

Національний університет цивільного захисту України
ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Заїка Наталія Петрівна

УДК 614.841.45

ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКОВОЇ ОЦІНКИ
ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ БАЛОК ІЗ ВОГНЕЗАХИСНИМ
ОБЛИЦЮВАННЯМ ГІПСОКАРТОНОМ**

Спеціальність – 261 «Пожежна безпека»

Галузь знань - 26 «Цивільна безпека»

Подається на здобуття освітньо-наукового рівня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____Наталія ЗАЇКА

Науковий керівник: **Поздєєв Сергій Валерійович**
доктор технічних наук, професор

Черкаси – 2025

АНОТАЦІЯ

Заїка Н.П. Удосконалення методу розрахункової оцінки вогнестійкості сталевих балок із вогнезахисним облицюванням гіпсокартоном. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 «Пожежна безпека». – Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, 2025.

Актуальність теми дослідження. Для забезпечення пожежної безпеки у більшості випадків елементи сталевих каркасів будівель мають облаштовуватися надійним вогнезахистом, це стосується, зокрема, сталевих балок, що безумовно є відповідальним елементом даних сталевих каркасів. На даний час пропонується велика кількість ефективних технічних рішень щодо улаштування систем вогнезахисту сталевих балок із використанням облицювальних матеріалів, серед яких можна виділити, як один з найбільш поширених та технологічних вогнестійкі гіпсокартонні плити.

Одним з основних способів підвищення надійності будівель в умовах пожежі є забезпечення нормованої межі вогнестійкості сталевих балок з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням, а найбільш ефективним підходом щодо прогнозування вогнестійкості сталевих балок є метод розрахункової оцінки їх вогнестійкості, що заснований на математичних моделях розрахункових методів. Передумовою для застосування цього підходу є вивчення закономірностей температурних показників нагрівання сталевих балок при тепловому впливі стандартного температурного режиму пожежі та під час вогневих випробувань, а також закономірності впливу конструктивних параметрів сталевих балок на умови утворення дефектів та наскрізних отворів у гіпсокартонному вогнезахисному облицюванні, що є частиною початкових даних для прогнозованої оцінки вогнестійкості сталевих балок під час пожежі.

Мета роботи полягає у розкритті закономірностей утворення

наскрізних отворів у вогнезахисному гіпсокартонному облицюванні сталевих балок при його локальному руйнуванні внаслідок пожежі і пов'язаної із цим втрати його вогнезахисної здатності залежно від часу перебігу пожежі як наукового підґрунтя удосконалення методу розрахункового оцінювання їхньої вогнестійкості.

Основні завдання дослідження:

1. Здійснити аналіз статистичних показників щодо кількості та особливостей зафіксованих в Україні пожеж за останній час, а також здійснити аналіз нормативної бази, що встановлює основні вимоги щодо основних аспектів нормування вогнестійкості сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахистом.

2. Розробити методику виконання експериментальних досліджень сталевих балок з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням шляхом проведення вогневих випробувань з метою вивчення температурних показників їхнього нагрівання при тепловому впливі пожежі.

3. Розробити методику та здійснити з її використанням визначення температурних залежностей теплофізичних характеристик гіпсокартонного облицювання на основі експериментально одержаних результатів вогневих випробувань зразків, що є фрагментами сталевих конструкцій і виявити закономірності часу нагрівання до критичних температур, використовуючи отримані теплофізичні характеристики у залежності від параметрів конструкції сталевих балок.

4. Розробити методику математичного моделювання процесу утворення наскрізних дефектів у гіпсокартонному вогнезахисному облицюванні із можливістю порушення його цілісності в умовах теплового впливу пожежі із стандартним температурним режимом з використанням явного методу інтегрування рівнянь динаміки сукупно із методом скінченних елементів.

5. Із використанням розроблених методик вивчити закономірності залежності часу утворення наскрізних дефектів, які приводять до втрати

вогнезахисної здатності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання сталевих балок, від їхніх конструктивних параметрів.

6. Розробити методику розрахункового оцінювання вогнестійкості сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням із врахуванням можливості втрати вогнезахисної здатності при утворенні наскрізних дефектів в умовах теплового впливу пожежі із стандартним температурним режимом.

Об'єкт дослідження – процеси нагрівання, деформування та руйнування гіпсокартонного вогнезахисного облицювання сталевих балок при тепловому впливі стандартного температурного режиму пожежі.

Предмет дослідження – вплив конструктивних характеристик сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням на час утворення наскрізних дефектів у вогнезахисному гіпсокартонному облицюванні під впливом стандартного температурного режиму пожежі.

Наукова новизна дисертації проведених досліджень у дисертаційній роботі полягає у розкритті закономірностей залежності часу втрати вогнезахисної здатності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання внаслідок появи наскрізних дефектів у ньому від конструктивних параметрів сталевих балок із даним типом вогнезахисту. Виявлені закономірності є науковим підґрунтям щодо удосконалення методів розрахункового оцінювання вогнестійкості сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням. При цьому вперше:

- виявлено залежність часу нагрівання вогнезахисних сталевих балок до критичної проектної температури у вигляді регресії $U = 10.903 + 1.648 \cdot d_p + 0.018 \cdot \theta_{кр} + 9.545 \cdot 10^{-4} d_p \cdot \theta_{кр}$ від величини критичної температури $\theta_{кр}$ та товщини d_p вогнезахисного гіпсокартонного облицювання і з використанням виявленої залежності побудована номограма для здійснення експрес-методу розрахунку часу досягнення критичної температури;

- виявлено залежність часу втрати вогнезахисної здатності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання сталевих балок унаслідок утворення наскрізних дефектів в умовах теплового впливу пожежі із

стандартним температурним режимом від коефіцієнту перерізу сталевोї балки A/V_m , товщини гіпсокартонного облицювання d_p та величини навантаження μ_f , яка має відповісти регресійній залежності $t_c = 136.14 - 0.119 \cdot A/V_m + 0.879 \cdot d - 111,742 \cdot \mu_f - 0,8 \cdot 10^3 \cdot A/V_m \cdot d - 0,0071 \cdot A/V_m \cdot \mu_f + 0,961 \cdot d \cdot \mu_f + 1,9 \cdot 10^{-4} \cdot A/V_m \cdot d \cdot \mu_f$;

– обґрунтовано удосконалений метод розрахункового оцінювання вогнестійкості сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням на основі виявлених закономірностей впливу конструктивних характеристик та рівня навантаження на час втрати вогнезахисної здатності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання внаслідок утворення наскрізних дефектів у ньому в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Набуло подальшого розвитку передумови використання розрахункових методів оцінювання вогнестійкості сталевих балок з вогнезахисним облицюванням для обґрунтування відповідних проектних даних для будівельних об'єктів різного призначення при забезпеченні їхньої пожежної безпеки.

Удосконалено науково-методичну базу для приведення у відповідність вогнестійкості сталевих будівельних конструкцій до нормативних вимог щодо пожежної безпеки шляхом улаштування вогнезахисту.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці удосконаленого методу розрахункового оцінювання вогнестійкості сталевих балок з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням при тепловому впливі стандартного температурного режиму пожежі, що дозволяє визначити відповідність сталевих балок із вогнезахистом до необхідного класу вогнестійкості. Даний метод дозволяє уникнути помилок, що можуть виникати при неврахуванні утворення дефектів у вогнезахисному облицюванні, які є причиною втрати їхньої вогнезахисної здатності. Запропонована номограма для встановлення часу втрати вогнезахисної здатності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання внаслідок утворення наскрізних дефектів дозволяє точніше оцінити вогнестійкість при застосуванні відомих методів розрахунку.

Запропонований удосконалений метод розрахункового оцінювання вогнестійкості сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням впроваджено при здійсненні науково-дослідної діяльності в Інституті державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту при аналізі пожежної безпеки будівельних конструкцій, у навчальний процес Національного університету цивільного захисту України під час викладання навчальної дисципліни «Пожежна безпека будівель та споруд» та практичну діяльність приватного підприємства «ПроектБудСтар» шляхом використання методик оцінювання вогнестійкості сталевих балок із вогнезахистом при аналізі пожежної безпеки об'єктів будівництва.

Методи дослідження. При аналізі статистичних даних щодо кількості та особливостей пожеж, а також огляду результатів наукових досліджень цього напрямку використовувався аналітичний метод. Для отримання температурних показників та теплофізичних характеристик гіпсокартонного облицювання виконувалися вогневі випробування, а отримані результати вимірювань даних випробувань були відповідним чином оброблені за допомогою стандартизованих математичних методів. Для виконання моделювання процесів деформування та руйнування вогнезахисного гіпсокартонного облицювання сталевих балок залучені математичні методи, які ґрунтуються на явному методі інтегрування загальних рівнянь динаміки у комбінації із методом скінченних елементів для описання напружено-деформованого стану. Для обґрунтування математичної моделі, що описує закономірності залежності часу руйнування гіпсокартонного вогнезахисного облицювання було виконано повний факторний числовий експеримент. Дослідження достовірності та адекватності розрахункових та експериментальних результатів дослідження сталевих балок з гіпсокартонним вогнезахистом в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі застосовані методи аналізу статистичних гіпотез.

У **вступі** наведено загальну характеристику дисертації, обґрунтовано актуальність теми досліджень, сформульовано мету, завдання, визначено об'єкт та предмет дослідження, вказано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, розкрито зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, визначено особистий внесок здобувача, наведено дані про апробацію, публікації, структуру та обсяг роботи.

У **першому розділі** проведено аналіз статистичних даних щодо кількості та особливостей пожеж у будівлях із сталевими конструкціями та основні відомості щодо нормування пожежної безпеки сталевих балок. Описано поведінку сталевих балок під час теплового впливу пожежі та методи підвищення вогнестійкості сталевих балок. Викладено експериментальні методи оцінки вогнестійкості сталевих балок, порядок проведення вогневих випробувань сталевих балок на вогнестійкість та експериментальні методи визначення вогнезахисної здатності вогнезахисних систем сталевих балок.

На основі результатів виконаного аналізу сформовано мету та основні завдання роботи.

Другий розділ присвячено опису експериментального обладнання для дослідження теплових процесів у сталевих зразках з вогнезахисним гіпсокартонним облицюванням під час їхніх вогневих випробуваннях і методикам виготовлення, підготовки зразків до випробування, проведення вогневих випробувань зразків фрагментів сталевих балок. Основне експериментальне обладнання – установка, що складається з вогневої печі з газовими пальниками, які забезпечують відповідний температурний режим пожежі у камері вогневої печі. Запропоновано схему розташування термопар та умови їх використання. Експеримент виконано протягом контрольного часу, який відповідає часу настання граничного стану за ознакою втрати несучої здатності для сталевих балок.

У **третьому розділі** викладені результати проведення вогневих випробувань фрагментів сталевих балок із перерізом двотаврового профілю

із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням при впливі стандартного температурного режиму пожежі та отримані дані температурних випробувань у випробуваних зразках. Встановлено, що у результаті високотемпературного нагріву протягом 60 хв за стандартним температурним режимом відбулося повне руйнування зразків з одним шаром гіпсокартонного вогнезахисного облицювання і часткове руйнування зразків із двошаровим і тришаровим облицюванням, що вказує на негативний тепловий вплив на цілісність вогнезахисного облицювання і спроможність зберігати вогнезахисну здатність.

Проаналізовано умови досягнення у сталевому осерді зразків фрагментів сталевих балок проектних критичних температур та виявлена закономірність часу їх фіксації у вигляді регресії, яка виражає його залежність від проектної критичної температури та товщини гіпсокартонного вогнезахисного облицювання і з її використанням побудовано відповідну номограму. Обчислено коефіцієнт теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання та виявлена його залежність від температури. Отримана узагальнена залежність коефіцієнта теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання від температури у табличній формі, яка може бути застосована для обчислення температури у сталевих балках із даним типом вогнезахисту.

У **четвертому розділі** представлено математичне моделювання теплового впливу пожежі на поведінку сталеві балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням. За результатами проведених досліджень описана поведінка сталеві балки з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням у час теплового впливу пожежі. Визначено умови виникнення стану втрати вогнестійкості за граничним станом втрати несучої здатності сталеві балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням та показано, що розкриття наскрізного дефекту між балкою та частинами гіпсокартонного вогнезахисного облицювання більше 25 мм фіксується раніше за настання граничного стану

втрати несучої здатності, що має враховуватися при відповідних обчисленнях.

У п'ятому розділі представлено метод оцінювання вогнестійкості сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням із врахуванням його втрати вогнезахисної здатності. За допомогою виконаних досліджень було розв'язано задачу виявлення закономірностей залежності межі вогнестійкості та часу втрати вогнезахисної здатності гіпсокартонним облицюванням унаслідок утворення наскрізних дефектів шириною більше 25 мм під тепловим впливом пожежі. Запропоновано методику визначення температурного режиму нагріву перерізу сталевих балок з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням та здійснені відповідні розрахунки. Встановлена закономірність часу втрати вогнезахисної здатності гіпсокартонного облицювання залежно від конструктивних параметрів сталеві балки із даним типом вогнезахисту. На основі встановлених закономірностей побудовані номограми для обчислення часу втрати гіпсокартонним облицюванням вогнезахисної здатності сталевих балок в залежності від їхнього коефіцієнту перерізу та рівня навантаження при трьох величинах товщини гіпсокартонного вогнезахисного облицювання та запропонована обчислювальна методика оцінювання вогнестійкості сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням за допомогою величини часу втрати гіпсокартонним облицюванням вогнезахисної здатності, визначеної за запропонованими номограмами.

Ключові слова: сталева балка, вогнезахист, межа вогнестійкості, вогневі випробування, комп'ютерне моделювання, обчислювальний експеримент, вплив вогню, вплив пожежі.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Заїка Н.П. Аналіз сучасного стану щодо вогнезахисних систем сталевих балок на основі облицювальних матеріалів. Збірник наукових праць Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація. Черкаси. Том 8 № 2. 2024. С. 206-217. – 1.

<https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/article/view/217/208>

2. Заїка Н.П. Закономірності розподілу температури сталеві балки з вогнезахистом з гіпсокартону від часу впливу пожежі. Scientific Journal «Problems of Emergency Situations». Черкаси. № 40. 2024. С. 17-30. – 1.

<https://doi.org/10.52363/2524-0226-2024-40-2>

3. Заїка Н. П. Дослідження теплових властивостей гіпсокартонного вогнезахисного облицювання сталевих балок в умовах пожежі. Механіка та математичні методи, 2025.Т. VII. № 1. с. 138–151. – 1.

<https://doi.org/10.31650/2618-0650-2025-7-1-138-151>

4. Рудешко І., Заїка Н., Куліца О., Сідней С. Дослідження ребристої залізобетонної панелі покриття за умовами стандартного температурного режиму пожежі. Збірник наукових праць Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація. Черкаси. 2022. Том 6 № 2. С. 95-101. – 0.5.

<http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21192>

5. Сідней С., Кобко В., Федченко С., Змага М., Заїка Н. Удосконалення зонного методу перевірки вогнестійкості пустотної плити. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація: зб. наук. праць. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2022. Т. 6. № 1. С. 95–103. – 0.5.

<https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/article/view/124/104>

**Публікації у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази
«Scopus»**

6. Трошкін С.Е., Куліца О.С., Поздєєв С.В., Костенко Т.В., Землянський О.М., Заїка Н.П. Дослідження процесу тепломасопереносу у вертикальних

кабельних тунелях атомної електричної станції за умов реальних пожеж. Східноєвропейський журнал корпоративних технологій «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies». 2023. Том 5 № 10 (125). С. 34-42. – 1.

<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289291>

7. Поздєєв С., Некора О., Федченко С., Заїка Н., Шналь Т., Субота А., Несух М. Дослідження адекватності результатів ідентифікації міцнісних характеристик бетону залізобетонного ригеля при нагріві в умовах пожежі. Східноєвропейський журнал корпоративних технологій «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies». 2023. Том 3 № 7 (123). С. 26-36. – 1.

<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.282205>

Стаття в періодичному науковому виданні іншої держави

8. Perehin A., Nuianzin O., Zaika N., Vedula S. Technique for creating the prototype of a compact fire plant for tests to determine the fire resistance of reinforced concrete structures. The scientific heritage, Budapest, Hungary. 2021. Vol. 78. P. 37-43. – 0.5.

<http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/21029/1/Nuianzin%207.pdf>

Список публікацій, які засвідчують апробацію дисертації

9. Заїка Н.П., Некора В.С., Неділько І.А. Дослідження цілісності вогнезахисної системи сталеві балки на основі гіпсокартонного облицювання в умовах пожежі. Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. Харків: НУЦЗ України, 2022. С. 32-34.

<https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2022/3.pdf>

10. Поздєєв С., Некора О., Нуянзін О., Борсук О., Заїка Н. Комп'ютерне моделювання поведінки сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним покриттям при нагріванні. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022. С. 178-179.

<https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2022/6.pdf>

11. Некора О., Заїка Н., Некора В. Дослідження показників вогнестійкості гофрованої сталевий балки із використанням вогнезахисту. Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 2022. С. 51-53.

<https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/bitstream/29.pdf>

12. Заїка Н. Розподіл температури сталевий балки з вогнезахистом від часу впливу пожежі. Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 2024. С. 65-67.

<https://indico.ldubgd.edu.ua/event/59/attachments/202024.pdf>

ABSTRACT

Zaika N.P. Improvement of the method of calculating the fire resistance of steel beams with fireproof plasterboard cladding. – Qualification scientific work on manuscript rights.

Thesis for the degree of Ph.D. in Technology in specialty 261 "Fire Safety". – National University of Civil Defense of Ukraine, Cherkasy, 2025.

Relevance of the research topic. To ensure fire safety in most cases, the elements of steel frames of buildings must be equipped with reliable fire protection, this applies, in particular, to steel beams, which are certainly a responsible element of these steel frames. Currently, a large number of effective technical solutions are proposed for the arrangement of fire protection systems for steel beams using facing materials, among which one can single out fire-resistant plasterboard as one of the most common and technological.

One of the main ways to increase the reliability of buildings in fire conditions is to ensure the normalized fire resistance limit of steel beams with

gypsum plasterboard fireproof cladding, and the most effective approach to predicting the fire resistance of steel beams is the method of calculating their fire resistance, which is based on mathematical models of calculation methods. A prerequisite for applying this approach is to study the patterns of temperature indicators of heating of steel beams under the thermal influence of the standard temperature regime of fire and during fire tests, as well as the patterns of the influence of the structural parameters of steel beams on the conditions for the formation of defects and through holes in gypsum plasterboard fireproof cladding, which is part of the initial data for the predicted assessment of the fire resistance of steel beams during a fire.

The purpose of the work is to reveal the patterns of the formation of through holes in the fire-resistant plasterboard cladding of steel beams during its local destruction due to fire and the associated loss of its fire-resistant ability depending on the time of the fire as a scientific basis for improving the method of calculating the assessment of their fire resistance.

The main objectives of the study:

1. To analyze statistical indicators regarding the number and characteristics of fires recorded in Ukraine recently, as well as to analyze the regulatory framework that establishes the main requirements for the main aspects of standardizing the fire resistance of steel beams with plasterboard fire protection.
2. Develop a methodology for performing experimental studies of steel beams with plasterboard fireproof cladding by conducting fire tests in order to study the temperature indicators of their heating under the thermal influence of fire.
3. Develop a methodology and use it to determine the temperature dependences of the thermophysical characteristics of plasterboard cladding based on the experimentally obtained results of fire tests of samples that are fragments of steel structures and identify the regularities of the heating time to critical temperatures, using the obtained thermophysical characteristics depending on the design parameters of steel beams.

4. To develop a method for mathematical modeling of the process of formation of through defects in gypsum board fireproof cladding with the possibility of violation of its integrity under the conditions of thermal impact of fire with a standard temperature regime using the explicit method of integration of dynamics equations together with the finite element method.

5. Using the developed methods, to study the patterns of dependence of the time of formation of through defects, which lead to the loss of fireproofing ability of gypsum board fireproof cladding of steel beams, on their design parameters.

6. Develop a methodology for calculating the fire resistance of steel beams with plasterboard fireproof cladding, taking into account the possibility of loss of fireproofing ability when through defects form under the thermal effects of a fire with a standard temperature regime.

The object of the study is the processes of heating, deformation and destruction of the fireproof gypsum plasterboard cladding of steel beams under the thermal influence of the standard temperature regime of fire.

The subject of the study is the influence of the structural characteristics of steel beams with fireproof gypsum plasterboard cladding on the time of formation of through defects in the fireproof gypsum plasterboard cladding under the influence of the standard temperature regime of fire.

The scientific novelty of the dissertation research conducted in the dissertation work is to reveal the patterns of dependence of the time of loss of fire-resistant ability of gypsum board fire-resistant cladding due to the appearance of through defects in it on the structural parameters of steel beams with this type of fire protection. The revealed patterns are a scientific basis for improving the methods of calculating the fire resistance of steel beams with gypsum board fire-resistant cladding. At the same time, for the first time:

- the dependence of the heating time of fire-resistant steel beams to the critical design temperature was found in the form of a regression $U = 10.903 + 1.648 \cdot d_p + 0.018 \cdot \theta_{kp} + 9.545 \cdot 10^{-4} d_p \cdot \theta_{kp}$ on the value of the critical temperature θ_{kp} and the thickness d_p of the fire-resistant plasterboard cladding, and using the found

dependence, a nomogram was constructed for implementing an express method for calculating the time to reach the critical temperature;

- the dependence of the time of loss of fire-resistant ability of gypsum board fire-resistant cladding of steel beams due to the formation of through defects under the conditions of thermal impact of fire with a standard temperature regime on the cross-sectional coefficient of the steel beam A/V_m , the thickness of the gypsum board cladding d_p and the load value μ_f was found, which corresponds to the regression dependence $t_c = 136.14 - 0.119 \cdot A/V_m + 0.879 \cdot d - 111,742 \mu_f - 0,8 \cdot 10^3 \cdot A/V_m \cdot d - 0,0071 \cdot A/V_m \mu_f + 0,961 \cdot d \cdot \mu_f + 1,9 \cdot 10^{-4} \cdot A/V_m \cdot d \mu_f$;

- an improved method of calculating the fire resistance of steel beams with plasterboard fireproof cladding was substantiated based on the identified patterns of the influence of structural characteristics and load level on the time of loss of fireproofing ability of plasterboard fireproof cladding due to the formation of through defects in it under the influence of a standard temperature regime of fire.

The prerequisites for using calculation methods for assessing the fire resistance of steel beams with fire-resistant cladding to substantiate the relevant design data for construction sites for various purposes while ensuring their fire safety *have been further developed*.

The scientific and methodological basis for bringing the fire resistance of steel building structures into line with regulatory requirements for fire safety by installing fire protection *has been improved*.

The practical significance of the results obtained is the development of an improved method for calculating the fire resistance of steel beams with gypsum plasterboard fireproof cladding under the thermal influence of the standard temperature regime of fire, which allows determining the compliance of steel beams with fire protection with the required fire resistance class. This method allows avoiding errors that may occur when not taking into account the formation of defects in the fireproof cladding, which are the cause of the loss of their fireproofing ability. The proposed nomogram for determining the time of loss of fireproofing ability of gypsum plasterboard fireproof cladding due to the formation

of through defects allows for a more accurate assessment of fire resistance when using known calculation methods.

The proposed improved method of calculating the fire resistance of steel beams with plasterboard fireproof cladding was implemented in the implementation of scientific and research activities at the Institute of Public Administration and Scientific Research on Civil Protection when analyzing the fire safety of building structures, in the educational process of the National University of Civil Protection of Ukraine when teaching the academic discipline "Fire Safety of Buildings and Structures" and in the practical activities of the private enterprise "ProektBudStar" by using methods for assessing the fire resistance of steel beams with fire protection when analyzing the fire safety of construction objects.

Research methods. When analyzing statistical data on the number and characteristics of fires, as well as reviewing the results of scientific research in this area, an analytical method was used. To obtain temperature indicators and thermophysical characteristics of gypsum plasterboard cladding, fire tests were performed, and the obtained measurement results of the test data were appropriately processed using standardized mathematical methods. To perform modeling of the deformation and destruction processes of fire-resistant gypsum plasterboard cladding of steel beams, mathematical methods were used, which are based on the explicit method of integrating general dynamics equations in combination with the finite element method to describe the stress-strain state. To substantiate the mathematical model describing the regularities of the time dependence of the destruction of gypsum board fireproof cladding, a full factorial numerical experiment was performed. Methods of statistical hypothesis analysis were applied to study the reliability and adequacy of the calculated and experimental results of the study of steel beams with gypsum board fireproofing under the influence of a standard temperature regime of fire.

The introduction provides a general description of the dissertation, justifies the relevance of the research topic, formulates the goal, objectives, defines the object and subject of the research, indicates the scientific novelty and practical

significance of the results obtained, reveals the connection of the work with scientific programs, plans and topics, identifies the personal contribution of the applicant, provides data on the approbation, publications, structure and scope of the work.

The first section analyzes statistical data on the number and characteristics of fires in buildings with steel structures and basic information on the standardization of fire safety of steel beams. The behavior of steel beams during the thermal impact of fire and methods for increasing the fire resistance of steel beams are described. Experimental methods for assessing the fire resistance of steel beams, the procedure for conducting fire tests of steel beams for fire resistance and experimental methods for determining the fire protection ability of fire protection systems of steel beams are presented.

Based on the results of the analysis, the goal and main tasks of the work are formed.

The second section is devoted to the description of the experimental equipment for studying thermal processes in steel samples with fire-resistant plasterboard cladding during their fire tests and the methods of manufacturing, preparing samples for testing, conducting fire tests of samples of fragments of steel beams. The main experimental equipment is a plant consisting of a fire furnace with gas burners that provide the appropriate temperature regime of the fire in the chamber of the fire furnace. The scheme of the thermocouples' location and the conditions of their use are proposed. The experiment was performed during the control time, which corresponds to the time of the occurrence of the limit state by the sign of loss of bearing capacity for steel beams.

The third section presents the results of fire tests of fragments of steel beams with an I-section with plasterboard fireproof cladding under the influence of a standard fire temperature regime and the obtained temperature test data in the tested samples. It was established that as a result of high-temperature heating for 60 min under a standard temperature regime, complete destruction of samples with one layer of plasterboard fireproof cladding and partial destruction of samples with

two-layer and three-layer cladding occurred, which indicates a negative thermal effect on the integrity of the fireproof cladding and the ability to maintain fireproofing ability.

The conditions for achieving the design critical temperatures in the steel core of samples of steel beam fragments were analyzed and the regularity of their fixation time was revealed in the form of a regression, which expresses its dependence on the design critical temperature and the thickness of the gypsum board fireproof cladding, and using it, a corresponding nomogram was constructed. The thermal conductivity coefficient of the gypsum board fireproof cladding was calculated and its dependence on temperature was revealed. A generalized dependence of the thermal conductivity coefficient of the gypsum board fireproof cladding on temperature was obtained in tabular form, which can be used to calculate the temperature in steel beams with this type of fire protection.

The fourth section presents mathematical modeling of the thermal impact of fire on the behavior of a steel beam with a gypsum plasterboard fireproof cladding. Based on the results of the conducted research, the behavior of a steel beam with a gypsum plasterboard fireproof cladding during the thermal impact of fire is described. The conditions for the occurrence of a state of loss of fire resistance beyond the limit state of loss of bearing capacity of a steel beam with a gypsum plasterboard fireproof cladding are determined and it is shown that the opening of a through defect between the beam and parts of the gypsum plasterboard fireproof cladding more than 25 mm is recorded earlier than the occurrence of the limit state of loss of bearing capacity, which must be taken into account in the relevant calculations.

The fifth section presents a method for assessing the fire resistance of steel beams with gypsum plasterboard fireproof cladding, taking into account its loss of fireproofing ability. With the help of the performed research, the problem of identifying the patterns of dependence of the fire resistance limit and the time of loss of fireproofing ability of gypsum plasterboard cladding due to the formation of through defects with a width of more than 25 mm under the thermal influence of

fire was solved. A method for determining the temperature regime of heating the cross-section of steel beams with gypsum plasterboard fireproof cladding was proposed and the corresponding calculations were made. The regularity of the time of loss of fire-resistant ability of gypsum plasterboard cladding depending on the design parameters of a steel beam with a given type of fire protection has been established. Based on the established regularities, nomograms have been constructed for calculating the time of loss of fire-resistant ability of steel beams by gypsum plasterboard cladding depending on their section coefficient and load level at three values of the thickness of gypsum plasterboard fire-resistant cladding, and a computational method for assessing the fire resistance of steel beams with gypsum plasterboard fire-resistant cladding using the time of loss of fire-resistant ability by gypsum plasterboard cladding determined according to the proposed nomograms has been proposed.

Keywords: steel beam, fire protection, fire resistance limit, fire tests, computer modeling, computational experiment, fire effect, fire effect.

LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE THEME OF THE DISSERTATION

Articles in scientific and professional publications of Ukraine

1. Zaika N.P. Analysis of the current state of fire protection systems for steel beams based on facing materials. Collection of scientific papers Emergency situations: prevention and liquidation. Cherkasy. Volume 8 No. 2. 2024. P. 206-217.

<https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/article/view/217/208>

2. Zaika N.P. Regularities of temperature distribution of a steel beam with fire protection from plasterboard depending on the time of fire exposure. Scientific Journal «Problems of Emergency Situations». Cherkasy. No. 40. 2024. P. 17-30.

<https://doi.org/10.52363/2524-0226-2024-40-2>

3. Zaika N. P. Investigation of thermal properties of gypsum board fireproof cladding of steel beams under fire conditions. *Mechanics and mathematical methods*, 2025. Vol. VII. No. 1. P. 138–151.

<https://doi.org/10.31650/2618-0650-2025-7-1-138-151>

4. Rudeshko I., Zaika N., Kulitsa O., Sidney S. Research of ribbed reinforced concrete panel covering under the conditions of standard temperature regime of fire. *Collection of scientific papers Emergency situations: prevention and liquidation*. Cherkasy. 2022. Vol. 6 No 2. P. 95-101.

<http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21192>

5. Sidney S., Kobko V., Fedchenko S., Zmaga M., Zaika N. Improvement of the zone method for testing the fire resistance of hollow core slabs. *Collection of scientific papers of the Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Defense of Ukraine “Emergency situations: prevention and liquidation”*. Cherkasy. 2022. Vol. 6. No. 1. P. 95–103.

<https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/article/view/124/104>

Publications in scientific publications included in the database Scopus

6. Troshkin S.E., Kulitsa O.S., Pozdeev S.V., Kostenko T.V., Zemlyansky O.M., Zaika N.P. Investigation of the heat and mass transfer process in vertical cable tunnels of a nuclear power plant under real fire conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 5 No. 10 (125). P. 34-42.

<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289291>

7. Pozdeev S., Nekora O., Fedchenko S., Zaika N., Shnal T., Subota A., Nesukh M. Research on the adequacy of the results of identification of the strength characteristics of reinforced concrete crossbar concrete when heated under fire conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 3 No. 7 (123). P. 26-36.

<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.282205>

Article in a scientific periodical from another country

8. Perehin A., Nuianzin O., Zaika N., Vedula S. Technique for creating the prototype of a compact fire plant for tests to determine the fire resistance of

reinforced concrete structures. The scientific heritage, Budapest, Hungary. 2021. Vol. 78. P. 37-43.

<http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/21029/1/Nuianzin%207.pdf>

List of publications, which certify the approval of the dissertation

9. Zaika N.P., Nekora V.S., Nedilko I.A. Research on the integrity of the fire protection system of a steel beam based on plasterboard cladding in fire conditions. Problems and prospects for ensuring civil protection: materials of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists. Kharkiv: National University of Civil Engineering of Ukraine, 2022. P. 32-34.

<https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2022/3.pdf>

10. Pozdeev S., Nekora O., Nuyanzin O., Borsuk O., Zaika N. Computer modeling of the behavior of steel beams with mineral wool fireproof coating during heating. Theory and practice of fire extinguishing and emergency response: materials of the International Scientific and Practical Conference. Cherkasy: CHIPB named after the Heroes of Chernobyl National University of Chemical and Biological Sciences of Ukraine, 2022. P. 178-179.

<https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2022/6.pdf>

11. Nekora O., Zaika N., Nekora V. Research on fire resistance indicators of corrugated steel beams using fire protection. Current problems of fire safety and prevention of emergency situations in modern conditions: materials of the All-Ukrainian scientific and practical conference with international participation. Lviv: Lviv State University of Life Safety, 2022. P. 51-53.

<https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/bitstream/29.pdf>

12. Zaika N. Temperature distribution of a steel beam with fire protection from the time of fire exposure. Current problems of fire safety and prevention of emergency situations in modern conditions: materials of the International Scientific and Practical Conference. Lviv: Lviv State University of Life Safety, 2024. P. 65-67.

<https://indico.ldubgd.edu.ua/event/59/attachments/202024.pdf>

ЗМІСТ

ВСТУП	25
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ЩОДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ БАЛОК	35
1.1. Статистичні дані щодо кількості та особливостей пожеж у будівлях із сталевими конструкціями.....	35
1.2. Основні відомості щодо нормування пожежної безпеки сталевих балок	37
1.3. Поведінка сталевих балок під час теплового впливу пожежі	43
1.3.1. Температурні криві режимів пожежі	44
1.3.2. Поведінка сталевих балок в умовах теплового впливу пожежі.....	48
1.3.3. Вогнезахисні системи для сталевих балок	50
1.4. Експериментальне оцінювання вогнестійкості сталевих балок.....	56
1.4.1. Метод вогневих випробувань	56
1.4.2. Експериментальні методи дослідження вогнезахисної здатності вогнезахисту сталевих балок.	61
1.5. Висновки до розділу	66
РОЗДІЛ 2. ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ У ЗРАЗКАХ СТАЛЕВИХ БАЛОК З ВОГНЕЗАХИСНИМ ГПСОКАРТОННИМ ОБЛИЦЮВАННЯМ ПІД ЧАС ЇХНІХ ВОГНЕВИХ ВИПРОБУВАНЬ	69
2.1. Експериментальне обладнання для здійснення вогневих випробувань.	69
2.2. Конструкція та методика підготовки зразків до випробування.....	73
2.3. Методика здійснення вогневих випробувань зразків сталевих балок...	78
2.3.1. Методика улаштування зразків фрагментів сталевих балок та відповідного обладнання до проведення випробувань.....	78
2.3.2. Методика здійснення вогневих випробувань	80
РОЗДІЛ 3. ПРОВЕДЕННЯ ВОГНЕВИХ ВИПРОБУВАНЬ ФРАГМЕНТІВ СТАЛЕВИХ БАЛОК ІЗ ГПСОКАРТОННИМ ВОГНЕЗАХИСНИМ ОБЛИЦЮВАННЯМ.....	90

3.1. Дані температурних вимірювань під час проведення вогневих випробувань фрагментів сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням	90
3.2. Математична модель закономірності залежності часу фіксації критичної температури зразків фрагментів сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням у залежності від його товщини.....	97
3.3. Вивчення залежності коефіцієнту теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання фрагментів сталевих балок.....	100
3.4. Дослідження адекватності розрахункових даних теплофізичних характеристик вогнезахисного гіпсокартонного облицювання, сталевих балок, отриманих за експериментальними даними.....	107
3.5. Висновки до розділу	111
РОЗДІЛ 4. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООВОГО ВПЛИВУ ПОЖЕЖІ НА ПОВЕДІНКУ СТАЛЕВОЇ БАЛКИ ІЗ ГІПСОКАРТОННИМ ВОГНЕЗАХИСНИМ ОБЛИЦЮВАННЯМ	114
4.1. Режим нагрівання сталеві балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням в умовах пожежі	114
4.2. Основні теоретичні посилення до методу обчислення напружено-деформованого стану у сталевій балці з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням	116
4.2.1. Аспекти обчислювальних процедур щодо визначення напружено-деформованого стану у сталевій балці з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням.	116
4.2.2. Математичні моделі поведінки сталеві балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням в умовах пожежі.....	118
4.2.3. Метод скінченних елементів для наближення основних диференціальних рівнянь динаміки взаємодії деформованих тіл	122
4.2.4. Математична модель розрахунку параметрів контактної взаємодії у системі тіл.....	123

4.2.5. Явний метод розв'язку рівнянь динаміки механічної системи.....	127
4.2.6. Тип та форма скінченних елементів	128
4.2.7. Математичні моделі матеріалів конструктивної системи	131
4.3. Комплекс початкових даних для проведення обчислень параметрів поведінки сталевій балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням в умовах пожежі	137
4.3.1. Основні початкові дані для сталевій балки із вогнезахисним з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням.	137
4.2.2. Граничні умови скінченно-елементної моделі сталевій балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням	139
4.4. Результати математичного моделювання поведінки сталевій балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням під час пожежі.....	142
4.5. Висновки до розділу	149
РОЗДІЛ 5. МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ БАЛОК ІЗ ГІПСОКАРТОННИМ ВОГНЕЗАХИСНИМ ОБЛИЦЮВАННЯМ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ВТРАТИ ВОГНЕЗАХИСНОЇ ЗДАТНОСТІ.....	150
5.1. Відтворення температурного режиму нагріву сталевій балки за умови втрати вогнезахисної здатності гіпсокартонного вогнезахисного покриття	150
5.2. Розрахунок вогнестійкості сталевій балки при втраті вогнезахисної здатності гіпсокартонного облицювання	153
5.3. Методика здійснення числового повнофакторного експерименту	158
5.4. Удосконалена методика оцінювання вогнестійкості сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням з врахуванням втрати його вогнезахисної здатності.....	165
5.5. Висновки	165
ВИСНОВКИ.....	168
ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА	171

ВСТУП

Актуальність теми. Наявні статистичні дані щодо пожеж в Україні за останні п'ять років свідчать про те, що кількість пожеж у будівлях, зведених на основі сталевих каркасів, має тенденцію до зростання та становить третю частину від числа сумарної кількості пожеж. Для забезпечення пожежної безпеки у більшості випадків елементи сталевих каркасів будівель мають облаштовуватися надійним вогнезахистом, це стосується, зокрема, сталевих балок, що безумовно є відповідальним елементом даних сталевих каркасів.

На даний час пропонується велика кількість ефективних технічних рішень щодо улаштування систем вогнезахисту сталевих балок із використанням облицювальних матеріалів, серед яких можна виділити, як один з найбільш поширених та технологічних вогнестійкі гіпсокартонні плити. При цьому вогнезахисні системи із гіпсокартонним облицюванням включають систему кріплення та фіксації облицювання на основі складної системи кріпильних та допоміжних елементів. У такому разі можна відмітити вплив даних елементів на міцність даної вогнезахисної системи у цілому, оскільки гіпсокартонні плити мають невисоку міцність, а вплив кріпильних шурупів, які їх фіксують на металопрофілі ще більше їх ослаблюють в умовах теплового впливу пожежі. Це може бути причиною передчасного руйнування облицювання і як наслідок втрати вогнезахисної спроможності. Отже, відповідність сталевої балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням має встановлюватися з огляду на дану можливість.

Дані щодо наукових досліджень ефективності вогнезахисних систем сталевих балок, які містяться у роботах: Белікова А.С., Демчини Б.Г., Ватулі Г.Л., Круковського П.Г., Шналя Т.М., Шмуклера В.С., Фоміна С.Л., Поздєєва С.В., Семерака М.М., Ніжника В.В. Некори О.В., Нуянзіна О.М., Отроша Ю.А., Ковальова А.І., T. Lie, B. Bartelemy, G. Kruppa, T. Harmathy, M. Schäfer, D. Bernhart, A. Buchanan, L. Bisby, V. Kodur, T. Lennon, J. Fellingner, B. Zhao та інших, показали, що методи оцінювання вогнестійкості сталевих балок із вогнезахистом

на основі гіпсокартонного вогнезахисного облицювання з огляду на можливість його руйнування вивчені недостатньо. Це стримує більш широке використання вогнезахисних систем із гіпсокартонним облицюванням для сталевих балок і може бути причиною прорахунків під час проектування вогнестійких сталевих балок каркасів будівель.

Розкриття закономірностей, що встановлюють зв'язок із конструктивними параметрами сталевих балок та утворенням наскрізних дефектів і отворів у гіпсокартонному вогнезахисному облицюванні є актуальним науково-технічним завданням, розв'язання якого дозволяє створення наукового підґрунтя щодо удосконалення розрахункових методів оцінювання сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням, що є частиною передумов щодо забезпечення вимог щодо їхньої нормованої вогнестійкості та підвищення рівня пожежної безпеки будівель із конструкціями такого типу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційні дослідження у рамках даної роботи проводилися при виконанні Дисертація виконана в межах, окреслених розпорядженням Кабінету Міністрів України від 19.08.2015 № 844-р «Про схвалення Стратегії розвитку системи технічного регулювання на період до 2020 року», відповідно до п. 17 розділу 2 «Плану наукової і науково-технічної діяльності ДСНС України на 2021 рік», а також розділу 2 «Плану наукової і науково-технічної діяльності Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля (ЧПБ) НУЦЗ (Національного університету цивільного захисту) України на 2021 рік». Дослідження було складовою частиною досліджень у рамках виконання науково-дослідної роботи в Черкаському інституті пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України «Удосконалення експериментально-розрахункової бази оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій при випробуваннях їхніх малогабаритних фрагментів», державний реєстраційний номер НДР – 0123U101399, де здобувачка була виконавцем.

Ідеєю роботи є створення наукового підґрунття для забезпечення відповідності сталевих балок з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням вимогам щодо їхньої нормованої вогнестійкості шляхом удосконалення методу розрахункового оцінювання їхньої вогнестійкості з врахуванням прогнозованого часу, протягом якого вогнезахисне облицювання зберігає свою цілісну структуру із врахуванням закономірностей впливу конструктивних параметрів сталевих балок та гіпсокартонного облицювання на умови його руйнування під час пожежі.

Мета роботи полягає у розкритті закономірностей утворення наскрізних отворів у вогнезахисному гіпсокартонному облицюванні сталевих балок при його локальному руйнуванні внаслідок пожежі і пов'язаної із цим втрати його вогнезахисної здатності залежно від часу перебігу пожежі як наукового підґрунття удосконалення методу розрахункового оцінювання їхньої вогнестійкості.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано наступні **завдання**:

- здійснити аналіз статистичних показників щодо кількості та особливостей зафіксованих в Україні пожеж за останній час, а також здійснити аналіз нормативної бази, що встановлює основні вимоги щодо основних аспектів нормування вогнестійкості сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахистом;
- розробити методику виконання експериментальних досліджень сталевих балок з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням шляхом проведення вогневих випробувань з метою вивчення температурних показників їхнього нагрівання при тепловому впливі пожежі;
- розробити методику та здійснити з її використанням визначення температурних залежностей теплофізичних характеристик гіпсокартонного облицювання на основі експериментально одержаних результатів вогневих випробувань зразків, що є фрагментами сталевих конструкцій і виявити закономірності часу нагрівання до критичних температур, використовуючи

отримані теплофізичні характеристики у залежності від параметрів конструкції сталевих балок;

- розробити методику математичного моделювання процесу утворення наскрізних дефектів у гіпсокартонному вогнезахисному облицюванні із можливістю порушення його цілісності в умовах теплового впливу пожежі із стандартним температурним режимом з використанням явного методу інтегрування рівнянь динаміки сукупно із методом скінченних елементів;

- із використанням розроблених методик вивчити закономірності залежності часу утворення наскрізних дефектів, які приводять до втрати вогнезахисної здатності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання сталевих балок, від їхніх конструктивних параметрів;

- розробити методику розрахункового оцінювання вогнестійкості сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням із врахуванням можливості втрати вогнезахисної здатності при утворенні наскрізних дефектів в умовах теплового впливу пожежі із стандартним температурним режимом.

Об'єкт дослідження – процеси нагрівання, деформування та руйнування гіпсокартонного вогнезахисного облицювання сталевих балок при тепловому впливі стандартного температурного режиму пожежі.

Предмет дослідження – вплив конструктивних характеристик сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням на час утворення наскрізних дефектів у вогнезахисному гіпсокартонному облицюванні під впливом стандартного температурного режиму пожежі.

Методи дослідження. При аналізі статистичних даних щодо кількості та особливостей пожеж, а також огляду результатів наукових досліджень цього напрямку використовувався аналітичний метод. Для отримання температурних показників та теплофізичних характеристик гіпсокартонного облицювання виконувалися вогневі випробування, а отримані результати вимірювань даних випробувань були відповідним чином оброблені за

допомогою стандартизованих математичних методів. Для виконання моделювання процесів деформування та руйнування вогнезахисного гіпсокартонного облицювання сталевих балок залучені математичні методи, які ґрунтуються на явному методі інтегрування загальних рівнянь динаміки у комбінації із методом скінченних елементів для описання напружено-деформованого стану. Для обґрунтування математичної моделі, що описує закономірності залежності часу руйнування гіпсокартонного вогнезахисного облицювання було виконано повний факторний числовий експеримент. Дослідження достовірності та адекватності розрахункових та експериментальних результатів дослідження сталевих балок з гіпсокартонним вогнезахистом в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі застосовані методи аналізу статистичних гіпотез.

Наукова новизна проведених досліджень у дисертаційній роботі полягає у розкритті закономірностей залежності часу втрати вогнезахисної здатності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання внаслідок появи наскрізних дефектів у ньому від конструктивних параметрів сталевих балок із даним типом вогнезахисту. Виявлені закономірності є науковим підґрунтям щодо удосконалення методів розрахункового оцінювання вогнестійкості сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням. При цьому вперше:

- виявлено закономірність залежності часу нагрівання вогнезахисних сталевих балок до критичної проектної температури у вигляді регресії $U = 10.903 + 1.648 \cdot d_p + 0.018 \cdot \theta_{кр} + 9.545 \cdot 10^{-4} d_p \cdot \theta_{кр}$ від величини критичної температури $\theta_{кр}$ та товщини d_p вогнезахисного гіпсокартонного облицювання і з використанням виявленої залежності побудована номограма для здійснення експрес-методу розрахунку часу досягнення критичної температури;

- виявлено закономірність залежності часу втрати вогнезахисної здатності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання сталевих балок унаслідок утворення наскрізних дефектів в умовах теплового впливу пожежі із стандартним температурним режимом від коефіцієнту перерізу сталевих

балки A/V_m , товщини гіпсокартонного облицювання d_p та величини навантаження μ_f , яка має відповісти регресійній залежності $t_c = 136.14 - 0.119 \cdot A/V_m + 0.879 \cdot d - 111,742 \cdot \mu_f - 0,8 \cdot 10^3 \cdot A/V_m \cdot d - 0,0071 \cdot A/V_m \cdot \mu_f + 0,961 \cdot d \cdot \mu_f + 1,9 \cdot 10^{-4} \cdot A/V_m \cdot d \cdot \mu_f$;

– запропоновано удосконалений метод розрахункового оцінювання вогнестійкості сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням на основі виявлених закономірностей впливу конструктивних характеристик та рівня навантаження на час втрати вогнезахисної здатності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання внаслідок утворення наскрізних дефектів у ньому в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Набуло подальшого розвитку передумови використання розрахункових методів оцінювання вогнестійкості сталевих балок з вогнезахисним облицюванням для обґрунтування відповідних проектних даних для будівельних об'єктів різного призначення при забезпеченні їхньої пожежної безпеки.

Удосконалено науково-методичну базу для приведення у відповідність вогнестійкості сталевих будівельних конструкцій до нормативних вимог щодо пожежної безпеки шляхом улаштування вогнезахисту.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці удосконаленого методу розрахункового оцінювання вогнестійкості сталевих балок з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням при тепловому впливі стандартного температурного режиму пожежі, що дозволяє визначити відповідність сталевих балок із вогнезахистом до необхідного класу вогнестійкості. Даний метод дозволяє уникнути помилок, що можуть виникати при неврахуванні утворення дефектів у вогнезахисному облицюванні, які є причиною втрати їхньої вогнезахисної здатності. Запропонована номограма для встановлення часу втрати вогнезахисної здатності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання внаслідок утворення наскрізних дефектів дозволяє точніше оцінити вогнестійкість при застосуванні відомих методів розрахунку.

Запропонований удосконалений метод розрахункового оцінювання вогнестійкості сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням впроваджено при здійсненні науково-дослідної діяльності в Інституті державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту при аналізі пожежної безпеки будівельних конструкцій, у навчальний процес Національного університету цивільного захисту України під час викладання навчальної дисципліни «Пожежна безпека будівель та споруд» та практичну діяльність приватного підприємства «ПроектБудСтар» шляхом використання методик оцінювання вогнестійкості сталевих балок із вогнезахистом при аналізі пожежної безпеки об'єктів будівництва.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій доводиться даними аналізу наукових праць даної галузі; узгодженістю методів дослідження із поставленими в роботі метою і завданнями; достатнім та необхідним обсягом отриманих даних при проведенні експериментальних досліджень, відповідних стандартизованим методам випробувань і використанні метрологічно атестованого обладнання та повірених засобів вимірювання; прийнятною збіжністю результатів числових та експериментальних досліджень, а також відповідною апробацією та практичним впровадженням отриманих результатів у ході проведених досліджень.

Особистий внесок здобувача полягає в проведенні літературного огляду щодо стану питання вогнестійкості сталевих балок з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням, формулюванні ідеї роботи, визначенні мети і завдань досліджень, об'єкту та предмету досліджень; розробці методики експериментальних досліджень та їх проведення; обробці отриманих даних, розробці способу аналізу теплотехнічних характеристик гіпсокартонного облицювання, здійсненні моделювання процесу утворення наскрізних дефектів та руйнування гіпсокартонних плит облицювання в умовах пожежі; виявленні закономірностей залежності межі вогнестійкості сталевих балок із вогнезахисним облицюванням від конструктивних параметрів сталевих балок

та розробленні номограм для визначення часу руйнування гіпсокартонного вогнезахисного облицювання для визначення його вогнезахисної здатності. Участь здобувачки в роботах, опублікованих у співавторстві, які наведено в списку опублікованих праць за темою дисертації полягає у наступному:

- в науковій праці [Сідней С., Кобко В., Федченко С., Змага М., Заїка Н. Удосконалення зонного методу перевірки вогнестійкості пустотної плити. Збірник наукових праць Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація. Черкаси. 2022. Том 6(1). С. 95-103] здобувачка провела літературний огляд щодо методів врахування теплового впливу відповідного режиму пожежі на умови нагріву елементів будівельних конструкцій;

- в науковій праці [Рудешко І., Заїка Н., Куліца О., Сідней С. Дослідження ребристої залізобетонної панелі покриття за умовами стандартного температурного режиму пожежі. Збірник наукових праць Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація. Черкаси. 2022. Том 6(2). С. 95-101] здобувачка розробила методику розрахунку температури нагрівання сталевих елементів плити в умовах пожежі та науково обґрунтувала її основні положення;

- в науковій праці [Трошкін С.Е., Куліца О.С., Поздєєв С.В., Костенко Т.В., Землянський О.М., Заїка Н.П. Дослідження процесу тепломасопереносу у вертикальних кабельних тунелях атомної електричної станції за умов реальних пожеж. Східноєвропейський журнал корпоративних технологій «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies». 2023. Том 5 №10 (125). С. 34-42] здобувачка опрацювала отримані дані в ході проведення експериментальних досліджень температурних режимів пожежі та нагрівання будівельних конструкцій в даних умовах;

- в науковій праці [Заїка Н.П., Некора В.С., Неділько І.А. Дослідження цілісності вогнезахисної системи сталеві балки на основі гіпсокартонного облицювання в умовах пожежі. Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. Харків: НУЦЗ України, 2022. С. 32-34.] здобувачка

розробила методологію розрахункового оцінювання цілісності вогнезахисного гіпсокартонного облицювання в умовах пожежі;

- в науковій праці [Поздєєв С., Некора О., Нуянзін О., Борсук О., Заїка Н. Комп'ютерне моделювання поведінки сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним покриттям при нагріванні. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022. С. 178-179.] здобувачка розробила метод температурного розподілу у сталевій балці із вогнезахисним облицюванням;

- в науковій праці [Некора О., Заїка Н., Некора В. Дослідження показників вогнестійкості гофрованої сталеві балки із використанням вогнезахисту. Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 2022. С. 51-53] здобувачка розробила метод розрахунку температурного розподілу у гофрованій сталевій балці із вогнезахисним облицюванням.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень доповідались, обговорювались та отримали позитивне схвалення на всеукраїнських, міжнародних науково-практичних та науково-технічних конференціях, а саме:

– Міжнародна науково-практична конференція молодих учених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту» (м. Харків, НУЦЗ України, 2022);

– Міжнародна науково-практична конференція. «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022);

– Міжнародна науково-практична конференція молодих учених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту» (м. Харків, НУЦЗ України, 2022);

– Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення». (м. Львів, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 2022);

– Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення». (м. Львів, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 2024).

Публікації. Основний зміст роботи викладено в 6.5 наукових статтях, віднесених до переліку фахових, в тому числі в двох статтях у виданнях, що входять до наукометричних баз Index Copernicus, Google Scholar, Open Academic Journals Index та інших, і одній статті у закордонному виданні. Результати досліджень також висвітлено у 4 доповідях на вітчизняних та іноземних наукових конференціях.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних літературних джерел з 130 найменувань, містить 192 сторінки друкованого тексту, 29 таблиць, 62 рисунки, 2 додатки.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ЩОДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ БАЛОК

1.1. Статистичні дані щодо кількості та особливостей пожеж у будівлях із сталевими конструкціями.

За результатами вивчення аналітичного огляду стану техногенної та природної безпеки в Україні за 2023 рік [1] виявлено, що за період з 2012 року до 2023 року в Україні було зафіксовано велику кількість пожеж рис. 1.1 [1], і зберігається тенденція до їхнього збільшення. За останнє десятиріччя було зафіксовано 971 966 пожеж, середня величина за зазначений період становить 97 197 випадків пожеж у рік. За даний період останніх 10 років соціальні втрати становили 33867 загиблими і 29 416 травмованими, що відповідає щорічним середнім величинам відповідно 3387 випадків загибелі і 2942 випадків травмування людей. Матеріальні втрати унаслідок виникнення пожеж становили понад 19 мільярдів гривень – прямі та понад 64 мільярдів гривень – непрямі [1].

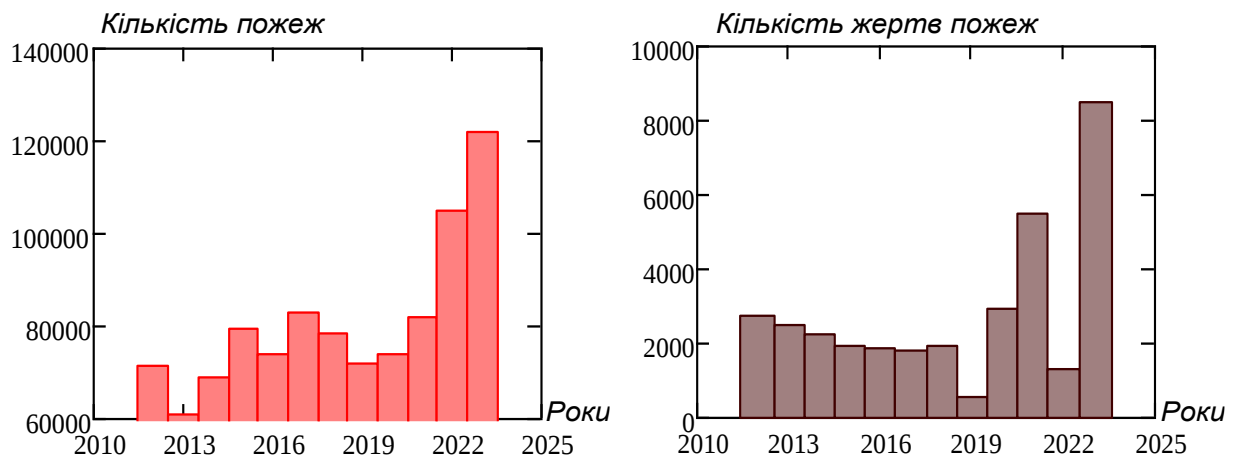


Рис. 1.1. Статистичні дані щодо кількості пожеж та загибелі людей у наслідок пожеж за 2012 – 2023 роки.

Лише за останні 12 місяців 2023 року матеріальні збитки від пожеж становили 15 млрд 321 млн 56 тис. грн. За період 2023 року за добу в Україні в середньому фіксується 339 пожеж, що є причиною загибелі 24 людей та

травмуванню 19 осіб, 98 будівель зазнають знищення або ушкодження за рахунок теплового впливу пожежі, щоденні збитки від пожеж становлять 45,8 млн грн. [1].

З огляду на результати аналізу даних щодо локації виникнення пожеж [1], поданих на рис. 1.2 можна підсумувати, що понад 33% всіх пожеж відбувається у внутрішньому просторі будівель та споруд.

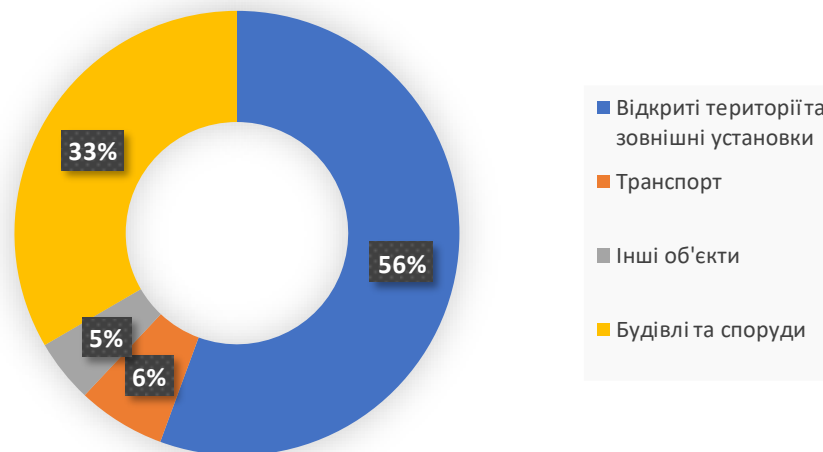


Рис. 1.2. Статистичні дані щодо локації виникнення пожеж, що сталися у 2023 році.

Серед причин, що є тригерами руйнування будівель та споруд унаслідок пожеж можна виділити як основну тепловий вплив дію полум'я, який є причиною швидкого нагріву конструкцій до рівня критичної температури 500 °C для сталевих конструкцій і 300 °C для конструкцій з алюмінієвих сплавів. Це, у свою чергу, є причиною утворення великих деформації та як наслідок втрати несучої здатності металевими конструкціями через 15-20 хвилин [1].

Значна кількість випадків повного або часткового руйнування будівель з металевими каркасами внаслідок їхнього нагріву при пожежі є результатом передчасного вичерпання несучої здатності. У більшості випадків це є наслідком недотримання нормативних вимог щодо вогнестійкості даних конструкцій. Свою роль у цьому може відігравати незадовільний технічний

контроль стану конструкцій або споруд, недотримання встановлених вимог пожежної безпеки до технологічних процесів на виробництві, відсутність, або недостатність технічного наглядового контролю щодо стану вогнезахисних систем. У сукупності, викладені недоліки при проектуванні та експлуатації будівель з металевими конструкціями є причиною зниження рівня пожежної безпеки будівельних об'єктів і, як наслідок, підвищення рівня небезпеки для людей, які перебувають у їхньому внутрішньому просторі.

1.2. Основні відомості щодо нормування пожежної безпеки сталевих балок.

Рівень вогнестійкості будівельних конструкцій – одна з найбільш важливих передумов безпеки людей, що перебувають у внутрішньому просторі будівлі, або беруть участь у рятувальних операціях. Несучі сталеві конструкції мають високу теплопровідність і це зумовлює важливість цього показника, оскільки температура 350-750 °C є граничною для настання втрати їх несучої здатності і подальшого руйнування [1 – 11].

Саме несуча здатність конструкції є важливою ознакою, що забезпечує стійкість і міцність конструкції будівлі, яка навіть при значному навантаженні (постійному та тимчасовому) має нормально функціонувати. Тому необхідно враховувати ступінь несучої здатності металевої конструкції на стадіях проектування і подальшого будівництва [1 – 34].

Розрахункове оцінювання вогнестійкості несучих сталевих конструкцій здійснюють відповідно до 4 нормативних документів, які діють в Україні:

ДБН В.1.1-7-2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги» [2], ДСТУ–Н EN 1993-1-2: 2010 «Єврокод 3: Проектування сталевих конструкцій – Частина 1-2: Загальні правила – Розрахунок на вогнестійкість» [3, 4], ДСТУ EN 13501-1:2022 Пожежна класифікація будівельних виробів і будівельних конструкцій. Частина 1. Класифікація за результатами випробувань щодо реакції на вогонь (EN 13501-1:2018, IDT) [5], ДСТУ EN

13381-8:2022 Методи випробування для визначення впливу на вогнестійкість елементів конструкцій. Частина 8. Реактивні вогнезахисні матеріали для сталевих конструкцій (EN 13381-8:2013, IDT) [6].

Методики здійснення експериментальних досліджень та обчислень оцінювання межі вогнестійкості сталевих конструкцій і, зокрема вогнезахисних сталевих балок, регламентуються нормативними документами [2 – 3, 7 - 32]. Відповідно до рекомендацій норм ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010 [3 – 5] застосовується ієрархічна структура методів для визначення критичної температури втрати несучої здатності. При цьому величина критичної проектної температури суттєво залежить від прикладеного механічного навантаження на елементи конструкції і може становити від 750 °С до 350 °С.

Для навантаженої в межах норми конструкції згідно [33 – 42] середнє значення критичної температури становить 500-550 °С. Вимоги щодо вогнестійкості наведено у табл 1.1.

Таблиця 1.1.

Основні особливості будівельних конструкцій при різних варіантах ступеня вогнестійкості будівель

Ступінь вогнестійкості	Конструктивні характеристики
I, II	Найбільш відповідальні будівлі, такі як багатоповерхові будівлі та будівлі підвищеної поверховості. Переважно будівлі зведені на основі залізобетонних монолітних каркасів та частково сталевими конструкціями, що мають надійний вогнезахист. Приклади: житлові, торгово-розважальні, офісні, готельні та багатофункціональні будівлі.
III	Відповідальні промислові та цивільні будівлі з несучими кам'яними, залізобетонними та сталезалізобетонними конструкціями з використанням зовнішніх та внутрішніх металевих конструкцій із вогнезахистом. Приклади: промислові цехи та технологічні споруди енергетичних, хімічних, переробних підприємств
IIIa	Відповідальні промислові будівлі переважно із сталевими каркасами, елементи яких мають вогнезахист. Вогнезахист виконується на основі спучувальних покриттів, штукатурок та облицювальних матеріалів. Приклади: виробничі приміщення промислових

Ступінь вогнестійкості	Конструктивні характеристики
	підприємств машинобудівної та будівельної галузей
IIIб	Обмежено відповідальні будівлі переважно до трьох поверхів із каркасом на основі сталевих і дерев'яних конструкцій. Елементи каркаса обов'язково передбачають наявність вогнезахисної системи. Приклади: виробничі приміщення промислових підприємств машинобудівної та будівельної галузей, а також складські будівлі
V	Обмежено відповідальні будівлі з елементами будівельних конструкцій з горючих та негорючих матеріалів, із вогнезахисними системами на основі штукатурок або вогнезахисного облицювання. Приклади: переважно складські та виробничі будівлі
IVa	Обмежено відповідальні і переважно одноповерхові будівлі з металевими каркасами та кам'яними і збірними залізобетонними конструкціями. Приклади: житлові та виробничі будівлі
V	Будівлі з низькою відповідальністю будівельних конструкцій. Вимоги щодо вогнестійкості даних конструкцій не висуваються.

Одним з головних керівних документів є будівельні норми ДБН В.1.1-7-2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги» [2]. Даний документ встановлює загальні вимоги пожежної безпеки до будинків та споруд будь-якого призначення. Елементи будівельних конструкцій мають відповідати встановленим класам вогнестійкості та межах поширенню вогню (М) відповідно до табл. 1.2. [2]. Необхідний ступінь вогнестійкості будівлі визначається залежно від конструктивних параметрів елементів конструкцій, що подані у табл. 1.1.

Таблиця 1.2.

Ступінь вогнестійкості будинку та класи вогнестійкості будівельних конструкцій

Конструктивний елемент	Ступень вогнестійкості будівлі							
	I	II	III	IIIa	IIIб	IV	IVa	V
	Необхідні класи вогнестійкості різних елементів конструкцій							
Несучі стіни (група поширення вогню M0)	REI 150	REI 120	REI 120	REI 60	REI 60	REI 30	REI 30	--
Самонесучі стіни (група поширення вогню M0)	REI 75	REI 60	REI 60	REI 30	REI 30	REI 15	REI 15	--

Продовження табл. 1.2.

Зовнішні ненесучі стіни (група поширення вогню M0)	E 30	E 15	E 15	E 15	E 15	E 15	E 15	--
Зовнішні ненесучі стіни (група поширення вогню M1)	--	--	E 30	E 15	E 30	--	--	--
Внутрішні ненесучі стіни та перегородки (група поширення вогню M0)	EI 30	EI 15	EI 15	EI 15	EI 15	EI 15	EI 15	--
Колони (група поширення вогню M0)	R 150	R 120	R 120	R 15	R 60	R 30	R 15	--
Колони (група поширення вогню M1)	--	--	--	--	R 60	R 30	--	--
Балки, косоури, сходи (група поширення вогню M0)	R 60	R 60	R 60	R 45	R 15	R 15	R 15	--
Балки, косоури, сходи (група поширення вогню M1)	--	--	--	--	R 15	--	--	--
Перекриття (група поширення вогню M0)	REI 60	REI 45	REI 45	REI 15	REI 45	REI 15	REI 15	--
Перекриття (група поширення вогню M1)	--	--	REI 45	--	REI 45	REI 15	--	--
Плити, настили прогони як елементи суміщених покриттів (група поширення вогню M0)	RE 60	RE 15	--	RE 15	RE 15	--	RE 15	--
Плити, настили прогони як елементи суміщених покриттів (група поширення вогню M1)	--	--	--	RE 15	RE 30	RE 15	RE 15	--
Плити, настили прогони як елементи суміщених покриттів (група поширення вогню M2)	--	--	--	--	--	--	RE 15	--
Балки, ферми, арки, рами як елементи суміщених покриттів (група поширення вогню M0)	R 30	R 30	--	R 15	R 45	--	R 15	--
Балки, ферми, арки, рами як елементи суміщених покриттів (група поширення вогню M1)	--	--	--		R 45	--	--	--

Вимоги щодо збереження одного із граничних станів вогнестійкості конструкцій, зокрема несучої здатності (R) для сталевих конструкцій і сталевих балок у тому числі, мають бути забезпечені впродовж встановленого проміжку часу в умовах пожежі і враховуються уже на стадії проектування. Характеристика щодо групи поширення вогню також є

важливим показником для визначення ступеню вогнестійкості будівельних конструкцій, даний показник встановлює три групи: M0, M1, M2, що визначаються за довжиною ділянки поширення вогню по поверхні елемента будівельної конструкції. Дана довжина вимірюється при горизонтальному та вертикальному її розміщенні. Для групи M0 розмір ділянки поширення полум'я в обох напрямках дорівнює 0 м, для групи M1 означений розмір при вертикальному положенні не має перевищувати 0,4 м та у горизонтальному положенні не має перевищувати 0,25 м, а для групи M2 ширина ділянки поширення полум'я не має перевищувати граничні значення вказані для M1.

Сталеві конструкції за групою поширення вогню є негорючими і їхня межа поширення полум'я відносить їх до групи M0, але через високу теплопровідність протягом 5-20 хвилин інтенсивного теплового впливу пожежі фіксується настання граничного стану втрати несучої здатності.

При проектуванні сталевих будівельних конструкцій враховуються рекомендації нормативних документів, відповідних нормам та вимогам європейських стандартів: ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1993-1-2:2005, IDT) [3 – 5] та ДСТУ-Н Б.В.2.6-211:2016 Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість [2 – 3, 7 – 32]. Перелічені нормативні документи містять методики теплового розрахунку та методи перевірки, регламентують дію пожежі на конструкції, обумовлюють загальні посилення та передумови розрахункового оцінювання вогнестійкості конструкцій, містять рекомендації щодо встановлення сценаріїв пожеж та їхніх температурних режимів.

Викладені документи використовуються при проектуванні сталевих конструкцій з урахуванням особливостей конструкції та їхнього навантаження у звичайних умовах. Також дані норми можуть бути застосовані для металевих конструкцій із вогнезахисними системами, що

мають протягом певного проміжку часу під впливом вогню зберігати цілісність своєї структури і виключати можливість передчасного руйнування.

При дотриманні наступних вимог при проектуванні використовуються критерії щодо умови збереження несучої здатності [2 – 3, 7 – 32]:

$$\bullet \text{ граничний час} \quad t_{d, fi} \geq t_{fi, requ}; \quad (1.1)$$

$$\bullet \text{ гранична несуча здатність} \quad R_{d, fi} \geq E_{d, fi}; \quad (1.2)$$

$$\bullet \text{ гранична температура} \quad \theta_d < \theta_{d, cr}, \quad (1.3)$$

де: $t_{d, fi}$ – межа вогнестійкості, отримана у результаті розрахунку;

$t_{fi, requ}$ – необхідна межа вогнестійкості, згідно із вимогами норм;

$R_{d, fi}$ – несуча здатність конструктивного елемента в умовах пожежі відповідно до часу встановленого класу вогнестійкості;

$E_{d, fi}$ – діюче нормативне навантаження в умовах пожежі відповідно до часу встановленого класу вогнестійкості;

θ_d – проектна критична температура нагрівання елемента конструкції;

$\theta_{d, cr}$ – розрахункова гранична температура нагрівання елемента конструкції; [2 – 3, 7 – 32].

При розрахунку конструкцій на вогнестійкість мають бути забезпечені зазначені умови та дотримання такого порядку дій:

- обґрунтування можливого сценарію пожежі в проектних умовах;
- обґрунтування встановлених температурних режимів пожежі;
- розрахунок температурних показників в елементах конструкцій;
- розрахунок параметрів напружено-деформованого стану конструктивних систем під час пожежі [43 – 69].

Для визначення вогнестійкості споруди необхідно врахувати межі її вогнестійкості та групу горючості основних її конструкцій. Розрахунок вогнестійкості сталевих конструкцій відбувається розрахунковим методом (за спрощеною або розвинутою моделлю), проте інколи застосовується метод випробування [2 – 3, 7 – 32].

1.3. Поведінка сталевих балок під час теплового впливу пожежі.

ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010 [3] є нормативним документом, який регламентує як в Україні, так і в інших країнах Європи вимоги будівельних норм до проектування несучих металевих конструкцій. Згідно до даного документа ступінь вогнестійкості несучих металевих конструкцій залежить від їх ступеня захищеності. Вони можуть бути незахищеними, захищені тепловими екранами, ізольовані вогнезахисним матеріалом тощо. Зважаючи на вид захисту металевої конструкції для визначення вогнестійкості застосовують наступні методи:

- спрощену розрахункову модель;
- уточнену розрахункову модель;
- випробування.

При застосуванні спрощених розрахункових співвідношень для сталевих конструкцій, що піддаються розтягу, стисканню, згину та іншим деформаціям, розрахункову несучу спроможність конструктивних елементів конструкції визначають за температурою, що у реальності має нерівномірний розподіл по ширині поперечного перерізу, за температурою, яку вважають рівномірно розподіленою по перерізу елемента конструкції у даний момент часу перебігу пожежі. З огляду на це при розрахунках за таким підходом має бути врахований тип вогнезахисту елемента конструкції, який впливає на характер нагріву даного елемента, що відрізняється для незахищених несучих металевих конструкцій, або захищених тепловими екранами. Значення максимальної температури при застосуванні даного підходу завищуються і це зумовлює появу додаткового запасу несучої здатності даних елементів під час пожежі.

При використанні уточнених розрахункових методів оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій мають враховуватися реальні умови перебігу теплових процесів при пожежі. За умови наявності інформації про відомі характеристики матеріалів при врахуванні їхнього змінювання у

залежності від температури, такий розрахунок можна здійснити для будь якого температурного режиму пожежі. Суть такої моделі полягає в:

- розрахунках розвитку та розповсюдження температури всередині елементів конструкцій;
- розрахунках механічних процесів в елементах конструкцій будівлі або її окремої частини.

1.3.1. Температурні криві режимів пожежі.

Для розрахункового оцінювання вогнестійкості елементів конструкції після обґрунтування встановленого сценарію пожежі на наступній стадії є обґрунтування температурного режиму пожежі, що описує відповідну температурну криву. Існує два типи температурних режимів: номінальний та параметричний. Номінальний температурний режим застосовується при описанні розвитку типової пожежі незалежно від конкретних показників приміщень будівлі. До номінальних режимів за [2 – 3, 7 – 32] можна віднести режими пожеж:

- із стандартною температурною кривою;
- із температурною кривою пожежі назовні будівель;
- із температурною кривою вуглеводневої пожежі.

Будь який температурний режим пожежі описується температурною кривою, яка виражає залежність середньооб'ємну температуру у приміщенні із пожежею від часу.

У більшості випадків застосовують стандартний температурний режим у діапазоні температур 20-1000 °C при розгляді сценарію пожежі в такому діапазоні оцінювання вогнестійкості згідно [2 – 3, 7 – 32] можуть здійснюватися при температурах до 1200 °C. За таких умов температурно-часова залежність визначається за виразом:

$$\theta_p = 345 \lg(8t+1) + 20, \quad (1.4)$$

де: θ_p – середньооб'ємна температура у приміщенні із пожежею, °C;

t – тривалість теплового впливу пожежі, хв.

Температурна крива стандартного температурного режиму пожежі наведена на рис. 1.3.

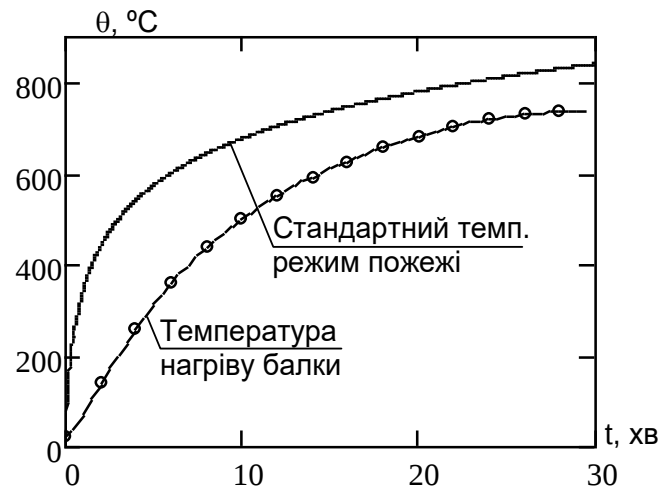


Рис. 1.3. Температурна крива стандартного режиму пожежі.

При аналізі режиму зовнішньої пожежі можна зазначити, що порівняно з стандартною температурною кривою пожежі тепловий вплив даного режиму є помітно меншим. При оцінюванні вогнестійкості елементів будівельних конструкцій, які експлуатуються ззовні будівель, можливий режим зовнішньої пожежі. В цьому варіанті для описання даної температурної кривої зовнішньої пожежі можна використати формулу:

$$\theta_p(t) = 660 [1 - 0,687 e^{-0,32t} - 0,313 e^{-3,8t}] + 20 \quad (1.5)$$

де: t – час перебігу теплового впливу пожежі, хв;

$\theta_p(t)$ – усереднена температура пожежі назовні поблизу елемента будівельної конструкції, °C.

Температурна крива режиму вуглеводневої пожежі застосовується коли розглядається випадки пожеж на об'єктах зберігання, транспортування або переробки продуктів та речовин нафто-газової та хімічної промисловості [2, 6]. Даний випадок характеризується найбільш інтенсивним тепловим впливом. Температурна крива режиму вуглеводної пожежі може бути виражена за допомогою формули:

$$\theta_p(t) = 1080 (1 - 0,325 e^{-0.167t} - 0,675 e^{-2.5t}) + \theta_0, \quad (2.3)$$

де: t – час розвитку та пожежі, хв;

θ_0 – початкова температура середовища, °С; $\theta_0 \approx 20^\circ\text{C}$;

$\theta_p(t)$ – температура у приміщенні із пожежею, °С.

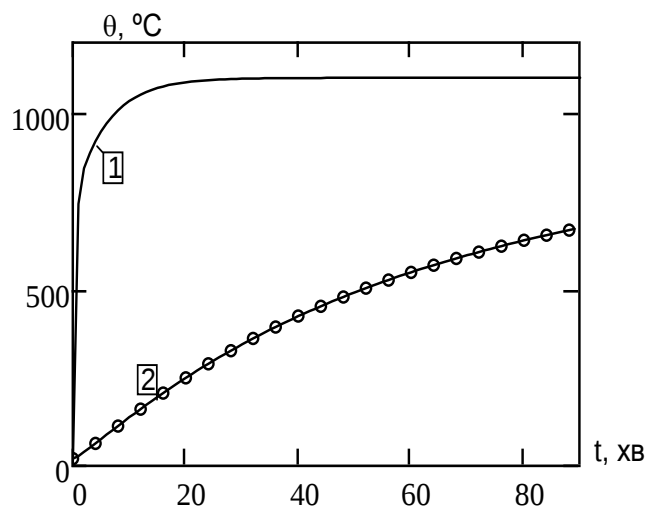


Рис. 1.4. Режим прогрівання сталевих балок протягом 90 хв пожежі: 1 – температурна крива вуглеводневого режиму пожежі; 2 – температурний режим нагріву вогнезахищеної сталевий балки.

Всі три криві залежностей температура-час основних номінальних температурних режимів показані на рис. 1.5 [2 – 9].

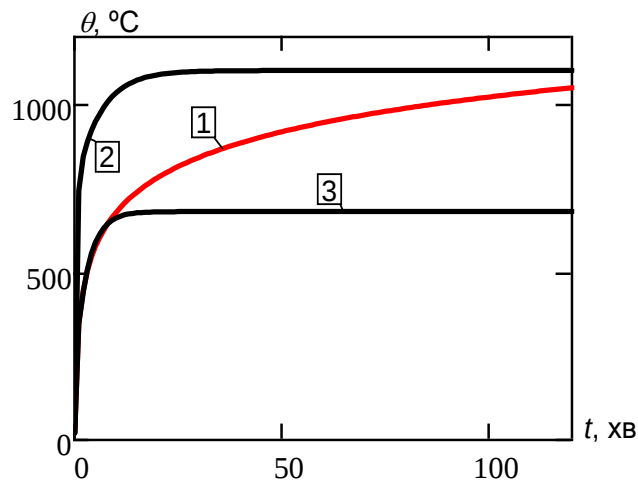


Рис. 1.5. Графік кривих температура-час номінальних температурних режимів: 1 – температурна крива стандартного режиму пожежі; 2 – температурна крива режиму вуглеводневої пожежі; 3 – температурна крива режиму зовнішньої пожежі.

Інший тип температурних режимів пожежі називається параметричними режимами, вони належать до варіантів розгляду сценаріїв пожеж, які наближаються до реальних умов їхнього перебігу. Параметри, які враховують при обґрунтуванні даних температурних режимів є найбільш значущими при оцінюванні вогнестійкості сталевих балок:

- геометричні та фізичні характеристики матеріалів огорожувальних конструкцій пожежного відсіку;
- наявність чи відсутність автоматичних систем пожежогасіння та примусової чи природної вентиляції;
- пожежне навантаження та параметри його розташування.

Залежно від характеру змінювання температури залежно від часу перебігу пожежі, можуть бути обґрунтовані параметричні температурні режими пожеж різного типу та локалізації. При цьому встановлено рівномірний розподіл температури для об'ємних пожеж і нерівномірний для локалізованих пожеж.

Параметричний режим для об'ємної пожежі може бути обґрунтовано для найбільшої площі пожежних відсіків до 500 м² і умовною висотою до 4 м.

Для обґрунтування даного режиму для оцінювання вогнестійкості обов'язковим є забезпечення умови повного згорання пожежного навантаження у пожежному відсіку.

Температурний режим локальних пожеж для практичного застосування використовується набагато менше [45 – 68]. Висота приміщення та довжина полум'я є головними параметрами режиму і при цьому може бути розглянуто два варіанти перебігу локалізованої пожежі див. рис. 1.6.

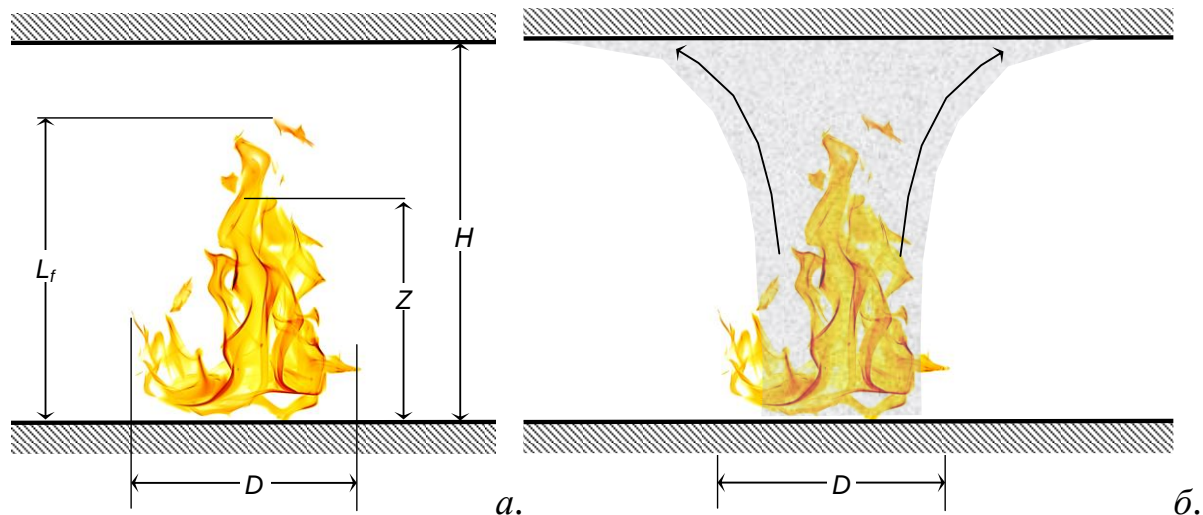


Рис. 1.6. Варіанти перебігу локальних пожеж: а – локалізована пожежа з однією зоною; б – локалізована пожежа з двома зонам.

Для обґрунтування теплового впливу параметричних режимів пожеж на елементи горизонтальних сталевих конструкцій та розрахунку їх вогнестійкості [2 – 3, 7 – 32] використання моделей локальних пожеж із заданими параметрами є більш частим.

1.3.2. Поведінка сталевих балок в умовах теплового впливу пожежі.

Погіршення властивостей матеріалів у результаті високотемпературного нагрівання, що проявляється при зменшенні жорсткості та міцності мають бути враховані при здійсненні розрахункового оцінювання вогнестійкості загальної конструктивної системи, що складається із сталевих конструкцій.

В умовах спільної дії прикладених механічних навантажень і високих температур, при проектуванні вогнестійкості сталевих конструкцій, не враховується запас несучої здатності елементів конструкцій. У результаті теплового впливу пожежі на елементи сталевих конструкцій спостерігається перерозподіл внутрішніх силових факторів, що спричиняє зміни параметрів деформацій і міцності.

Основні механічні характеристики сталі, до яких відносяться границя текучості, границі пропорційності та модуль пружності сталі повністю визначають поведінку сталевих балок в умовах підвищення температури у результаті теплового впливу пожежі. Для врахування зменшення міцності та деформаційних властивостей сталі вводяться спеціальні коефіцієнти, які, в свою чергу, є також значущими властивостями для матеріалу сталевих конструкцій, зокрема сталевих балок. На рис. 1.7. [2 – 3, 7 – 32] показані криві залежностей коефіцієнтів зниження механічних характеристик сталі, від яких залежить несуча здатність елементів конструкцій в умовах нагріву при пожежі.

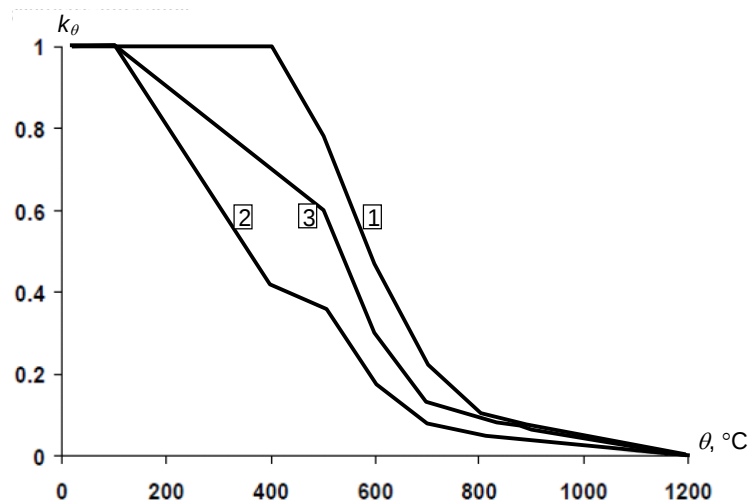


Рис. 1.7. Залежність зниження коефіцієнтів напруження-деформації при підвищенні температури: 1 – коефіцієнт зниження границі текучості; 2 – коефіцієнт зниження границі пропорційності; 3 – коефіцієнт зниження модуля пружності.

1.3.3. Вогнезахисні системи для сталевих балок.

Сталеві конструкції є дуже вразливими щодо впливу високих температур. Висока теплопровідність сталі є причиною швидкого нагріву сталевих конструкцій та алюмінієвих конструкцій. Можна спостерігати втрату несучої здатності сталевими конструкціями через 5-20 хвилин перебігу пожежі із стандартним температурним режимом, що за [2] відповідає R 15, це зумовлює необхідність улаштування вогнезахисту, оскільки цієї вогнестійкості недостатньо для здійснення евакуації людей під час пожежі та здійснення діяльності оперативно-рятувальних підрозділів при проведенні рятувальних операцій. Згідно цього показника необхідно застосовувати будівельні матеріали, які задовольняють вимоги пожежної безпеки і відповідають встановленим класам вогнестійкості табл. 1.2. [1]. У випадку сталевих конструкцій дані вимоги можна задовольнити за допомогою вогнезахисту елементів конструкцій [69 – 74]. Ці засоби є достатньо різноманітними і класифікуються за схемою рис.1.8.



Рис. 1.8. Класифікація вогнезахисних засобів.

Дані способи найчастіше використовуються для забезпечення необхідної вогнестійкості сталевих конструкцій, хоча можуть використовуватися до інших конструктивних матеріалів.

Для вогнезахисту застосовуються теплові екрани та хімічні засоби. Тим не менше для улаштування вогнезахисту є найбільш застосовними спучувальні фарби та покриття на водній і на органічній основі. Їхніми перевагами являється:

- декоративний вигляд;
- мала товщина;
- можливість набуття потрібного кольору та забарвлення;
- технологічність;
- зручний температурний діапазон при нанесенні.

Візуально дані вогнезахисні засоби практично не відрізняються від звичайних покриттів та фарб. Основна різниця полягає в тому, що спучувальні фарби спінюються при підвищенні температур до величини 200 °C – 250 °C (спучений шар утворюється на поверхні, яка оброблена, це забезпечує бар'єр щодо поширення тепла безпосередньо до сталі). Для деяких вогнезахисних засобів даного типу властива хімічна реакція із виділенням газів, які можуть додатково пригнічувати реакцію горіння. До цього ж, дані засоби мають певні додаткові позитивні властивості, серед яких можна виділити:

- підвищення стійкості сталі до корозії;
- високу адгезію до поверхні інших матеріалів;
- підвищення стійкості сталі до кліматичних впливів.

Вказані вогнезахисні системи мають достатньо тривалий термін зберігання своєї вогнезахисної здатності, який становить 5-10 років, а деякі подібні засоби можуть забезпечити вогнезахисну здатність до 20 років. За допомогою терморозширюючих фарб та покриттів можна збільшити до R 45 – R 60 і навіть більше.

Поверхні елементів, підданих захисту, можуть мати велике розмаїття за складністю форми та розмірів на відміну від вогнезахисних штукатурок, обмазок, базальтування та різних видів вогнезахисного облицювання. Це також є перевагою спучувальних фарб та покриттів.

До недоліків терморозширюючих фарб та покриттів слід віднести:

- ✓ необхідність нанесення спеціального захисного лаку для захисту від кліматичного впливу;
- ✓ необхідність попередньої підготовки поверхонь захищуваних елементів конструкцій;
- ✓ швидке руйнування під впливом температур спученого шару;
- ✓ необхідність постійного контролю за цілісністю шару покриття;
- ✓ необхідність нанесення декілька шарів засобу;
- ✓ порівняно висока вартість матеріалів та трудомісткість процесу нанесення, що здійснюється кваліфікованими робіниками [56 – 67].

Засоби конструктивного вогнезахисту можна поділити на чотири типи (див. рис. 1.8). Вогнезахисні штукатурки, для елементів будівельних конструкцій із різним функціональним призначенням, за винятком засобів із вмістом гіпсу або вапняку, що є одним із найбільш дешевих вогнезахисних засобів. При їх використанні захист триває 10- 25 років, а показник класу вогнестійкості становить до R 180. Для сталевих конструкцій складної конфігурації, таких як складені балки, ферми та в'язі, що працюють в умовах підвищеної вібрації, при застосуванні зазначеного вогнезахисного засобу виникає ризик виникнення тріщин, відшарування, що зумовлює потребу постійного контролювання цілісності поверхні [3, 69]. У даному випадку це ставить під сумнів ефективність використання даного засобу у таких умовах.

З точки зору створення теплоізоляційного бар'єру між пожежею та сталевією балкою є вогнезахисне облицювання плитними матеріалами або звичайними будівельними матеріалами, такими як цегла та бетон. Перевагами такого типу вогнезахисту як обкладення цеглою є:

- надійне блокування кліматичних впливів;

- збільшення несучої здатності для захищеного елемента конструкції;
- можливість задоволення більш жорстких вимог щодо вогнестійкості [17, 55];
- можливість забезпечення відповідного естетичного вигляду.

Разом із тим до недоліків слід віднести:

- утруднення при застосуванні згинальних елементів конструкцій;
- порівняно високі трудомісткість та вартість;
- помітне збільшення розмірів елементів конструкцій;
- додаткове механічне навантаження на підлогу.

Для здійснення ефективного вогнезахисту сталевих будівельних конструкцій використовують обетонування, що збільшує час захисної дії до R 240. Фізико-хімічні процеси у структурі бетону при його нагріванні дозволяють підвищити захисний ефект. Це можна продемонструвати на прикладі достатньо помітного ефекту випаровування вологи у внутрішніх порах бетону при його нагріванні, що дозволяє суттєво підвищити теплоізоляційну спроможність даного матеріалу. Також можна відмітити, що бетон є негорючим матеріалом і не поширює полум'я по поверхні [17, 55]. Такий спосіб використовується в основному для підсилення дефектних та ушкоджених корозією сталевих конструкцій. Серед недоліків цього способу можна виділити такі основні:

- збільшення розмірів та складності елементів будівельних конструкцій;
- необхідність використання додаткового обладнання та матеріалів для встановлення опалубки та забезпечення її доброго заповнення бетоном;
- значні площі для здійснення даної технології;
- істотна товщина обетонування [17].

Також відомі подібні вогнезахисні системи на основі облицювання плитними ніздрюватобетонними матеріалами. Головними перевагами даних вогнезахисних систем є:

- порівняно мала теплопровідність;
- порівняно велика теплоємність;

- зручність технологічного процесу формоутворення;
- порівняно висока повітро- та паропроникність;
- порівняно невелика питома вага матеріалу;
- негорючість;
- відсутність поширення полум'я поверхнею;
- довговічність;
- тривале зберігання вогнезахисної здатності [19, 20].

Ефективність використання даного матеріалу як вогнезахисного засобу підтверджується високим показником термічного опору легкого бетону. Основним недоліком при його застосуванні як вогнезахисного матеріалу є потреба випробування на вогнестійкість, оскільки при використанні спеціальних модифікаторів підвищується ризик його крихкого руйнування під впливом тиску водяної пари всередині під час випаровування вологи при нагріванні [17, 55]. Також недоліком легкого та ніздрюватого бетону є імовірність просідання і порівняно невисока міцність на стискання. Зазначених недоліків можна уникнути при правильному підбиранні модифікаторів бетону та застосування арматури [16]. Незважаючи на викладені недоліки такого способу вогнезахисту, він часто використовується для вертикальних елементів конструкцій як простий, недорогий та ефективний засіб.

Достатньо поширеним засобом для вогнезахисту сталевих конструкцій є облицювання плитними матеріалами, він має ряд позитивних особливостей, серед яких:

- відсутність технологічних процесів із застосуванням води та розчинів;
- простота заміни;
- незначна вага на конструкцію;
- можливість забезпечення порівняно високої вогнестійкості (R 60 – R 180).

У той же час можна вказати на такі недоліки:

- необхідність захисту від вологи плитних облицювальних матеріалів;

- поганий вплив на циркуляцію чистого повітря у приміщеннях;
- неможливість забезпечення будь-якої товщини шару вогнезахисту, оскільки плитні матеріали мають певну товщину;
- складність конструкцій кріпильної системи;
- порівняно висока вартість [16, 17, 55].

Основним наповнювачем плит є мінераловатні матеріали. Мінеральна вата є негорючою, стійкою до високих температур до 600 °C і вище, має добру теплоізоляційну здатність і може одночасно слугувати засобом для утеплення будинків. Мінеральну вату випускають у вигляді плитних матеріалів (матів) та рулонів, а основними її виробниками в Україні є Техноніколь, BauGut, URSA, ROCKWOOL, Knauf, ПарокІ, ZOVAT, Termolife та інші. В рулонному варіанті в основному мінеральну вату застосовують для згинальних елементів конструкцій, а у плитному варіанті їх можна використовувати для всіх типів сталевих конструкцій. При цьому можна виділити як основний матеріал кам'яну (базальтову) мінеральну вату. Для її виготовлення використовуються гірські породи. Існує менш вживаний подібний матеріал – скловата. Даний матеріал виготовляють шляхом плавлення кварцового піску або склобою. Кам'яна вата є більш вогнестійким матеріалом, з точки зору її теплопровідності, є менш шкідливою у порівнянні із скловатою. Мінеральна вата створює значно менші навантаження на конструкцію за рахунок меншої густини, що також є істотною перевагою.

Враховуючи умови експлуатації, вартість та ряд додаткових переваг дуже часто використовують вогнезахисний засіб сталевих будівельних конструкцій на основі гіпсокартонних плит. Гіпсокартон має низьку теплопровідність, тому його використовують як окремий матеріал у якості ефективного вогнезахисного засобу, так і в складі вогнезахисних систем з мінераловатними плитами або іншими теплоізоляційними матеріалами, в яких гіпсокартонні плити є огорожувальним засобом із додатковою спроможністю до теплоізоляції [21]. Перевагами використання гіпсокартонних плитних матеріалів як вогнезахисного засобу є:

- негорючість;
- порівняно невисока густина і як результат знижене навантаження на конструкції;
- порівняно невисока теплопровідність;
- є добрим звукоізоляційним матеріалом, що забезпечує мультифункціональність;
- достатня паропроникність;
- можливість їхнього комбінування з іншими вогнезахисними системами.

Проте, недоліком даного способу вогнезахисту є складний спосіб кріплення гіпсокартонних плит, а також їхня схильність до передчасного руйнування під впливом деформування балки та невисокої міцності при тепловому впливі пожежі.

1.4. Експериментальне оцінювання вогнестійкості сталевих балок.

1.4.1. Метод вогневих випробувань.

Експериментальні методи оцінювання вогнестійкості сталевих балок (відповідно до регламентованих вимог [5, 6, 32, 47, 69]) встановлюють часовий інтервал впливу високих температур зразків елементів сталевих конструкцій до фіксації граничного стану втрати несучої спроможності. Випробувальна піч є основним обладнанням для проведення оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій. В ній створюються необхідні умови, які відтворюють впливи на елементи конструкцій при пожежі, такі як тепловий вплив за стандартним температурним режимом, надлишковий тиск та механічне навантаження за рахунок відповідного обладнання.

Для здійснення вогневих випробувань [5, 6] сталевих балок застосовуються вогневі печі, що реалізують нагрів зразку з трьох боків. Конструкція випробувальної печі дає змогу розмістити та закріпити в ній

зразки, конструкція і розміри яких відповідають проектним даним. Якщо розмістити зразки повного розміру неможливо, допускається проведення експерименту з випробуванням фрагментів елементів конструкцій, які мають мінімальну довжину не менше 4 м із прикладанням відповідного механічного навантаження, для зразків до яких не прикладається навантаження їхня довжина повинна бути не меншою за 1 м.

Температурний режим випробувальної печі обумовлюється виконанням умов забезпечення теплового режиму випробувань, що досягається шляхом улаштування конструктивної теплоізоляції огороження вогневої камери печі при використанні футеровки з вогнетривких теплоізоляційних матеріалів. Тепловий опір огороження печі визначається за формулою (1.7):

$$\sqrt{\lambda \rho c} = 500 \text{ Вт с}^{1/2} \text{ м}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{С}^{-1}, \quad (1.7),$$

де: λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу огороження, Вт/м×С;

ρ – густина матеріалу огороження печі, кг/м³;

c – питома теплоємність матеріалу огороження печі, Дж /кг °С .

При згоранні рідкого палива і утворенні факелу полум'я, яке не повинно дотикатися до поверхні зразка для випробувань, відбувається нагрівання простору всередині вогневої камери за стандартним температурним режимом пожежі. Температура має розподілятися рівномірно у просторі вогневої камери печі.

Температурні показники стандартної температурної кривої режиму пожежі обчислені за формулою (1.4) та наведені у таблиці 1.3 [5, 6].

Таблиця 1.3.

Числові значення температурних показників середньої температури у камері печі за стандартним температурним режимом пожежі.

Час перебігу пожежі t , хв	Середня температура у камері печі θ_p , °С
0	20
6	603.118
12	705.436

Продовження табл. 1.3

16	748.153
32	851.427
44	898.982
61	947.812
89	1004.316
119	1047.787
149	1081.441
179	1108.905
239	1152.192
359	1213.126

Протягом здійснення вогневих випробувань згинальних конструкцій, (наприклад балок, ферм), повинні враховуватись вимоги [5, 6, 69] щодо відтворення механічного навантаження на зразки. При цьому повна площа контакту досліджуваного зразка з навантажувальними тягарями і обладнанням не повинна бути більша за 10%.

Бетонні блоки використовуються як тягарі для відтворення механічного навантаження. Тягарі встановлюються на сталеві балки та фіксують дане навантаження в незмінному положенні протягом процесу випробування, незалежно від переміщень зразка, до фіксації втрати несучої здатності досліджуваним зразком.

Є можливим здійснення випробування зразків сталевих балок з вогнезахисними засобами без прикладання навантаження. Конструкція зразків для випробування сталевих балок має відповідати вимогам державного стандарту [6]. Даним стандартом встановлено у якості основного показника, що фіксує настання граничного стану втрати несучої здатності в сталевих балках, критичної проектної температури. Для певного елемента даної сталевий конструкції критична проектна температура обчислюється з використанням настанов стандартів [5, 6].

Балка фіксується відповідно до проектного технічного регламенту у вогневій камері. Елемент конструкції встановлюється на вертикальні опори, що є огороженням печі, у спосіб вільного спирання. Приклад шарнірного

спирання навантажених балок на огорожувальні стінки вогневої печі показано на рис.1.9.



а.



б.

Рис. 1.9. Процес випробування сталевих балок із вогнезахисним покриттям із механічним навантаженням: а – зразки балок для вогневих випробувань до початку випробувань, б – зразки балок для вогневих випробувань після проведення випробувань.

Краї випробовуваного зразка, які виступають за межі вогневої камери, ізолюють за допомогою шару мінераловати середньою густиною $90-150 \text{ кг/м}^3$ завтовшки $100 \text{ мм} \pm 10 \text{ мм}$ для зменшення теплових втрат.

На рис. 1.10. представлена схема розміщення та закріплення випробовуваного зразка конструктивного елементу на стінках вогневої печі [5, 6]:

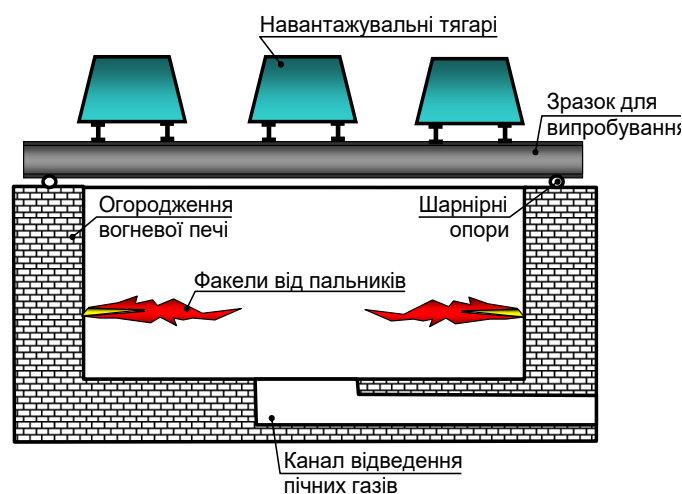


Рис. 1.10. Схема установки для проведення випробувань на вогнестійкість горизонтальних елементів будівельних конструкцій.

При проведенні вогневих випробувань важливою складовою є контрольно-вимірювальні прилади, вони розділяються на дві групи.

Першу групу складають прилади, які вимірюють температуру у певних точках простору вогневої печі, всередині зразка, на поверхні, яка не обігрівається та оточуючого навколишнього середовища. Дозволений діапазон, в якому має бути похибка термопар становить $\pm 4-15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Друга група приладів призначена для вимірювань:

- надлишкового тиску в камері печі (допустима похибка до $\pm 2\text{ Па}$);
- навантаження на зразок – середня похибка не більше $\pm 5\text{ \%}$ (динамометричне обладнання);
- деформаційних показників – середня похибка не більше $\pm 2\text{ мм}$ (сталева лінійка або лазерний дальномір).

Підготовчий етап процесу випробування здійснюється не раніше ніж за 15 хв до початку. Даний процес включає закріплення зразка та прикладення навантаження. У початковій фазі встановлюються початкові температурні показники на всіх термопарах та вимірюється температура і вологість навколишнього середовища в приміщенні, де розташована випробувальна піч, поточні показники деформації в умовах дії прикладеного навантаження сталевій балки. Момент включення пальників фіксується як початок випробування. На протязі всього процесу необхідно фіксувати значення показників всіх вимірювальних приладів, через проміжок часу не менше за 1 хвилину.

Показник надлишкового тиску всередині вогневої печі починає вимірюватися на відстані 100 мм від обігрівальної поверхні зразка горизонтальної конструкції через 5 хв після початку випробування і в момент завершення випробувань має бути рівним $(10\pm 2)\text{ Па}$. [5, 6].

Вимірювання переміщень зразків згинальних конструкцій у результаті їхньої деформації виконуються поблизу геометричного центру даного елемента, а також у місцях, де очікується поява найбільших його деформацій.

Візуально перебіг випробування фіксуються за допомогою засобів фото- та відеозйомки.

Коли спостерігається руйнування та обвалення досліджуваного зразка або досягається гранична величина прогину даного зразка, що є свідченням появи граничного стану втрати його несучої здатності, процес випробування закінчується. При першому варіанті момент часу обвалення конструкції є моментом часу припинення процесу випробування [5, 6, 32, 47, 69]. Момент припинення досліджень при досягненні граничних значень деформації досліджуваних зразків визначається за граничною величиною максимального прогину та величиною швидкості його нарощування. Зазначені граничні величини обчислюється за формулами (1.8) та (1.9):

$$D = L^2 [400b]^{-1} \quad (1.8)$$

$$dD/dt = L^2 [900b]^{-1} \quad (1.9)$$

де: D – гранична величина максимального прогину зразка для випробувань, мм;

L – величина прольоту досліджуваного зразка балки, мм;

b – висота перерізу досліджуваного зразка балки, мм.

При значенні максимального прогину зразка балки не більше за $L/30$, за граничну деформацію приймається тільки граничне значення максимального прогину.

Під проведення вогневих випробувань зразків сталевих балок з вогнезахисними покриттями, що піддаються випробуванням без прикладення механічного навантаження, зафіксоване переважання значення середньої температури зразка по відношенню до його початкової температури на 480°C є ознакою настання граничного стану втрати несучої здатності.

1.4.2. Експериментальні методи дослідження вогнезахисної здатності вогнезахисту сталевих балок.

Вогневі випробування сталевих балок із вогнезахистом відбуваються відповідно до настанов стандарту [6], але при застосуванні вогнезахисних

покривтів (нанесення фарб, обмазок та штукатурок), а також облицювань, які призначені для підвищення межі вогнестійкості до встановленого класу вогнестійкості сталевій балки, застосовують настанови стандарту [6]. Залежність його мінімальної товщини від коефіцієнта перерізу профілю сталевій балки та забезпечувана цим нормована межа вогнестійкості – є головним показником вогнезахисної спроможності вогнезахисного покриття досліджуваного зразка сталевій балки (згідно із рекомендаціями [6]).

Вогнезахисні облицювання розрізняються за площею поперечного перерізу: профільні та коробчасті перерізи, що показані на рис.1.11.

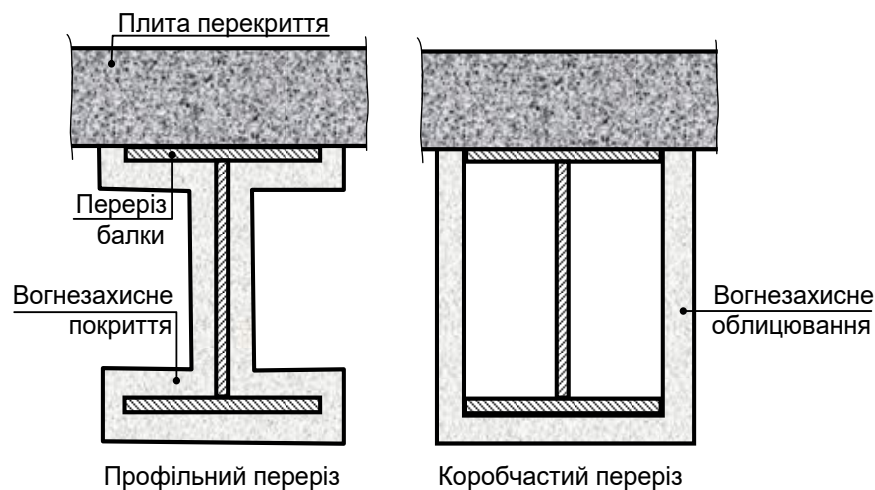


Рис. 1.11. Схема конструкції перерізів сталевій балки з вогнезахисними засобами, що обігривається з трьох сторін.

Коефіцієнт перерізу сталевій балки із вогнезахисним облицюванням розраховується за виразом (1.10). Значення коефіцієнту перерізу враховується для підбирання товщини вогнезахисного облицювання.

$$A/V_m = \frac{\text{периметр} \cdot \text{поперечного} \cdot \text{перерізу}}{\text{площа} \cdot \text{поперечного} \cdot \text{перерізу}}. \quad (1.10)$$

Для балок, які піддаються випробуванням з прикладанням механічного навантаження встановлюється схема температурних датчиків:

- з 8 термопар, розташованих у вогневій камері печі вздовж зразка сталевोї балки на відстані $1/5$, $2/5$, $3/5$ і $4/5$, симетрично на відстані 90-110 мм від поверхні досліджуваної балки;

- з 30 термопар, розташованих безпосередньо на поверхні профілю сталевोї балки на відстані $1/4$, $3/8$, $1/2$, $5/8$, $3/4$ по довжині зразка з протилежних сторін стінки балки з боку вогневого впливу. Від місць прикладення навантаження термопар розташовуються на відстані, не меншій за 150 мм від елементів жорсткості (див. рис. 1.12);

- з 12 термопар, розташованих на верхній поверхні нижнього фланця балки, по одній посередині між основними термопарами та по одній посередині відстані між крайніми основними термопарами і центрами опор балок [6].

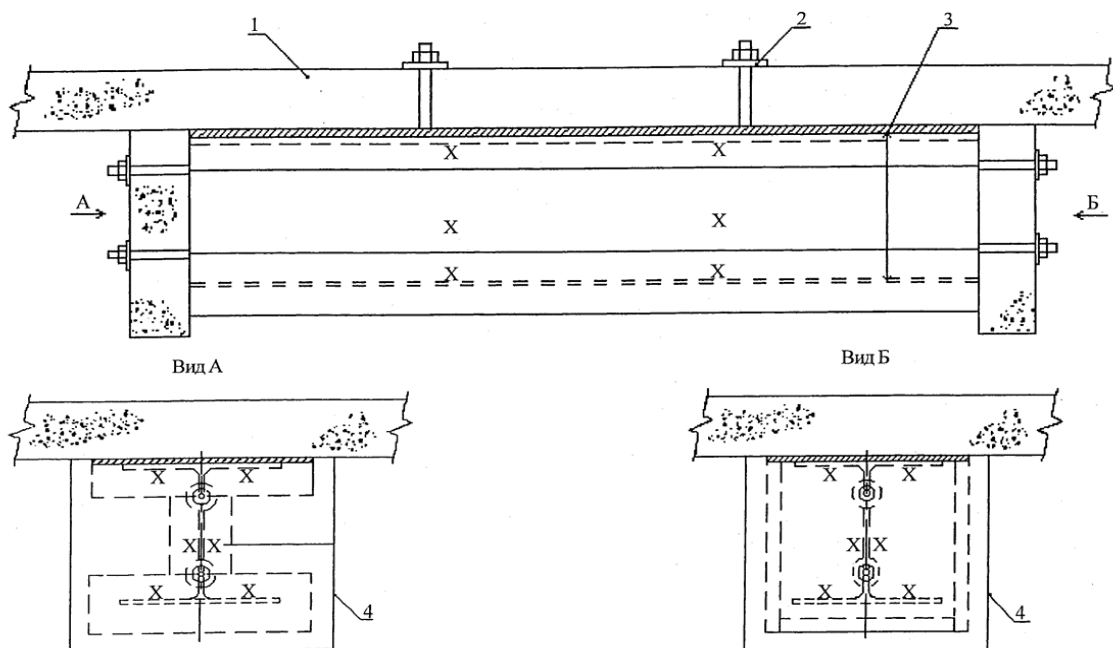


Рис. 1.12. Схема розташування термопар на зразку сталевої балки при її випробуванні на вогнестійкість без прикладення навантаження: 1 – верхнє огородження печі, 2 – елементи для фіксації балки, 3 – зразок сталевої балки для випробування на вогнестійкість, 4 – теплова ізоляція на краях балки; × – вимірювальний спай термопар (Вид А – зразок сталевої балки з профільним перерізом, Вид Б – зразок сталевої балки з коробчастим перерізом).

Для сталевих балок, які піддаються випробуванням з прикладанням механічного навантаження встановлюються такі вимірювальні схеми розташування:

- з 8 термопар, розташованих у вогневій камері печі вздовж зразка сталеві балки на відстані $1/5$, $2/5$, $3/5$ і $4/5$, симетрично на відстані 90-110 мм від поверхні досліджуваної балки;

- з 30 термопар, розташованих безпосередньо на поверхні профілю сталеві балки на відстані $1/4$, $3/8$, $1/2$, $5/8$, $3/4$ по довжині зразка з протилежних сторін стінки балки з боку вогневого впливу. Від місць прикладення навантаження термопар розташовуються на відстані, не меншій за 150 мм від елементів жорсткості (див. рис. 1.13);

- з 12 термопар, розташованих на верхній поверхні нижнього фланця балки, по одній посередині між основними термопарами та по одній посередині відстані між крайніми основними термопарами і центрами опор балок [6].

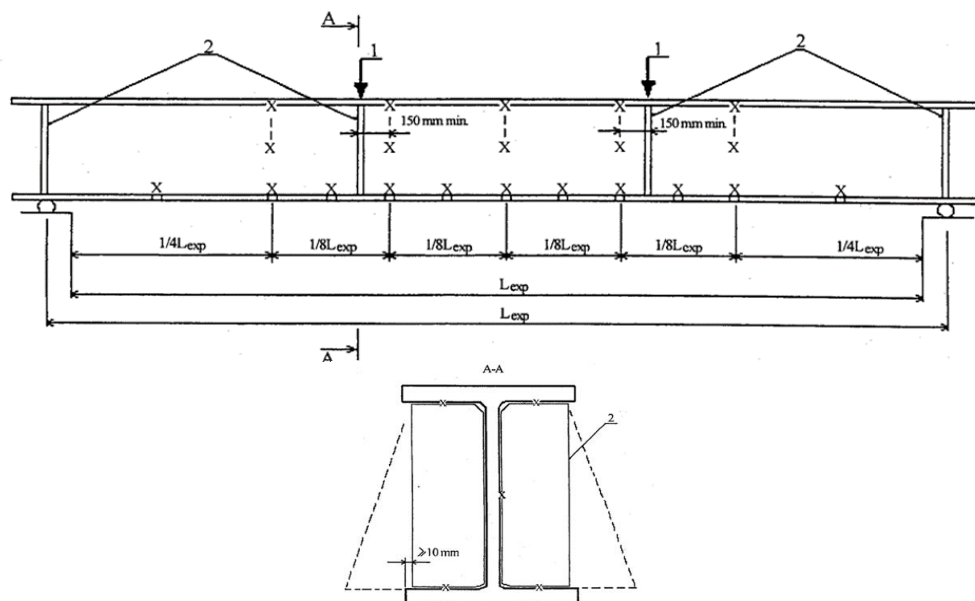


Рис. 1.13. Схема розміщення термопар на зразку сталеві балки при її випробуванні на вогнестійкість із прикладанням механічного навантаження: 1 – прикладене навантаження, 2 –ребра жорсткості виготовлені із сталевих пластин, x – вимірювальний спай термопарі (А-А – поперечний переріз зразка сталеві балки з різними варіантами улаштування ребер жорсткості).

Основні етапи проведення випробування, спосіб та частота фіксації показників температурних вимірювань здійснюються згідно із [5, 6, 32, 47, 69]. Контроль і реєстрація температури в печі проводиться 1 раз на хвилину за усіма показниками термопар.

Досягнення критичної проектної температури від 350 °C до 750 °C є ознакою настання граничного стану втрати несучої здатності для сталевих балок з вогнезахисним покриттям чи облицюванням, що піддаються вогневим експериментальним випробуванням без прикладання навантаження. За показниками трьох термопар, що розташовані у центрі прольоту балки та на відстані 300 + 25 мм від точки цього розташування [5, 6], визначається температура як їхнє середнє значення.

Коли величина температури сталеві балки із прикладеним до неї навантаженням перевищує відповідну критичну проектну температуру [6], експериментальні дослідження припиняються.

Для перевірки правильності результатів дослідження зіставляють показники термопар і, якщо зняті всі вимірювані дані з мінімальної допустимої кількості термопар, що встановлені за прийнятими схемами на зразку сталеві балки (табл. 1.4), то цього вже достатньо для проведення подальшого аналізу випробування.

Таблиця 1.4.

Відомості щодо мінімально допустимої кількості контрольних точок встановлення температурних датчиків при випробуваннях сталевих балок на вогнестійкість

Місце розташування контрольної точки встановлення термопар на балці	Навантажена балка		Ненавантажена балка	
	Мінімальна кількість контрольних точок встановлення термопар на балці	Загальна кількість контрольних точок встановлення термопар на балці	Мінімальна кількість контрольних точок встановлення термопар на балці	Загальна кількість контрольних точок встановлення термопар у балці
Верхня частина балки	2	4	6	10

Продовження табл. 1.4.

Всередині на стінці перерізу	2	4	3	5
На нижній частині балці	2	4	12	16

Визначення та врахування коригувальних коефіцієнтів, що є залежними від усереднених показників температури зразків сталевих балок для випробування, рівня їхнього механічного навантаження є неодмінним при проведенні аналізу.

Узагальнення та аналіз вимірювань усереднених показників температури у просторі печі, температурних показників термопар, встановлених на поверхні зразка сталеві балки та переміщень при їхній деформації подаються у вигляді таблиці і графіку.

Поетапно здійснюється оцінка характеристик вогнезахисного засобу сталевих балок. Початковим етапом є розв'язання диференційного рівняння або проведення методу числової регресії даних випробувань, для яких необхідна мінімальна кількість точок для інтерполяції [6].

1.5. Висновки до розділу.

У ході проведення аналізу показано, що використання вогнезахисту на основі гіпсокартонного облицювання має суттєву перспективу для приведення у відповідність до вимог щодо вогнестійкості для сталевих балок, однак суттєвою перешкодою для його більшого поширення є обмежені дані щодо характеристик теплофізичних властивостей гіпсокартонного вогнезахисного облицювання. Також, істотною перешкодою для повсюдного поширення даного типу вогнезахисту є недостатність відомостей щодо умов появи наскрізних дефектів та тріщин у гіпсокартонному вогнезахисному облицюванні і, як результат цього, втрата його вогнезахисної здатності. Зважаючи на викладене вище, одержання нових наукових даних про поведінку сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням в

умовах пожежі є актуальною науково-технічною задачею. Враховуючи викладене, було сформульовано мету та основні завдання досліджень.

Мета роботи полягає у розкритті закономірностей утворення наскрізних отворів у вогнезахисному гіпсокартонному облицюванні сталевих балок при його локальному руйнуванні внаслідок пожежі і пов'язаної із цим втрати його вогнезахисної здатності залежно від часу перебігу пожежі як наукового підґрунтя удосконалення методу розрахункового оцінювання їхньої вогнестійкості.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано наступні **завдання:**

- здійснити аналіз статистичних показників щодо кількості та особливостей зафіксованих в Україні пожеж за останній час, а також здійснити аналіз нормативної бази, що встановлює основні вимоги щодо основних аспектів нормування вогнестійкості сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахистом;
- розробити методику виконання експериментальних досліджень сталевих балок з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням шляхом проведення вогневих випробувань з метою вивчення температурних показників їхнього нагрівання при тепловому впливі пожежі;
- розробити методику та здійснити з її використанням визначення температурних залежностей теплофізичних характеристик гіпсокартонного облицювання на основі експериментально одержаних результатів вогневих випробувань зразків, що є фрагментами сталевих конструкцій і виявити закономірності часу нагрівання до критичних температур, використовуючи отримані теплофізичні характеристики у залежності від параметрів конструкції сталевих балок;
- розробити методику математичного моделювання процесу утворення наскрізних дефектів у гіпсокартонному вогнезахисному облицюванні із можливістю порушення його цілісності в умовах теплового впливу пожежі із стандартним температурним режимом з використанням

явного методу інтегрування рівнянь динаміки сукупно із методом скінченних елементів;

- із використанням розроблених методик вивчити закономірності залежності часу утворення наскрізних дефектів, які приводять до втрати вогнезахисної здатності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання сталевих балок, від їхніх конструктивних параметрів;

- розробити методику розрахункового оцінювання вогнестійкості сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням із врахуванням можливості втрати вогнезахисної здатності при утворенні наскрізних дефектів в умовах теплового впливу пожежі із стандартним температурним режимом.

РОЗДІЛ 2.

ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ У ЗРАЗКАХ СТАЛЕВИХ БАЛОК З ВОГНЕЗАХИСНИМ ГІПСОКАРТОННИМ ОБЛИЦЮВАННЯМ ПІД ЧАС ЇХНІХ ВОГНЕВИХ ВИПРОБУВАНЬ

2.1. Експериментальне обладнання для здійснення вогневих випробувань.

Експериментальні дослідження здійснюються шляхом проведення вогневих випробувань для вивчення поширення тепла у зразках сталевих елементів з вогнезахисним гіпсокартонним облицюванням. Даний процес здійснюється відповідно [5, 6, 32, 47, 69]. Для здійснення експериментів застосована вогнева піч, що розташована на випробувальному майданчику Національного університету цивільного захисту України у районі Дахнівка м. Черкаси. Параметри вимірювального обладнання для вогневих випробувань наведені у табл. 2.1.

Також на рис. 2.1. та рис. 2.2. представлені фотографії, на яких показаний зовнішній вигляд та конструктивна схема випробувальної установки на основі вогневої печі зі схемою розташування випробувальних зразків та вимірювальної арматури для визначення показників температури повітря у камері вогневої печі. Зазначена вогнева піч встановлена на відкритому повітрі, при цьому випробування мають проводитися влітку для забезпечення того, щоб максимальна зміна температурних показників у повітряному просторі була не більше 10 °С, у порівнянні з усередненими значеннями температури. Проведення випробування може бути здійснене, коли температура навколишнього середовища становить у діапазоні від 6 °С до 40 °С і вологості повітря у діапазон від 46 до 75 %.

На рис. 2.1. також подана система нагрівання простору камері печі за допомогою газових пальників. Газ подається до пальників через систему

трубок від газових балонів через редуктор, що дозволяє регулювати подачу газу у факел, змінюючи його потужність. Пальники встановлюються у каналах в яких природний газ спалюється і створює факел, для забезпечення відповідного теплового впливу шляхом підвищення температури всередині простору вогневої печі випробувальної установки.

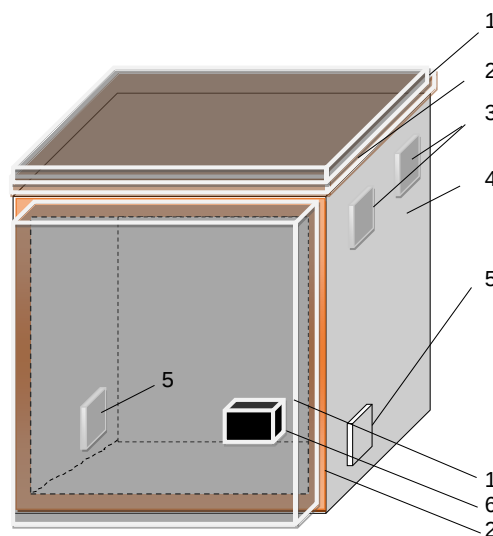


Рис. 2.1. Конструкція та схема випробувальної установки на основі вогневої печі: 1 – верхня огорожувальна система вогневої печі установки; 2 – ущільнювач з мінераловатної плити та вогнетривкового шнура; 3 – газові пальники, що забезпечують відповідний температурний режим пожежі у камері печі; 4 – огорожувальні стінки печі; 5 – нагрівальні канали для пальників, які не використовуються; 6 – отвір для виходу пічних газів.

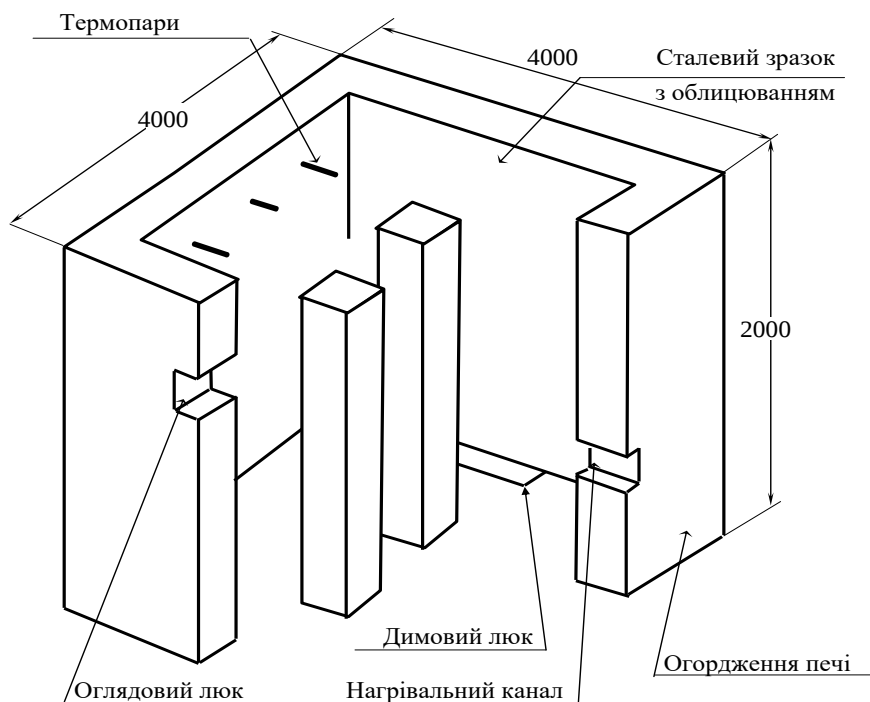


Рис. 2.2. Конструктивна схема вогневої печі із внутрішніми елементами.

Таблиця 2.1.

Вимірювальні засоби та прилади для здійснення випробування

№ з/п	Вимірювальний засіб	Кільк.	Особливості використання та інтервал шкал	Показники щодо точності вимірювань
1.	Термопари з хромель-алюмелевим спаєм	25 од.	фіксація температури у просторі печі та у зразку (діапазон вимірювання від 0 до 1300°C)	$\pm 0,0075 \times \theta_{\text{вим.}} \text{ } ^\circ\text{C}$
2.	Психрометр МВ-4М	1 од.	від 11 до 100 % до 51°C	$\pm 3\%$ $\pm 0,2^\circ\text{C}$
3.	Комплекс для фіксації температури	1 од.	діапазон вимірювання від 0 до 1300°C та до 180 хв	$\pm (0,5 + 0,0009T)^\circ\text{C}$ $\pm 1 \text{ с}$
4.	Хронометр цифровий	1 од.	від 0 до 60 с від 0 до 180 хв	$\pm 0,4 \text{ с}$ $\pm 1 \text{ с}$
5.	Штангенциркуль	1 од.	від 0 до 250 мм	ціна под.. 0,05 мм
6.	Лінійка вимірювальна металева	1 од.	до 1000 мм	$\pm 1 \text{ мм}$

Температура всередині внутрішнього простору вогневої печі фіксується промисловими термопарами із дротом вимірювального спаю типу ТХА діаметром, що не перевищує 1,5 мм, з дротами, ізолюваними за допомогою захисного кожуха, відповідно до вимог [5]. Висока точність та низька інерційність термопар забезпечується за допомогою використання спаю, розташованого на кінці дротів. При цьому зміна температури може бути зафіксована при використанні вимірювального комплексу, показаного на рис. 2.3.



Рис. 2.3. Схема підключення термопар до вимірювального комплексу.

Захисний корпус термопар видаляється на відстані більше 25 мм від вимірювального спаю. Конструкція термопар із відповідними особливостями схематично зображена на рис. 2.4.

На рис 2.4. показаний зовнішній вигляд термопар для фіксації температурних показників у внутрішньому просторі вогневої печі.

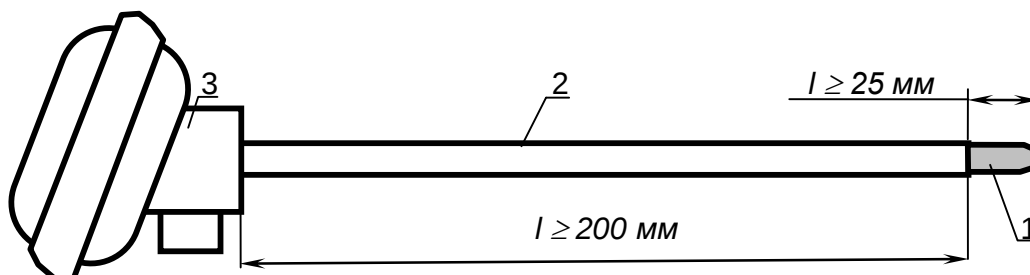
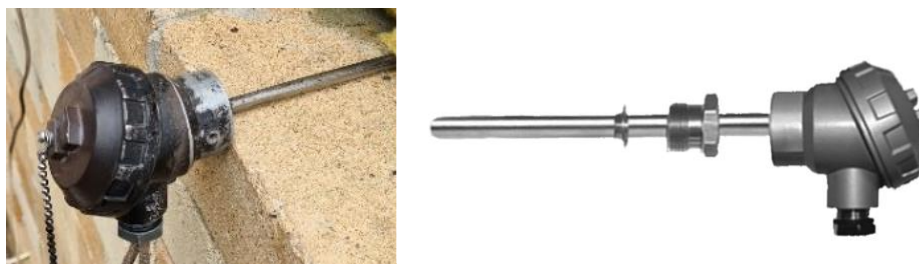


Рис. 2.4. Схема конструкції термопар для вимірювання температури у внутрішньому просторі печі при здійсненні випробувань та її зовнішній вигляд: 1 – вимірювальний спай; 2 – захисний корпус; 3 – теплоізолююча оболонка.

При контролі температур у зразках встановлюється три термопари у серединному перерізі зразка, таким чином, щоб температурно чутливий елемент термопар фіксувався на поверхні сталеві балки під облицюванням зразка [5, 6].

Температура навколишнього середовища визначалася за даними вимірювань за допомогою термопар. Вимірювальний спай даних термопар фіксується на відстані 1,5 м від огорожувальних конструкцій вогневої печі (див. рис. 2.1.).

2.2. Конструкція та методика підготовки зразків до випробування.

Згідно із рекомендаціями, що наведені у роботі [5, 6, 32, 47, 69], для здійснення випробувань зразків фрагментів балок з вогнезахисним гіпсокартонним облицюванням виготовляються два однакові зразки з

однаковими конструктивними та технологічними параметрами, висотою 1000 мм, що відповідає габаритній висоті вогневої камери печі. При врахування рекомендацій та підходів, що описані у роботах [5, 6], для здійснення вогневих випробувань було зроблено 3 пари зразків фрагментів сталевих балок. Для виготовлення зразків використовується двотавровий переріз, відповідний до профілю № 20, із геометричними параметрами згідно із ДСТУ 8768:2018, для яких приведена товщина перерізу становить 3,4 мм. Ширина полки двотаврового перерізу зразка становить 100 мм, а висота двотаврового перерізу між становить 200 мм. Довжина зразка становить 950 мм. На рис. 2.5. показані конструктивні схеми перерізів зразків, які піддаються випробуванням.

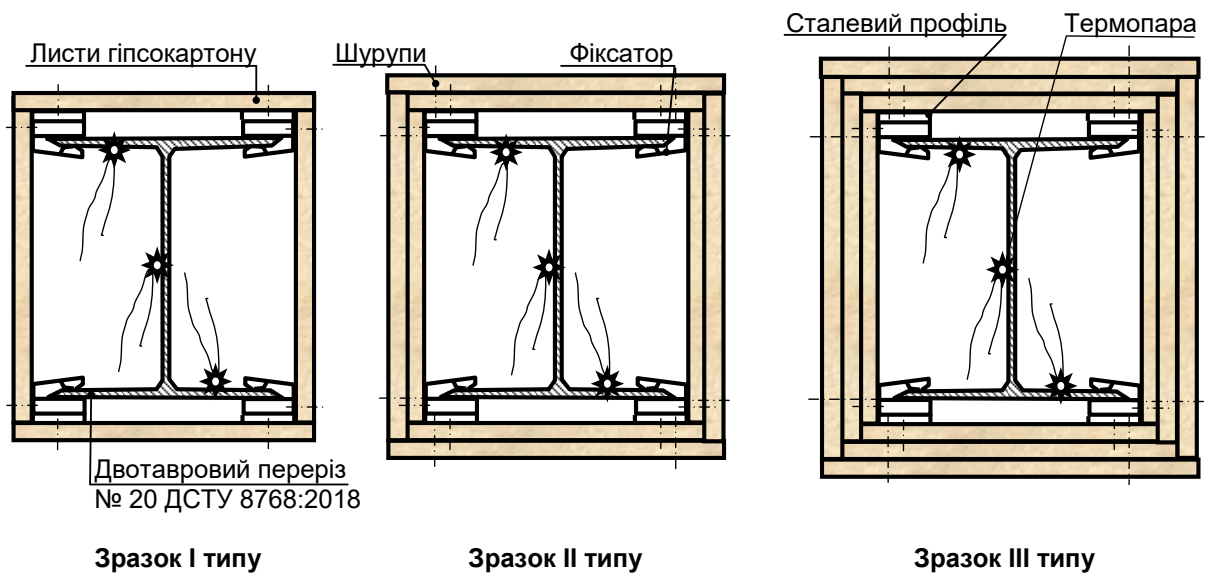


Рис. 2.5. Конструкція перерізів зразків, що піддаються випробуванням.

Для вивчення властивостей гіпсокартонних плит в умовах нагріву було передбачено вогнезахисне облицювання, виготовлене з вогнестійких гіпсокартонних плит виробництва фірми «KNAUF (Україна)», розмірами 1200×2500 мм, товщиною 12.5 мм, виготовлених за вимогами ТУУ Ст. 2.7 24577862.001 98. Згідно із даними вимогами, гіпсокартонні плити складаються з двох шарів спеціального картону із осердям з гіпсового теста. Застосовуються армувальні добавки. Бічні кромки листів завальцьовуються

краями лицьового шару картону. За технологією, після твердіння гіпсу відбувається розрізання листа на окремі плити. Фінішною обробкою гіпсокартонних плит є їхнє сушіння, маркування, укладка та упаковка. Для формування осердя використовується гіпсове в'язуче маркування Г4 згідно із ДСТУ Б В 2.7 82 99. Сталеві зразки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням мають три модифікації: одно-, дво- та трьохшарове виконання. Для фіксації гіпсокартонного облицювання на сталевому зразку були використані комплекти кріпильних деталей та сталевий профіль ПП 60/27 виробництва фірми «KNAUF (Україна)» таблиця 2.2.

Таблиця 2.2.

Параметри конструктивних даних гіпсокартонного вогнезахисного облицювання зразків для випробування

Профіль зразка	Довжина зразка, l , м	Зведена товщина перерізу зразка, δ , мм	Зведена товщина коробчастого перерізу, δ_k , мм	Коефіцієнт коробчастого перерізу A_{st}/V , m^{-1}	Густина плит, kg/m^3	Товщина облицювання d , мм	№ зразка
№20	0.95	3,4	4,5	222,2	950	12,5	1
№20	0.95	3,4	4,5	222,2	950	12,5	2
№20	0.95	3,4	4,5	222,2	950	25	3
№20	0.95	3,4	4,5	222,2	950	25	4
№20	0.95	3,4	4,5	222,2	950	37,5	5
№20	0.95	3,4	4,5	222,2	950	37,5	6

Виготовлення та підготовка сталевих зразків для проведення вогневих випробувань відбувалось послідовно [5, 6, 32, 47, 69]. У першу чергу було підготовлено базу початкових даних, що включала основні конструктивні характеристики профілю та вогнезахисного облицювання. Відповідно до цього було здійснено різання гіпсокартонної плити та допоміжних матеріалів для їхньої фіксації, що включають сталевий профіль ПП 60/27. Після цього було підготовлено набір кріпильних деталей у вигляді фіксаторів та шурупів.

Також, на цьому етапі було здійснено розрізання сталевого двотаврового профілю. На наступному етапі було здійснено складання зразку шляхом закріплення на ньому кріпильних деталей. На наступній стадії порізані частини облицювання піддавалися складуванню та кондиціюванню протягом 28 діб. Основні стадії виготовлення зразка показані на рис. 2.6.

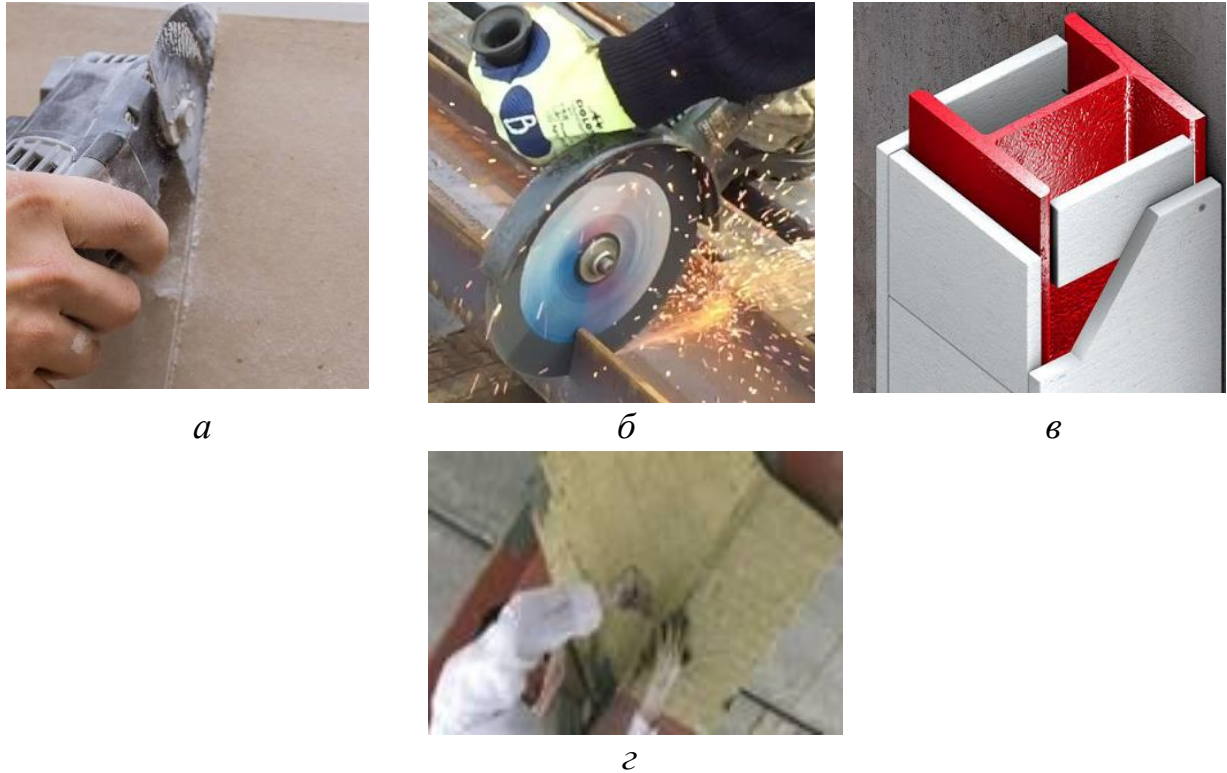


Рис. 2.6. Стадії виготовлення та підготовки зразків сталевих балок та їхнього облицювання для здійснення вогневих випробувань. *а* – порізка гіпсокартонних плит у відповідності із конструктивними вимогами; *б* – порізка сталевого двотаврового профілю; *в* – складання гіпсокартонного вогнезахисного облицювання; *г* – улаштування кріплення гіпсокартонного облицювання за допомогою деталей системи закріплення.

У процесі складання зразків, перед закріпленням облицювання, були розміщені та зафіксовані термопари у відповідних місцях зразків, у центрі стінок двотаврового перерізу і у внутрішньому просторі коробчастої структури облицювання посередині полук двотаврових перерізів. Описана система показана на рис. 2.7. і у відповідності до рекомендацій робіт [6].

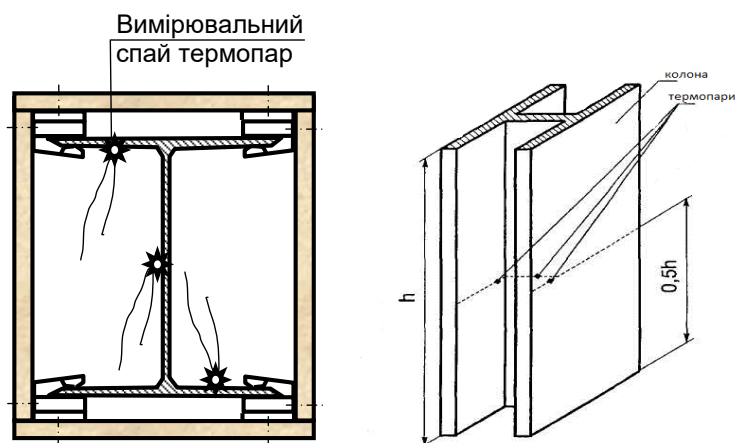


Рис. 2.7. Схема розташування термопар у місцях для вимірювання температури у зразках фрагменту сталевій балки з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням коробчастого перерізу.

Останнім етапом після фіксування термопар у відповідних контрольних положеннях було закріплення гіпсокартонного вогнезахисного облицювання до сталевому профілю, що з'єднувався із фрагментом сталевій балки за допомогою фіксаторів, як зображено на рис. 2.5. Закріплення виконувалося за допомогою шурупів, що наведено на рис. 2.5. Крок шурупів становив 300 мм, як це встановлюється у рекомендаціях [5, 6, 32, 47, 69].

Для вимірювання показників температури при нагріванні окремих елементів конструкції сталевій балки із вогнезахисним гіпсокартонним облицюванням у встановленому інтервалі величин товщини облицювання дозволяється фіксація відхилення цих значень до $\pm 5\%$. Різниця між показниками товщини зразків із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням може виникнути у результаті допущених неточностей при складанні даних зразків, при розрізанні гіпсокартонних листів і неточністю монтажних робіт. У даному випадку зафіксовані відхилення є допустимими, оскільки вони не перевищують 5% за результатами контрольних вимірювань.

Відповідно до [5, 6] торці по краях зразка повинні бути захищеними від нагрівання для усунення впливу на показники вимірювання крайових ефектів. Дана технічна вимога була реалізована при виготовленні зразка. Для

цього по краях зразка було встановлено теплоізоляційне ущільнення, що виготовлено з гіпсокартонних плит товщиною 12.5 мм.

2.3. Методика здійснення вогневих випробувань зразків сталевих балок.

2.3.1. Методика улаштування зразків фрагментів сталевих балок та відповідного обладнання до проведення випробувань.

Після виготовлення та підготовчого етапу випробування зразки сталевих балок із улаштованою теплоізоляцією по краях розташовуються у внутрішньому просторі печі. Улаштування зразків виконується при фіксуванні нижнього кінця зразка за допомогою сталевих кронштейнів, як це зображено на фотографіях (див. рис. 2.8.).

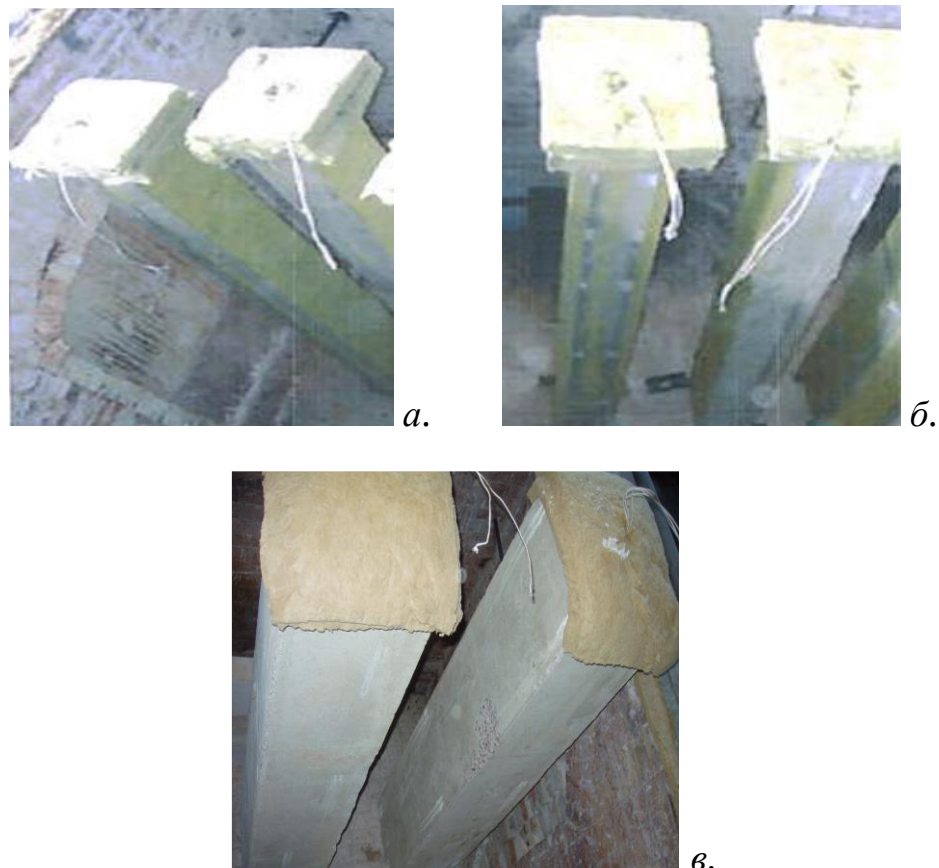


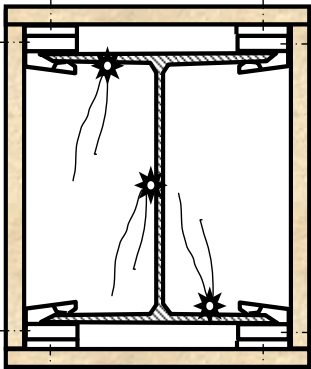
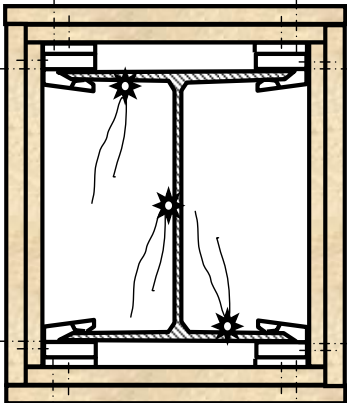
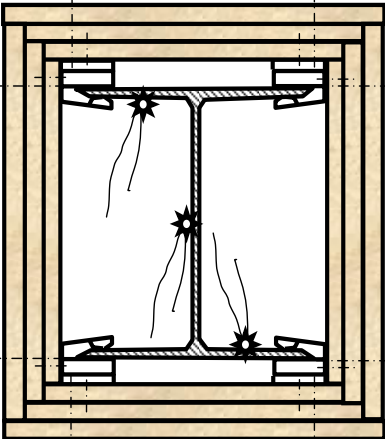
Рис. 2.8. Улаштування зразків сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням до проведення випробувань: *а* – зразки №1 та №2; *б* – зразки №3 та №4; *в* – зразки №5 та №6.

Враховуючи рекомендації [6] випробування зразків сталевих балок з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням проводилося без прикладання навантаження одночасно для двох ідентичних зразків із висотою 950 мм.

За рекомендаціями у роботі [6] була дотримана мінімальна дистанція від зразка до внутрішньої поверхні стінок вогневої печі та безпосередньо між зразками, яка має бути не менше 200 мм. Габарити камери печі дають змогу випробовувати одночасно тільки 2 зразки сталевих балок, тож випробування проходило у три етапи, на кожному з яких було одночасно випробувано по два зразки одночасно. На першому етапі проведено випробування зразків № 1 та № 2, на другому випробовувалися зразки № 3 - № 4, і на третьому – зразки № 5 - № 6, як це відображено у табл. 2.3.

Таблиця 2.3.

Послідовність випробування зразків

І стадія		ІІ стадія	
№ 1 (12.5 мм)	№ 2 (12.5 мм)	№ 3 (25 мм)	№ 4 (23 мм)
ІІІ стадія			
№ 5 (37.5 мм)		№ 6 (37.5 мм)	
			
Зразки №1 та №2		Зразки №3 та №4	
		Зразки №5 та №6	

Після розташування випробувальних зразків сталевих балок у внутрішньому просторі печі та улаштування вимірювальної інфраструктури із під'єднанням відповідних приладів у внутрішньому просторі печі,

виконується улаштування відповідної теплоізоляції всіх отворів печі, окрім отвору відведення димових газів. Передуючи проведення випробування, не менш як за 5 хвилин до старту випробувань, визначаються початкові величини температури, які фіксуються на всіх вимірювальних спаях термопар всередині вогневої печі, назовні у навколишньому середовищі, де розташована випробувальна піч. Початок випробування фіксується з часу, коли вмикаються пальники вогневої печі.

2.3.2. Методика здійснення вогневих випробувань.

Для проведення випробувань всередині вогневої печі створювався стандартний температурний режим. Під час проведення випробувань вимірювання температури на всіх термopарax виконувалося з інтервалом через одну хвилину. Протягом всієї тривалості випробування вимірювалася температура у внутрішньому просторі печі у сталевих зразках із вогнезахисним облицюванням. Показник надлишкового тиску фіксувався у точці на відстані 100 мм від нижньої поверхні верхнього огородження вогневої печі. Було зафіксовано, що на 6-ій хвилині випробувань надлишковий тиск становив у середньому для всіх етапів випробування 4 Па, а з 15-ї хвилини і до припинення випробування надлишковий тиск становив у середньому 9 Па.

У початковий момент, перед випробуванням, було зафіксовано величину температури назовні та показник відносної вологості повітря оточуючого середовища. На першому етапі випробувань перших двох зразків величина температури повітря назовні становила 18 °C із вологістю 54 %, на другому етапі при випробуванні третього та четвертого зразків величина температури повітря назовні складала 20°C та вологістю 51 %, на третьому етапі при випробуванні п'ятого та шостого зразків показник температури повітря назовні становив 21°C із вологістю повітря 57 %.

Дотримуючись рекомендацій [5, 6] для зразків фрагментів сталевих

балок з вогнезахисними гіпсокартонним покриттям, підданих випробуванням без навантаження, настання граничного стану втрати вогнестійкості за втратою несучої здатності фіксується при перевищенні середньої температури зразка сталевий балки величини її початкової температури більше 480 °С.

Метод здійснення випробувань заснований на встановленні межі вогнестійкості зразка фрагменту сталевий конструкції, тобто інтервалу часу від старту проведення випробування до часу настання граничного стану втрати несучої здатності, яка визначається досягненням критичної температури нагрівання [5].

За результатами вимірювань при проведенні випробувань отримують межу вогнестійкості конструкції при використанні виразу:

$$t_{fr} = t_{mes} - \Delta t \quad (2.1)$$

де: t_{fr} - межа вогнестійкості фрагменту сталевий конструкції, хв;

t_{mes} — величина найменшого проміжку часу від початкового моменту випробування до фіксації граничного стану втрати вогнестійкості, отриманого за результатами вогневих випробувань однакових зразків, хв;

Δt — похибка під час випробувань, хв.

Згідно із [5] величина похибки Δt одержується з використанням формули:

$$\Delta t = 0.015 t_{mes} + 3 \quad (2.2)$$

Проте, на виконання умов, наведених у [5], величина похибки обчислюється для проміжку часу від 0 до t_{mes} . При цьому обчислюється інтегральний параметр A_f середньої величини температури θ_f у внутрішньому просторі вогневої печі впродовж випробування при використанні виразу:

$$A_f = 0.5 \sum_{i=1}^n (\theta_{fi} + \theta_{fi-1})(t_i - t_{i-1}), \quad (2.3)$$

де: θ_{fi} – величина середньої температури у внутрішньому просторі печі, відповідна часу t_i , °C;

t_i – інтервал часу i -го етапу вимірювання середньої температури у внутрішньому просторі печі;

i – номер етапу вимірювання величини середньої температури (еквівалентний часу t_i , при проведенні фіксації температури через 1 хв);

n – номер кінцевого етапу вимірювання при $t_i = t_{mes}$.

Таким самим способом для проміжку часу від 0 до t_{mes} розраховують інтегральну величину A_s для стандартного температурного режиму θ_s за виразом:

$$A_s = 0.5 \sum_{i=1}^n (\theta_{si} + \theta_{si-1})(t_i - t_{i-1}), \quad (2.4)$$

де: θ_{si} величина температури згідно із стандартним температурним режимом, відповідне часу t_i , °C.

Методика обчислення величини температури θ_s у залежності від часу описана в [6].

- При $A_f \geq A_s$ похибка приймається $\Delta t = 0$.
- При $A_f < A_s$ похибка Δt розраховується при використанні формули:

$$\Delta t = (A_s - A_f)(0.015 t_{mes} + 3) (A_s - A_{min})^{-1}, \quad (2.5)$$

де: A_{min} – інтегральний параметр мінімального допустимого значення температури θ_{min} для часового проміжку від 0 до t_{mes} , °C·хв.

Параметр A_{min} розраховується за виразом, який подібний до рівнянь (2.3) та (2.4):

$$A_{min} = 0.5 \sum_{i=1}^n (\theta_{min i} + \theta_{min i-1})(t_i - t_{i-1}) \quad (2.6)$$

де: $\theta_{\min i}$ - величина нижньої границі температури $\theta_{\min}$, відповідна поточному значенню часу t_i , °C.

Значення мінімально допустимої температури $\theta_{\min}$ розраховується за виразом:

$$\theta_{\min} = (1 - 0.01 \cdot |d|) \cdot \theta \quad (2.7)$$

де: d – допустимий відхил значення середньої температури у внутрішньому просторі печі від величини температури θ_s , %.

Умови настання граничного стану втрати вогнестійкості сталевих конструкцій за деформаціями надано у роботі [5] і для зразків сталевих конструкцій, що піддаються випробуванням вони описуються виразами (2.8) та (2.9):

$$C = 0.01 \cdot h \quad (2.8)$$

де: C – найбільша допустима величина поздовжнього переміщення зразка сталевих елементів конструкції, мм;

h – висота зразка, мм.

Величина швидкості збільшення деформації зразка, підданого випробуванням обчислюється за виразом:

$$dC/dt = 0.003h. \quad (2.9)$$

Для інтерпретації результатів вимірювань температури під час проведення дослідів щодо вогневих випробувань сталевих конструкцій з вогнезахисним гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням згідно із рекомендаціями [6] можна скористатися декількома методами на основі обчислень з використанням диференціального нестационарного рівняння теплопровідності із постійними або змінними величинами коефіцієнта

теплопровідності. Проте, можна скористатися більш простим методом на основі наближеної формули:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p}{V d_p c_a \rho_a} \cdot \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1 + \phi/3)} \cdot \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \cdot \Delta\theta_{g,t} \quad (\Delta\theta_{a,t} \geq 0 \text{ при } \Delta\theta_{g,t} > 0), \quad (2.10)$$

де: $\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} \cdot d_p A_p / V$,

A_p / V — коефіцієнт перерізу сталевій балки із вогнезахистом;

c_a — температурозалежна теплоємність сталі, Дж/(кг·°C);

$c_p = 1000$ — стала питома теплоємність гіпсокартонного вогнезахисного облицювання Дж/(кг·°C);

d_p — товщина гіпсокартонного вогнезахисного облицювання, м;

$\Delta t = 30$ — крок за часом часу (с);

$\theta_{a,t}$ — поточна температура сталевий зразок у даний момент часу t , °C;

$\theta_{g,t}$ — поточна температура повітря у приміщенні із пожежею у даний момент часу t , °C;

$\Delta\theta_{g,t}$ — прирощення поточної температури повітря у приміщенні із пожежею за інтервал часу Δt , °C;

λ_p — значення коефіцієнту теплопровідності, обчислене за його температурною залежністю у поточний момент часу, Вт/(м·°C);

$\rho_a = 7850$ — густина сталі, (кг/м³);

$\rho_p = 200$ — густина гіпсокартонного вогнезахисного облицювання, кг/м³.

Під час проведення обчислень при інтерпретації результатів вимірювань температури у зразках фрагментів сталевих балок для врахування розкиду у розподілі температурних показників були розраховані коефіцієнти коригування.

При оцінюванні параметрів вогнезахисної здатності вогнезахисного гіпсокартонного облицювання було використано середню величину температури зразка фрагменту сталевий балки із вогнезахисним облицюванням

на всіх часових проміжках, де були отримані температурні дані.

Коригувальний коефіцієнт для випробуваних зразків визначався на основі розбіжності температурних показників при врахуванні різниці товщини вогнезахисного облицювання. При цьому застосовувався такий вираз:

$$k_d(\theta) = \frac{k_{\max}(\theta) - k_{\min}(\theta)}{d_{\max} - d_{\min}} (d - d_{\min}) + k_{\min}(\theta). \quad (2.12)$$

Отриманий коригувальний коефіцієнт використовувався для обчислення уточненої середньої величини температури кожного сталевого зразка із вогнезахисним гіпсокартонним облицюванням при використанні виразу:

$$\theta_{m(SC)} = k_d(\theta) \cdot \theta_{SC} \quad (2.13)$$

де: $\theta_{m(SC)}$ – уточнена величина температури сталевого зразка із вогнезахисним гіпсокартонним облицюванням;

θ_{SC} .- середня величина температури для сталевого зразка із вогнезахисним гіпсокартонним облицюванням;

При використанні спрощеного метода визначення залежності коефіцієнта теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання від температури проводять шляхом визначення значення коефіцієнта теплопровідності, використовуючи виміряні показники на кожному кроці при проведенні вогневих випробувань. Для здійснення розрахунків за даним алгоритмом використовується формула:

$$\lambda_{p,t}(t) = \left(d_p (A_p/V)^{-1} c_a \rho_a (1 + \phi/3) \frac{1}{(\theta_t - \theta_{a,t}) \Delta t} \right) [\Delta \theta_{a,t} + (\exp(0.1\phi) - 1) \theta_t]. \quad (2.14)$$

При реалізації даного обчислювального алгоритму за формулою (2.14) середня температура у вогнезахисному гіпсокартонному облицюванні θ_p для

кожного із зразків і на кожному кроці за часом, обчислюється як середня температура обігрівної сторони облицювання та сталевго осердя всієї композиції за наступною формулою:

$$\theta_p = 0.5(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.15)$$

Отримана залежність від часу для коефіцієнта теплопровідності ставиться у відповідність до температур нагрівання вогнезахисного гіпсокартонного облицювання. Тобто як результат має бути отримана температурна залежність коефіцієнта теплопровідності $\lambda_p(\theta_p)$.

Для використання одержаної залежності коефіцієнта теплопровідності від температури шляхом усереднення значень λ_p для кожного зразка отримують набір значень λ_{pt} для табличних температур із кроком 50 °С у діапазоні від 0 до 1000 °С.

Додатковим розрахунком у даному випадку є встановлення температурного розподілення по товщині вогнезахисного гіпсокартонного покриття. При цьому має бути врахований показник втрати вологи всередині вогнезахисного облицювання, що виконується для всієї тривалості проведених вогневих випробувань. При цьому використовується формула:

$$D_p = C \cdot d_p^3 \quad (2.16)$$

$$C = (\sum_{i=1}^n D_p \cdot d_p^3) / (\sum_{i=1}^n d_p^6) \quad (2.17)$$

де: n – кількість зразків;

D_p – проміжок, відповідний ділянці зменшення вологості для кожного із зразків із вогнезахисним гіпсокартонним облицюванням, хв;

d_p – товщина вогнезахисного матеріалу на кожному із зразків із вогнезахисним гіпсокартонним облицюванням, мм.

Для обчислення проміжку ділянки зниження вологості виконують:

- розрахунок θ_a за формулою (2.10) і приводять їх до табличних значень

температур із кроком 100 °С;

- розрахунок D_p у залежності від товщини вогнезахисного облицювання d_p ;
- розрахунок θ_a за (2.10) для часового інтервалу, який становить суму $t_1 + D_p$.

На наступній стадії проводиться обчислення величини максимального часу t_{max} , при якому досягається проектна критична температура нагрівання сталевго осердя зразка від 350 °С до 750 °С через інтервал 50 °С.

Для оцінки адекватності отриманих показників у результаті проведених розрахунків визначаються критерії прийнятності:

- для кожного зразка фрагменту сталевго балки розрахункове значення часу нагрівання до проектної критичної температури, яка коригується згідно із розбіжностями температурних значень по товщині покриття, має не перевищувати 30 % розрахункового часу нагрівання до проектної критичної температури під час проведених вогневих випробувань випробувань;
- розрахована середня величина відхилень (%) часу нагрівання до проектної критичної температури для кожної зразка фрагменту сталевго балки повинно бути меншим за нуль;
- максимальне індивідуальне значення усіх розбіжностей для зразків фрагментів сталевго балки не повинен перевищувати 20 %, але при цьому не має бути меншими або рівними нулю [6].

Коли критерії прийнятності не задовольняються, вводяться коригувальні коефіцієнти, і здійснюється подальше обчислення поки не будуть досягнуті виконання умов прийнятності.

Оскільки при нагріванні вогнезахисного гіпсокартонного облицювання відбувається інтенсивне випаровування наявної у ньому води як наслідок спостерігається ділянка постійного значення температури близько 100 °С протягом певного проміжку часу. Для уникнення обчислювальних складностей дана температурна крива формалізується та згладжується, як показано на рис. 2.9.

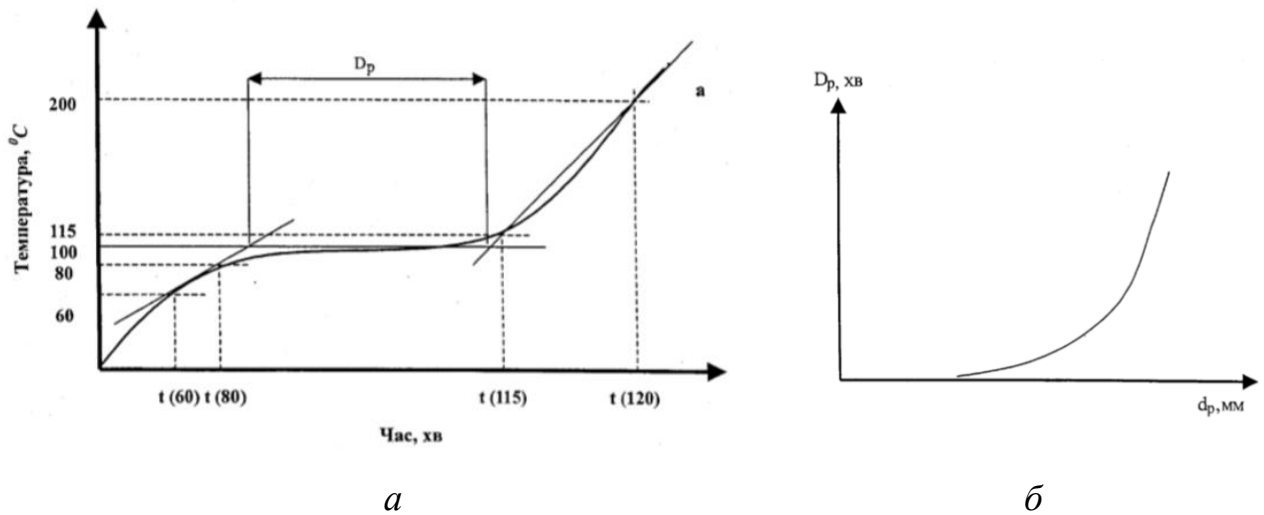


Рис. 2.9. Криві часу проміжку ізотермічної ділянки температурної кривої, яка з'являється внаслідок випаровування вологи: *а* – формалізована та згладжена температурна крива із визначеною тривалістю ізотермічної ділянки; *б* – крива залежності тривалості ізотермічної ділянки температурної кривої.

При застосуванні методу оцінювання вогнезахисної здатності покриття, заснованому на визначенні коефіцієнта теплопровідності за спрощеним підходом на основі формул (2.10) та (2.11) для всіх використаних значень $\lambda_p(\theta_p, d_p)$ приймаються усереднені значення при різних комбінаціях проектної температури сталевого осердя та товщини гіпсокартонного вогнезахисного облицювання.

Обчислені параметри теплопровідності для різних температур нагріву сталі та товщини покриття $\lambda_p(\theta_p, d_p)$, виконуються за допомогою мінімізації середньоквадратичного відхилення. Розрахунки виконуються за допомогою формули (2.18) та на основі спрощеного підходу з використанням формули (2.10).

$$\lambda = C_0 + C_1\theta_p + C_2d_p \quad (2.18)$$

де: C_0, C_1, C_2 – коефіцієнти регресії.

Після проведення розрахунків здійснюється перевірка за критеріями

прийнятності, які визначаються так само [5, 6, 32, 47, 69].

Для аналізу вогнезахисної здатності вогнезахисного облицювання був застосований метод побудування відповідної регресійної залежності. При використанні даного методу за отриманими температурними показниками, отриманими у ході проведення випробувань сталевих зразків із різною товщиною вогнезахисного облицювання виконується розрахунок констант, які під час виконання подальших обчислень дозволяють встановити час нагріву конструкції до появи ознак настання граничного стану втрати несучої здатності і, відповідно, втрати вогнестійкості для конструкцій з певними конструктивними параметрами і при різних значеннях товщини вогнезахисного облицювання.

У такому разі регресійна залежність має такий вигляд:

$$t = a_0 + a_1 d_p + a_2 \frac{d_p}{A_{iIV}} + a_3 \theta_{SC} + a_4 d_p \theta_{SC} + a_5 d_p \frac{\theta_{SC}}{A_{iIV}} + a_6 \frac{\theta_{SC}}{A_{iIV}} + a_7 \frac{1}{A_{iIV}} \quad (2.19)$$

Тут $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$ – коефіцієнти регресії, які обчислюють шляхом проведення повного факторного експерименту при використанні даних випробувань для температур від 350 °C до 750 °C через кожні 50 °C.

Одержані результати також перевіряють на виконання умов прийнятності за відповідними критеріями.

РОЗДІЛ 3.

ПРОВЕДЕННЯ ВОГНЕВИХ ВИПРОБУВАНЬ ФРАГМЕНТІВ СТАЛЕВИХ БАЛОК ІЗ ГІПСОКАРТОННИМ ВОГНЕЗАХИСНИМ ОБЛИЦЮВАННЯМ

3.1. Дані температурних вимірювань під час проведення вогневих випробувань фрагментів сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням.

За викладеними у розділі 2 дійсної роботи експериментальними методиками досліджень було виконано експериментальні випробування зразків досліджуваних сталевих балок двотаврового профілю із вогнезахисним облицюванням, що завершені при досягненні температури у сталевому осерді зразків часу 60 хв, тобто досягнення часу, що є найбільшим і відповідає найжорсткішим вимогам згідно із I ступенем вогнестійкості згідно із класифікацією за ДБН В.1.1.7:2016. При цьому вважалося, що при досягненні у сталевому осерді зразків температури 500 °С є умовою втрати вогнестійкості за граничним станом втрати несучої спроможності. Умови досягнення критичної температури 500 °С наведені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1.

Показники часу фіксації втрати вогнестійкості за граничним станом втрати несучої спроможності зразків сталевих балок

I тип зразків		III тип зразків	
№ зразка, (товщина облицювання, мм)	Час втрати несучої спроможності, хв	№ зразка, (товщина облицювання, мм)	Час втрати несучої спроможності, хв
№ 1 (12.5 мм)	42	№ 5 (37.5 мм)	--
№ 2 (12.5 мм)	41	№ 6 (37.5 мм)	--
II тип зразків			
№ 3 (25 мм)	56		
№ 4 (25 мм)	54		

Для дослідження впливу нагрівання на цілісність з'єднання гіпсокартонних плит вогнезахисного облицювання між собою було виконано візуальний огляд гіпсокартонного облицювання зразків після проведення випробувань. Вигляд зразків після проведення випробувань показано на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Вигляд зразків фрагментів сталевих балок після випробувань: *а* – зразки № 1 та № 2 (товщина облицювання 12.5 мм); *б* – зразки № 3 та № 4 (товщина облицювання 25 мм); *в* – зразки № 5 та № 6 (товщина облицювання 37.5 мм).

Згідно із даними щодо візуального огляду зразків фрагментів сталевих балок після випробувань виявлено, що на зразках №1 та № 2 повністю відсутнє вогнезахисне облицювання, тобто воно було повністю зруйновано

під впливом високотемпературного нагрівання. На зразках № 3 та № 4 залишилося гіпсокартонне вогнезахисне облицювання, проте воно було сильно ушкоджене, оскільки можна було помітити великі наскрізні ушкодження та отвори. Вогнезахисне облицювання зразків № 5 та № 6 хоча мало суттєві ушкодження, проте наскрізних ушкоджень та отворів при візуальному огляді не виявлено. Це дає підстави зазначити, що тепловий вплив пожежі негативно впливає на цілісність вогнезахисного облицювання, і, відповідно, на спроможність зберігати свою вогнезахисну здатність. Враховуючи характер ушкоджень, є логічним припустити, що руйнування вогнезахисного облицювання може призводити до передчасного досягнення критичних температур, що є причиною настання граничного стану втрати вогнестійкості за несучою здатністю під впливом нагріву, тобто втрати вогнестійкості зразків № 1 - № 4. Обстеження зовнішнього огляду випробовуваних зразків № 5 та № 6 не виявило значних руйнувань вогнезахисного облицювання, тож цим, зокрема, можна пояснити високу вогнезахисну здатність гіпсокартонного облицювання. Це може бути підтверджено даними табл. 3.1.

Аналізуючи дані щодо часу нагрівання сталевих осердя зразків № 1 - № 4 до значень критичної температури у випробованих зразках, поданих у табл. 3.1., що був встановлений із урахуванням похибки при використанні методики, наведеної у розділі 2 та рекомендаціями робіт [5, 6], критична температура 500 °C найскоріше була зафіксована на 41-й хвилині у зразку із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням 12.5 мм і найповільніше у зразку із середньою товщиною гіпсокартонного вогнезахисного облицювання 25 мм на 56 хв. За період часу випробування для зразків із вогнезахисним облицюванням 37.5 мм критична температура 500 °C зафіксована не була. Такий стан показує високу вогнезахисну здатність гіпсокартонного вогнезахисного облицювання товщиною 37.5 мм, оскільки при такій товщині облицювання досягається найбільший клас вогнестійкості сталевих балок R 60.

За результатами вимірювань температури в печі побудовані графіки середніх показників, що були розраховані за даними 6 термопар для кожного з двох заходів, що представлено на рис. 3.3. Температурні показники у просторі вогневої печі відповідають стандартному режиму пожежі при їх порівнянні з мінімальними та максимальними відхиленнями, тобто всі значення температури лежать у проміжку між $\theta_{\text{ст.мін}}$ та $\theta_{\text{ст.мах}}$. На рис. 3.2. показані графіки середніх температурних значень термопар всередині вогневої печі.

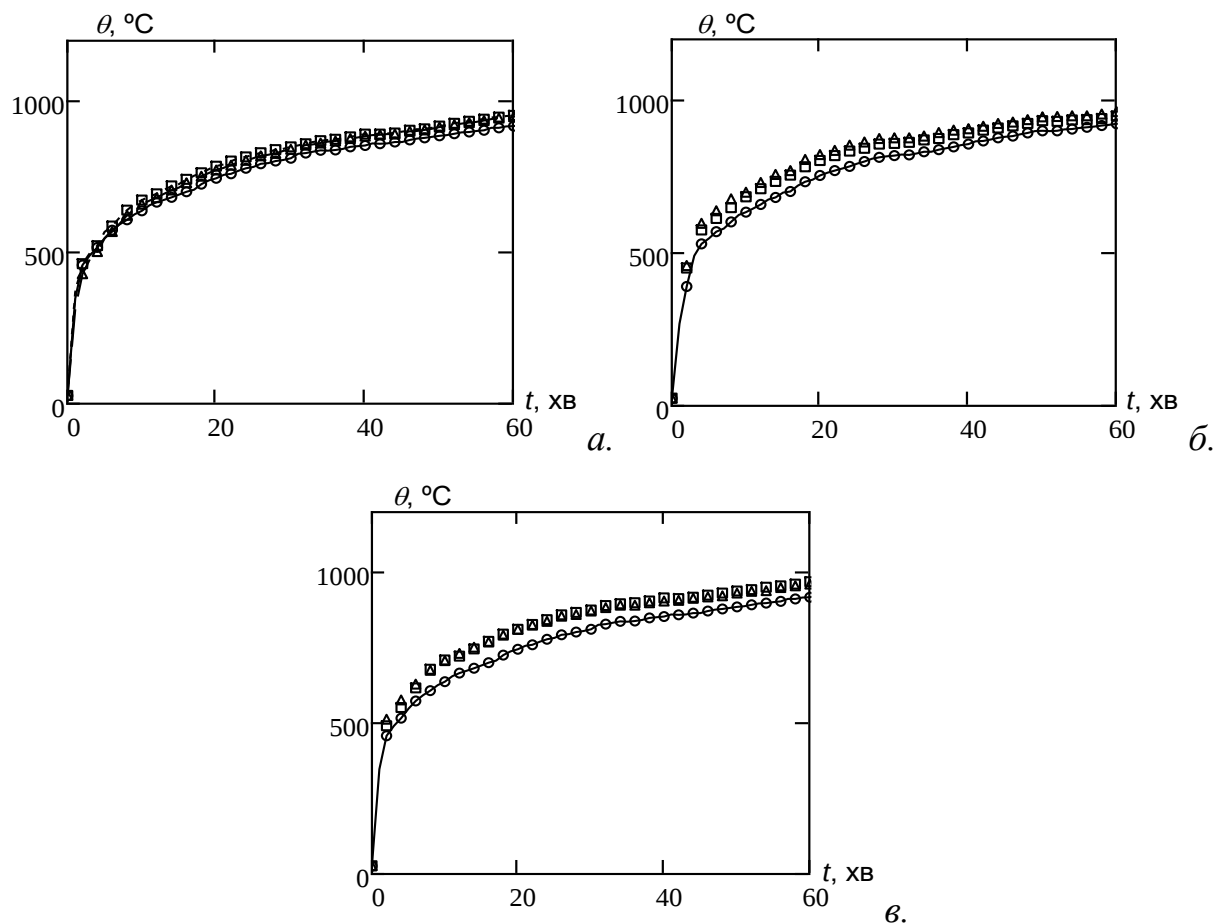


Рис. 3.2. Результати температурних вимірювань у камері вогневої печі, отриманих під час випробувань зразків фрагментів сталевих балок з вогнезахисним облицюванням (*a* – зразки № 1, № 2; *б* – зразки № 3, № 4; *в* – зразки № 5, № 6); □□□ – показники 1 термопар; ○○○ – показники 2 термопар; ▲▲▲ – показники 3 термопар.

На рис. 3.3. наведено результати встановлення збіжності показників температурних вимірювань у просторі вогневої печі під час проведення випробувань із стандартним температурним режимом пожежі.

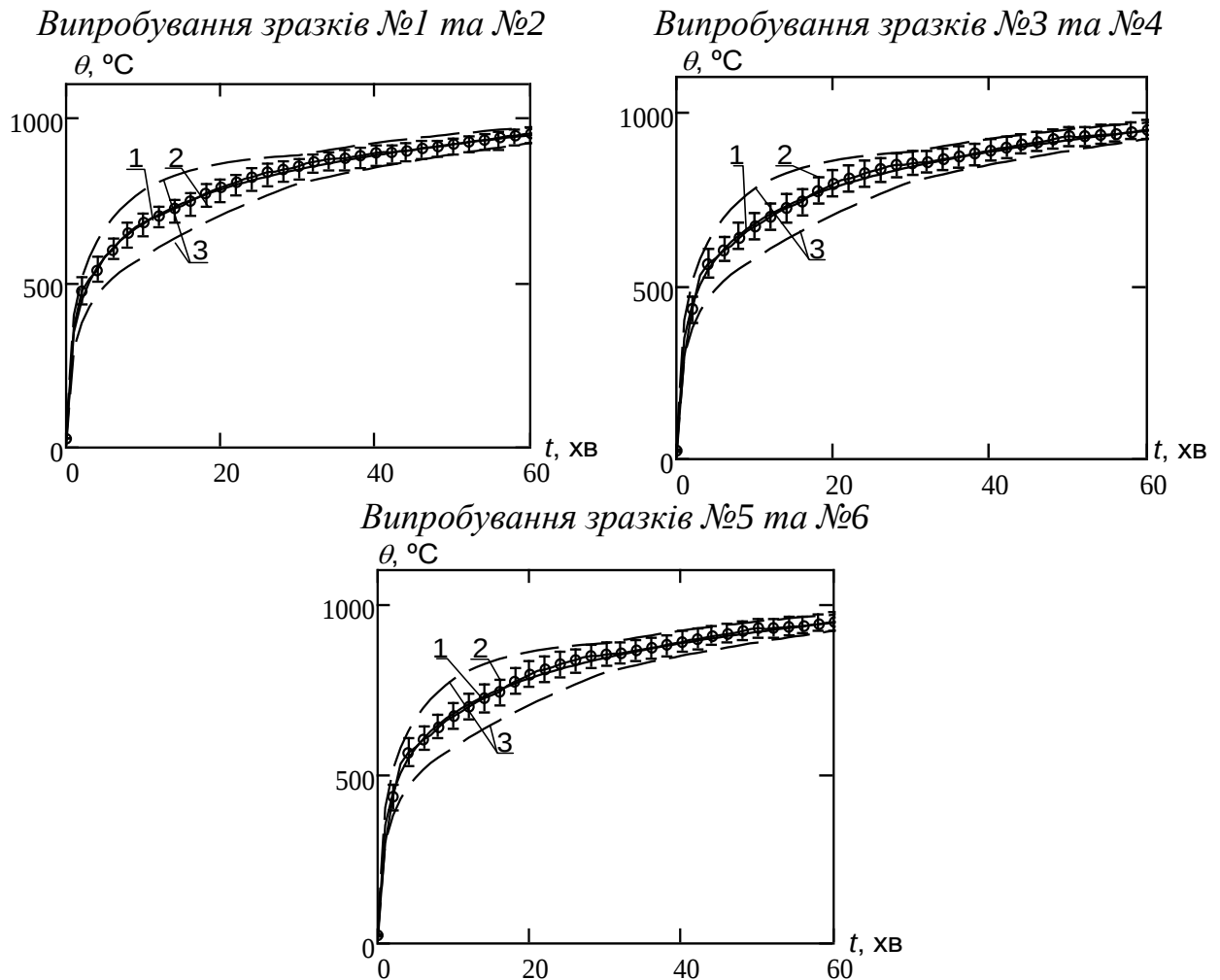


Рис. 3.3. Дані вимірювань щодо температурного режиму вогневих випробувань зразків сталевих балок у печі: 1 – середня величина температури у просторі печі, 2 – стандартний температурний режим пожежі, 3 – граничні відхилення температурних показників у просторі печі від стандартного температурного режиму.

Аналізуючи температурні криві, подані на рис. 3.2. та рис. 3.3., можна помітити, що під час випробувань у камері вогневої печі температурний режим в цілому відповідає до стандартної температурної кривої пожежі,

оскільки відхилення температурних показників не становить суттєвих величин і суттєвих викидів не спостерігається.

На рис. 3.4. показані криві величини середньої температури для зразків одного типу за свідченнями трьох термопар, розташованих на поверхні сталевого осердя зразків залежно від часу перебігу випробувань. На даних кривих також показані відхилення даних щодо отриманої температури від величини математичного очікування, тобто середньої за двома зразками та показниками трьох термопар.

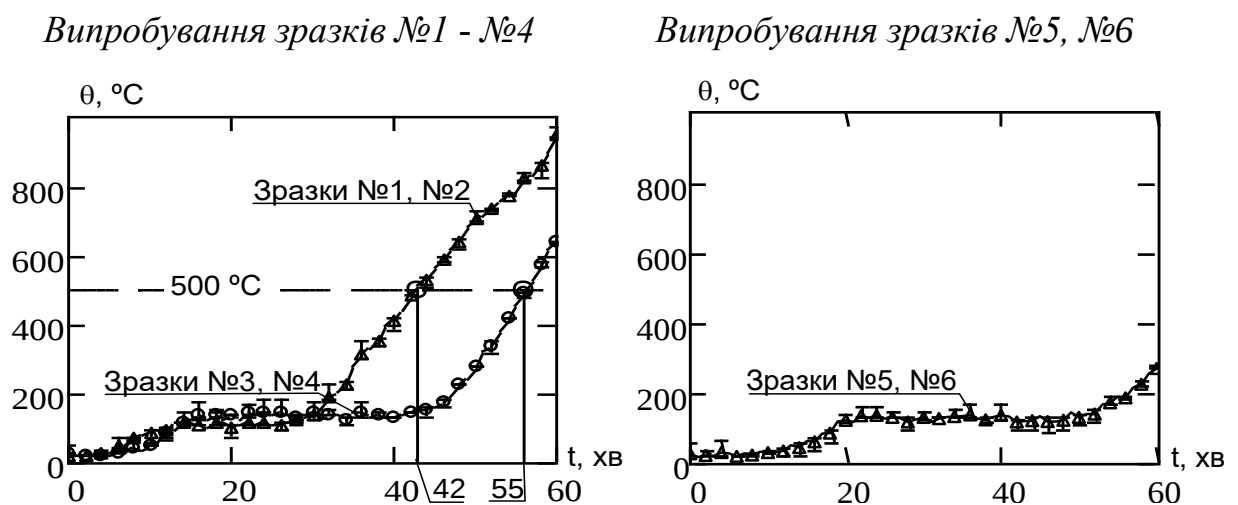


Рис. 3.4. Криві середньої температури для зразка одного типу, усереднені за показниками з трьох термопар встановлених на поверхні сталевого осердя зразків залежно від поточного часу випробувань.

Аналізуючи криві, показані на рис. 3.4. можна прослідкувати, що вимірювання виконані коректно, оскільки викиди та відхилення результатів вимірювання температури у зразках під час випробування є незначними.

Для попереднього встановлення закономірності залежності часу досягнення втрати вогнестійкості за граничним станом втрати несучої здатності було побудовано відповідний графік часу, при якому було зафіксовано досягнення критичної температури 500 °C у залежності від

товщини гіпсокартонного вогнезахисного облицювання. Для цього було залучено дані, зведені у табл. 3.2.

Таблиця 3.2.

Час фіксації температури 500 °С у сталевому осерді зразка фрагмента сталевій балки у залежності від товщини гіпсокартонного вогнезахисного облицювання

Товщина вогнезахисного облицювання, d_p , мм	12.5	25	37.5
Час досягнення температури 500 °С, U , хв	42	55	65

Час досягнення температури 500 °С для усередненої кривої для зразків № 5 та № 6 було визначено методом екстраполяції, використовуючи формалізовану температурну криву нагрівання зразка у спосіб, як показано на рис. 2.11.

На рис. 3.5. поданий побудований графік з використанням даних табл. 3.2.

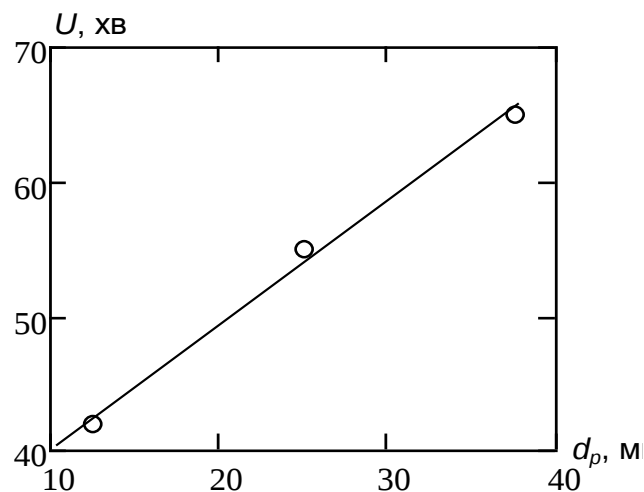


Рис. 3.5. Крива часу настання температури 500 °С у залежності від товщини гіпсокартонного вогнезахисного облицювання.

Крива, показана на рис 3.5., є близькою до лінійній залежності. Зважаючи на це, для виявлення залежності часу фіксації температури 500 °С може бути застосована лінійна регресійна математична модель.

3.2. Математична модель закономірності залежності часу фіксації критичної температури зразків фрагментів сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням у залежності від його товщини.

Аналіз узагальнених даних, поданих у табл. 3.2. та рис. 3.5. вказує на те, що може бути одержано математичну модель залежності часу фіксації певної проектної критичної температури від найбільш впливових параметрів товщини гіпсокартонного вогнезахисного облицювання та критичної проектної температури. При цьому може бути використано лінійну регресійну модель, яка у загальному вигляді може бути представлена виразом [6, 72 – 76]:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1x_2 . \quad (3.1)$$

Ця регресійна залежність може бути отримана при використанні елементарного плану експерименту I порядку. Матриця вказаного плану подана у табл. 3.3. відповідно до рекомендацій [72 – 76].

Таблиця 3.3.

Матриця елементарного плану експерименту першого порядку для повного факторного експерименту для даної регресійної залежності

№	x_1	x_2	x_1x_2
1	+	+	+
2	+	-	-
3	-	+	-
4	-	-	+

У цьому разі може бути виконаний повнофакторний експеримент для одержання лінійної регресійної залежності (3.1) згідно із рекомендаціями [72 – 76].

Відповідно до прийнятого плану експерименту, інтервал зміни найбільш значущих параметрів регресії поданий у табл. 3.4. і даний інтервал можна встановити за даними вимірювань і, у результаті екстраполяції, використовуючи підхід, описаний вище.

Таблиця 3.4.

Діапазони варіювання параметрів у числового експерименту

Товщина гіпсокартонного облицювання, d_p , мм			Проектна критична температура, $\theta_{кр}$, °C		
Мінімальна величина, d_{p-1}	Серединна величина, d_{p0}	Максимальна величина, d_{p+1}	Мінімальна величина, θ_1	Серединна величина, θ_0	Максимальна величина, θ_{+1}
12.5	37.5	62.5	350	550	750

Виконуючи варіювання факторів згідно із планом табл. 3.3. та діапазонами факторів у табл. 3.4., за отриманими результатами виконаних експериментів та екстраполяції щодо встановлення часу настання критичної температури було одержано відповідні показники часу фіксації інтервальних величин критичних температур. Отримані показники наведені у табл. 3.5.

Таблиця 3.5.

Час досягнення критичної температури, отриманих у результаті повнофакторного експерименту за прийнятим планом

Експеримент згідно із планом	1	2	3	4
Час фіксації критичної проектної температури, t , хв	184	151	54	42

Використовуючи одержані результати при проведенні повнофакторного експерименту, результати якого наведено у табл. 3.5., було розраховано коефіцієнти регресії (3.1) за виразами [72 – 76]:

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i; a_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 y_i; a_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_2 y_i; a_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_2 y_i. \quad (3.2)$$

Тут: $N = 4$ – кількість експериментів згідно із планом повнофакторного експерименту;

x_i – кодована величина параметру згідно із планом повнофакторного експерименту згідно із табл. 3.3.;

y_i – величина часу фіксації проектної критичної температури згідно із табл. 3.5.

Розраховані коефіцієнти регресії за виразами (3.2) наведено у табл. 3.6.

Таблиця 3.6.

Коефіцієнти регресії для часу фіксації проектної критичної температури сталевих балок із вогнезахисним облицюванням з гіпсокартону

Тип регресії	$a_0,$	$a_1,$	$a_2,$	$a_3,$
$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_1 x_2$	107.75	59.75	11.25	5.25

З використанням отриманих коефіцієнтів регресії часу фіксації проектної критичної температури була побудована поверхня його залежності від параметрів сталевієї балки з вогнезахистом, яка подана на рис. 3.6.

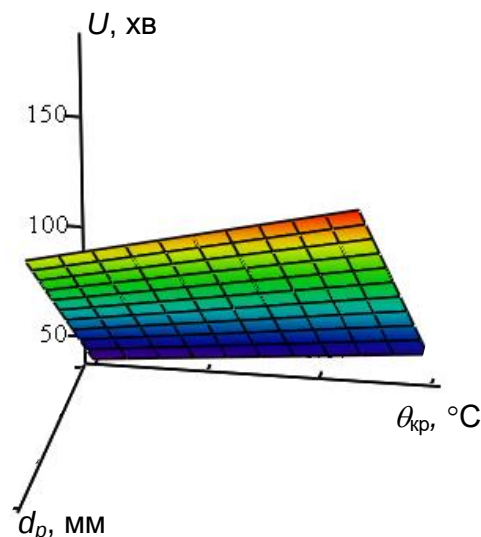


Рис. 3.6. Поверхня регресії часу фіксації проектної критичної температури від значущих параметрів сталевієї балки з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням.

Математичним описанням залежності часу фіксації проектної критичної температури від факторів вогнезахищеної сталеві балки згідно із визначеними дійсними коефіцієнтами регресії є регресійна залежність:

$$U = 10.903 + 1.648 \cdot d_p + 0.018 \cdot \theta_{кр} + 9.545 \cdot 10^{-4} d_p \cdot \theta_{кр}. \quad (3.3)$$

Для наочності та спроможності використання одержаних результатів для використання номографічного методу було побудовано відповідну номограму, що наведена на рис. 3.7.

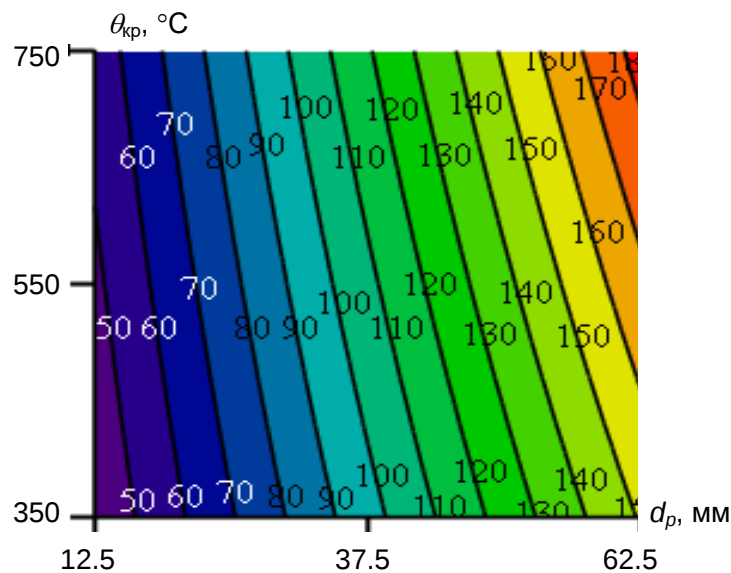


Рис. 3.7. Номограма для розрахунку межі вогнестійкості за значенням проектної критичної температури та товщиною гіпсокартонного вогнезахисного облицювання.

3.3. Вивчення залежності коефіцієнту теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання фрагментів сталевих балок.

Застосовуючи результати температурних вимірювань, одержані під час вогневих випробувань фрагментів сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням на основі гіпсокартону, а також методику

обчислення коефіцієнта теплопровідності, викладену у 2 розділі дійсної роботи було здійснено відповідні розрахунки із використанням рівняння (2.14).

Для обчислення за рівнянням (2.14) необхідно встановити температурні залежності теплофізичних властивостей сталі. У табл. 3.7. наведені теплофізичні характеристики звичайної конструктивної сталі.

Таблиця 3.7

Теплофізичні властивості звичайної конструктивної сталі

Коефіцієнт теплопровідності, $\lambda_p(\theta)$, Вт/(м·°С)	Питома теплоємність, $c_p(\theta)$, Дж/(м³·°С)	Густина, кг/м³
при $20\text{ °С} \leq \theta \leq 800\text{ °С}$, $54 - 3,33 \cdot 10^{-2} \theta$ при $\theta > 800\text{ °С}$. 27,3	при $20\text{ °С} \leq \theta \leq 600\text{ °С}$ $425 + 0,773\theta - 1,69 \cdot 10^{-2} \theta^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} \theta^3$ при $600\text{ °С} < \theta \leq 735\text{ °С}$ $666 - 13002/(\theta - 738)$, при $735\text{ °С} < \theta \leq 900\text{ °С}$ $545 + 17820/(\theta - 731)$, при $900\text{ °С} < \theta \leq 1200\text{ °С}$ 650	7850

Враховуючи рекомендації ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2012 Eurocode 1 [12] та умови реалізації методу, наведеному у роботі [77], теплоємність припускається постійною величиною і становить $c_p = 1000$ Дж/(кг·°С). Густина гіпсокартонного вогнезахисного покриття також припускається постійною величиною і становить $\rho_p = 950$ кг/м³ у відповідності до довідникових відомостей [77]. Для початкового обмеження імовірних температурних показників було виконано прямі обчислення температурного режиму нагріву зразків № 1 та № 2 згідно із табл. 3.1. із застосуванням для цього величини коефіцієнта теплопровідності $\lambda_p(\theta) = 0.2$ Вт/(м·°С), врахувавши довідникові відомості [77 – 80].

Після проведення обчислень було одержано температурний режим нагріву зразка № 1 згідно із табл. 3.1., що показаний на рис. 3.8.

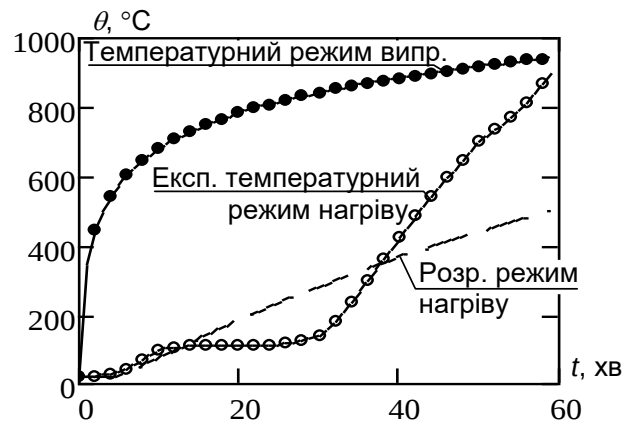


Рис. 3.8. Усереднені температурні режими нагріву зразків № 1 та № 2, одержані обчислювальним та експериментальним способами.

Відповідно до температурних кривих, показаних на рис. 3.8. можна зазначити, що результат розрахунку дає достатньо точне наближення тільки на початкових етапах впливу температурного режиму нагріву зразків № 1 та № 2, відносно експериментальних даних, тож обчислення коефіцієнта теплопровідності можна виконувати із початковими величинами, наближеними до попередньо встановленого.

Використовуючи набір даних, зведених до табл. 3.1. та табл. 3.7. і застосовуючи рівняння (2.14), було виконано обчислення коефіцієнту теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання. Одержані дані у вигляді кривих коефіцієнта теплопровідності залежно від часу перебігу випробування показані на рис. 3.9.

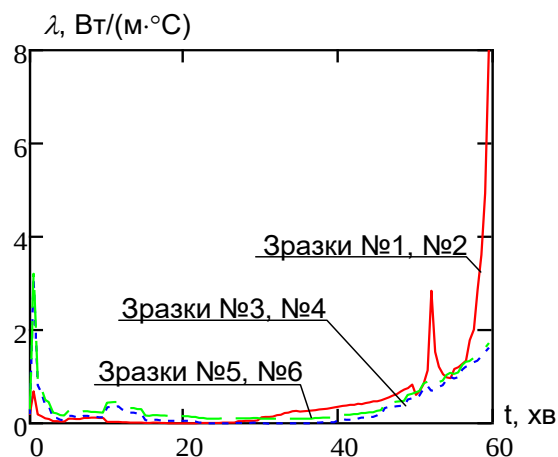


Рис. 3.9. Криві залежностей коефіцієнту теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання зразків залежно від часу випробування.

Криві, показані на рис. 3.9. мають характерні особливості, що можна прослідкувати на прикладі характеру зміни коефіцієнта теплопровідності при порівнянні товстого та тонкого шару облицювання. Існує помітна відмінність, яка проявляється у появі максимуму графіку коефіцієнта теплопровідності гіпсокартонного облицювання малої товщини, і відсутності такого максимуму для зразків із товстішим шаром гіпсокартонного вогнезахисного облицювання. Поява такого максимуму пояснюється тим, що при малій товщині гіпсокартонного облицювання має місце вплив внутрішніх процесів у сталі, що має чіткий максимум теплоємності при досягненні температур, при яких спостерігається максимум у гіпсокартонному облицюванні.

При нагріванні всіх зразків із гіпсокартонним вогнезахисним облицювання залежність зміни коефіцієнта теплопровідності має подібний вигляд. Спільною особливістю є достатньо тривалий період збереження показника коефіцієнта теплопровідності на сталому рівні. При досягненні більших температур з певного моменту коефіцієнт теплопровідності починає швидко зростати. Це може бути пояснено тим, що випаровується вільна волога у гіпсокартоні, а потім активізуються процеси деструкції гіпсу руйнування самого облицювання.

Також є помітною цікава особливість зміни коефіцієнту теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання, якщо його товщина є більшою за 50 мм відповідних зразків фрагментів сталевих балок, що полягає у досягненні чіткого мінімуму, починаючи з 30 хв. Вона може бути пояснена тим, що має місце істотна кількість вологи, що знаходиться у каркасі гіпсового каменю у зразках, де гіпсокартонне вогнезахисне облицювання має більшу товщину. При нагріванні гіпсокартонного облицювання присутня волога починає випаровуватися і таким чином сповільнює процес нагріву і тим самим впливає на перебіг зміни коефіцієнта теплопровідності, як це можна побачити аналізуючи відповідні криві.

Для отримання залежності значення коефіцієнта теплопровідності від температури, було побудовано криві, що зображені на рис. 3.10.

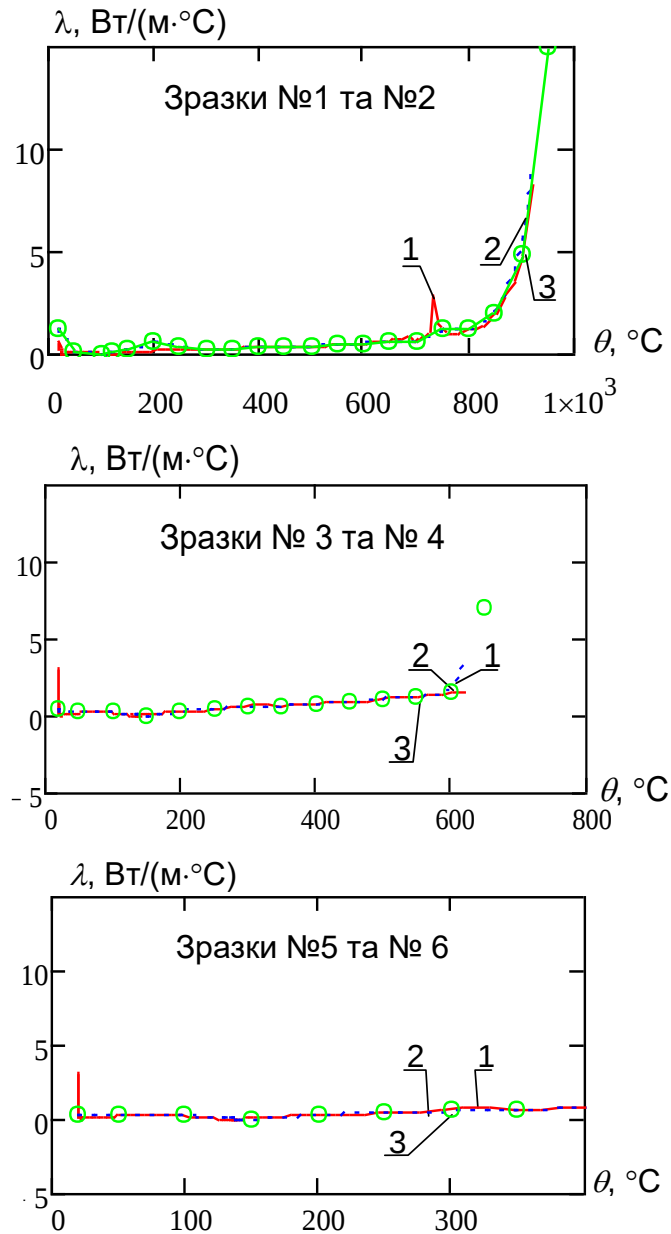


Рис. 3.10. Криві залежностей величини коефіцієнта теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання зразків сталевих балок у залежності від температури: 1 – усереднена залежність для зразків одного типу; 2 – інтерпольована залежність для знаходження табличних точок; 3 – табличні точки.

Графіки рис. 3.12., дозволяють прослідкувати, що припущення, які були зроблені раніше, підтверджуються, оскільки максимум температурної

кривої коефіцієнта теплопровідності для зразків № 1 та № 2 при нагріванні зразка повторюється і фіксується також за температури близько 750 °С. Тобто при даній температурі невелика товщина гіпсокартонного вогнезахисного облицювання відчутний вплив внутрішніх процесів при нагріванні у сталі. Початок термічного розкладання гіпсового каменю самого гіпсокартону розпочинається при температурі близько 800 °С, оскільки дана температура позначає початок швидкого зростання температури для всіх зразків.

Так само дістало свого підтвердження припущення, що локальний мінімум коефіцієнта теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання товщиною більше як 25 мм відповідних зразків для випробування № 3 - №6.

За методикою, яка наведена у стандарті [6, 77] температурна залежність коефіцієнта теплопровідності від часу для випробовуваних зразків перераховується на залежність від температури із кроком через 50 °С. Для перерахування коефіцієнта теплопровідності для кожного табличного значення температури було застосовано лінійну інтерполяцію.

На наступному етапі було переревірено критерії прийнятності на виконання рекомендацій [6, 77]:

- час фіксації проектної критичної температури не повинний перевищувати реальний час, одержаний під час випробування, більше за 30 %;
- середня величина різниці між розрахунковим та експериментальним часом фіксації проектної критичної температури повинно бути менше нуля;
- максимум 20 % індивідуальних відхилень має бути більше нуля.

Враховуючи одержані результати, які були обчислені з використанням використаних розрахункових методик, було побудовано графік усередненої температурної залежності величини коефіцієнта теплопровідності. Одержаний графік показаний на рис. 3.11.

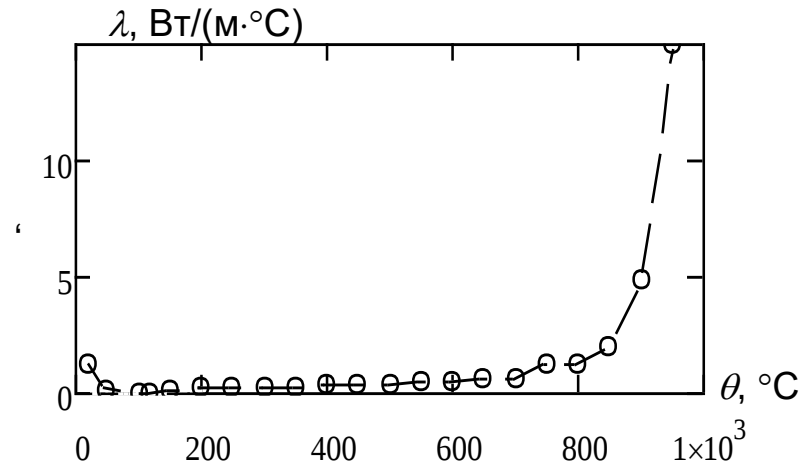


Рис. 3.11. Усереднена залежність величини коефіцієнта теплопровідності від табличних значень температури для зразків сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням.

Для практичних розрахунків температури нагріву сталевих балок зручно застосовувати температурну залежність коефіцієнта теплопровідності у табличній формі, що подана у табл. 3.8.

Таблиця 3.8

Таблична форма залежностей від температури теплофізичних характеристик гіпсокартонного вогнезахисного облицювання

Значення коефіцієнту теплопровідності		Значення питомої теплоємності	Густина, ρ , кг/м ³
θ , °C	$\lambda(\theta)$, Вт/(м·°C)	$c_p(\theta)$, Дж/(кг·°C)	
20	1.2	1000	950
50	0.094		
100	0.011		
150	0.023		
200	0.136		
250	0.2		
300	0.267		
350	0.266		

Продовження табл. 3.8

450	0.294	1000	200
500	0.341		
550	0.382		
600	0.418		
650	0.475		
700	0.553		
750	0.678		
800	0.611		
850	1.212		
900	1.201		
950	2.014		
1000	4.937		
1050	15		

Таким чином, була одержана залежність коефіцієнта теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання товщиною до 67.5 мм, що відповідає попередньо встановленим даним питомої теплоємності гіпсокартону та його густини (див. табл. 3.8.).

3.4. Дослідження адекватності розрахункових даних теплофізичних характеристик вогнезахисного гіпсокартонного облицювання, сталевих балок, отриманих за експериментальними даними.

Застосовуючи одержані розрахункові дані щодо теплофізичних характеристик (див. табл. 3.8.) гіпсокартонного вогнезахисного облицювання, враховуючи результати вогневих випробувань зразків сталевих балок із даним облицюванням, було обчислено температурні режими нагріву внутрішнього осердя випробовуваних зразків. Для проведення обчислень температурних режимів нагріву зразків було застосовано рівняння (2.10).

Результати обчислень наведені у вигляді кривих температурних режимів нагріву сталевго осердя зарзків разом із кривим, що одержані експериментальним шляхом. Побудовані криві температурних режимів показані на рис. 3.12.

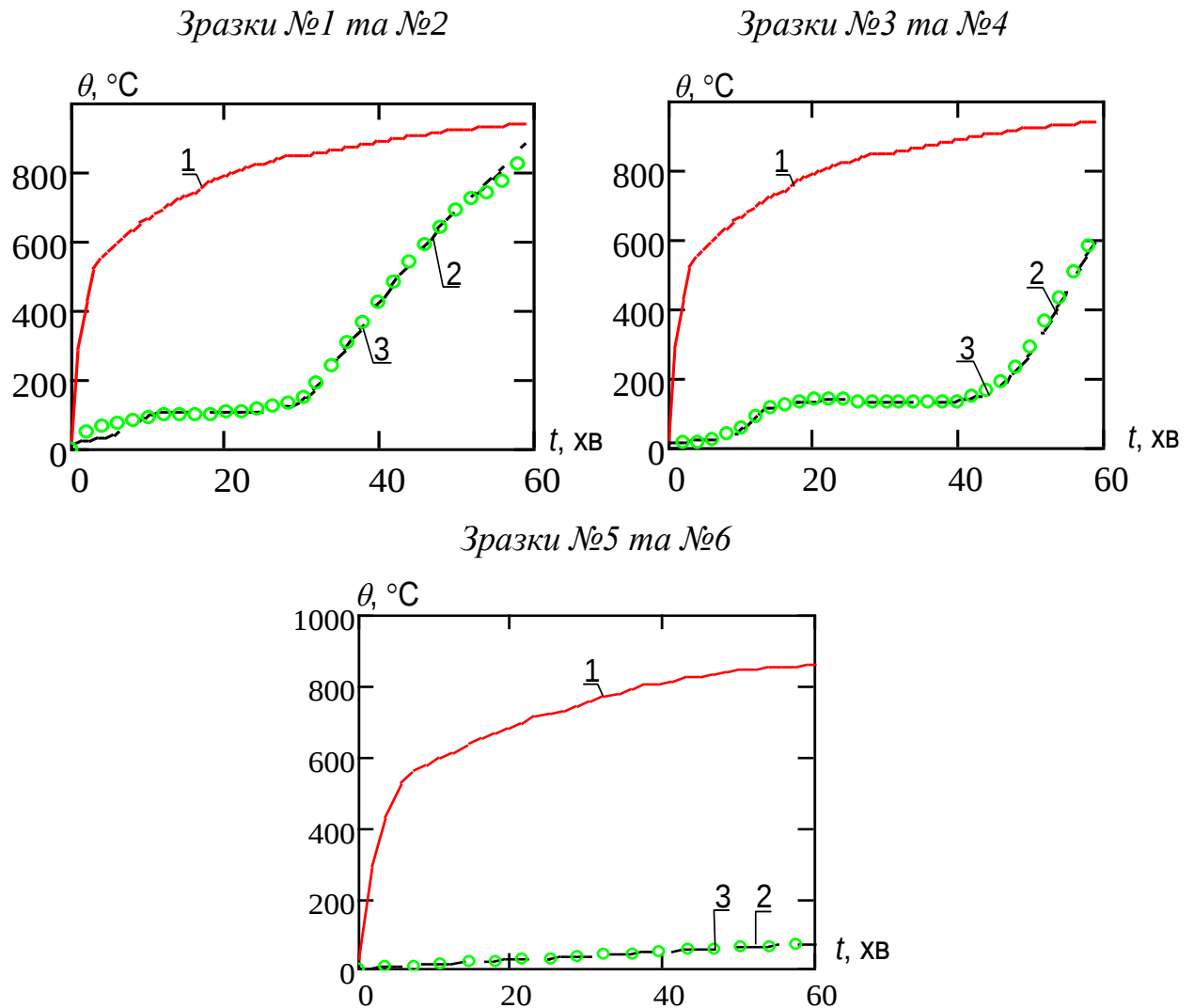


Рис. 3.12. Криві температурних режимів нагрівання сталевго осердя зразків з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням: $\bigcirc-\bigcirc-\bigcirc$ - емпіричні дані; — — — - дані обчислень.

Дані, що наведені на рис. 3.12., вказують на незначну розбіжність між даними обчислень та емпіричними даними, які одержані за узагальненою залежністю коефіцієнта теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання від температури.

Для оцінювання адекватності одержаних розрахункових результатів щодо залежності коефіцієнта теплопровідності від температури повинні бути обчислені критерії прийнятності у відповідності до рекомендацій нормативної настанови [6]. Температура нагріву зразка сталеві балки обчислювалася за рівнянням (2.10) за умов впливу режиму пожежі із стандартною температурною кривою. Одержані розрахункові дані подані у табл. 3.9. Під час обчислень, при встановленні невідповідності критеріям прийнятності, розраховується коефіцієнт безпеки для множення отриманих температур для забезпечення даних критерії. Обчислені коефіцієнти безпеки потім було враховано при розрахунку необхідної товщини облицювання для забезпечення відповідності сталеві балки необхідному класу вогнестійкості.

Таблиця 3.9

**Критерії адекватності розрахункових результатів при визначенні
коефіцієнту теплопровідності**

№ Зр.	Розбіжність досягання величини нормованого ряду проектних температур, %								Середня розбіжн., %	Частка дод. значень розкиду, %
	400.°C	450.°C	500.°C	550.°C	600.°C	650.°C	700.°C	750.°C		
1	-8.138	-6.758	-4.281	-3.033	-0.652	-1.224	2.191	-0.416	-2.789	0
2	-9.857	-8.617	-9.837	-6.924	-8.846	-9.342	-3.124	-3.786	-7.542	0
3	-24.31	-27.094	-20.363	-19.806	-25.367	-22.001	-21.326	-16.379	-22.081	0
4	-7.225	-7.255	-7.797	-6.417	-5.947	-4.737	-4.077	-2.438	-5.737	0
5	-15.304	-12.604	-13.041	-8.489	-7.265	-10.49	-8.229	1.431	-9.249	0
6	-14.899	-10.929	-6.112	-3.555	-5.022	-1.944	-0.526	0.284	-5.338	0

Дані табл. 3.9. розраховані при застосуванні коефіцієнту безпеки $K = 1.05$, що є множником величини температури, одержаної у спосіб прямого обчислення за рівнянням (2.10). У такому разі критерії прийнятності збігаються.

З метою вивчення достовірності результатів обчислення температурних значень та критеріїв прийнятності результатів розрахунку характеристик

впливу пожежі на зразки сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням було визначено відповідні статистичні показники одержаних обчислених результатів. Розрахункові показники середніх величин абсолютного відхилення, відносного відхилення, середньоквадратичного відхилення при порівняльному аналізі експериментальних і розрахункових даних для досліджуваних зразків зведені до табл. 3.10.

Таблиця 3.10

Абсолютні, відносні та середньоквадратичні відхилення, отримані під час порівняння розрахункових та експериментальних показників

№ зразка	Абсолютні відхилення, °C	Відносні відхилення, %	Середньо квадратичні відхилення, °C
1	40.796	12.89	18.27
2	37.673	12.682	9.655
3	30.345	9.082	6.09
4	39.271	14.505	17.24
5	15.07	4.247	3.915
6	25.302	8.3	9.619
Середні значення	31.41	10.284	10.798

Статистичні показники, показані у табл. 3.10. вказують на те, що похибка, отримана шляхом порівняльного аналізу обчислених та емпіричних температурних даних у зразках фрагментів сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням не має суттєвого впливу на похибку обчислень, оскільки середнє значення відносної похибки не переважає 10.3 %, а значення середньоквадратичного відхилення є не вище 10.8 °C. Це дає змогу стверджувати, що за проведенням аналізом статистичних параметрів обчислених даних щодо температури одержана залежність величини коефіцієнта теплопровідності може бути використана для розрахунків температури нагрівання сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням.

Дані щодо розрахованих статистичних критеріїв для температурних показників відповідних випробуваних зразків подані у табл. 3.11.

Таблиця 3.11

Статистичні критерії щодо розрахованих температур для зразків сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням

№ зразка	Критерій Кохрена	Критерій Стьюдента	Критерій Фішера
1	0.411	0.703	0.904
2	0.396	0.641	0.907
3	0.624	0.659	0.986
4	0.578	0.68	0.927
5	0.85	0.876	0.959
6	0.684	0.823	0.931
7	0.549	0.656	0.886
8	0.584	0.72	0.928

Отримані дані у табл. 3.11. показують, що статистичні критерії, за якими аналізується розкид значень відхилень температур у зразках сталевих балок із вогнезахисним облицюванням не переважають табличних величин. Це значить, що одержана залежність коефіцієнта теплопровідності від температури може бути застосована як узагальнена для обчислення температур нагрівання сталевих балок із гіпсокартонних вогнезахисним облицюванням.

3.5. Висновки до розділу.

З огляду на викладене, отримані результати можна узагальнити і зробити такі висновки.

- Виконано вогневі випробування зразків сталевих балок із перерізом двотаврового профілю із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням при впливі стандартного температурного режиму пожежі і у

результаті цього одержано дані температурних вимірювань у випробуваних зразках.

- Згідно із даними візуального огляду встановлено, що у результаті високотемпературного нагріву протягом 60 хв за стандартним температурним режимом спостерігалось повне руйнування зразків з одним шаром гіпсокартонного вогнезахисного облицювання і часткове руйнування зразків із двошаровим і тришаровим облицюванням, при цьому наскрізних дефектів у тришаровому облицюванні не спостерігалось. Це значить, що тепловий вплив пожежі негативно впливає на суцільність структури вогнезахисного облицювання і, відповідно, на спроможність зберігати свою вогнезахисну здатність.

- Досліджено умови фіксації у сталевому осерді зразків фрагментів сталевих балок проектних критичних температур та виявлена закономірність часу досягнення даних температур у вигляді регресії, яка виражає його залежність від проектної критичної температури $\theta_{кр}$ та товщини d_p гіпсокартонного вогнезахисного облицювання $U = 10.903 + 1.648 \cdot d_p + 0.018 \cdot \theta_{кр} + 9.545 \cdot 10^{-4} d_p \cdot \theta_{кр}$ і з її використанням побудовано відповідну номограму.

- Обчислений коефіцієнт теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання та виявлена його залежність від температури, яка досягає максимуму близько 750 °C у зразку з одношаровим облицюванням, який пояснюється впливом процесів у сталевому осерді зразка.

- Одержана узагальнена залежність коефіцієнта теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання від температури у табличній формі, яка може бути застосована для обчислення температури у сталевих балках із даним типом вогнезахисту у інтервалі значень його товщини до 67.5 мм при значенні питомої теплоємності 1000 Дж/(кг·°C) та густини 950 кг/м³.

- Показано, що одержана залежність коефіцієнта теплопровідності від температури може бути застосована як загальна для розрахунку температурних показників при нагріванні у сталевих балок за стандартною температурною кривою із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням, оскільки величина відносна похибка не перевищує 10.3 %, а величина середньоквадратичного відхилення не перевищує 10.8 °С.

- Показано що статистичні критерії адекватності Кохрена, Стьюдента та Фішера, обчислених для результатів розрахунку температури у сталевих балках із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням при порівняльному аналізі розрахункових та експериментальних даних мають значення не більше відповідно 0.7, 0.88 та 0.96 і не є більшими за табличні значення. Це означає, що результати обчислень при застосуванні отриманої залежності коефіцієнта теплопровідності від температури є адекватними.

РОЗДІЛ 4

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОГО ВПЛИВУ ПОЖЕЖІ НА ПОВЕДІНКУ СТАЛЕВОЇ БАЛКИ ІЗ ГІПСОКАРТОННИМ ВОГНЕЗАХИСНИМ ОБЛИЦЮВАННЯМ

4.1. Режим нагрівання сталевій балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням в умовах пожежі.

Для дослідження руйнування гіпсокартонного вогнезахисного облицювання при деформації сталевій балки в умовах теплового впливу при пожежі найбільш значним є нагрівання до високих температур. При встановленні та прикладенні навантаження у вигляді температурних показників було прийняті припущення, наведені нижче.

1. Підвищення температури враховується тільки безпосередньо у сталевій балці, коли нагрівання до високих температур у гіпсокартонному вогнезахисному облицюванні не розглядається, оскільки показник модуля пружності гіпсокартону дуже швидко деградує і набуває дуже малих значень.

2. Температура всередині сталевій балки розподілена рівномірно, тобто є ізопараметричною у будь-якій точці балки.

3. Температура всередині балки змінюється відповідно до режиму, що обчислюється за формулою (2.10), наведених у другому розділі дійсної роботи, при застосуванні режиму пожежі із стандартною температурною кривою.

4. В якості теплофізичних властивостей сталі у рівнянні (2.10) застосовується математичні моделі, які подані у табл. 3.7. у третьому розділі дійсної роботи.

5. Теплофізичні характеристики гіпсокартону у формулі (2.10) відповідають математичним моделям, що запропоновані у результаті досліджень, викладених у третьому розділі даної роботи, і наведені у табл. 3.8.

6. Закріплювальна система гіпсокартонного вогнезахисного облицювання, описана у другому розділі дійсної роботи і показана на рис. 2.5., складається з метало профілю та кріпильних елементів, має таку ж саму температуру як і основна сталева балка.

Для вирішення задачі теплопровідності використано конструктивні параметри сталевих балок, подані на схемі рис. 4.1 а. Схема теплового тристороннього впливу пожежі на досліджувану балку подана на рис. 4.1 б.

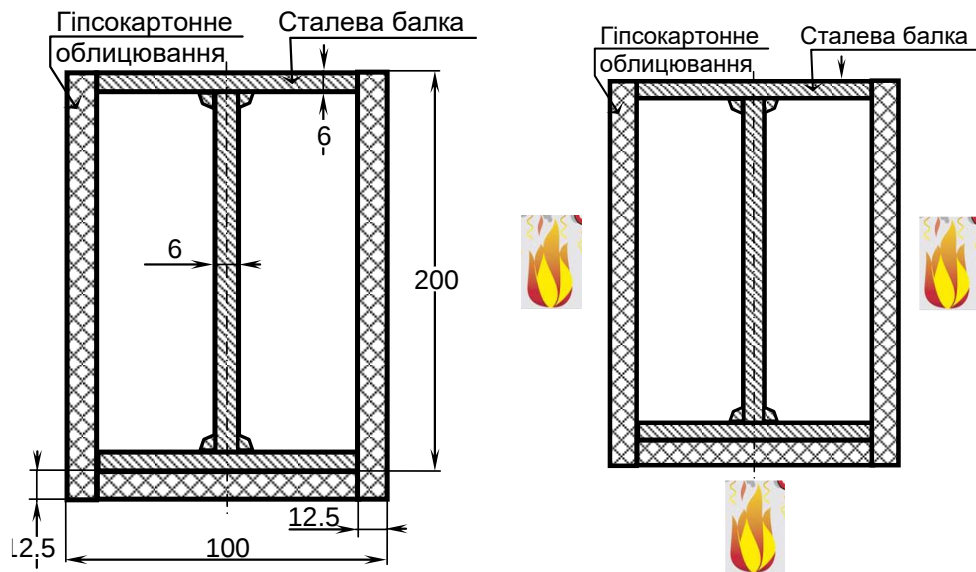


Рис. 4.1. Конструкція перерізу сталевій балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням (а) та схема теплового впливу на неї при пожежі (б).

Головні характеристики для розрахунку зведені до табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Головні параметри сталевій балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням для теплотехнічного розрахунку

Характеристика	Позначення	Од-ця виміру	Значення
Товщина вогнезахисн. облицювання	d_p	м	0.020
Коефіцієнт перерізу балки	A_m / V	м^{-1}	222.2
Часовий крок	Δt	с	30

Здійснивши потрібні обчислення, було одержано температурний режим нагріву даної сталевій балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням, що показаний на рис. 4.2.

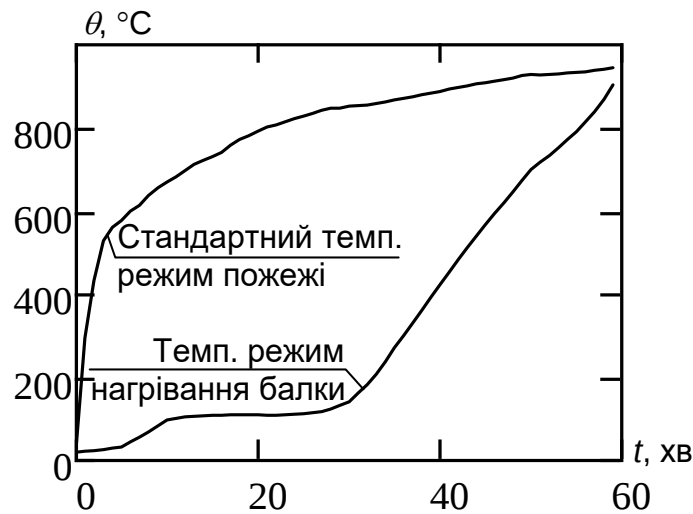


Рис. 4.2. Температурний режим нагріву сталевій балки з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням при тепловому впливі пожежі із стандартним температурним режимом.

Обчислений температурний режим нагріву сталевій балки при пожежі може бути застосований як температурне навантаження при розв'язку задачі міцності.

4.2. Основні теоретичні посилання до методу обчислення напружено-деформованого стану у сталевій балці з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням.

4.2.1. Аспекти обчислювальних процедур щодо визначення напружено-деформованого стану у сталевій балці з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням.

Для математичного моделювання поведінки сталевій балки з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням в умовах нагріву при пожежі

було застосовано загальний теоретичний підхід, що заснований на положеннях, викладених нижче.

1. Для обчислення напружено-деформованого стану (НДС) у сталевій балці із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням застосовується загальний підхід, що ґрунтується на використанні явного методу інтегрування системи рівнянь динаміки механічних систем, а також рівнянь НДС, що є результатом взаємодії компонентів систем, апроксимованих за допомогою метода скінченних елементів (МСЕ).

2. Для проведення математичного моделювання сталеві балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням використовуються плоскі скінченні елементи (СЕ) чотирикутної форми типу пластин Беличко-Цая [83 – 87] із чотирма вузлами.

3. При математичному моделюванні гіпсокартонних плит вогнезахисного облицювання застосовуються тривимірні масивні СЕ призматичної форми, які мають вісім вузлів.

4. Для описання поведінки сталеві балки застосована модель термопружнопластичного матеріалу, який має діаграми деформування із рекомендаціям Eurocode 3 [3 – 5, 77, 79 – 82, 92 – 125], що складаються з ділянки зростання та горизонтальної ділянки. Спадаюча гілка при цьому не враховується, тому що її врахування не має суттєвого впливу на процес деформації балки, з огляду на те, що основною причиною руйнування гіпсокартонного облицювання є переміщення згину.

5. Для відтворення нелінійного характеру деформування та руйнування матеріалу гіпсокартонних плит вогнезахисного облицювання застосовується модель пружнопластичного матеріалу із можливістю руйнування [123 - 130].

6. Розрахунок засновується на припущенні, що порушення цілісності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання проводиться з врахуванням утворення наскрізних дефектів безпосередньо у самих плитах та між ними [59 – 65].

7. Для описання впливу на деформування та руйнування пластин гіпсокартонних плит вогнезахисного облицювання з'єднань між ними та балкою застосована модель контактної взаємодії.

8. Прикладання механічного та температурного навантаження є поступовим і відтворює відповідну динамічну історію із прикладанням власної ваги у початковій фазі та подальшого прикладання діючого навантаження. У кінцевій фазі прикладається температурне навантаження.

4.2.2. Математичні моделі поведінки сталевій балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням в умовах пожежі.

На рис. 4.3. подана розрахункова схема для описання руху твердого тіла, яке деформується під час взаємодії з певного моменту часу $t = 0$ до певного заданого моменту часу.

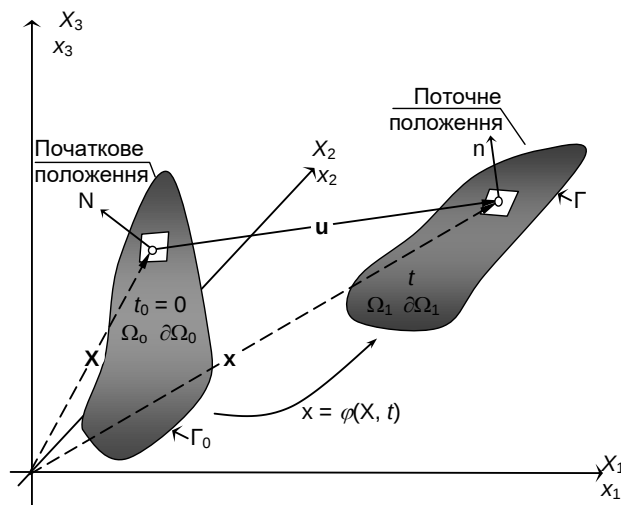


Рис. 4.3. Деформований стан твердого тіла до взаємодії та поточний стан деформованого твердого тіла у результаті певної взаємодії.

На розрахунковій схемі, представлений на рис. 4.3. деформоване тверде тіло позначене через Ω_0 , а границя розрахункової області даного тіла позначається через Γ_0 . Визначене положення та форма деформованого тіла у даний час t відповідно позначається через Ω , а границя його розрахункової

області, позначається через Γ . У процесі руху тіла із початкового положення та з даною формою Ω_0 у задане положення та змінену форму Ω , певна точка із набором координат $\mathbf{X}$, у початковому фазі встановлена у розрахунковій області Ω_0 рушить у область Ω і буде характеризуватись іншим набором координат $\mathbf{x}$.

Диференціальне рівняння динаміки руху, що відтворює взаємодію твердих деформівних тіл може бути записане на основі консервативних законів механіки як це описано у роботах Belychko, Flanagan та ін. [62 – 65, 83 – 90].

При такій системі позначень має головне значення диференціальне рівняння балансу імпульсу. Дане рівняння записується у вигляді:

$$\sigma_{ij,i} + \rho \cdot f_i = \rho \cdot \ddot{x}_i, \quad (4.1)$$

де: $\ddot{x}_i$ - прискорення відповідної точки тіла;

$\sigma_{ij,i}$ – тензор напружень Коши у заданій точці тіла;

ρ – густина у заданій точці тіла;

$\rho \cdot f_i$ - зовнішні сили, які прикладені у заданій точці тіла.

Рівняння збереження маси для матеріальної системи записуються у вигляді рівності:

$$\rho \cdot \det(\mathbf{J}) = \rho_0, \quad (4.2)$$

де: ρ_0 – густина матеріалу у початковий момент часу;

$\det(\mathbf{J})$ - визначник Якобі дотичної матриці жорсткості.

Базове рівняння, що виражає закон збереження енергії, складається з суми кінетичної енергії та потенціальної енергії, яка визначається як внутрішня енергія тіла. Сума потенціальної енергії та кінетичної енергії відповідає загальній сумі робіт всіх сил.

$$P^{int} + P^{kin} = P^{ext} + P^{heat}. \quad (4.3)$$

Кінетична енергія одержується за виразом:

$$P^{kin} = 0.5 \frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} d\Omega \quad (4.4)$$

Внутрішня енергія одержується із застосуванням формули:

$$P^{ext} = \int_{\Omega} \mathbf{v} \cdot \rho \mathbf{b} d\Omega + \int_{\Gamma} \mathbf{v} \cdot \mathbf{t} d\Gamma. \quad (4.5)$$

Якщо відсутні джерела теплового потоку, рівняння балансу енергії за результатами робіт [62 – 65, 83 – 90] може бути записано у вигляді рівності:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho w^{int} + (0.5 \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}) d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{v} \cdot \rho \mathbf{b} d\Omega + \int_{\Gamma} \mathbf{v} \cdot \mathbf{t} d\Gamma \quad (4.6)$$

Рівняння балансу енергії у результаті перетворення для тіла у деформованому вигляді може бути записано як:

$$\rho \dot{w}^{int} = 0.5 \sigma_{ij} \left[\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right] \quad (4.7)$$

Граничні умови для завдання переміщення твердого тіла Γ_f набувають вигляду:

$$\sigma_{ij} n_j = t_i(t). \quad (4.8)$$

де: n_j – вектор нормалі до граничної поверхні даного деформованого тіла, із зовнішнім направленням.

Для встановлення граничних умов для встановлення деформованої поверхні тіла можна записати такий вираз:

$$x_i(\mathbf{X}, t) = \bar{x}_i(t). \quad (4.9)$$

При виникненні контактної взаємодії поверхонь деформованих тіл граничні умови можна записати за допомогою рівняння:

$$(\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-) n_j = 0 \quad (4.10)$$

Використовуючи принцип віртуальних переміщень δx_i деформований стан тіл, які піддаються динамічній взаємодії, може бути описаний з використанням диференціального рівняння збереження можливих робіт:

$$\int_{\Omega} [\rho \ddot{x}_i + \sigma_{ij,j} - \rho f_i] \delta x_i d\Omega + \int_{\Gamma_f} [\sigma_{ij} n_j - t_i] \delta x_i d\Gamma + \int_{\Gamma_c} (\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-) n_j \delta x_i d\Gamma = 0 \quad (4.11)$$

Допускаючи, що сума віртуальних робіт є рівною нулю у перетвореному вигляді диференціальне рівняння зберігання віртуальних робіт (4.11) записується [62 – 65, 83 – 90]:

$$\int_{\Omega} \rho \ddot{x}_i \delta x_i d\Omega + \int_{\Omega} \sigma_{ij,j} \delta x_i d\Omega - \int_{\Omega} \rho f_i \delta x_i d\Omega - \int_{\Gamma_f} t_i \delta x_i d\Gamma - \int_{\Gamma_c} t_i^c \delta x_i d\Gamma = 0 \quad (4.12)$$

4.2.3. Метод скінченних елементів для наближення основних диференціальних рівнянь динаміки взаємодії деформованих тіл.

Рівняння для застосування наближення континуального описання параметрів розрахунковій області скінченного елемента (СЕ) може бути записане у вигляді такого виразу:

$$x_i(\mathbf{X}, t) = \bar{x}_i(\mathbf{X}(\xi, \eta, \zeta), t) = \sum_{j=1}^m \phi_j(\xi, \eta, \zeta) x_i^j(t) \quad (4.13)$$

де: ϕ_j – функція форми у параметричному вигляді із параметрами ξ, η, ζ ;

m – число вузлів, які визначаються за формою СЕ;

x_i^j – поточна координата вузлова за даною віссю ортогональної системи координат.

Можлива внутрішня енергія СЕ може бути записана через рівняння:

$$\delta \Pi_e = \int_{\Omega_e} \rho \ddot{x}_i \Phi_i^e d\Omega + \int_{\Omega_e} \sigma_{ij} \Phi_{ij}^e d\Omega - \int_{\Omega_e} \rho f_i \Phi_i^e d\Omega - \int_{\Gamma_e} t_i \Phi_i^e d\Gamma. \quad (4.14)$$

Тут: $\Phi_i^e = (\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_k)_i^e$.

Весь ансамбль СЕ має бути описаний з врахування принципу можливих переміщень. У цьому разі рівняння збереження загальної енергії тіла, що розбите на сітку СЕ набуває форми:

$$\sum_{e=1}^{en} \left[\int_{\Omega_e} \rho \ddot{x}_i \Phi_i^e d\Omega + \int_{\Omega_e} \sigma_{ij} \Phi_{ij}^e d\Omega - \int_{\Omega_e} \rho f_i \Phi_i^e d\Omega - \int_{\Gamma_e} t_i \Phi_i^e d\Gamma \right] = 0. \quad (4.15)$$

Рівняння (4.15) для проведення обчислень може бути записане у більш зручній для цього матричній формі:

$$\sum_{e=1}^{en} \left[\int_{\Omega_e} \rho \mathbf{N}^T \mathbf{N} \mathbf{a}_e d\Omega + \int_{\Omega_e} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} d\Omega - \int_{\Omega_e} \rho \mathbf{N}^T \mathbf{b} d\Omega - \int_{\Gamma_e} \mathbf{N}^T \mathbf{t} d\Gamma \right] = 0 \quad (4.16)$$

де: $\mathbf{N}$ – матриця параметричних інтерполяційних функцій форми СЕ;

$\boldsymbol{\sigma}$ – вектор поточних напружень;

$\mathbf{B}$ – матриця жорсткості твердого тіла;

$\mathbf{b}$ – вектор навантажень, що діють на вузли СЕ;

$\mathbf{a}_e$ – вектор прискорень вузлів СЕ;

$\mathbf{t}$ – вектор зовнішніх сил, що діють у вузлах СЕ.

4.2.4. Математична модель розрахунку параметрів контактної взаємодії у системі тіл.

Розрахункова схема для описання контактної взаємодії деформованих тіл при їх дотику, коли вони зіштовхуються або взаємно проникають одне у одне наведена на рис. 4.4.

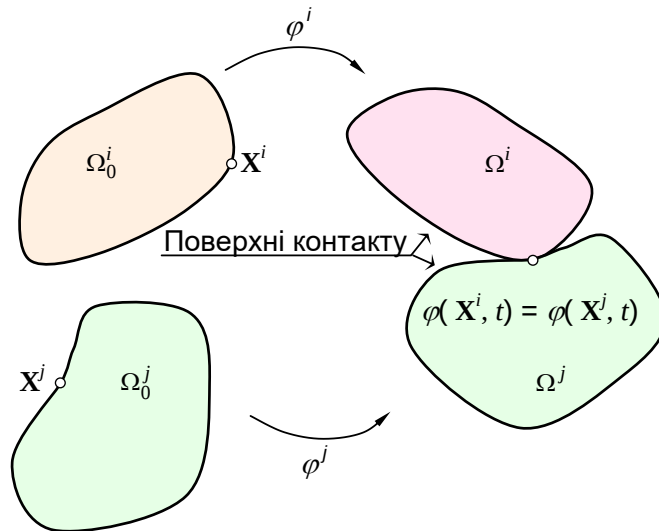


Рис. 4.4. Розрахункова схема до описання динаміки контактної взаємодії деформованих тіл.

Для описання динаміки контактної взаємодії можна припустити, що два тіла, приведені до контакту, коли вони зберігають здатність до

деформування, і не існує абсолютно твердих тіл, існування яких припускається в певних кейсах для обчислень із спрощеними алгоритмами.

Для визначення моменту наявності контакту твердих тіл має бути перевірено чи задовольняється умова Герца-Синьоріні-Мора [62 – 65, 83 – 90], подана у вигляді нерівностей:

$$g \geq 0, \lambda \geq 0, g\lambda \geq 0, \quad (4.17)$$

де: g – параметр, що характеризує геометрію зазору, і який обчислюється за формулою:

$$g(\mathbf{x}^i, t) = (\mathbf{x}^i - \mathbf{x}^j)^T \mathbf{n}. \quad (4.18)$$

Схема до розшифровки позначень геометричних характеристик контактуючих тіл наведена нижче на рис. 4.5.

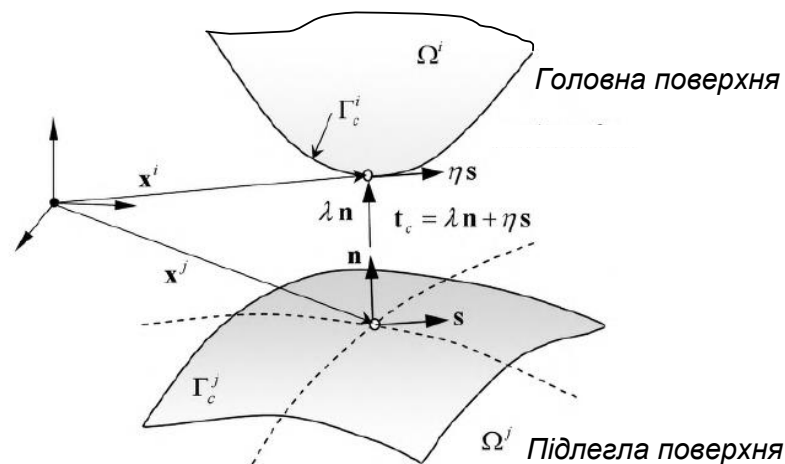


Рис. 4.5. Схема до позначення геометричних характеристик контактної взаємодії.

Для описання сил тертя, що виникають при контактній взаємодії тіл враховується загальний закон Кулона. У такому разі значення дотичної швидкості контактних точок визначається через вираз:

$$(4.19)$$

$$\dot{\mathbf{u}}(\mathbf{x}^i, t) = (\dot{\mathbf{u}}^i - \dot{\mathbf{u}}^j)^T \mathbf{s}.$$

З огляду на це, загальний закон Кулона записується у вигляді:

$$\begin{cases} |\tau| \leq 1 \\ \text{якщо } |\tau| < 1 \text{ приймається } \dot{u} = 0 \\ \text{при } |\tau| < 1 \text{ приймається } \text{sign}(\dot{u}) = \text{sign}(\tau) \end{cases} \quad (4.20)$$

Тут числовий параметр τ обчислюється за формулою:

$$\tau = \frac{\eta}{\mu\lambda}, \quad (4.21)$$

де: μ - коефіцієнт тертя.

Для обчислення параметрів контактної взаємодії поверхонь СЕ тіл застосовується метод штрафних функцій у сукупності із методом множення Лагранжа [62 – 65, 83 – 90]. Для сегменту поверхні СЕ, що обмежений його вузлами застосовується комплекс операцій, послідовність якого подана нижче.

1. Встановлюється пара «підлеглий вузол – керуючий сегмент СЕ», що розташований на контактній поверхні за положенням проекції підлеглого вузла СЕ на площину керуючого сегменту у певному квадранті локальної системи координат, розташованої на керуючому сегменті СЕ на контактній поверхні. Проекція вузла на керуючий сегмент представляється контактною точкою, а дистанція між підлеглим вузлом СЕ та проекцією або контактною точкою називається проекційною відстанню. При спільному розгляданні вузла та керуючого сегменту СЕ його площа має бути збільшена на малу величину ($\sim 2\%$) для підвищення надійності розрахункового алгоритму.

2. Проводиться розрахунок координат контактної проекційної точки у локальній системі координат, локалізований на керуючому сегменті.

3. Проводиться обчислення проекційної відстані у локальній системі координат мастер-сегменту СЕ.

4. За умови рівності проекційної відстані до негативної величини, його визначають як глибину пенетрації i , використовуючи його, відбувається обчислення сили, що діє на підлеглий вузол з використанням рівності [62 – 65, 83 – 90]:

$$f_s = K_c \cdot \delta \quad (4.23)$$

де: f_s – величина сили контакту, що прикладається у точці контакту;

δ - глибина проникнення;

K_c – контактна жорсткість.

5. Відбувається розрахунок контактних сил у вузлах головного сегменту з використанням інтерполяційних функцій форми СЕ, які залежать від розташування контактної точки у локальній системі координат, асоційованої із керуючим сегментом СЕ. Рівності для розрахунку інтерполяційних функцій форми СЕ подані нижче [83 – 87].

$$f_m^i = N_i(\xi, \eta) \cdot f_s \text{ де } \begin{cases} N_1 = 0.25(1 + \xi)(1 + \eta) \\ N_2 = 0.25(1 + \xi)(1 - \eta) \\ N_3 = 0.25(1 - \xi)(1 + \eta) \\ N_4 = 0.25(1 - \xi)(1 - \eta) \end{cases} \quad (4.24)$$

Розрахунок контактної жорсткості проводиться із застосуванням рівняння:

$$K_c = \frac{f_s A^2 k}{V_e} \quad (4.25)$$

де: f_s – число фактору штрафу;

k – модуль пружності матеріалу;

A – площа мастер-сегменту;

V_e – об'єм СЕ, прилеглого до керуючого сегменту.

4.2.5. Явний метод розв'язку рівнянь динаміки механічної системи.

Здійснення розрахунку швидкості вузлових точок СЕ при застосуванні явного метода інтегрування диференціальних рівнянь динаміки системи проводиться за виразом [62 – 65, 83 – 90]:

$$\mathbf{v}^{n+0.5} = (\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^n) / \Delta t^{n+0.5} \Rightarrow \mathbf{u}^{n+1} = \mathbf{u}^n + \Delta t^{n+0.5} \mathbf{v}^{n+0.5} \quad (4.26)$$

Обчислення переміщень вузлів СЕ здійснюється при застосуванні виразу:

$$\mathbf{x}^{n+1} = \mathbf{x}^0 + \mathbf{u}^{n+1} \quad (4.27)$$

Для виконання розрахунку вузлових прискорень СЕ при наближенні похідної від швидкості за часом за допомогою скінченних різниць використовується рівність:

$$\mathbf{a}^n = (\mathbf{v}^{n+0.5} - \mathbf{v}^{n-0.5}) / \Delta t^n \Rightarrow \mathbf{v}^{n+0.5} = \mathbf{v}^{n-0.5} + \Delta t^n \mathbf{a}^n \quad (4.28)$$

Викладений алгоритм дозволяє записати (4.11) у вигляді рівності:

$$\mathbf{M} \mathbf{a}^n = \mathbf{F}^n; \quad \mathbf{F}^n = \sum_{e=1}^{en} (\mathbf{F}_e^{ext} - \mathbf{F}_e^{int}) \quad (4.29)$$

Прискорення вузлів СЕ є результатом розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь при використанні методу обернення матриці $\mathbf{M}$:

$$\mathbf{a}^n = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{F}^n. \quad (4.30)$$

Часовий крок автоматично коригується за обчисленим числом Куранта-Фрідрікса-Леві з використанням рівності:

$$\Delta t \leq \Delta t_{crit} = \min \frac{l_e}{c_e}. \quad (4.31)$$

Тут: c_e – число, що одержується з використанням виразу:

$$c_e = \sqrt{E_e / \rho_e};$$

l_e – крок просторової сітки СЕ.

4.2.6. Тип та форма скінченних елементів.

Для відтворення поведінки гіпсокартонного вогнезахисного облицювання використовуються об'ємні восьмивузлові СЕ типу SOLID. На рис. 4.6. подана геометрична конфігурація описаного СЕ.

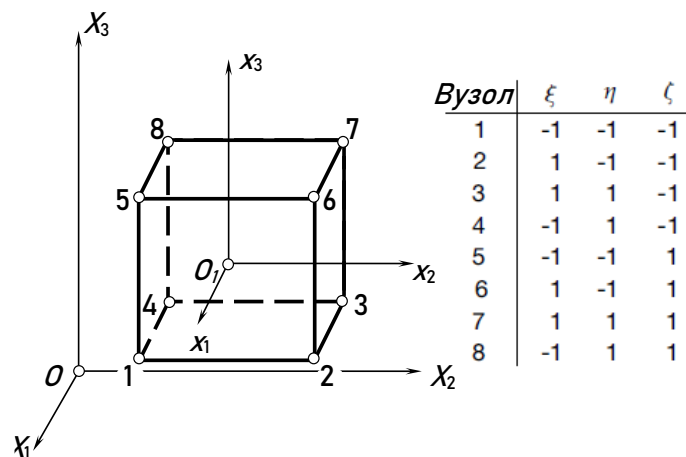


Рис. 4.6. Геометрична конфігурація восьмивузлового СЕ гексаедричного типу SOLID.

Для СЕ даного типу використовується рівняння, що дозволяє обчислити координати вузлових точок для функцій форми (4.16) і записується через вираз:

$$x_i(\mathbf{X}, t) = \bar{x}_i(\mathbf{X}(\xi, \eta, \zeta), t) = \sum_{j=1}^8 \phi_j(\xi, \eta, \zeta) x_i^j(t), \quad (4.32)$$

де: ϕ_j – функція форми у параметричному вигляді для j -тої вершини СЕ, що у даному випадку розраховується з використанням рівності:

$$\phi_j = 0.125(1 + \xi\xi_j)(1 + \eta\eta_j)(1 + \zeta\zeta_j), \quad (4.33)$$

Параметри ξ_j , η_j , ζ_j визначаються при застосуванні схеми, поданої на рис. 4.6.

Матриця інтерполяції для СЕ даного типу має такий запис:

$$\mathbf{N}(\xi, \eta, \zeta) = \begin{bmatrix} \phi_1 & 0 & 0 & \phi_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \phi_1 & 0 & 0 & \phi_2 & \dots & \phi_8 & 0 \\ 0 & 0 & \phi_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & \phi_8 \end{bmatrix}. \quad (4.34)$$

Вираз, через який записується вектор напружень, має вигляд:

$$\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yz} \quad \tau_{zx})^T \quad (4.35)$$

Плоский СЕ типу двовимірної пластини Беличко-Ліна-Цая [83 – 87] для описання динаміки взаємодії тіл у ньому розкладає складний рух на комбінацію найпростішого обертального та лінійного руху точок разом із деформуванням. Ефективність використання такого типу СЕ впливає з математичного спрощення у результаті цього припущення за умови введення локальної системи координат, асоційованої із СЕ цього типу. Деформаційна

швидкість зв'язана із тензором напружень Коши із подальшим уникненням складностей при розкритті нелінійності деформаційних процесів.

При введенні базових співвідношень геометричних та силових характеристик у СЕ типу пластини Беличко-Цая розглядається локальна система координат $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$, напрямні вектори якої $\hat{\mathbf{e}}_1, \hat{\mathbf{e}}_2, \hat{\mathbf{e}}_3$ встановлюються, наведеною на рис. 4.7. розрахунковою схемою [62 – 65, 83 – 90].

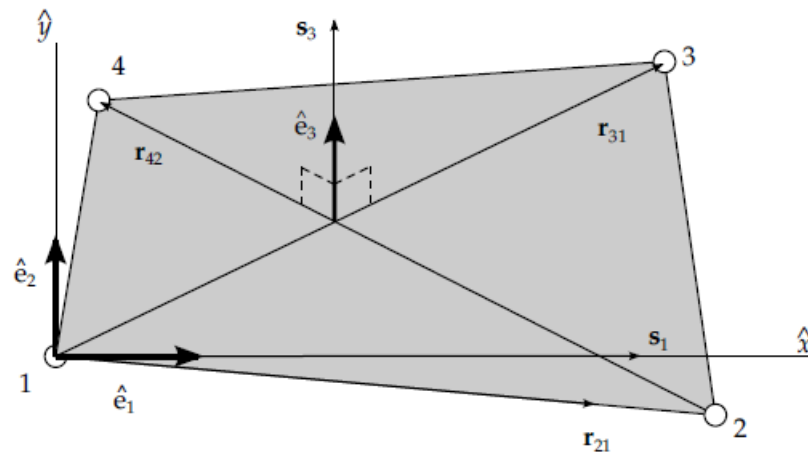


Рис. 4.7. Розрахункова схема для визначення геометричних співвідношень СЕ типу чотирьохвузлової пластинки Беличко-Цая.

При встановленні основних рівностей для СЕ типу двовимірної пластинки Беличко-Цая застосовується теорія Міндліна [86]. За даною теорією швидкість точок СЕ цього типу обчислюється при використанні рівності:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}^m - \hat{z} \mathbf{e}_3 \times \boldsymbol{\theta}, \quad (4.36)$$

де: $\mathbf{v}^m$ – швидкості у векторній формі для центру локальної системи координат СЕ;

$\boldsymbol{\theta}$ – кутова швидкість у векторній формі;

$\hat{z}$ – координата точки за локальною системою координат.

4.2.7. Математичні моделі матеріалів конструктивної системи.

Для описання поведінки сталеві балки в умовах нагрівання при пожежі застосовується пружно пластичний матеріал із врахуванням температурних деформацій та деградації матеріалу як наслідок нагріву до високих температур. Діаграми деформування даного матеріалу відповідають настановам для проектування вогнестійких сталевих конструкцій [62 – 65, 83 – 90], які мають вигляд діаграм Прандтля. Спадаюча гілка на діаграмах не розглядається, оскільки дана особливість не має суттєвого впливу на поведінку сталеві балки. Приймається припущення, що фіксується переважання поперечних переміщень при розгляданні передумов втрати місцевої стійкості перерізу. Теоретичні положення для математичної моделі матеріалу даного типу, що описується у роботі Холквіста [84]. У такому разі, напруження на пружній ділянці діаграми з'являються внаслідок деформацій повороту перерізів. Дані деформації обчислюються з використанням рівності:

$$\sigma_{ij}^{\nabla} = C_{ijkl}(\dot{\epsilon}_{kl} - \dot{\epsilon}_{kl}^{\theta}) + \dot{\chi}_{ij}d\theta. \quad (4.37)$$

Тут похідна визначається за виразом $\dot{\chi}_{ij} = \frac{dC_{ijkl}}{d\theta} C_{klmn}^{-1} \dot{\sigma}_{mn}$,

C_{ijkl} – твірна матриця, що обчислюється через рівність, що включає коефіцієнт Пуасона μ :

$$C_{ijkl} = \frac{E}{(1+\mu)(1-\mu)} \begin{bmatrix} 1-\mu & \mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 1-\mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & \mu & 1-\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5-\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-\mu \end{bmatrix}, \quad (4.38)$$

Швидкість деформації внаслідок підвищення температури обчислюється з використанням коефіцієнту температурного розширення α при застосуванні рівності:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{\theta} = \alpha \dot{\theta} \delta_{ij}. \quad (4.39)$$

Тут: δ_{ij} – елементи тензора ідентифікації пластичних деформацій.

Встановлення появи пластичних деформацій відбувається за допомогою ізотропної функції податливості:

$$\phi = 0.5 s_{ij} s_{ij} - \sigma_y(\theta)^2 3^{-1}, \quad (4.40)$$

де: s_{ij} – компоненти девіатора напружень;

$\sigma_y(\theta)$ – температурозалежна функція зміцнення.

Компоненти девіатора напружень на подальших кроках інтегрування обчислюються з використанням рівності:

$$s_{ij}^{n+1} = \frac{\sigma_y s_{ij}^*}{\sqrt{1.5 s_{ij}^{*} s_{ij}^{*}}}. \quad (4.41)$$

На поточному кроці інтегрування показник ефективної пластичної деформації перераховується з використанням виразу:

$$\Delta \varepsilon_{\text{eff}}^p = \frac{\left(1 - \frac{\sigma_y}{\sqrt{1.5 s_{ij}^{*} s_{ij}^{*}}} \right) \sqrt{1.5 s_{ij}^{*} s_{ij}^{*}}}{G + 3E_p}. \quad (4.41)$$

Тут: E_p – модуль зміцнення;

G – модуль пружності другого роду.

Встановлення законів деградації матеріалу внаслідок теплового впливу температур для даної моделі матеріалу було застосовано температурні залежності основних механічних показників для сталі. Табл. 4.2. містить табличні дані щодо температурних залежностей коефіцієнтів зниження механічних характеристик конструктивної сталі згідно із рекомендаціями настанови [3, 4].

Таблиця 4.2

Коефіцієнти зменшення механічних параметрів сталі

Температура нагрівання сталі $\theta, ^\circ\text{C}$	Коефіцієнт зниження розрахункового значення границі текучості, $k_{y,\theta} = \sigma_{y,\theta} / \sigma_y$	Коефіцієнт зниження розрахункового значення модуля пружності, $k_{e,\theta} = E_\theta / E$	Коефіцієнт зниження розрахункового значення межі пружності $k_{p,\theta} = \sigma_{p,\theta} / \sigma_y$
20	1.000	1.000	1.000
100	1.000	1.000	1.000
200	1.000	0.900	0.807
300	1.000	0.800	0.613
400	1.000	0.700	0.420
500	0.780	0.600	0.360
600	0.470	0.310	0.180
700	0.230	0.130	0.075
800	0.110	0.090	0.050
900	0.060	0.0675	0.0375
1000	0.040	0.0450	0.0250
1100	0.020	0.0225	0.0125
1200	0.000	0.0000	0.0000

Коефіцієнт терморозширення обчислюється за допомогою регресійної залежності від температури:

$$\text{при } 20 ^\circ\text{C} \leq \theta < 750 ^\circ\text{C} \quad \frac{\Delta l}{l} = 1.2 \cdot 10^{-5} \theta + 0.4 \cdot 10^{-8} \theta^2 - 2.416 \cdot 10^{-4},$$

$$\text{при } 750 ^\circ\text{C} \leq \theta < 860 ^\circ\text{C} \quad \frac{\Delta l}{l} = 1.1 \cdot 10^{-2}, \quad (4.42)$$

$$\text{при } 860 ^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200 ^\circ\text{C} \quad \frac{\Delta l}{l} = 2 \cdot 10^{-5} \theta - 6.2 \cdot 10^{-3}.$$

На рис. 4.8. поданий графік залежності температурної деформації сталі від температури нагріву.

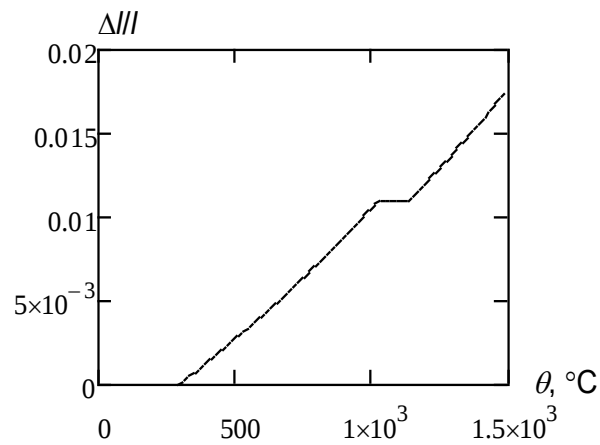


Рис. 4.8. Залежність величини температурної деформації конструкційної сталі від температури.

З метою здійснення встановлення характеристик математичної моделі матеріалу має бути заданий коефіцієнт температурної деформації α , який має відповідати залежності деформації температурного розширення, показаний на рис. 4.8. На рис. 4.9. наведена крива залежності коефіцієнту температурної деформації конструкційної сталі від її температури нагріву, що є компонентом комплексу початкових даних у відповідній математичній моделі матеріалу.

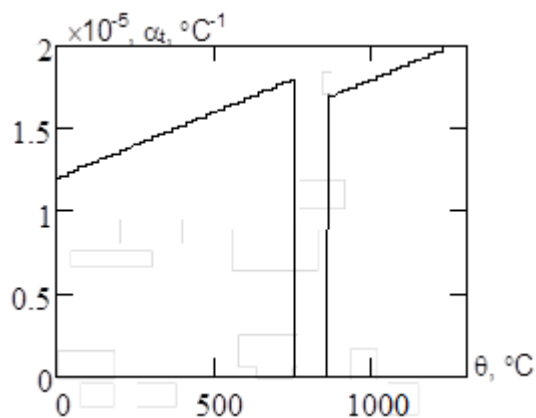


Рис. 4.9. Температурна залежність коефіцієнта температурної деформації сталі, з якої виготовлена балка.

Табл. 4.3. містить основні характеристики конструкційної сталі, з якої виготовлена балка [62 – 65].

Таблиця 4.3

Основні механічні властивості сталі досліджуваної балки

Клас міцності	Міцність, МПа	Модуль пружності, ГПа	Коефіцієнт Пуассона
C 245	245	$2,1 \cdot 10^2$	0,3

Викладені дані було застосовано для побудування діаграм деформування конструкційної при її нагріванні до різних температур під час теплового впливу пожежі. Одержані діаграми показані на рис. 4.10.

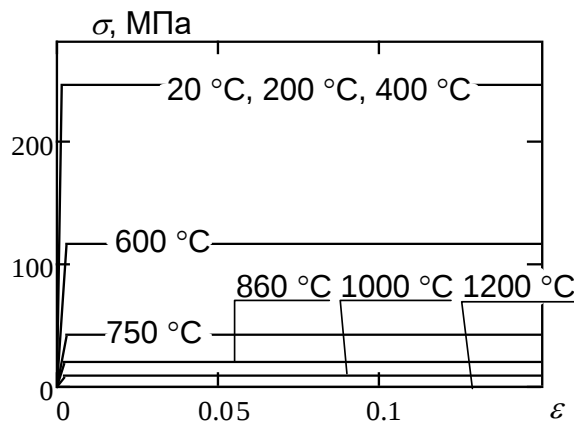


Рис. 4.10. Діаграми деформування конструкційної сталі класу C 245, нагрітої до різних значень температури.

Для описання нелінійної поведінки допоміжних матеріалів вогнезахисного облицювання може бути застосована математична модель Блатц-Ко [62 – 65, 83 – 90]. Дана математична модель матеріалу призначена для описання нелінійної поведінки за допомогою введення напружень Піюлі-Кірхгофа, що можуть бути розраховані з використанням рівності:

$$S_{ij} = G \left(V^{-1} C_{ij} - V^{-\frac{1}{1-2\mu}} \delta_{ij} \right). \quad (4.42)$$

Тут: C_{ij} – компоненти тензора деформацій Коши-Гріна, які можна розрахувати за допомогою формули:

$$C_{ij} = \frac{\partial x_k}{\partial X_i} \frac{\partial x_k}{\partial X_j}. \quad (4.43)$$

Основні механічні показники [83 – 90], для математичної моделі матеріалу Блатц-Ко, зведені до табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Механічні характеристики гіпсокартону

Матеріал	Міцність на розтяг, МПа	Міцність зсуву, МПа	Модуль пружн., МПа	Модуль пружн. II роду, МПа	Коеф. Пуассона
Гіпсокартон «Кнауф Україна»	5.4	1.4	$10 \cdot 10^3$	6000	0,3

За напруженнями Піоли-Кірхгофа визначаються компоненти тензора напружень Коши:

$$\sigma_{ij} = \frac{\rho}{\rho_0} \frac{\partial x_k}{\partial X_i} \frac{\partial x_k}{\partial X_j} S_{kl}. \quad (4.44)$$

За умовчанням коефіцієнт Пуассона гіпсокартону матеріалу складає $\mu = 0.3$.

4.3. Комплекс початкових даних для проведення обчислень параметрів поведінки сталевій балці із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням в умовах пожежі.

4.3.1. Основні початкові дані для сталевій балці із вогнезахисним з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням.

Для обчислення основних характеристик (НДС) для сталевій балці із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням було враховано геометричні характеристики перерізу, які детально описані у вище. Проліт балки становить 6 м. Конструктивна схема балки, яка піддається дослідженню показана на рис. 4.11.

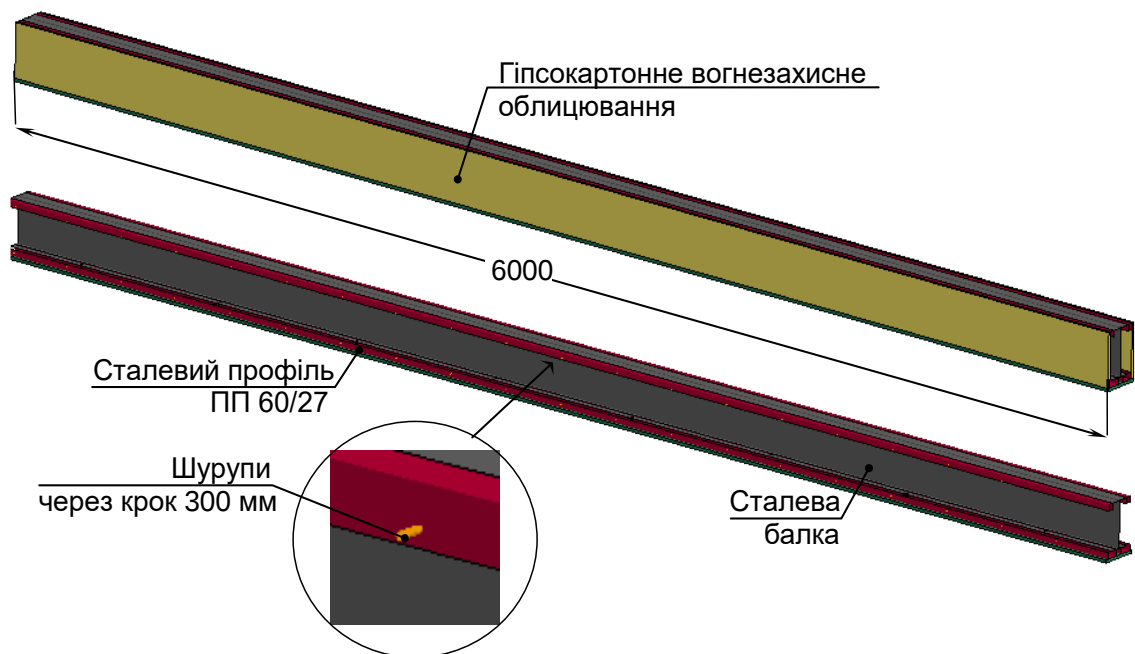


Рис. 4.11. Схема конструктивних компонентів сталевій двотавровій балці із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням.

Одної з важливих конструктивних особливостей балки є наявність кріпильних елементів, до яких відносяться металопрофіль і шурупи для закріплення гіпсокартонних плит. Нижня гіпсокартонна плита також приєднується до сталевого профіля за допомогою шурупів.

Для конструктивної схеми, показаній на рис. 4.11. було виконано розбиття на скінченні елементи. Дана скінченно-елементна модель показана на рис. 4.12.

Побудована скінченно-елементна модель включає плоскі чотирьохвузлові елементи, які відносяться до типу SHELL з п'ятьма точками інтегрування. Даний тип СЕ має формулювання оболонки Беличко-Цая [62 – 65, 83 – 90]. Розрахункова область гіпсокартонного вогнезахисного облицювання дискретизується на об'ємні восьмивузлові СЕ типу SOLID. Матеріалом сталеві балки є пружно-пластичний матеріал із можливістю виникнення температурних деформацій [1, 2, 4]. Також до скінченно-елементної схеми введені балкові СЕ типу Х'юса-Лю для відтворення кріпильних шурупів.

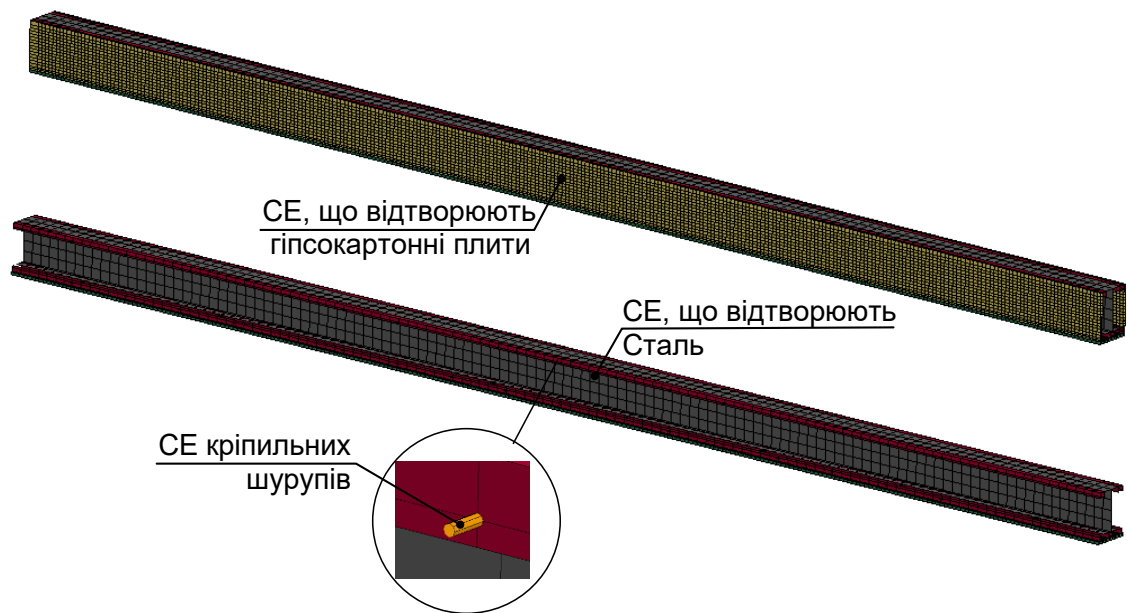


Рис. 4.12. Скінченно-елементна схема для сталеві балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням.

Для відтворення матеріалу гіпсокартонного облицювання використана математична модель пружнопластичного матеріалу із можливістю руйнування [2]. У табл. 4.5. приведені кількісні дані щодо СЕ побудованої скінченно-елементної моделі для сталеві балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням.

Таблиця 4.5

Кількісні дані щодо скінченно-елементної сітки для сталеві балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням

Кількість балкових СЕ типу BEAM	Кількість плоских СЕ типу SHELL	Число об'ємних СЕ типу SOLID
120	3662	13160
Загальна кількість СЕ		
16942		

4.2.2. Граничні умови скінченно-елементної моделі сталеві балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням.

Під час здійснення обчислень було зроблено припущення, що втрата цілісності вогнезахисним гіпсокартонним облицюванням в основному буде відбуватися по лініям стикування гіпсокартонних плит та внаслідок розтріскування та руйнування самих гіпсокартонних плит. Таке припущення було прийнято, зважаючи на гіпотезу, що деформація балки, контактна взаємодія між плитами вогнезахисту та деградація механічних властивостей гіпсового каменю призводить до утворення тріщин у місцях кріплення гіпсокартонних плит шурупами. Таке припущення враховується під час підготовки моделі при описанні контакту (див. рис. 4.13.).

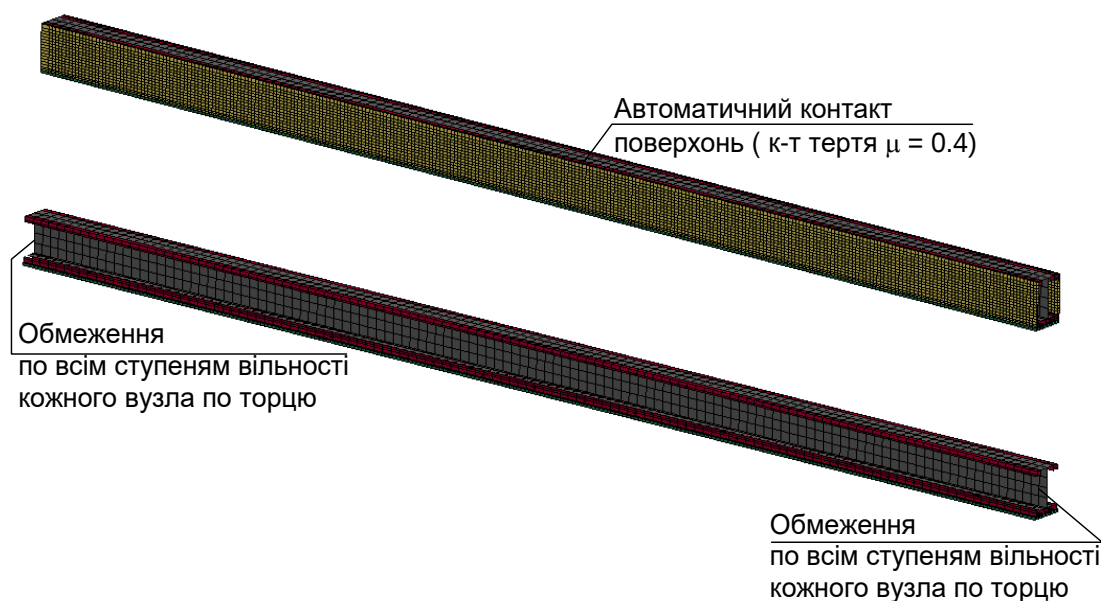


Рис. 4.13. Схема прикладання граничних умов до елементів сталеві балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням.

На скінченно-елементній схемі, наведеній на рис. 4.13, також вказані умови фіксації балки у просторі, які заключаються в блокуванні переміщень на всіх напрямків руху всіх вузлів на кожному із торців сталеві балки із вогнезахисним облицюванням.

На досліджувану сталеву балку перед накладанням температурного навантаження поступово прикладається навантаження від власної ваги та діюче розподілене навантаження, які діятимуть постійно протягом всього розрахунку, часовий інтервал якого становить 17.5 с. Параметр часу при цьому має умовний характер і перераховується відповідно до реального часу 60 хв теплового впливу стандартного режиму пожежі.

На скінченно-елементній схемі показані характеристики навантажень на сталеву балку із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням. Дана схема подана на рис. 4.14, де вказаний тип та напрямок навантаження, що прикладається до балки.

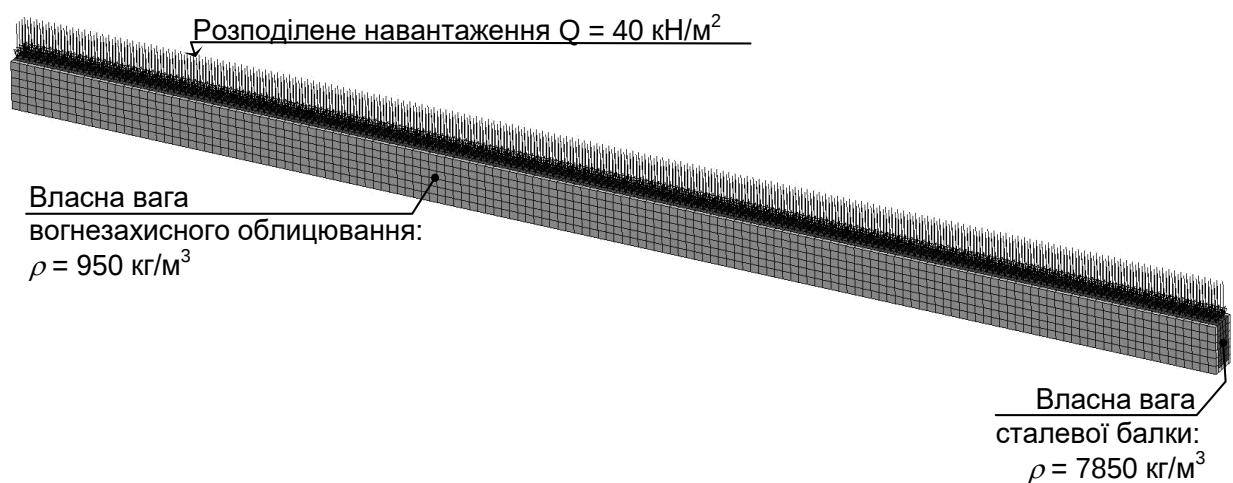


Рис. 4.14. Розрахункова схема щодо параметрів механічного навантаження, прикладеного до сталеві балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням.

Рівень прикладеного розподіленого навантаження прийнятий з врахуванням коефіцієнту навантаження $\mu = 0.5$ і визначений за рівністю:

$$Q = 8 \frac{\mu \cdot f_y \cdot W_x}{B \cdot l^2}. \quad (4.45)$$

Тут: $l = 6$ м – величина прольоту балки між опорами.

Величина моменту осьового опору перерізу W_x розраховується за виразом:

$$W_x = \frac{2J_x}{H}, \quad J_x = \frac{Bt^3}{6} + \frac{B \cdot t \cdot (H - 2t)^2}{2} + \frac{s \cdot (H - 2t)^3}{12}, \quad (4.46)$$

де: $H = 0.2$ м, $B = 0.1$ м – відповідно значення висоти та ширини двотаврового перерізу;

J_x – осьовий момент інерції перерізу досліджуваної балки;

$t = s = 0.006$ м – відповідно значення товщини полки та стінки перерізу I-балки.

Навантаження прикладалося поступово згідно із графіками, які зображені на рис. 4.15.

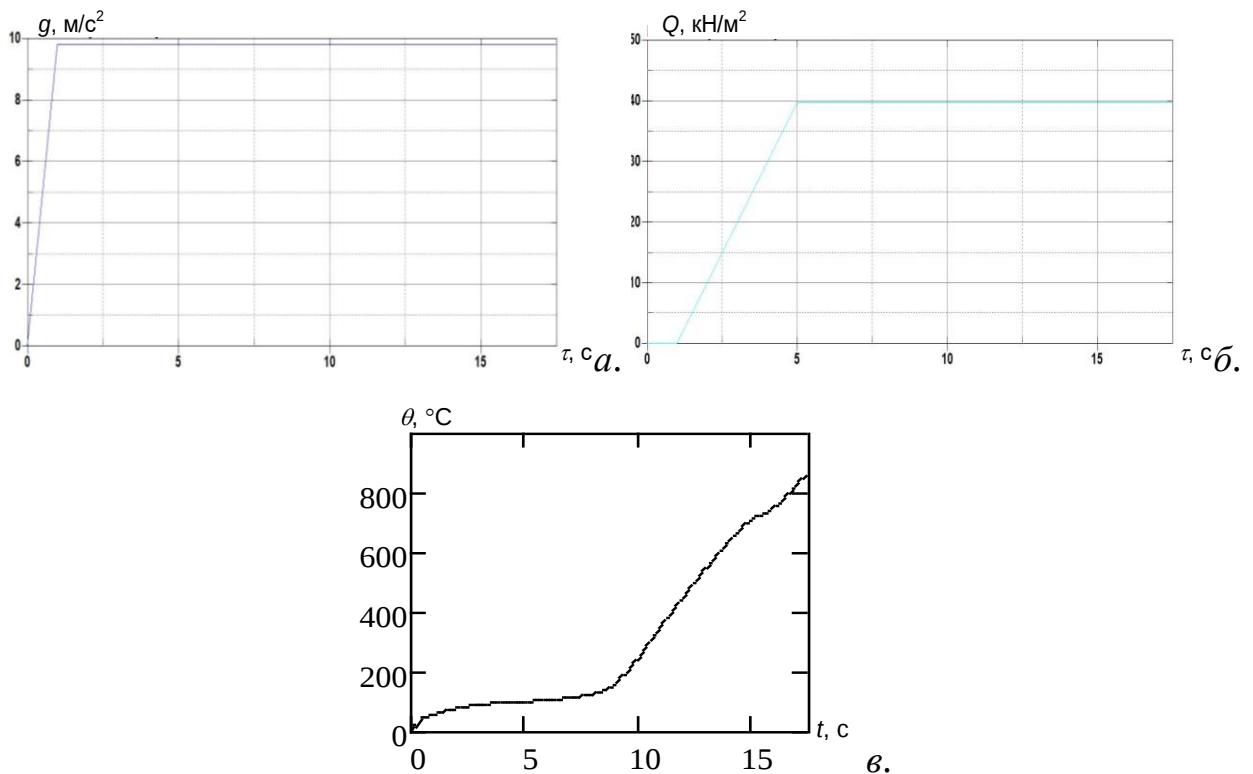


Рис. 4.15. Криві залежностей від часу прикладених навантажень: *а* – крива прискорення вільного падіння при врахуванні власної ваги; *б* – крива значення розподіленого навантаження при його поступовому прикладанні; *в* – крива величини температурного навантаження.

Згідно із рис. 4.14. видно, що спочатку за 1 с прикладається власна вага, потім за 4 с прикладається розподілене навантаження. В останній фазі прикладається температурне навантаження.

Для зменшення негативного впливу коливальних ефектів при прикладанні навантаження на стадії прикладення навантаження від власної ваги обчислення здійснювалося за алгоритмом Пападракакіса [84]. Обчислення для інших процесів здійснювалися із включенням глобального демпфування із коефіцієнтом 0.14.

4.4. Результати математичного моделювання поведінки сталевій балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням під час пожежі.

Після здійснення обчислень було одержано дані щодо процесу деформування сталевій балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням під час теплового пожежі.

При проведенні розрахунку навантаження прикладалося протягом часу 17.5 с, відповідному інтервалу часу дії пожежі 60 хв., як це показано на рис. 4.2. З метою компенсування динамічних ефектів, які проявляються у появі неприродного коливального руху було застосована опція демпфування, у відповідності із викладеним вище. Враховуючи криві навантаження, показані на рис. 4.15, виконано порівняння шкал часу обчислення та часу перебігу пожежі.

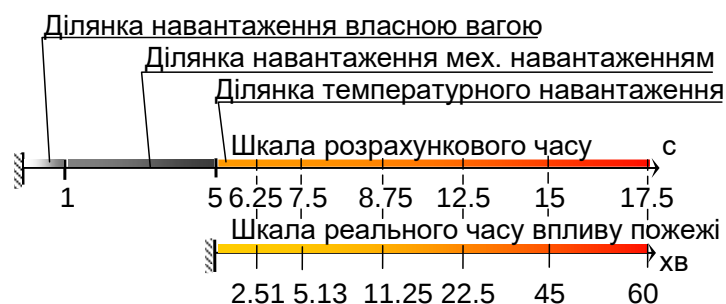


Рис. 4.16. Порівняння шкал умовного часу обчислення та реального часу перебігу пожежі.

На рис. 4.17. наведено розподіли нормальних поздовжніх напружень у досліджуваній сталевій балці із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням на стадіях прикладання діючого механічного навантаження.

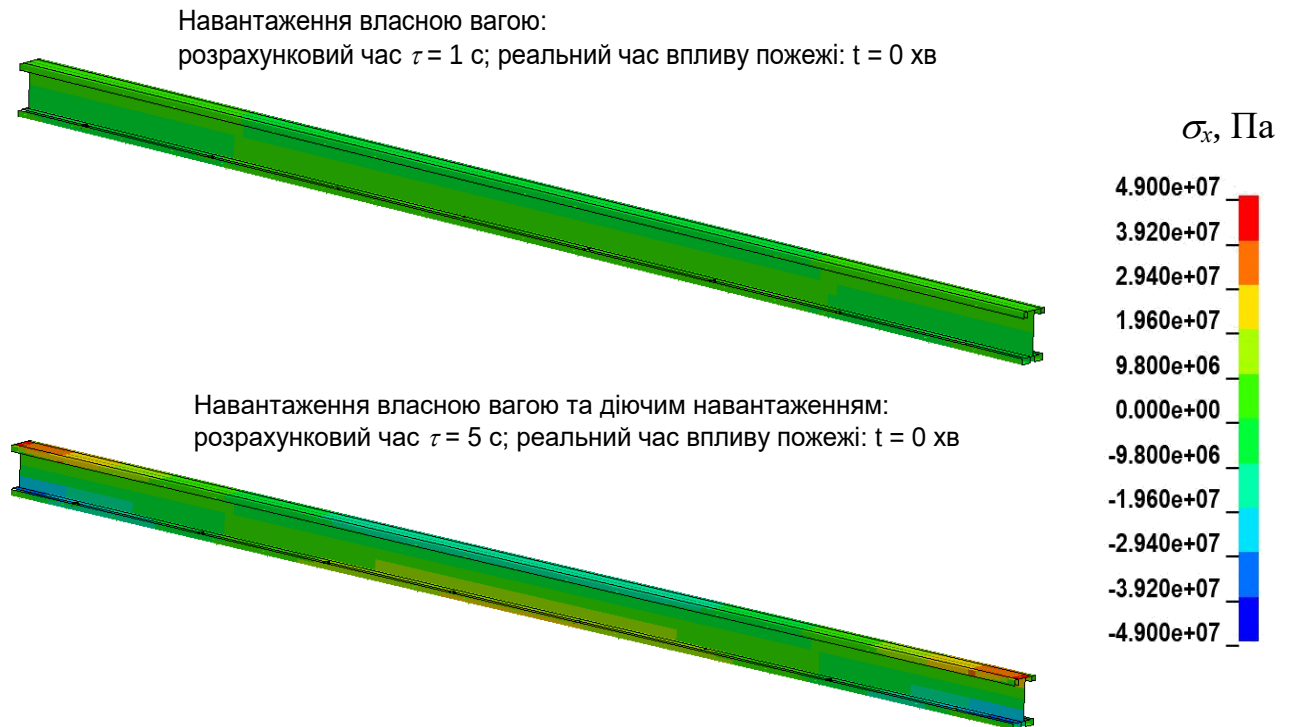


Рис. 4.17. Розподілення осьових нормальних напружень у сталевій балці на стадії прикладання механічного навантаження.

На рис. 4.18. наведено розподілення нормальних напружень у напрямку поздовжньої осі досліджуваної балки при здійсненні покрокового прикладення температур у вузлах.

Проводячи аналіз розподілів напружень, що подані на рис. 4.17, рис. 4.18, можна сказати, що перед початком прикладання температур найбільша величина напружень у балці становить близько 50 МПа, тобто приблизно $0.2f_y$. З огляду на це, можна зробити висновок, що результати розрахунку напружено-деформованого стану у сталевій балці перед прикладанням температури вузлах є коректними.

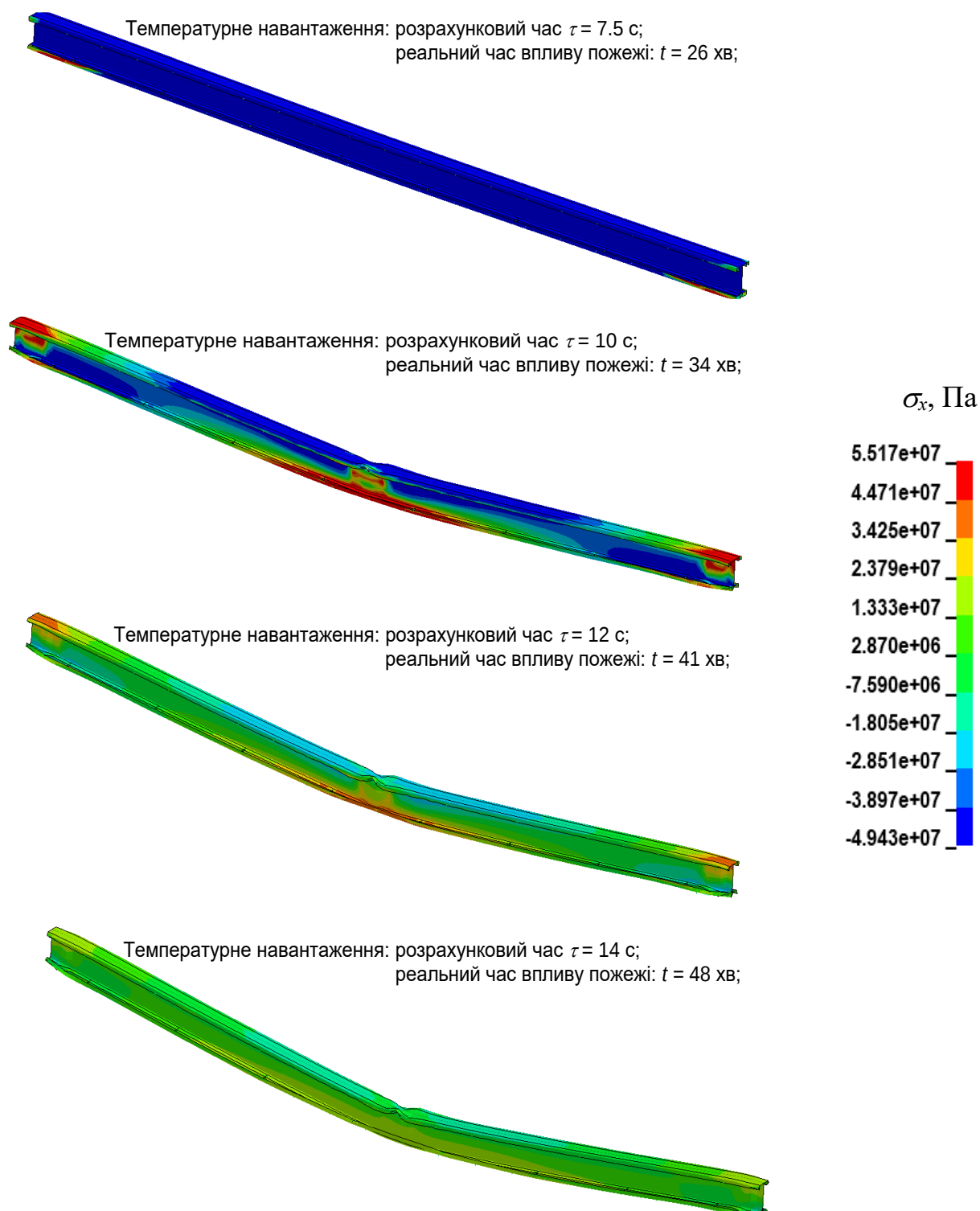


Рис. 4.18. Розподілення поздовжніх нормальних напружень при покроковому прикладанні температури вузлах скінченно-елементної моделі балки.

При поступовому прикладанні температурних даних у вузлах сітки було отримано результати, за якими можна прослідкувати, що максимального рівня приблизно 56 МПа величина напружень досягає біля

26 хв під час досягнення температурного значення нагріву сталеві балки біля 160 °С. Після проходження піку вони починають спадати і концентруватися у локальних зонах, що показує наростання на даній стадії пластичних деформацій на кінцях і у середині балки. У момент часу 25 хв перебігу пожежі мають місце руйнування та відшарування гіпсокартонних плит. Таким чином, при значенні температури 389 °С має місце помітна деструкція вогнезахисного гіпсокартонного облицювання. При величині температури 567 °С стають помітні ознаки локальної втрати стійкості, такі як складки у стінці та полках двотаврової балки всередині балки у її кінцях, що закріплені. Також у даних умовах можна побачити подальше руйнування гіпсокартонного вогнезахисного облицювання у місцях, де воно закріплене на сталевому профілі.

На рис. 4.19. показано криві максимального прогину та швидкості наростання максимального прогину сталеві балки із вогнезахисним облицюванням у залежності від часу протікання пожежі.

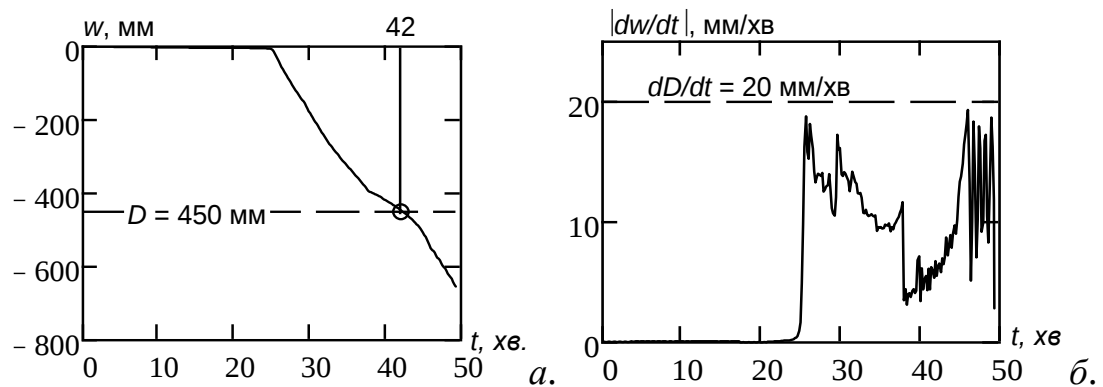


Рис. 4.19. Криві найбільшого прогину сталеві балки з вогнезахисним гіпсокартонним облицюванням (а) та швидкості нарощення найбільшого прогину (б) у залежності від часу протікання пожежі.

На кривих рис. 4.19. показані значення найбільшого прогину D сталеві балки та швидкості dD/dt зростання найбільшого прогину балки. Коли відбувається їхнє перевищення, то фіксується виникнення граничного стану втрати несучої здатності сталеві балки із вогнезахисним

гіпсокартонним облицюванням. Критичні показники деформацій балки обчислюються за рівностями, що подані у стандарті [5]:

$$D = \frac{l^2}{400H}, \quad \frac{dD}{dt} = \frac{l^2}{9000H}. \quad (4.47)$$

Аналізуючи криві, показані на рис. 4.18., фіксується, що виникнення стану втрати вогнестійкості через втрату несучої здатності настає на 42 хв перебігу пожежі.

Для дослідження цілісності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання сталеві балки були розглянуті розташування та геометрична конфігурація гіпсокартонного облицювання у різні моменти часу протікання пожежі. Дані картини показані на рис. 4.20.

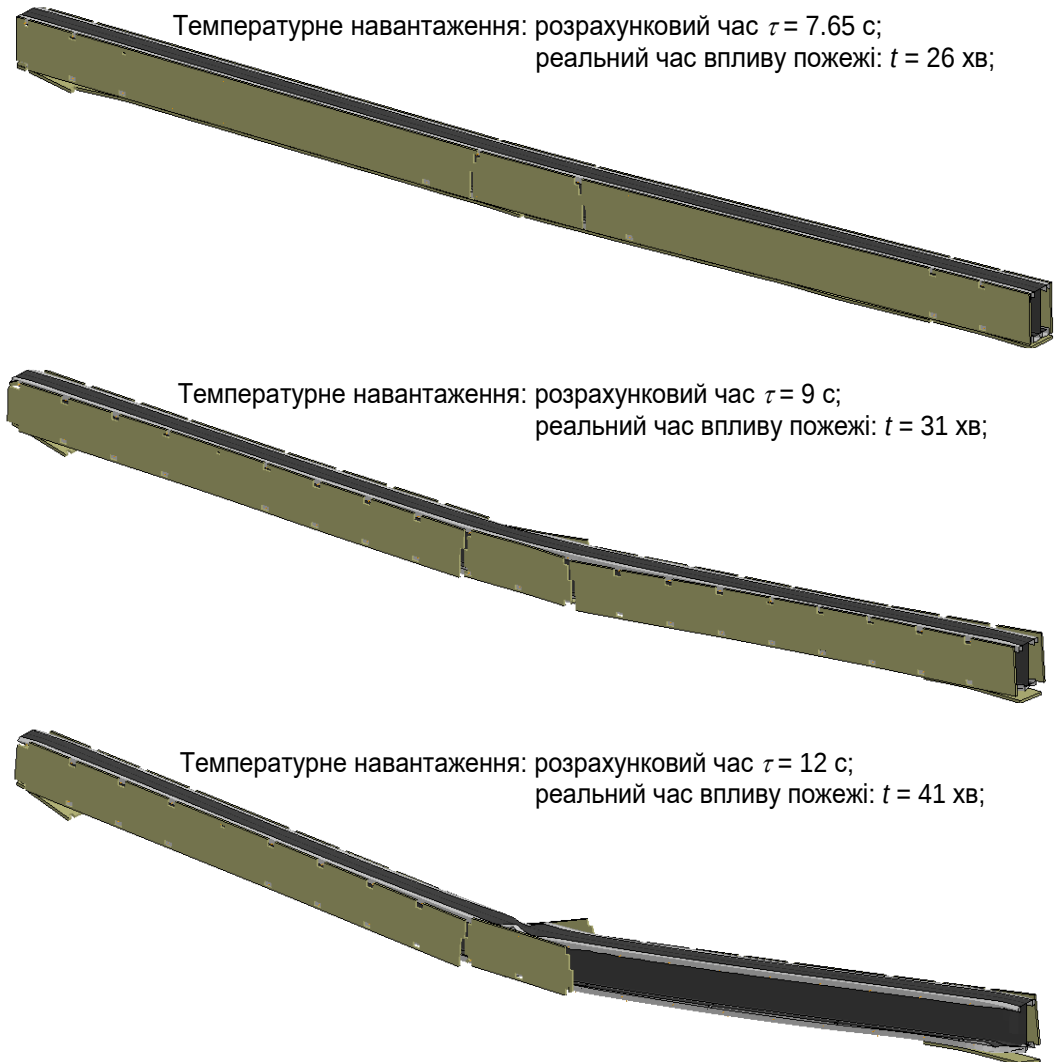


Рис. 4.20. Розташування та геометрична конфігурація гіпсокартонного вогнезахисного облицювання у різні моменти часу протікання пожежі.

Картина руху частин гіпсокартонного вогнезахисного облицювання даної сталеві балки свідчить, що початок утворення наскрізних дефектів в облицюванні фіксується після 26 хв перебігу пожежі. Для встановлення моменту, коли гіпсокартонне вогнезахисне облицювання руйнується із утворенням наскрізних дефектів і, як наслідок цього, втрачається вогнезахисна здатність, можна застосувати ознаки настання граничного стану втрати цілісності. Згідно із стандартом [2, 5] втрата цілісності огорожувальними конструкціями може бути ідентифікована у момент часу появи наскрізних дефектів, крізь які можуть проходити полум'я, продукти горіння і т.д. Настання втрати цілісності може бути пов'язано із трьома ознаками: початок помітного горіння чи тління ватного тампона, який розташований поблизу місць розташування тріщин на відстані від 20 мм до 30 мм в інтервалі часу менше за 30 с; появи тріщин, крізь береги якої можна без зусиль занурити усередину конструкції шуп діаметром не менше 6 мм і просунути його вглиб тріщини на довжину завбільшки 150 мм; появи дефектів, крізь які можна без зусиль занурити у середину матеріалу шуп діаметром 25 мм. Враховуючи викладене, природно розглядати ознаку появи отворів або тріщин 25 мм, тож даний показник будемо використовувати для фіксації стану, при якому руйнування гіпсокартонного вогнезахисного облицювання є критичним для продовження його вогнезахисної здатності.

З метою встановлення критичного стану руйнування гіпсокартонного вогнезахисного облицювання із подальшою втратою вогнезахисної здатності було побудовано криві змінення координат двох точок на краях дефекту, що рухаються при збільшенні його ширини, подані на рис. 4.21. З огляду на це, вибране відповідне місце утворення дефекту, враховуючи зображення на рис. 4.19. Використовуючи побудовані криві змінення координат даних точок, був розрахований зазор між ними за рівністю [62 – 65]:

$$s = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2}, \quad (4.48)$$

x_1, y_1, z_1 – координати локації першої точки дефекту у вогнезахисному облицюванні;

x_0, y_0, z_0 – координати локації другої точки дефекту у вогнезахисному облицюванні.

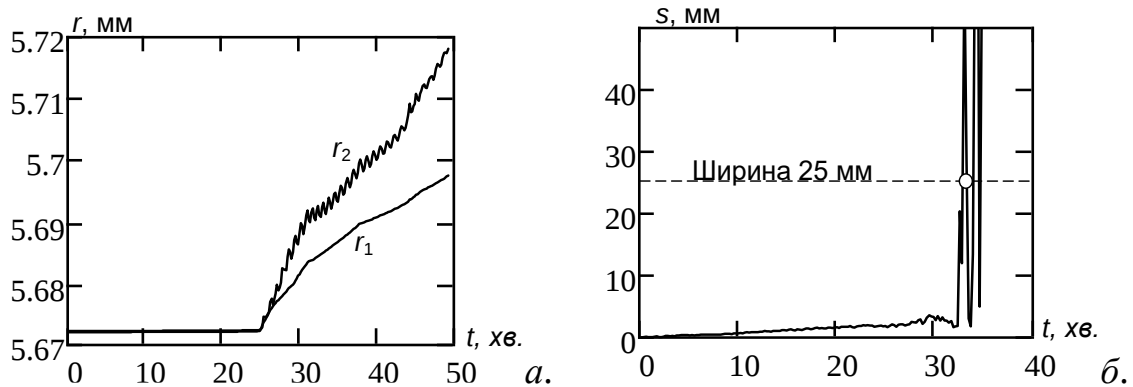


Рис. 4.21. Графіки зміни значення загальних координат точок, розташованих на найбільшому наскрізному дефекті (а), графік наростання максимального зазору залежно від часу перебігу пожежі (б).

На показаних кривих на рис. 4.20. відмічений момент досягнення критичного розкриття наскрізного дефекту при локальному руйнуванні облицювання завбільшки 25 мм. Це дало змогу з'ясувати, що розкриття країв наскрізного дефекту більше 25 мм фіксується на 34 хв перебігу пожежі при температурі нагрівання сталеві балки 255 °С.

Аналізуючи дані, подані на рис. 4.18. та рис. 4.20., можна помітити, що втрата вогнезахисної здатності гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням спостерігається раніше на 11 хв за появу граничного стану втрати несучої здатності. Це означає, що обчислення повинно здійснюватися до цієї величини, вважаючи що облицювання зберігає свою вогнезахисну здатність, а після цього моменту вогнезахист не має враховуватися, оскільки він руйнується.

4.5. Висновки до розділу.

Враховуючи викладені у даному розділі результати виконаних досліджень можна вказати на такі висновки:

- було вивчено поведінку сталевій балки з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням протягом перебігу пожежі в інтервалі від 0 до 60 хв.;

- у час перебігу пожежі 34 хв при температурі 255 °С спостерігається поява наскрізних дефектів у вогнезахисному облицювання, а при температурі 483 °С фіксуються ознаки порушення локальної стійкості сталевій балки у вигляді складок на стінці та полицях її двотаврового перерізу всередині прольоту та на її кінцях;

- показано, що виникнення стану несучої здатності сталевій балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням відбувається на 42 хв впливу пожежі із стандартним температурним режимом;

- показано, що розкриття наскрізного дефекту між балкою та частинами гіпсокартонного вогнезахисного облицювання більше 25 мм фіксується у момент часу 34 хв при досягненні величини температури нагрівання сталевій балки 255 °С;

- показано, що порушення вогнезахисної здатності гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням за ознакою розкриття наскрізного дефекту у ньому більше за 25 мм спостерігається раніше на 11 хв за настання граничного стану втрати несучої здатності, що має враховуватися при відповідних обчисленнях.

РОЗДІЛ 5

МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ БАЛОК ІЗ ГІПСОКАРТОННИМ ВОГНЕЗАХИСНИМ ОБЛИЦЮВАННЯМ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ВТРАТИ ВОГНЕЗАХИСНОЇ ЗДАТНОСТІ

5.1. Відтворення температурного режиму нагріву сталеві балки за умови втрати вогнезахисної здатності гіпсокартонного вогнезахисного покриття.

При обґрунтуванні температурного режиму нагріву сталеві балки при пожежі має бути враховано втрату вогнезахисної здатності гіпсокартонним облицюванням під тепловим впливом пожежі. Це досягається шляхом використання виразу визначення температури $\Delta\theta_{a,t}$ за проміжок часу Δt при наявності і відсутності вогнезахисту. Формула для визначення вогнестійкості із наявним вогнезахистом, який має вигляд [3, 4, 62 – 65]:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p}{V d_p c_a \rho_a} \cdot \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1 + \phi/3)} \cdot \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \cdot \Delta\theta_{g,t} \quad (\Delta\theta_{a,t} \geq 0 \text{ при } \Delta\theta_{g,t} > 0), \quad (5.1)$$

$$\text{де: } \phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} \cdot d_p A_p / V ,$$

де: A_p / V – коефіцієнт перерізу сталеві балки;

c_a —питома теплоємність сталі, Дж/(кг·°С);

$c_p = 1000$ — питома теплоємність гіпсокартонного вогнезахисного облицювання Дж/(кг·°С);

d_p — товщина гіпсокартонного вогнезахисного облицювання м;

$\Delta t = 30$ — крок за часом часу с;

$\theta_{a,t}$ — температура сталі у момент часу t (°С);

$\theta_{g,t}$ — температура пожежі у момент часу t (°С);

$\Delta\theta_{g,t}$ — прирощення температури пожежі за час Δt , °C;

λ_p — коефіцієнт теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання Вт/(м·°C);

$\rho_a = 7850$ — густина сталі, кг/м³;

$\rho_p = 200$ — густина гіпсокартонного вогнезахисного облицювання, кг/м³.

Рівняння (5.1) використовується до моменту руйнування гіпсокартонного вогнезахисного облицювання, тобто до моменту часу 34 хв перебігу пожежі та при температурі нагрівання сталеві балки 255 °C. Після цього приймається, що гіпсокартонне вогнезахисне облицювання втрачає свою вогнезахисну здатність і має проводитися обчислення за формулою, що дозволяє обчислити поточне прирощення температури $\Delta\theta_{a,t}$ за проміжок часу Δt , що відповідає кроку за часом [3, 4, 62 – 65]:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \cdot \frac{A_m}{V c_a \rho_a} \cdot \dot{h}_{net} \Delta t, \quad (5.2)$$

де: k_{sh} — коефіцієнт для врахування ефекту затінення балки іншими конструкціями;

$\dot{h}_{net}$ — величина загального теплового потоку, Вт/м².

Загальний тепловий потік розраховується за формулою [3]:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r}, \quad (5.3)$$

де: $\dot{h}_{net,c}$ — загальний тепловий потік теплообміну конвекцією;

$\dot{h}_{net,r}$ — загальний тепловий потік теплообміну випромінюванням.

Загальний тепловий потік теплообміну конвекцією, що розраховується за формулою [3]:

$$\dot{h}_{\text{net},c} = \alpha_c(\theta_g - \theta_m), \quad (5.4)$$

де: $\alpha_c = 25$ – коефіцієнт тепловіддачі при теплообміні за рахунок конвекції,
 $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$;

θ_g – температура температурного режиму пожежі, $^{\circ}\text{C}$;

θ_m – температура нагрівання сталеві балки, $^{\circ}\text{C}$.

Загальний потік тепла при теплообміні зарахунок випромінювання,
 $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$, який обчислюється за таким виразом [3]:

$$\dot{h}_{\text{net},r} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot ((\theta_g + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4), \quad (5.5)$$

де: $\Phi = 1$ – форм-фактор випромінювання, що падає на поверхню сталеві балки;

ε_m – ступінь чорноти сталеві балки;

$\varepsilon_f = 1$ – ступінь чорноти випромінювання у повітрі при пожежі;

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ – постійна Стефана – Больцмана.

Такий підхід дає змогу обчислити температуру за формулою (5.2), якщо початкова температура в момент початку використання даної формули прийнята як температура при втраті вогнезахисної здатності гіпсокартонного облицювання, обчислена за рівнянням (5.1).

Застосовуючи викладений алгоритм, були виконані відповідні обчислення, у результаті чого побудовано температурний режим нагріву сталеві балки з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням за умови його втрати цілісності на 34 с при температурі нагрівання сталеві балки 255°C згідно із результатами обчислень, які викладені у 4 розділі дійсної роботи. Одержаний температурний режим нагрівання балки наведений на рис. 5.1.

Криві, наведені на рис. 5.1. дають змогу побачити, що на 34 хв температура сталеві балки починає суттєво зростати і за 5 хв наближується до стандартної температурної кривої пожежі. Одержану температурну криву

можна застосувати для проведення обчислень з встановлення несучої здатності сталевій балці, в момент коли вогнезахисна здатність гіпсокартонного облицювання раптово втрачається унаслідок його руйнування.

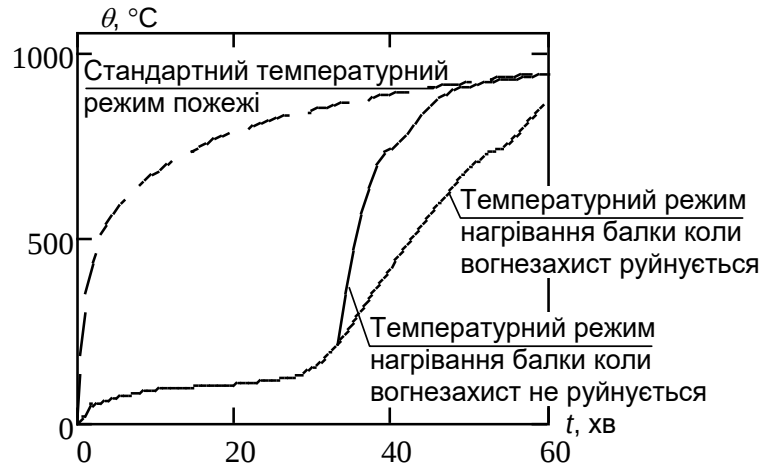


Рис. 5.1. Температурний режим нагріву сталевієї балки з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням при дії стандартного температурного режиму пожежі з врахуванням та без врахування втрати облицюванням вогнезахисної здатності.

5.2. Розрахунок вогнестійкості сталевієї балки при втраті вогнезахисної здатності гіпсокартонного облицювання.

При розрахунку вогнестійкості сталевієї балки при втраті вогнезахисної здатності гіпсокартонним облицюванням з причини утворення у ньому наскрізних дефектів, було застосовано алгоритм обчислень, описаний у попередньому розділі дійсної роботи. Тут відсутня необхідність враховувати наявне гіпсокартонне вогнезахисне облицювання з огляду на те, що температурний режим нагріву сталевієї балки одержано.

При обчисленні характеристик напружено-деформованого стану (НДС) у сталевій балці із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням, коли у визначений момент часу воно втрачає свою вогнезахисну здатність. При цьому використовуються конструктивні дані перерізу, описані у

попередньому розділі даної роботи. При цьому довжина прольоту балки як і раніше становить 6 м. На рис. 5.2. показана скінченно-елементна модель досліджуваної сталеві балки.

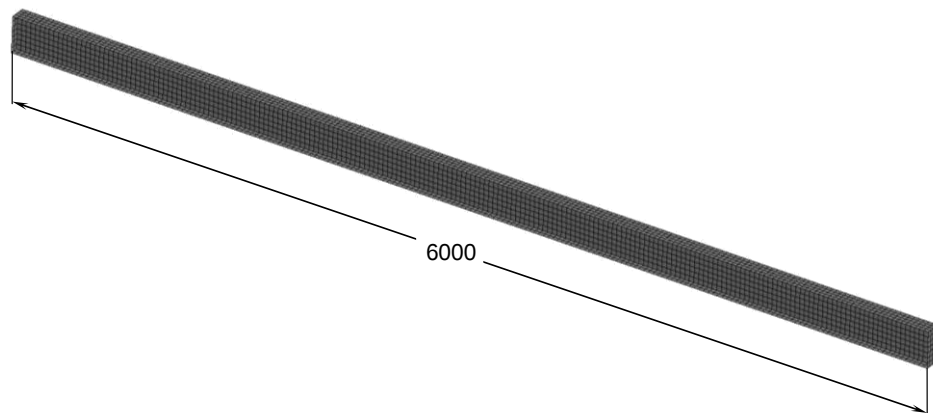


Рис. 5.2. Скінченно-елементна схема сталеві балки при врахуванні втрати вогнезахисної здатності гіпсокартонного облицювання.

При побудованні скінченно-елементної моделі було застосовано двовимірні СЕ типу SHELL типу оболонок Беличко-Цая [3, 4, 62 – 65]. Матеріалом досліджуваної балки є пружно-пластичний матеріал із можливістю врахування температурних деформацій [3, 4, 62 – 65].

У табл. 5.1. подані кількісні дані щодо СЕ скінченно-елементної моделі даної балки.

Таблиця 5.1

Кількісні дані щодо скінченно-елементної моделі балки

Кількість СЕ	Кількість СЕ типу SHELL
3044	3044

До сталеві балки перед долучанням температурного навантаження прикладається поступово навантаження від власної ваги та діюче розподілене навантаження, що діє протягом перебігу розрахунку, тривалість якого становить 17.5 с. Фактор часу має умовне значення і відповідає реальному часу теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі 60 хв.

Схема прикладення навантажень до сталевій балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням показана на рис. 5.3. На даній схемі відтворений спосіб прикладання та напрямок діючого навантаження та умови фіксації кінців балки.

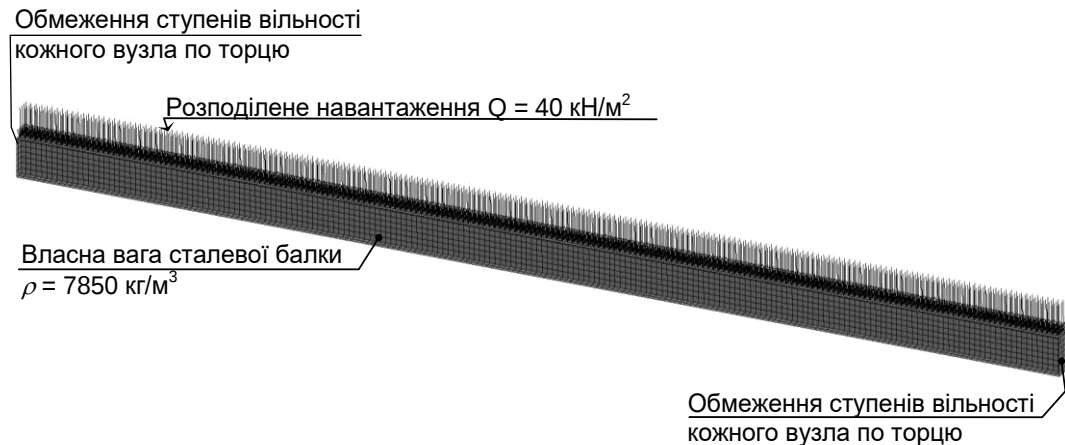


Рис. 5.3. Розрахункова схема умов закріплення та прикладення механічного навантаження сталевій балки.

Рівень розподіленого навантаження прийняте відповідно до рівня навантаження $\mu = 0.5$.

Механічні властивості матеріалу балки описані у 4 розділі даної роботи.

Навантаження надавалося поступово відповідно до кривих, які показані на рис. 4.15. Для мінімізації негативного впливу коливального руху при прикладанні навантажень за встановлений розрахунковий час на етапі прикладання навантаження від власної ваги розрахунок здійснювався з використанням алгоритму динамічної релаксації за обчислювальним алгоритмом Пападракакіса [84]. Інші динамічні процеси були обчислені із застосованою опцією повного демпфування із значенням коефіцієнту 0.14.

Криві, які описують механізм послідовного навантаження, показані на рис. 4.15 так само застосовані у цьому разі, шкали розрахункового часу та часу реального впливу пожежі відповідають співставленню, поданому на рис. 4.16.

Після здійснення обчислень було отримано одержані результати, що показані на рис. 5.4. у вигляді кривих найбільшого прогину сталеві балки залежно від часу протікання пожежі.

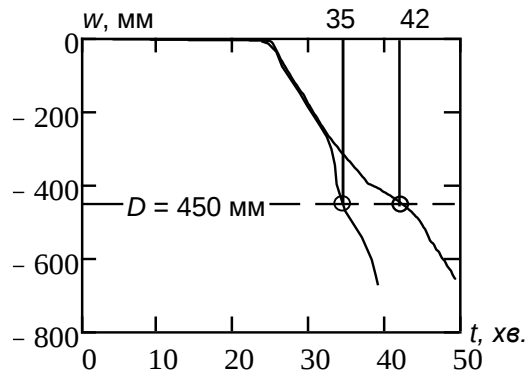


Рис. 5.4. Криві змінення найбільшого прогину сталеві балки залежно від часу протікання пожежі: 1 – для балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням, що зберігає вогнезахисну здатність; 2 – для балки із гіпсокартонним вогнезахистом із порушеною вогнезахисною здатності.

Критичне значення величини максимального прогину визначено за формулою (4.47) і становить величину, обчислену як раніше, оскільки геометричні дані балки не змінюються.

Криві, подані на рис. 5.4. свідчать про те, що межа вогнестійкості фіксується на 35 хв. Також можна зафіксувати, що одержаний час появи граничного стану втрати несучої здатності раніше на 7 хв при умові нехтуванням втратою вогнезахисної здатності гіпсокартонним вогнезахистом унаслідок утворення наскрізних дефектів у вогнезахисному облицюванні. Це доводить важливість врахування порушення вогнезахисної здатності вогнезахисним облицюванням даного типу. Крім цього, втрата вогнезахисної здатності облицювання пов'язана із ризиком шокowego теплового удару на сталеву балку. Це можна прослідкувати на кривій максимального прогину під час втрати вогнезахисної здатності гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням.

Під час досліджень впливу конструктивних характеристик балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням на їхню вогнестійкість були здійснені обчислення, було виконано процедуру, що викладено вище і дані процедури були виконані у описаній нижче послідовності.

1. Обчислюється температурний режим нагрівання балки із визначеними конструктивними характеристиками в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі за рівністю (5.1).

2. Використовуючи вирази (4.2) – (4.44) та математичні моделі властивостей матеріалів досліджуваної балки, що викладено у попередньому розділі дійсної роботи, обчислюється час перебігу пожежі, при якому фіксується порушення вогнезахисної здатності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання балки внаслідок утворення у ньому наскрізних дефектів, шириною більше як 25 мм.

3. Обчислюється інший температурний режим нагрівання сталевій балки, використовуючи обчислене значення часу перебігу пожежі, при якому відбувається втрата вогнезахисної здатності гіпсокартонного облицювання внаслідок утворення у ньому наскрізних дефектів. Даний режим має бути подібним до показаного на рис. 5.1. При цьому мають бути використані формули (5.1) – (5.5)

4. Застосовуючи формули (4.2) – (4.41) та математичні моделі властивостей матеріалів, що викладено у 4 розділі дійсної роботи у табл. 4.2. та табл. 4.3., обчислюється межа вогнестійкості, як це показано на рис. 5.4.

Проведені розрахунки обчислення за викладеною методикою дозволили одержати результати у вигляді графіку залежності часу втрати вогнезахисної здатності гіпсокартонного облицювання та кривої межі вогнестійкості залежно від конструктивних характеристик сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням. Такими характеристиками є коефіцієнт перерізу балки, рівень навантаження та товщина гіпсокартонного вогнезахисного облицювання. Одержані криві показані на рис. 5.5.

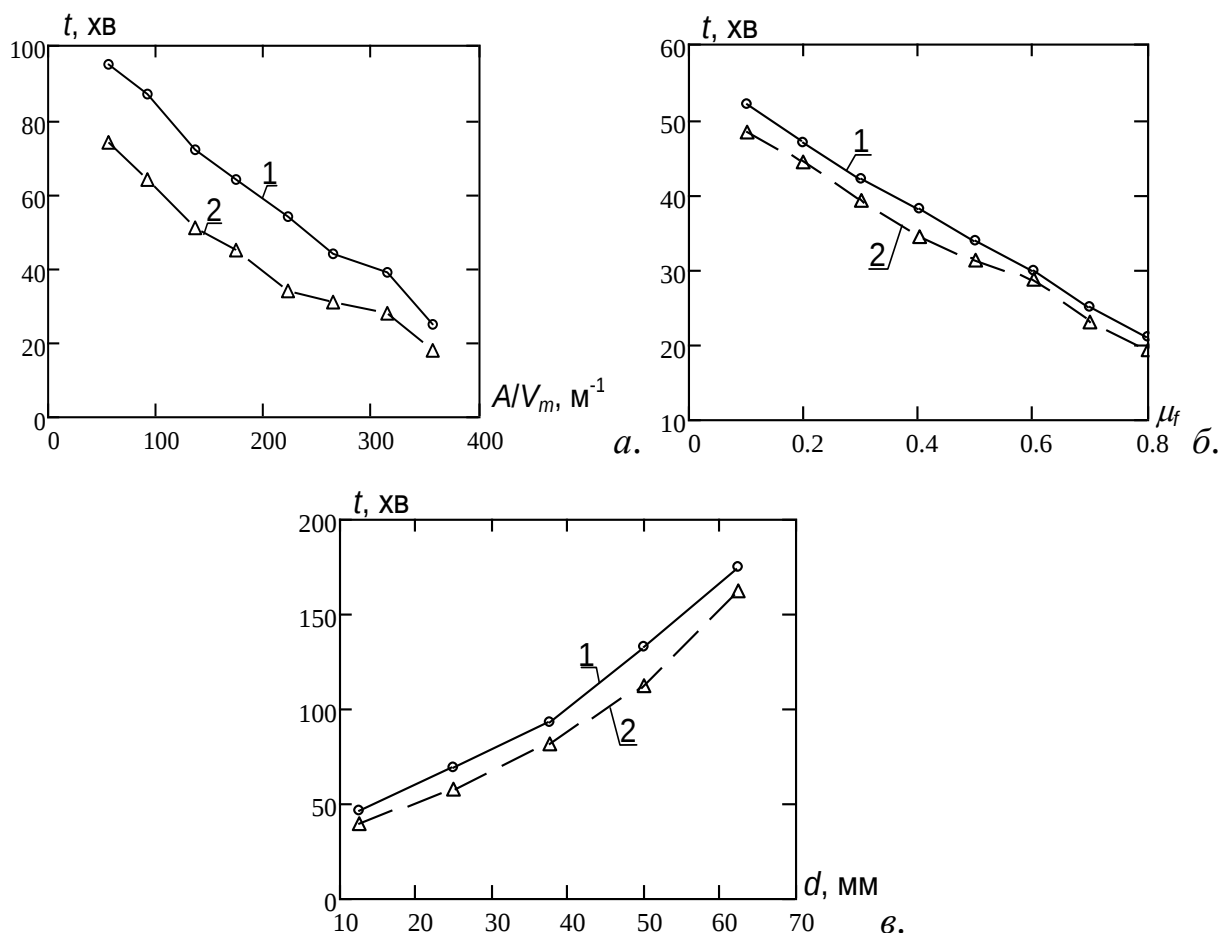


Рис. 5.5. Криві залежностей межі вогнестійкості сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням (1) та часу настання втрати вогнезахисної здатності гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням (2): а - від коефіцієнту перерізу балки; б – від рівня навантаження; в – від товщини гіпсокартонного вогнезахисного облицювання.

Отримані криві показують, що вогнестійкість сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням суттєво залежить від вибраних характеристик, а її характер близький до лінійного.

5.3. Методика здійснення числового повнофакторного експерименту.

Для обґрунтування удосконаленого методу конструювання сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням при врахуванні

втрати його вогнезахисної здатності внаслідок утворення наскрізних дефектів у ньому у результаті теплового впливу пожежі має бути розроблена система коригувальних коефіцієнтів для пониження величини межі вогнестійкості як результат впливу цього ефекту. При цьому було б ефективно застосовувати регресійну модель, яка може бути одержана шляхом проведення числового повнофакторного експерименту.

З метою одержання регресійної моделі було прийнято план числового повнофакторного експерименту при варіюванні найбільш значущих та незалежних факторів, які впливають на час настання руйнування гіпсокартонного вогнезахисного облицювання з утворенням наскрізних дефектів шириною більше 25 мм. Враховуючи отримані результати проведених досліджень, інформація про які викладено вище у попередніх розділах дійсної роботи. Запропоновано у якості даних незалежних факторів використовувати коефіцієнт перерізу сталеві балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням A/V_m , товщину шару гіпсокартонного вогнезахисного облицювання d та коефіцієнт величини навантаження μ_f . В табл. 5.2. наведено встановлені границі діапазонів факторів для проведення числового повнофакторного експерименту.

Таблиця 5.2

Діапазони варіювання прийнятих факторів числового повнофакторного експерименту

Коефіцієнт перерізу балки, $A/V_m, \text{ м}^{-1}$			Товщина шару вогнезахисного облицювання, мм			Коефіцієнт навантаження		
Найменше значення, A/V_{m-1}	Середнє значення, A/V_{m0}	Найбільше значення, A/V_{m1}	Найменше значення, d_{-1}	Середнє значення, d_0	Найбільше значення, d_1	Найменше значення, μ_{-1}	Середнє значення, μ_0	Найбільше значення, μ_1
56	206	356	12.5	37.5	62.5	0,1	0,5	0,8

Криві, наведені на рис. 5.5. показують, що межа вогнестійкості та часу фіксації втрати вогнезахисної здатності вогнезахисного гіпсокартонного облицювання мають майже лінійну залежність від найбільш впливових характеристик конструкції сталеві балки. Даний факт дозволяє прийняти гіпотезу, що шукана регресійна залежність межі вогнестійкості сталеві балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням за граничним станом порушення несучої здатності також має лінійний характер. При цьому найбільш значущі фактори, що по суті є конструктивними характеристиками сталеві балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням, встановлені для визначення регресії є незалежними за їх природою.

Враховуючи викладені вище твердження та міркування, можна припустити, що регресійна залежність межі вогнестійкості сталеві балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням за граничним станом порушення несучої здатності від встановлених конструктивних характеристик, має вигляд поданий нижче [73 – 76]:

$$q(p) = c_0 + c_1p_1 + c_2p_2 + c_3p_3 + c_4p_1p_2 + c_5p_1p_3 + c_6p_2p_3 + c_7p_1p_2p_3. \quad (5.6)$$

Тут: $c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7$ – коефіцієнти регресії.

Під час розрахунку коефіцієнтів регресії(5.6) треба було визначити 8 експериментальних ситуацій для числового розрахунку. Результати числових експериментальних розрахунків мають бути одержані за ортогональним планом експерименту, відповідному матриці плану, наведеної у табл. 5.3.

Таблиця 5.3

План повнофакторного експерименту

№ експ.	p_1	p_2	p_3	p_1p_2	p_1p_3	p_2p_3	$p_1p_2p_3$
1	+	+	+	+	+	+	+
2	-	+	+	-	-	+	-
3	+	-	+	-	+	-	-

Продовження табл. 5.3

4	-	-	+	+	-	-	+
5	+	+	-	+	-	-	-
6	-	+	-	-	+	-	+
7	+	-	-	-	-	+	+
8	-	-	-	+	+	+	-

Під час виконання обчислень при здійсненні процедур повного факторного експерименту було залучено математичне описання, що викладене вище у попередньому розділі та цьому розділі даної роботи. При цьому було залучено методику розрахунку межі вогнестійкості з врахуванням зміни характеру температурного режиму нагріву сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням у разі втрати ним вогнезахисної здатності. На додаток було використано розрахунковий алгоритм оцінювання несучої здатності сталевих балок із встановленими конструктивними характеристиками, викладений вище у попередньому пункті цього розділу дійсної роботи. Основні конструктивні параметри характеристики сталевих балок з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням та механічні властивості конструкційної сталі показані у табл. 5.4.

Таблиця 5.4

Загальні характеристики досліджуваних балок з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням

Характеристики	Позначення характеристик	Величина	Одиниця виміру
Геометричні розміри			
• ширина перерізу	s	100	мм
• висота	H	200	
• ширина захисного шару	d_p	(див. табл. 5.2)	
• довжина	L	6000	
Матеріал покриття	Гіпсокартонні листи «Кнауф Україна»		

Продовження табл. 5.4

Густина сталі	ρ_{st}	7860	кг/м ³
Густина гіпсокартону	ρ_e	950	кг/м ³
Теплофізичні властивості		Дані табл. 3.7 і табл. 3.8	
Гранична вологість	γ	< 3	%
Гранична міцність сталі	$f_{c,0,k}$	245	МПа
Модуль Юнга сталі	E	$2.1 \cdot 10^2$	ГПа

Конструктивні характеристики сталевих балок, наведені у табл. 5.4., дозволили здійснити необхідні розрахунки згідно із матрицею ортогонального плану експерименту відповідно до табл. 5.3. У результаті було обчислено межі вогнестійкості сталевих балок з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням. Одержані дані виконаних розрахунків зведені до табл. 5.4.

Таблиця 5.5

Час втрати вогнезахисної здатності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання сталевих балок за результатами проведеного повного факторного експерименту

Експериментальна ситуація згідно із планом експерименту	1	2	3	4	5	6	7	8
Межа вогнестійкості з втратою вогнезахисної здатності, q_i , хв	32	108	21	44	51	145	34	64

Використовуючи дані табл. 5.4., було обчислено коефіцієнти регресії (5.9) із застосуванням формул, що записані нижче [73 – 76]:

$$c_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N q_i ; c_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_1 q_i ; c_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_2 q_i ; c_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_3 q_i ; c_4 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_1 p_2 q_i ;$$

$$c_5 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_1 p_3 q_i ; c_6 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_2 p_3 q_i ; c_7 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_1 p_2 p_3 q_i \quad (5.7)$$

де: $N = 8$ – загальна кількість експериментальних випадків відповідно до встановленого плану числових експериментів;

p_i – величина фактору згідно із планом числових експериментів (табл. 5.3);

q_i – значення межі вогнестійкості сталевих балок з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням за табл. 5.5.

Результати розрахунку коефіцієнтів регресії показані у табл. 5.6.

Таблиця 5.6

Коефіцієнти регресії для часу порушення вогнезахисної здатності гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням сталеві балки

Коефіцієнт	c_0 ,	c_1 ,	c_2 ,	c_3 ,	c_4 ,	c_5 ,	c_6 ,	c_7
Величина	136.14	- 0.119	0.879	- 111.7	- $8 \cdot 10^4$	- $7,1 \cdot 10^3$	0,961	$1,9 \cdot 10^{-4}$

З використанням одержаної регресійної залежності, було побудовано поверхні залежності часу втрати вогнезахисної здатності гіпсокартонним облицюванням сталевих балок від значущих факторів при розгляді різних показників товщини гіпсокартонного вогнезахисного облицювання, що показані на рис. 5.6. На даних поверхнях встановлені рівні, відповідні різним показникам часу втрати вогнезахисної здатності гіпсокартонного облицювання для досліджуваних сталевих балок.

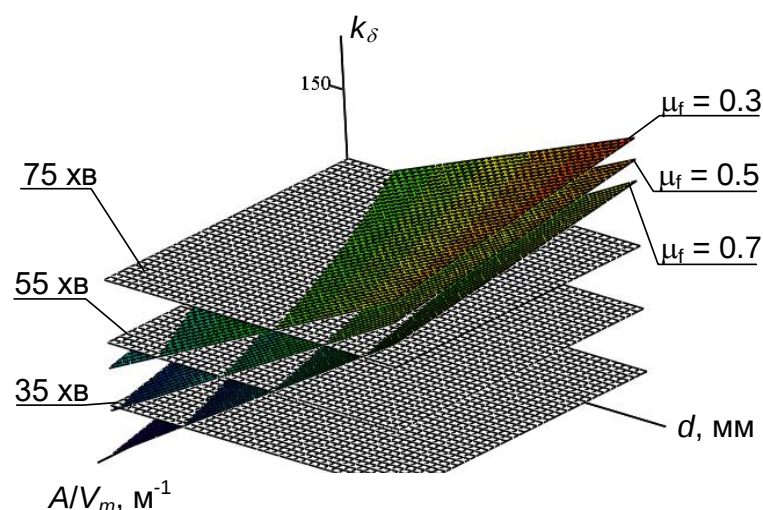


Рис. 5.6. Поверхні залежностей часу втрати вогнезахисної здатності гіпсокартонним облицюванням для досліджуваних сталевих балок для оцінювання їхньої межі вогнестійкості.

При дослідженні впливу значущих конструктивних характеристик сталевих балок на час втрати вогнезахисної здатності гіпсокартонним облицюванням досліджуваних сталевих балок було досліджено залежності вказаних характеристик їхньої конструкції одне від одного при трьох найбільш поширених величинах товщини гіпсокартонного вогнезахисного облицювання: 25 мм, 50 мм та 75 мм, що кратні товщині гіпсокартонних листів. На рис. 5.7. показані побудовані номограми.

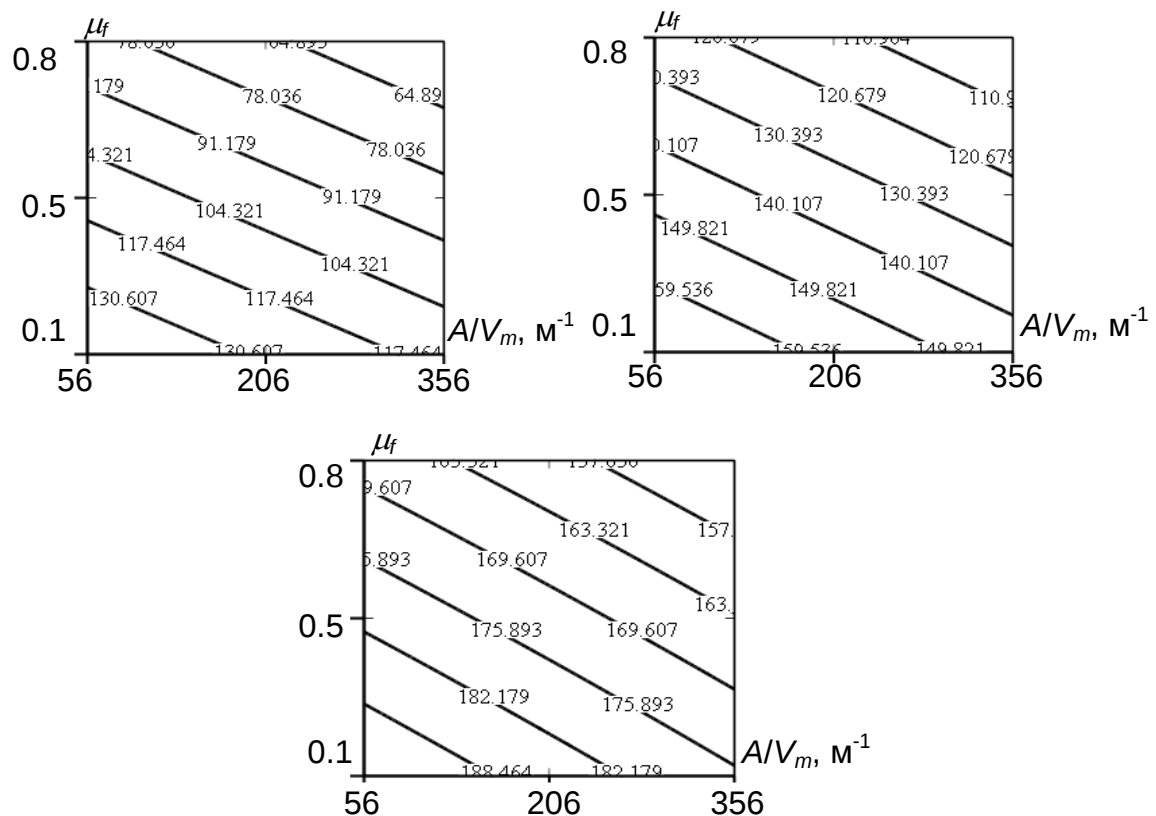


Рис. 5.7. Залежності часу порушення цілісності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання сталевій балки від коефіцієнту перерізу та коефіцієнту навантаження для різних значень його товщини: а – 25 мм; б – 50 мм; в – 75 мм.

Отримані дані дозволяють виконати оцінювання меж вогнестійкості сталевих балок із врахуванням порушенням вогнезахисної здатності гіпсокартонним облицюванням для відповідності встановлених нормованих вогнестійкості.

5.4. Удосконалена методика оцінювання вогнестійкості сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням з врахуванням втрати його вогнезахисної здатності.

Для розроблення удосконалення методу конструювання сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням була обґрунтована обчислювальна методика, що має у своїй основі розрахунок часу втрати вогнезахисної здатності гіпсокартонним облицюванням у подальшому його врахування при оцінюванні вогнестійкості. Запропонована методика реалізується при виконанні такої послідовності обчислювальних операцій.

1. За коефіцієнтом перерізу сталеві балки, коефіцієнтом навантаження та товщиною гіпсокартонного вогнезахисного облицювання, за розробленими номограмами, показаними на рис. 5.7., встановлюється час втрати вогнезахисної здатності гіпсокартонним облицюванням унаслідок утворення наскрізних дефектів шириною більше 25 мм під тепловим впливом пожежі.

2. Значення часу втрати вогнезахисної здатності гіпсокартонним облицюванням використовується для розрахунку за формулами (5.1) – (5.5) режиму нагрівання сталеві балки в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі, наведеного на рис. 5.1.

3. Одержаний температурний режим нагріву сталеві балки і розрахункові методики, рекомендовані EN 1993-1-2 : 2005 використовуються для оцінювання класу вогнестійкості досліджуваної сталеві балки.

5.5. Висновки.

За допомогою виконаних досліджень було розв'язано задачу виявлення закономірностей залежності межі вогнестійкості та часу втрати вогнезахисної здатності гіпсокартонним облицюванням унаслідок утворення

наскрізних дефектів шириною більше 25 мм під тепловим впливом пожежі. У результаті одержано наступні результати:

- запропонована методика визначення температурного режиму нагріву перерізу сталевих балок з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням та здійснені розрахунки для балки двотаврового перерізу 100×200 за даним режимом і показано, що після втрати гіпсокартонним облицюванням вогнезахисної здатності унаслідок утворення наскрізних дефектів шириною більше 25 мм під тепловим впливом пожежі значно підвищується і стає більше у 1.5-2 рази за температуру, розраховану за умови відсутності руйнування;

- запропонована методика обчислення несучої здатності сталевій балці з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням, у якому утворюються наскрізні дефекти певний момент часу перебігу пожежі, і показано, що межа вогнестійкості балки настає на 34 хв за графіком максимального прогину, що на 7 хв спостерігається раніше, ніж результат, одержаний за умови відсутності утворення наскрізних дефектів;

- виконаний повний факторний експеримент за допомогою запропонованих методик розрахунку несучої здатності сталевих балок з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням і встановлено закономірності у вигляді математичної моделі зміни залежності часу втрати гіпсокартонним облицюванням вогнезахисної здатності залежно від коефіцієнту перерізу, товщини гіпсокартонного облицювання та рівня навантаження, яке має вигляд регресії $t_c = 136.14 - 0.119 \cdot A/V_m + 0.879 \cdot d - 111,742 \cdot \mu_f - 0,8 \cdot 10^3 \cdot A/V_m \cdot d - 0,0071 \cdot A/V_m \cdot \mu_f + 0,961 \cdot d \cdot \mu_f + 1,9 \cdot 10^{-4} \cdot A/V_m \cdot d \cdot \mu_f$;

- побудовані номограми для обчислення часу втрати гіпсокартонним облицюванням вогнезахисної здатності сталевих балок в залежності від їхнього коефіцієнту перерізу та рівня навантаження при трьох величинах товщини гіпсокартонного вогнезахисного облицювання;

- запропонована обчислювальна методика оцінювання вогнестійкості сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним

облицюванням за допомогою величини часу втрати гіпсокартонним облицюванням вогнезахисної здатності, визначеного за запропонованими номограмами та рекомендацій другої частини Єврокоду 3.

ВИСНОВКИ

Дисертація, яка є завершеною науковою роботою, містить результати розв'язку актуальної науково-практичної задачі з удосконалення розрахункового методу оцінювання вогнестійкості сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням, при цьому враховується можливість втрати вогнезахисної здатності вогнезахисного облицювання в умовах пожежі внаслідок утворення наскрізних дефектів шириною більше 25 мм. З цією метою було вивчено і розкрито закономірності залежності часу порушення вогнезахисної здатності гіпсокартонного облицювання залежно від характеристик конструкції сталевих балок із таким типом вогнезахисту. Основними виносяться такі положення.

1. Аналіз статистики пожеж, зафіксованих в Україні, вказує на велику кількість обвалень будівельних конструкцій спричинених пожежами включно з причин їхньої невідповідності до вимог будівельних норм щодо пожежної безпеки будівель та споруд. Однією з причин даної невідповідності може бути непередбачуване порушення вогнезахисної здатності вогнезахисного облицювання сталевих балок з причин утворення у ньому наскрізних дефектів під час пожежі. Прогнозування порушення цілісності вогнезахисного облицювання може бути передумовою підвищення пожежної безпеки сталевих балок із вогнезахисним облицюванням включно із облицюванням гіпсокартонними плитами.

2. Для дослідження температурних показників нагріву сталевих балок із вогнезахисним гіпсокартонним облицюванням була розроблена методика вогневих випробувань і з її використанням було проведено експериментальні дослідження фрагментів даних сталевих балок. З використанням отриманих результатів випробувань була виявлена закономірність часу нагріву до критичної температури, яка апроксимована регресійною залежністю від величини критичної проектної температури $\theta_{кр}$ і товщини облицювання d_p у вигляді $U = 10.903 + 1.648 \cdot d_p + 0.018 \cdot \theta_{кр} + 9.545 \cdot 10^{-4} d_p \cdot \theta_{кр}$. Застосовуючи

отриману регресійну залежність було побудовано номограму для експрес-визначення часу нагріву до критичної проектної температури. Одержано узагальнену температурну залежність коефіцієнта теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання, що може бути застосована для обчислення температури нагріву сталевих конструкцій з таким вогнезахистом товщиною до 62.5 мм.

3. Розроблено обчислювальну методику моделювання поведінки гіпсокартонного облицювання сталеві балки в умовах нагріву при пожежі на основі явного метода загальних рівнянь динаміки сукупно із методом скінченних елементів. Застосовуючи розроблену методику було проведено математичне моделювання поведінки сталеві балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням в умовах теплового впливу пожежі тривалістю 60 хв.

4. Показано, що величина розкриття наскрізного дефекту в гіпсокартонному вогнезахисному облицюванні завбільшки 12.5 мм фіксується в момент часу 39.5 хв, коли температура сталеві балки досягає 425 °С, що відбувається раніше на 11 хв за момент досягнення граничного стану втрати несучої здатності.

5. Обґрунтовано методику обчислення несучої здатності сталеві балки з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням, де можливе утворення наскрізних дефектів у результаті теплового впливу пожежі, при проведенні обчислень з її використанням показано, що межа вогнестійкості балки наступає на 35 хв, що на 7 хв раніше за результат, отриманий без врахування втрати вогнезахисної здатності облицювання за рахунок утворення наскрізних дефектів.

6. Виявлено закономірність зміни часу втрати вогнезахисної здатності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання як наслідок утворення у ньому наскрізних дефектів шириною розкриття більше 25 мм залежно від коефіцієнту перерізу сталеві балки A/V_m , товщини гіпсокартонного облицювання d та коефіцієнту навантаження μ_f у вигляді $t_c = 136.14 -$

$$0.119 \cdot A/V_m + 0.879 \cdot d - 111,742 \cdot \mu_f - 0,8 \cdot 10^3 \cdot A/V_m \cdot d - 0,0071 \cdot A/V_m \cdot \mu_f + 0,961 \cdot d \cdot \mu_f + 1,9 \cdot 10^{-4} \cdot A/V_m \cdot d \cdot \mu_f.$$

7. Побудовано номограми для встановлення часу втрати вогнезахисної здатності гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням сталевих балок унаслідок утворення накрізних дефектів під час пожежі в залежності від конструктивних характеристик даних балок.

8. На основі отриманої регресійної залежності та побудованих номограм, які дозволяють враховувати втрату вогнезахисної здатності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання унаслідок утворення у ньому наскрізних дефектів внаслідок пожежі, розроблена розрахункова методика оцінки вогнестійкості сталевих балок із даним типом вогнезахисту із використанням їхніх конструктивних параметрів та рекомендацій настанов при проектуванні вогнестійких сталевих конструкцій за другою частиною Єврокоду 3.

ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА

1. «Статистичний облік пожеж», розробленого у відповідності до вимог наказу ДСНС від 16.08.2017 № 445 «Про забезпечення ведення обліку пожеж та їх наслідків»
2. ДБН В.1.1-7-2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги».
3. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1993-1-2:2005, IDT).
4. ДСТУ-Н Б.В.2.6-211:2016 Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість.
5. ДСТУ EN 13501-1:2022 Пожежна класифікація будівельних виробів і будівельних конструкцій. Частина 1. Класифікація за результатами випробувань щодо реакції на вогонь (EN 13501-1:2018, IDT).
6. ДСТУ EN 13381-8:2022 Методи випробування для визначення впливу на вогнестійкість елементів конструкцій. Частина 8. Реактивні вогнезахисні матеріали для сталевих конструкцій (EN 13381-8:2013, IDT).
7. Розрахунок сталевих конструкцій на вогнестійкість відповідно до Єврокоду 3. Практичний посібник до ДСТУ-Н EN 1993-1-2:2010 / Український Центр Сталевого Будівництва. – Київ, 2016. 81 с.
8. Sterner, E., and U. Wickstrom (1990), “TASEF—Temperature Analysis of Structures Exposed to Fire,” Fire Technology SP Report 1990: 05, Boras: Swedish National Testing Institute.
9. Шналь Т. М. Вогнестійкість та вогнезахист металевих конструкцій: навч. посібник. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2010. – 176 с.
10. Технічний регламент будівельних виробів, будівель і споруд, затверджений Постановою Кабінету Міністрів України від 20 грудня 2006 р. № 1764.

11. Новак С. В., Григор'ян Б. Б., Нефедченко Л. М., Абрамов О. О. Оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій та виробів. Методи випробувань: навч. посіб. Черкаси: АПБ, 2011. 124 с.
12. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі (EN 1991-1-2:2002, IDT).
13. ДБН В.1.2-7-2023 «Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Основні вимоги до будівель і споруд пожежна безпека».
14. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення.
15. Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва. 2. Директива № 89/106/ЄЕС Ради ЄС про зближення законодавчих, нормативних і адміністративних положень держав-членів ЄС відносно будівельних матеріалів. Міжнародний документ від 21.12.1988 № 89/106/ЄЕС.
16. Захарченко П. В., Гавриш О. М., Карпенко О. О., Петухов О. М. Технологія та товарознавство систем сухого будівництва: вогнезахист будівельних конструкцій. Навч. посіб. КНУБА – К.: «СПД Павленко», 2012. – 392 с.
17. Осипенко В. І., Поздєєв С. В., Тищенко І. Ю. Будівельні матеріали та їх поведінка при дії високих температур: Навч. посіб. // Черкаси: 2012. – 202 с.
18. Васильченко О. В., Квітковський Ю. В., Луценко Ю. В., Миргород О. В. Безпека експлуатації будівель і споруд та їх поведінка в умовах надзвичайних ситуацій: Навч. посібник. // Х.: НУЦЗУ, 2010. - 372 с.
19. А. С. Беліков, і. г. Маладика, О. В. Борсук «Підвищення вогнестійкості металевих конструкцій як шлях забезпечення вогнезахисту будівель» збірник наукових праць «Пожежна безпека: теорія і практика» № 18/2014 ст. 38-42.
20. Akaа, O. U., Abu, A., Spearpoint, M., & Giovinazzi, S. (2016). A group-ANP decision analysis for the selection of applied fire protection to steel structures. Fire Safety Journal, 86, 95-105.

21. Пушкаренко А. С., Василенко О. В., Квітковський Ю. В., Луценко Ю. В., Миргород О. В. Вогнезахисне оброблення будівельних матеріалів і конструкцій: Навч посіб. // Х.: НУЦЗУ, КП «Міська друкарня», 2011. – 176 с.
22. Bilotta, A., de Silva, D., & Nigro, E. (2016). Tests on intumescent paints for fire protection of existing steel structures. *Construction and Building Materials*, 121, 410-422.
23. Новак С. В., Григор'ян Б. Б., Нефедченко Л. М., Абрамов О. О. Оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій та виробів. Методи випробувань: Навчальний посібник. – Черкаси: АПБ, 2011. – 124 с.
24. Long T. Phan, Therese P. McAllister, John L. Gross, Morgan J. Hurley. Best Practice Guidelines for Structural Fire Resistance Design of Concrete and Steel Buildings. NIST Technical Note 1681. 2010. 217 p.
25. Bennetts, I.D., and I.R. Thomas, “Design of Steel Structures Under Fire Conditions,” *Progress in Struct. Engrg. and Materials* 4:1 (2002) 6-17.
26. Б.Г. Демчина. Поведінка дощатоклеєних колон за місцевого впливу температури / А.Б. Пелех, Г.М. Олексин, М.І. Сурмай // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". - 2009. - № 655. - С. 71-74. - Бібліогр.: 3 назв. - укр.
27. А.Б. Пелех . Натурні випробування конструкції дерев'яної рами на вогнестійкість в умовах реальної пожежі / А. Б. Пелех, Б. Г. Демчина, Т. М. Шналь, С. С. Була, О. В. Крочак // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". - 2008. - № 627. - С. 167-171. - Бібліогр.: 4 назв. - укр.
28. Law, M. (1983), “A Basis for the Design of Fire Protection of Building Structures,” *The Structural Engineer* 61A:5 (1983).
29. Lie, T.T. (1992) (ed.), “Structural Fire Protection,” ASCE Manuals and Reports of Engineering Practice No 78, New York: American Society of Civil Engineers.
30. Змага Я.В. Розрахунковий метод підвищеної точності для оцінки межі вогнестійкості дерев'яних балок з вогнезахисним просоченням: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук: спец. 21.06.02 «Пожежна безпека»/ Я.В. Змага. – Харків 2016.

31. Демешок В.В. Розрахунковий метод оцінки вогнестійкості дерев'яної плити перекриття за допомогою методу кінцевих елементів / В. В. Демешок // Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека. - 2016. - № 2. - С. 67-74.

32. Фещук Ю.Л. Вогнестійкість дерев'яних колон з вогнезахисним лицюванням / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв, В.В. Ніжник, О.П. Борис // Пожежна безпека: збірник наукових праць ЛДУБЖД. – Львів, 2017 – № 30. – С. 159 – 167.

33. Будинки і споруди. Жилові будинки. Основні положення. ДБН В.2.2-15-2005. [Чинні від 01.01.2006] Держбуд України від 18.05.2005 № 80 – 45 с. – (Державні будівельні норми України).

34. Будинки і споруди. Підприємства торгівлі. ДБН В. 2.2-23:2009 [Чинні від 01.07.2009] Мінрегіонрозвитку та будівництва України від 16.01.2009 №4 – 59 с. – (Державні будівельні норми України).

35. Будинки і споруди. Культурно-видовищні та дозвілєві заклади. ДБН В 2.2-16-2005. [Чинний від 01-04-2006] Держбуд України від 27.09.05 № 171 – 20 с. – (Державні будівельні норми України).

36. Будинки і споруди. Дошкільні навчальні заклади. ДБН В.2.2-4-97. [Чинний від 27-06-1996] Держкоммістобудування України від 06.08.1997 № 136 – 48 с. – (Державні будівельні норми України).

37. Будинки і споруди. Будинки та споруди навчальних закладів. ДБН В.2.2-3-97. Основні положення. – [Чинний від 27-06-1996] Держкоммістобудування України від 6.08.97 р. – 37 с. – (Державні будівельні норми України)

38. Будинки і споруди. Заклади охорони здоров'я. ДБН В.2.2-10-2001. Основні положення. – [Чинний від 04-01-2001]. Держбуд України від 01.04.2001 № 2. – 45 с. – (Державні будівельні норми України).

39. Будинки та споруди. Підприємства харчування. ДБН В.2.2-25-2009. Основні положення. – [Чинний від 01-09-2010]. Міністерство регіонального

розвитку та будівництва від 30.12.2009 № 703. – 85 с. – (Державні будівельні норми України).

40. Будинки та споруди. Спортивні та фізкультурно-оздоровчі споруди. ДБН В.2.2-13-2003. Основні положення. – [Чинний від 01-03-2004]. Держбуд України від 10.11.2003 № 184. – 105 с. – (Державні будівельні норми України)

41. Будинки та споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення. ДБН В.2.2-28-2010. Основні положення. – [Чинний від 01-10-2011]. Міністерство регіонального розвитку та будівництва від 30.12.2010 № 570. – 28 с. – (Державні будівельні норми України).

42. Наказ МНС України від 02.07.2007 № 460 «Про затвердження Правил з вогнезахисту» [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://zakon2.>

43. England, J.P., S.A. Young, M.C. Hui, and N. Kurban (2000), Guide for the Design of Fire Resistant Barriers and Structures. Melbourne: Building Control Commission.

44. Wang, Y. C., & Kodur, V. K. R. (2000). Research toward use of unprotected steel structures. Journal of structural engineering, 126(12), 1442-1450.

45. Жартовський В.М. Дослідження з підвищення ефективності застосування вогнезахищеної деревини / В.М. Жартовський, Ю.В. Цапко, К.І. Соколенко, Р.В. Ліхньовський // Науковий вісник УкрНДПБ. –2006. – № 1 (13). – С. 55 – 58.

46. Xue, Y., Zhang, S., & Yang, W. (2015). Influence of expanded vermiculite on fire protection of intumescent fireproof coatings for steel structures. Journal of Coatings Technology and Research, 12(2), 357-364.

47. e Silva, V. P., & Fakury, R. H. (2002). Brazilian standards for steel structures fire design. Fire Safety Journal, 37(2), 217-227.

48. Watolla, M. B., Gluth, G., Sturm, P., Rickard, W. D. A., Krüger, S., & Schartel, B. (2017). Intumescent geopolymers-bound coatings for fire protection of steel.

49. Yew, M. C., & Ramli Sulong, N. H. (2011). Effect of epoxy binder on fire protection and bonding strength of intumescent fire protective coatings for steel. In *Advanced Materials Research* (Vol. 168, pp. 1228-1232). Trans Tech Publications Ltd.

50. Gardner, L. (2007). Stainless steel structures in fire. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 160(3), 129-138.

51. Lie, T.T. (1992) (ed.), "Structural Fire Protection," ASCE Manuals and Reports of Engineering Practice No 78, New York: American Society of Civil Engineers.

52. Jones B. Modeling the Performance of Gypsum Plasterboard Assemblies Exposed to Real Building Fires and Standart Furnace Tests / B. Jones, H. Gerlich, A. Buchanan // *Proceedings of the 4th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods* (Melbourne, Australia, 2002).

53. Lu W. Advanced Steel Structures. Structural Fire Design / W. Lu, P. Makelainen // Helsinki University of Technology Laboratory of Steel Structures Publications 29. – Espoo, 2003.

54. Kotsovinos, P., Walker, G., and Deeny, S.: "Reliability based fire severity assessment of modern buildings with open - plan spaces," in *Conference Proceedings of the 2nd International Conference on Structural Safety under Fire and Blast, CONFAB 2017*, London, 2017.

55. Пушкаренко А.С. Будівельні матеріали та їх поведінка в умовах високих температур: Навчальний посібник [для студ. вищ. навч. закл.] / А.С. Пушкаренко, О.В. Васильченко. – Харків: АПБУ. – 2001. – 166 с.

56. Green, M., Butterworth, N., Burgess, I.W. & Plank, R., 2003. Practical case studies in performance-based structural fire engineering design. In *Designing Structures for Fire*. Baltimore: American Society of Civil Engineers (ASCE), pp. 259–269.

57. Newman, G.M., Robinson, J.T. & Bailey, C.G., 2000. Fire Safe Design - A New Approach to Multi-Storey Steel Framed Buildings, SCI-P288, Ascot, Berkshire, UK: Steel Construction Institute.

58. Соколенко К.І. Підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів із застосуванням вогнезахищеної деревини: Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 21.06.02 «Пожежна безпека» / К.І. Соколенко. – Київ, 2005. – 22 с.

59. Wang, Y., Burgess, I.W., Wald, F. & Gillie, M., 2012. Performance-Based Fire Engineering of Structures, Broken Sound Parkway, NW: CRC Press.

60. Lie, T.T. (2002), “Fire Temperature-Time Relations,” Chapter 4-8, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd ed., Bethesda, Md.: Society of Fire Protection Engineers.

61. Meacham, B.J. (1997), “An Introduction to Performance-Based Fire Safety Analysis and Design with Applications to Fire Safety,” in Building to Last, Proc. Struct. Congress XV, New York: American Society of Civil Engineers, 529-533.

62. Борсук О. В. Метод розрахункової оцінки можливості прогресивного руйнування будівель у наслідок пожежі / С. В. Поздєєв, А. В. Швиденко, О. В. Борсук [та ін.] / Міжнародний науковий журнал «Інтернаука» // № 4(84), 1 т., 2020, С. 74 – 80.

63. Борсук О. В. Температурний вплив на теплофізичні властивості вогнезахисного мінераловатного облицювання сталевих конструкцій в умовах випробувань на вогнестійкість / С. В. Поздєєв, О. М. Нуянзін, О. В. Борсук [та ін.] // Східно-Європейський журнал передових технологій // 4/12 (106) 2020 – С. 39 – 45.

64. Борсук О. В. Дослідження поведінки сталевієї балки із вогнезахисним мінераловатним облицюванням при пожежі / О. В. Борсук // Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідування : зб. наук. праць. – Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. – том. 4 № 1 (2020) – С. 15 – 24.

65. Wickstrom, U., and Palsson, J.: “A Scheme for Verification of Computer Codes for Calculating Temperature in Fire Exposed Structures,” SP Swedish National Testing and REsearch Institute, 1999.

66. Gillie, M.: “Analysis of heated structures: nature and modelling benchmarks,” *Fire Safety Journal*, vol. 44, pp. 673-680, 2009.
67. Zhao, B., Roosefid, M., Vassart, O.: “Full Scale Test of A Steel and Concrete Composite Floor Exposed to ISO Fire,” in *Proceedings of the 5th International Conference on Structures in Fire*, Singapore, 2008.
68. Rackauskaite, E., Kotsovinos, P., Jeffers, A., and Rein, G.: “Structural Analysis of Multi-Storey Steel Frames Exposed to Travelling Fires and Traditional Design Fires”, *Engineering Structures*, vol. 150, pp. 271-287, 2017.
69. Новак С.В., Нефедченко Л.М., Абрамов О.О. Методи випробувань будівельних конструкцій та виробів на вогнестійкість. – Київ: Пожінформтехніка, 2010. – 132 с.
70. Матеріали будівельні. Методи випробовувань на горючість: ДСТУ Б В.2.7.-19-95 (ГОСТ 30244-94).
71. Матеріали будівельні. Метод випробовування на займистість: ДСТУ Б В.1.1-2-97(ГОСТ 30402-96). – 28 с.
72. Milke, J.A. (2002), “Analytical Methods for Determining Fire Resistance of Steel Members,” *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd ed., DiNenno, ed., Quincy, Mass.: National Fire Protection Association.
73. Shina, S. Industrial design of experiments: A case study approach for design and process optimization. (2022) P. 368.
74. Нечаєв В., Берідзе Т., Кононенко В. Теорія планування експерименту. 2005. 232 с.
75. Волокита А., Селіванов В. Основи теорії планування експерименту. Навч. посібник. 2022. – 41 с.
76. Статюха Г., Складанний Д., Бонаренко О. – Вступ до планування оптимального експерименту. К.: ІВЦ «Політехніка», 2011. – 117 с.
77. Eurocodes: Background & Applications Structural Fire Design. JRC Science and Policy Report / O. Vassart et as. Publications Office of the European Union. 2014.

78. Методика оцінювання адекватності результатів визначення меж вогнестійкості залізобетонних балок експериментально-розрахунковим методом / Поздєєв В.С. та ін. Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка «Галузеве машинобудування, будівництво». 2014. Вип. 1(40). С. 129-136.

79. Bennetts, I.D., and I.R. Thomas, "Design of Steel Structures Under Fire Conditions," *Progress in Struct. Engrg. and Materials* 4:1 (2002) 6-17.

80. Bailey, C.G. (2004), "Membrane Action of Slab/Beam Composite Floor Systems in Fire," *Engrg. Struct.* 26(12): 1691-1703.

81. Некора О.В. Розрахунково-експериментальний метод визначення вогнестійкості стиснутих елементів залізобетонних будівельних конструкцій: дис. .кандидата техн. наук : 21.06.02 / Некора Ольга Валеріївна. – Черкаси, 2008. – 147 с.

82. British Standards Institution, BS EN 1991-1-2, Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire, London, November 2002.

83. Belytschko, T., Chiapetta, R.L. & Bartel, H.D.: Efficient Large Scale Non-Linear Transient Analysis by Finite Elements. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 10 (1976) 1, pp. 579-596.

84. Hallquist, J.O. LS-DYNA Theory Manual, Livermore Software Technology Corporation: California, USA 2005.

85. Bakeer T. Collapse analysis of masonry structures under earthquake actions. Publication Series of the Chair of Structural Design, TU Dresden, 200.

86. Shapiro, A.: "Using LS-DYNA for heat transfer & coupled thermal-stress problems," Livermore Software Technology Corporation, 2012.

87. Temple, A., Walker, G., Flint, G., Panev, Y., and Kotsovinos, P.: "Verification of 2D heat transfer models developed in LS-DYNA for structural fire engineering applications," in *International Conference Applications of Structural Fire Engineering, ASFE'17, Manchester, 2017.*

88. Rackauskaite, E., Kotsovinos, P., and Rein, G.: “Model Parameter Sensitivity and Benchmarking of the Explicit Dynamic Solver of LS-DYNA for Structural Analysis in Case of Fire,” *Fire Safety Journal*, vol. 90, p. 123:138, 2017.

89. Aagaard, B.T.: *Finite-Element Simulations of Earthquakes*. PhD-Thesis, California Institute of Technology: Pasadena, California 2000.

90. ANSYS, Inc.: *ANSYS Structural Analysis Guide*, ANSYS, Inc.: Canonsburg, PA 2004.

91. Шналь Т.М. Вогнестійкість та вогнезахист дерев'яних конструкцій: Навчальний посібник [для студ. вищ. навч. закл.] / Т.М. Шналь – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2006. – 220 с.

92. Rackauskaite, E., Kotsovinos, P., Jeffers, A., and Rein, G.: “Structural Analysis of Multi-Storey Steel Frames Exposed to Travelling Fires and Traditional Design Fires,” *Engineering Structures*, vol. 150, pp. 271-287, 2017.

93. O. Pettersson, S.E. Magnusson, and J. Thor (1976), “Fire Engineering Design of Structures,” Publication 50, Swedish Institute of Steel Construction.

94. 1. Lennon, T., Moore, D.B., Wang, Y.K., Bailey, C.G. *Guide for designers to EN 1991-1-2:2002, EN 1992-1-2:2002, EN 1993-1-2:2002 and EN 1994-1-2:2002: a guide to the design of fire protection of steel, steel-reinforced concrete and concrete constructions completed and constructed in accordance with Eurocodes: trans. with English / T. Lennon and others; ed. Series H. Gulvanesyan; science ed. trans. V.M. Roitman, I.A. Kirillov, A.I. Plotnikov, (2013), 196 p.*

95. Демчина Б.Г. Сучасні тенденції у дослідженнях вогнестійкості 135 будівельних конструкцій // *Пожежна безпека : збірник наукових праць*. – Львів, 2001. – С 383-385.

96. Gewain, R., and Troup, E. (2001), “Restrained Fire Resistance Ratings in Structural Steel Buildings,” *AISC Engineering Journal*, 2001, AISC, Chicago, IL.

97. Ковальов А.І. Удосконалення методу оцінювання вогнезахисної здатності покривів залізобетонних перекриттів: дис. ... кандидата техн. наук : 21.06.02 / Ковальов Андрій Іванович. – Черкаси, 2006. – 146 с.

98. Ковальов, А. І., Отрош, Ю. А., Коссе, А. Г., & Черненко, О. М. (2020). Залежність точності визначення теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів від параметрів моделі. Проблеми пожарной безопасности, (48), 63-70.

99. Jerath, V., K.J. Cole, and C.I. Smith (1980), Elevated Temperature Tensile Properties of Structural Steels Manufactured by the British Steel Corporation, Report T/RS/1189/11/80/C, BSC Teesside Laboratories (July 1980).

100. Kirby, B. (1983), The Behaviour of Structural Steels Manufactured by BSC under Stress Controlled Anisothermal Creep Conditions, Report SH/RS/3664/4/83/B, BSC Sheffield Laboratories (October 1983).

101. Kirby, B. (1999), The Behaviour of Multi-Storey Steel Framed Buildings in Fires, A European Joint Research Program, U.K.: British Steel Swinden Technology Centre.

102. Kirby, B.R., and Preston (1988), “High Temperature Properties of Hot-Rolled, Structural Steels for Use in Fire Engineering Design Studies,” Fire Safety J. 13 (1988) 27-37.

103. Kodur, V.K.R., and T.Z. Harmathy (2002), “Properties of Building Materials,” Chapter 10 of The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd ed., Bethesda, Md.: Society of Fire Protection Engineers.

104. Köster, W. (1948), Die Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls reiner Metalle, Z. Metallkd. 39(1).1-9.

105. Lane, B. (2000), “Performance-Based Design for Fire Resistance,” Modern Steel Construction (December 2000).

106. Lawson, R.M., and G.M. Newman (1990), Fire Resistant Design of Steel Structures—A Handbook to BS5950:Part 8, SCI Publication 080, U.K.: The Steel Construction Institute. 169

107. Lawson, R.M., and G.M. Newman (1996), Structural Fire Resistant Design to EC3 & EC4, and Comparison with BS 5950, SCI Publication 080, U.K.: The Steel Construction Institute.
108. Korhonen E.S. Natural fire modeling of large spaces / Helsinki University of Technology.
109. Lawson, R.M., D. Oshatogbe, and G.M. Newman (2002), Design of Fabsec Beams in Non-Composite and Composite Applications (including Fire), U.K.: Fabsec Limited.
110. Заїка Н. Аналіз сучасного стану щодо вогнезахисних систем сталевих балок на основі облицювальних матеріалів. Збірник наукових праць Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація. Черкаси. Том 8 № 2. 2024. С. 206-217.
111. Заїка Н. Закономірності розподілу температури сталевій балки з вогнезахистом з гіпсокартону від часу впливу пожежі. Scientific Journal «Problems of Emergency Situations». Черкаси. № 40. 2024. С. 17-30.
112. Заїка Н. Дослідження теплових властивостей гіпсокартонного вогнезахисного облицювання сталевих балок в умовах пожежі. Механіка та математичні методи, 2025.Т. VII. № 1. с. 138–151
113. Рудешко І., Заїка Н., Куліца О., Сідней С. Дослідження ребристої залізобетонної панелі покриття за умовами стандартного температурного режиму пожежі. Збірник наукових праць Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація. Черкаси. 2022. Том 6(2). С. 95-101.
114. Сідней С., Кобко В., Федченко С., Змага М., Заїка Н. Удосконалення зонного методу перевірки вогнестійкості пустотної плити. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація: зб. наук. праць. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2022. Т. 6. № 1. С. 95–103.
115. Трошкін С., Куліца О., Поздєєв С., Костенко Т., Землянський О., Заїка Н. Дослідження процесу тепломасопереносу у вертикальних кабельних тунелях атомної електричної станції за умов реальних пожеж.

Східноєвропейський журнал корпоративних технологій «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies». 2023. Том 5 №10 (125). С. 34-42.

116. Поздєєв С., Некора О., Федченко С., Заїка Н., Шналь Т., Субота А., Несух М. Дослідження адекватності результатів ідентифікації міцнісних характеристик бетону залізобетонного ригеля при нагріві в умовах пожежі. Східноєвропейський журнал корпоративних технологій «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies». 2023. Том 3 № 7 (123). С. 26-36. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.282205

117. Perehin A., Nuianzin O., Zaika N., Vedula S. Technique for creating the prototype of a compact fire plant for tests to determine the fire resistance of reinforced concrete structures. The scientific heritage, Budapest, Hungary. 2021. Vol. 78. P. 37-43.

118. Luecke, W.E., J.D. McColskey, C.N. McCowan, S.W. Banovic, R.J. Fields, T. Foecke, T.A.Siewert, and F.W. Gayle (2005), Federal building and fire safety investigation of the world trade center disaster: Mechanical properties of structural steel. Technical Report NCSTAR 1- 3D, National Institute of Standards and Technology. Available on-line at <http://wtc.nist.gov>. Lund Institute of Technology (1983), Properties of Materials at High Temperatures: Steel,

119. Anderberg, Y., ed., Report LUTVDG/TVBB-3008), Lund: Sweden, Lund Institute of Technology.

120. Malhotra, H.L. (1982), Design of Fire-Resisting Structures, New York: Chapman and Hall.

121. Stanislav Sidnei «Determination of features of composite steel and concrete slab behavior under fire condition». Valeriia Nekora, Taras Shnal, Olga Nekora, Iryna Dankevych, Serhii Pozdieiev, S. «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies», 6/7 (114) 2021 p. 59.

122. Фомін С. Л. Вогнестійкість багатоповерхових каркасних будівель. Міжвідомчий науково-технічний збірник Державного НДІ Будівельних Конструкцій «Будівельні конструкції». 2005. Т. 2. С. 310-315.

123. Complete “stress-strain” diagrams of rolled steel beams / Stanislav Fomin et as. MATEC Web of Conferences. EDP Sciences. 2018. 203. P. 02008.

124. Перельмутер О. В., Перельмутер А.В., Слівкер В.І. Розрахункові моделі споруд та можливість їхнього аналізу: посібник. Київ. Видавництво "Сталь". 2002. 600 с.

125. П.Г Круковський, С.В Новак. Аналіз існуючих методів оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій. Збірник наукових праць Академії пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля «Пожежна безпека: теорія і практика». 2013. № 4. С. 69 – 72.

126. Круковський П. Г. Зворотні завдання тепломасоперенесення (Загальний інженерний підхід). Київ : НАНУ Ін-т техн. теплофізики, 1998. 224 с.

127. Eurocodes: background & applications. Structural Fire Design. Worked examples. / O. Vassart et al. Luxemburg : Publication Office of the European Union, 2014. 252 p.

128. W. Lu., P. Makelainen. Advanced Steel Structures. Structural Fire Design. Helsinki University of Technology Laboratory of Steel Structures Publications. 2003. Vol. 29, Espoo.

129. Борсук О., Нуянзін О., Кришталь В., Ведула С., Горовенко М. Дослідження межі вогнестійкості сталевих балок за умови втрати цілісності вогнезахисного покриття // Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація. — 2020. — Т. 4, № 2. — С. 5-15.

130. Захарченко П. В., Гавриш О. М., Карпенко О. О., Петухов О. М. Технологія та товарознавство систем сухого будівництва: вогнезахист будівельних конструкцій. Навч. посіб. КНУБА – К.: «СПД Павленко», 2012. – 392 с.

ДОДАТОК А

**Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості
про апробацію результатів дисертації**

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Заїка Н.П. Аналіз сучасного стану щодо вогнезахисних систем сталевих балок на основі облицювальних матеріалів. Збірник наукових праць Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація. Черкаси. Том 8 № 2. 2024. С. 206-217. – 1.

<https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/article/view/217/208>

2. Заїка Н.П. Закономірності розподілу температури сталевий балки з вогнезахистом з гіпсокартону від часу впливу пожежі. Scientific Journal «Problems of Emergency Situations». Черкаси. № 40. 2024. С. 17-30. – 1.

<https://doi.org/10.52363/2524-0226-2024-40-2>

3. Заїка Н. П. Дослідження теплових властивостей гіпсокартонного вогнезахисного облицювання сталевих балок в умовах пожежі. Механіка та математичні методи, 2025.Т. VII. № 1. с. 138–151. – 1.

<https://doi.org/10.31650/2618-0650-2025-7-1-138-151>

4. Рудешко І., Заїка Н., Куліца О., Сідней С. Дослідження ребристої залізобетонної панелі покриття за умовами стандартного температурного режиму пожежі. Збірник наукових праць Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація. Черкаси. 2022. Том 6 № 2. С. 95-101. – 0.5.

<http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21192>

5. Сідней С., Кобко В., Федченко С., Змага М., Заїка Н. Удосконалення зонного методу перевірки вогнестійкості пустотної плити. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація: зб. наук. праць. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2022. Т. 6. № 1. С. 95–103. – 0.5.

<https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/article/view/124/104>

Публікації у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази «Scopus»

6. Трошкін С.Е., Куліца О.С., Поздєєв С.В., Костенко Т.В., Землянський О.М., Заїка Н.П. Дослідження процесу тепломасопереносу у вертикальних кабельних тунелях атомної електричної станції за умов реальних пожеж. Східноєвропейський журнал корпоративних технологій «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies». 2023. Том 5 № 10 (125). С. 34-42. – 1.

<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289291>

7. Поздєєв С., Некора О., Федченко С., Заїка Н., Шналь Т., Субота А., Несух М. Дослідження адекватності результатів ідентифікації міцнісних характеристик бетону залізобетонного ригеля при нагріві в умовах пожежі. Східноєвропейський журнал корпоративних технологій «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies». 2023. Том 3 № 7 (123). С. 26-36. – 1.

<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.282205>

Стаття в періодичному науковому виданні іншої держави

8. Perehin A., Nuianzin O., Zaika N., Vedula S. Technique for creating the prototype of a compact fire plant for tests to determine the fire resistance of reinforced concrete structures. The scientific heritage, Budapest, Hungary. 2021. Vol. 78. P. 37-43. – 0.5.

<http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/21029/1/Nuianzin%207.pdf>

Список публікацій, які засвідчують апробацію дисертації

9. Заїка Н.П., Некора В.С., Неділько І.А. Дослідження цілісності вогнезахисної системи сталеві балки на основі гіпсокартонного облицювання в умовах пожежі. Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. Харків: НУЦЗ України, 2022. С. 32-34.

<https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2022/3.pdf>

10. Поздєєв С., Некора О., Нуянзін О., Борсук О., Заїка Н. Комп'ютерне

моделювання поведінки сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним покриттям при нагріванні. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022. С. 178-179.

<https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2022/6.pdf>

11. Некора О., Заїка Н., Некора В. Дослідження показників вогнестійкості гофрованої сталевий балки із використанням вогнезахисту. Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 2022. С. 51-53.

<https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/bitstream/29.pdf>

12. Заїка Н. Розподіл температури сталевий балки з вогнезахистом від часу впливу пожежі. Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 2024. С. 65-67.

<https://indico.ldubgd.edu.ua/event/59/attachments/202024.pdf>

ДОДАТОК Б

Акти впровадження результатів дисертації

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор Національного
університету цивільного захисту України
з навчальної роботиОлександр ДЖУЛАЙ
«__» _____ 2025 року
* код * інвентарний *
№ 08571363 *

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
за темою «Удосконалення методу розрахункової оцінки вогнестійкості сталевих
балок із вогнезахисним облицюванням гіпсокартоном» авторки Заїки Наталії
Петрівни

Комісія у складі:

голови – начальника навчально-наукового інституту пожежної безпеки,
кандидата технічних наук, доцента Мельника В.П.та членів – доцента кафедри пожежної профілактики у населених пунктах,
PhD з цивільної безпеки Рашкевич Н.В.;– старшого викладача кафедри пожежної профілактики у населених пунктах
Майбороди Р.І.

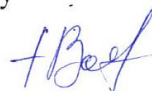
склали акт, який підтверджує, що результати дисертаційної роботи «Удосконалення методу розрахункової оцінки вогнестійкості сталевих балок із вогнезахисним облицюванням гіпсокартоном» мають теоретичне та практичне значення для освітнього процесу. Запропоновані методики оцінювання вогнестійкості сталевих балок із вогнезахисним облицюванням гіпсокартоном впроваджені в освітній процес на кафедрі пожежної профілактики у населених пунктах Національного університету цивільного захисту України в навчальній дисципліні «Пожежна безпека будівель та споруд» при підготовці здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 261 «Пожежна безпека». Впровадження результатів досліджень даної дисертаційної роботи дозволяє підвищити якість проведення лекційних та практичних занять шляхом розширення знань здобувачів за рахунок практичного застосування нових наукових даних.

Голова комісії:

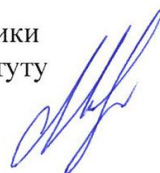
начальник навчально-наукового інституту
пожежної безпеки,
кандидат технічних наук, доцент

Валентин МЕЛЬНИК

Члени комісії:

доцент кафедри пожежної профілактики
у населених пунктах навчально-наукового інституту
пожежної безпеки,
PhD з цивільної безпеки

Ніна РАШКЕВИЧ

старший викладач кафедри пожежної профілактики
у населених пунктах навчально-наукового інституту
пожежної безпеки

Роман МАЙБОРОДА

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
приватного підприємства

«ПроектБудСтар»



Наталія КОНОГРАЙ

2024 року

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи за темою
«Удосконалення методу розрахункової оцінки вогнестійкості сталевих балок із
вогнезахисним облицюванням гіпсокартоном» авторки Заїки Наталії Петрівни

Комісія в складі:

голови — головного інженера проекту приватного підприємства
«ПроектБудСтар» Романа ПУРДЕНКА

та членів — інженера приватного підприємства «ПроектБудСтар»
Владислава КОВАЛЬ, інженера приватного підприємства «ПроектБудСтар»
Катерини СЕКРЕТ складала даний акт про те, що результати дисертаційної роботи
за темою «Удосконалення методу розрахункової оцінки вогнестійкості сталевих
балок із вогнезахисним облицюванням гіпсокартоном» впроваджені в діяльність
приватного підприємства «ПроектБудСтар» шляхом використання методик
оцінювання вогнестійкості сталевих балок із вогнезахисним облицюванням
гіпсокартоном при аналізі пожежної безпеки об'єктів промислового,
громадського та житлового будівництва.

Даний акт не є підставою для одержання премій та інших винагород із
фондів Національного університету цивільного захисту України.

Голова комісії:

головний інженер проекту
приватного підприємства «ПроектБудСтар»

Роман ПУРДЕНКА

Члени комісії:

інженер
приватного підприємства «ПроектБудСтар»

Владислав КОВАЛЬ

інженер
приватного підприємства «ПроектБудСтар»

Катерина СЕКРЕТ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Голова комісії з припинення
Інституту державного управління
та наукових досліджень
з цивільного захисту



Андрій КАЛИНОВСЬКИЙ

01 2025 року

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Зайки Наталії Петрівни на тему:

**«Удосконалення методу розрахункової оцінки вогнестійкості сталевих балок
із вогнезахисним облицюванням гіпсокартоном»**

Комісія у складі: голови комісії - начальника науково-дослідного центру протипожежного захисту ІДУ НД ЦЗ докт. техн. наук, професора НІЖНИКА Вадима Васильовича, членів комісії: заступника начальника відділу нормативно-технічного забезпечення науково-дослідного центру протипожежного захисту ІДУ НД ЦЗ докт. техн. наук, ст. досл. БАЛЛО Ярослава В'ячеславовича, начальника відділу досліджень, статистики пожеж та надзвичайних ситуацій науково-дослідного центру протипожежного захисту ІДУ НД ЦЗ канд. техн. наук, ст. досл. КЛИМАСЯ Руслана Володимировича склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи ЗАЙКИ Наталії Петрівни на тему: «Удосконалення методу розрахункової оцінки вогнестійкості сталевих балок із вогнезахисним облицюванням гіпсокартоном» впроваджено у діяльність науково-дослідного центру протипожежного захисту ІДУ НД ЦЗ, шляхом використання запропонованих розрахункових методик оцінювання вогнестійкості сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням при проведенні практичного аналізу пожежної безпеки даних конструкцій. Запропоновані методики можуть бути розвинені із метою доповнення нормативно-правової бази для забезпечення вимог щодо пожежної безпеки сталевих конструкцій конструкцій шляхом улаштування вогнезахисних систем на основі облицювання гіпсокартоном.

Акт складено для надання в разову спеціалізовану вчену раду у зв'язку із захистом дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Голова комісії
докт. техн. наук, професор

Вадим НІЖНИК

Члени комісії
докт. техн. наук, ст. досл.

Ярослав БАЛЛО

канд. техн. наук, ст. досл.

Руслан КЛИМАСЬ