

УДК 624.012

ІНТЕРПРЕТАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВОГНЕВИХ ВИПРОБУВАНЬ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК ДЛЯ ОЦІНКИ ЇХНЬОЇ МЕЖІ ВОГНЕСТІЙКОСТІ

Запропоновано метод, який дозволяє на основі даних, одержаних під час вогневих випробувань при тристоронньому нагріванні за стандартною температурною кривою пожежі у вогневій печі без механічного навантаження згідно з вимогами стандартів, оцінити межу вогнестійкості залізобетонних балок прямокутного перерізу за несучою здатністю при застосуванні міцнісного розрахунку. Проведений розрахунок щодо оцінки межі вогнестійкості залізобетонної балки за результатами вогневих випробувань показав ефективність цього методу.

A method that allows using data obtained during the fire tests at trilateral heated by the standard temperature curve fire in the firing furnace without mechanical load as required by the standards to evaluate the fire resistance limit of reinforced concrete beams of rectangular section bearing capacity for the application of strength calculation. Our calculation in evaluating the fire resistance of reinforced concrete beams under fire tests results showed the effectiveness of this method.

Ключові слова: вогневі випробування, вогнестійкість, протипожежний захист, температура, стандартний режим, залізобетонна балка, несуча здатність, інтерполяція, арматурний стержень, характеристики матеріалів, напруження, деформації, термопара.

Забезпечення пожежної безпеки залізобетонних балок, які є складовою частиною перекриттів будівель, – це актуальна проблема сьогодні. Адже виведення їх з експлуатації призводить до руйнування будівлі в цілому. Однією з причин підвищеної небезпеки залізобетонних балок є зміна характеристик їх міцності та деформативності під час та після пожежі.

Проектування протипожежного захисту будівель і споруд може ґрунтуватися на результатах експериментальних випробувань на вогнестійкість. У теперішній час в Україні значення межі вогнестійкості визначають шляхом випробувань за національним стандартом України [1] або за стандартами на методи випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій конкретних видів (колон, балок, перекриттів, покриттів, дверей та воріт, підвісних стель, кабельних проходок тощо). Але експериментальний метод потребує приладів для визначення величини навантажень та вимірювання деформацій, крім цього він не дає змоги проконтролювати величину навантаження та деформації при руйнуванні зразка в експериментальній печі.

Можливо визначати межу вогнестійкості за розрахунковими методами. При цьому як вихідні необхідно використовувати дані, отримані шляхом випробувань для перевірки достовірності.

Єврокоди допускають систему, засновану на комбінації результатів випробувань і чисельного моделювання для будівель і споруд. Розрахунково-експериментальний метод розрахунку поєднує в різному порядку експери-



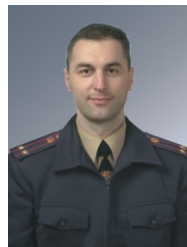
С.В. Поздєєв
начальник кафедри будівельних конструкцій Академії пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля, м. Черкаси, д.т.н., доцент



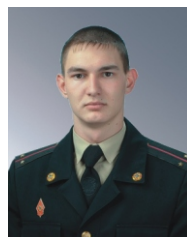
Ю.А. Отрош
доцент кафедри будівельних конструкцій Академії пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля, м. Черкаси, к.т.н., доцент



А.М. Омельченко
здобувач Академії пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля, м. Черкаси



С.Д. Щіпець
здобувач Академії пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля, м. Черкаси



М.О. Кропива
ад'юнк Академії пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля, м. Черкаси

ментальні та розрахункові процедури. Більшість таких методів засновано на попередньому експериментальному визначенні параметрів властивостей матеріалів досліджуваних конструкцій або розподілу температур за поперечним перерізом і наступним визначенням межі вогнестійкості при використанні одного з розрахункових методів.

Зазначені розрахунково-експериментальні методи, на наш погляд, позбавлені характерних недоліків, притаманних методам, заснованим на вогневих випробуваннях, і розрахунковим, оскільки вони дозволяють вилучити з експериментальних установок навантажувальне обладнання та контрольно-вимірювальні прилади, пов'язані з вимірюванням зусиль та деформацій. Це, в свою чергу, дає змогу значно зменшити трудовитрати, вартість підготовки та проведення експериментів і унеможливує обвалення випробовуваного зразка разом із вантажами у простір камери печі і, як наслідок, ушкодження її огорожувальних конструкцій та футерівки, що мають найбільшу вартість. Застосування розрахункової інтерпретації також дозволяє підвищити точність, оскільки виключається вплив невідповідності габаритних розмірів та граничних умов випробовуваного елемента як складової відповідної структури.

Метою роботи є розроблення методу, який дозволяє на основі даних, одержаних під час вогневих випробувань при тристоронньому нагріванні за стандартною температурною кривою пожежі у вогневій печі без механічного навантаження згідно з вимогами стандартів [3] та [1], оцінити межу вогнестійкості залізобетонних балок прямокутного перерізу за несучою здатністю при застосуванні міцнісного розрахунку (рис. 1).

Запропонована методика дає змогу проводити випробування балкових елементів будівельних конструкцій (балок, ригелів, перемичок, елементів ферм, рам, арок тощо) на вогнестійкість за температурним режимом згідно з [1] без прикладання механічного навантаження. Методика використовується для визначення межі вогнестійкості балкових елементів будівельних конструкцій (далі – балок), які піддаються впливу вогню з трьох боків.

Метод враховує зміни механічних властивостей кожного шару бетону і арматурної сталі залежно від їх температури нагріву. Принцип

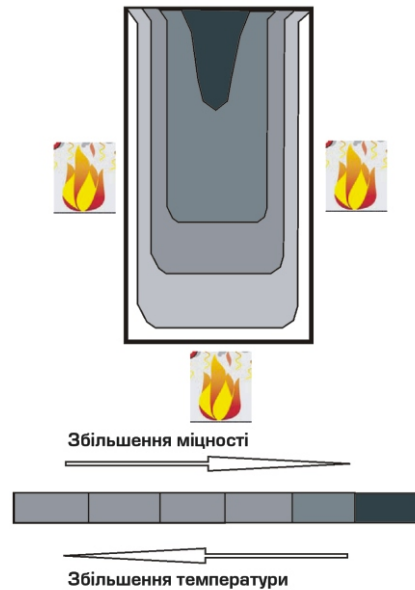


Рис. 1. Зміна міцності в перерізі балки в залежності від температури

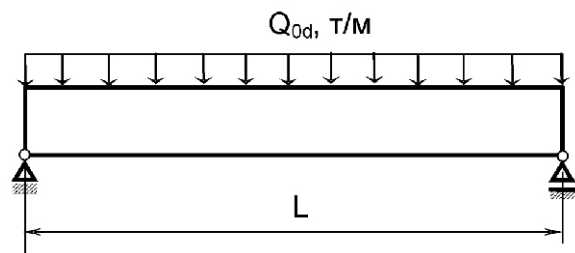


Рис. 2. Розрахункова схема балки

зміни механічних властивостей бетону і арматурної сталі показаний на рис. 1.

Зазначена зміна враховується при розгляді параметрів напружено-деформованого стану в перерізі балки відповідно до шарнірної схеми її закріплення, геометричних параметрів, класу міцності бетону і арматурної сталі (рис. 2).

Рівняння, що описують напружено-деформований стан, взяті відповідно до рекомендацій [2]. Для врахування зміни механічних властивостей у залежності від температури була використана інтерполяція температур у вузлових точках перерізу при застосуванні значень температур, які виміряні у контрольних точках перерізу під час проведення випробувань.

На рис. 3 наведені схеми розбиття перерізу на прямокутні зони з вузловими точками, де будуть визначатися температури шляхом інтерполяції, та розташування контрольних точок, де визначатиметься температура відповідно до рекомендацій стандарту [3, п. 8.1.2].

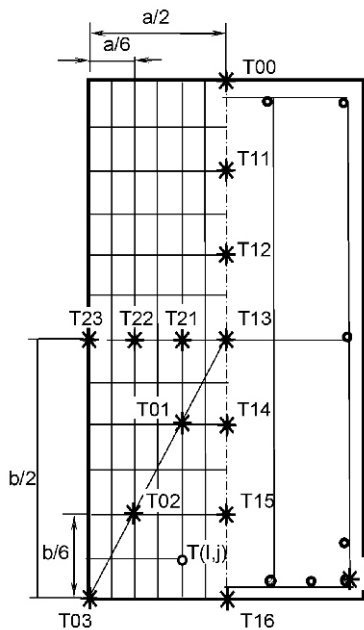


Рис. 3. Схема розташування термопар та розбиття перерізу балки на зони

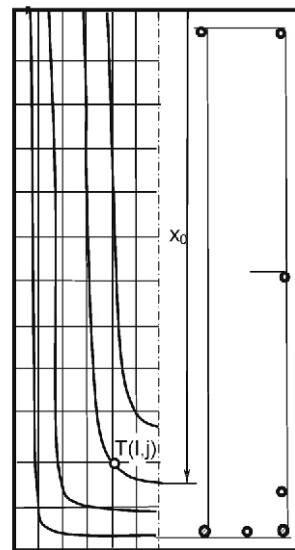


Рис. 4. Розрахункова схема балки

Спосіб інтерполяції полягає у виконанні таких процедур.

1. За показниками термопар T00, T11–T16 знаходиться вираз, який апроксимує залежність температури від вертикальної координати вздовж поздовжньої осі перерізу для кожного контрольного моменту часу k :

$$T_{v_{k,i}} = T_{00_k} + (T_{16_k} - T_{00_k}) \frac{i}{m}^{Q_{v_k}}, \quad (1)$$

де Q_v – показник ступеня, що визначається шляхом мінімізації середньквадратичної нев'язкості з використанням виразу

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^m [T_{iM} - T_{iE}]^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

де m – кількість просторово-часових контрольних точок; T_{iE} , T_{iM} – експериментальне та розраховане значення температури в i -й просторовій контрольній точці у контрольний момент часу k .

Схема наближення ізотерм у перерізі балки наведена на рис. 4.

2. Задаються початкові параметри функції, що наближує ізотерму:

$$j = x_0 + 1 - \frac{i}{x_0} \frac{p_0 (p_{\max} - p_0) x_0^n}{p_0 (p_{\max} - p_0) x_0^n}, \quad (3)$$

де $p_0 = 1,8$, $p_{\max} = 15$ мінімальний та максимальний показники ступеня функції, що апроксимує ізотерми; x_0 – початкове значення координати i функції, що апроксимує ізотерми; $n = n_0$ – пара-

метр, який піддається пошуку при наближенні поверхні для інтерполяції температур у вузлових точках.

3. У кожній контрольній точці визначається x_0 шляхом розв'язку виразу (3) як рівняння при відомих значеннях i, j . За отриманим значенням x_0 визначається температура у контрольній точці за виразом (1).

4. Варіюючи параметр n , визначається таке його значення, при якому вираз (2) досягає мінімуму. Алгоритм пошуку мінімуму заснований на методі Ньютона.

5. Застосовуючи описаний алгоритм, знаходиться значення температур у вузлових точках перерізу у кожний контрольний момент часу випробування.

6. У кожній зоні визначається середня температура за чотирма вузловими точками.

7. Температури в арматурних стержнях, де не відбувалося вимірювання, визначаються за алгоритмом як i для будь-якої вузлової точки перерізу.

8. Міцнісна задача розв'язується виходячи із значення максимального прогину балки, що визначається за формулою

$$D = \frac{L^2}{400b}. \quad (4)$$

За даним значенням максимального прогину визначається максимальна кривизна за формулою

$$\frac{48D}{5L^2} = 24 \cdot 10^{-3} b^{-1}. \quad (5)$$

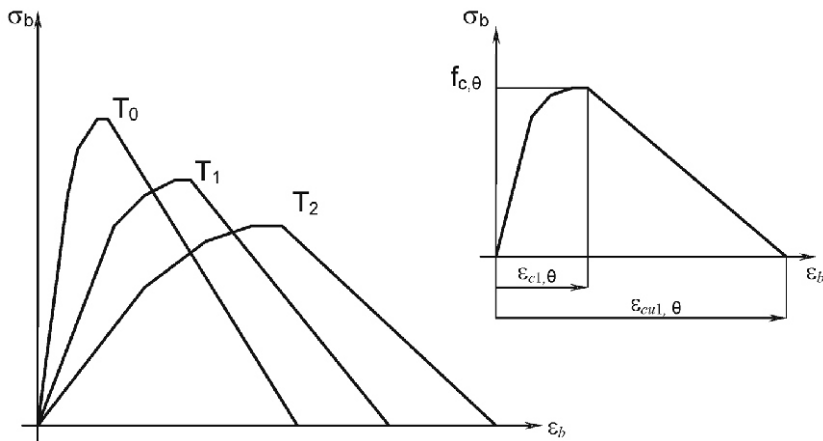


Рис. 5. Механічні властивості бетону за високих температур

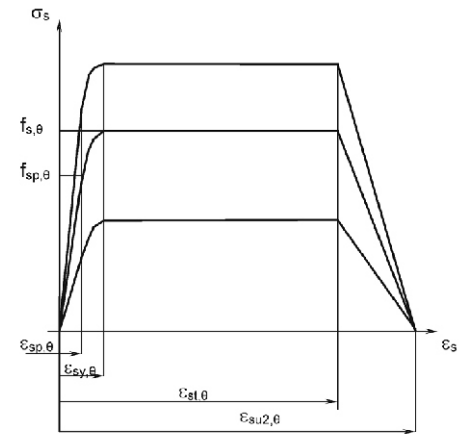


Рис. 6. Механічні властивості арматурної сталі за високих температур

9. За відомими найбільшою кривизною, середніми значеннями температури кожної зони і температури арматурних стержнів, а також координатами даної зони і центра перерізу арматурного стержня визначаються середні напруження кожної з зон та арматурних стержнів за відповідними діаграмами «напруження-деформація», що рекомендовані нормативним документом [2].

Діаграми деформування бетону у залежності від температури нагріву наведені на рис. 5 і будуються за наступними формулами:

при $0 < \epsilon_b < \epsilon_{cl}$,

$$\sigma_b(\epsilon_b) = \frac{3 \epsilon_b f_{c,\theta}}{\epsilon_{cl}} \left(1 - 2 \frac{\epsilon_b}{\epsilon_{cl}} \right); \quad (6)$$

при $\epsilon_{cl} < \epsilon_b < \epsilon_{cul}$,

$$\sigma_b(\epsilon_b) = f_{c,\theta} \frac{f_{c,\theta} (\epsilon_b - \epsilon_{cl})}{\epsilon_{cul} - \epsilon_{cl}},$$

де ϵ_b – відносна деформація бетону; $f_{c,\theta}$ – розрахунковий опір бетону на стисання, залежний від температури нагріву бетону; ϵ_{cl} – гранична відносна деформація зростаючої гілки діаграми; ϵ_{cul} – найбільша відносна деформація діаграми.

Діаграми деформування арматурної сталі в залежності від температури нагріву наведені на рис. 6 і будуються за формулами:

при $0 < \epsilon_s < \epsilon_{sp}$,

$$\sigma_s(\epsilon_s) = E_s \epsilon_s,$$

при $\epsilon_{sp} < \epsilon_s < \epsilon_{st}$,

$$\sigma_s(\epsilon_s) = f_{sp,\theta} \left(\frac{\epsilon_s - \epsilon_{sp,\theta}}{\epsilon_{st,\theta} - \epsilon_{sp,\theta}} \right)^{0,5},$$

при $\epsilon_{st} < \epsilon_s < \epsilon_{su2}$,

$$\sigma_s(\epsilon_s) = f_{sy,\theta} \left[1 - \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{st,\theta})}{(\epsilon_{su2,\theta} - \epsilon_{st,\theta})} \right],$$

при $\epsilon_{su2} < \epsilon_s < \epsilon_s$, $\sigma_s = 0$,

де q, p, k – деякі параметри, що знаходяться за формулами:

$$q^2 = \frac{(\epsilon_{st,\theta} - \epsilon_{sp,\theta}) (\epsilon_{st,\theta} - \epsilon_{sp,\theta})}{(\epsilon_{st,\theta} - \epsilon_{sp,\theta})} \left(\frac{k}{E_s} \right);$$

$$p^2 = k (\epsilon_{st,\theta} - \epsilon_{sp,\theta}) E_s, \quad k^2;$$

$$k = \frac{(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})^2}{(\epsilon_{st,\theta} - \epsilon_{sp,\theta}) E_s 2 (f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})}.$$

До формул (7), (8) входять такі параметри: ϵ_{sp} – деформація, за якої настає межа пропорційності;

$\epsilon_{sy} = 0,02$ – деформація, за якої настає межа текучості;

$\epsilon_{st} = 0,15$ – деформація, за якої починається спадна гілка діаграми;

$\epsilon_{su2} = 0,2$ – найбільша деформація;

f_{sp} – межа пропорційності сталі;

f_{sy} – межа міцності сталі;

E_s – модуль пружності сталі, залежний від температури нагріву.

За відомими напруженнями кожної з зон перерізу балки та арматурних стержнів визначається момент, при якому досягається критична кривизна балки, з використанням формули

$$M_{\lim,fi} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sigma_{bi,j}(\sigma_{bi,j}) A_{bi,j} d_{bi,j}^l}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sigma_{sdi}(\sigma_{sdi}) A_{sdi} d_{sdi}^l}, \quad (9)$$

де $\sigma_{bi,j}(\sigma_{bi,j})$ – напруження у бетоні, які визначаються за формулами (6), для середнього значення температури поточної зони бетону у перерізі;

$\sigma_{sdi}(\sigma_{sdi})$, $\sigma_{sdi}(\sigma_{sdi})$ – напруження у робочій та додатковій арматурі, які визначаються за формулами (7), (8);

$d_{bi,j}$, 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.

Деформації:

$x_{bi,j}$, де $x_{bi,j}$ – відстань центра зони до горизонтальної центральної осі перерізу;

$x_{sdi,j}$, де $x_{sdi,j}$ – відстань осі додаткового арматурного стержня до горизонтальної центральної осі перерізу;

$x_{si,j}$, де $x_{si,j}$ – відстань осі робочого арматурного стержня до горизонтальної центральної осі перерізу;

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

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

За формулою (9) будується графік залежності внутрішнього моменту від кривизни балки. При побудові графіка фіксується момент із найбільшим значенням, який розглядається як максимальний момент, що 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

$$M_{0d} = Q_{0d} L^2 / 8, \quad (10)$$

визначається настання граничного стану втрати несучої здатності.

Висновки.

1. Розроблений метод дозволяє проводити випробування балкових елементів будівельних конструкцій (балок, ригелів, перемичок, елементів ферм, рам, арок тощо) на вогнестійкість за температурним режимом згідно з ДСТУ Б В.1.1-4-98 без прикладання механічного навантаження і використовується для визначення межі вогнестійкості балкових елементів будівельних конструкцій, які піддаються впливу вогню з трьох боків.

2. Проведений розрахунок за розробленим методом щодо оцінки межі вогнестійкості залізобетонної балки за результатами вогневих випробувань показав його ефективність.

[1] ДСТУ Б В.1.1-4-98*. Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги / Держбуд України. – К.: Держбуд України, 2005. – 18 с.

[2] ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012 Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1992-1-2:2004, IDT).

[3] ДСТУ Б В.1.1-13:2007 Захист від пожежі. Балки. Метод випробування на вогнестійкість.

[4] EN 1993 Eurocode: 3 Проектування сталевих конструкцій EN 1993-1-2:2005 Part 1-2: Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість.

[5] EN 1994 Eurocode 4: Проектування сталезалізобетонних конструкцій EN 1994-1-2:2005 Частина 1-2: Основні правила – Вогнестійкість.

Надійшла 25.02.2014 р.