrete walls conduct under the fire influence investigation using final elements method. *Emergency Situations: Prevention and Liquidation*, (4), 89–98. Retrieved from <https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/handle/123456789/6482>
13. Wickström, U., & Pålsson, J. (1999). *A Scheme for Verification of Computer Codes for Calculating Temperature in Fire Exposed Structures*. SP Report 1999:36. SP Swedish National Testing and Research Institute. Retrieved from <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:962108/FULLTEXT01.pdf>
14. Lawson, R. M., Oshatogbe, D., & Newman, G. M. (2006). *Design of Fabsec Cellular Beams in Non-Composite and Composite Applications (for Both Normal Temperature and Fire Engineering Conditions)*. Fabsec Limited.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.Л. Ватуля, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна.

Автор: ФЕДЧЕНКО Світлана Миколаївна
науковий співробітник наукового відділу
Черкаський інститут пожежної безпеки імені
Героїв Чорнобиля Національного університету
цивільного захисту України
E-mail – svitlanafedchenko@ukr.net
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3294-2214>

STUDY OF STRENGTH REDUCTION OF REINFORCED CONCRETE BEAM UNDER FIRE TESTS

S. Fedchenko

Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

The article presents the results of studies of the regularity of changes in the concrete strength of reinforced concrete beams depending on the heating temperature of its inner layers under fire conditions by interpreting the temperature and deformation measurement results. To obtain the data necessary to identify patterns of concrete strength reduction, we developed a method of fire tests that substantiates the experimental base, design, and number of samples, type, number, and location of measuring devices, as well as the method for statistical processing of measurement data. Based on the developed methodology, we conducted fire tests. As a result of the tests, we obtained a set of measurement results in the form of time dependences of temperature indicators at individual cross-section points and the dependence of the maximum beam deflection on time, which are necessary to identify the coefficients of reduction in concrete strength of reinforced concrete beams under fire test conditions. We then used the proposed method to identify regularities in the reduction of concrete strength of a reinforced concrete beam, which includes interpolation using the obtained temperature indicators at individual points of the cross-section of the beam, which allows us to set the temperature at any point of the cross-section at any control time of measurements based on the approximation of isotherms by parabolas with a variable indicator of their degree. At the next stage, to identify the dependence of the concrete strength of reinforced concrete beams, we used a method based on the compilation of systems of equilibrium equations of internal layers in the cross-section of a reinforced concrete beam, in which the unknown values are the coefficients of reduction of concrete strength for a range of temperatures every 100 °C in the range from 20 °C up to 1200 °C, provided that the reduction factor for the specified heating temperature of the inner layer of concrete is determined by linear interpolation. Using the proposed approach, we obtained appropriate results for a reinforced concrete beam subjected to fire tests. The obtained dependences of the strength reduction coefficient were used to evaluate the fire resistance of reinforced concrete beams and crossbars by the calculation method based on the deformation model. By comparing the obtained data with the data from the literature, we established the adequacy of the calculated data based on the relative deviation and Fisher's test. The totality of the obtained data allows for improving the calculation method for evaluating reinforced concrete crossbars and beams by increasing the accuracy of the data obtained.

Keywords: reinforced concrete beam, fire tests, concrete strength reduction coefficient, fire resistance.