

ПОРІВНЯННЯ РОБОТИ БАГАТОПОВЕРХОВИХ СТАЛЕВИХ КАРКАСІВ ПРИ ПОЖЕЖІ ЗА РІЗНИХ ПОЧАТКОВИХ УМОВ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ЖИВУЧІСТЬ

¹Дауров М.К., аспірант,
mk19daurov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6338-4326

¹Білик А.С., к.т.н., доцент,
artem.bilyk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9219-920X

¹Київський національний університет будівництва і архітектури
пр. Повітрофлотський, 31, м. Київ, 03037, Україна

Анотація. Проаналізовано дослідження, присвячені живучості при пожежі сталевих каркасів в багатоповерхових будівлях. Виявлено, що існуючі заходи посилення живучості суттєво збільшують металоємність каркасів. Не виявлено детального аналізу потенційних механізмів руйнування залежно від різних початкових умов. Виявлена необхідність в дослідженні напруженого стану елементів під час пожежі до першого руйнування та подальших потенційних механізмів руйнування для більш глибокого розуміння живучості. В даній публікації проаналізовано роботу плоских багатоповерхових сталевих каркасів під час пожежі. Побудовані графіки залежності коефіцієнту використання несучої здатності різних елементів каркасу залежно від часу.

Порівняно роботу каркасів при пожежі з різними вузлами примикання балок до колон та різним розташуванням джерела пожежі. Виявлено, що під час пожежі в балкових елементах каркасу напружений стан змінюється зі згинального на стиснуто-зігнутий. Встановлено, що елементи каркасу потрібно проектувати такими, в яких пластичні деформації з'являються раніше, ніж настає втрата місцевої стійкості. Необхідно проектувати перерізи за класифікацією Єврокоду, де є класифікація залежно від геометрії.

Порівняно роботу каркасів при пожежі з різними початковими запасами. Виявлено, що в жодному елементі каркасу температура до першого настання граничного стану не досягає 400°C, за якої починає зменшуватися межа текучості сталі. Встановлено, що на вогнестійкість каркасів більше впливає не зниження характеристик сталі, а розподіл зусиль.

Порівняно каркаси з жорсткими та шарнірними вузлами примикання з точки зору живучості та вогнестійкості. Встановлено, що каркаси з шарнірними вузлами є більш вогнестійкими, а з жорсткими – більш живучі при пожежі. Визначено спосіб збільшення часу до втрати живучості сталевих каркасів.

Ключові слова: живучість, пожежа, сталевий каркас, багатоповерхова будівля, прогресуюче руйнування, пластичні деформації.

Вступ. В умовах урбанізації в містах все більше зростає населення, що призводить до зменшення місця земельних ділянок для будівництва та збільшує потребу у багатоповерховому будівництві. Проте зі збільшенням поверховості збільшується і чутливість будівлі до різних загроз, які можуть призвести до її повного руйнування та великої кількості людських жертв. Багато сучасних досліджень в галузі будівельних конструкцій присвячено живучості, будівель, тобто їх здатності чинити опір повному руйнуванню після локального руйнування внаслідок загрози. Однією із загроз, що може спричинити руйнування багатоповерхової будівлі, є пожежа. Прикладами прогресуючого руйнування багатоповерхової будівлі внаслідок пожежі є пожежа в Сан-Паулу (Бразилія, 2018 р., рис. 1, а) та Мадрид (Іспанія, 2005 р. рис. 1, б). До того ж у вітчизняних нормах є вимога: всі об'єкти класу наслідків ССЗ розраховувати на живучість, зокрема і на живучість при пожежі [1].

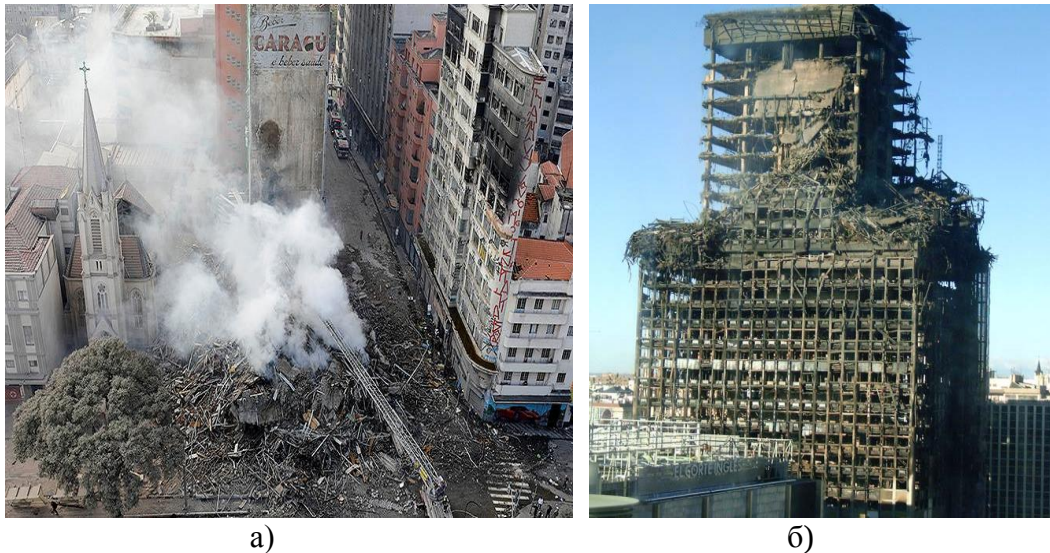


Рис. 1. Наслідки прогресуючого руйнування будівель від пожежі:
а – в Сан-Паулу; б – в Мадриді

Аналіз останніх досліджень. Раніше виконані дослідження живучості сталевих каркасів при пожежі можна поділити на 2 частини: присвячені *роботі каркасів при пожежі* та присвячені *заходам посилення живучості* цих каркасів. Дослідження [2-8] показують, що під час пожежі першими можуть руйнуватися перекриття каркасу, а не колони. Тому варто досліджувати різні механізми руйнування каркасів при пожежі з метою визначення і уникнення найбільш руйнівних.

В [8] було досліджено роботу елементів багатоповерхових сталевих каркасів при пожежі за розташування джерела пожежі в різних прольотах на різних поверхах. Для розглянутого каркасу було зокрема встановлено, що:

- при пожежі час до першого руйнування за сценарію пожежі в середньому прольоті більший, ніж у крайньому;
- за пожежі на вищому поверсі руйнування відбувається пізніше, ніж на нижчому;
- на нижчому поверсі колони більш схильні до того, щоб зруйнуватися раніше за балку, ніж на верхньому;
- в середньому прольоті балки більш схильні до того, щоб зруйнуватися раніше за колону, ніж у крайньому.

В [9] було досліджено вогнестійкість та живучість при пожежі сталевих каркасів з детальним моделюванням роботи різних компонентів вузлів примикання балок до колон. Було встановлено, що вузли можуть руйнуватися раніше, ніж елементи каркасу. Досліджений вплив вузлів на зусилля в елементах каркасів [10-11].

Вивчено роботу каркасів при пожежі, що спричинена землетрусом і поширюється на декілька поверхів та декілька прольотів одночасно [12]. В роботі [9] було встановлено, що розподіл зусиль так змінює напружений стан в сталевому каркасі, що після підбору перерізів під зусилля від цих навантажень металоємність каркасу збільшилась на 50% навіть з урахуванням того, що максимальне температурне навантаження склало 120°C при вогнезахисті R180. Це свідчить про те, що збільшення вогнезахисту є неефективним заходом посилення живучості сталевих каркасів при пожежі. В [8] показано, що перше руйнування при пожежі в сталевому каркасі може відбутися значно раніше за початок зменшення міцнісних характеристик сталі.

Були досліджені коефіцієнти запасу елементів сталевих каркасів та їх вплив на живучість каркасу [4-6]. В [13] наголошується, що коефіцієнт завантаженості в колонах має бути 0,25, щоб запобігти прогресуючому руйнуванню, що значно збільшує металоємність каркасу. Для посилення живучості при пожежі та сейсмостійкості рекомендується використовувати комбіновані аутригерні системи (superframe), що поєднують вертикальні та

горизонтальні аутригери по контуру рам каркасу [13].

Виходячи з результатів попередніх досліджень роботи сталевих каркасів при пожежі можна сказати, що це питання потребує більш системного дослідження та аналізу. Досліджені раніше заходи посилення живучості сталевих каркасів при пожежі потребують оптимізації. Необхідно глибше вивчити особливості розподілу зусиль та напружений стан конструкцій каркасу будівлі під час пожежі та досліджувати заходи з посилення живучості, які будуть ефективні та економічно доцільні водночас.

Задачі досліджень. В даних дослідженнях виконані наступні задачі:

- порівняти роботу сталевих каркасів при пожежі з різними вузлами примикання балок до колон;
- порівняти роботу сталевих каркасів при пожежі з різними початковими запасами;
- проаналізувати вплив зміни напруженого стану каркасів на їхню живучість при пожежі.

Матеріали та методика дослідження. Було проведено числове дослідження роботи плоскої сталеві рами при пожежі в одному з прольотів на одному з поверхів. Об'єктом дослідження є плоска рама, що складається з трьох прольотів (2 крайніх та середній) та трьох поверхів (нижній, середній, верхній) без вогнезахисту. Прольот балки прийнято – 7,2м. Висота поверху прийнята – 3,6м. Колони розкріплені із площини рами в рівні примикання балок, балки розкріплені із площини з кроком 2,4м. Крок рам – 6м. Завантаженість у балок та колон була прийнята однаковою – 50% з метою здійснення наочного порівняння зміни їх навантаженості в процесі пожежі. Бази колон прийнято з жорстким примиканням. Вузли примикання балки до колони – жорсткі та шарнірні. Були розглянуті по 2 сценарії пожежі: нижній поверх – крайній прольот, нижній поверх – середній прольот (рис. 2).

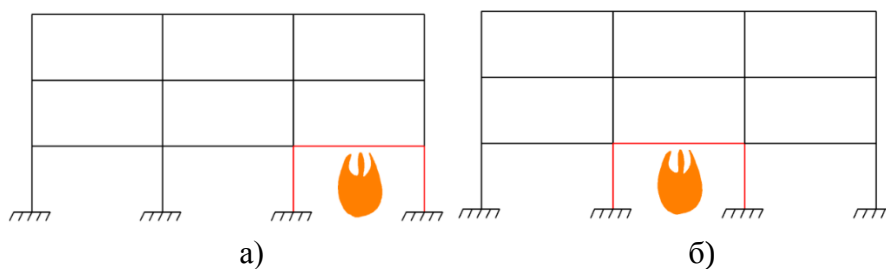


Рис. 2. Прийняті сценарії розрахункової пожежі для каркасу з жорстким приєднанням балок до колон:

а – нижній поверх – крайній прольот; б – нижній поверх – середній прольот

Навантаження були зібрані за ДБН В.1.2-2 «Навантаження і впливи» [14]. Розрахункова ситуація аварійна. На балки навантаження було прийнято $1\text{т/м}^2 \times 6\text{м} = 6\text{т/м}$. На колони було прийнято 35% вітрового характеристичного (згідно з рекомендацій UFC 4-023-03. Design of buildings to resist progressive collapse [15]) для м. Київ. Сталь елементів С255. Підбір та перевірка перерізів виконана за ДБН В.2.6-198 «Сталеві конструкції» [16]. Дія пожежі змодельована температурними навантаженнями, що були визначені за ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість [17].

Розрахунок на дію пожежі виконано нелінійний статичний, так як у пожежі не має фактору миттєвості як наприклад вибух, удар і т.д. Покроково з інтервалом в 30 секунд в нелінійній постановці (з урахуванням геометричної нелінійності) задавався приріст температури. Зміну міцнісних та деформативних характеристик сталі залежно від температури згідно ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010 [17] (фізична нелінійність).

Покладені спрощення. При розрахунку прийнято, що температура розподіляється рівномірно по довжині елементу та по перерізу. Також припускається, що елементи рами не сприймають інших температурних дій крім пожежі. Вузли мають більший резерв несучої здатності, ніж елементи каркасу.

Результати досліджень. Результати розрахунку показані в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунків для каркасів

Сценарій	Вузли балок з колонами, чарунка пожежі	Час першого руйнування, с	Елемент	Температура нагрітої балки, °C	В межах/поза межами нагрітої чарунки	Фактор вичерпання несучої здатності
1	Жорсткі, крайній прольот нижній поверх	300	Крайня колона	229	В межах	Стійкість із площини згину
2	Жорсткі, середній прольот нижній поверх	330	Крайня балка	249	Поза межами*	Втрата місцевої стійкості поясу
3	Жорсткі, крайній прольот нижній поверх	120	Крайня балка	105	В межах	Місцева стійкість поясу та місцева стійкість стінки
4	Шарнірні, крайній прольот нижній поверх	480	Крайня колона	310	В межах	Стійкість із площини згину
5	Шарнірні, середній прольот нижній поверх	600	Середня колона	374	В межах	Стійкість із площини згину
6	Шарнірні, крайній прольот нижній поверх	660	Крайня колона	262	В межах	Стійкість із площини згину
7	Шарнірні, крайній прольот нижній поверх	420	Крайня колона	259	В межах	Стійкість із площини згину

* – руйнування відбувалося на поверсі, де була пожежа

За сценарію 1 середня колона на початку пожежі була більш завантажена, але внаслідок згину, що спричинений термічним розширенням балки, швидше завантажується та руйнується крайня колона (рис. 3). З рис. 4 можна побачити, що на графіку завантаженості балки відбувається стрибок. Це пояснюється тим, що коли в балці збільшується поздовжня сила за рахунок дії температурного навантаження, приведений відносний ексцентриситет m_{ef} зменшується нижче значення 20, за якого балка розраховується як стиснуто-зігнутий, а не згинальний елемент. На графіку зміни коефіцієнту використання несучої здатності за різними факторами (рис. 5) можна побачити, що стрибок відбувається для коефіцієнту використання несучої здатності за місцевою стійкістю поясу.

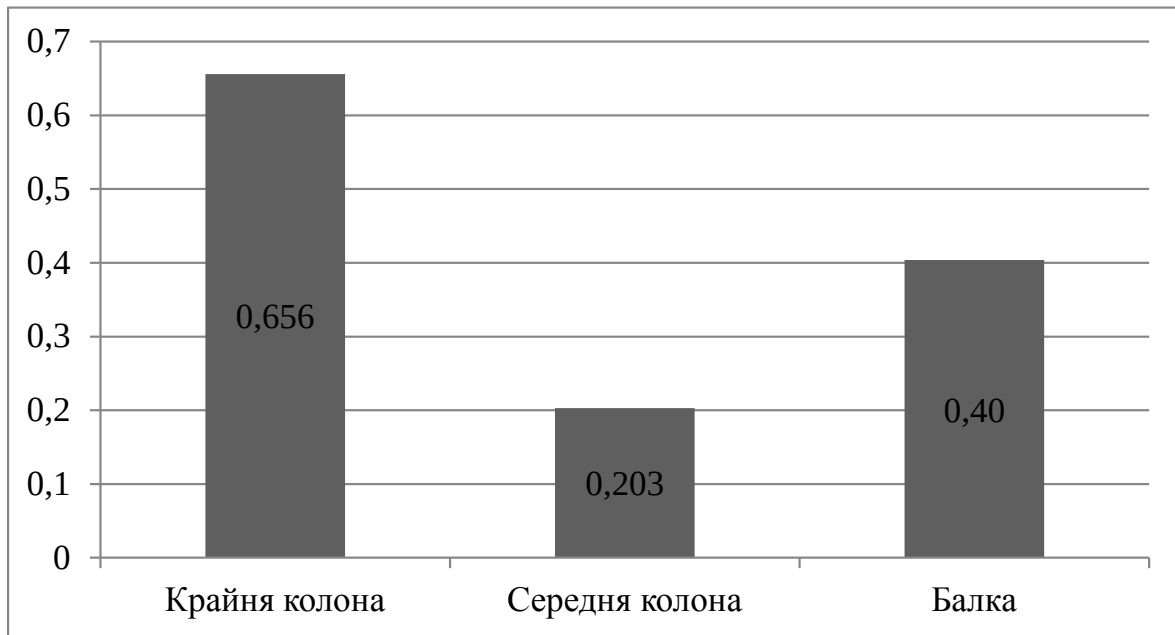


Рис. 3. Приріст коефіцієнту використання несучої здатності елементів для сценарію 1

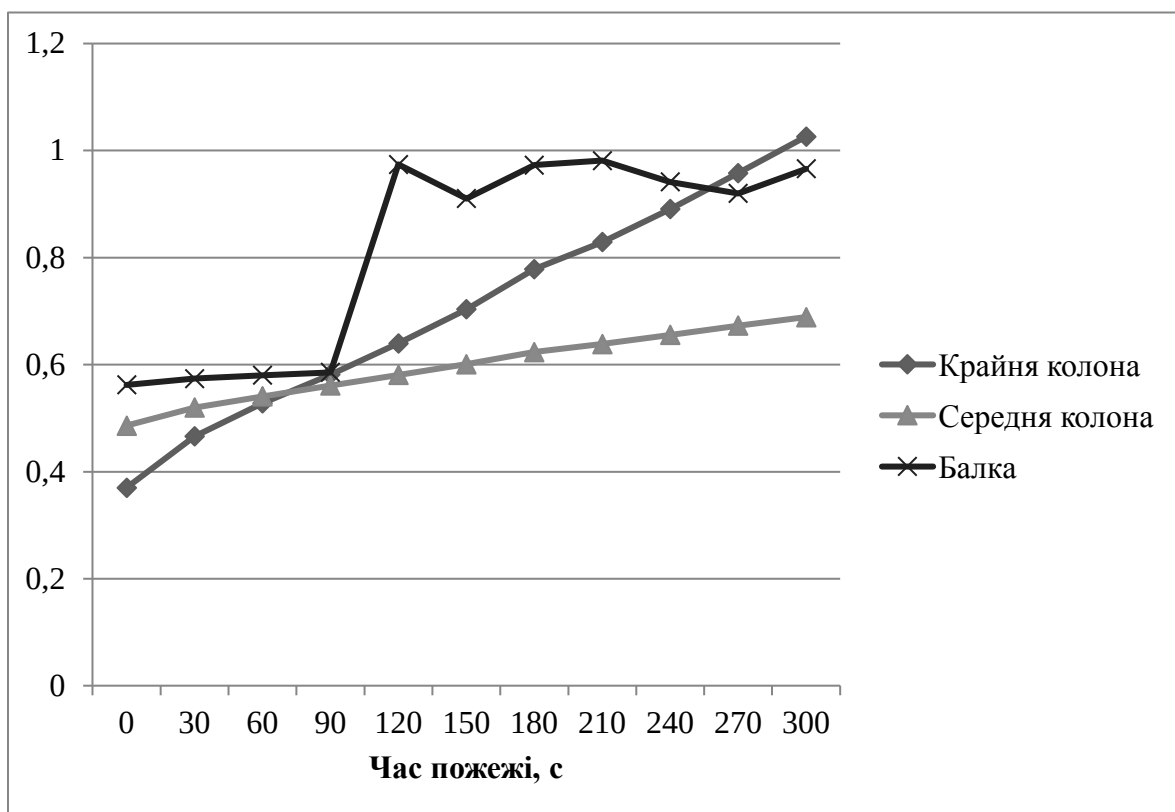


Рис. 4. Графік зміни коефіцієнта використання несучої здатності під час пожежі для сценарію 1

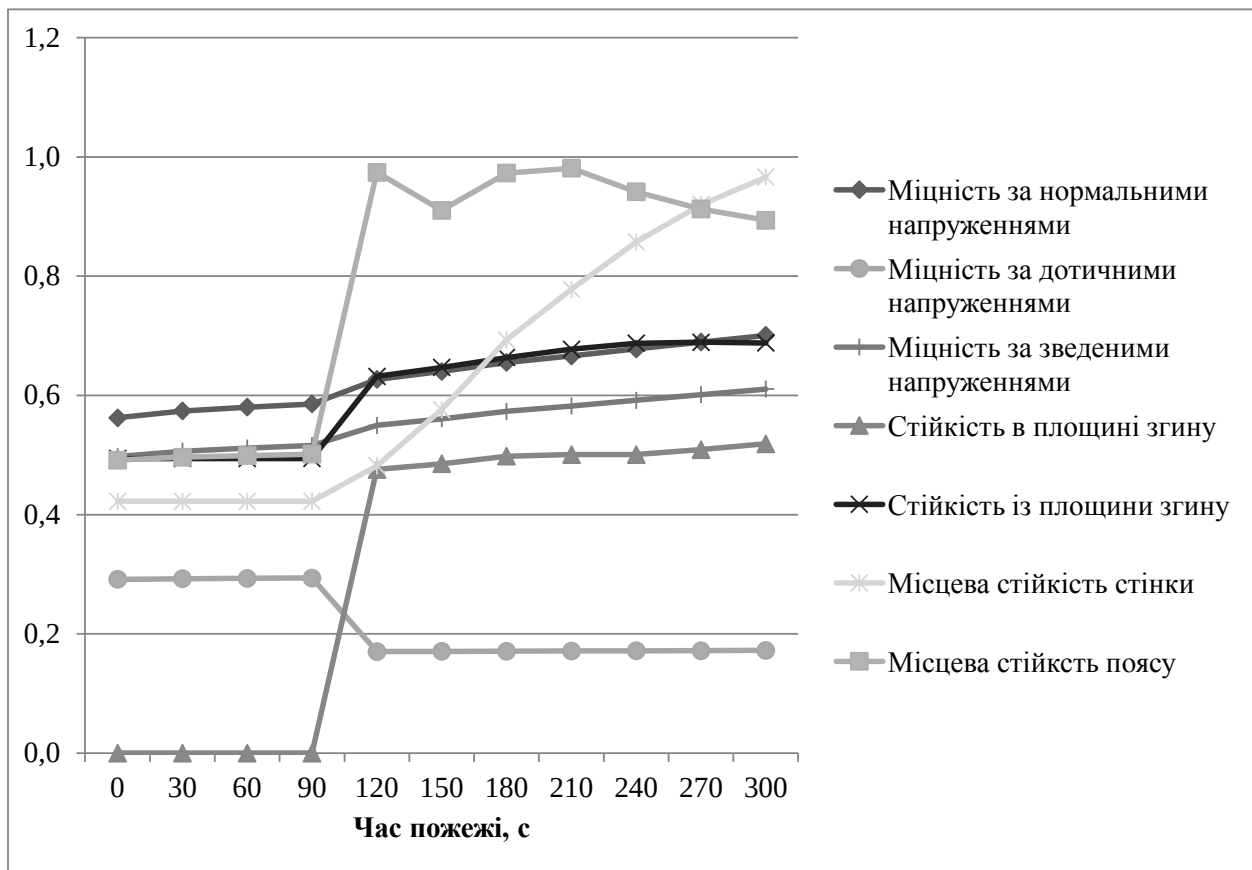


Рис. 5. Зміна коефіцієнтів використання несучої здатності нагрітої балки за різними факторами для сценарію 1

З рис. 6 можна побачити, що в середньому прольоті на нижньому поверсі (сценарій 2) на відміну від крайнього швидше завантажується балка, ніж колона. Але руйнується першою не середня балка (з безпосередньою дією вогню), а крайня, хоча в ній стрибок в коефіцієнті використання несучої здатності відбувається пізніше, ніж у середній (рис. 7). Більш раннє руйнування саме крайньої балки, а не середньої, на яку діє вогонь, пояснюється меншим значенням m_{ef} , що зумовлене меншим відношенням моменту до поздовжньої сили (рис. 8).

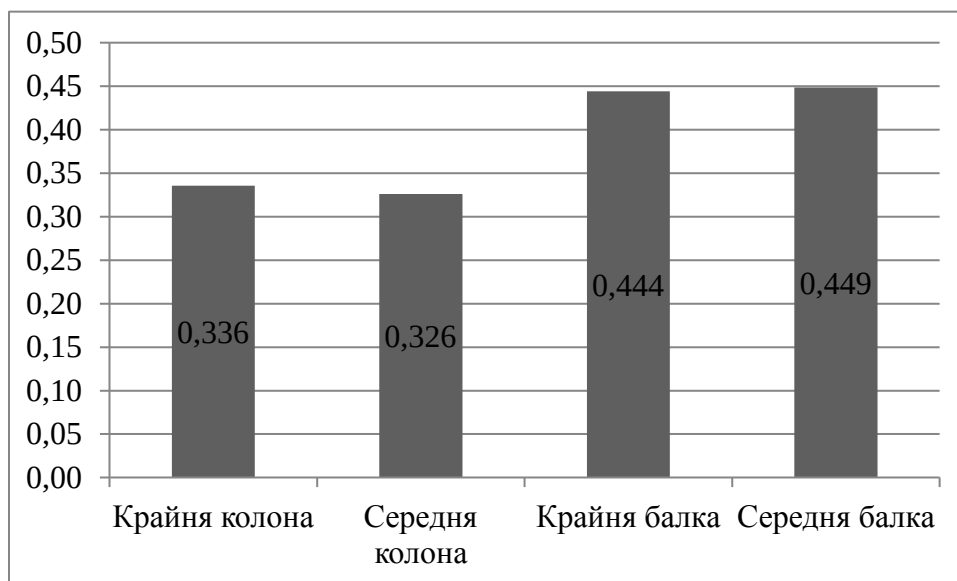


Рис. 6. Приріст коефіцієнту використання несучої здатності елементів для сценарію 2

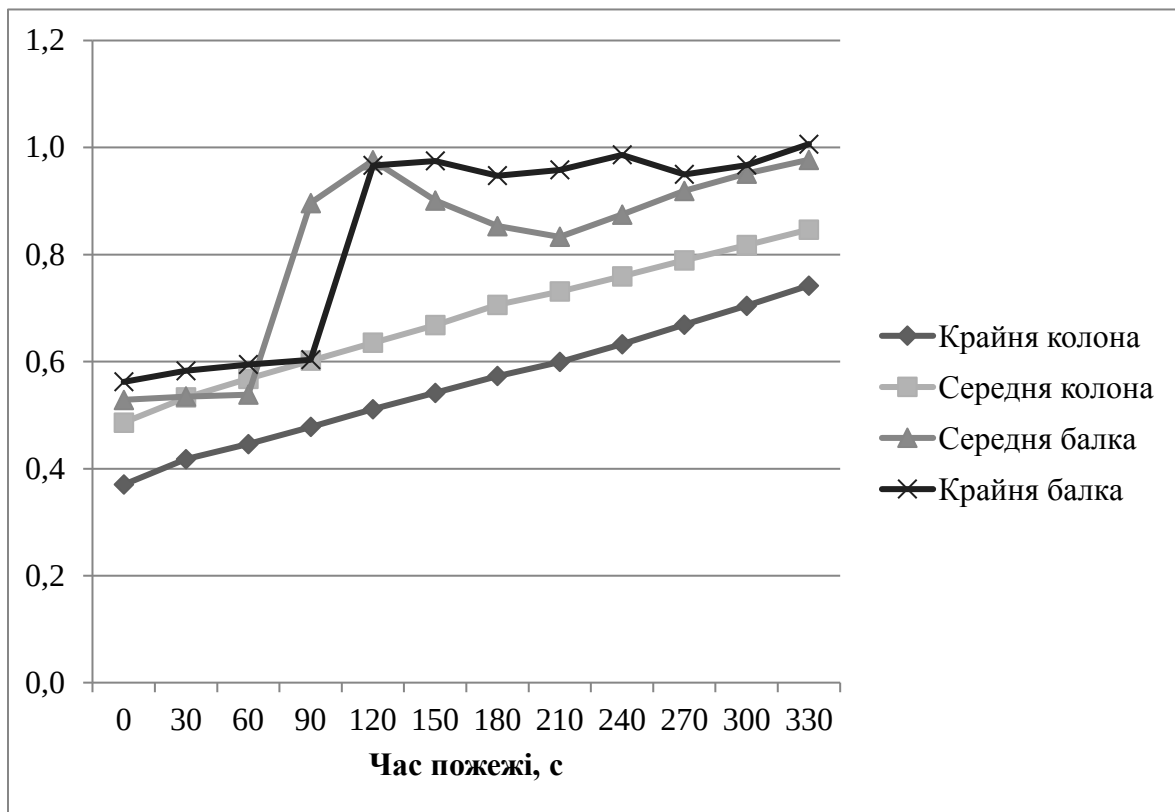
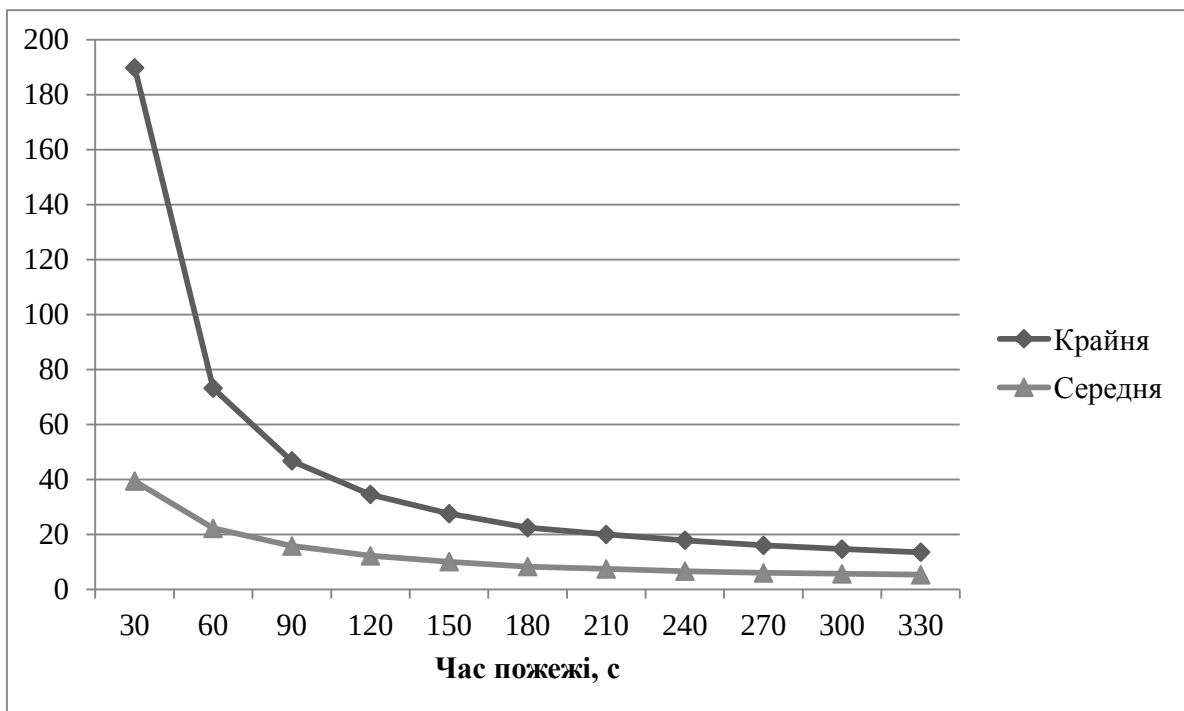


Рис. 7. Графік зміни коефіцієнту використання несучої здатності для сценарію 2

Рис. 8. Графік зміни величини m_{ef} в балці для сценарію 2

Для сценарію 1 було виконано аналогічний розрахунок, але балка була прийнята 2-го класу (згідно [16] з допущенням обмежених пластичних деформацій). Результати розрахунку показані в табл. 1 та рис. 9.

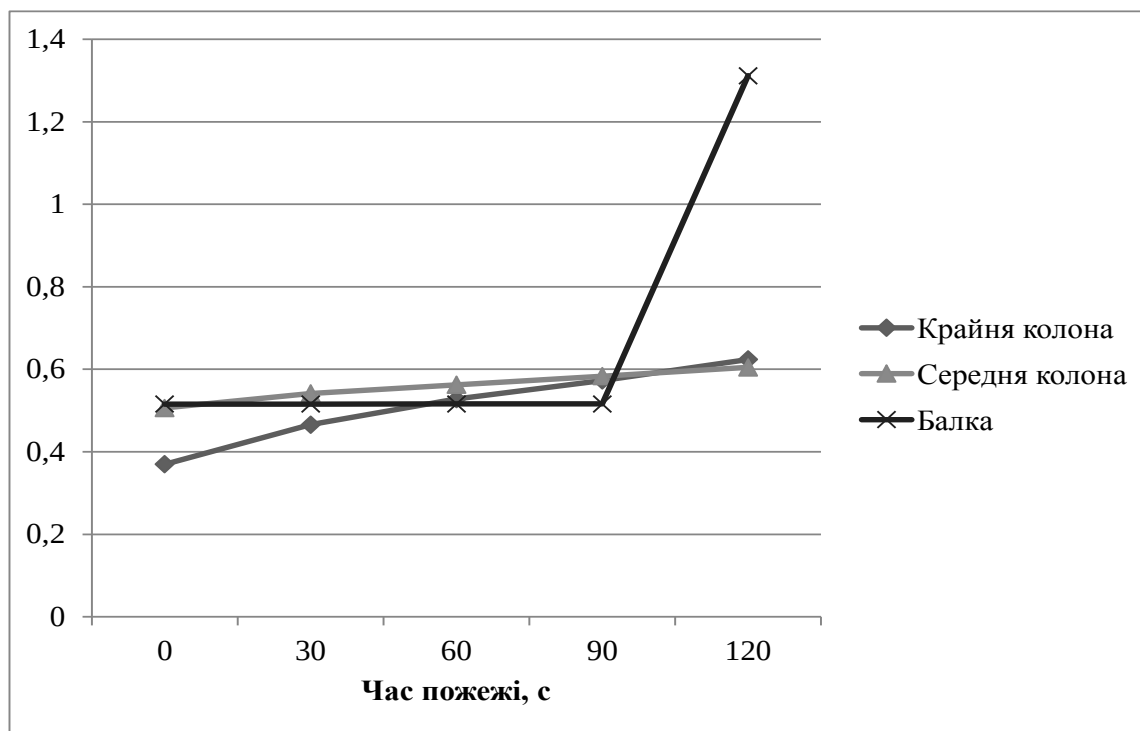


Рис. 9. Графік зміни коефіцієнту використання несучої здатності для сценарію 3

Як можна побачити з графіків на рис. 9, для рами з балкою, прийнятою 2-го класу руйнування настає ще раніше, ніж для рами з балкою 1-го класу та стрибок в графіку завантаженості більший (79,6% в порівнянні з 45%). На відміну від аналогічного випадку, де першою руйнується крайня колона, руйнування настає в балці.

Для рам із шарнірним примиканням балок до колон були розглянуті по 2 сценарії пожежі: нижній поверх – крайній прольот, нижній поверх – середній прольот (рис. 10).

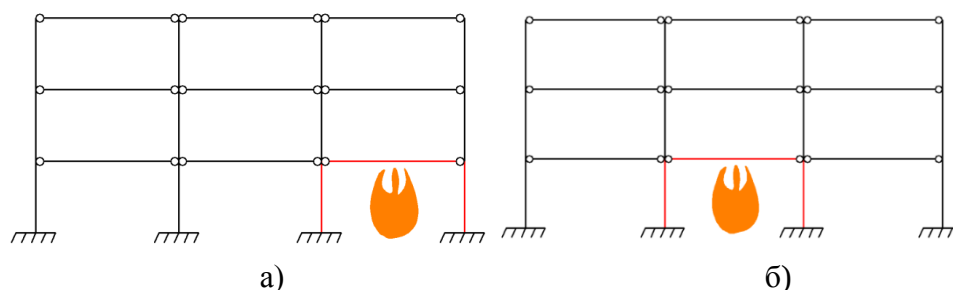


Рис. 10. Сценарії пожежі для шарнірних балок:

а – нижній поверх – крайній прольот; б – нижній поверх – середній прольот

Результати розрахунку показані в табл. 1. З рис. 11 можна побачити, що на графіку коефіцієнту використання несучої здатності як крайньої, так і середньої балки відбувається стрибок, як і в рамі з жорсткими вузлами. З рис. 12 можна побачити, що крайня колона завантажується швидше, ніж балка та середня колона, незважаючи на те, що на початку була менш завантаженою, як і в аналогічному випадку в рамі з жорсткими вузлами. Нагріта балка завантажується повільніше, ніж в рамі з жорсткими вузлами (приріст 0,264 в порівнянні з 0,46), колона – приблизно однаково (приріст 0,64 в порівнянні з 0,656), що вказує більшу схильність до першого руйнування колони, ніж у рамі з жорсткими вузлами. Поздовжня сила у балці, що нагрівається, на 18% менша, ніж в аналогічному випадку в жорсткій рамі, незважаючи на те, що балка з шарнірними вузлами має більшу жорсткість. Колона першою руйнується, як і в рамі з жорсткими вузлами, ніж балка. Час руйнування довший (480с=8хв в порівнянні з 300с=5хв) за рахунок меншої поздовжньої сили в балці.

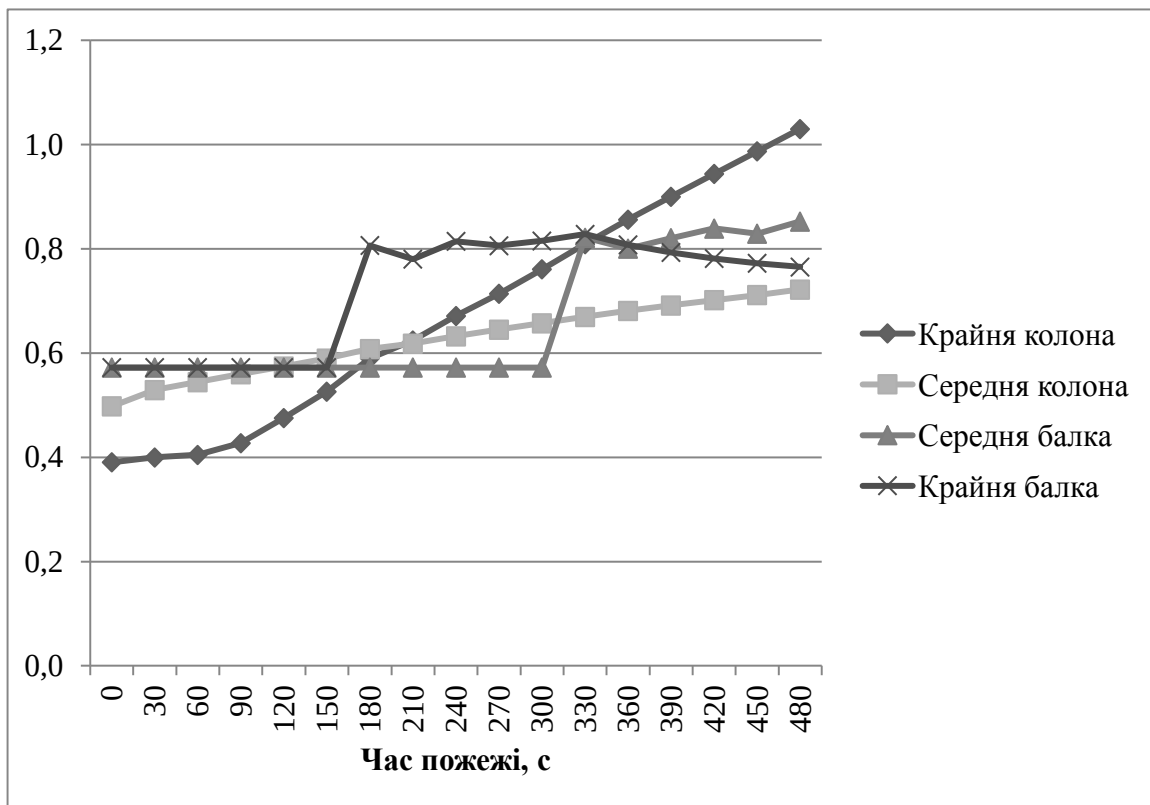


Рис. 11. Графік зміни коефіцієнту використання несучої здатності для сценарію 4

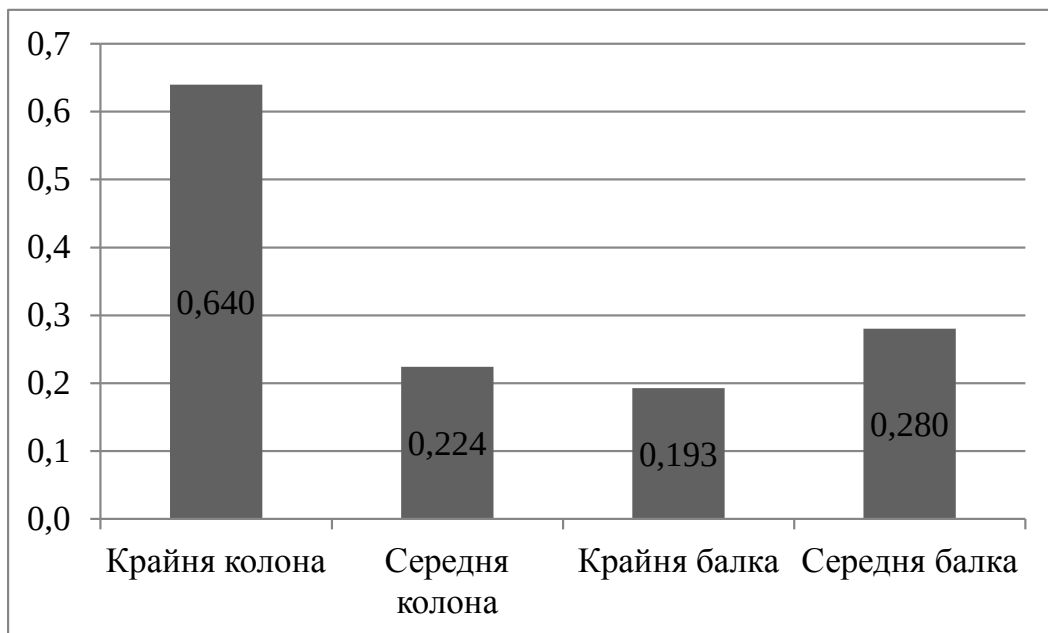


Рис. 12. Приріст коефіцієнту використання несучої здатності для сценарію 4

Як можна побачити з рис. 13, величина стрибку графіку завантаженості балки в рамі з шарнірними вузлами менша (з $\sim 0,5$ до $\sim 0,8$), ніж в рамі з жорсткими (з $\sim 0,5$ до $\sim 0,95$). Колони за пожежі в середньому прольоті завантажуються швидше, ніж балки, на відміну від аналогічного випадку в рамі з жорсткими вузлами. Крайня колона завантажується швидше, ніж середня, але середня руйнується раніше через більшу початкову завантаженість (рис. 14).

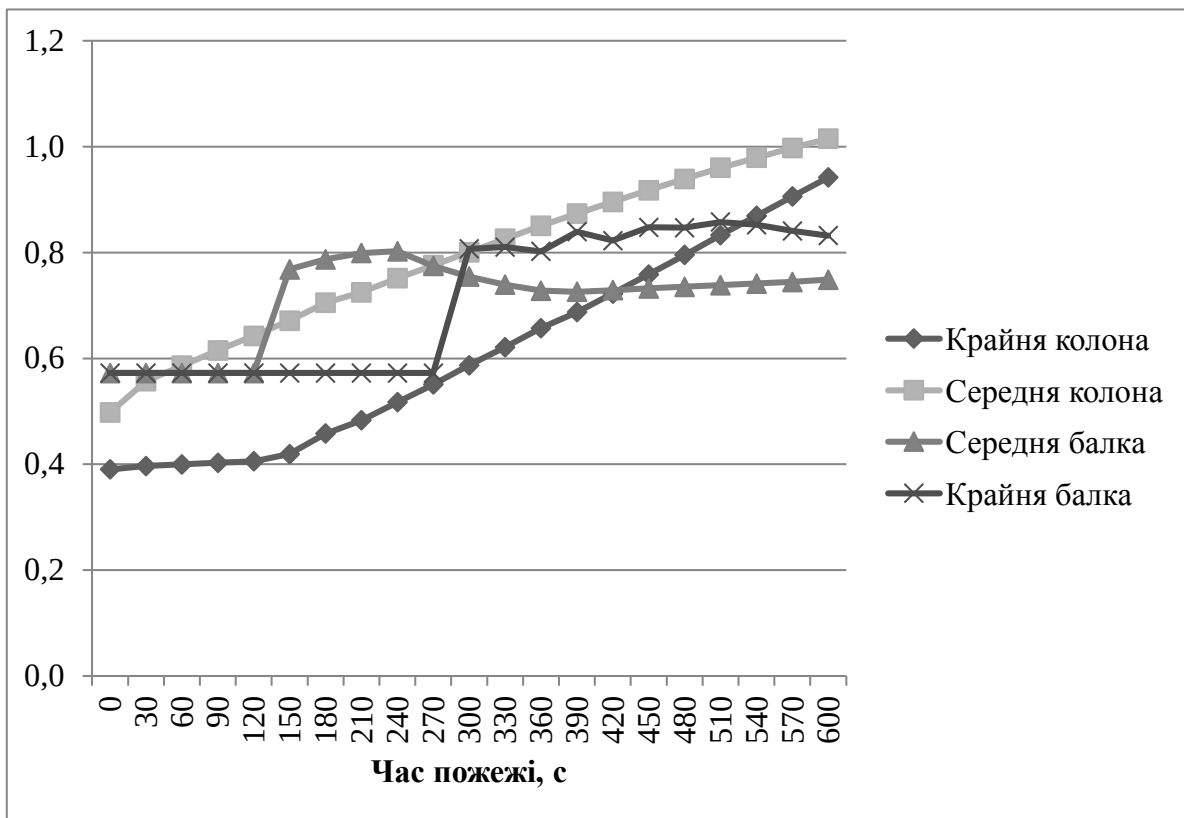


Рис. 13. Графік зміни коефіцієнта використання несучої здатності для сценарію 5

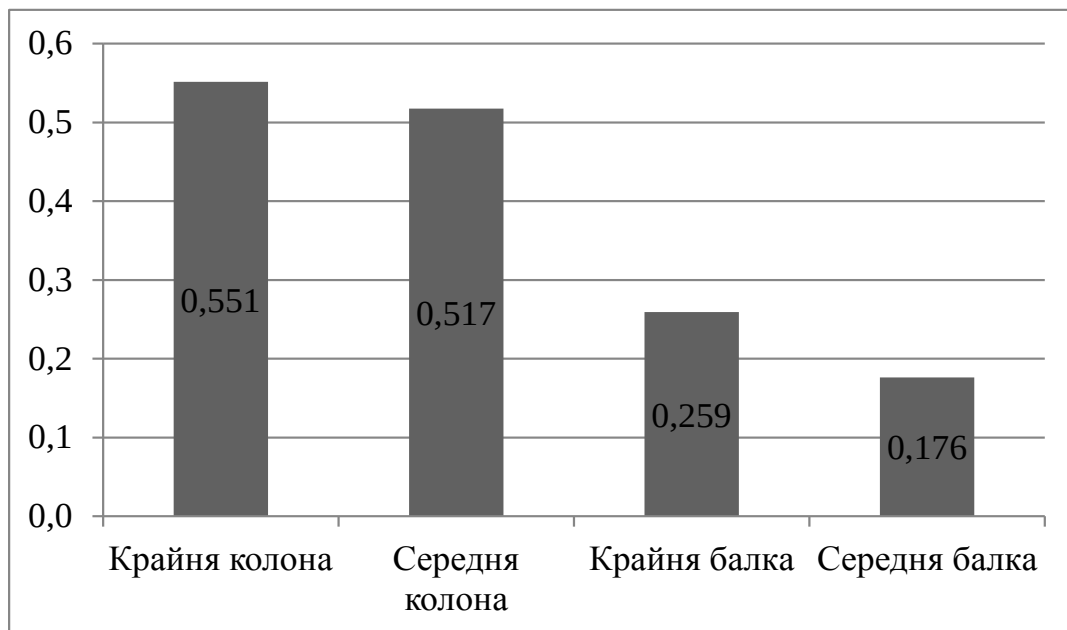


Рис. 14. Приріст коефіцієнту використання несучої здатності для сценарію 5

Порівняння сталевих каркасів із жорстким та шарнірним з'єднанням балок до колон з точки зору живучості проведене на базі вищезазначених та раніше вивчених [18-21] досліджень, і наведене в табл. 2.

Для рам із шарнірним примиканням балок до колон із завантаженістю у балок та колон - 25% був розглянутий один сценарій пожежі: нижній поверх – крайній прольот (рис. 15).

Таблиця 2 – Порівняння сталевих каркасів

Критерій порівняння	Вузли приєднання балок до колон	
	Жорсткі	Шарнірні
Одинична живучість	Більша, при «вилученні» колони динамічне зусилля частково сприймає балка в опорних перерізах та вузлах	Менша, необхідно застосовувати в'язі для жорсткості каркасу та більші перерізи аутригерів для сприйняття динамічного зусилля при «вилученні» колони
Вогнестійкість	Менша, час першого руйнування менший	Більша, час першого руйнування більший
Живучість при пожежі	Більша, менш схильні до першого руйнування колон, після першого руйнування балки зусилля розподіляється певний час на колони	Менша, більш схильні до першого руйнування колон, потребують аутригерів

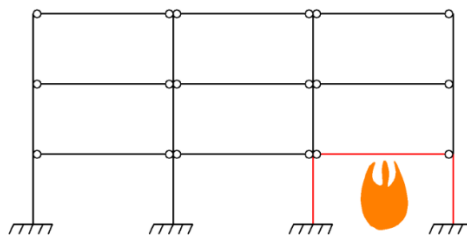


Рис. 15. Сценарій пожежі для каркасу із завантаженістю 25% з шарнірними балками: нижній поверх – крайній прольот

Результати розрахунку показані в табл. 1. Принципових відмінностей у зміні коефіцієнтів несучої здатності в різних елементах немає у порівнянні з рамою із завантаженістю 0,5 (рис. 16). Передбачувано, що час руйнування в рамі з більшим запасом міцності більший, ніж в рамі з меншим запасом (660с в порівнянні з 480с). Температура елементів рами, що нагрівається, на час руйнування менша в рамі із завантаженістю 0,25 на 13-15%, ніж в рамі із завантаженістю 0,5. Це пояснюється тим, більші перерізи мають менші коефіцієнти перерізу і нагріваються повільніше.

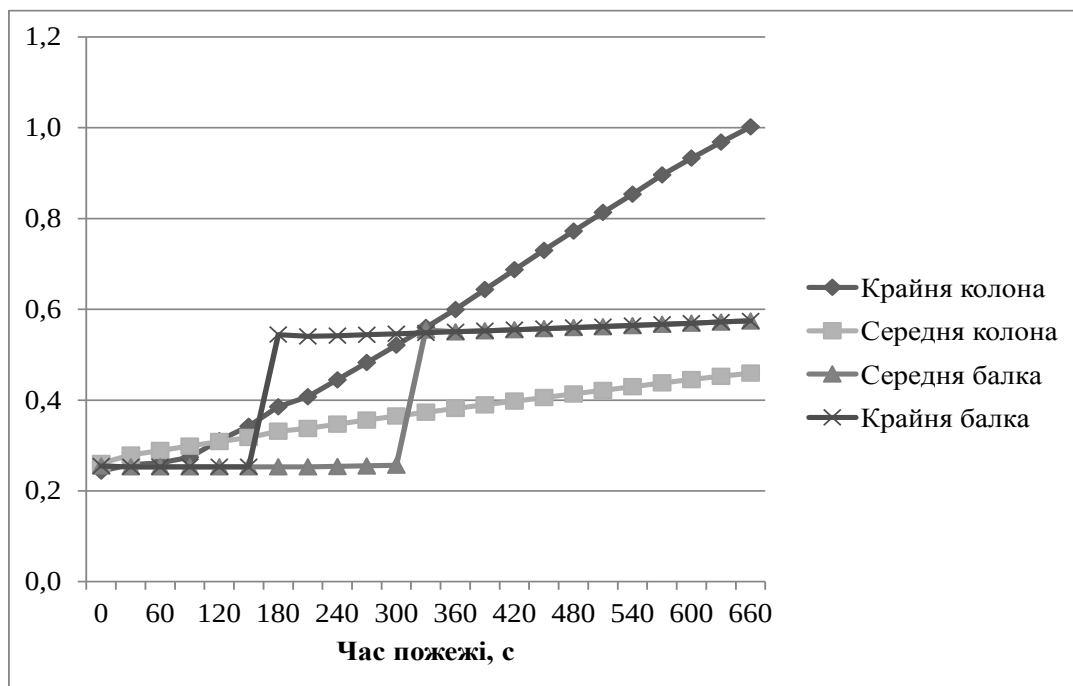


Рис. 16. Графік зміни коефіцієнта несучої здатності для сценарію 6

Для рам із шарнірним примиканням балок до колон із завантаженістю у балок та колон – 75% був розглянутий один сценарій пожежі: нижній поверх – крайній прольот (рис. 17).

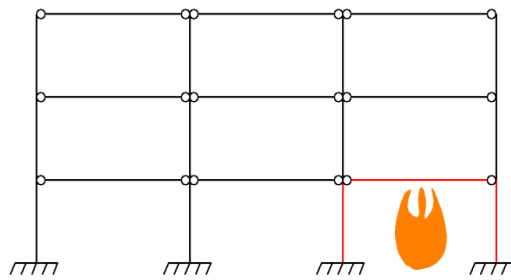


Рис. 17. Сценарій пожежі для рам із завантаженістю 75% з шарнірними балками: нижній поверх – крайній прольот

Результати розрахунку показані в табл. 1. Виходячи з графіка зміни коефіцієнта несучої здатності (рис. 18), можна сказати, що крайня колона руйнується першою, незважаючи на те, що інші елементи в нагрітій чарунці мають вдвічі більший початковий коефіцієнт несучої здатності.

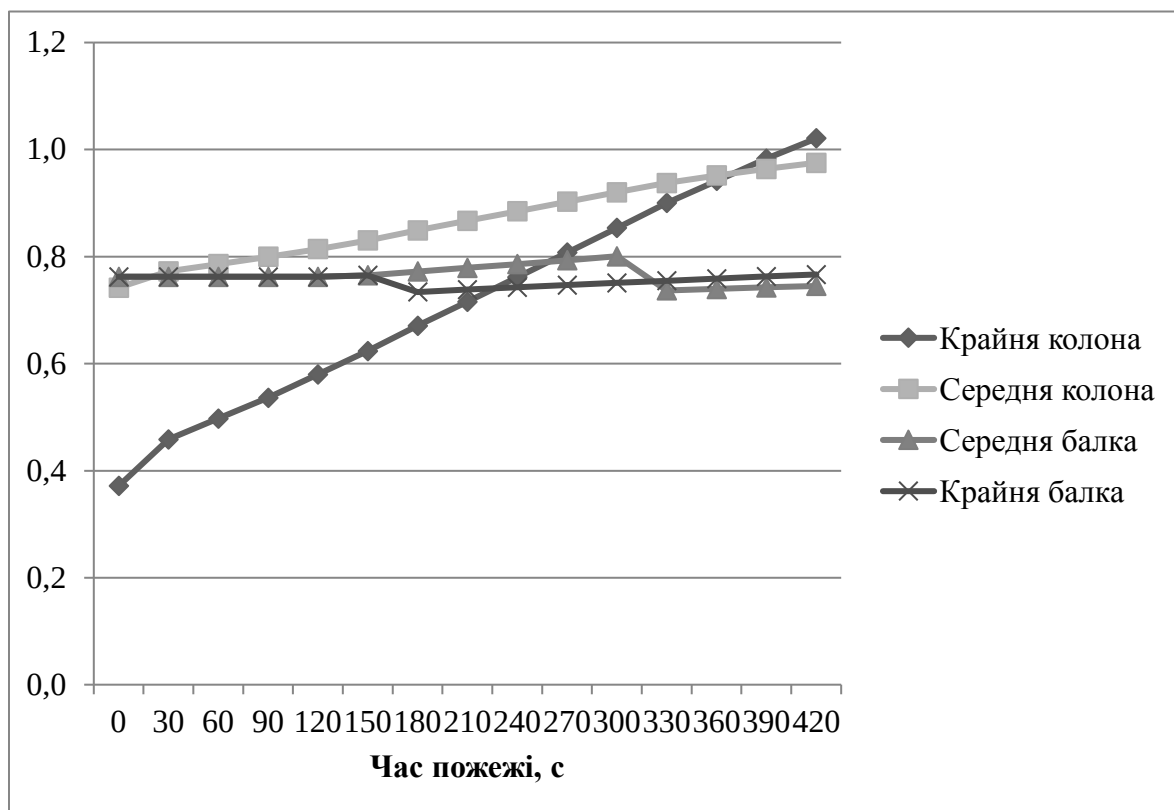


Рис. 18. Графік зміни коефіцієнта несучої здатності для сценарію 7

На відміну від всіх інших сталевих каркасів, розрахованих на дію пожежі, на графіку зміни коефіцієнта несучої здатності балочних елементів не спостерігається стрибка, незважаючи на те, що клас балки було прийнято 1-й, як і для попередніх випадків. Було визначено клас перерізів балок за Eurocode 3 [22] для 3-х варіантів пожежі з різними початковими умовами (табл. 3).

Таблиця 3 – Визначення класу балки за Eurocode 3 [22]

Сценарій	Початкові умови	Переріз балки	Клас балки за ДБН [15]	Клас балки Eurocode 3[22] (стінка)	Клас балки Eurocode 3[22] (пояс)
1	Жорстка рама, нижній поверх крайній прольот	2 – 250×12, 520×12	1 клас	$520/12=43,3 \leq 72 \times (235/240)^{0,5} = 71,2$ – 1 клас	$119/12=9,92 \leq 9 \times (235/240)^{0,5} = 13,86$ – 3 клас
2	Жорстка рама, нижній поверх крайній прольот	2 – 340×14, 520×12	2 клас	$520/12=43,3 \leq 72 \times (235/240)^{0,5} = 71,2$ – 1 клас	$163/14=11,64 \leq 9 \times (235/240)^{0,5} = 13,86$ – 3 клас
7	Шарнірна рама, нижній поверх крайній прольот	2 – 180×20, 480×16	1 клас	$480/16=30 \leq 72 \times (235/240)^{0,5} = 71,2$ – 1 клас	$80/20=4 \leq 9 \times (235/240)^{0,5} = 8,91$ – 1 клас

Було виявлено, що для сценарію 1 з балкою 1-го класу (що працює в межах пружних деформацій) і для сценарію 2 з балкою 2-го класу (в якій допускається розвиток обмежених пластичних деформацій) за ДБН [15] за класифікацією Eurocode 3 [22] обидві належать до 3-го класу (працюють в пружній області, а напруження досягають межі текучості тільки у крайніх волокнах). Саме тому в обох випадках на рис. 4, 10 відбуваються стрибки при переході від згинального до стиснуто-зігнутого напруженого стану. При чому балка, яка за ДБН [15] відноситься до 2-го класу і мала б більш плавно переходити у стиснуто-зігнутий стан, має ще більший стрибок, ніж балка 1-го класу за ДБН [15]. Це явище пояснюється тим, що балка сценарію 2 за Eurocode 3 [22] ближча до 4-го класу (втрата місцевої стійкості настає до досягнення границі текучості в одній або кількох частинах перерізу), ніж балка сценарій 1. А балка в сценарії 7, яка є 1-го класу за ДБН [15] (що працюють в межах пружних деформацій) за Eurocode 3 [22] належить до 1 класу (перерізи, в яких може утворюватися повний шарнір пластичності). І це є причиною того, що на графіку (рис. 20) стрибку не відбувається.

Порівнюючи роботу сталевих каркасів з різним коефіцієнтом використання несучої здатності при пожежі, можна зробити наступні висновки:

- час першого руйнування в рамках з меншими резервами несучої здатності коротший, а в каркасах з більшими – довший;
- в усіх випадках відбувалося перше руйнування одного й того ж елемента за тим же фактором;
- температура руйнування може бути меншою в каркасі з більшими резервами несучої здатності;
- ані в каркасі з великими резервами несучої здатності (0,25), ані в рамі маленькими (0,75) температура жодного з елементів не досягає 400°C, за якої починає знижуватися межа текучості сталі;
- в каркасі із завантаженістю 0,75 не відбувається стрибку на графіку коефіцієнта несучої здатності балки при переході від згинального в стиснуто-зігнутий напружений стан.

Висновки. В даній статті була проаналізована робота сталевих каркасів при пожежі за різних початкових умов таких як: типи вузлів примикання балок до колон, початковий коефіцієнт використання несучої здатності, допущення/недопущення розвитку обмежених пластичних деформацій в балках. Каркаси із шарнірними вузлами схильні до більш раннього руйнування колон, аніж балок. Якщо виходити з того, що безпечніший механізм руйнування буде у випадку першого руйнування балки, а не колони, то з точки зору живучості при пожежі більш ефективними є каркаси з жорсткими вузлами. Але час першого руйнування в каркасах з шарнірним примиканням балок більший, тобто вогнестійкість є вищою. Щоб більш детально проаналізувати живучість каркасів при пожежі, необхідно дослідити роботу каркасів від першого настання граничного стану до втрати живучості. При дослідженні

роботи при пожежі каркасів із різними початковими коефіцієнтами використання несучої здатності виявлено, що в жодному елементі каркасу температура до першого настання граничного стану не досягає 400°C, за якої починає зменшуватися межа текучості сталі. Це свідчить про те, що на несучу здатність елементів сталевих каркасів при пожежі більше впливає розподіл зусиль, ніж зниження характеристик сталі.

В балкових елементах при пожежі від термічного розширення відбувається перехід від згинального до стиснуто-зігнутого напруженого стану. При розрахунку стиснуто-зігнутих елементів допускаються розвиток обмежених пластичних деформацій. Щоб при чисельному розрахунку запобігти стрибку коефіцієнту використання несучої здатності при пожежі, переріз балок необхідно проектувати саме з урахуванням обмежених пластичних деформацій за класифікацією Єврокоду 3 [22] (де клас залежить від геометрії). Допущення пластичних деформацій збільшує час першого руйнування в каркасі і відповідно час втрати живучості, але вимагає додаткових резервів несучої здатності.

Література

1. Дауров М. К., Білик А.С. Огляд вимог сучасних нормативних документів із розрахунку сталевих каркасів багатоповерхових будівель на опір прогресуючому руйнуванню. *Містобудування та територіальне планування*. 2019. №70. С. 175-186.
2. Sun R., Burgess I., Huang Zh., Dong G.. Progressive failure modelling and ductility demand of steel beam-to-column connections in fire. *Engineering Structures*. 2015. №89. P. 66-78.
3. Richard Liew, J.Y., Tang, L.K., Holmaas, T., Choo, Y.S. Advanced analysis for the assessment of steel frames in fire. *Journal of Constructional Steel Research*. 1998. № 47. P. 19-45.
4. Jiang, J., Li, G.Q., Usmani, A.S. Progressive collapse mechanisms of steel frames exposed to fire. *Advances in Structural Engineering*. 2014. № 17(3). P. 381-398.
5. Jiang, B.H., Li, G.Q., Usmani A.S. Progressive collapse mechanisms investigation of planar steel moment frames under localized fire. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015. № 115. P. 160-168.
6. Sun, R.R., Huang, Z.H., Burgess I. Progressive Collapse Analysis of Steel Structures under Fire Conditions. *Engineering Structures*. 2012. №34. P. 400-413.
7. Lange, D., Roben, C., and Usmani, A.S. Tall Building Collapse Mechanisms Initiated by Fire: Mechanisms and Design Methodology. *Engineering Structures*. 2012. №36. P. 90-103.
8. Daurov M.K., Bilyk A.S. Investigation of changes in steel frames stress state in fire and influence on its vitality. *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific and technical collected articles*. 2022. № 108. P. 325-336.
9. Daurov M.K., Bilyk A.S. Providing of the vitality of steel frames of high-rise buildings under action of fire. *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles*. 2019. № 102. P. 62-68.
10. Білик С. І., Білик А. С., Ключніченко Т. О., Джанов Л. В.. Визначення коефіцієнта розрахункової довжини стержня шарнірно закріпленого в нижній частині *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2018. №. 2. С. 162-169.
11. Білик С.І., Білик А.С., Цюпин Є.І., Нужний В.В., Ключніченко Т.О. Удосконалення методики розрахунку зварних швів фланцевих вузлових з'єднань із врізаними ребрами жорсткості просторових сталевих ферм з труб. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2020. № 7. С. 57-65.
12. Memari M. Performance of steel structures subjected to fire following earthquake: PhD dissertation. Colorado State University. Colorado, 2016. 211p.
13. Wada A., Ohi K., Suzuki H., Sakumoto Y., Fushimi M., Kamura H., Murakami Y., Sasaki M., Fujiwara K. Study of Structural Redundancy of High-Rise Steel Building Due to the Effect of Heat and Loss of Vertical Structural Members. 2004.

14. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. [Чинний від 2007-01-01]. К.: Мінбуд України, 2006. 77 с. (Національний стандарт України).
15. UFC 4-023-03. United Facilities Criteria. Design of Buildings to Resist Progressive Collapse. Department of Defense USA, 2009. 227p. (UFC)
16. ДБН В.2.6–198:2014. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування. [Чинний від 2015-01-01]. К.: Мінрегіон України, 2014. 199 с. (Національний стандарт України).
17. ДСТУ–Н Б EN 1993-1-2:2010. Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. [Чинний від 2013-07-01]. К.: Мінрегіон України, 2010. 106 с. (Національний стандарт України).
18. А. С. Білик, А. І. Коваленко. Порівняння методів розрахунку металевих каркасів висотних будівель на одиничну живучість. *Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського*. 2015. № 16. С. 30-39.
19. А. С. Білик, А. І. Коваленко. Динамічні зусилля в колонах сталевих каркасів багатопверхових будівель при розрахунку на одиничну живучість. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2016. № 32. С. 304-309.
20. Коваленко А.І. Особливості проектування багатопверхових будівель з одиничною живучістю. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2016. № 63. С. 62-66.
21. А. С. Білик, А. І. Коваленко. Сучасні методи моделювання прогресуючого руйнування будівель і споруд. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия : Создание высокотехнологических экокомплексов в Украине на основе концепции сбалансированного (устойчивого) развития*. 2016. № 87. С. 35-41.
22. EN 1993-1-1:2005. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings: EN 1991-1. Brussels: Management Centre, 2005. 93 p. (European Standard).

References

- [1] M. K. Daurov, A. S. Bilyk, "Oglyad vimog suchasnikh normativnikh dokumentiv iz rozrakhunku stalevikh karkasiv bagatopoverkhovikh budivel' na opir progresuyuchomu ruihnuvannyu", *Mistobuduvannya ta teritorial'ne planuvannya*, no. 70, pp. 175-186, 2019.
- [2] R. Sun, I. Burgess, Zh. Huang, G. Dong, "Progressive failure modelling and ductility demand of steel beam-to-column connections in fire", *Engineering Structures*, no. 89, pp. 66-78, 2015.
- [3] J.Y. Richard Liew, L.K. Tang, T. Holmaas, Y.S. Choo, "Advanced analysis for the assessment of steel frames in fire", *Journal of Constructional Steel Research*, no. 47, pp. 19-45, 1998.
- [4] J. Jiang, G.Q. Li, A.S. Usmani, "Progressive collapse mechanisms of steel frames exposed to fire", *Advances in Structural Engineering*, no. 17(3), pp. 381-398, 2014.
- [5] B.H. Jiang, G.Q. Li, A.S. Usmani, "Progressive collapse mechanisms investigation of planar steel moment frames under localized fire", *Journal of Constructional Steel Research*, no. 115, pp. 160-168, 2015.
- [6] R.R. Sun, Z.H. Huang, I. Burgess, "Progressive Collapse Analysis of Steel Structures under Fire Conditions", *Engineering Structures*, no. 34, pp. 400-413, 2012.
- [7] D. Lange, C. Roben, A.S. Usmani, "Tall Building Collapse Mechanisms Initiated by Fire: Mechanisms and Design Methodology", *Engineering Structures*, no. 36, pp. 90-103, 2012.
- [8] M.K. Daurov, A.S. Bilyk, "Investigation of changes in steel frames stress state in fire and influence on its vitality", *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific and technical collected articles*, no. 108, pp. 325-336, 2022.

- [9] M.K. Daurov, A.S. Bilyk, "Providing of the vitality of steel frames of high-rise buildings under action of fire", *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles*, no. 102, pp. 62-68, 2019.
- [10] S.I. Bilyk, A.S. Bilyk, T.O. Kliushnichenko, L.V. Dzhanov, "Vyznachennia koefitsiienta rozrakhunkovoi dovezhyny sterzhnia sharnirno zakriplenoho v nyzhnii chastyni", *Budivelni konstruktsii. Teoriia i praktyka*, no. 2, pp. 162-169, 2018.
- [11] S.I. Bilyk, A.S. Bilyk, Ye.I. Tsiupyn, V.V. Nuzhnyi, T.O. Kliushnichenko, "Udoskonalennia metodyky rozrakhunku zvarnykh shviv flantsevykh vuzlovykh ziednan iz vrizanymy rebramy zhorstkosti prostorovykh stalevykh ferm z trub", *Budivelni konstruktsii. Teoriia i praktyka*, no. 7, pp.57-65, 2020.
- [12] M. Memari, "Performance of steel structures subjected to fire following earthquake", PhD dissertation, Colorado State University, Colorado, 2016.
- [13] A. Wada, K. Ohi, H. Suzuki, Y. Sakumoto, M. Fushimi, H. Kamura, Y. Murakami, M. Sasaki, K. Fujiwara, *Study of Structural Redundancy of High-Rise Steel Building Due to the Effect of Heat and Loss of Vertical Structural Members*, 2004.
- [14] DBN V.1.2-2:2006. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia. K.: Minrehionbud Ukrainy, 2006.
- [15] UFC 4-023-03. United Facilities Criteria. Design of Buildings to Resist Progressive Collapse. Department of Defense USA, 2009.
- [16] DBN V.2.6-198:2014. Stalevi konstruktsii. Normy proektuvannia. K.: Minrehionbud Ukrainy, 2014.
- [17] DSTU-N B EN 1993-1-2:2010. Yevrokod 3. Proektuvannia stalevykh konstruktsii. Chastyna 1-2. Zahalni polozhennia. Rozrakhunok konstruktsii na vohnestiikist. K.: Minrehionbud Ukrainy, 2010.
- [18] A.S. Bilyk, A.I. Kovalenko, "Porivnyannia metodiv rozrakhunku metalevykh karkasiv visotnykh budivel' na odinichnu zhivuchist'", *Zbirnik naukovykh prac' Ukraïns'kogo institutu stalevykh konstrukcij imeni V. M. Shimanovs'kogo*, no. 16, pp. 30-39, 2015.
- [19] A.S. Bilyk, A.I. Kovalenko, "Dinamichni zusillya v kolonakh stalevykh karkasiv bagatopoverkhovykh budivel' pri rozrakhunku na odinichnu zhivuchist'", *Resursoekonomni materiali, konstrukcii, budivli ta sporudi*, no. 32, pp. 304-309, 2016.
- [20] A.I. Kovalenko, "Osoblivosti proektuvannia bagatopoverkhovykh budivel' z odinichnoyu zhivuchistyu", *Visnik Odes'koï derzhavnoï akademii budivnictva ta arkhitekturi*, no. 63, pp. 62-66, 2016.
- [21] A.S. Bilyk, A.I. Kovalenko, "Suchasni metodi modelyuvannia progresuyuchogo ruzhuvannia budivel' i sporud", *Stroitel'stvo. Materialovedenie. Mashinostroenie. Seriya : Sozdanie vysokotekhnologicheskikh ehkokompleksov v Ukraine na osnove koncepcii sbalansirovannogo (ustojchivogo) razvitiya*, no. 87, pp. 35-41, 2016.
- [22] EN 1993-1-1:2005. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings: EN 1991-1. Brussels: Management Centre, 2005.

**MULTI-STOREY STEEL FRAMES IN FIRE STRESS STATE COMPARISON OF
UNDER DIFFERENT INITIAL CONDITIONS AND THEIR INFLUENCE ON VITALITY**

¹**Daurov M.K.**, postgraduate student,
mk19daurov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6338-4326

¹**Bilyk A.S.**, Ph.D, Assistant Professor,
artem.bilyk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9219-920X
¹*Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture*
31, Povitroflotsky Ave., Kyiv, 03037, Ukraine

Abstract. The researches devoted multi-storey buildings steel frames fire vitality was analyzed. It was found that the existing measures to increase the viability significantly increase the frames metal content. No detailed analysis of potential destruction mechanisms depending on different initial conditions has been identified. The need to research the frame elements stress state during a fire before the first destruction and subsequent potential mechanisms of destruction for a better vitality understanding. This publication analyzes the stress state of 2d multi-storey steel frames during a fire. Various frame elements load capacity factor dependence graphs on time are done.

The frames operation in case of fire with different beam-to-column connections and different fire source locations are compared. It was found that during a fire in the beam frame elements, the stress state changes from bending to compressed-bent. It has been established that the frame elements should be designed in such a way that plastic deformations appear before local buckling occurs. It is necessary to design sections according to the Eurocode classification, where there is a classification depending on the geometry.

The frames operation in case of fire with different initial load capacity factor is compared. It was found that in no the frame element temperature before the first onset of the limit state does not reach 400°C, at which the steel yield strength begins to decrease. It is established that the frames fire resistance of is more influenced not by the steel characteristics reduction, but by the forces distribution.

The frames with rigid and hinged beam-to-column connections are compared in terms of vitality and fire resistance. It is established that frames with hinged connections are more fire-resistant, and with rigid connections – more vitally to fire. The method of increasing the time to steel frame vitality loss is determined.

Keywords: vitality, fire, steel frame, multi-storey building, progressive collapse, plastic deformation.

Стаття надійшла до редакції 19.07.2022