

С. О. Сідней, д.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-7664-6620)

І. І. Іщенко, викл. каф. (ORCID 0009-0000-5050-4926)

Т. В. Костенко, д.т.н., проф., проф. каф. (ORCID 0000-0001-9426-8320)

Р. Б. Мотрічук, PhD, викл. каф. (ORCID 0000-0002-5670-6788)

Є. В. Школяр, к.психол.н., доц. каф. (ORCID 0000-0002-7304-1677)

В. Ю. Колосков, к.т.н., доцент, в.о. нач. центру (ORCID 0000-0002-9844-1845)

Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

ЗАЛЕЖНІСТЬ МЕЖІ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕВОЇ КОЛОНИ ВІД РІВНЯ НАВАНТАЖЕННЯ

У межах дослідження було проведено розрахунки з оцінювання вогнестійкості сталевій колони в умовах впливу пожежі з урахуванням різного рівня механічного навантаження. Математичне моделювання, виконане у програмному середовищі ANSYS, дозволило врахувати температурно-залежні характеристики матеріалу, просторову геометрію елемента та комбіновану дію температурного й механічного навантаження. Об'єктом дослідження є напружено-деформований стан сталевій колони без вогнезахисту в умовах сумісного впливу температурного та механічного навантаження. Проблема дослідження полягає в тому, що в сучасній інженерній практиці відсутній спрощений підхід до оцінювання вогнестійкості сталевих колон, який би забезпечував прийнятний рівень точності, порівнянний з результатами, отриманими за допомогою уточнених методів чисельного моделювання. Застосування таких методів потребує значних обчислювальних ресурсів, спеціалізованого програмного забезпечення та високої кваліфікації виконавців, що ускладнює їх використання під час проєктування або під час оцінювання ризиків у реальних умовах. Через це виникає необхідність у створенні більш доступного інженерного інструменту, який би дозволив з достатньою точністю прогнозувати втрату несучої здатності конструкцій в умовах пожежі без залучення складних розрахункових схем. Ці розрахунки стали основою для побудови аналітичної залежності межі вогнестійкості конструкції від рівня навантаження. Запропонована залежність забезпечує високу точність, порівнянну з уточненими методами, і водночас дозволяє швидко оцінювати вогнестійкість аналогічних конструкцій без потреби у складному чисельному моделюванні. Таким чином, отримані результати стали підґрунтям для формування практично орієнтованого підходу до попереднього визначення межі вогнестійкості сталевих колон при заданому рівні навантаження.

Ключові слова: вогнестійкість, метод скінченних елементів, комп'ютерне моделювання, втрата несучої здатності, пожежа

1. Вступ

Сучасне будівництво дедалі більше орієнтується на використання матеріалів, які поєднують у собі високу міцність, довговічність, технологічність і ефективність монтажу. Одним із таких універсальних матеріалів є сталь, яка завдяки своїм унікальним фізико-механічним властивостям посідає провідне місце серед конструкційних матеріалів. Її висока міцність при деформаціях на розтяг і стиск дозволяє створювати елементи, здатні сприймати значні навантаження без суттєвих деформацій, забезпечуючи при цьому економію матеріалів і зменшення маси споруд. Це знижує навантаження на фундаменти та підвищує ефективність конструктивних рішень [1].

Важливою перевагою сталевих конструкцій є їхня здатність надійно працювати за дії як статичних, так і динамічних навантажень, включаючи вітрові, сейсмічні та експлуатаційні впливи [2]. Завдяки високому модулю пружності сталь зберігає геометричну стабільність елементів навіть у випадках багаторазового або змінного навантаження. Пружність і пластичність цього матеріалу забезпечують ефективне поглинання енергії під час короткочасних динамічних дій, запобігаючи руйнуванню конструкцій. Це робить сталь незамінною при спорудженні висотних

будівель, мостів, ангарів, торговельних і спортивних центрів, тобто об'єктів, що потребують максимальної надійності та стійкості до зовнішніх впливів [1, 3].

За умови правильного технічного обслуговування та захисту від корозії сталь здатна зберігати свої властивості понад пів століття без потреби у значних ремонтах [1, 3]. Її інертність до біологічних чинників, ультрафіолетового випромінювання та коливань температури робить матеріал надзвичайно стійким до старіння. Для підвищення терміну служби сталевих елементів застосовують цинкування, антикорозійне фарбування, нержавіючі сталі й леговані сплави, що забезпечує їхню довготривалу експлуатацію навіть у складних кліматичних умовах.

Суттєвою перевагою сталі є її здатність ефективно протистояти агресивним середовищам [1, 3]. У хімічно активних, морських або промислових умовах сучасні захищені сталі демонструють стабільні показники міцності та зносостійкості. Це дозволяє використовувати їх у нафтопереробній, харчовій, фармацевтичній промисловості, а також у портових спорудах і каналізаційних системах, де дія вологи та реагентів є постійною [4].

Висока пластичність і технологічність сталі робить її одним із найзручніших матеріалів для виготовлення та монтажу конструкцій. Вона легко піддається різанню, згинанню, зварюванню, штампуванню, що дає змогу реалізовувати складні архітектурні форми та інженерні рішення. Використання сталі дозволяє створювати просторі інтер'єри з великими прольотами без проміжних опор, забезпечуючи гнучкість планувальних рішень і комфортність середовища [1–4].

Однією з найсуттєвіших переваг сталевих конструкцій є можливість значного скорочення часу будівництва завдяки попередньому виготовленню елементів на виробництві. Компоненти конструкцій створюються в контрольованих умовах заводів із застосуванням сучасного обладнання, що забезпечує високу точність, мінімізацію похибок і повну відповідність проєктній документації. Такий підхід дозволяє уникнути затримок, пов'язаних із погодними умовами чи складністю виконання робіт безпосередньо на будівельному майданчику. Після доставки на об'єкт збірка сталевих елементів здійснюється швидко та ефективно за допомогою кранів і болтових або зварних з'єднань. Це скорочує строки будівництва, зменшує витрати на оплату праці, оренду техніки та облаштування тимчасової інфраструктури [4]. Монтаж сталевих конструкцій можливий навіть у зимовий період, коли бетонування чи кладка є ускладненими або неможливими. Така швидкість і мобільність особливо актуальні для міських проєктів, де є обмежений простір будівельного майданчика, високі вимоги до термінів або потреба в оперативному введенні об'єкта в експлуатацію – наприклад, у випадку торговельних комплексів, логістичних центрів, лікарень чи об'єктів критичної інфраструктури. Ефективна організація будівельного процесу знижує загальні витрати на реалізацію проєкту та дозволяє швидше досягти економічної віддачі. Крім того, зменшення кількості ручних операцій і часу перебування працівників на висоті сприяє підвищенню рівня безпеки праці, що робить сталь оптимальним вибором для сучасного індустріального будівництва [1–4].

Попри численні переваги, одним із ключових недоліків сталі є її низька стійкість до високих температур. На відміну від залізобетону, сталь не здатна тривалий час зберігати свої властивості при дії вогню [5]. Уже за температури понад 500°C її механічні характеристики стрімко погіршуються: зменшується границя текучості, знижується модуль пружності, втрачається жорсткість, що призводить до зниження несучої здатності елементів і можливого руйнування споруди [6].

Така вразливість вимагає застосування спеціальних розрахункових методик, експериментальних досліджень і вогнезахисних заходів, спрямованих на забезпечення стабільності конструкцій у разі пожежі [7].

Тому забезпечення надійної роботи сталевих колон в умовах пожежі безпосередньо залежить від коректності визначення їхньої вогнестійкості. Для цього необхідно застосовувати адекватні методи оцінювання, здатні відображати реальні процеси втрати несучої здатності конструкцій під дією високих температур.

Оцінювання вогнестійкості сталевих колон у сучасній інженерній практиці переважно здійснюється за допомогою розрахункових методів, які поділяються на спрощені та уточнені підходи. Спрощені методи дають змогу оперативно перевірити відповідність конструкції заявленому класу вогнестійкості, проте вони забезпечують лише констатацію того, чи відповідає елемент заданому класу, і не дають точного значення фактичної межі вогнестійкості, формуючи додатковий запас, що може бути завищеним. Натомість уточнені методи, засновані на чисельному моделюванні та застосуванні методу скінченних елементів, дають можливість отримати високоточні результати, але вимагають значних ресурсів, спеціалізованого програмного забезпечення та залучення кваліфікованих фахівців.

За таких умов виникає наукова проблема, що полягає в суперечності між потребою у точному визначенні фактичної межі вогнестійкості сталевих колон та обмеженими можливостями існуючих методів її оцінювання: спрощені підходи не забезпечують необхідної точності, а уточнені – надмірно ресурсомісткі для широкого практичного застосування. Подолання цієї суперечності потребує розроблення підходів, які б забезпечували точність, наближену до уточнених методів, але без значних матеріальних, часових і кадрових витрат, що визначає актуальний напрям наукових досліджень та формує потребу у створенні ефективних інженерних рішень і оптимізованих методик.

2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій у Європі здійснюється відповідно до положень Єврокоду 3, а саме частини EN 1993-1-2:2005 «Проектування сталевих конструкцій. Загальні правила. Проектування конструкцій на випадок пожежі». Цей нормативний документ є частиною системи європейських стандартів (Eurocodes), які застосовуються для уніфікованого проектування будівельних конструкцій в умовах дії вогню. У ньому наводяться методи визначення температурного впливу на елементи конструкцій, рекомендації щодо застосування різних типів вогнезахисту та критерії оцінювання втрати несучої здатності. Важливо, що EN 1993-1-2 передбачає можливість як спрощених розрахунків, так і складного чисельного моделювання, що дозволяє інженерам обирати найбільш доцільний підхід залежно від типу проекту, класу будівлі та ступеня відповідальності конструкцій.

В Україні, з метою адаптації європейських стандартів до національного контексту, розроблено і впроваджено низку нормативних документів, серед яких ключову роль відіграє ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 «Настанова з проектування сталевих конструкцій на вогнестійкість». Відповідно до його вимог, для визначення вогнестійкості сталевих конструкцій застосовують три методи, а саме: спрощений, уточнений та експериментальний (випробувальний) методи. ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 містить інструкції з визначення межі вогнестійкості сталевих елементів, порядок виконання розрахунків у нормальному та пожежному режимах, а

також методи оцінки ефективності засобів вогнезахисту. У ньому враховано специфіку вітчизняних будівельних матеріалів, кліматичні умови, доступність технологій та практику проектування, що робить його актуальним для українських інженерів і архітекторів.

Таким чином, нормативна база ЄС і України дає змогу здійснювати повноцінну оцінку вогнестійкості сталевих конструкцій, забезпечуючи баланс між безпекою, економічною ефективністю та сучасними вимогами до архітектури і будівництва.

Розрахункові методи оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій поділяються на спрощені та уточнені, кожен із яких має свої переваги та сфери застосування. Спрощені методи оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій (як зазначено, зокрема, у [7]) набули поширення завдяки своїй простоті застосування на ранніх етапах проектування. Їх ключова перевага полягає в можливості швидкої оцінки граничного стану конструкції без необхідності залучення складних моделей чи програмного забезпечення. Такий підхід є доцільним для типових ситуацій, коли температура пожежі передбачається стандартною, геометрія конструктивних елементів проста, а навантаження – рівномірно розподілені.

Однак у сучасній інженерній практиці, де все частіше зустрічаються нерегулярні схеми навантажень, комбіновані матеріали, складна геометрія (наприклад, перерізи з отворами, зварні або болтові з'єднання), високі вимоги до точності та прогнозованості поведінки в умовах пожежі, спрощені методи демонструють суттєві обмеження. Зокрема:

- вони не дозволяють врахувати локальні ефекти температурного впливу;
- не відображають зміни жорсткості вздовж довжини елемента;
- не підходять для неуніфікованих умов нагрівання.

Ускладнення застосування цих методів у практиці також пов'язане з необхідністю вручну враховувати безліч поправкових коефіцієнтів, що, за відсутності програмної підтримки, збільшує ризик помилок та знижує достовірність результатів.

Таким чином, хоча спрощені методи залишаються корисним інструментом для попереднього аналізу, використовувати їх як єдиний засіб оцінювання вогнестійкості в умовах складних об'єктів є недостатньо обґрунтованим. Це формує підґрунтя для необхідності удосконалення існуючих методик або переходу до уточнених чи чисельних методів аналізу.

Уточнені розрахункові методи, засновані на чисельному моделюванні (зокрема згідно з [9]), дозволяють врахувати значно більшу кількість факторів, які впливають на поведінку сталевих колон в умовах пожежі. До їхніх переваг належить можливість моделювання реального температурного поля, локальних деформацій, складної геометрії перерізів, нерівномірних навантажень, ефектів взаємодії елементів, а також впливу вогнезахисних покриттів.

У той самий час, результати досліджень [9] вказують, що ефективне використання таких підходів передбачає:

- наявність достовірних експериментальних даних для верифікації моделі;
- ретельне завдання початкових і граничних умов;
- застосування високоточного програмного забезпечення (наприклад, SAFIR, ANSYS, ABAQUS);
- наявність висококваліфікованого інженера-аналітика.

До того ж, моделювання з використанням уточнених методів суттєво залежить від якісного завдання фізико-механічних характеристик матеріалу [10], зокрема при підвищених температурах, які часто невідомі або мають значну варіатив-

ність у різних стандартах [11]. Це обмежує універсальність підходу.

Таким чином, попри високу точність результатів, використання уточнених методів залишається малодоступним для широкого інженерного кола через складність реалізації, що й формує запит на оптимізовані алгоритми або гібридні підходи до оцінювання вогнестійкості.

Уточнені методи, базовані на чисельному моделюванні, мають потенціал надати високоточні результати. Однак їх реалізація вимагає великого обсягу вихідних даних, високої якості параметризації, використання складного програмного забезпечення та участі фахівців, що володіють відповідною інженерною і комп'ютерною компетенцією. Будь-яка похибка на етапі формалізації даних або некоректна постановка моделі може призвести до суттєвого викривлення результатів.

Усі ці чинники ускладнюють забезпечення об'єктивної оцінки вогнестійкості сталевих конструкцій у реальних умовах пожежі, особливо в контексті практичного проєктування або швидкої оцінки ризиків під час реконструкції існуючих об'єктів.

Таким чином, аналіз сучасних підходів свідчить про існування фундаментальної суперечності: з одного боку – недостатня точність спрощених методів, з іншого – надмірна складність реалізації уточнених. Це створює об'єктивну потребу у вдосконаленні інженерних методів, які б водночас забезпечували точність, адаптивність до складних сценаріїв пожежі та практичну доступність для широкого інженерного застосування.

Методика експериментального визначення вогнестійкості сталевих колон передбачає проведення спеціальних випробувань у лабораторних умовах, які максимально імітують реальні сценарії пожежі [12]. Основою таких досліджень є піддавання зразків впливу стандартного температурного режиму згідно з міжнародним стандартом ISO 834. Цей температурний режим описує умовну пожежу, яка характеризується стрімким зростанням температури в печі до понад 1000 °C протягом перших 60 хвилин. У процесі випробувань зразки сталевих колон розміщуються в спеціальних термокамерах або печах, де відтворюється вогневе навантаження, аналогічне до реального пожежного середовища.

Такі експерименти дійсно забезпечують найбільш достовірну оцінку поведінки сталевих колон під час пожежі. Визначення граничного часу втрати несучої здатності має вирішальне значення для подальшої сертифікації конструкцій та оцінювання ефективності захисних заходів [6]. Проте, критично важливо враховувати, що висока точність і достовірність таких випробувань досягається за рахунок значних ресурсних витрат – як матеріальних, так і часових. Це обмежує їх застосування в умовах масового проєктування або для оперативного оцінювання стану конструкцій у вже збудованих спорудах.

Крім того, високі вимоги до лабораторної бази (наявність термокамер, точних засобів контролю, систем навантаження тощо) роблять ці методи недоступними для багатьох проєктних організацій, особливо у країнах із обмеженим доступом до сучасної технічної інфраструктури.

Варто також зауважити, що хоча стандарти EN 13381-4 [13] та EN 13381-8 [14] і встановлюють типові процедури випробувань вогнезахисних матеріалів, їх застосування не завжди враховує специфіку реальних умов експлуатації, зокрема змінні навантаження, неоднорідності матеріалів або непередбачувані шляхи поширення вогню в складних об'ємно-планувальних рішеннях. Це, у свою чергу, знижує релевантність результатів лабораторних випробувань для практичних сценаріїв.

Отже, незважаючи на очевидну наукову цінність та високу точність, експериментальні методи мають суттєві практичні обмеження, які унеможливають їхнє широке впровадження в типовому будівництві. Це зумовлює потребу в розвитку адаптивних комбінованих підходів – таких, що поєднують експериментальні результати із уточненими чисельними методами для створення валідованих і доступних моделей пожежної поведінки сталевих колон.

Існують також розрахунково-експериментальні методи [15], які поєднують в собі результати натурних або лабораторних випробувань з подальшим використанням спрощених розрахункових підходів. Зокрема, під час таких випробувань визначається розподіл температури в конструкції в умовах дії стандартного або реального пожежного навантаження. Отримані температурні криві використовуються як вхідні дані для спрощеного розрахунку граничного стану. На основі цього обчислюється час до втрати несучої здатності та визначається клас вогнестійкості.

Такий підхід дозволяє зменшити обсяг повноцінного моделювання, а також частково компенсувати недоліки спрощених методів за рахунок урахування реальних температурних впливів. Однак розрахунково-експериментальні методи мають низку обмежень. По-перше, точність отриманих результатів значною мірою залежить від умов проведення експерименту, якості вимірювального обладнання, геометрії зразка та способу фіксації температурних даних. По-друге, навіть у разі використання реальних температурних даних, подальший етап спрощеного розрахунку залишається вразливим до тих самих недоліків, що були притаманні класичним спрощеним методам – неврахування локальних ефектів, напруженого стану, різниці у вогнезахисних шарах тощо.

Таким чином, розрахунково-експериментальні методи можуть бути ефективними у типових ситуаціях, коли важливо зменшити обсяг моделювання, але не є універсальним інструментом для оцінювання вогнестійкості у складних умовах або нестандартних архітектурних рішеннях. Їх застосування потребує ретельної калібровки експериментальних параметрів, що знижує загальну гнучкість і масштабованість цього підходу в проєктній практиці.

Отже, огляд нормативних документів, наукових джерел та існуючих підходів до оцінювання вогнестійкості сталевих колон свідчить про наявність фундаментальної наукової суперечності. Вона полягає у протилежних властивостях трьох основних груп методів:

- спрощені методи, попри їх доступність і швидкість, забезпечують лише орієнтовну оцінку («відповідає чи не відповідає» нормованому класу вогнестійкості) та не здатні відтворити реальні термомеханічні процеси;
- уточнені чисельні методи дають високу точність, але потребують значних обчислювальних ресурсів, складного програмного забезпечення та високої кваліфікації спеціаліста, що обмежує їх широке практичне застосування;
- експериментальні та натурні випробування забезпечують найвищу достовірність, однак водночас є надзвичайно ресурсомісткими, потребують спеціалізованого обладнання, значних фінансових витрат та тривалого часу підготовки й проведення, що робить їх недоцільними для масового використання в типовому проєктуванні.

У зв'язку з чим виникає наукова проблема, що виражається у суперечності між потребою у точному, достовірному та оперативному визначенні фактичної межі вогнестійкості сталевих колон та недостатньою ефективністю наявних методів: спрощені – надто грубі, уточнені – надто складні й дорогі, експериментальні – малодоступні та ресурсозатратні. Подолання цієї суперечності вимагає розро-

блення методів або інженерних алгоритмів, здатних забезпечити точність, наближену до чисельних або експериментальних підходів, але без значних матеріальних, часових, кадрових і технічних витрат. Саме створення таких адаптивних, практично застосовних та ресурсоефективних підходів і становить актуальний напрям сучасних досліджень у сфері оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій.

3. Мета та завдання дослідження

Мета роботи полягає у встановленні залежності між рівнем прикладеного навантаження та зміною межі вогнестійкості сталевій колоні, виготовленої з двотаврового профілю № 24. Це дозволить здійснювати оцінювання вогнестійкості таких конструкцій без необхідності проведення математичного моделювання із застосуванням методу скінченних елементів.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

1. Побудувати тривимірну скінченно-елементну модель сталевій колоні з урахуванням реальної геометрії та температурно-залежних властивостей матеріалу для аналізу її поведінки в умовах стандартного пожежного навантаження.

2. Виконати математичне моделювання напружено-деформованого стану колони при сумісному впливі теплового та механічного поздовжнього навантаження (20 %, 40 % і 60 % від критичного), з метою визначення часу втрати несучої здатності.

3. Побудувати графічну залежність між рівнем механічного навантаження та межею вогнестійкості, яка дозволить надалі оцінювати вогнестійкість аналогічних конструкцій без проведення обчислень за спрощеним методом, а також без застосування математичного моделювання.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єкт дослідження – напружено-деформований стан сталевій колоні без вогнезахисту в умовах сумісного впливу температурного та механічного навантаження.

Предмет дослідження – вплив рівня прикладеного механічного навантаження на зміну межі вогнестійкості сталевій колоні без вогнезахисту в умовах дії стандартного температурного режиму пожежі.

Гіпотеза дослідження полягає в тому, що математичне моделювання поведінки сталевій колоні за умов одночасного впливу теплового та механічного навантаження дозволить встановити залежність межі вогнестійкості від рівня прикладеного навантаження. Це, своєю чергою, уможливить визначення межі вогнестійкості графічним методом – без необхідності використання уточненого або навіть спрощеного розрахункового підходу.

Методи дослідження включали три основні етапи:

1. Формування скінченно-елементної моделі у програмному комплексі ANSYS WB для дослідження напружено-деформованого стану сталевій колоні в умовах сумісного термосилового впливу протягом 1800 с.

2. Проведення статичного розрахунку для визначення часу втрати несучої здатності сталевій колоні при прикладених навантаженнях, що становлять 20 %, 40 % і 60 % від критичного значення, з метою встановлення залежності межі вогнестійкості від рівня механічного навантаження.

Для проведення чисельного моделювання було обрано сталеву колону з наступними геометричними характеристиками: довжина (висота) конструкції – 3000 мм, ширина полиць – 115 мм, висота перерізу – 240 мм, товщина полиць – 9,5 мм, товщина стінки – 5,6 мм (рис. 1).

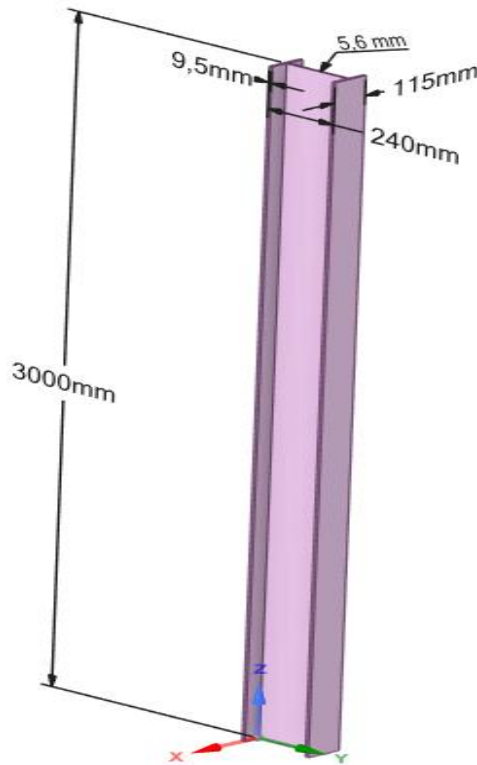


Рис. 1. Габаритні розміри досліджуваної сталеві колони

Такі параметри відповідають реальним конструктивним рішенням, що застосовуються у вертикальних несучих елементах сучасних багатоповерхових будівель – адміністративних, громадських, промислових та торговельних. Вибір саме цієї конфігурації колони зумовлений її типовістю для каркасного будівництва та відповідністю вимогам нормативних документів.

Критичне механічне навантаження, за якого настає втрата стійкості сталеві колони, визначалося за формулою Ейлера за рекомендаціями [1]:

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l_{пр}^2}, \quad (1)$$

де π – число Пі 3,14; E – модуль Юнга сталі $2,1 \cdot 10^5$ МПа; I – осьовий момент інерції перерізу колони; $l_{пр}$ – приведена довжина колони, яка дорівнює $l_{пр} = l_{пр} \cdot \mu$, де $\mu = 1$, за умови шарнірного закріплення колони з двох боків.

На основі цього розрахунку було визначено значення критичного навантаження, яке становило 554,7 кН. Від нього у чисельній моделі були задані три рівні прикладеного навантаження – 20 %, 40 % та 60 % від критичного значення. Відповідні навантаження моделювались у вигляді тиску, прикладеного до верхньої грані поперечного перерізу сталеві колони (рис. 2).

Після прикладання механічного навантаження прикладається тепловий вплив у вигляді температурного навантаження за принципом описаним у [16, 17].

У моделі враховано, що тепла дія пожежі здійснюється з чотирьох боків колони, за схемою, що представлена на рис. 3. З термодинамічної точки зору, така постановка задачі передбачає рівномірне теплообмінне навантаження на зовнішню поверхню сталеві профілю, що відповідає реальним умовам повного охоплення вогнем [18, 19].

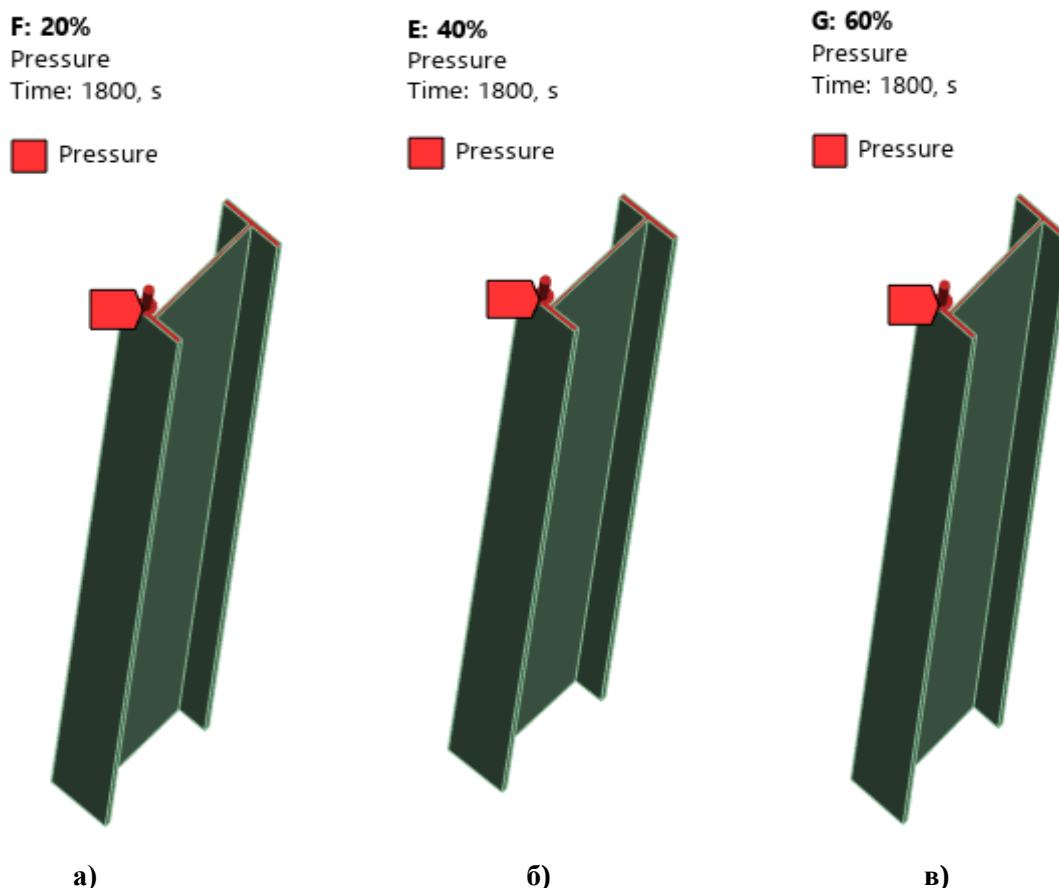


Рис. 2. Схема прикладання навантаження до верхньої грані поперечного перерізу сталевій колони за трьома рівнями: а – 20 %, б – 40 %, в – 60 % від критичного поздовжнього навантаження

Функцію, що описує тепловий вплив згідно зі стандартним температурним режимом пожежі, було використано відповідно до рекомендацій [6]. Її математичне подання має такий вигляд:

$$\vartheta = 345 \cdot \lg(8 \cdot t + 1) + 20, \quad (2)$$

де t – час, що відраховується від початку випробування, хв.

Час впливу пожежі було прийнято 1 800 с, оскільки незахищені сталеві конструкції мають низькі показники вогнестійкості [16, 17].

Така конфігурація теплового навантаження відповідає типовій конструктивній ситуації, коли сталева колона розташована відкрито та не обмежена будівельними елементами з жодного боку. У реальних умовах багатоповерхового каркасного будівництва саме така геометрія зустрічається найчастіше – наприклад, у центральних або крайових частинах каркаса будівлі, де колони повністю оточені повітрям і потенційно можуть зазнавати впливу високих температур з усіх боків. Цей сценарій вважається одним із найбільш несприятливих для конструктивного елемента з точки зору вогнестійкості, оскільки відсутність теплового бар'єру значно прискорює прогрівання перерізу. Саме тому така умова є базовою для чисельного моделювання вогневого навантаження при розрахунках граничного стану несучої здатності.

Для розв'язання теплотехнічної задачі були задані відповідні граничні умови для сталевій двотаврової колони, що є об'єктом дослідження в цій роботі. Зазна-

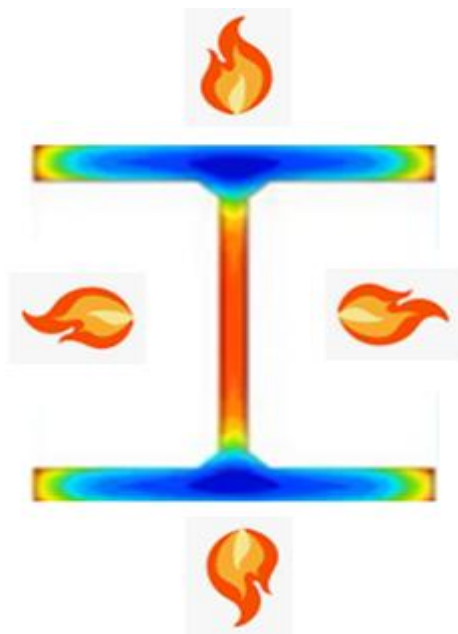


Рис. 3. Схема впливу стандартного температурного режиму пожежі до досліджуваної сталевій колоні

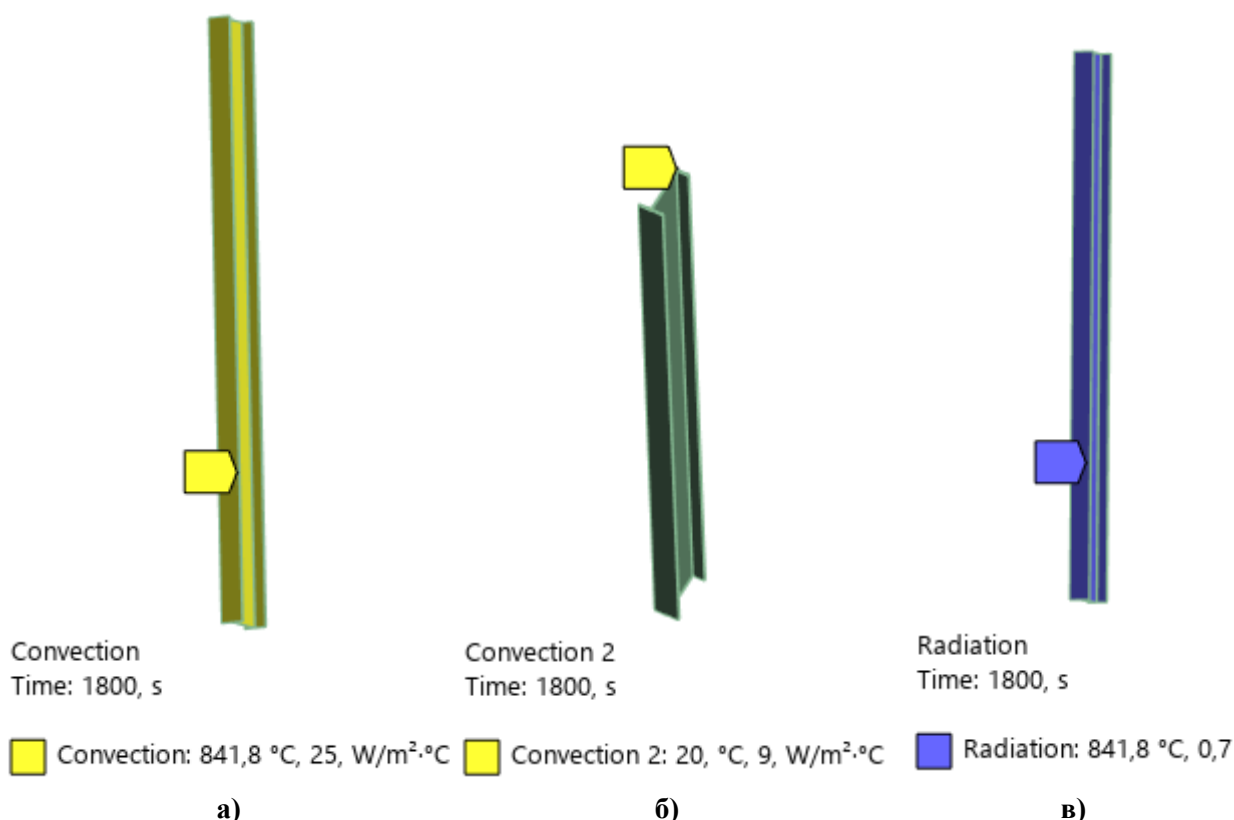


Рис. 4. Прикладання граничних умов до досліджуваної сталевої колони: а – конвекційний теплообмін обігрівних поверхонь конструкції; б – конвекційний теплообмін необігрівних поверхонь конструкції; в – радіаційний теплообмін обігрівних поверхонь конструкції

Для поверхонь сталевї колони, що безпосередньо зазнають дії вогню, було за-
дано складне теплове навантаження, яке охоплює два основні механізми теплообміну:

Fire Safety. DOI: 10.52363/2524-0226-2025-42-17	273
---	-----

➤ конвективний теплообмін між нагрітою газовою фазою, що утворюється в умовах пожежі, та зовнішніми поверхнями колони. Його моделювання здійснюється з використанням відповідного коефіцієнта тепловіддачі, величина якого залежить від температури та швидкості потоку, а також від типу руху газів – при пожежі, як правило, домінує турбулентний режим, що сприяє інтенсивному переносу тепла;

➤ радіаційний теплообмін, який враховує вплив теплового випромінювання від полум'я та гарячих газів на поверхню колони. У розрахунках береться до уваги коефіцієнт чорності сталі, що характеризує її здатність до поглинання теплової енергії, а також температура джерела випромінювання, яка істотно впливає на інтенсивність теплопередачі. Цей механізм є критичним у фазі активного горіння, коли випромінювання стає основним каналом передачі енергії.

Для тих граней колони, які не перебувають у прямому контакті з вогнем, у моделюванні застосовані граничні умови третього роду. Вони передбачають теплообмін із навколишнім середовищем через природну конвекцію та радіаційне випромінювання при постійній температурі зовнішнього повітря (близько 20–25 °C). Такий підхід дозволяє змодельовати теплові втрати на «тіньових» ділянках перерізу, що є важливою умовою формування збалансованої термічної моделі. Комплексне використання таких граничних умов забезпечує створення максимально наближеної до реальності моделі температурного навантаження, дозволяючи відстежити розподіл температур у перерізі колони в часі й просторі, ідентифікувати зони теплового піку та проаналізувати напрямки поширення тепла. Це має особливе значення при переході до розрахунків напружено-деформованого стану елемента, оскільки нерівномірний температурний розподіл безпосередньо впливає на розвиток температурних напружень, деформацій та можливість втрати стійкості. Відтак правильне завдання граничних умов є основою достовірного чисельного моделювання й прийняття ефективних рішень у сфері проектування протипожежного захисту сталевих конструкцій.

5. Математичне моделювання поведінки сталеві колони в умовах сумісного термосилового навантаження

5.1. Побудова скінченно-елементної моделі сталеві колони

На основі побудованої геометричної моделі сталеві колони (рис. 1) була сформована тривимірна скінченно-елементна сітка (рис. 5), яка слугувала основою для подальшого чисельного моделювання теплового впливу стандартного пожежного навантаження.

У процесі дискретизації використовувалися елементи типу SOLID279, призначені для моделювання нелінійного теплопереносу в середовищі з температурними градієнтами, що змінюються в часі. Ці елементи враховують температурну залежність теплофізичних і механічних властивостей сталі, що є критично важливим для достовірного моделювання її поведінки під впливом вогневого навантаження.

Для побудови сітки застосовано метод Sweep, що формує впорядковану структуру з рівномірним розподілом елементів уздовж колони [20–22]. Використано гексаедральні об'ємні елементи, які забезпечують високу точність у моделюванні складної геометрії та температурних градієнтів. У порівнянні з тетраедральною, така сітка потребує менше елементів, забезпечуючи кращу схожимість, стабільність розрахунків і точне врахування теплової інерційності.

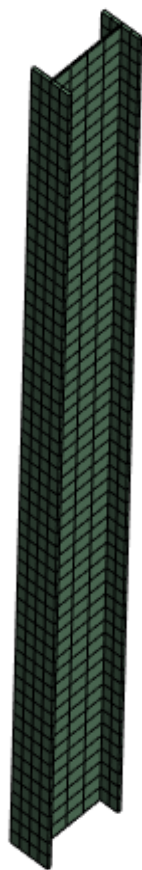


Рис. 5. Побудована скінченно-елементна сітка досліджуваної сталевій колони

Сітка з 1 260 елементів і 6 680 вузлів забезпечує баланс між точністю й продуктивністю: вона досить щільна для відображення локальних температурних піків і градієнтів, але водночас не перевантажує обчислювальні ресурси. Такий рівень дискретизації дозволяє ефективно виконувати тепловий та механічний аналіз сталевій колони.

5.2. Результати моделювання напружено-деформованого стану колони в умовах пожежі

За результатами проведеного розрахунку було отримано розподіл температури по сталевій колоні що представлено на рис. 6.

Максимальні значення температури фіксуються у верхній частині сталевій колони (рис. 6), що є очікуваним результатом, враховуючи характер поширення тепла під час пожежі. У стандартному температурному режимі передбачається концентрація найвищих температур у верхній зоні приміщення, де акумулюються гарячі гази та продукти згоряння.

Відповідно, найнижчі температури спостерігаються у нижній частині елемента, що також відображено на рис. 6.

Як зазначалося раніше, чисельне дослідження сумісного впливу механічного навантаження та стандартного температурного режиму пожежі на сталеву колону проводилось протягом 1 800 секунд (30 хвилин). Такий часовий інтервал обрано з урахуванням того, що незахищені сталеві конструкції характеризуються низькою вогнестійкістю – як правило, вони втрачають несучу здатність вже в межах перших 15 хвилин пожежі. Це зумовлено швидким підвищенням температури та інтенсивною деградацією механічних властивостей сталі.

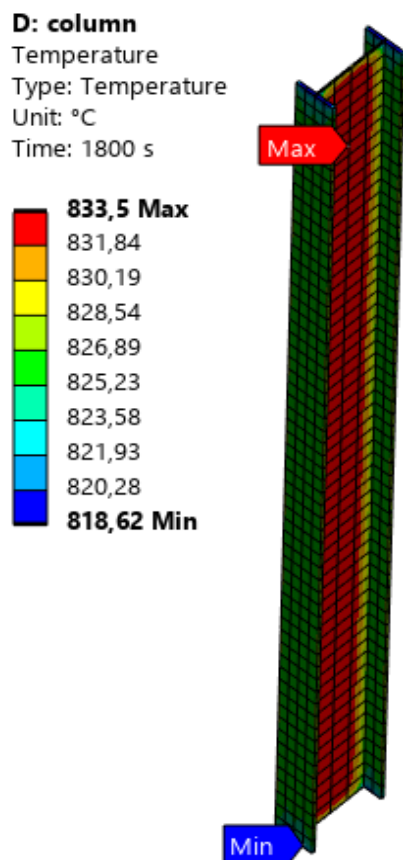


Рис. 6. Розподіл температури по сталевій колоні в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі протягом 1800 с [17]

У межах даного моделювання враховувалися температурозалежні теплофізичні та механічні характеристики, а також фактична геометрія поперечного перерізу колони, що дозволило достовірно оцінити поведінку конструкції в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі. На колону було прикладено попередньо визначене поздовжнє навантаження, яке відповідає різним рівням несучої здатності (20 %, 40 %, 60 %) від критичної сили за формулою Ейлера (1)).

На рис. 7 представлено результати математичного моделювання поведінки сталевій колони під час впливу пожежі. Отримані результати вертикального стискання (від'ємного подовження) колони (рис. 7) надають можливість визначити час настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати несучої здатності.

Відповідно до [23] ознаками настання граничного стану вогнестійкості для вертикальних конструкцій є вертикальне стискання (від'ємне подовження) колони на величину:

$$C = \frac{h}{100}, \quad (3)$$

або виникнення граничної швидкості вертикального стискання (від'ємного подовження) колони за:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{3 \cdot h}{1000}, \quad (4)$$

де h – початкова висота зразка.

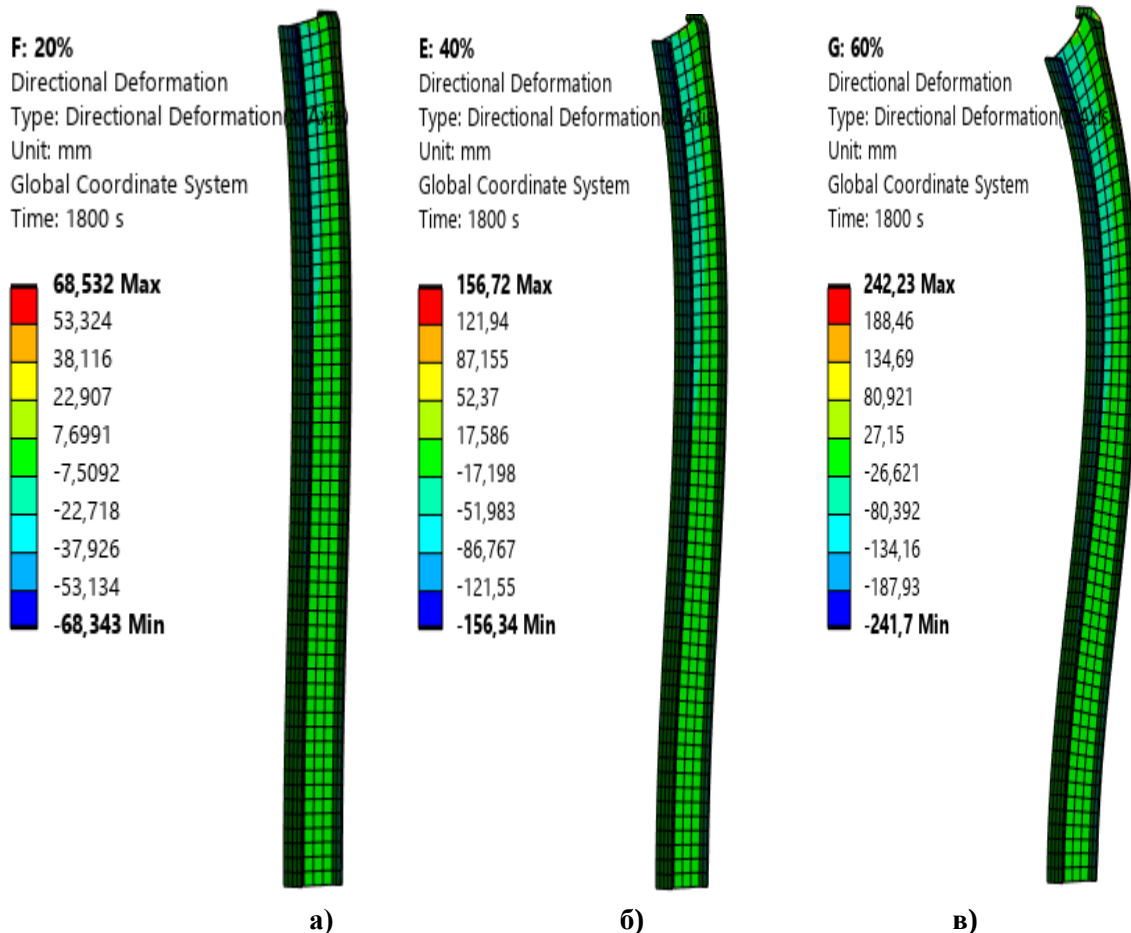


Рис. 7. Вертикальне стискання (від'ємне подовження) досліджуваної сталевій колони при різних рівнях навантаження на 1 800 с: а – 20 %; б – 40 %; в – 60 %

Таким чином, за результатами проведених чисельних досліджень встановлено, що час настання граничного стану за критерієм втрати несучої здатності становить:

- 1 014,8 с – при рівні навантаження 20 % від критичної сили ;
- 752,34 с – при навантаженні 40 % від критичної сили;
- 572,65 с – при навантаженні 60 % від критичної сили.

Отримані результати свідчать про прямий зв'язок між рівнем прикладеного навантаження та вогнестійкістю сталевій колони: чим вище навантаження, тим швидше конструкція втрачає свою несучу здатність в умовах пожежі, що дозволило побудувати відповідні графіки рис. 8.

Отримані результати щодо настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати несучої здатності підтверджені через появи критичних вертикальних стискань (від'ємних подовжень) у досліджуваної сталевій колони також було підтверджено й отриманим розподілом нормальних напружень, що представлено на рис. 9.

Графіки, що представлені на рис. 8. дозволяють:

- визначити критичний момент втрати стійкості за кожного рівня навантаження;
- провести порівняльний аналіз динаміки деформацій, що виникають під дією підвищеної температури;
- встановити граничний час, протягом якого колона може залишатися працездатною без вогнезахисту.

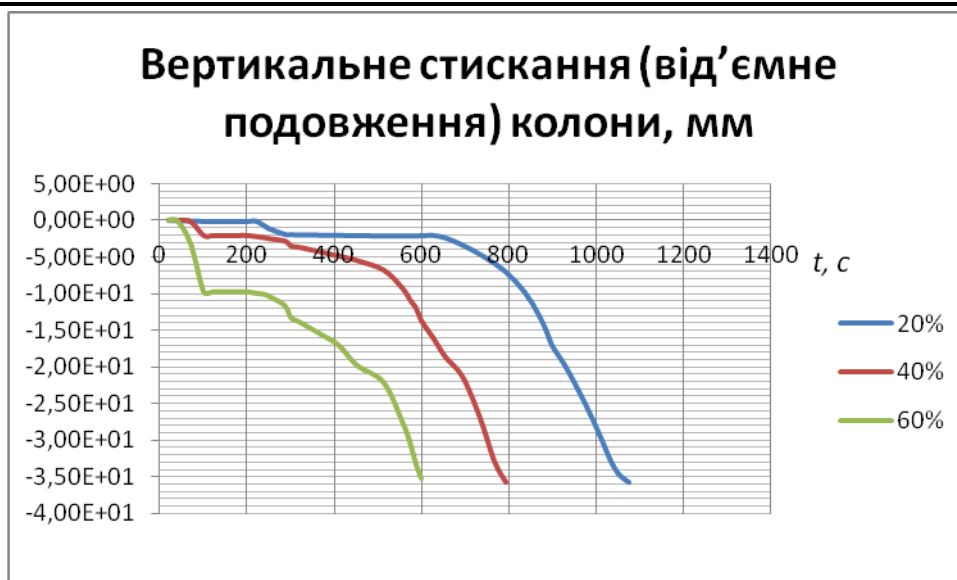


Рис. 8. Графіки залежності вертикального стискання (від'ємного подовження) досліджуваної сталеві колони при різних рівнях навантаження

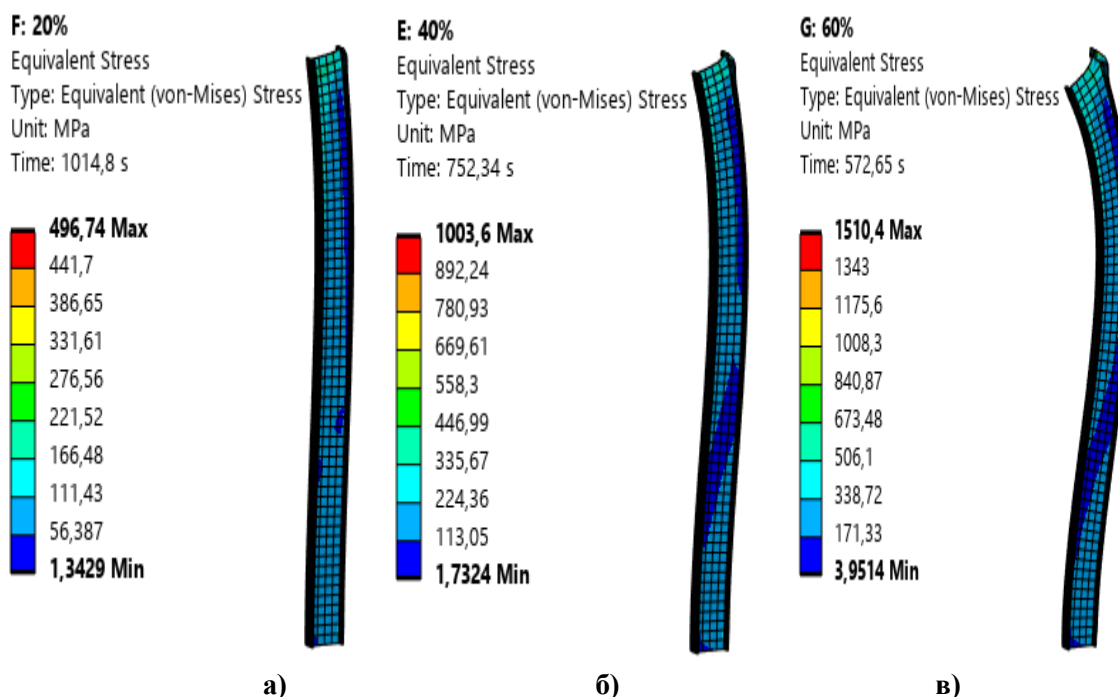


Рис. 9. Розподіл нормальних напружень у досліджуваній сталевій колоні при різних рівнях навантаження: а – 20 %; б – 40 %; в – 60 %

Отже отримані графіки є важливим інструментом для інженерного обґрунтування рішень щодо посилення конструкцій або застосування вогнезахисних засобів. Крім того, вони дозволяють встановити залежність межі вогнестійкості досліджуваних колон від рівня прикладеного механічного навантаження, що підвищує точність оцінювання їхньої роботи в умовах пожежі.

5.3. Визначення залежності зміни межі вогнестійкості сталеві колони від рівня навантаження

Проведені дослідження із застосуванням методу скінченних елементів дозволили встановити залежність між межею вогнестійкості сталеві колони та рівнем прикладеного механічного навантаження, що відображено на графіку на рис. 10.



Рис. 10. Графік залежності зміни межі вогнестійкості досліджуваної сталеві колони від рівня прикладеного механічного навантаження.

Ця залежність має лінійну залежність, що підтверджується побудовою у вигляді прямої лінії (рис. 10).

Регресійна модель має вигляд квадратичного полінома:

$$y = 835 \cdot x^2 - 1775 \cdot x - 1336,4,$$

де y – межа вогнестійкості (час до втрати несучої здатності), с; x – рівень прикладеного навантаження у частках одиниці, наприклад, 0,5 для 50 %.

Значення коефіцієнта детермінації $R^2 = 1$ вказує на високу точність апроксимації, що підтверджує адекватність моделі і свідчить про пряму залежність швидкості деградації несучої здатності від рівня прикладеного механічного навантаження. Із зростанням рівня навантаження час до втрати вогнестійкості зменшується. Це пояснюється тим, що вище початкове напруження в колоні пришвидшує досягнення критичних деформацій у нагрітому стані. Крива має виражений спадний характер, що означає, що навіть незначне збільшення навантаження у високому діапазоні (40–60 %) веде до різкого зменшення вогнестійкості досліджуваної сталеві колони.

Квадратична форма функції свідчить про нелінійну чутливість колони до навантаження: наприклад, перехід від 20 % до 40 % скорочує вогнестійкість на 254 с, а з 40 % до 60 % – ще на 188 с. Така залежність може бути використана для побудови нормативних кривих вогнестійкості, які враховують не лише геометрію і матеріал, а й рівень механічного навантаження.

Інженерне значення подібної моделі полягає в тому, що вона дозволяє проєктувальнику:

- заздалегідь оцінити граничний час стійкості конструкції для заданого рівня навантаження;
- приймати обґрунтовані рішення щодо вогнезахисту,
- оптимізувати конструкцію з урахуванням фактичної експлуатації.

Таким чином, представлений графік і отримана формула дозволяють визначати межу вогнестійкості колони у взаємозв'язку з рівнем поздовжнього навантаження, що підвищує достовірність інженерної оцінки її роботи в умовах пожежі та дає змогу робити це без необхідності залучення значних обчислювальних ресурсів.

6. Обговорення результатів дослідження поведінки сталевій колони в умовах пожежі

Поставлена в роботі мета – встановлення залежності між рівнем прикладеного навантаження та межею вогнестійкості сталевій колони з двотаврового профілю № 24 була досягнута шляхом виконання термомеханічного чисельного моделювання в середовищі програмного забезпечення ANSYS Workbench. У моделі враховано вплив реальної геометрії, температурно-залежних властивостей сталі, умов стандартної пожежі ISO 834 та чотирибічної теплової дії.

Результати моделювання дозволили кількісно оцінити, як рівень прикладеного навантаження впливає на час до втрати несучої здатності. Побудована залежність (наближена квадратичною функцією) дозволяє швидко орієнтуватися в межі вогнестійкості при зміні навантаження, без необхідності повторного моделювання, що суттєво підвищує практичну цінність виконаного дослідження не втрачаючи

Отримана емпірична формула є достатньо точною у межах досліджених параметрів, що підтверджується високим коефіцієнтом детермінації та стабільною поведінкою кривої. Вона є придатною для попередньої оцінки вогнестійкості однотипних колон у типових інженерних задачах.

Позитивні сторони виконаної роботи:

- практична орієнтованість: запропоновано підхід, який не вимагає залучення складних обчислювальних моделей під час кожної оцінки.

- обґрунтованість результатів: усі вихідні дані були вибрані з урахуванням нормативних документів та наукових рекомендацій.

- деталізація аналізу: враховано температурний градієнт у тілі елемента, що підвищує достовірність визначення критичного моменту втрати несучої здатності.

Обмеження роботи:

- отримана залежність має обмежену область застосування – лише для колони з двотаврового профілю №24 за умов стандартної пожежі.

- не враховано вогнезахисне покриття, яке в реальних умовах може значно змінювати температуру сталі та затримувати втрату несучої здатності.

Отже, хоча запропонований підхід має певні обмеження, він дозволяє значно полегшити інженерну оцінку вогнестійкості сталевих колон у проєктній та експертній практиці. Результати можуть бути використані як орієнтовна база для нормативних або спрощених методик розрахунку.

7. Висновки

1. У результаті дослідження побудовано тривимірну модель сталевій колони з урахуванням її реальної геометрії та температурно-залежних теплофізичних властивостей матеріалу. Згенерована скінченно-елементна сітка забезпечує оптимальне поєднання точності й обчислювальної ефективності, що робить її придатною для виконання комплексного теплотехнічного та статичного аналізу. Це створило надійну основу для подальшого моделювання напружено-деформованого стану, визначення часу втрати несучої здатності досліджуваної сталевій колони.

2. Проведено чисельний аналіз напружено-деформованого стану сталевій колони при трьох рівнях прикладеного механічного навантаження (20 %, 40 %, 60 % від критичної сили). Визначено час досягнення граничного стану за ознакою втрати несучої здатності: 1 014,8 с при 20 %, 752,34 с при 40 % та 572,65 с при 60 % навантаження. Установлено, що із зростанням навантаження час вогнестій-

кості суттєво зменшується, що свідчить про високу чутливість конструкції до рівня прикладеної сили.

3. Побудовано графічну залежність між рівнем прикладеного навантаження та часом настання граничного стану з вогнестійкості сталевих колон за ознакою втрати несучої здатності, яка має вигляд (5). Встановлено, що дана залежність має форму квадратичного полінома, що дозволяє використовувати її як інженерний інструмент для оцінювання вогнестійкості без необхідності складних розрахунків. Значення коефіцієнта детермінації $R^2 = 1$ вказує на високу точність апроксимації, що підтверджує адекватність моделі і свідчить про пряму залежність швидкості деградації несучої здатності від рівня прикладеного механічного навантаження.

Література

1. Гвоздь В. М., Тищенко О. М., Поздєєв С. В., Шналь Т. М., Березовський А. І., Рудешко І. В., Сідней С. О. Розрахунок сталевих конструкцій будівель і споруд згідно з Єврокодом 3 та національними додатками України: навч. посіб. Черкаси: НУЦЗУ, 2021. 176 с.
2. Ільченко М., Гвоздь В., Рудешко І., Бас О. Особливості конструктивних рішень захисних споруд цивільного захисту: навч. посіб. Черкаси: НУЦЗУ, 2022. 130 с.
3. Хоменко О. Г. Сталеві конструкції у будівництві: підручник. Глухів: ГНПУ ім. О. Довженка, 2018. 347 с.
4. Васильченко О. В., Квітковський Ю. В., Миргород О. В., Стельмах О. А. Будівельні конструкції та їх поведінка в умовах надзвичайних ситуацій: навч. посіб. Харків: НУЦЗУ, 2015. 488 с.
5. Shevchenko V. Numerical modelling of fire-exposed steel columns. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2021. Vol. 27. № 4. P. 293–301.
6. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1993-1-2:2005, IDT). ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010. Єврокод 3 [Чинний з 01.07.2013]. Київ: ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», 2010. 98 с.
7. Kovalenko I., Mishchenko D. Analysis of fire resistance of steel elements with protective coatings. *Fire Safety Journal*. 2023. P. 142.
8. Настанова з проектування сталевих конструкцій на вогнестійкість. ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 [Чинний з 01.07.2017]. Київ: ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», 2010.
9. Bhavana B. A study on the behaviour of steel structures subjected to fire. *S-JPSET*. 2019. Vol. 10. P. 391–395.
10. Шналь Т. М. Розвиток наукових основ розрахункової оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій за умов впливу параметричних температурних режимів пожеж: дис. ... д-ра техн. наук: 21.06.02 «Пожежна безпека». Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2019. 294 с.
11. Sidnei S., Berezovskyi A., Kasiarum S., Chastokolenko I. Revealing patterns in the behavior of a reinforced concrete slab in fire based on determining its stressed and deformed state. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 5. № 7(125). P. 43–49. doi: 10.15587/1729-4061.2023.289930
12. Шкарабура І. М., Маладика І. Г., Мигаленко К. І., Лесечко Д. В. Оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій на етапі експлуатації будівель і споруд: монографія. Черкаси: ЧІПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗУ, 2017. 128 с.
13. Методи випробування для визначення впливу на вогнестійкість елементів Fire Safety. DOI: 10.52363/2524-0226-2025-42-17

тів конструкцій. Частина 4. Пасивні вогнезахисні матеріали для сталевих конструкцій (EN 13381-4:2013, IDT). ДСТУ EN 13381-4:2022. [Чинний з 01.06.2023]. Київ: Технічний комітет «Пожежна безпека та протипожежна техніка». 2022.

14. Методи випробування для визначення впливу на вогнестійкість елементів конструкцій. Частина 8. Реактивні вогнезахисні матеріали для сталевих конструкцій (EN 13381-8:2013, IDT). ДСТУ EN 13381-8:2022. 2022-12-28: наказ ДП «УкрНДНЦ» від 28.12.2022 № 285.

15. Ковальов А. І., Отрош Ю. А., Томенко В. І., Кондратьєв А. В. Оцінювання вогнестійкості вогнезахисених сталевих конструкцій. Вісті Донецького гірничого інституту. 2021. № 2 (49). С. 149–158.

16. Гвоздь В., Некора О., Сідней С., Неділько І., Федченко С., Тищенко Є. Дослідження вогнестійкості елементів сталевих каркасів промислових будівель з урахуванням рівня механічного навантаження. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація. 2021. Т. 5. № 1. С. 40–49.

17. Nekora V., Sidnei S., Shnal T., Nekora O., Lavrinenko L., Pozdieiev S. Thermal effect of a fire on a steel beam with corrugated wall with fireproof mineral-wool cladding. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Vol. 5. № 1(113). P. 24–32.

18. Шаршанов А. Я., Сайчук І. В. Термодинаміка і теплопередача: методичні вказівки до вивчення курсу та контрольні завдання. Харків: НУЦЗ України, 2017. 120 с.

19. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд (EN 1993-1-1:2005/A1:2014, IDT). ДСТУ-Н Б EN 1993-1-1:2010. Єврокод 3 [Чинний з 01.07.2013]. Київ: Український науково-дослідний та проектний інститут сталевих конструкцій ім. В. М. Шимановського, 2010. 150 с.

20. Lee J. Elevated-temperature properties of ASTM A992 steel for structural-fire engineering analysis. Doctoral dissertation. Austin: University of Texas Libraries, 2012. 359 p.

21. Bailey C. G. The influence of the thermal expansion of beams on the structural behaviour of columns in steel-framed structures during a fire. Engineering Structures. 2000. Vol. 22. P. 755–768.

22. Agarwal A., Choe L., Varma A. Fire design of steel columns: Effects of thermal gradients. Journal of Constructional Steel Research. 2014. Vol. 93. P. 107–118.

23. Випробування на вогнестійкість. Частина 1. Загальні вимоги (EN 1363-1:2020, IDT). ДСТУ EN 1363-1:2023 [Чинний з 01.03.2024]. Київ: Технічний комітет «Пожежна безпека та протипожежна техніка», 2023. 89 с.

S. Sidnei, DSc, Associate Professor, Associate Professor of the Department

I. Ishchenko, Lecturer of the Department

T. Kostenko, DSc, Professor, Professor of the Department

R. Motrichuk, PhD, Lecturer of the Department

I. Shkoliar, PhD, Associate Professor of the Department

V. Koloskov, PhD, Associate Professor, Acting Head of Center

National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

DEPENDENCE OF THE FIRE RESISTANCE LIMIT OF A STEEL COLUMN ON THE LOAD LEVEL

The object of the study is the stress–strain state of an unprotected steel column under the combined action of thermal and mechanical loading. The research problem lies in the absence of a simplified approach in modern engineering practice for assessing the fire resistance of steel columns that would provide an acceptable level of accuracy comparable to the results obtained through advanced numerical modeling methods. The application of such advanced methods requires significant computa-

tional resources, specialized software, and a high level of technical expertise. This makes them difficult to use during time-constrained design processes or for real-time risk assessments in practical conditions. Therefore, there is a need for a more accessible engineering tool capable of predicting the loss of load-bearing capacity of steel structures under fire exposure with sufficient accuracy, without relying on complex calculation schemes. As part of the research, calculations were performed to assess the fire resistance of an I-section steel column (section № 24) subjected to standard fire conditions in accordance with ISO 834, taking into account different levels of applied mechanical loading. The mathematical modeling was conducted in the ANSYS Workbench software environment, which made it possible to incorporate temperature-dependent material properties, the spatial geometry of the element, and the combined effect of thermal and mechanical loads. These calculations provided the basis for developing an analytical dependence of the fire resistance limit on the level of applied load. The proposed relationship ensures high accuracy, comparable to that of detailed numerical methods, while enabling a rapid assessment of the fire resistance of similar structural elements without the need for complex simulations, which typically require substantial computational capacity and specialized personnel. Thus, the results of the study formed the foundation for a practically oriented approach to the preliminary determination of the fire resistance limit of steel columns based on a known load level.

Keywords: fire resistance, finite element method, computer modeling, loss of load-bearing capacity, fire

References

1. Gvozd, V. M., Tyshchenko, O. M., Pozdieiev, S. V., Shnal, T. M., Berezovskyi, A. I., Rudeshko, I. V., Sidnei, S. O. (2021). Design of steel structures of buildings and facilities according to Eurocode 3 and national annexes of Ukraine: Textbook. Cherkasy: NUCDU.
2. Ilchenko, M., Gvozd, V., Rudushko, I., Bas, O. (2022). Features of structural solutions of civil protection shelters: Textbook. Cherkasy: NUCDU.
3. Khomenko, O. H. (2018). Steel structures in construction: A textbook for students of higher education institutions. Hlukhiv: Hlukhiv National Pedagogical University named after O. Dovzhenko.
4. Vasylchenko, O. V., Kvitkovskyi, Yu. V., Myrhorod, O. V., Stelmakh, O. A. (2015). Building structures and their behavior in emergency conditions: Textbook. Kharkiv: NUCDU.
5. Shevchenko, V. (2021). Numerical modelling of fire-exposed steel columns. *Journal of Civil Engineering and Management*, 27(4), 293–301.
6. State Enterprise "State Research Institute of Building Structures". (2010). Design of steel structures. Part 1-2. General provisions. Structural fire design (EN 1993-1-2:2005, IDT). DSTU-N B EN 1993-1-2:2010 Eurocode 3 [Effective from 01.07.2013]. Kyiv: SE "State Research Institute of Building Structures", 98.
7. Kovalenko, I., Mishchenko, D. (2023). Analysis of fire resistance of steel elements with protective coatings. *Fire Safety Journal*, 142.
8. State Enterprise "State Research Institute of Building Structures". (2010). Guide for the design of steel structures for fire resistance. DSTU-N B V.2.6-211:2016 [Effective from 01.07.2017]. Kyiv: SE "State Research Institute of Building Structures".
9. Bhavana, B. (2019). A study on the behaviour of steel structures subjected to fire. *S-JPSET*, 10, 391–395.
10. Shnal, T. M. (2019). Development of scientific foundations for the calculation of fire resistance of building structures under the influence of parametric fire temperature regimes: Doctoral dissertation in technical sciences (21.06.02 "Fire Safety"). Lviv Polytechnic National University, Lviv, 294.
11. Sidnei, S., Berezovskyi, A., Kasiarum, S., Chastokolenko, I. (2023). Reveal-

ing patterns in the behavior of a reinforced concrete slab in fire based on determining its stressed and deformed state. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(7 (125)), 43–49. doi: 10.15587/1729-4061.2023.289930

12. Shkarabura, I. M., Maladyka, I. H., Myhalenko, K. I., Lesechko, D. V. (2017). Assessment of fire resistance of steel structures during the operation of buildings and facilities: Monograph. Cherkasy: CHIPB named after the Heroes of Chernobyl, NUCDU.

13. Technical Committee “Fire Safety and Firefighting Equipment”. (2022). Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural elements. Part 4. Passive fire protection materials for steel elements (EN 13381-4:2013, IDT). DSTU EN 13381-4:2022 [Effective from 01.06.2023]. Kyiv: Technical Committee “Fire Safety and Firefighting Equipment”.

14. Technical Committee “Fire Safety and Firefighting Equipment”. (2022). Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural elements. Part 8. Reactive fire protection materials for steel elements (EN 13381-8:2013, IDT). DSTU EN 13381-8:2022 [Approved by Order № 285 dated 28.12.2022 of SE “UkrNDNC”].

15. Kovalyov, A. I., Otrosh, Y. A., Tomenko, V. I., Kondratiev, A. V. (2021). Evaluation of fire resistance of fire protected steel structures. *Visnyk of the Donetsk Mining Institute*, 2(49), 149–158.

16. Gvozdz, V., Nekora, O., Sidnei, S., Nedilko, I., Fedchenko, S., Tyshchenko, Ye. (2021). Study of fire resistance of elements of steel frames of industrial buildings considering the level of mechanical load. *Emergencies: Prevention and Elimination*, 5(1), 40–49.

17. Nekora, V., Sidnei, S., Shnal, T., Nekora, O., Lavrinenko, L., Pozdieiev, S. (2021). Thermal effect of a fire on a steel beam with a corrugated wall and fireproof mineral-wool cladding. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(1(113)), 24–32.

18. Sharshanov, A. Ya., Saichuk, I. V. (2017). Thermodynamics and heat transfer: Study guide and control assignments. Kharkiv: National University of Civil Defense of Ukraine (NUCDU).

19. Shimanovskiy, V. M. (2013). Ukrainian Research and Design Institute of Steel Structures. (2010). Design of steel structures. Part 1-1. General rules and rules for buildings (EN 1993-1-1:2005/A1:2014, IDT). DSTU-N B EN 1993-1-1:2010 Eurocode 3 [Effective from 01.07.2013]. Kyiv: V. M. Shimanovskiy UkrNDI of Steel Structures, 150.

20. Lee, J. (2012). Elevated-temperature properties of ASTM A992 steel for structural-fire engineering analysis (Doctoral dissertation, The University of Texas Libraries, Austin), 359.

21. Bailey, C. G. (2000). The influence of the thermal expansion of beams on the structural behaviour of columns in steel-framed structures during a fire. *Engineering Structures*, 22, 755–768. doi: 10.1016/S0141-0296(99)00028-0

22. Agarwal, A., Choe, L., Varma, A. (2014). Fire design of steel columns: Effects of thermal gradients. *Journal of Constructional Steel Research*, 93, 107–118. doi: 10.1016/j.jcsr.2013.10.023

23. Technical Committee “Fire Safety and Firefighting Equipment”. (2023). Fire resistance tests. Part 1. General requirements (EN 1363-1:2020, IDT). DSTU EN 1363-1:2023 [Effective from 01.03.2024]. Kyiv: Technical Committee “Fire Safety and Firefighting Equipment”, 89.

Надійшла до редколегії: 10.09.2025

Прийнята до друку: 13.10.2025