ISSN 2071-1859 (Print), ISSN 2521-6635 (Online)
УДК 624.012.45:614.841.4 https://doi.org/10.33271/crpnmu/86.217

© Д.М. Зезюков[1], М.М. Махінько[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

МЕТОДИКА НАТУРНИХ ВИПРОБУВАНЬ ТА АНАЛІТИЧНОЇ ОЦІНКИ ЗАЛИШКОВОЇ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІСЛЯ ПОЖЕЖІ

D. Zeziukov[1], https://orcid.org/0000-0001-7451-992X
M. Makhinko[1] https://orcid.org/0000-0001-5541-8672
[1]Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

METHODOLOGY OF FIELD TESTING AND ANALYTICAL ASSESSMENT OF THE RESIDUAL LOAD-BEARING CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES AFTER FIRE

Мета. Розробити та обґрунтувати методику оцінювання технічного стану і залишкової несучої здатності залізобетонних конструкцій після пожежі на основі комплексного застосування натурного обстеження, неруйнівного контролю та лабораторних випробувань.

Методика. За вихідну основу використано матеріали відбору пошкоджених елементів, вимірювання прогинів і тріщин, визначення залишкової міцності та жорсткості, а також вимог безпеки під час випробувань авторами. Методика розширена з урахуванням сучасної міжнародної практики fib, Eurocode, ISO та ACI. Запропоновано багаторівневу схему діагностики.

Результати. Наведено аналітичні залежності для коефіцієнтів фізико-механічних характеристик. Обґрунтовано необхідність визначення температурного профілю по перерізу. Показано, що оцінювання лише міцності бетону є недостатнім. Запропоновано послідовність «пожежний сценарій – карта пошкоджень – NDT – лабораторний контроль – розрахунок – натурне навантаження – інтегральна оцінка».

Наукова новизна. Встановлено аналітичні залежності для кількісного оцінювання основних залишкових фізико-механічних характеристик залізобетонних конструкцій після пожежі. Запропоновано систему коефіцієнтів (k_{fc}), (k_E), (k_M), (k_{cr}) та (k_b), що характеризують ступінь збереження відповідних властивостей після пожежного впливу. Удосконалено методику післяпожежного оцінювання шляхом інтеграції результатів візуального обстеження, неруйнівного та лабораторного контролю, натурних випробувань і методу скінченних елементів у єдину систему кількісної оцінки технічного стану та залишкової несучої здатності.

Практична значимість. Практичним результатом є алгоритм вибору між подальшою експлуатацією, ремонтом, підсиленням або демонтажем. Запропонований інтегральний критерій призначений для прозорого порівняння результатів різних видів діагностики. Методика орієнтована на реальні конструкції, для яких історія температури та властивості матеріалів відомі частково, тому передбачає калібрування непрямих методів за контрольними зразками, що підвищує достовірність інженерного висновку та безпеку.

Ключові слова: *залізобетонні конструкції, пожежа, залишкова несуча здатність, неруйнівний контроль, прогин, тріщиностійкість, зчеплення арматури, оцінювання пошкоджень.*

Вступ. Пожежа створює для залізобетонної конструкції особливий вид пошкодження, оскільки її наслідки визначаються не лише максимальною температурою, а й тривалістю нагрівання, швидкістю нагріву та охолодження, температурним градієнтом у перерізі, умовами зволоження, типом заповнювача, складом бетону, початковим рівнем навантаження, схемою обпирання та можливістю розвитку температурних деформацій. Натурні випробування необхідні через неможливість повністю врахувати всі фактори розрахунком; їх метою є отримання достовірніших даних про фактичну міцність, жорсткість, тріщиностійкість і можливість подальшої експлуатації пошкоджених елементів. Сучасна міжнародна практика розглядає післяпожежне обстеження як поетапний процес, що починається з безпечного доступу та збору даних про пожежу, продовжується візуальним і інструментальним обстеженням, лабораторним контролем матеріалів і завершується перевіркою конструктивної системи та обґрунтуванням ремонтно-відновлювального рішення. fib Bulletin 46 окремо систематизує методи випробування бетону після пожежі – від кернів, склерометрії та ультразвуку до хімічного, рентгенодифракційного та мікроструктурного аналізу і розглядає післяпожежне обстеження та ремонт як окремий етап життєвого циклу конструкції [1–2]. ACI CODE-562-25 також виходить із performance-based підходу до оцінювання, ремонту та підсилення існуючих бетонних конструкцій і прямо включає пожежу до переліку чинників, що мають враховуватися під час оцінювання [3]. Для України питання оцінювання вогнестійкості та роботи конструктивної системи в умовах пожежі узгоджується з ДБН В.1.2-7:2021. Чинні норми передбачають перевірку відповідності основній вимозі пожежної безпеки з урахуванням граничних станів, розрахункових методів і, за потреби, випробувань, при цьому розрахунки мають враховувати просторову роботу конструкції, а випробування застосовують, коли розрахункові методи не забезпечують достатньої достовірності [4]. Отже, натурне випробування після пожежі доцільно розглядати не як ізольовану процедуру, а як частину системної оцінки.

Аналіз попередніх досліджень. Однією з ключових проблем є значна варіабельність залишкової міцності бетону. Огляд 53 наукових робіт і 1240 експериментальних точок, виконаний Shahraki et al., показав, що розкид результатів визначається, зокрема, видом заповнювача, складом бетону та методикою випробування; авторами запропоновано ймовірнісні моделі нормованої залишкової міцності та проведено їх зіставлення з коефіцієнтами Eurocode [5]. Це підтверджує, що єдина функція «міцність–температура» не може безумовно замінити фактичне обстеження конкретного об'єкта.

Важливим напрямом є неруйнівний контроль. Wróblewski та Stawiski показали можливість застосування ультразвукової швидкості імпульсу для оцінювання залишкової міцності бетону після реальної пожежі, зокрема для встановлення глибини пошкодженого шару. Автори підкреслюють, що при однобічному нагріванні пошкодження є найбільшим біля поверхні та зменшується з віддаленням від неї [6]. Огляд Moura et al. підтверджує перспективність UPV, але водночас вказує, що залежність між UPV і залишковою міцністю суттєво залежить від складу бетону, тому калібрування за конкретним матеріалом є принципово важливим [7].

Окрему групу становлять дослідження зчеплення арматури з бетоном. Wang et al. розробили аналітичну модель післяпожежного bond-slip та показали, що деградація зчеплення впливає на залишкову несучу здатність і вибір ремонтного рішення [8]. Експерименти Das, Bošnjak та Sharma за ISO 834 із різною тривалістю та схемою нагрівання показали істотне зниження післяпожежної міцності й жорсткості зчеплення [9]. Подальші дослідження підтверджують, що тип випробування, довжина анкеровки, положення стержня, товщина захисного шару та поперечне армування можуть впливати на абсолютні значення залишкової міцності зчеплення [10, 11].

Аналітичні дослідження післяпожежної роботи плит показують, що оцінювати необхідно не лише залишкову несучу здатність, а й залишкову пластичність і деформаційну здатність. Shachar та Dancygier для різних сценаріїв пожежі виконували розрахунок температурного профілю по висоті перерізу, після чого будували залишкові діаграми момент–кривизна. Автори дійшли висновку, що одна лише перевірка несучої здатності не гарантує адекватної оцінки післяпожежного стану [12].

Формулювання невирішеної частини проблеми та мети. Таким чином, невирішеною частиною проблеми залишається інтеграція натурних випробувань, локальних характеристик матеріалів і розрахункового моделювання в єдиний алгоритм, який дозволяє переходити від карти пошкоджень до кількісної оцінки залишкової несучої здатності та обґрунтованого рішення щодо подальшої експлуатації. Метою статті є розширення методики натурних випробувань залізобетонних елементів після пожежі шляхом інтеграції візуальної діагностики, неруйнівних і руйнівних випробувань, статичного навантаження та аналітичної оцінки залишкових властивостей матеріалів і конструкції з урахуванням сучасної міжнародної практики. Для досягнення мети поставлено такі завдання: 1) систематизувати порядок відбору елементів за зонами пожежного впливу; 2) визначити мінімально необхідний набір контрольованих параметрів; 3) запропонувати аналітичні коефіцієнти для кількісної оцінки залишкової міцності, жорсткості та тріщиностійкості; 4) включити до методики контроль зчеплення арматури з бетоном; 5) сформувати алгоритм прийняття рішення «експлуатація – ремонт – підсилення – демонтаж».

Основна частина (Результати).

Загальна концепція післяпожежного обстеження. Авторами рекомендується поділ будівлі на ділянки за інтенсивністю пожежного впливу, відбір елементів у кожній зоні та на межі зон, а також проведення трьох основних типів робіт: попереднього освідчення, випробування пробним навантаженням без руйнування, випробування демонтованих елементів до руйнування (за потреби), та з обов'язковим етапом формування карти температурного та пошкоджувального поля.

Сучасний підхід до діагностики доцільно представити як чотири рівні (Таблиця 1): Level 0 – збір даних про пожежу та безпеку доступу; Level 1 – візуальне картування пошкоджень; Level 2 – неруйнівний і локально-руйнівний контроль матеріалів; Level 3 – конструктивний розрахунок і натурне навантаження. Перевага такої схеми полягає в тому, що дорогі та потенційно небезпечні випробування виконуються лише після локалізації найбільш критичних зон.

Таблиця 1

Рівні післяпожежної діагностики

Рівень	**Основні операції**	**Результат**	**Рішення**
0. Безпека та дані	Сценарій пожежі; час; вентиляція; гасіння; обвалення; доступ	Початкові умови та обмеження	Допуск/ заборона робіт
1. Візуальний	Тріщини; відшарування; сколи; оголення арматури; залишковий прогин	Карта пошкоджень і зон	Вибір точок контролю
2. Матеріали	UPV; склерометрія; керни; арматура; зчеплення	Локальні характеристики	Калібрування розрахунку
3. Конструк-тивний	Прогини; тріщини; деформації; контрольне навантаження	Rpost, Epost, fpost, wcr	Експлуатація /ремонт/ підсилення/ демонтаж

Відбір елементів та зонування пошкоджень. З урахуванням сучасних підходів до обстеження рекомендується виділяти щонайменше чотири категорії: A – зона обвалення або критичного пошкодження; B – зона сильного теплового впливу з відшаруванням захисного шару, оголенням арматури або значними деформаціями; C – зона середнього впливу з тріщинами та локальним зниженням показників; D – контрольна зона без ознак пожежного пошкодження. Зона D необхідна як еталон для порівняння результатів неруйнівного контролю та фактичних властивостей бетону.

Відбір зразків проводиться на межі аварійної зони та зон сильних і слабких пошкоджень. Для характерної ділянки приймається три екземпляри, а результати найбільш пошкоджених елементів поширюються на аналогічну ділянку. Сучасна практика потребує обережнішого статистичного узагальнення: три зразки можуть бути достатніми для попереднього рішення, але не повинні автоматично вважатися репрезентативними для всієї будівлі, якщо пожежне поле є неоднорідним. Доцільно використовувати стратифіковану вибірку за типом елемента, орієнтацією поверхні, товщиною захисного шару та інтенсивністю пошкодження.

Контроль матеріалів після пожежі. До базового набору слід включати: фактичні геометричні розміри; міцність бетону на стиск; ультразвукову швидкість; склерометричний індекс; стан поверхневого шару; глибину відшарування; положення, діаметр і кількість арматурних стержнів; товщину захисного шару; стан арматури; за потреби – механічні властивості сталі та характеристики зчеплення. fib Bulletin 46 систематизує аналогічний комплекс, доповнюючи його хімічним, рентгенодифракційним і мікроструктурним аналізом [2].

Особливо важливо розділяти оцінювання поверхневого шару і ядра перерізу. При однобічній пожежі температура в бетоні зменшується з відстанню від

обігріваної поверхні, тому середнє значення міцності керна може приховувати локально пошкоджену зону. Ультразвукове профілювання по глибині дозволяє деталізувати межу пошкодження [6, 7]. Тому рекомендується вимірювати UPV не в одній точці, а по сітці, яка охоплює поверхневу зону, зону захисного шару та ядро.

Аналітична модель залишкових властивостей. Для кількісного переходу від результатів обстеження до оцінки залишкової несучої здатності доцільно поєднати локальні коефіцієнти деградації матеріалів із нелінійним методом скінченних елементів (МСЕ). Такий підхід особливо корисний для конструкцій зі складною схемою обпирання, нерівномірним нагріванням, просторовим перерозподілом зусиль і значними залишковими деформаціями. У сучасній практиці МСЕ доцільно застосовувати за послідовною thermal–mechanical схемою: спочатку визначається температурне поле, після чого його результати передаються до механічної моделі для оцінки залишкового напружено-деформованого стану.

Запропонована схема такого розрахунку наведена на рис. 1.

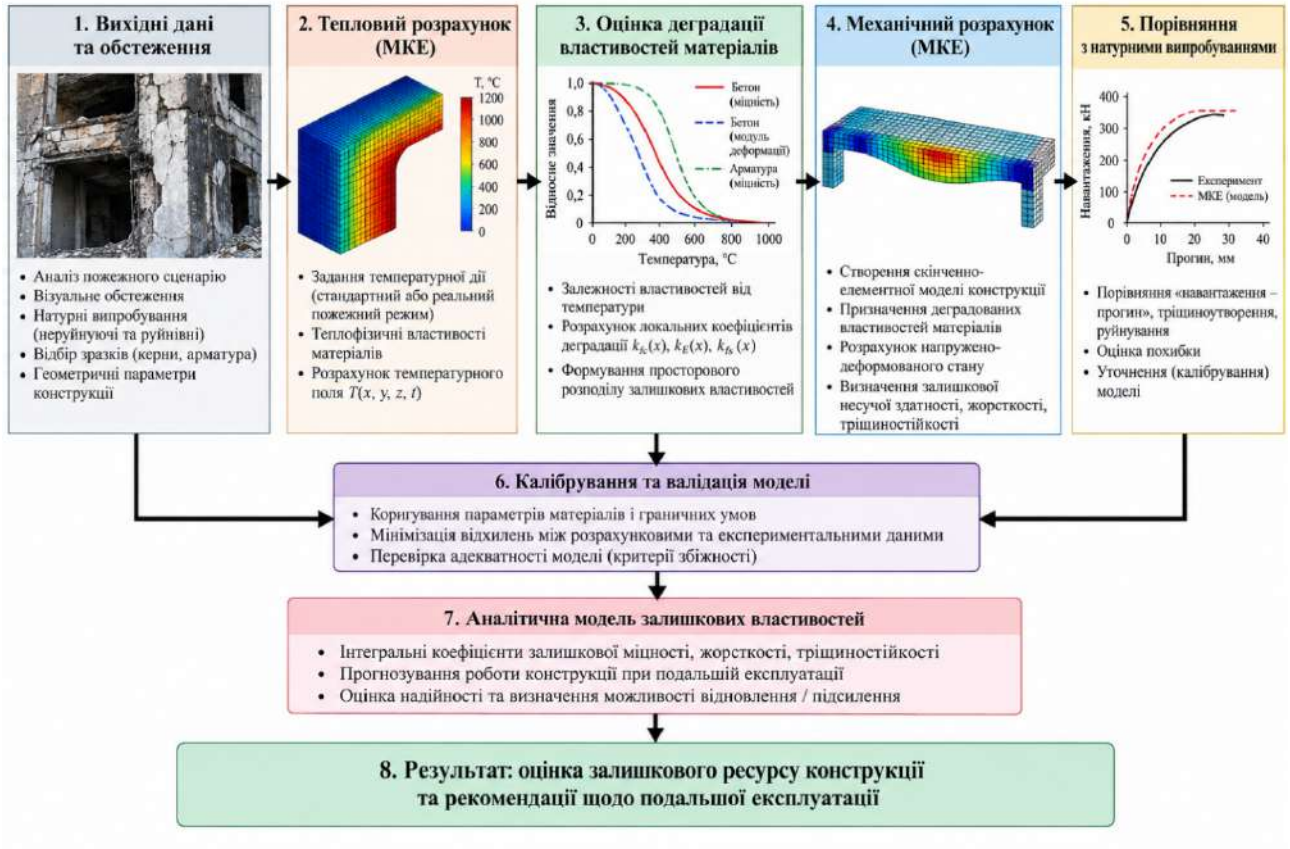


Рис. 1. Послідовність thermal–mechanical МСЕ-оцінювання залишкової несучої здатності залізобетонної конструкції після пожежі.

Теплову задачу в МСЕ можна записати у загальному вигляді як

$$\rho c(T)\ \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla\cdot\left[\lambda(T)\nabla T\right]\ +\ \dot{q} \qquad (1)$$

де T – температура; ρ – густина матеріалу; $c(T)$ – питома теплоємність; $\lambda(T)$ – теплопровідність; $\dot{q}$ – внутрішнє тепловиділення. На межі конструкції задаються

умови конвективного та радіаційного теплообміну, а за можливості – фактична температурно-часова історія пожежі. Якщо така інформація відсутня, стандартизована пожежна крива може бути використана як розрахунковий сценарій, але результат слід трактувати саме як сценарне відтворення.

Після отримання температурного поля $T(x, t)$ для кожної точки перерізу вводяться залишкові властивості матеріалів. Для бетону та арматури доцільно використовувати просторово змінні коефіцієнти деградації:

$$k_{fc(x)} = f_{c,res(x)} / f_{c,0}; \quad k_{fs(x)} = fy,_{res(x)} / f_{y,0}; \quad k_{E(x)} = Ec,_{res(x)} / E_{c,0}.$$

Індекс x характеризує положення точки або скінченного елемента в перерізі. На відміну від моделі з одним усередненим коэффициентом для всього перерізу, МСЕ дозволяє враховувати градієнт пошкодження: поверхневий шар при однобічному нагріванні може мати істотно нижчу міцність і жорсткість, тоді як ядро перерізу зберігає значну частину початкових властивостей.

Для приведення неоднорідного поля деградації до еквівалентної характеристики перетину можна використовувати інтегральний коефіцієнт залишкової міцності бетону:

$$kfc,int = \frac{\int Ac\ kfc(x)\ \cdot \sigma ref\,(x)\ dA}{\int Ac\ \sigma ref\,(x)\ dA} \tag{2}$$

де: Ac – площа бетонного перерізу, а $\sigma_{ref}(x)$ – вагова функція, яка враховує фактичну участь окремої області бетону в сприйнятті зусилля.

Для попередньої оцінки можна прийняти $\sigma_{ref}(x)=1$; для згинаного елемента доцільніше задавати вагування за напруженнями або внутрішніми зусиллями, отриманими з перерізного розрахунку. Це дозволяє пов'язати локальні результати NDT і кернів із глобальною характеристикою сечения.

Для оцінки залишкової несучої здатності згинаного елемента інтегральна умова рівноваги може бути представлена як

$$M_{Rd,res} = \int A_c\ \cdot f_{c,res(x)}\ \cdot z_{c(x)}\ dA + \sum A_{si}\ \cdot f_{y,res,i}\ \cdot z_i$$

де: $z_{c(x)}$ та z_i – плечі внутрішніх сил відносно прийнятої осі; A_{si} – площа і-го стержня арматури.

У повному нелінійному МСЕ ця залежність реалізується через діаграми σ–ε бетону й сталі, тріщиноутворення, пластичність, контакт і геометричну нелінійність. Тому наведена формула є фізичною інтерпретацією результату та зручним спрощеним представленням секційної рівноваги.

Перевага МСЕ полягає у можливості розділити післяпожежне оцінювання на три стадії: I – початковий стан конструкції до пожежі; II – термомеханічна робота під час нагрівання; III – залишкова робота після охолодження. Такий підхід дає змогу врахувати навантаження, що діяло до пожежі, температурні деформації, пластичні деформації та зміну властивостей матеріалів під час нагрівання і після охолодження [16].

Практична послідовність МСЕ включає: 1) побудову геометричної моделі; 2) задання фактичного армування та захисного шару; 3) розрахунок температурного поля; 4) визначення температурно- та післяпожежно-залежних властивостей бетону й сталі; 5) введення зон локального пошкодження, тріщин і відшарування; 6) послідовний розрахунок охолодження; 7) прикладання експлуатаційного або випробувального навантаження; 8) отримання кривих «навантаження–прогин», «момент–кривизна» та граничної несучої здатності.

МСЕ не повинен використовуватися незалежно від натурних даних. Найбільш обґрунтованим є калібрований підхід: результати UPV, склерометрії, кернів, дослідження арматури та натурного навантаження використовуються для коригування локальних параметрів моделі. Після цього виконують порівняння розрахункових і експериментальних значень.

Відносну похибку за граничною навантажувальною здатністю можна визначити як

$$\varepsilon_P = |P_{u,FE} - P_{u,exp}| \,/\, P_{u,exp} \tag{4}$$

а похибку за прогином під контрольним навантаженням – як

$$\varepsilon_f = |f_{FE(Pc)} - f_{exp(Pc)}| \,/\, f_{exp(Pc)} \tag{5}$$

Для комплексної перевірки моделі можна сформувати функцію невідповідності:

$$J = w_P\,\varepsilon_P + w_f\,\varepsilon_f + w_w\,\varepsilon_w + w_{cr}\,\varepsilon_{wcr}, \quad \Sigma w_i = 1 \tag{6}$$

де: w_P, w_f, w_w та w_{cr} – вагові коефіцієнти для граничного навантаження, прогину, залишкової деформації та ширини тріщин. Чим менше J, тим краще узгоджуються результати МСЕ з натурними випробуваннями. Ця функція може використовуватися для калібрування параметрів бетону, арматури, зчеплення та локальних зон пошкодження.

Для узагальненої оцінки залишкової несучої здатності елемента доцільно ввести коефіцієнт

$$k_{FE} = P_{u,res} \,/\, P_{u,0} \tag{7}$$

де: $P_{u,res}$ – гранична навантажувальна здатність після пожежі за МСЕ, а $P_{u,0}$ – гранична здатність тієї самої моделі без пожежного пошкодження. Цей показник доцільно зіставляти з експериментальним коефіцієнтом $kexp = P_{u,exp,res} \,/\, P_{u,exp,0}$. Відношення k_{FE}/k_{exp}, близьке до одиниці, характеризує адекватність моделі щодо зміни несучої здатності.

Для переходу від окремого елемента до всієї конструктивної системи можна визначати системний коефіцієнт залишкової несучої здатності як мінімальне значення по критичних елементах:

$$K_{sys} = \min_{(j)} \left(k_{FE,j} \right) \tag{8}$$

де: j – номер критичного елемента або розрахункового перерізу.

Для неоднорідного пожежного пошкодження це принципово важливо: локальна втрата несучої здатності одного елемента може спричинити перерозподіл

зусиль і зміну роботи всієї системи. Тому для рам, плит і просторових каркасів МСЕ має перевагу перед ізольованим розрахунком окремого перерізу [18, 19].

Таким чином, МСЕ доцільно розглядати не як альтернативу натурному випробуванню, а як засіб екстраполяції локально виміряних параметрів на всю конструктивну систему. Натурні дані визначають фактичний рівень пошкодження, а МСЕ дозволяє оцінити його наслідки для напружено-деформованого стану, перерозподілу зусиль і залишкової несучої здатності. Така комбінація особливо доцільна для будівель, де кількість елементів велика, а можливість їх руйнівного випробування обмежена.

Виходячи з низки проведених обстежень будівель авторами, пошкоджені вогнем елементи мають прискорене утворення тріщин і різке збільшення прогинів на початкових етапах навантаження. Для практичної оцінки доцільно визначати три характеристики: залишковий прогин після охолодження fres, приріст прогину під контрольним навантаженням Δf та ширину тріщин w_{cr}.

$$\delta f = f_{res} / l \tag{9}$$

де: l – розрахунковий проліт.

Контрольні залежності, а саме: відносний залишковий прогин $t = (f_{залиш} - f_{почат})/l$ та критерій необоротної втрати жорсткості через порівняння фактичного прогину з граничним значенням доцільно доповнювати коефіцієнтом k_{EI} залишкової жорсткості.

Для тріщиностійкості доцільно фіксувати не тільки факт появи першої тріщини, а й функцію $w_{cr(P)}$, тобто залежність ширини розкриття від навантаження. Рекомендованим є ступінчасте збільшення навантаження, обмеження частки навантаження та витримка під контрольним рівнем.

Традиційна оцінка після пожежі часто зосереджується на міцності бетону та сталі, хоча реальна несуча здатність залізобетонного елемента залежить від передачі зусиль через контакт «сталь–бетон». Дослідження 2022–2025 років показують суттєву деградацію залишкової міцності зчеплення, причому в окремих випадках вона зменшується сильніше, ніж міцність бетону на стиск [8–11].

Для інженерного оцінювання пропонується коефіцієнт:

$$k_b = \tau_{b,res} / \tau_{b,0} \tag{10}$$

де $\tau_{b,res}$ – залишкова міцність зчеплення, а $\tau_{b,0}$ – характеристика контрольної ділянки. Якщо безпосереднє випробування зчеплення неможливе, слід використовувати непрямі ознаки: оголення стержнів, поздовжні тріщини вздовж арматури, локальне відшарування захисного шару, втрату анкеровки та дані про максимальну температуру в зоні стержня. Однак такі непрямі ознаки не повинні підміняти випробування у критичних перерізах.

Для уникнення ситуації, коли один високий показник компенсує критично низький інший, пропонується використовувати консервативний вектор критеріїв. Для кожного елемента визначають:

$$K = \min(k_M, k_{EI}, k_{cr}, k_b) \tag{11}$$

де: k_{cr} – нормований показник тріщиностійкості. Величину k_{cr} можна задавати як відношення допустимої контрольної ширини тріщини до фактичної за контрольного навантаження, обмежуючи результат одиницею:

$$k_{cr} = \min(1;\ w_{lim} / w_{cr,exp}) \tag{12}$$

Запропонований критерій K (Таблиця 2) призначений як інструмент інтеграції результатів. Його перевага полягає у прозорості: якщо хоча б один критичний механізм – несуча здатність, жорсткість, тріщиностійкість або зчеплення – не забезпечує прийнятний рівень, рішення не може ґрунтуватися лише на інших показниках.

Таблиця 2

Система кількісних показників

Показник	**Позначення**	**Спосіб визначення**	**Фізичний зміст**
Залишкова міцність	k_M	Статичне випробування / розрахунок	Здатність сприймати навантаження
Залишкова жорсткість	k_{EI}	Прогини та кривизна	Деформативність елемента
Тріщиностійкість	k_{cr}	wcr(P), перша тріщина	Експлуатаційна придатність
Зчеплення	k_b	Випробування / непряма оцінка	Передача зусиль сталь–бетон
Інтегральний критерій	K	min (k_M, k_{EI}, k_{cr}, k_b)	Консервативна узагальнена оцінка

Для практичного застосування пропонується наступна послідовність. На першому етапі фіксуються дані про пожежу: тривалість, ймовірний температурний режим, місце осередку, вентиляція, дія води та інших засобів гасіння. На другому етапі створюється геометрична карта пошкоджень із прив'язкою до осей будівлі. На третьому – проводиться сітковий неруйнівний контроль і визначаються місця відбору кернів. На четвертому – досліджуються арматура та захисний шар. На п'ятому – виконується розрахунок залишкової несучої здатності. На шостому – проводиться контрольне статичне випробування найбільш репрезентативних елементів. На сьомому – результати порівнюються з розрахунком і приймається рішення щодо подальшої експлуатації.

Порівняння з міжнародною практикою. Міжнародні джерела демонструють перехід від оцінювання окремого матеріального показника до performance-based оцінки всієї конструктивної системи. fib Bulletin 108 розглядає пожежну інженерію як процес із чітко заданими цілями та допускає використання розширених розрахункових і ймовірнісних методів [14]. ISO 834-1:2025 визначає актуальні загальні вимоги до випробувань на вогнестійкість у стандартизованих температурно-часових режимах [15]. Водночас після реальної пожежі стандартизована крива не повинна автоматично прийматися як фактична історія

температури; вона є еталонним режимом випробування, тоді як оцінювання реальної будівлі потребує реконструкції сценарію або використання фактичних інструментальних даних.

Наукова новизна та практична значущість. Наукова новизна запропонованого підходу полягає в інтеграції відомих експериментальних і розрахункових інструментів у єдину послідовність післяпожежного оцінювання. Запропоновано: стратифіковане зонування пошкоджень; розділення поверхневого шару і ядра перерізу при NDT; введення окремого коефіцієнта зчеплення k_b; перехід від одиничних контрольних показників до вектора k_M, k_{EI}, k_{cr}, k_b; та консервативний інтегральний критерій $K = \min(k_M, k_{EI}, k_{cr}, k_b)$.

Практична значущість полягає у можливості скоротити кількість небезпечних і дорогих випробувань без втрати інформативності: спочатку локалізуються неоднорідні зони за допомогою візуального обстеження та NDT, після чого руйнівні випробування виконуються тільки в репрезентативних перерізах. Для кожного елемента формується цифровий профіль «пошкодження – властивості – деформації – несуча здатність», що може бути безпосередньо використаний у розрахунковій моделі або системі моніторингу.

Обмеження методики. Запропоновані аналітичні залежності не слід трактувати як заміну нормативного розрахунку або випробувань. Найбільша невизначеність виникає, коли невідома максимальна температура арматури, реальна тривалість нагрівання, умови охолодження або початкові властивості матеріалів. Крім того, результати UPV і склерометрії залежать від складу бетону та стану поверхні; тому їх доцільно використовувати для картування неоднорідності та калібрувати кернами, а не застосовувати як єдиний критерій безпеки [6, 7].

Для відповідальних конструкцій із суттєвими пошкодженнями необхідно виконувати просторовий розрахунок конструктивної системи з урахуванням перерозподілу зусиль, температурних деформацій, втрати жорсткості окремих елементів і можливого пошкодження вузлів. У разі невідповідності розрахункових і експериментальних результатів пріоритет має надаватися консервативній оцінці та додатковим дослідженням.

Висновки.

1. Натурні випробування залізобетонних конструкцій після пожежі мають розглядатися як завершальний етап багаторівневої діагностики, а не як ізольована процедура. Запропонована методика обґрунтовано поєднує зонування пошкоджень, відбір елементів, вимірювання прогинів і тріщин, контрольне навантаження та вимоги безпеки.

2. Сучасна міжнародна практика підтверджує необхідність комбінування візуального огляду, неруйнівних методів, кернів, випробувань арматури, аналізу температурного профілю та конструктивного розрахунку. f_{ib}, ACI та ISO формують performance-based основу такого підходу [2, 3, 14, 15].

3. Для кількісної оцінки доцільно використовувати коефіцієнти залишкової міцності k_{fc}, жорсткості k_E та несучої здатності k_M, а також окремий коефіцієнт післяпожежного зчеплення k_b. Це дозволяє відокремити деградацію матеріалу від зміни роботи конструктивної системи.

4. Оцінювання лише міцності бетону недостатнє. Після пожежі необхідно контролювати залишковий прогин, кривизну, ширину тріщин, стан арматури та зчеплення сталь–бетон. Дослідження останніх років показують, що деградація зчеплення може бути суттєвішою за зниження міцності бетону на стиск [8–11].

5. Запропонований критерій $K = \min(k_M, k_{EI}, k_{cr}, k_b)$ може використовуватися як консервативний інструмент узагальнення результатів. Він не є нормативним коефіцієнтом і має застосовуватися разом із чинними нормативними розрахунками та експертним висновком.

6. Перспективним напрямом подальших досліджень є створення експериментальної бази для післяпожежних конструкцій України з одночасною реєстрацією UPV, склерометрії, температурного профілю, характеристик кернів, арматури, зчеплення та результатів натурного навантаження. Це дозволить калібрувати локальні залежності «NDT – залишкова властивість» та перейти до ймовірнісної оцінки надійності.

Перелік посилань

1. ДБН В.1.2-6:2021. (2022). Основні вимоги до будівель і споруд. Механічний опір та стійкість. Міністерство розвитку громад та територій України.
2. International Federation for Structural Concrete. (2008). Fire design of concrete structures – Structural behaviour and assessment (fib Bulletin No. 46). fib. https://doi.org/10.35789/fib.BULL.0046
3. ACI Committee 562. (2025). ACI CODE-562-25: Assessment, repair, and rehabilitation of existing concrete structures – Code requirements and commentary. American Concrete Institute.
4. ДБН В.1.2-7:2021. (2022). Основні вимоги до будівель і споруд. Пожежна безпека. Міністерство розвитку громад та територій України.
5. Shahraki, M., Hua, N., Elhami-Khorasani, N., Tessari, A., & Garlock, M. (2023). Residual compressive strength of concrete after exposure to high temperatures: A review and probabilistic models. *Fire Safety Journal, 135*, 103698. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2022.103698
6. Wróblewski, R., & Stawiski, B. (2020). Ultrasonic assessment of the concrete residual strength after a real fire exposure. *Buildings, 10* (9), 154. https://doi.org/10.3390/buildings10090154
7. Moura, M. A. do N., Moreno, A. L., & Ferreira, G. C. dos S. (2023). Ultrasonic testing on evaluation of concrete residual compressive strength: A review. *Construction and Building Materials, 373*, 130887. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130887
8. Wang, T. C., Gao, W. Y., Hu, L. L., Hamed, E., Bai, Y. L., Zeng, J. J., & Yang, J. (2022). Analytical model for predicting the post-fire bond behavior between steel bars and concrete. *Construction and Building Materials, 343*, 128129. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128129
9. Das, A., Bošnjak, J., & Sharma, A. (2023). Post-fire bond behaviour of reinforcement in concrete considering different bonded lengths and position of rebars. *Engineering Structures, 296*, 116908. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116908
10. Bošnjak, J., Das, A., & Sharma, A. (2024). Influence of concrete cover and transverse reinforcement on residual post-fire bond performance of reinforcement in concrete. *Engineering Structures, 314*, 118191. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118191
11. Tajik, N., Elhami-Khorasani, N., Ranade, R., & Tessari, A. (2025). Experimental study of post-fire bond strength between steel reinforcing bars and concrete using beam-end specimens. *Engineering Structures, 336*, 120450. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120450
12. Shachar, Y. M., & Dancygier, A. N. (2020). Assessment of reinforced concrete slabs post-fire performance. *Fire Safety Journal, 111*, 102932. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102932
13. European Committee for Standardization. (n.d.). *EN 1992-1-2: Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design*. CEN.

14. International Federation for Structural Concrete. (2023). Performance-based fire design of concrete structures (fib Bulletin No. 108). fib. https://doi.org/10.35789/fib.BULL.0108
15. International Organization for Standardization. (2025). *ISO 834-1:2025: Fire-resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements*. ISO.
16. Gong, F., Jiang, X., Gamil, Y., Iftikhar, B., & Thomas, B. S. (2023). An overview on spalling behavior, mechanism, residual strength and microstructure of fiber reinforced concrete under high temperatures. *Frontiers in Materials, 10*. https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1258195
17. Ramzi, S., & Hajiloo, H. (2023). The effects of supplementary cementitious materials (SCMs) on the residual mechanical properties of concrete after exposure to high temperatures – Review. *Buildings, 13* (1), 103. https://doi.org/10.3390/buildings13010103
18. Non-destructive assessment of fire-damaged RC columns by experimental modal analysis and sonic testing: Development, validation and application to real cases. (2026). *Buildings, 16* (11), 2155. https://doi.org/10.3390/buildings16112155
19. Cai, W. L., Mao, J. Y., Dong, K., Miao, J. J., Gu, Z. J., et al. (2023). Calculation method of the residual bearing capacities of concrete T-shaped beams considering the effect of fire cracks. *Fire Technology, 59*, 305–329. https://doi.org/10.1007/s10694-022-01324-0
20. Raouffard, M. M., & Nishiyama, M. (2016). Residual load bearing capacity of reinforced concrete frames after fire. *Journal of Advanced Concrete Technology, 14*(10), 625–633. https://doi.org/10.3151/jact.14.625
21. Cai, B., Li, B., & Fu, F. (2020). Finite element analysis and calculation method of residual flexural capacity of post-fire RC beams. *International Journal of Concrete Structures and Materials, 14*, Article 58. https://doi.org/10.1186/s40069-020-00428-7
22. Kodur, V. K. R., & Agrawal, A. (2020). A numerical approach for evaluating residual capacity of fire damaged concrete members. *Revista ALCONPAT, 10*(2), 230–242. https://doi.org/10.21041/ra.v10i2.483

ABSTRACT

Purpose. To develop and substantiate a methodology for assessing the technical condition and residual load-bearing capacity of reinforced concrete structures after fire exposure based on the comprehensive application of in-situ inspection, non-destructive testing, and laboratory testing.

Methods. The methodology is based on the results of sampling damaged structural elements, measurements of deflections and cracks, determination of residual strength and stiffness, as well as safety requirements for testing. The methodology was further developed with consideration of current international practices and provisions of fib, Eurocodes, ISO, and ACI. A multilevel diagnostic framework is proposed.

Results. Analytical relationships for the coefficients characterizing the residual physical and mechanical properties are presented. The necessity of determining the temperature profile across the cross-section is substantiated. It is demonstrated that assessing concrete strength alone is insufficient for a reliable evaluation of the post-fire condition of reinforced concrete structures. A diagnostic sequence is proposed: "fire scenario – damage map – NDT – laboratory testing – structural analysis – in-situ load testing – integrated assessment."

Originality. Analytical relationships have been established for the quantitative assessment of the principal residual physical and mechanical properties of reinforced concrete structures after fire exposure. A system of coefficients, namely (k_{fc}), (k_E), (k_M), (k_{cr}), and (k_b), is proposed to characterize the degree of preservation of the corresponding structural properties after fire exposure. The post-fire assessment methodology has been improved by integrating the results of visual inspection, non-destructive and laboratory testing, in-situ load testing, and the finite element method into a unified system for the quantitative assessment of the technical condition and residual load-bearing capacity.

Practical Significance. The practical outcome is an algorithm for selecting an appropriate course of action, including continued operation, repair, strengthening, or demolition. The proposed integrated criterion is intended to provide a transparent basis for comparing the results obtained from different diagnostic methods. The methodology is applicable to real structures for which the thermal history and material properties are only partially known; therefore, it provides for the calibration of indirect assessment methods using reference specimens, thereby increasing the reliability of engineering conclusions and ensuring structural safety.

Keywords: *reinforced concrete structures, fire, residual load-bearing capacity, non-destructive testing, deflection, crack resistance, reinforcement-to-concrete bond, damage assessment.*

дата першого надходження статті до видання	17.07.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	24.08.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.09.2026

© 2026. D. Zeziukov, M. Makhinko
Published by the Dnipro University of Technology on behalf of Collection of Research Papers of the National Mining University. ISSN 2521-6635 (Online) | ISSN 2071-1859 (Print). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.