

Рудешко І. В., Березовський А. І., Дагіль В.Г.

Черкаський Інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України

(вул. Онопрієнко, 8, Черкаси, 18024, Україна; email: andrey82-07@ukr.net, orcid.org/0000-0002-4043-1206,
orcid.org/0000-0001-7335-609X, orcid.org/0000-0003-1783-3837)

ВОГНЕСТІЙКІСТЬ БУДІВЕЛЬ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ЗМІНИ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІД ЧАС ПОЖЕЖІ

Проведено аналіз стану питання, щодо вогнестійкості будівель каркасного типу із врахуванням зміни напруженого стану конструкцій під час пожежі, досліджено експериментальну базу випробувань натуральних фрагментів будівель, проведено аналіз результатів випробувань натуральних фрагментів будівель, вивчений вплив спільної роботи будівельних конструкцій на зміну напруженого стану елементів каркасних будівель, зміну вогнестійкості елементів каркасу і будівлі у цілому. Представлені результати випробувань натуральних фрагментів будівель у м. Кардінгтон, стосовно перерозподілу напружень на стиках конструкцій, зміни статичної схеми плит перекриття, і їх впливу на поведінку колон рамних конструкцій під час пожежі. Розглянуто причини збільшення опорних моментів у нерозрізних конструкціях і сили, що виникають внаслідок стиснення теплового розширення конструкцій під час пожежі. Проведена порівняльна оцінка поведінки двохпільотних плит перекриття, залежно від способу їх армування.

Ключові слова: напружений стан будівельних конструкцій, клас вогнестійкості, спільна робота конструкцій, вогнестійкість, каркасні будівлі, монолітні каркаси, збірні каркаси, лабораторні і натуральні випробування на вогнестійкість, моделювання спільної роботи конструкцій.

Мета роботи: довести вплив спільної роботи будівельних конструкцій на вогнестійкість будівлі в цілому, внаслідок зміни напруженого стану її конструкцій під час пожежі.

Постановка проблеми. Багато сучасних нормативних документів, у тому числі і [1- 3], ґрунтуються на тому, що вогнестійкість окремої будівельної конструкції може бути визначена без врахування взаємозв'язків з іншими конструкціями будівлі чи споруди. Випробування на вогнестійкість проводять за стандартною методикою, що гарантує найменший клас вогнестійкості конструкції. Ці випробування трудомісткі, багато коштують і потребують використання спеціальних установок і обладнання [9]. Згідно аналізу випробувань на вогнестійкість, розроблені методи розрахунку класів вогнестійкості різних типів залізобетонних конструкцій, що складаються із теплотехнічного і статичного розрахунків [10]. Клас вогнестійкості окремої конструкції, також може бути визначена приблизно, за таблицями і рекомендаціями, отриманими на основі аналізу великої кількості випробувань залізобетонних елементів за стандартною методикою.

Такий підхід пов'язаний із оцінюванням вогнестійкості будівлі в цілому і відсутністю відповідної експериментальної бази. Оцінювання вогнестійкості будівель і споруд без врахування взаємних зв'язків між будівельними конструкціями було доцільним, коли будівництво монолітних взаємопов'язаних несучих каркасів було рідкістю. Використання монолітних каркасів для сучасних багатоповерхових і висотних цивільних і промислових будівель великих розмірів вимагає розробки відповідних науково обґрунтованих методів визначення вимог щодо їх вогнестійкості. Визначення класу вогнестійкості окремої залізобетонної конструкції характеризує її роботу під час пожежі без врахування спільної роботи із іншими конструкціями у будівлі чи споруді. Спільна робота перекриття із стінами і колонами, статична схема будівлі, монолітність конструкції, стики і армування елементів із врахуванням закріплення на опорах, впливають на клас вогнестійкості окремо взятих конструкцій і будівлі у цілому. Результати досліджень показують, що вогнестійкість згинаємих конструкцій, що входять до загальної системи будівлі і жорстко закріплені на опорах, у багатьох випадках підвищується. В той час, вогнестійкість конструкцій, що працюють на стиск, навпаки, зменшується. Це пояснюється зміною напруженого стану

будівельних конструкцій при пожежі внаслідок їх спільної роботи. Тобто всі конструкції працюють як єдина система, і тому відбувається перерозподіл напружень.

Випадки великих пожеж показують, що великі видовження конструкцій перекриття, що виникають у великих секціях будівлі, можуть привести до раптового руйнування несучих колон, а це, у свою чергу, спричиняє руйнування секції у цілому. Класи вогнестійкості будівельних конструкцій будівель і споруд можуть суттєво відрізнятись при їх спільній роботі від класів вогнестійкості, що отримані при лабораторних випробуваннях на вогнестійкість [4]. Результати обстежень пошкоджених при пожежі конструкцій будівель показують, що зміна напруженого стану конструкцій, спричинена їх спільною роботою може, як позитивно, так і негативно впливати на вогнестійкість будівлі у цілому. Тому, сучасне будівництво потребує особливої уваги, щодо вогнестійкості будівель і споруд у цілому.

На підставі вищезазначеного, актуальність даної проблеми очевидна.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивчення проблеми спільної роботи конструкцій будівель в умовах пожежі, а також зміни їх напруженого стану, проводиться протягом багатьох років. До теперішнього часу накопичений багатий досвід експериментального вивчення даної проблеми завдяки моделюванню спільної роботи будівельних конструкцій під час пожежі в умовах лабораторій. Проведений ряд великомасштабних досліджень натуральних фрагментів будівель, які надали дуже цінну наукову інформацію [10]. Разом із цим ці дослідження підтвердили необхідність подальшого вивчення даної проблеми, оскільки багато важливих питань (особливо аналітичного оцінювання вогнестійкості будівель), ще не вирішені.

Основний матеріал. Традиційний розрахунок на дію пожежі стосується експлуатаційних властивостей окремих елементів конструкцій (балки, колони, стіни, плити перекриття) [13]. У методиках аналізу (випробування на вогнестійкість за умов стандартної пожежі) не розглядається взаємодія конструктивних елементів у реальних каркасних будівлях зі сталі і залізобетону. Робота стиків (місця з'єднання конструкцій) в умовах пожежі або після вогневого впливу є дуже важливим фактором з точки зору збереження загальної стійкості несучої системи будівлі. Саме у цих місцях відбувається перерозподіл напружень і виникнення додаткових зусиль, що впливають на вогнестійкість будівлі у цілому. Тому, потрібно більш ретельно розглядати роботу стиків.

Найбільш загальний підхід, щодо проектування стиків при пожежі полягає у забезпеченні потрібної товщини захисного шару бетону і мінімальних розмірів стику на рівні цих параметрів у конструкцій, що з'єднуються (для залізобетонних елементів). У разі пасивного вогнезахисту, товщина покриття має бути на рівні, як для елементів, що з'єднуються (сталеві конструкції). Але такий підхід не враховує:

- рівень напруженого стану стику відносно елементів, що стикуються;
- пластичність, що потрібна для забезпечення значних деформацій, що пов'язані із настанням граничного стану при пожежі;
- опір при розтягу, що потрібний для сприйняття великих розтягуючих зусиль, що виникають у процесі охолодження при реальній пожежі.

Ступінь вогнестійкості стиків залізобетонних конструкцій, так само, як і конструкцій, залежить від розмірів поперечного перерізу і товщини захисного шару арматури [7,8]. Такий підхід заснований на значній тепловій інерції залізобетонних конструкцій, що обумовлена їх значною вагою і низькою теплопровідністю. Тому, більшість залізобетонних стиків не потребує додаткового вогнезахисту.

Конструювання залізобетонних конструкцій має особливе значення відносно їх характеристик при пожежі. Ряд авторських свідоцтв [5, 6] регламентують правила конструювання елементів для покращення їх технічних характеристик при пожежі. Ці правила вміщують:

- анкерування (закріплення) арматури;

- безперервне верхнє і нижнє армування над опорами із розрахунковим з'єднанням арматури внапусток для попередження передчасного руйнування внаслідок зміни напруженого стану;
- заходи, щодо запобігання розповсюдження вогню по шляхах проходження інженерних комунікацій.

На експлуатаційні характеристики стиків впливають як постійні, так і тимчасові навантаження, а також впливи, що виникають при пожежі.

Збільшення опорного моменту у нерозрізних конструкціях. Під час пожежі, внаслідок теплового розширення поверхні балки або плити перекриття, з'являється вигин, який спричиняє збільшення опорних моментів [14]. Це може сприяти текучості арматури стиснутої зони, якщо не вжити заходів ще на стадії проектування. Щоб запобігти цьому потрібно передбачити напусток арматури у опорних зонах залізобетонних конструкцій перекриття. Збірні конструктивні елементи заводського виготовлення, як правило, являються вільно спертими і мають достатню несучу здатність на вигин, що запобігає збільшенню опорних моментів.



Рис. 1. Еюра моментів у нерозрізній конструкції.

Сили, що виникають внаслідок стиснення теплового розширення. У разі розташування пожежного відсіку у каркасній конструкції, розширенню елементів, що нагріваються під час пожежі, запобігають холодні оточуючі конструкції. Подібне стиснення теплового розширення сприяє перерозподілу напружень і виникненню значних стискаючих зусиль у стиках, що було підтверджено великомасштабними випробуваннями у м. Кардінгтон, Великобританія [11]. Схематично це надано на рис.2.

Залізобетонні стики можуть сприйняти і ще більші зусилля. Але, при охолодженні, знову відбувається перерозподіл напружень і можуть з'явитися значні розтягуючі зусилля, що були не передбачені на стадії проектування.

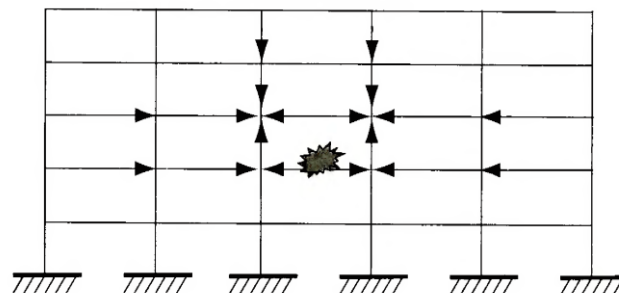


Рис. 2. Стискаючі зусилля у рамній конструкції внаслідок стиснення теплового розширення.

Неможливість оцінювання вогнестійкості будівель і споруд у цілому, і конструкцій великих розмірів в лабораторних умовах, а також необхідність перевірки роботи будівель і споруд у поєднанні із іншими елементами, спричинили проведення вогневих випробувань натурних фрагментів будівель.

Метою цих випробувань було визначення загальної стійкості будівлі під час пожежі і після неї, а також визначення залишкової несучої здатності після пожежі. Вплив значних деформацій полягає у збільшенні ексцентриситету зусиль у місцях з'єднання конструкцій (стиках). У опорних перерізах має забезпечуватися достатня здатність, щодо пластичного обороту, за для сприйняття значних вертикальних прогинів, що характерні для плит перекриття в умовах пожежі. На опорі можуть відбуватися значні пошкодження внаслідок викривлення балок і плит перекриття, що може спричинити локальне руйнування колон.

У рамній конструкції, що складається із нерозрізних колон, горизонтальне переміщення плити перекриття може викликати значну поперечну деформацію колон, що, у свою чергу, призведе до зміни їх напруженого стану і можливості руйнування внаслідок зрізу (на що попередньо вони не були розраховані).

Така ситуація особливо стосується колон крайнього ряду, де розширення до центру будівлі обмежено оточуючими холодними конструкціями.

Таку ситуацію було змодельовано під час великомасштабних вогневих випробувань залізобетонної будівлі у м. Кардінгтон (рис. 3).

Єврокод EN 1992-1-2 надає лише незначну інструкцію, щодо проектування стиків подібних конструкцій, але наполягає на необхідності їх розрахунку за умови повного аналізу роботи конструкції при пожежі [12].

Стосовно вимог, щодо ізоляції стику, для забезпечення його вогнестійкості, то зазори у стиках між елементами мають бути не меншими за 20мм і не глибше за половину мінімальної товщини з'єднувальних елементів [14].



Рис. 3. Випробування на вогнестійкість у Кардінгтоні (Великобританія): поперечне переміщення крайніх колон внаслідок стисненого теплового розширення.

Під час випробувань також було встановлено, що усі монолітні залізобетонні перекриття, що спирались на цегляні стіни, мали клас вогнестійкості більший, що встановлений за стандартними випробуваннями.

Клас вогнестійкості плит підвищувалась за рахунок конструктивного поперечного армування плит, що сприймало частину навантаження. Плити, що були розраховані за балковою схемою, під час пожежі починали працювати, як плити, що спираються по контуру, тому що вони мали спирання по 3-х або 4-х сторонах. Крім того, у плитах з'явились повздовжні стискаючі зусилля від температурних деформацій. Защемлення в цегляних стінах утворювали негативні моменти на опорах.

Для порівняння дослідних даних із результатами стандартних випробувань на вогнестійкість були випробувані дві нерозрізні плити завтовшки 15см із прольотами $l_1=5,32\text{м}$ і $l_2=4,45\text{м}$ (рис.4,а). За розмірами, плити відповідали плитам випробувального будинку. Одна плита була армована відповідно до статичного розрахунку. Вимоги вогнестійкості не враховувались.

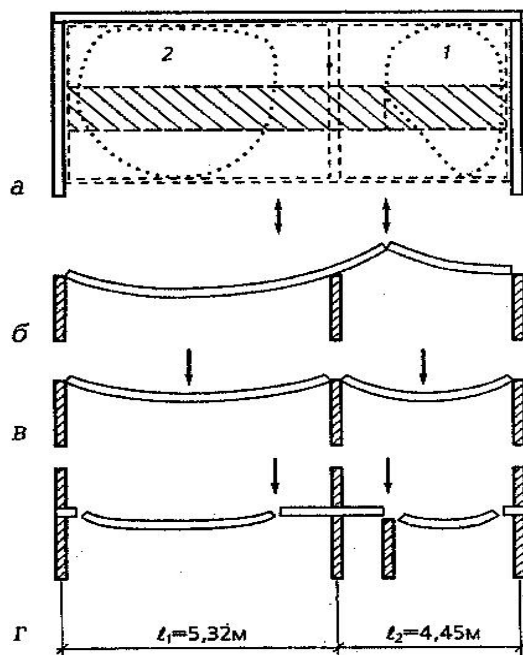


Рис. 4. Руйнування двох прольотних плит перекриття після одностороннього вогневого впливу знизу: а – в існуючій будівлі (.....) і при стандартних випробуваннях на вогнестійкість із утворенням тріщини (-----); б – біля обриву арматури біля середньої опори; в – на опорі; г – над несучою перегородкою.

Друга плита була армована так, як і перша, але були враховані вимоги, що до вогнестійкості для нерозрізних залізобетонних конструкцій. Для середньої опори арматура підбиралась із врахуванням сумарного моменту від навантаження і температури, і розподілялась згідно епюрі сумарних моментів.

Плити, що були випробувані при нормальних температурах і на вогнестійкість, працювали, як балочна система в одному напрямку.

У першій плиті (без врахування вимог вогнестійкості), на 8-й хвилині вогневого впливу, у прольоті l_2 (більш короткому), біля середньої опори, у місці обриву верхньої арматури, що сприймала негативний момент, утворилась широка тріщина (рис. 4, б), яка перетворила двох прольотну нерозрізну балку у дві статично визначені балки. Плита мала межу вогнестійкості 54 хвилини, при моменті на опорі 26 кН·м і прогин 250 мм.

Під час випробування другої плити, на 20 хвилині від початку нагрівання, на середній опорі з'явилась тріщина завтовшки 1 мм. Верхня арматура на опорі, при цьому, обірвалась. Двох прольотна статично невизначена балка перетворилась на дві статично

визначені. Межа вогнестійкості плити становила 90 хвилин при моменті на опорі 39 кН·м і прогині 200 мм (рис. 4, в.).

Під час експериментальної пожежі у будівлі (рис. 4, г) у прольоті l_2 була встановлена перегородка завтовшки у $\frac{1}{2}$ цеглини, що сприймала частину навантаження від плити під час пожежі. За наявності перегородки, межа вогнестійкості плити складала 120 хвилин, момент на опорі – 37 кН·м, прогин – 125 мм.

Висновки: великомасштабні вогневі випробування будівлі показали, що:

1. У рамній конструкції, що складається із нерозрізних колон, горизонтальне переміщення плити перекриття може викликати значну поперечну деформацію колон, що, у свою чергу, призведе до зміни їх напруженого стану і можливості руйнування внаслідок зрізу (на що попередньо вони не були розраховані). Така ситуація особливо стосується колон крайнього ряду, де розширення до центру будівлі обмежено оточуючими холодними конструкціями.
2. Єврокод EN 1992-1-2 надає лише незначну інструкцію, щодо проектування стиків подібних конструкцій, але наполягає на необхідності їх розрахунку за умови повного аналізу роботи конструкції при пожежі.
3. На роботу залізобетонних плит у будівлі впливають защемлення на опорах у несучих стінах, цегляні перегородки під плитами перекриття, що частково сприймають навантаження від плит, зменшують прогин, але, за умовою, що несуча стіна нагрівається з однієї сторони і перешкоджає розповсюдженню вогню до сусідніх приміщень;

У нерозрізних плитах тріщини з'явилися на верхній поверхні плит там, де обірвалась верхня арматура, що розташована над опорами (у стиснутій зоні перерізу). Тріщини являлися шарнірами і перетворювали статично невизначені плити у статично визначені, але з прольотами, меншими, ніж при прийнятій статичній схемі розрахунку. Верхня арматура на опорах переміщує місця утворення тріщин з опор на кінець обриву арматури.

ЛІТЕРАТУРА:

1. ДБН В.1.1-7-2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва.
2. Савченко О.С. Спільна робота плит та ригелів у складі диска перекриття: дис. канд. техн. наук. Полтава: Полтавський національний технічний ун-т. ім. Юрія Кондратюка. 2004.
3. Жуков В.В., Шустова Е.Н. О результатах обследования состояния несущих железобетонных конструкций зданий после пожара. В кн.: Обеспечение огнестойкости зданий и сооружений при применении новых строительных материалов и конструкций. М.: МДНТП, 1999. с.142-147.
4. Астапенко В.М., Кошмаров Ю.А., Молчадский И.С. Термогазодинамика пожаров в помещении. М.: Стройиздат, 1988.
5. Design and Detailing of Concrete Structures for Fire Resistance. London: ISE, 1978.
6. Fire Design of Concrete Structures in accordance with MC90. CEB-Bulletin. 1991. №208. 204 p.
7. Березовський А.І., Сідней С.О., Рудешко І.В. Оцінка ефективності матеріалів для герметизації порожнин будівельних конструкцій. Науковий вісник будівництва. 2019. Т. 98. №4 С. 288-295.
8. Рудешко І.В., Березовський А. І., Дагіль В.Г. Оптимізація проектних рішень під час вибору типу вогнезахисту металевих конструкцій

REFERENCES:

1. DBN V.1.1-7-2016 Pozhezhna bezpeka ob'yektiv budivnytstva.
2. Savchenko O.S. Joint work of plates and crossbars as a part of a disk of overlapping: dis. cond. Sciences: Poltava National Technical University. them. Yuri Kondratyuk. Poltava 2004.
3. Zhukov V.V., Shustova E.N. About results of inspection of a condition of bearing reinforced concrete designs of buildings after a fire. In the book: Ensuring fire resistance of buildings and structures when using new building materials and structures. M.: MDNTP, 1999. p.142-147.
4. Astapenko V.M., Koshmarov Y.A., Molchadsky I.S. Thermogasdynamics of indoor fires. M.: Stroyizdat, 1988.
5. Design and Detailing of Concrete Structures for Fire Resistance. London: ISE, 1978.
6. Fire Design of Concrete Structures in accordance with MC90. CEB-Bulletin. 1991. №208. 204 p.
7. Berezov'skyi A.I., Sidney S.O., Rudeshko I.V. Otsinka efektyvnosti materialiv dlya hermetyzatsiyi pustot budivel'nykh konstruktсий. Naukovyy visnyk budivnytstva. 2019. №4 (98). S. 288-295.
8. Rudeshko I.V., Berezov'skyi A. I., Dahil' V.H. Optymizatsiya proektnykh rishen' pid chas vyboru typu vohnezakhystu metalevykh konstruktсий

- машинних залів АЕС. Науковий вісник будівництва. 2018. Т. 93. №3. С.275-284.
9. ДСТУ Б В.1.1-18: 2007 Споруди та фрагменти будівель. Метод натурних вогневих випробувань. Загальні вимоги.
 10. Демехин В.Н., Мосалков И.Л., Плюснина Г.Ф. Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре. М.: АПС МЧС России, 2003. 654с.;
 11. Биби Э. В., Нараянан Р.С. Руководство для проектировщиков к Еврокоду 2: проектирование железобетонных конструкций. М.: МГСУ, 2013. 292 с.
 12. 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);
 13. EN 1991 Єврокод1: Дії на конструкції. Ч 1-2 Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі (EN 1991-1-2: 2010, IDT);
 14. Леннон Т., Мур Д.Б., Ван Ю. К., Бейли К. Г. Руководство для проектировщиков к EN 1991-1-2, 1992-1-2, 1993-1-2 и 1994-1-2: справочник по проектированию противопожарной защиты стальных, сталежелезобетонных и бетонных конструкций зданий и сооружений в соответствии с Еврокодами. М.: МГСУ, 2012. 224 с.
 9. DSTU B V.1.1-18: 2007 Sporudy ta frahmenty budivel'. Metod naturnykh vohnevykh vyprobuvan'. Zahal'ni vymohy.
 10. Demekhyn V.N., Mosalkov Y.L., Plyusnyna H.F. Zdanyya, sooruzhenyya y ykh ustoychivost' pry pozhare. M., AHPS MCHS Rossyy, 2003. 654 s.
 11. Byby É. V., Narayanan R.S. Rukovodstvo dlya proektyrovanyya k Evrokodu 2: proektyrovanye zhelezobetonykh konstruksyy. M.: MGSU, 2013. 292 s.
 12. DSTU-N B EN 1992-1-2:2012 Yevrokod 2. Proektuvannya zalizobetonykh konstruksiy. Chastyna 1-2. Zahal'ni polozhennya. Rozrakhunok konstruksiy na vohnestiykist' (EN 1992-1-2:2004, IDT).
 13. EN 1991 Yevrokod1: Diyi na konstruksiyi. CH 1-2 Zahal'ni diyi. Diyi na konstruksiyi pid chas pozhezhi (EN 1991-1-2: 2010, IDT).
 14. Lennon T., Mur D.B., Van YU. K., Beyly K. H. Rukovodstvo dlya proektyrovshchykov k EN 1991-1-2, 1992-1-2, 1993-1-2 y 1994-1-2: spravochnyk po proektyrovanyyu protyvopozharnoy zashchyty stal'nykh, stalezhelezobetonykh y betonnykh konstruksyy zdanyu y sooruzhenyy v sootvetstvyy s Evrokodamy. M.: MGSU, 2012. 224 s.

Rudeshko I. V., Berezovskyi A. I., Dahil V.H. FIRE RESISTANCE OF BUILDINGS TAKING INTO ACCOUNT CHANGES IN THE STRESS STATE OF BUILDING STRUCTURES DURING A FIRE. The analysis of the state of the issue of fire resistance of frame buildings taking into account the change of stress state of structures during fire, the experimental base of tests of natural fragments of buildings, the analysis of test results of natural fragments of buildings, the influence of joint work of building structures on stress change buildings, change of fire resistance of elements of a framework and the building as a whole. The results of tests of natural fragments of buildings in Cardington are presented, concerning the redistribution of stresses at the joints of structures, changes in the static scheme of floor slabs, and their influence on the behavior of columns of frame structures during fire. The reasons for the increase of bearing moments in inseparable structures and the forces arising from the compression of thermal expansion of structures during a fire are considered. A comparative evaluation of the behavior of two-span floor slabs, depending on the method of their reinforcement.

Key words: stress state of building structures, fire resistance class, joint work of structures, fire resistance, frame buildings, monolithic frames, prefabricated frames, laboratory and natural tests for fire resistance, modeling of joint work of structures.