

Державна служба України з надзвичайних ситуацій
Національний університет цивільного захисту України
Черкаський інститут пожежної безпеки
імені Героїв Чорнобиля

Шкарабура І. М., Маладика І. Г., Мигаленко К. І., Лесечко Д. В.

**ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ
СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ
НА ЕТАПІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ
БУДІВЕЛЬ І СПОРУД**

МОНОГРАФІЯ

Черкаси 2022

УДК 614.841.45
Ш-66

*Рекомендовано до друку вченою радою
Черкаського інституту пожежної безпеки
імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України,
протокол № 1 від «28» вересня 2022 року*

Рецензенти:

О. І. Голоднов – доктор технічних наук, професор;

О. М. Нуянзін – кандидат технічних наук, доцент.

Розроблення взаємозв'язаних заходів щодо визначення параметрів технічного стану й оцінювання вогнестійкості експлуатованих сталевих конструкцій, будівель і споруд у цілому, обґрунтування можливості продовження терміну експлуатації або необхідності регулювання технічного стану та вогнестійкості через ремонт, посилення або заміну конструкцій і вогнезахисних матеріалів.

На основі проведених досліджень розроблено методи визначення вогнестійкості сталевих конструкцій залежно від різних типів вогнезахисних матеріалів, оцінювання технічного стану й вогнестійкості експлуатованих сталевих конструкцій будівель і споруд, обґрунтування можливості подальшої надійної експлуатації. Розроблені методи дають змогу брати до уваги властивості матеріалу конструкцій, а також можливість зміни характеристик матеріалів (сталі, вогнезахисних матеріалів) за час експлуатації.

Для наукових, науково-педагогічних співробітників, докторантів, аспірантів (ад'юнктів), слухачів, курсантів та студентів, які володіють відповідним математичним апаратом в межах навчальної програми технічного вузу III-IV рівня акредитації.

Оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій на етапі експлуатації будівель і споруд : монографія / [І. М. Шкарабура, І. Г. Маладика, К. І. Мигаленко, Д. В. Лесечко] – Черкаси: Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля, НУЦЗ України 2022. – 128 с.

© Шкарабура І. М., Маладика І. Г., Мигаленко К. І., Лесечко Д. В.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ Й ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕНЬ	8
1.1. Види, сфера застосування й поведінка сталевих конструкцій під час пожежі	8
1.2. Вимоги до вогнестійкості сталевих конструкцій і способи її забезпечення.....	15
1.2. Методи оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій і визначення необхідної товщини їхніх вогнезахисних матеріалів.....	22
1.4. Оцінювання технічного стану сталевих конструкцій, прийнятих в експлуатацію об'єктів будівництва, щодо відповідності вимогам пожежної безпеки	26
1.5. Висновки й завдання дослідження	31
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОКАЗНИКІВ ЗДАТНОСТІ ДО ЗЧЕПЛЕННЯ ВОГНЕЗАХИСНИХ МАТЕРІАЛІВ РІЗНИХ ТИПІВ НА РЕЗУЛЬТАТИ ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ	34
2.1. Завдання дослідження	34
2.2. Методи дослідження впливу показників здатності до зчеплення на результати оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій.....	35
2.3. Результати оцінювання тривалості досягнення критичної температури сталі зразків сталевих конструкцій із врахуванням показників здатності вогнезахисних матеріалів до зчеплення та без їх урахування	39
2.4. Результати оцінювання збіжності між значеннями мінімальної товщини вогнезахисних матеріалів різних типів, за яких забезпечено нормовані величини межі вогнестійкості сталевих конструкцій.....	45
2.5. Висновки до розділу 2	61

РОЗДІЛ 3. ОБҐРУНТУВАННЯ СПРОЩЕНОГО МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАХИЩЕНИХ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	63
3.1. Завдання дослідження	63
3.2. Складники й процедури спрощеного методу оцінювання вогнестійкості захищених сталевих конструкцій, параметри зразків для випробувань та граничні величини критичної температури сталі	67
3.3. Результати валідації спрощеного методу оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій із застосуванням систем вогнезахисту різних типів.....	75
3.4. Висновки до розділу 3	95
РОЗДІЛ 4. ВИЗНАЧАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ Й ПОЛОЖЕННЯ МЕТОДИКИ ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТА ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ЕТАПІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД	97
4.1. Загальні положення. Обґрунтування параметрів методики	97
4.2. Особливості проведення обстежень та оцінювання технічного стану й вогнестійкості експлуатованих конструкцій будівель і споруд	99
4.3. Висновки до розділу 4	112
ВИСНОВКИ.....	113
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	116

ВСТУП

Досвід експлуатації сталевих будівельних конструкцій засвідчує достатній запас їхньої несучої здатності за умов відсутності непередбачуваних високотемпературних впливів. Нерівномірний нагрів і зміна характеристик міцності й деформативності металу під час пожежі – одна з найбільш суттєвих причин підвищеної небезпеки. Зокрема, такі властивості залежать від межі міцності (R) і модуля пружності (E) сталі [1, 2].

На працездатності будь-якої конструкції позначаються вимоги до міцності та стійкості окремих її елементів, особливо після непроектних (високотемпературних) впливів. У зв'язку з тим, що в сталевих конструкціях після високотемпературних впливів виникає зміна фізико-механічних характеристик матеріалу й залишковий НДС важливо з'ясувати, якою мірою ці фактори можуть вплинути на подальшу безпечну роботу конструкцій.

У разі зміни температури від 20 °C до 200...300 °C межа міцності деяких марок сталі та бетону збільшується. Зростання температури матеріалу сприяє зниженню його модуля пружності, тобто при цьому збільшується деформативність конструкції. Модуль пружності конструкційних матеріалів за збільшення температури знижується. Деформації температурного розширення сталі зростають зі збільшенням температури до 700 °C [1, 2].

Поведінку будівельних конструкцій, а також зміну характеристик міцності й деформативності матеріалів конструкцій під час високотемпературних впливів вивчали Б. Бартеlemi, В. Бушев, Г. Ватуля, О. Голоднов, М. Гордіюк, Б. Демчина, О. Добростан, В. Дріжд, В. Корсун, О. Кричевський, А. Мілованов, І. Мосалков, О. Некора, С. Новак, Ю. Отрош, Г. Плюсіна, В. Поклонський, В. Пчелінцев, С. Поздєєв, В. Ройтман, С. Фомін, С. Цвіркун, А. Яковлев, J. Smolka, L. Slupik, A. Fic, A. Nowak, L. Kosyrczyk, R. Caldas, R. Fakury, J. Sousa, M. Batista та ін.

Вимоги до несучої здатності, деформативності, довговічності, вогнестійкості, надійності сталевих елементів і конструкцій аргументують необхідність аналізу їхнього НДС з урахуванням умов експлуатації та високотемпературних впливів. Теоретичні дослідження необхідно провести з використанням наявних моделей, із корекцією щодо специфіки деформування сталевих елементів.

Конструкції будівель і споруд повинні бути спроектовані для надійного сприйняття всіх можливих навантажень і впливів, для подальшого їх передання на ґрунтову основу. Довговічність будівель у процесі зведення забезпечують через використання якісних матеріалів, дотримання технології робіт і повну відповідність проекту. У процесі експлуатації довговічність будівель під впливом різних чинників знижується [1; 2; 3]. Більшість чинників, що впливають на довговічність, мають випадковий характер, тому надійність і довговічність будівельних конструкцій залежать від законів теорії ймовірності [4].

У сучасній практиці будівництва сталеві конструкції широко використовують. Це можна пояснити тією обставиною, що сталь має високу міцність, надійно працює за різних видів навантаження, відповідає вимогам довговічності за умов використання надійних засобів захисту. Сталеві конструкції індустриальні, їх виготовляють на спеціалізованих заводах. Окремі елементи, конструкції (відправні марки) транспортують до місця будівництва, монтують і встановлюють у проектне положення з використанням підйомно-транспортних засобів.

Висока міцність, надійність, індустриальність виготовлення з урахуванням принципів уніфікації, стандартизації їхніх елементів, можливість транспортування на великі відстані, малі терміни монтажу, відносна легкість, порівняно із залізобетонними конструкціями, підтверджують економічність використання сталевих конструкцій у будівництві [5].

Крім того, сталеві конструкції зручні в експлуатації, оскільки їх легко ремонтувати, посилювати під час проведення робіт із реконструкції за збільшення навантажень. Водночас сталеві конструкції мають і недоліки: схильність до корозії, що потребує спеціальних заходів захисту; мала вогнестійкість, що вимагає проведення заходів, спрямованих на захист конструкцій від впливу високих температур [6; 7; 8].

Останнім часом актуальним напрямом науково-технічної політики України стала гармонізація національних нормативних документів із нормативними документами Європейського Союзу, відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 23.05.2011 № 547 «Про затвердження Порядку застосування будівельних норм, розроблених на основі національних технологічних традицій, та будівельних норм, гармонізованих з нормативними документами Європейського Союзу». Із початку

XXI століття набуло чинності чимало нормативних документів, які стосуються розрахунків і проектування сталевих конструкцій, з огляду на вимоги до забезпечення вогнестійкості [9; 10; 11].

Значення загальної деформації сталевих елементів під час пожежі залежить від деформації температурного розширення, зміни модуля пружності, а також від деформації повзучості. Під поняттям «температурна повзучість» розуміють зміну деформацій у часі від постійних значень температури та докладеного навантаження. Серед основних чинників, які впливають на величину та швидкість повзучості, виокремлюють величини напружень, температуру, а також тривалість їхніх дій. Із цих чинників провідним є рівень напружень, що позначається на швидкості повзучості за певної температури. Зі збільшенням величини напружень швидкість температурної повзучості зростає.

Вивчення зміни НДС, що зумовлене тривалим терміном експлуатації та вимушеними температурними деформаціями, вимагає врахування зміни в часі фізико-механічних властивостей сталі. У руслі такого явища актуальним стає створення розрахункових моделей експлуатованих сталевих конструкцій [5–8; 12–25] та вдосконалення методики оцінювання технічного стану й вогнестійкості сталевих конструкцій на етапі експлуатації будівель і споруд.

Дослідження виконано на кафедрі пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, згідно з планом науково-технічної діяльності інституту та в межах науково-дослідницької роботи Українського науково-дослідного інституту цивільного захисту за темою «Провести дослідження вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів та розробити методику попередньої оцінки їх ефективності (Ефективність покриттів)» № ДР 0116U008038.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ Й ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Види, сфера застосування й поведінка сталевих конструкцій під час пожежі

У розвитку конструктивних форм металевих конструкцій виокремлюють три характерні етапи [15; 16; 17]. Перший етап – кінець XIX століття, у цей період створення конструктивної форми було підпорядковане вимогам економії металу, ґрунтоване на практичних досягненнях будівельної механіки цього періоду, що вможливлювали отримання теоретично оптимальних схем.

Другий етап – початок XX століття, його характерна ознака пов'язана з тим, що конструктивна форма, прийнята на основі мінімуму ваги, стала випробовувати вплив переходу від кустарних способів виготовлення й монтажу до механізованих індустріальних методів виконання цих видів робіт. Водночас несумісні, порівняно з попереднім етапом, масштаби будівництва надавали все більшої гостроти проблемі суттєвого збільшення виробництва металоконструкцій і зниження трудомісткості їх виготовлення. Під впливом об'єктивних чинників почали з'являтися вимоги до конструктивної форми металу – економія, зниження трудовитрат у виробництві та зведенні, а також забезпечення необхідної довговічності за наявності складних умов і режимів експлуатації, зокрема вогнезахисту [15; 18]. Помітною подією цього періоду, що суттєво вплинула на подальший розвиток сталевих конструкцій, було впровадження електрозварювання. Складні питання щодо розвитку технологій зварювання розв'язував Інститут електрозварювання [19; 20] (нині – Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України).

Третій етап – розпочався з середини XX століття. У цей час конструктивна форма сталевих конструкцій випробовувала посилений вплив трьох основних факторів [19]:

- постійний попит народного господарства на будівельні сталеві конструкції;

- бурхливий розвиток індустрії збірних залізобетонних конструкцій, що за низкою показників конкурують зі сталевими конструкціями;

– посилення вимог до сталевих конструкцій як природного результату розвитку науки та техніки, що супроводжується помітним зростанням потужності одиничних технологічних агрегатів і форсуванням режимів їхньої роботи, а також появою багатьох нових виробництв і технологій.

Найбільшим досягненням учених і будівельників є перехід від розрахунку за напруженням, що допускають, до розрахунку будівельних конструкцій за граничними станами. Метод розрахунку за граничними станами сприяв переведенню забезпечення міцності та надійності конструкції на наукову основу й згодом набув поширення в зарубіжній практиці [5; 12; 16].

Завдяки застосуванню легких захисних конструкцій, знизилися витрати сталі на несучі конструкції, водночас створено умови для організації принципово нового конвеєрного способу збирання й монтажу великими блоками покриттів будівель. За такої організації робіт на монтажі зникає необхідність у трудомістких і небезпечних операціях на висоті, з'являється можливість поєднаного в часі виробництва робіт із прокладення надземних комунікацій, облаштування підлог, фундаментів під устаткування тощо, істотно зростає ефективність використання монтажних кранів. Завдяки спеціалізації робітників на конвеєрі, збільшуються продуктивність і якість праці, стає можливим ведення обробних видів діяльності, незалежно від погодних умов.

Покрівлі на основі оцинкованого сталевого профільованого листа й ефективного утеплювача започаткували цілу серію нових мобільних каркасів покриттів збірних будівель. На базі цього нового типу конструкцій стін і захисних покрівель постала ціла галузь так званих легких металевих конструкцій одноповерхових будівель, що комплектно поставляють на будівництва з множиною спеціалізованих заводів-виробників.

Теоретичні положення й методологія типізації в будівництві розвинені завдяки працям учених Є. Белені, М. Стрілецького, К. Муханова, В. Пермякова, В. Гордєєва, А. Перельмутера, В. Шимановського і багатьох інших [5; 16; 19]. Вивчення способів найбільш доцільного, із погляду всього народного господарства, зменшення кількості елементів супроводжуване створенням методики техніко-економічних досліджень ефективності уніфікації схем і розмірів, а також принципів типізації конструкцій. Це сприяло успішному розвитку типового проектування в металобудівництві.

Реконструкція й технічне переоснащення виробничих об'єктів, що пов'язані з втручанням в експлуатовані будівлі та споруди, становлять специфічну народногосподарську проблему. Її сутність полягає в особливостях цього виду робіт під час підготовки проектної документації, вибору конструктивних форм і методів підсилення, з'ясування способів виробництва будівельних робіт й устаткування. Такий вид робіт відрізняється від звичайних проектних робіт, що виконують у ході створення нової споруди [5; 17; 21].

Найбільш трудомісткою частиною реконструктивних робіт є детальне обстеження реального технічного стану кожної конструкції, елементів і вузлів з'єднань із фіксацією всіх дефектів, пошкоджень та відхилень у геометрії через зовнішній огляд, інструментальні виміри та геодезичне знімання. Обстеження проводять на підприємстві у важкодоступних місцях, на висоті, в умовах підвищеної небезпеки для життя, що вимагає спеціально підготовленого персоналу, допущених до робіт верхолазів [4; 17; 22].

Хімічний склад і механічні властивості металу основних несучих конструкцій визначають на основі лабораторних аналізів зразків. Ретельному дослідженню підлягають достовірність прийнятих у проекті навантажень, правильність розрахункових схем, зусиль і перерізів елементів, з урахуванням фактичної недосконалої, дефектів і пошкоджень. У ході роботи з'ясовують відповідність змонтованих конструкцій вимогам чинних нормативних документів [12; 23; 24]. У матеріалах обстеження фіксують дані, що характеризують історію експлуатації об'єкта, раніше виконані реконструкції, підсилення й ремонт, терміни служби рейок кранів, коліс та окремих конструктивних елементів, ускладнення, які виникають під час експлуатації (недостатня жорсткість, коливання, вібрації, залишкові деформації тощо).

Відповідальна частина технічного огляду – загальний аналіз стану реконструйованого об'єкта, його конструктивних частин, елементів і вузлів, захисних покриттів, запасів та резервів, наявних і розкритих унаслідок аналізу. На підставі цього формулюють висновок про придатність об'єкта для подальшої експлуатації, розробляють необхідні проектні рішення щодо підсилення (заміни) конструкцій, які вийшли з ладу, вибирають оптимальні методи виробництва. Ефективність реконструкції того або іншого об'єкта суттєвою мірою залежить від величини

витрат на перероблення будівель та споруд, що не дають безпосереднього приросту потужності. Майстерність проектувальників-металістів полягає в дослідженні способів продовження життя сталевих конструкцій із мінімальною витратою матеріальних і трудових ресурсів у найкоротші терміни. У зв'язку з цим особливої важливості набуває ретельний аналіз розрахункових передумов, використання вогнезахисту й захисту від корозії, урахування пластичної та закритичної стадій роботи матеріалу, можливостей просторового перерозподілу зусиль тощо.

Матеріали щодо узагальнення практики обстеження сталевих конструкцій будівель і споруд, положення нормативних й інструктивних документів, а також рекомендації щодо реконструкції сталевих конструкцій розроблено ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій ім. В. М. Шимановського» спільно з іншими проектними, науково-дослідницькими й навчальними інститутами [12; 14; 23; 24]. Ці матеріали дають змогу вибрати сучасне надійне рішення сталевих конструкцій як для нового будівництва, так і для споруд, що підлягають реконструкції або відновленню після неprojektних впливів, мають ознаки фізичного чи морального зношування. Завдяки тісному зв'язку наукових досліджень з актуальними потребами проектування й будівництва, а також створенню теоретичної та матеріальної бази науково-технічного прогресу, вітчизняне металобудівництво збагатилося будівлями та спорудами, які перевищують рівень світових досягнень будівельної техніки щодо оригінальності рішень, величини будівельних параметрів та економічності (наприклад, об'єкт «Укриття» і «Конфаймент» на ЧАЕС).

Сталеві конструкції є негорючим матеріалом, однак фактична межа їхньої вогнестійкості в середньому становить 15 хв. [8; 15]. Це можна пояснити швидким зниженням характеристик міцності й деформативності сталі за підвищених температур, які виникають під час пожежі. У разі обвалення або отримання значних прогинів сталеві конструкції виходять з експлуатації, псується обладнання, сировина, готова продукція, а також ускладнюється евакуація людей, організація гасіння пожежі.

Інтенсивність нагріву металоконструкцій залежить від низки чинників: характер нагріву конструкцій і способи їх

захисту. У разі короткочасної дії температури за реальної пожежі після займання горючих матеріалів метал нагрівається повільніше й менш інтенсивно, ніж докільця. У випадку дії «стандартного» режиму пожежі [25] температура не перестає підвищуватися, теплова інерція металу, що зумовлює деяке затримання нагріву, простежувана тільки протягом перших хвилин пожежі. Потім температура металу наближається до температури середовища, що нагрівається. Захист сталевих елементів й ефективність цього захисту також впливають на нагрів сталі [26–27].

Висока теплопровідність сталі дає змогу допустити, що теплоперенесення в масі конструкції є рівномірним і миттєвим, тому для металу можна не використовувати поняття температурного градієнта ні щодо перерізу, ні стосовно довжини елементів металоконструкцій. Ступінь нагріву металевої конструкції під час пожежі залежить від розмірів елементів і величини поверхні обігріву. Якщо об'єм металу збільшується й зменшується поверхня його обігріву, температура елемента знижується. Нині недостатньо вивчена поведінка зварних, болтових і заклепувальних з'єднань в умовах пожежі. [15].

Зниження міцності на зріз сталевих болтів або заклепок, що перебувають в умовах пожежі, призводить до руйнування з'єднання, а зниження міцності сталі елементів, що сполучалися, на зминання, збільшує його деформативність. На поведінку болтових і заклепувальних з'єднань в умовах пожежі впливає значення коефіцієнта температурного розширення сталі конструктивних елементів, а також болтів і заклепок [15; 28–29].

Найбільшу небезпеку під час пожежі становлять утеплені захисні конструкції. Як утеплювач часто використовують полімерні горючі матеріали: пінополістирол, пінополіуретан, пінопласт тощо. Під час загоряння утеплювача сталеві елементи захисної конструкції опиняються в зоні дії полум'я. Аналіз пожеж у виробничих будівлях із застосуванням таких конструкцій доводить, що покриття вигорали на великих площах (десятки тисяч м²) за 20–25 хв. [15; 29].

Особливо інтенсивно розвивалася пожежа на покрівлі в разі виникнення пожежі всередині будівлі. Поширенню вогню на покрівельних захисних конструкціях сприяє застосування рулонних гідроізоляційних матеріалів на бітумній основі. У процесі натурних вогневих випробувань [15], з'ясовано, що за

середньооб'ємної температури 280 °С температура під профільованим настилом досягала 380 °С. За такої температури простежується плавлення та займання полімерного утеплювача, його інтенсивне горіння з виділенням токсичних продуктів. Швидке зростання температури призводить до обвалення покриття вже через 7 хв. після загоряння покрівлі. Найшвидше запалюються ділянки покрівлі, що примикають до стін будівлі, це сприяє швидкому поширенню полум'я (до 20 м/хв.) по всьому покриттю. Обвалення захисних конструкцій під час пожежі відбувається внаслідок втрати несучої здатності її елементів, а також з'єднань елементів конструкції між собою та з несучими конструкціями покриття або каркаса будівлі. Заміна матеріалів, що згорають, на ті, що не згорають (наприклад, використання мінеральної вати), сприяє зниженню пожежної небезпеки захисних конструкцій. Можливе заповнення порожнеч профільованого настилу матеріалом, що не згорає, проте це призводить до збільшення ваги конструкцій. Особливу увагу необхідно приділяти питанням вогнезахисту з'єднань захисних конструкцій із несучими конструкціями каркаса будівлі.

У разі дії на балку високих температур під час пожежі навіть на обмежену частину її поверхні, переріз конструкції, унаслідок високої теплопровідності металу, швидко прогрівається до однакової температури. При цьому знижується межа плинності й модуль пружності сталі. Обвалення прокатних балок простежуване в перерізі, де діє максимальний згинальний момент. Використання таких балок у балочній клітці внаслідок передчасного виходу з ладу сталевого настилу, який жорстко прикріплено до балок, призводить до втрати їхньої загальної стійкості. Втрата загальної стійкості прокатних балок відбувається в разі шарнірного обпирання на них сталевого настилу. Втрата несучої здатності балок складеного перерізу проходить у зоні дії максимального згинального моменту, втрати загальної стійкості конструкцій унаслідок обвалення в'язів у вигляді настилу або другорядних балок балочної клітки, а також втрати місцевої стійкості стінки балки чи звисів стислих полиць. Руйнування конструкції може бути простежуване у зварних, болтових або в заклепувальних з'єднаннях елементів складеного перерізу від дії зусиль різь.

Руйнування статично визначених балок відбувається внаслідок утворення одного пластичного шарніра. Статично

невизначені балки є переважними, порівняно зі статично визначеними. Зокрема, двопрогінна статично невизначена балка руйнується в умовах пожежі внаслідок утворення трьох пластичних шарнірів, межа вогнестійкості такої конструкції вища від статично визначеної [15; 28–29]. Умови обпирання балки також впливають на значення її межі вогнестійкості. Закладення сталевих балки в залізобетонні або в кам'яні стіни ускладнює температурні деформації уздовж її довжини.

Вичерпання несучої здатності сталевих колон, що перебувають в умовах пожежі, може настати через втрату міцності стержнем конструкції; міцності або стійкості елементами сполучної решітки, а також вузлів кріплення цих елементів до гілок колони; стійкості окремими гілками на ділянках між вузлами сполучення елементів решітки з гілками в колонах наскрізних перерізів; місцевої стійкості стінки та звисів стислих полиць колони складеного двотаврового перерізу; загальної стійкості колони.

Позацентровий стиск, порівняно з центральним, – більш невідповідний вид завантаження, що негативно впливає на вогнестійкість конструкції. Необхідно зазначити, що в багатьох випадках колона, яка працює як центрально-стисла, в умовах пожежі може зазнавати дії позацентрово докладеної сили стиску. Це можливо в разі локальної дії температури пожежі на конструкції покриття або перекриття, що спираються на колони середнього ряду. Обвалення конструкцій покриття або перекриття з одного боку від такої колони призводять у подальшому до її роботи як позацентрово стислої конструкції.

Колони є елементами плоских рам чи просторового каркаса, що шарнірно або жорстко сполучені з конструкціями, які спираються на них. У разі жорстких з'єднань колони з ригелем, її робота залежить від поведінки конструкції ригеля під час пожежі. Зважаючи на наявність у будівлі системи внутрішніх приміщень, вогнище пожежі в початковій його стадії опиняється локалізованим, тому впливає на обмежену кількість несучих елементів конструкцій. Це може призвести до зменшення температурних деформацій у колоні, що внаслідок відсутності свободи переміщення уздовж її довжини отримує додаткове навантаження [15].

Поведінка в умовах пожежі арок і рам залежить від статичної схеми роботи конструкцій, а також від перерізів їхніх

елементів. У разі використання відкритих зтяжок, що сприймають розпір конструкції, відмова арок або рам під час пожежі може настати внаслідок втрати несучої здатності цим елементом. Руйнування ж відбувається й через втрату несучої здатності опорних і конькового вузлів, а втрата стійкості елементів з площини конструкції – унаслідок обвалення в'язів.

Отже, серед суттєвих причин підвищеної небезпеки для конструкцій у разі дії високих температур варто назвати перерозподіл внутрішніх зусиль в елементах, нерівномірний нагрів і зміну характеристик міцності та деформативності матеріалу конструкцій (сталі) під час і після пожежі за умови руйнування вогнезахисних покриттів. У зв'язку з цим постає необхідність у проектуванні надійного вогнезахисту сталевих конструкцій, а в разі виникнення пожежі – у проведенні робіт з обстеження, визначення й регулювання технічного стану для відновлення експлуатаційної придатності конструкцій за можливого руйнування після впливів високих температур. Крім того, необхідно розв'язувати питання, пов'язані із забезпеченням тривалої та надійної експлуатації конструкцій, через вибір належних матеріалів або проведення захисних заходів.

1.2. Вимоги до вогнестійкості сталевих конструкцій і способи її забезпечення

Вимоги до проектування сталевих конструкцій будівель і споруд у разі пожежі із застосуванням лише пасивних методів вогнезахисту регламентовані в ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 [8]. Цей стандарт застосовують для сталевих конструкцій, до яких окреслені вимоги стосовно збереження несучої здатності за вогневого впливу на них, для запобігання передчасному руйнуванню будівлі. Стандарт регулює принципи та правила проектування конструкцій, вимоги до несучої здатності й рівнів роботи, вимоги щодо проектування будівель і споруд або їхніх частин, які належать до сфери застосування ДБН В.2.6-198:2014 [12] та запроектовані відповідно до його вимог. Методи, які подано в ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 [8], застосовують до будь-якої марки сталі, для якої наявні властивості за підвищених температур.

Нормованою вогнестійкістю, згідно з ДСТУ Б В.1.1-4-98* [25], називають здатність конструктивної системи, її частини або

окремої конструкції протягом певного часу в умовах теплового впливу за стандартним температурним режимом виконувати несучу та/або огорожувальну функцію за встановленого сполучення навантажень.

Межа вогнестійкості будівельних конструкцій – показник вогнестійкості конструкцій, який визначають залежно від часу початку вогневого випробування за стандартним температурним режимом до настання одного з нормованих для цієї конструкції граничних станів із вогнестійкості [6; 7; 25]. Межа вогнестійкості знижується зі збільшенням навантажень, що діють на конструкції.

Фактична межа вогнестійкості сталевих конструкцій за стандартного режиму пожежі, залежно від товщини елементів перерізу та величини напруження, становить від 6 до 24 хв. Винятком є сталеві оболонки, мембранні покриття, у яких межа вогнестійкості без вогнезахисту може досягати 45-60 хв. Проектуючи будівлі та споруди, допускають межу вогнестійкості незахищених сталевих конструкцій із товщиною металу в 10 мм, що дорівнює 15 хв. Значення необхідних меж вогнестійкості основних будівельних конструкцій, зокрема металевих, сягають від 15 до 150 хв., залежно від ступеня вогнестійкості будівлі та типу конструкцій [15; 25]. Отже, більшість незахищених сталевих конструкцій задовольняє вимоги до межі вогнестійкості лише в обсязі 15 хв. Сфера застосування сталевих конструкцій обмежена щодо вогнестійкості, оскільки не дотримана умова безпеки $R_f \geq R_u$ [25], де R_f, R_u – фактичний і нормований для конструкції клас вогнестійкості за ознакою втрати несучої здатності.

Ця умова безпеки – основний критерій обґрунтування необхідності вогнезахисту сталевих конструкцій, тобто якщо $R_f \geq R_u$, то вогнезахист не потрібний, а за $R_f < R_u$ – вогнезахист потрібний.

Конкретний тип вогнезахисного складу й матеріалу вибирають на основі техніко-економічного аналізу, з огляду на величину необхідної межі вогнестійкості конструкції; тип конструкції, що підлягає захисту; вид навантаження; умови температурної вологості експлуатації й виробництва монтажних робіт; ступінь агресивності довкілля щодо вогнезахисту та матеріалу конструкції; збільшення навантаження на конструкцію за рахунок маси вогнезахисту; трудомісткість монтажу вогнезахисту; естетичні вимоги.

Найбільш надійними способами вогнезахисту нині вважають облицювання з негорючих матеріалів, вогнезахисні покриття, підвісні стелі. Як облицювальні матеріали для вогнезахисту металоконструкцій використовують бетон, цеглу, гіпсокартонні листи й інші плиткові та листові вироби, а також різні типи штукатурки [15].

Оббетонування. Вогнезахист сталевих конструкцій за допомогою бетону в сучасному будівництві застосовують порівняно часто. Використання оббетонування найбільш раціональне тоді, коли одночасно підсилюють ригелі, колони або стійки, наприклад, під час реконструкції. Оббетонування виконують після прикріплення до конструкції армувальної сітки. Товщина шару бетону становить 50 мм, що дає змогу забезпечити межу вогнестійкості 120 хв. і 60 мм, за необхідної межі вогнестійкості 150 хв. Оббетонування вважають найбільш ефективним способом вогнезахисту.

Облицювання з цегли. Цегляне облицювання застосовують для підвищення вогнестійкості колон і стійок. Кладку виконують із глиняної звичайної або силікатної цегли на цементно-піщаному розчині, марки не нижче за М50. Горизонтальні й вертикальні шви заповнюють розчином із подальшим обробленням під розшивку. Виконуючи облицювання, до уваги беруть той факт, що в цегли й сталі – різні коефіцієнти лінійного розширення (відрізняються майже втричі). Необхідно влаштовувати проміжок між сталеву конструкцією й цегляною кладкою. Для підсилення цегляну кладку армують арматурою діаметром до 8 мм. Для отримання вогнестійкості 120 хв. достатньо шару цегли завтовшки 65 мм.

Облицювання з бетону й цегли витримує вогкість, його застосовують практично за будь-яких умов температурної вологості, за наявності агресивного середовища. Такі облицювання стійкі до атмосферних впливів і динамічних навантажень. Однак ці способи вогнезахисту пов'язані з трудомісткими опалубними й арматурними роботами, малопродуктивні, значно обважнюють каркас будівлі та збільшують терміни будівництва.

Облицювання з теплоізоляційних плит. Найбільш перспективні облицювання з теплоізоляційних плит на основі перліту, вермикуліту й цементу, азбестоперлітоцементних і напівжорстких мінераловатних плит. Заводська товщина плит

становить близько 50 мм, що забезпечує межу вогнестійкості до 120 хв. за умови надійного кріплення плит до конструкції.

Ефективний спосіб кріплення плит – приварювання до конструкції, що підлягає захисту, випусків арматури, яку вводять у плити в процесі їх виготовлення. Шви закладають тим самим складом, із якого виготовлено плити. Інший спосіб кріплення – установлення нащилинників із холоднотягнутих профілів, які кріплять самонарізувальними гвинтами, що в умовах пожежі обмежують температурні й усадкові деформації, запобігають передчасному руйнуванню.

Облицювання гіпсокартонними листами. Нині широко використовують вогнезахисне облицювання з гіпсокартонних листів. Конструкції розроблені для багатопверхових будівель і споруд зі сталевим несучим каркасом, із міжповерховими перекриттями зі збірних або з монолітних залізобетонних плит. Ці конструкції значно легші за цегляні або за бетонні облицювання, індустріальні, ефективні з погляду вогнестійкості. У разі застосування гіпсокартонних листів допускають демонтаж вогнезахисного облицювання й виконання різних робіт із підсилення конструкцій, а також повторного нанесення антикорозійного покриття на несучих конструкціях. Внутрішню порожнину між вогнезахистом й елементами несучої конструкції можна використати для монтажу різних інженерних систем і комунікацій.

Такі облицювання вважають досить перспективними. Один шар завтовшки 16 мм може забезпечити вогнестійкість колон і ригелів до 60 хв. З огляду на можливість передчасного руйнування гіпсокартонних листів під час пожежі внаслідок технологічних дефектів, рекомендовано влаштовувати вогнезахист не в один, а у два шари.

Для облаштування вогнезахисту з гіпсокартонних листів використовують додаткові кріпильні елементи з холоднотягнутих профілів, що утворюють каркас. Відстань між поздовжніми елементами каркаса – 500 мм. Окрім поздовжніх, застосовують також і поперечні елементи каркаса, які розміщують через 900 мм на ригелі або 1200 мм на колоні, а також у місцях стиків листів. Елементи каркаса прикріплюють самонарізувальними гвинтами. Стики облицювань між собою та конструкціями будівлі перекривають сталевими нащилинниками, які прикріплюють самонарізувальними гвинтами з кроком

200 мм. У місцях обпирання ребристих плит перекриття на ригелі проводять додаткову теплоізоляцію у вигляді пояса з мінеральної вати.

Штукатурка. Традиційним видом вогнезахисного покриття є цементно-піщана штукатурка. Для її приготування використовують цемент і пісок. Вона рекомендована для захисту таких металоконструкцій будівель, як колони, ригелі, елементи в'язів, вузли сполучення між елементами.

Використання цементно-піщаної штукатурки зумовлене такими її перевагами, як недефіцитність матеріалів для приготування складу, простота виготовлення, можливість механізованого нанесення, забезпечення високої межі вогнестійкості конструкції, що підлягає захисту.

Водночас цей вид вогнезахисту має низку недоліків, що обмежують його застосування: велика трудомісткість робіт із нанесення покриття внаслідок необхідності армування сталеву сіткою; великі навантаження на фундаменти будівель через те, що збільшується вага каркаса; необхідність застосування антикорозійних покриттів.

Прагнення знизити масу вогнезахисного облицювання останнім часом призводить до розроблення легких штукатурок і покриттів на основі азбесту, перліту, вермикуліту, фосфатних з'єднань та інших ефективних матеріалів. Ці облицювання мають малу щільність і низьку теплопровідність. У разі пожежі вони не виділяють диму й токсичних продуктів.

У ході проектування та виконання штукатурних робіт необхідно брати до уваги вимоги до технології її нанесення на поверхню, що підлягає захисту. Щоб штукатурка не відвалилася на початку пожежі, перед її нанесенням конструкцію ретельно очищають від бруду, пилу, іржі та кріплять до неї сталеву сітку.

У процесі використання плоскої сітки до металевої конструкції приварюють шпильки. До шпильок приварюють сталеву сітку розміром осередку до 100 мм. Сітку встановлюють на відстані 10 мм від металевої поверхні для того, щоб штукатурний розчин проник під сітку і штукатурка була надійно прикріплена до конструкції. У разі використання об'ємної сітки Рабіца її накладають безпосередньо на поверхню конструкції, після чого кінці сталевих шпильок загинають, що забезпечує закріплення сітки на поверхні конструкції.

Для штукатурки, що наносять методом напівсухого торкретування, як елементи армування використовують Г-подібні шпильки з дроту. Шпильки приварюють до конструкції, що підлягає захисту, із кроком 200 мм і відгинають так, щоб відстань від їхніх кінцевих кромek до поверхні конструкцій становила 10 мм.

Балки й колони, виконані з двотаврів або зі швелерів полицями назовні, перед кріпленням армувальної сітки обгортають склотканиною чи фольгою, що закриває порожнечі та знижує витрату матеріалів. Для збільшення жорсткості шару облицювання застосовують арматурний каркас. Вогнезахисні штукатурки можуть наносити як на заводі, так і безпосередньо на майданчику вручну або механізованим способом. Для нанесення складів, що мають досить високу міцність у перші хвилини після нанесення, а також складів на основі таких в'язучих, які швидко схоплюються, застосовують метод напівсухого торкретування. При цьому нанесення штукатурки виконують за допомогою цемент-пушок.

Разом із методом напівсухого торкретування вдаються до методу набризгування. Для нанесення штукатурки цим методом у внутрішніх приміщеннях використовують спеціальну установку.

Легкі вогнезахисні штукатурки більш ефективні, порівняно з цементно-піщаними. Вони мають меншу вагу, менше навантажують каркас будівлі та забезпечують однакову межу вогнестійкості конструкції. Водночас цьому виду покриттів властиві недоліки: матеріал покриттів м'який, має невелику конструктивну міцність, легко відшаровується від поверхні металу. Таке покриття не можна використати для відкритих поверхонь, які не захищені від механічних пошкоджень, а також для зовнішніх робіт. Ці покриття не захищають від корозії та не відповідають естетичним вимогам. Необхідність застосування арматурних сіток збільшує трудомісткість робіт.

Вогнезахисні покриття. Одним із перспективних способів вогнезахисту сталевих конструкцій є високоефективні покриття, які наносять на поверхню конструкції порівняно тонким шаром. Ці покриття можуть бути пасивними, які не змінюють своєї фізичної форми під час нагрівання й забезпечують вогнезахист завдяки фізичним або тепловим властивостям, та реактивними, що під час нагрівання внаслідок хімічних реакцій значно збільшуються в товщині й змінюють форму (спучуються),

забезпечують вогнезахист завдяки теплоізолювальному й охолоджувальному ефектам [26; 27].

Серед пасивних вогнезахисних покриттів широко застосовувані покриття типу ОФП (наприклад склад ОФП-ММ). З огляду на наявність азбесту в рецептурі цього покриття, воно заборонене до подальшого застосування. Замість нього нині використовують склад ОФП-МВ, де азбест замінений на гранульовану мінеральну вату. За своїми вогнезахисними й фізико-механічними властивостями, способом нанесення, використовуваними механізмами для нанесення ці склади ідентичні. Відмінність полягає лише в підготовці робочого складу.:

Нині широко застосовують і полегшене покриття марки ОПВ-180, до складу якого входять гіпсоцементне пуццоланове в'язуче, мулітокремнеземне волокно, пластифікатор і шлам флотації фосфоритних руд.

Зараз запропоновано широкий вибір складів для вогнезахисних покриттів, які відрізняються за складом, ціною, способом нанесення, довговічністю тощо.

Вогнетривкі підвісні стелі – ефективний засіб підвищення вогнестійкості металевих конструкцій покриттів і перекриттів. Особливо доцільні підвісні стелі для вогнезахисту ферм та структур. Безпосередній захист кожного елемента цих конструкцій облицюваннями або покриттями, що спучуються, – трудомісткий і недостатньо надійний, оскільки покриття важко нанести у вузлових з'єднаннях елементів конструкцій.

Облаштування підвісної вогнезахисної стелі надійніше, оскільки між стелею й конструкцією, що підлягає захисту, створюється повітряний проміжок, який додатково підвищує її межу вогнестійкості. Найбільш простою й дешевою підвісною стелею є стеля з мінераловатних плит, які укладають на сталеву сітку або на різні штукатурки по сітці. Сітку за допомогою сталевих стержнів, розташованих із кроком 800-1000 мм, підвішують до нижнього пояса ферм або структур. Зовнішня поверхня стелі закрита декоративним матеріалом. За товщини плит 50-80 мм підвісна стеля підвищує межу вогнестійкості ферм і структур до 45-60 хв.

Типове конструктивне рішення складається з металевого каркаса, облицювання та кріпильних елементів. Загальна товщина підвісних стель, що містять каркас й облицювання,

дорівнює 40-84 мм. Відстань від екранів до площини поверхні, що підлягає захисту, становить 80-350 мм. Як облицювання захисних екранів підвісних стель використовують: гіпсобетонні плити завтовшки 14 мм; гіпсокартонні перфоровані плити (важкі або полегшені) завтовшки 50 мм із заповненням мінеральною ватою та наклейкою з алюмінієвої фольги; декоративні гіпсові плити завтовшки 20 мм; мінераловатні плити; мінераловатні плити на синтетичному в'язучому завтовшки 30 мм.

Отже, вогнезахист металевих конструкцій може бути виконаний різними способами. Спосіб вогнезахисту вибирають проектувальники та власники будівлі.

1.3. Методи оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій і визначення необхідної товщини їхніх вогнезахисних матеріалів

До чинників, що впливають на поведінку будівельних конструкцій в умовах пожежі, належать такі [6; 15; 25]:

- ступінь навантаження конструкцій та окремих елементів;
- вигляд і кількість пожежного навантаження, що впливає на температурний режим, а також теплоту пожежі;
- теплове навантаження на конструкцію;
- теплофізичні й фізико-механічні характеристики матеріалів, із яких виконані будівельні конструкції;
- умови нагріву та способи з'єднання конструкцій.

Згідно з ДСТУ Б В.1.1-4-98* [25], фактичні межі вогнестійкості будівельних конструкцій визначають з огляду на дію нормативних навантажень (беруть до уваги характеристичні значення величин навантажень відповідно до ДБН В.1.2-2:2006 [30]). Величини нормативних навантажень затверджують залежно від призначення конструкцій та умов їх експлуатації.

Класифікація навантажень, використовувана в ДБН В.1.2-2:2006 [30], дає підстави вважати випадок пожежі особливим впливом. Відповідно до цього, для оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій використовують постійні та тривалі навантаження.

На несучу здатність і деформативність будівельних конструкцій, що перебувають в умовах пожежі, впливають фізико-механічні властивості матеріалу конструкції, які змінюються залежно від температури нагрівання. Зокрема, такі властивості

визначають за межею міцності (R) і модулем пружності (E) матеріалу, із якого виготовлені конструкції.

Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (окремої конструкції, частини конструктивної системи або конструктивної системи в цілому), згідно з вимогами ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 [8], передбачає такі етапи:

- вибір проектних сценаріїв пожежі;
- визначення температурних режимів пожежі;
- розрахунок підвищення температури в будівельних конструкціях;
- розрахунок механічної роботи конструкцій в умовах пожежі.

Граничним станом за ознакою втрати несучої здатності для сталевих конструкцій, які випробовують під навантаженням, є обвалення зразка або виникнення граничних значень температур для арматури та сталі колон із вогнезахисним облицюванням. Температура, за якої матеріал конструкцій (сталь) або сталева арматура не можуть виконувати свої функції, дорівнює 500 °С.

Для колон, які випробовують без навантаження, час досягнення граничного стану за ознакою втрати несучої здатності визначають за даними вимірювань температури, відповідно до товщини зразка, розрахунковим методом, який має бути узгоджений із вимогами ДБН В.1.1-7:2016 [6].

Розрахунок будівельних конструкцій на вогнестійкість охоплює прикладання впливів для теплового аналізу та впливів для механічного аналізу. Ці вимоги до методу визначення вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів для будівельних несучих сталевих конструкцій регламентує стандарт ДСТУ Б В.1.1-17:2007 (ENV 13381-4:2002, NEQ) [26].

У стандарті описано пасивні та реактивні вогнезахисні покриття. Відповідно до стандарту, використовують зразки, які є сталевими прокатними профілями – сталевими двотаврами з профільними (коробчастими) коефіцієнтами (зведеними товщинами) у вигляді балок і колон із нанесеним на них вогнезахисним покриттям, згідно з технологією нанесення, регламентованою в нормативній документації для вогнезахисного покриття.

Для з'ясування характеристики вогнезахисної здатності вогнезахисного покриття випробовують певний набір зразків

балок та колон під навантаженням і без навантаження, а також набір зразків коротких колон без навантаження.

За результатами випробувань зразків визначають коефіцієнти, які враховують вплив на вогнезахисну здатність покриття, здатність вогнезахисного покриття до злипання (зчеплення) із металевою поверхнею зразка. Ці коефіцієнти використовують під час визначення вогнезахисної здатності покриття відповідно до розділу 12 ДСТУ Б В.1.1-17:2007 (ENV 13381-4:2002, NEQ) [26].

Для проведення математичного аналізу зі з'ясування характеристики вогнезахисної здатності покриття використовують результати випробувань повного стандартного набору з 10 обов'язкових зразків коротких колон. Цей набір зразків охоплює сталеві профілі із зазначеними профільними й коробчастими коефіцієнтами перерізів і значеннями товщини покриття, що має відповідати максимальному, середньому та/або мінімальному значенню товщини, відповідно до нормативної документації на нього. Якщо під час проведення математичного аналізу доведено необхідність отримання додаткових даних, то перелік зразків для отримання цих даних визначають за таблицею 6 або таблицею 10 ДСТУ Б В.1.1-17:2007 (ENV 13381-4:2002, NEQ) [26]. У цих таблицях представлено перелік 18 або 26 обов'язкових зразків коротких колон (залежно від потреби).

Для оцінювання методами математичного аналізу вогнезахисної здатності пасивного вогнезахисного покриття, що використовують для три- та чотирибічного захисту сталевих конструкцій, випробовують відповідно до таблиці 2 [26] два зразки балки під навантаженням, два зразки балки без навантаження та набір зразків коротких колон, які вибирають згідно з аналізом, що зображено на рис. А 2 ... А 4 [26].

Для оцінювання вогнезахисної здатності пасивного вогнезахисного покриття, яке використовують тільки для чотирибічного захисту колон, замість випробувань двох балок під навантаженням, випробовують дві колони під навантаженням із мінімальним і максимальним значеннями товщини вогнезахисного покриття та набір зразків коротких колон, відповідно до п. 7.1.3 [26]. У такому разі випробування двох балок під навантаженням не проводять.

Для оцінювання вогнезахисної здатності реактивного вогнезахисного покриття, яке використовують для три- та

чотирибічного захисту сталевих конструкцій, випробовують два навантажені зразки балки, два ненавантажені зразки балки відповідно до таблиці 2, набір коротких колон, дібраних з огляду на п. 7.1.3 [26], зразок колони заввишки 2000 ± 10 мм, без навантаження з максимальною товщиною вогнезахисного покриття (висока колона).

Для оцінювання вогнезахисної здатності реактивного вогнезахисного покриття, яке використовують тільки для чотирибічного захисту колон, випробовують два зразки колони під навантаженням із мінімальним та максимальним значеннями товщини вогнезахисного покриття (замість випробувань двох навантажених балок), набір коротких колон, згідно з п. 7.1.3 [26]. Випробування двох ненавантажених балок, а також високої колони в такому разі не проводять. Здатність вогнезахисного покриття до злипання та здатність до опору усадці й текучості в цьому випадку оцінюють за результатами випробувань двох колон під навантаженням.

Характеристики вогнезахисної здатності покриттів з'ясовують на основі проведених експериментальних даних, відповідно до вимог розділу 12 ДСТУ Б В.1.1-17:2007 (ENV 13381-4:2002, NEQ) [26].

Загальні вимоги й методи контролювання вогнезахисного оброблення будівельних конструкцій представлено в стандарті ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010 [27]. Вогнезахисне оброблення будівельних конструкцій виконують на підставі проектів робіт із вогнезахисного оброблення, згідно з вимогами цього стандарту та інших нормативних документів, а також регламентами робіт із вогнезахисту на конкретні види вогнезахисних засобів. Спосіб вогнезахисного оброблення вибирають залежно від властивостей будівельної конструкції, вогнезахисного засобу та умов експлуатації.

Сутність методу випробувань полягає в окресленні часового проміжку від початку температурного впливу за температурним режимом, згідно з ДСТУ Б В.1.1-4-98* [25], на сталеву пластину з нанесеним засобом вогнезахисту (вогнезахисні фарби, штукатурки та облицювання) до підвищення її температури на 480 °С від початкового значення (критична температура). Метод не може бути застосований для визначення межі вогнестійкості конструкцій із нанесеними вогнезахисними засобами (підрозділ 7.4 ДСТУ Б В.1.1-4-98* [25]).

Попередньо, під час сертифікаційних, типових чи періодичних випробувань (у ході розроблення технічних умов на вогнезахисний засіб), з'ясовують час прогріву двох сталевих пластин (контрольні зразки) до критичної температури. Значення часу прогріву фіксує підприємство-виробник у технологічному регламенті на вогнезахисний засіб. Товщина нанесення засобу вогнезахисту на одну сталеву пластину має бути меншою на 10 % від середньої товщини нанесення засобу, відповідно до технічних умов, а на другій сталевій пластині – на 10 % більшою (замість середньої товщини може бути вибрана інша товщина засобу за умови належного обґрунтування).

Для одного зразка (зразок, що перевіряють) сталевій пластині з нанесеним засобом вогнезахисту (товщина нанесення d_n повинна бути в діапазоні товщин d_k) визначають час досягнення критичної температури t_n . Порівнюють значення часу досягнення критичної температури нагріву контрольних зразків із часом досягнення критичної температури нагріву зразка, що перевіряють (для значення товщини засобу d_n). Якщо значення t_n менші на 10 % від значення t_k , то вогнезахисні властивості засобу вогнезахисту зразка, що підлягає перевірці, втрачені чи не відповідають чинним вимогам.

1.4. Оцінювання технічного стану сталевих конструкцій, прийнятих в експлуатацію об'єктів будівництва, щодо відповідності вимогам пожежної безпеки

Поданий вище виклад матеріалу стосується проектування нових конструкцій. Для конструкцій, які зазнали пошкоджень унаслідок експлуатації, зокрема після пожежі, необхідно провести обстеження для з'ясування технічного стану та обґрунтувати можливість подальшої експлуатації за умови ремонту, підсилення або заміни.

Нагляд за технічним станом будівельних конструкцій здійснюється згідно ДСТУ-Н Б В.1.2-17:2016 [31], що поширюється на будівлі і споруди для класів, згідно з ДБН В.1.2-14-2018 [32], регламентує загальні вимоги до контролю за технічним станом конструкцій будівель і споруд.

Поведінку будівельних конструкцій під дією різних впливів, а також зміну характеристик міцності й деформативності будівельних конструкцій під час високотемпературних впливів

вивчали М. Барабаш, Б. Бартелемі, М. Барабаш, О. Башинська, В. Бушев, Г. Ватуля, О. Голоднов, М. Гордіюк, В. Дрідж, О. Добростан, Б. Демчина, Л. Като, В. Корсун, Л. Кравців, О. Кричевський, П. Круківський, С. Новак, І. Маладика, А. Мілованов, І. Мосалков, О. Некора, Г. Плюсніна, В. Пчелінцев, С. Поздєєв, В. Ройтман, С. Фомін, С. Цвіркун, А. Яковлев, J. Smolka, L. Slupik, A. Fic, A. Nowak, L. Kosyrczyk, R. Caldas, R. Fakury, J. Sousa, M. Batista, [1; 2; 15; 33–59] та ін. Результати досліджень за цією тематикою стали складником захищених дисертацій, увійшли до рекомендацій, посібників, нормативних документів і національних стандартів України [6–9; 13–14; 22; 25–27].

Для обстеження конструкцій, які отримали пошкодження внаслідок пожежі, необхідно з'ясувати відомості про пожежу [15]:

- час виявлення пожежі, початку інтенсивного горіння;
- тривалість інтенсивного горіння під час пожежі;
- засоби гасіння пожежі;
- місце розташування осередку займання;
- максимальна температура середовища під час пожежі.

Докладне обстеження сталевих конструкцій потрібно провести в такій послідовності:

- вивчити наявну документацію щодо конструкцій і будівель у цілому;
- ознайомитися з об'єктом, пошкодженим унаслідок пожежі;
- розробити методика проведення обстежень;
- обмежити доступ сторонніх осіб до зони виконання робіт;
- розкріпити або підсилити конструкції, що перебувають в аварійному стані (можуть бути обвалені під час проведення робіт з обстеження);
- виконати візуальне й інструментальне обстеження конструкцій для з'ясування їхнього технічного стану після пожежі;
- виконати візуальне обстеження конструкцій, які найбільш постраждали від високотемпературного впливу під час пожежі;
- виконати необхідні розрахунки, підготувати висновок про технічний стан сталевих конструкцій і можливість подальшої експлуатації будівлі;
- розробити проект підсилення конструкцій із забезпеченням вогнестійкості.

Розвиток пожежі призводить до нерівномірного нагрівання та руйнування конструкцій, стінового огородження, складованих матеріалів, обладнання, тому необхідно з'ясувати характеристики матеріалів конструкцій через лабораторні випробування зразків, які вилучені з елементів (зазнали впливу високих температур), а також проаналізувати їхній деформований стан через проведення обмірювальних робіт із залученням сучасних приладів та обладнання.

Розрахунки конструкцій необхідно проводити з огляду на виявлений (за результатами обстеження) деформований стан і фізико-механічні характеристики матеріалів елементів конструкцій. Фізико-механічні характеристики матеріалів можна вивчати руйнівними та неруйнівними методами.

У руслі дослідження до уваги беруть попередній досвід науковців щодо так званої варіації механічних властивостей сталі, залежно від року виробництва, обставин виробництва, а також анізотропію, яка призводить до зниження механічних показників у разі зміни напрямку з поздовжнього на поперечний та за товщиною [12; 14; 22].

Чинні нормативні документи, що зокрема використовують під час виготовлення конструкцій [12; 60], регламентують перелік механічних показників і методи механічних випробувань сталі.

Основний метод механічних випробувань сталі – випробування зразків на статичне розтягування для окреслення межі текучості σ_t , тимчасового опору розриву σ_b , модуля пружності та відносного подовження в разі розриву. Такі методи випробування потребують руйнування конструкції для вирізання стандартних зразків [61–62]. Застосування цього методу обмежене, а отримані результати не завжди можуть бути достовірними через статистичне розкидування даних.

Основна перевага руйнівних методів досліджень – одержання механічних властивостей досліджуваного металу з мінімальною погрішністю. При цьому дослідження можуть бути виконані як за кімнатних температур, так і за підвищених, знижених [63–64].

Крім руйнівних, застосовують і неруйнівні методи, що зможливають дослідження властивостей сталі без вилучення зразків [65–67]. Ці методи дають змогу з'ясувати властивості матеріалу за непрямыми характеристиками. Перша група (так

звані фізичні методи) заснована на дослідженнях магнітних, електричних, радіологічних тощо властивостей матеріалів, які змінюються під час навантаження [67]. Вони не забезпечують зручності, терміновості, економічності й достовірності отримання характеристик сталі під час випробувань.

Нині набули поширення методи локального руйнування. Найбільш продуктивними вважають методи, які пов'язані з вимірюванням твердості. Ці методи поділяють на статичні й динамічні. У ході підготовки поверхні недопустима зміна властивостей поверхневого шару й забезпечена перпендикулярність напрямку дії сили до поверхні конструкції [68–70].

Вимірювання проводять методом плавного (статичний) або ударного (динамічний) вдавлення індентора в поверхню матеріалу. Найбільш поширеними є методи вимірювання твердості за Брінеллем [68], за Роквелом [69], за Віккерсом [70].

Одержана за допомогою зазначених вище методів твердість – це деяке умовне середнє напруження на поверхні відбитка, що характеризує опір матеріалу деформації. Твердість пов'язана з основними механічними характеристиками, які визначають за розтягуванням. Складність визначення цієї функції полягає в аналізі деформацій із неоднорідним розподілом напружень [66].

Залежність між характеристиками міцності та твердістю кваліфікують як кореляційну. Основне обґрунтування можливості визначення механічних параметрів за твердістю передбачає підготовку діаграми твердості й діаграми розтягування сталі. Для вимірювання твердості за Брінеллем, Роквеллом і Віккерсом використовують стаціонарні й мобільні прилади.

Широкого застосування набули прилади ударної дії, які використовують еталонний зразок під час вимірювання [71–73]. За допомогою цих приладів отримано залежності σ_T та σ_B , але надійність результатів була нижчою, ніж у ході застосування статичних методів. У процесі застосування описаних вище методів похибка може бути значно вищою за 7 % [71–75].

Прилади, принцип дії яких базований на відскоку наконечника, називають склекротоскопами. За цією схемою працює метод вимірювання динамічної твердості, який має назву метод Шора. Твердість згідно з Шором (HSD) розраховують за висотою відскоку h сталевого бойка з алмазним наконечником, який падає на зразок з висоти H [71–75]. Для визначення σ_T та σ_B

використовують емпіричні формули. Відповідно до результатів досліджень, похибка цього методу може сягати 15 %.

Згідно з вимогами чинних нормативних документів [12; 14], елементи (конструкції) є працездатними, а їхній технічний стан нормальним або задовільним, якщо не виконані [30–31]:

– умова відмови конструкцій (досягнення граничних станів першої групи)

$$F \geq F_u, \quad (1.1)$$

– умова досягнення конструкцією граничних станів другої групи

$$f \geq f_u. \quad (1.2)$$

У цих формулах: F, F_u – максимальне зусилля й несуча здатність конструкції f, f_u – максимальний і граничний прогини конструкції.

З огляду на те, що в усіх конструкціях відбуваються зміни в часі, деякі (чи всі) компоненти нерівностей, подані вище, є функціями часу. Кожну з нерівностей (1.1), (1.2) можна перетворити до вигляду [76–78]:

$$\Phi_u[x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t), y_1, y_2, \dots, y_n] < \Phi(t), \quad (1.3)$$

де $\Phi_u[x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t), y_1, y_2, \dots, y_n]$ – функція несучої здатності або деформативності конструкцій, що окреслена згідно з рекомендаціями нормативних документів, з огляду на зміни параметрів у часі; $\Phi(t)$ – чинне максимальне зусилля (деформація) в елементі (конструкції).

Вид функційної залежності можна визначити після алгебраїчних перетворень нерівностей виду (1.3) із включенням до складу аргументів усіх величин, які залежать від часу, якщо це можливо.

У ході експлуатації будівельні конструкції зазнають руйнування, можуть перебувати в непридатному до експлуатації або в аварійному стані [79–81]. За таких умов їх вважають зруйнованими, їхню залишкову несучу здатність під час розрахунку підсилення приймають такою, що дорівнює нулю

(наприклад, об'єкт «Конфаймент» ЧАЕС [79–80]). Якщо кваліфікувати такі конструкції як частково зруйновані, то постає необхідність з'ясування ознак, за якими ці конструкції відрізняються від конструкцій, що повністю зруйновані. Варто зазначити, що об'єкт «Конфаймент» ЧАЕС уже введений в експлуатацію.

Частково зруйновані ті конструкції, у яких у процесі експлуатації, унаслідок дії різних чинників впливу, виникли пошкодження, що знизили несучу здатність. Для таких конструкцій не дотримані вимоги чинних норм і державних стандартів у частині розрахунку за граничними станами першої групи. Експлуатація цих конструкцій можлива після підсилення, якщо дотримана низка умов [1; 4; 21; 77–79; 82]:

- після часткового зняття зовнішнього навантаження процес збільшення прогинів і деформацій зупинився;
- стан конструкцій не загрожує життєдіяльності людей, які проводитимуть роботи з підсилення;
- загальний вигляд конструкцій та будівлі в цілому дає підстави вважати можливою їх експлуатацію після підсилення.

Сучасний розвиток технологій відновлення вможливорює виконання робіт із підсилення будівельних конструкцій із різним ступенем пошкодження.

Розроблення математичного апарату із визначення залишкової несучої здатності та вогнестійкості будівельних конструкцій, що зазнали протягом певного часу силових або інших чинників впливу високого рівня, вимагає використання такої моделі деформування матеріалів, яка б охоплювала всі етапи – від початку навантаження до повного руйнування.

1.5. Висновки й завдання дослідження

На основі поданого в першому розділі викладу сформульовано низку висновків.

1. Проаналізовано сучасний стан питання щодо сталевих конструкцій, окреслено сферу їх застосування й особливості роботи під дією різних впливів; виокремлено напрями та завдання досліджень.

2. З'ясовано, що пожежне навантаження на конструкції та будівлі в цілому можливе за будь-яких умов експлуатації. Схарактеризовано різні засоби забезпечення вогнестійкості

сталевих конструкцій (вогнезахисні покриття; облицювання з негорючих матеріалів; підвісні стелі тощо), виявлено позитивні й негативні якості захисних заходів. Наголошено, що нині недостатньо вивчений характер впливу показників здатності до зчеплення вогнезахисних матеріалів різних типів на результати оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій уточненим експериментальним способом.

3. Досліджено зміни характеристик міцності сталі під час і після пожежі. Урахування змін характеристик міцності й деформативності сталі за високотемпературних впливів можливе в разі використання деформаційних моделей. У цьому напрямі в різних країнах світу проводять низку досліджень. На сьогодні систематизовано вагомий теоретичний та експериментальний матеріал, що вможливорює виконання розрахунків конструкцій за різних чинників впливу.

4. Виявлено, що в чинному ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 [8] регламентовано настанови стосовно розрахунку та проведення заходів для забезпечення вогнестійкості конструкцій, але не представлено вимог до з'ясування технічного стану сталевих конструкцій будівель і споруд, не вмотивовано необхідності його регулювання після впливу високих температур під час пожежі. Відсутні пропозиції щодо визначення залишкової несучої здатності після початку фізичного руйнування конструкцій.

5. Наявні методи оцінювання вогнестійкості захищених сталевих конструкцій дають змогу окреслювати сталі значення мінімальної товщини системи вогнезахисту для широких діапазонів зведеної товщини сталевого профілю й критичної температури, за яких забезпечено нормовані класи вогнестійкості сталевих конструкцій. Однак практична реалізація таких методів вимагає великих матеріальних витрат, пов'язаних, зокрема, із необхідністю застосування спеціальних вогневих печей, обладнання для навантажування зразків сталевих конструкцій, а також зі створенням численної кількості стандартизованих зразків (сталевих колон і балок, облицьованих вогнезахисними матеріалами), на які має бути встановлено більше ніж 200 термопар. У ході оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій на етапі експлуатації будівель і споруд застосування таких методів не завжди прийнятне.

6. Пропоновані нині методики розрахунку сталевих конструкцій не дають змоги визначити залишкову несучу

здатність експлуатованих конструкцій, особливо тих, що зазнали руйнування внаслідок пожежі. Для визначення НДС, залишкової несучої здатності та вогнестійкості сталевих конструкцій, з огляду на різні чинники впливу, а також опису передісторії завантаження, необхідно розробити методика, ґрунтовану на методі розрахунку конструкцій за граничними станами.

Сформульовані висновки аргументовано доводять доцільність таких завдань дослідження:

- узагальнити результати досліджень у сфері визначення вогнестійкості сталевих конструкцій, НДС конструкцій після силових і високотемпературних впливів, обґрунтувати необхідність проведення досліджень;

- з'ясувати характер впливу показників здатності до зчеплення вогнезахисних матеріалів різних типів на результати оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій стандартизованим методом, який регламентований у ДСТУ Б В.1.1-17 [26], що послугує підґрунтям для розроблення спрощеного методу оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій;

- визначити складники й процедури спрощеного методу оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій, згідно з яким застосовують зменшену кількість зразків (порівняно зі стандартизованим методом) і не використовують навантажених зразків для випробувань, а також обґрунтувати параметри зразків для випробувань і граничні значення критичної температури сталі в межах спрощеного методу;

- провести валідацію спрощеного методу оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій із застосуванням систем вогнезахисту й вогнезахисних матеріалів різних типів;

- удосконалити методика оцінювання технічного стану та вогнестійкості сталевих конструкцій на етапі експлуатації будівель і споруд;

- упровадити отримані результати досліджень для виконання практичних завдань.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОКАЗНИКІВ ЗДАТНОСТІ ДО ЗЧЕПЛЕННЯ ВОГНЕЗАХИСНИХ МАТЕРІАЛІВ РІЗНИХ ТИПІВ НА РЕЗУЛЬТАТИ ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

2.1. Завдання дослідження

За результатами аналізу, проведеного в межах розділу 1, з'ясовано, що для оцінювання вогнестійкості захищених сталевих конструкцій застосовують метод, основні положення якого викладено в ДСТУ Б В.1.1-17:2007 [26]. Цей метод базований на припущенні, що ознакою втрати вогнестійкості сталевій конструкції є досягнення критичної температури сталі. Метод дає змогу визначати значення мінімальної товщини вогнезахисного матеріалу для широких діапазонів зведеної товщини сталевого профілю й критичної температури, за яких забезпечено нормовані величини межі вогнестійкості несучих сталевих конструкцій (колон та балок). Під час випробувань за цим методом проводять механічне навантажування зразків двох балок і беруть до уваги показники здатності вогнезахисного матеріалу до зчеплення та (або) його здатності залишатися неушкодженим під час вогневого впливу (далі – показники здатності до зчеплення). Метод передбачає можливість відшарування вогнезахисного матеріалу та (або) його пошкодження внаслідок деформації (наприклад, прогину) навантаженої сталевій конструкції під час вогневого впливу, що призводить до підвищення інтенсивності нагрівання конструкції та зменшення часу досягнення критичної температури сталі.

Реалізація описаного методу, однак, вимагає суттєвих матеріальних витрат, які пов'язані з необхідністю застосування спеціальних вогневих печей з обладнанням для навантажування зразків сталевих конструкцій, а також зі створенням численної кількості стандартизованих зразків (сталевих колон і балок, облицьованих вогнезахисним матеріалом), на які має бути встановлено більше ніж 200 термопар. У ході оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій на етапі експлуатації будівель застосування такого методу не прийнятне.

З огляду на це, доцільно застосовувати метод, який потребує порівняно менших матеріальних витрат, ніж метод, запропонований у ДСТУ Б В.1.1-17:2007 [26], і має прийнятну достовірність результатів оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій. Такий метод оцінювання (далі – спрощений метод) має бути ґрунтований на проведенні випробувань тільки ненавантажених зразків, їхня кількість повинна бути меншою, ніж у методі, що регламентований у ДСТУ Б В.1.1-17:2007 [26].

Для обґрунтування положень цього спрощеного методу (зокрема, параметрів зразків, діапазонів зведеної товщини сталевого профілю й критичної температури сталі) необхідно оперувати даними щодо впливу показників здатності до зчеплення вогнезахисних матеріалів різних типів на результати оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій. Ці дані дають змогу визначити значення зведеної товщини сталевого профілю й критичної температури сталі, за яких різниця між значеннями мінімальної товщини вогнезахисного матеріалу, отриманими з урахуванням і без урахування показників здатності вогнезахисних матеріалів до зчеплення, не перевищує допустимої величини. Для з'ясування даних щодо зазначеного впливу необхідно провести дослідження, що передбачає виконання низки таких завдань:

- оцінювання тривалості досягнення критичної температури сталі зразків сталевих конструкцій в умовах вогневого впливу, з урахуванням показників здатності до зчеплення й без їх урахування, для вогнезахисних матеріалів різних типів;

- оцінювання збіжності між значеннями мінімальної товщини вогнезахисних матеріалів різних типів, за яких забезпечені нормовані величини межі вогнестійкості сталевих конструкцій, що отримані з урахуванням показників здатності до зчеплення та без їх урахування.

2.2. Методи дослідження впливу показників здатності до зчеплення на результати оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій

Для вивчення впливу показників здатності до зчеплення на результати оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій застосовано дані випробувань двох типів вогнезахисних матеріалів, що отримані за методом ДСТУ Б В.1.1-17:2007 [26] і

представлені в роботі [47]. Під час цих випробувань використано такі зразки сталевих конструкцій: десять ненавантажених сталевих колон висотою 1,0 м, одна ненавантажена сталева колона висотою 2,0 м, дві навантажені сталеві балки довжиною 4,0 м, дві ненавантажені сталеві балки довжиною 1,0 м різних профілів двотаврового перерізу, на які нанесено вогнезахисні матеріали.

Для створення зразків сталевих конструкцій застосовано реактивний вогнезахисний матеріал «Ендотерм 400202» [83], що спучується під тепловим впливом в умовах пожежі, та пасивний вогнезахисний матеріал (плита) «Ендотерм 210104» [84] виробництва ТОВ «НВП «Спецматеріали». Реактивний вогнезахисний матеріал нанесено на поверхню сталевих профілів. Із застосуванням пасивного вогнезахисного матеріалу створено коробчасту систему вогнезахисту прямокутного перерізу, як зображено на рис. 2.1.

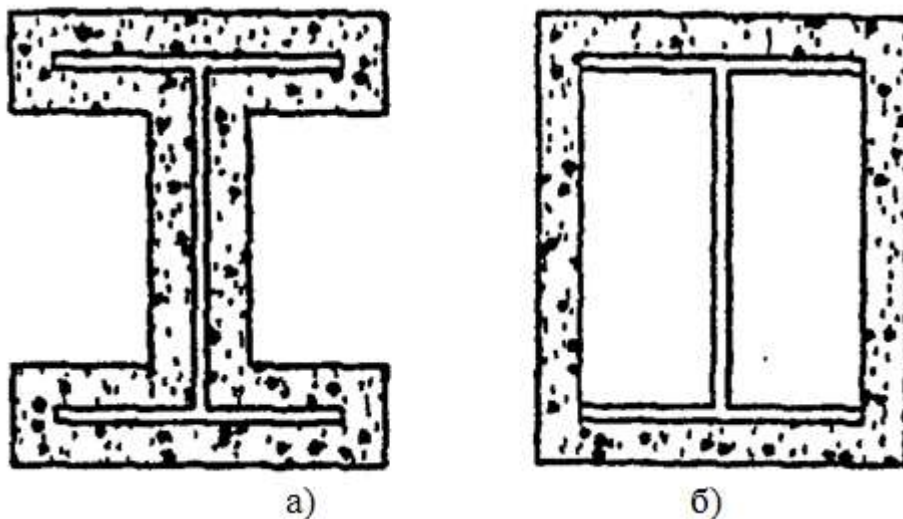


Рис. 2.1. – Профільована (а) і коробчаста (б) системи вогнезахисту

Параметри зразків сталевих колон і результати визначення значень тривалості t_{cr} вогневого впливу за стандартного температурного режиму до досягнення критичної температури сталі θ_{cr} (далі – тривалості досягнення критичної температури сталі) на цих зразках подано в таблицях 2.1, 2.2, 2.3, 2.4. [47].

Відомості щодо тривалості t_{cr} досягнення критичної температури сталі, систематизовані в таблицях 2.3, 2.4, не беруть до уваги можливе відшарування вогнезахисних матеріалів та (або) їх пошкодження внаслідок деформації навантажених сталевих колон під час пожежі.

Таблиця 2.1.
 Параметри зразків сталевих колон із реактивним вогнезахисним матеріалом

№ зразка	Типорозмір сталевого профілю	Зведена товщина сталевого профілю, V/A_m , мм	Товщина вогнезахисного матеріалу, d_p , мм
1	IPE200	3,266	1,193
2	IPE200	3,266	1,854
3	HEA200	4,268	0,429
4	HEA200	4,268	1,919
5	HEA300	5,886	0,385
6	HEA300	5,886	1,886
7	HEB300	7,710	0,413
8	HEB450	9,798	1,992
9	HEM280	13,050	1,155
10	HEM280	13,050	0,373

Таблиця 2.2.
 Параметри зразків сталевих колон із пасивним вогнезахисним матеріалом

№ зразка	Типорозмір сталевого профілю	Зведена товщина сталевого профілю V/A_m , мм	Товщина вогнезахисного матеріалу, d_p , мм
1	IPE200	4,41	40,2
2	IPE200	4,41	60,4
3	HEA200	6,30	19,3
4	HEA200	6,30	40,4
5	HEA200	6,30	60,8
6	HEA300	8,82	20,8
7	HEA300	8,82	40,8
8	HEB300	11,53	20,3
9	HEB450	13,56	40,2
10	HEM280	18,82	19,8

Таблиця 2.3.
Значення тривалості t_{cr} досягнення критичної температури сталі
для зразків сталевих колон із реактивним вогнезахисним
матеріалом

Критична температура сталі θ_{cr} , °C	350	400	450	500	550	600	650	700	750
№ зразка	Значення тривалості t_{cr} , хв.								
1	21	29	36	42	47	52	57	-	-
2	32	41	48	54	60	65	71	78	87
3	15	20	24	28	32	35	39	43	48
4	35	46	55	61	68	74	81	88	98
5	17	23	28	32	35	39	43	48	54
6	37	52	62	71	79	87	95	-	-
7	19	25	30	34	38	42	46	51	58
8	48	61	73	83	93	103	114	-	-
9	41	54	65	72	81	90	99	111	-
10	25	32	38	44	48	53	58	-	-

Таблиця 2.4.
Значення тривалості t_{cr} досягнення критичної температури сталі
для зразків сталевих колон із пасивним вогнезахисним
матеріалом

Критична температура сталі θ_{cr} , °C	350	400	450	500	550	600	650	700	750
№ зразка	Значення тривалості t_{cr} , хв.								
1	108	115	123	131	140	149	160	174	-
2	214	225	237	249	261	273	288	-	-
3	51	55	60	65	71	78	85	95	108
4	121	130	139	149	159	170	183	198	219
5	239	252	266	282	297	-	-	-	-

Продовження табл. 2.4.

6	65	73	81	90	99	110	122	137	157
7	143	155	167	180	194	210	227	247	-
8	73	81	91	101	112	124	139	155	176
9	165	181	197	213	231	250	263	275	289
10	95	108	121	134	149	166	-	-	-

Згідно з експериментальними даними, представленими в таблицях 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, визначено дані щодо тривалості $t_{cr,mod}$ досягнення критичної температури сталі, які зважають на показники здатності вогнезахисних матеріалів до зчеплення, а також різницю $\delta_{t,mod}$ між цими даними й значеннями тривалості t_{cr} . Проведено апроксимацію даних щодо тривалості t_{cr} та $t_{cr,mod}$ із застосуванням рівняння числової лінійної регресії, що окреслює залежність тривалості досягнення критичної температури сталі від значення цієї температури, товщини вогнезахисного матеріалу та зведеної товщини сталевого профілю. За отриманими коефіцієнтами регресії визначено значення мінімальної товщини вогнезахисного матеріалу, які враховують і не враховують показники здатності вогнезахисних матеріалів до зчеплення, та їхню різницю. Процедури й отримані результати докладно описані нижче.

2.3. Результати оцінювання тривалості досягнення критичної температури сталі зразків сталевих конструкцій із врахуванням показників здатності вогнезахисних матеріалів до зчеплення та без їх урахування

Дані щодо тривалості t_{cr} досягнення критичної температури сталі, подані в таблицях 2.3, 2.4, не беруть до уваги можливе відшарування вогнезахисних матеріалів та (або) їх пошкодження внаслідок деформації навантажених сталевих колон під час пожежі, тобто не зважають на показники здатності вогнезахисних матеріалів до зчеплення.

У таблицях 2.5, 2.6 систематизовано відомості стосовно тривалості $t_{cr,mod}$ досягнення критичної температури сталі, які враховують показники здатності реактивного й пасивного вогнезахисних матеріалів до зчеплення. Ці дані визначені за результатами порівняння значень температури сталеві поверхні

на двох навантажених балках довжиною 4,0 м і двох ненавантажених балках довжиною 1,0 м. Для реактивного вогнезахисного матеріалу аналогічні дані проаналізовані також за результатами порівняння значень температури сталеві поверхні на колоні висотою 2,0 м і колоні висотою 1,0 м, за процедурою, яку викладено в підрозділах 12.2, 12.3 ДСТУ Б В.1.1-17:2007 [26]. Відповідно до цієї процедури, коригувальний коефіцієнт $k_d(\theta_{LB})$, який характеризує здатність вогнезахисного матеріалу до зчеплення, визначають за формулою:

$$k_d(\theta_{LB}) = \theta_{LB} / \theta_{UB}, \quad (2.1)$$

де θ_{LB} – температура навантаженої балки, °С; θ_{UB} – температура ненавантаженої балки, °С.

Значення коригувального коефіцієнта $k_d(\theta_{LB})$ визначають для кожної навантаженої балки для інтервалів температури, починаючи від 350 °С, із кроком 50 °С.

Таблиця 2.5.

Значення тривалості $t_{cr,mod}$ досягнення критичної температури сталі для зразків сталевих колон, які враховують показники здатності реактивного вогнезахисного матеріалу до зчеплення

Критична температура сталі θ_{cr} , °С	350	400	450	500	550	600	650
№ зразка	Значення тривалості $t_{cr,mod}$, хв.						
1	21	29	35	40	45	50	56
2	32	41	48	54	60	65	71
3	15	20	23	26	30	33	37
4	35	46	55	61	68	74	81
5	17	22	26	29	33	36	41
6	37	51	62	71	79	87	95
7	19	24	28	32	35	39	44
8	48	61	73	83	93	103	114
9	41	53	62	70	78	87	97
10	25	31	36	40	45	49	55

Для реактивного вогнезахисного матеріалу за результатами вимірювання температури θ_{TC} високої колони (колони довжиною 2 м) і температури θ_{SC} еквівалентної їй короткої колони (колони довжиною 1 м) додатково розраховують коригувальний коефіцієнт $k_d(\theta_{TC})$, який також характеризує здатність реактивного вогнезахисного матеріалу до зчеплення, за формулою:

$$k_d(\theta_{TC}) = \theta_{TC} / \theta_{SC}. \quad (2.2)$$

Значення коригувального коефіцієнта $k_d(\theta_{TC})$ визначають для інтервалів температури, починаючи від 350 °С, із кроком 50 °С.

Таблиця 2.6.

Значення тривалості $t_{cr,mod}$ досягнення критичної температури сталі для зразків сталевих колон, які враховують показники здатності пасивного вогнезахисного матеріалу до зчеплення

Критична температура сталі θ_{cr} , °С	350	400	450	500	550	600	650	700	750
№ зразка	Значення тривалості $t_{cr,mod}$, хв.								
1	107	114	122	130	138	142	146	150	–
2	214	224	236	248	260	268	272	–	–
3	51	55	59	62	65	69	73	78	84
4	120	129	138	148	157	162	167	173	179
5	239	252	266	281	296	–	–	–	–
6	65	72	79	84	91	96	103	111	121
7	142	153	165	178	191	196	204	211	–
8	73	81	89	95	101	108	116	125	136
9	165	181	197	213	229	237	245	253	260
10	93	106	118	126	135	144	–	–	–

За отриманими значеннями цих коефіцієнтів результати вимірювання температури θ_{SC} коротких колон (колон довжиною 1 м) коригують за формулою:

$$\theta_{m(SC)} = k_d(\theta) \cdot \theta_{SC}, \quad (2.3)$$

де $\theta_{m(SC)}$ – скоригована температура сталеві колони, °С; $k_d(\theta)$ – коригувальний коефіцієнт, який характеризує здатність вогнезахисного матеріалу до зчеплення.

Значення коригувального коефіцієнта $k_d(\theta)$ для пасивного вогнезахисного матеріалу відповідають значенням коригувального коефіцієнта $k_d(\theta_{LB})$, а для реактивного вогнезахисного матеріалу – найбільшому з коригувальних коефіцієнтів $k_d(\theta_{LB})$ і $k_d(\theta_{TC})$.

Дані щодо тривалості $t_{cr,mod}$, які представлено в таблицях 2.5 і 2.6, визначені за даними щодо скоригованої температури $\theta_{m(SC)}$ коротких сталевих колон.

За формулою (2.4) визначено дані щодо різниці $\delta_{t,mod}$ між значеннями тривалості досягнення критичної температури сталі, які не враховують і враховують показники здатності реактивного й пасивного вогнезахисних матеріалів до зчеплення. Значення цих показників подано в таблицях 2.7 і 2.8. На рис. 2.2, 2.3 зображено залежності цієї різниці від критичної температури сталі для зразків сталевих колон із реактивним та пасивним вогнезахисними матеріалам.

$$\delta_{t,mod} = 100(t_{cr} - t_{cr,mod}) / t_{cr}. \quad (2.4)$$

Таблиця 2.7.

Результати розрахунку значень різниці $\delta_{t,mod}$ для сталевих колон із реактивним вогнезахисним матеріалом

Критична температура сталі θ_{cr} , °С	350	400	450	500	550	600	650
№ зразка	Значення різниці $\delta_{t,mod}$, %						
1	0,00	0,00	2,78	4,76	4,26	3,85	1,75
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	4,17	7,14	6,25	5,71	5,13

Продовження табл. 2.7.

4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	4,35	7,14	9,38	5,71	7,69	4,65	
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
7	0,00	4,00	6,67	5,88	7,89	7,14	4,35	
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
9	0,00	1,85	4,62	2,78	3,70	3,33	2,02	
10	0,00	3,13	5,26	9,09	6,25	7,55	5,17	

Таблиця 2.8.

Результати розрахунку значень різниці $\delta_{t,mod}$ для сталевих колон із пасивним вогнезахисним матеріалом

Критична температура сталі θ_{cr} , °C	350	400	450	500	550	600	650	700	750
№ зразка	Значення різниці $\delta_{t,mod}$, %								
1	0,93	0,87	0,81	0,76	1,43	4,70	8,75	13,79	–
2	0,00	0,44	0,42	0,40	0,38	1,83	5,56	–	–
3	0,00	0,00	1,67	4,62	8,45	11,54	14,12	17,89	22,22
4	0,83	0,77	0,72	0,67	1,26	4,71	8,74	12,63	18,26
5	0,00	0,00	0,00	0,35	0,34	–	–	–	–
6	0,00	1,37	2,47	6,67	8,08	12,73	15,57	18,98	22,93
7	0,70	1,29	1,20	1,11	1,55	6,67	10,13	14,57	–
8	0,00	0,00	2,20	5,94	9,82	12,90	16,55	19,35	22,73
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,87	5,20	6,84	8,00	10,03
10	2,11	1,85	2,48	5,97	9,40	13,25	–	–	–

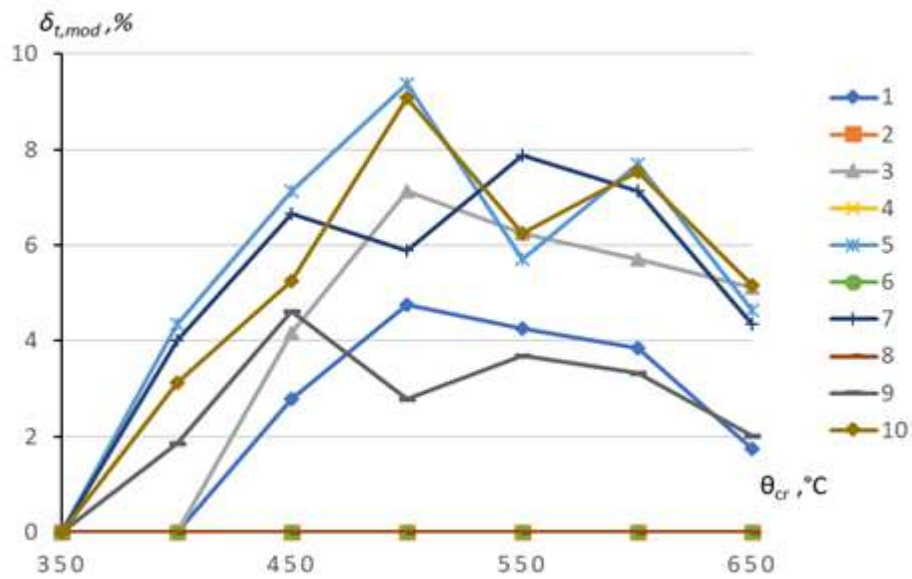


Рис. 2.2. – Залежність різниці $\delta_{t,mod}$ від критичної температури сталі θ_{cr} для зразків сталевих колон із реактивним вогнезахисним матеріалом (1, 2...10 – номер зразка)

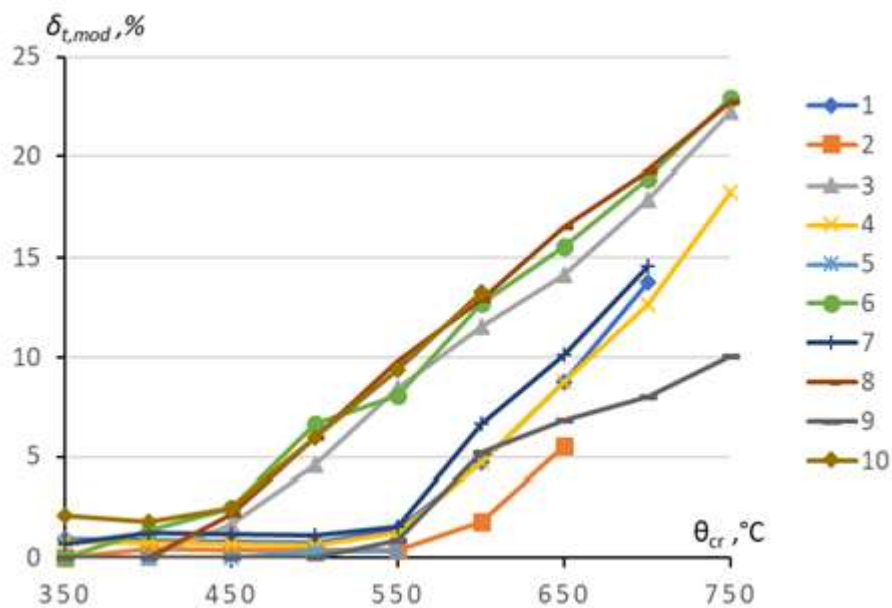


Рис. 2.3. – Залежність різниці $\delta_{t,mod}$ від критичної температури сталі θ_{cr} для зразків сталевих колон із пасивним вогнезахисним матеріалом (1, 2...10 – номер зразка)

Аналіз отриманих розрахункових даних спонукає до висновку, що для зразків сталевих колон із пасивним вогнезахисним матеріалом різниця $\delta_{t,mod}$ досягає 22,9 %, це значно більше, ніж для зразків сталевих колон із реактивним вогнезахисним матеріалом, для яких максимальна різниця становить 9,4 %. Для зразків сталевих колон із реактивним вогнезахисним матеріалом різниця $\delta_{t,mod}$ збільшується в разі підвищення критичної температури сталі до 500 °С, а за подальшого підвищення цієї температури – зменшується. Для зразків сталевих колон із пасивним вогнезахисним матеріалом за підвищення критичної температури сталі до (450...550)°С значення різниці $\delta_{t,mod}$ несуттєві (до 2,5 %), у разі подальшого підвищення цієї температури різниця $\delta_{t,mod}$ помітно збільшується, її найбільші величини фіксують за температури 750 °С.

Такий хід залежностей різниці $\delta_{t,mod}$ від критичної температури сталі пов'язаний із тим, що в коробчастій системі вогнезахисту з пасивним вогнезахисним матеріалом після досягнення температури сталевих профілів значень (450...550)°С, унаслідок деформації навантажених зразків (балок), відбувається суттєве ушкодження вогнезахисного матеріалу [48], що призводить до інтенсивного підвищення температури профілів. У профільованій системі вогнезахисту з реактивним вогнезахисним матеріалом, через деформацію навантажених зразків під час вогневого впливу, не відбувається суттєвого пошкодження цього вогнезахисного матеріалу [48].

2.4. Результати оцінювання збіжності між значеннями мінімальної товщини вогнезахисних матеріалів різних типів, за яких забезпечено нормовані величини межі вогнестійкості сталевих конструкцій

Унаслідок різниці $\delta_{t,mod}$ між значеннями тривалості досягнення критичної температури сталі, які не враховують і враховують показники здатності реактивного й пасивного вогнезахисних матеріалів до зчеплення, з'являється різниця $\delta_{d,mod}$ і в розрахункових значеннях мінімальної товщини вогнезахисних матеріалів, за яких для певних величин критичної температури сталі та зведеної товщини сталевого профілю забезпечена нормована межа вогнестійкості несучих сталевих конструкцій.

Для визначення даних щодо цієї різниці оброблено відомості, систематизовані в таблицях 2.3, 2.4, 2.5 і 2.6. в такій послідовності.

1. Апроксимація даних щодо тривалості t_{cr} , які запропоновано в таблицях 2.3 і 2.4, із використанням регламентованої в Ж.3 ДСТУ Б В.1.1-17:2007 [26] процедури та рівняння числової лінійної регресії виду:

$$t_{cr} = a_0 + a_1 d_p + a_2 d_p \frac{V}{A_m} + a_3 \theta_{cr} + a_4 d_p \theta_{cr} + a_5 d_p \frac{V}{A_m} \theta_{cr} + a_6 \frac{V}{A_m} \theta_{cr} + a_7 \frac{V}{A_m}, \quad (2.5)$$

де t_{cr} – тривалість досягнення критичної температури сталі, хв.; θ_{cr} – критична температура сталі, °С; d_p – значення товщини вогнезахисного матеріалу на зразку, зафіксоване в таблиці 2.1 або в таблиці 2.2, мм; V/A_m – зведена товщина сталевого профілю (таблиці 2.1, 2.2), мм; $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$ – константи (коефіцієнти регресії).

Такий підхід уможливорює констатацію залежності тривалості досягнення критичної температури сталі від значення цієї температури, товщини вогнезахисного матеріалу та зведеної товщини сталевого профілю. Згідно з результатами розрахунків, визначають значення восьми констант $a_0 - a_7$ цієї залежності. Апроксимацію даних щодо тривалості $t_{cr,mod}$, які представлено в таблицях 2.5 і 2.6, виконують із застосуванням рівняння числової лінійної регресії (2.5), але замість t_{cr} приймають $t_{cr,mod}$.

2. Визначення значень мінімальної товщини d_p вогнезахисного матеріалу, які не враховують показники здатності реактивного й пасивного вогнезахисних матеріалів до зчеплення, для різних величин нормованої межі вогнестійкості ($t_{fi,requ}$), критичної температури сталі та зведеної товщини сталевого профілю з урахуванням обмежень, описаних у п. 13.2 ДСТУ Б В.1.1-17:2007 [26]:

$$d_p = \frac{t_{cr} - a_0 - a_3 \theta_{cr} - a_6 \theta_{cr} \frac{V}{A_m} - a_7 \frac{V}{A_m}}{a_1 + a_4 \theta_{cr} + a_2 \frac{V}{A_m} + a_5 \theta_{cr} \frac{V}{A_m}}, \quad (2.6)$$

де $t_{cr} = t_{fi,requ}$ – нормована межа вогнестійкості, хв.; V/A_m – зведена товщина сталевого профілю для розрахунків, мм; d_p – розрахункове значення мінімальної товщини вогнезахисного матеріалу, яке не враховує показники здатності вогнезахисного матеріалу до зчеплення, мм.

Значення мінімальної товщини $d_{p,mod}$ вогнезахисного матеріалу, які враховують показники здатності реактивного й пасивного вогнезахисних матеріалів до зчеплення, визначають за формулою (2.6), але замість d_p приймають $d_{p,mod}$ і застосовують значення коефіцієнтів $a_0 - a_7$, які отримано за даними $t_{cr,mod}$, для різних величин нормованої межі вогнестійкості ($t_{fi,requ}$), критичної температури сталі та зведеної товщини сталевого профілю, із урахуванням обмежень, регламентованих у п. 13.2 ДСТУ Б В.1.1-17:2007 [26]. Ці розрахунки проведено для значень нормованої межі вогнестійкості від 30 хв. до 90 хв. – для реактивного вогнезахисного матеріалу, від 45 хв. до 240 хв. – для пасивного вогнезахисного матеріалу; критичної температури сталі від 350 °C до 650 °C – для реактивного вогнезахисного матеріалу, від 350 °C до 750 °C – для пасивного вогнезахисного матеріалу; зведеної товщини сталевого профілю від 2,9 мм до 14,3 мм – для реактивного вогнезахисного матеріалу, від 4,0 мм до 20,0 мм – для пасивного вогнезахисного матеріалу.

3. Визначення різниці $\delta_{d,mod}$ між значеннями товщини $d_{p,mod}$ та d_p , які враховують і не враховують показники здатності реактивного й пасивного вогнезахисних матеріалів до зчеплення, проводять за формулою:

$$\delta_{d,mod} = 100 (d_{p,mod} - d_p) / d_p, \quad (2.7)$$

де $d_{p,mod}$ – розрахункове значення мінімальної товщини вогнезахисного матеріалу, яке враховує показники здатності вогнезахисного матеріалу до зчеплення, мм.

Результати визначення коефіцієнтів регресії представлено в таблицях 2.9 і 2.10. Розрахунки коефіцієнтів чисельної регресії виконано із застосуванням стандартної програми (функції) регресивного аналізу ЛИНЕЙН «Microsoft Excel».

Розрахункові дані щодо товщини d_p та $d_{p,mod}$ визначено з урахуванням обмежень, описаних у п. 13.2 ДСТУ Б В.1.1-17:2007 [26]. Зокрема, це стосується обмеження стосовно того, що відхилення розрахункової товщини вогнезахисного матеріалу від значень товщини, які були під час випробування, мають сягати від 5 %. З огляду на це, у таблицях (у деяких їхніх колонках) та на рисунках, зображених нижче, відсутні значення розрахункової товщини вогнезахисного матеріалу для деяких величин зведеної товщини сталевого профілю.

Отримані розрахункові дані щодо товщини $d_{p,mod}$ реактивного вогнезахисного матеріалу для нормованої межі вогнестійкості 45 хв. і пасивного вогнезахисного матеріалу для нормованої межі вогнестійкості 180 хв. як приклад запропоновано в таблицях 2.11 і 2.12. Результати визначення різниці $\delta_{d,mod}$ представлено в графічному вигляді у формі залежностей цієї різниці від зведеної товщини сталевого профілю для різних значень нормованої межі вогнестійкості та критичної температури сталі. Для реактивного вогнезахисного матеріалу ці залежності відображені на рис. 2.4, 2.5, 2.6, 2.7.

Таблиця 2.9.

Результати визначення коефіцієнтів регресії за даними щодо тривалості t_{cr}

Значення коефіцієнтів регресії								
Реактивний вогнезахисний матеріал	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
Реактивний вогнезахисний матеріал	-15,22	7,442	-2,181	0,06073	0,01045	0,008036	0,000789	0,839
Пасивний вогнезахисний матеріал	-117,3	4,555	-0,063	0,1485	-0,00142	0,000414	0,002897	1,372

Таблиця 2.10.

Результати визначення коефіцієнтів регресії за даними щодо тривалості $t_{cr,mod}$

Значення коефіцієнтів регресії								
Реактивний вогнезахисний матеріал	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
Реактивний вогнезахисний матеріал	-20,99	7,518	-1,975	0,0718	0,01130	0,00768	-0,00129	1,641
Пасивний вогнезахисний матеріал	-84,17	4,230	-0,0388	0,0743	-0,00078	0,000385	0,000866	1,760

Таблиця 2.11.
Значення мінімальної товщини $d_{p,mod}$ реактивного
вогнезахисного матеріалу для нормованої межі
вогнестійкості 45 хв.

Критична температура сталі θ_{cr} , °C	350	400	450	500	550	600	650
Зведена товщина сталевого профілю V/A_m , мм	Значення мінімальної товщини $d_{p,mod}$, мм						
2,9			1,811	1,464	1,175	0,930	0,719
3,0			1,789	1,444	1,157	0,915	0,707
3,1			1,767	1,425	1,140	0,900	0,695
3,2			1,746	1,405	1,123	0,886	0,683
3,3			1,725	1,387	1,107	0,872	0,671
3,4			1,705	1,368	1,091	0,858	0,660
3,6		2,077	1,665	1,333	1,060	0,832	0,638
3,7		2,056	1,645	1,315	1,045	0,819	0,628
3,8		2,035	1,626	1,298	1,030	0,807	0,618
4,0		1,994	1,588	1,265	1,002	0,783	0,598
4,2		1,955	1,552	1,233	0,974	0,760	0,579
4,5		1,897	1,500	1,187	0,935	0,727	0,552
4,8		1,841	1,450	1,144	0,898	0,696	0,527
5,0		1,805	1,418	1,116	0,874	0,676	0,511
5,3		1,753	1,372	1,076	0,840	0,648	0,488
5,6		1,703	1,327	1,038	0,808	0,621	0,467
5,9		1,654	1,285	1,001	0,778	0,596	0,446
6,3	2,089	1,592	1,231	0,955	0,739	0,565	0,421
6,7	2,023	1,533	1,179	0,912	0,703	0,535	0,397
7,1	1,960	1,476	1,131	0,871	0,669	0,508	0,375
7,7	1,868	1,396	1,062	0,814	0,622	0,469	
8,3	1,781	1,321	0,999	0,761	0,579	0,434	
9,1	1,672	1,227	0,921	0,697	0,527	0,392	
10,0	1,556	1,130	0,841	0,632	0,474		
11,1	1,426	1,023	0,754	0,562	0,417		
12,5	1,274	0,901	0,656	0,483			
14,3	1,100	0,764	0,548	0,398			

Таблиця 2.12.
Значення мінімальної товщини $d_{p,mod}$ пасивного вогнезахисного матеріалу для нормованої межі вогнестійкості 180 хв.

Критична температура сталі θ_{cr} , °C	350	400	450	500	550	600	650	700	750
Зведена товщина сталевого профілю V/A_m , мм	Значення мінімальної товщини $d_{p,mod}$, мм								
4,0	52,96	51,61	50,29	48,99	47,71	46,45	45,21	44,00	42,80
4,2	52,63	51,25	49,89	48,56	47,25	45,96	44,70	43,46	42,24
4,3	52,47	51,07	49,69	48,34	47,02	45,72	44,44	43,19	41,97
4,5	52,15	50,71	49,30	47,92	46,56	45,24	43,94	42,67	41,43
4,8	51,67	50,17	48,71	47,29	45,90	44,54	43,21	41,91	40,64
5,0	51,35	49,82	48,33	46,88	45,46	44,08	42,73	41,41	40,12
5,3	50,88	49,30	47,77	46,27	44,82	43,40	42,02	40,68	39,37
5,6	50,42	48,79	47,21	45,68	44,19	42,75	41,34	39,97	38,64
5,9	49,96	48,29	46,67	45,10	43,58	42,10	40,67	39,28	37,94
6,3	49,36	47,63	45,95	44,34	42,78	41,27	39,81	38,39	37,02
6,7	48,77	46,98	45,26	43,60	42,00	40,46	38,97	37,54	36,15
7,1	48,19	46,34	44,58	42,88	41,25	39,67	38,16	36,71	35,30
7,7	47,33	45,42	43,58	41,83	40,15	38,54	37,00	35,52	34,09
8,3	46,50	44,51	42,62	40,82	39,10	37,46	35,89	34,39	32,95
9,1	45,42	43,35	41,39	39,53	37,76	36,08	34,48	32,96	31,51
10,0	44,24	42,09	40,06	38,14	36,33	34,62	33,00	31,46	30,00
11,1	42,86	40,62	38,51	36,54	34,69	32,96	31,32	29,77	28,30
12,5	41,19	38,84	36,67	34,65	32,76	31,00	29,35	27,80	26,34
14,3	39,16	36,71	34,47	32,41	30,49	28,72	27,07	25,54	24,10
16,7	36,64	34,11	31,81	29,72	27,80	26,04	24,41	22,91	21,51
20,0	33,51	30,91	28,59	26,49	24,60	22,88	21,31	19,87	18,54

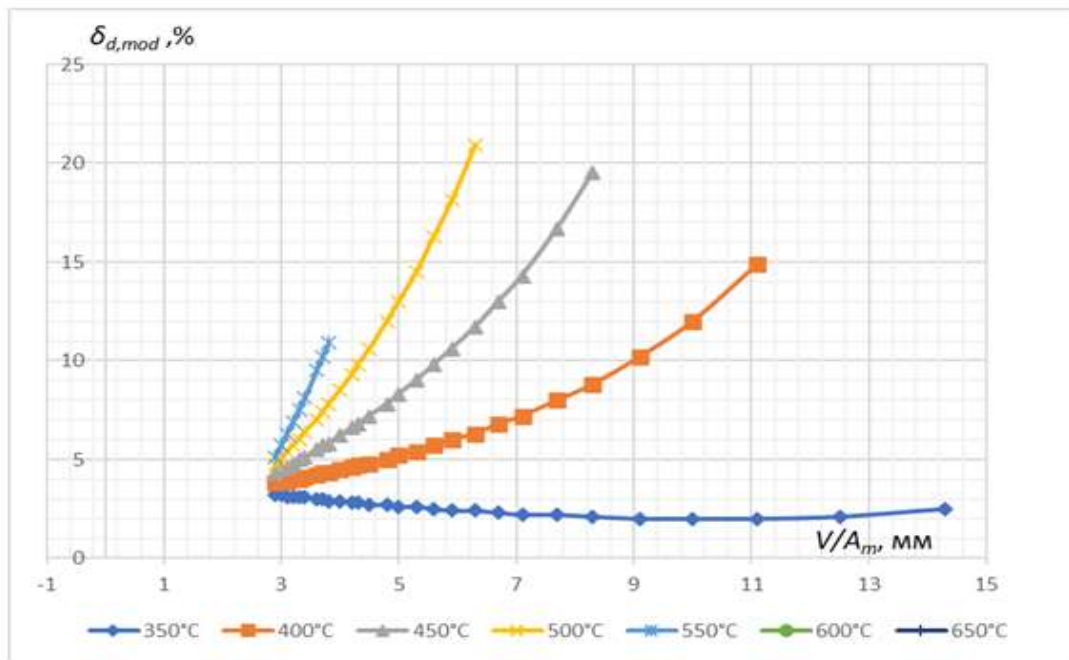


Рис. 2.4. – Залежність різниці $\delta_{d,mod}$ від зведеної товщини сталевого профілю для нормованої межі вогнестійкості 30 хв. і різних значень критичної температури сталі θ_{cr} , зафіксована для реактивного вогнезахисного матеріалу

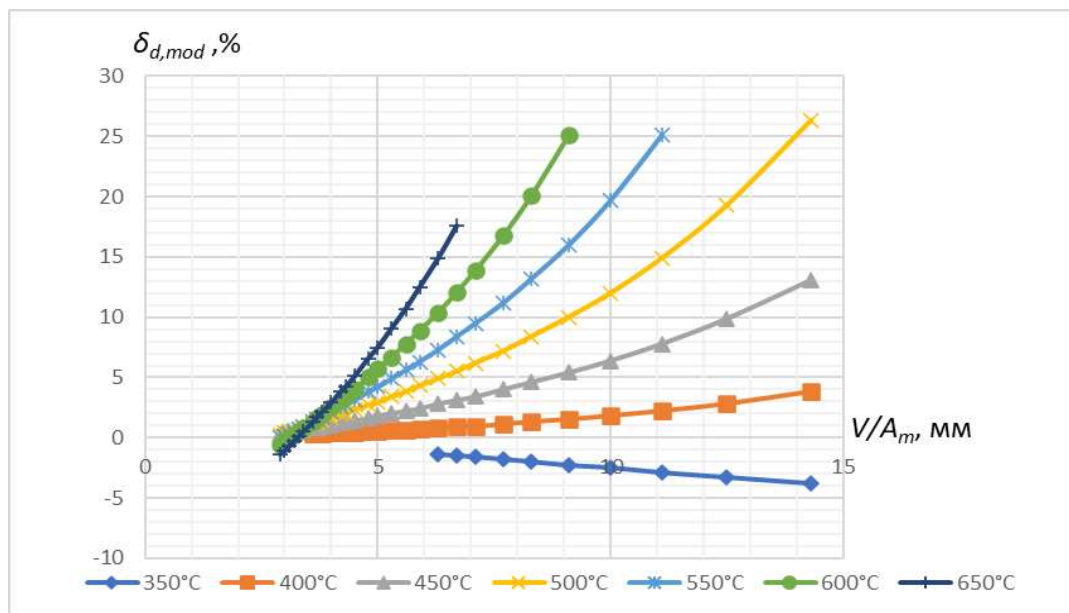


Рис. 2.5. – Залежність різниці $\delta_{d,mod}$ від зведеної товщини сталевого профілю для нормованої межі вогнестійкості 45 хв. і різних значень критичної температури сталі θ_{cr} , зафіксована для реактивного вогнезахисного матеріалу

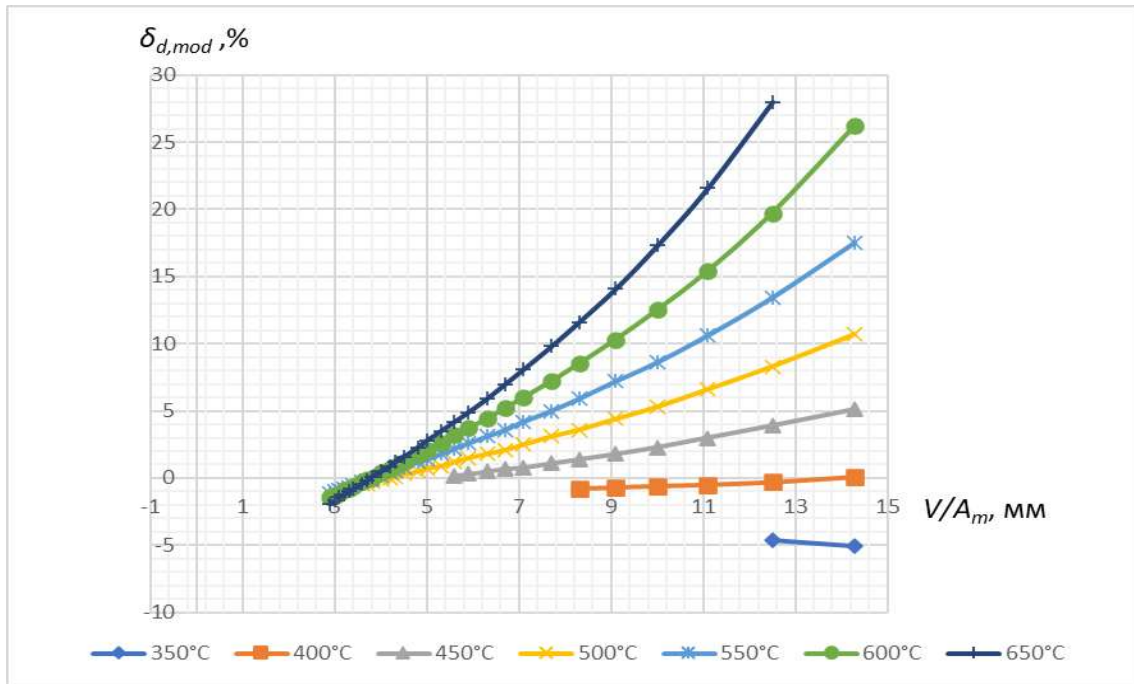


Рис. 2.6. – Залежність різниці $\delta_{d,mod}$ від зведеної товщини сталевого профілю для нормованої межі вогнестійкості 60 хв. і різних значень критичної температури сталі θ_{cr} , зафіксована для реактивного вогнезахисного матеріалу

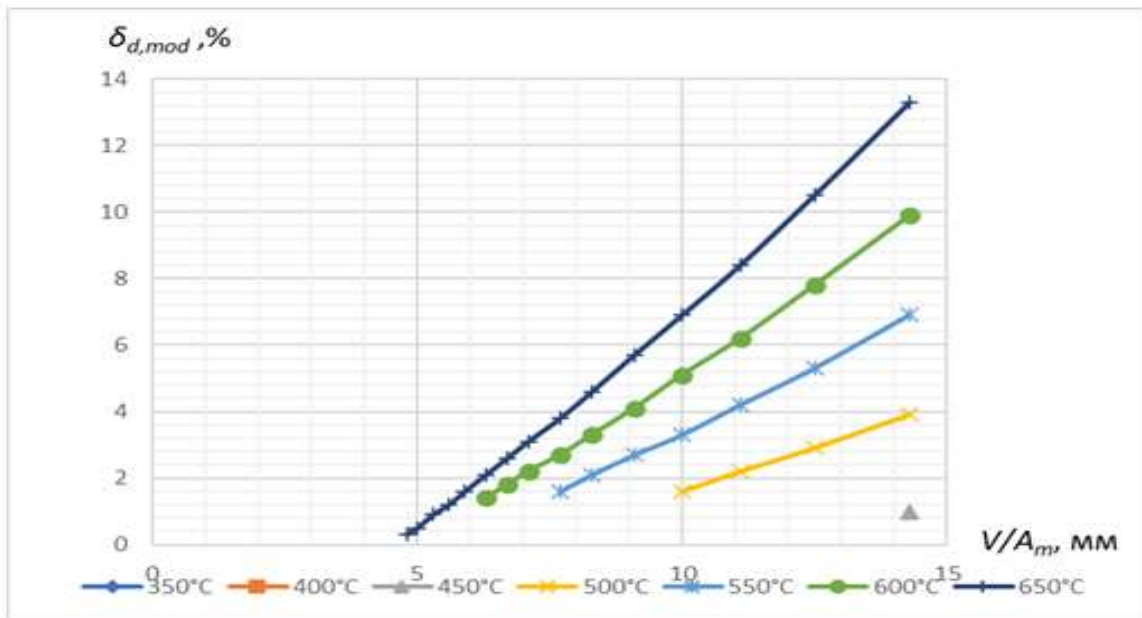


Рис. 2.7. – Залежність різниці $\delta_{d,mod}$ від зведеної товщини сталевого профілю для нормованої межі вогнестійкості 90 хв. і різних значень критичної температури сталі θ_{cr} , зафіксована для реактивного вогнезахисного матеріалу

Аналіз отриманих розрахункових даних засвідчує, що залежності $\delta_{d,mod}$ від зведеної товщини сталевого профілю для реактивного вогнезахисного матеріалу мають переважно монотонний характер. Різниця $\delta_{d,mod}$ для більшості залежностей суттєво збільшується з підвищенням зведеної товщини сталевого профілю, її значення залежать від величини критичної температури сталі та нормованої межі вогнестійкості (рис. 2.5, 2.7). Максимальне значення різниці $\delta_{d,mod}$ становить 28,0 %. Для залежностей, отриманих для критичної температури сталі 350 °С і нормованої межі вогнестійкості 45 хв. (рис. 2.5) та 60 хв. (рис. 2.6), із підвищенням зведеної товщини сталевого профілю різниця $\delta_{d,mod}$ зменшується й досягає 5,1 %. Наявність від'ємних значень різниці $\delta_{d,mod}$ можна пояснити похибками апроксимації даних щодо тривалості t_{cr} і $t_{cr,mod}$, проведеної за рівнянням числової лінійної регресії виду (2.5). Під час цієї апроксимації визначають значення коефіцієнтів регресії, за якими наявна мінімальна відмінність між експериментальними даними щодо тривалості t_{cr} (або $t_{cr,mod}$) і розрахунковими значеннями t_{cr} (або $t_{cr,mod}$). Відповідно до підрозділу 12.6 ДСТУ Б В.1.1-17:2007 [26], допустима відмінність між експериментальними й розрахунковими даними щодо тривалості t_{cr} (або $t_{cr,mod}$) – до 30 %. Для розрахунків, які виконують для реактивного вогнезахисного матеріалу, середнє значення цієї відмінності для тривалості t_{cr} становить 9,53 % (для пасивного вогнезахисного матеріалу – 4,66 %).

Отримані для пасивного вогнезахисного матеріалу залежності $\delta_{d,mod}$ від зведеної товщини сталевого профілю представлено на рис. 2.8, 2.9, 2.10, 2.11, 2.12, 2.13, 2.14, 2.15. Ці залежності мають такий самий характер, як і для реактивного вогнезахисного матеріалу. Максимальне значення різниці $\delta_{d,mod}$ становить 38,7 %. Для залежностей, які отримано для критичної температури сталі 350 °С і 400 °С та нормованої межі вогнестійкості від 45 хв. до 240 хв., із підвищенням зведеної товщини сталевого профілю різниця $\delta_{d,mod}$ зменшується й досягає –5,2 %.

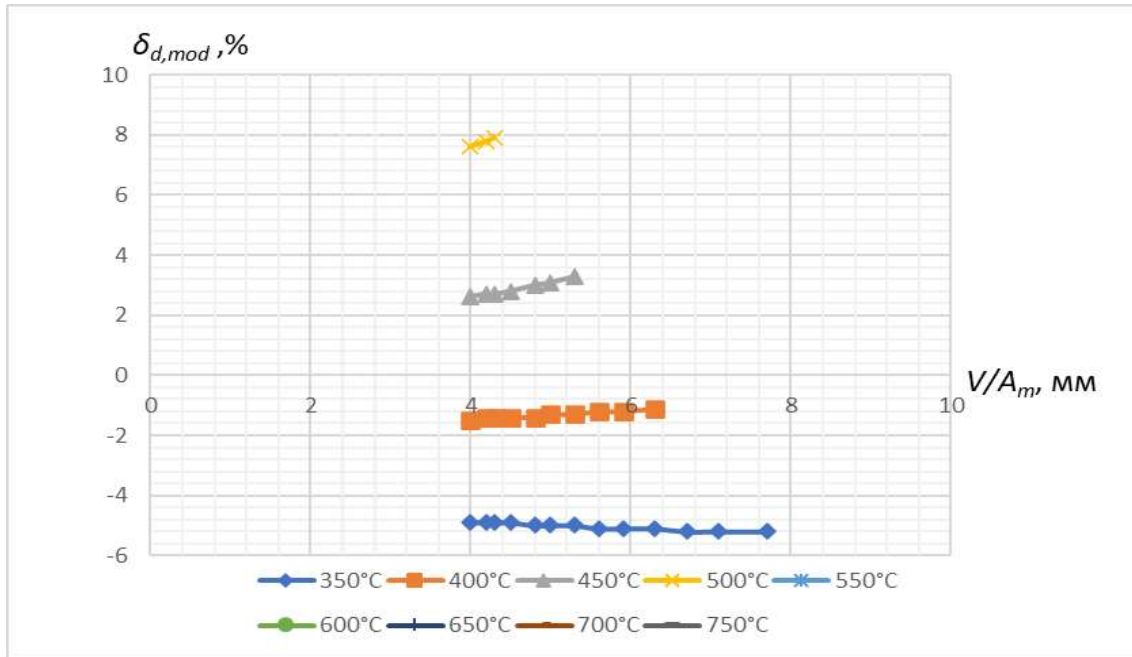


Рис. 2.8. – Залежність різниці $\delta_{d,mod}$ від зведеної товщини сталевого профілю для нормованої межі вогнестійкості 45 хв. і різних значень критичної температури сталі θ_{cr} , зафіксована для пасивного вогнезахисного матеріалу

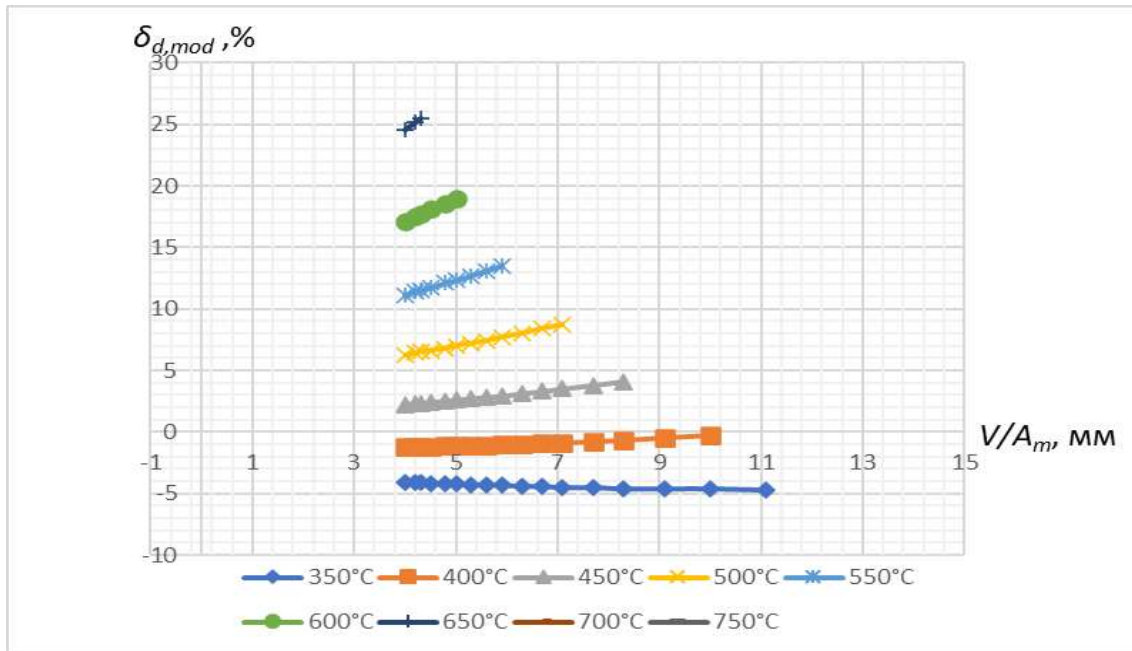


Рис. 2.9. – Залежність різниці $\delta_{d,mod}$ від зведеної товщини сталевого профілю для нормованої межі вогнестійкості 60 хв. і різних значень критичної температури сталі θ_{cr} , зафіксована для пасивного вогнезахисного матеріалу

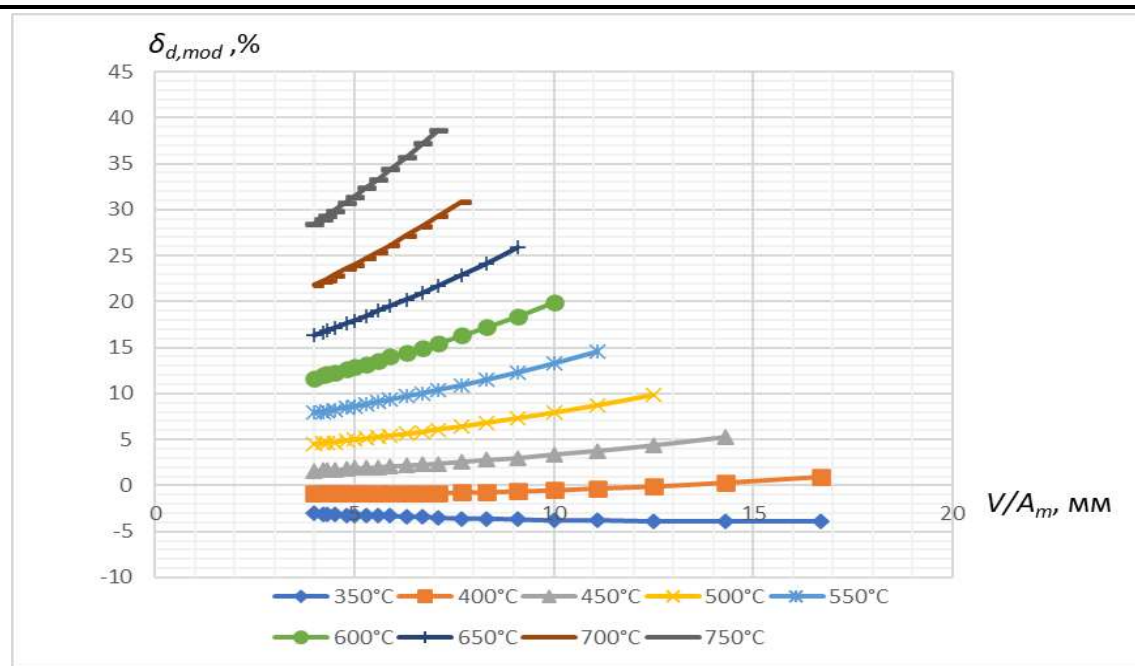


Рис. 2.10. – Залежність різниці $\delta_{d,mod}$ від зведеної товщини сталевого профілю для нормованої межі вогнестійкості 90 хв. і різних значень критичної температури сталі θ_{cr} , зафіксована для пасивного вогнезахисного матеріалу

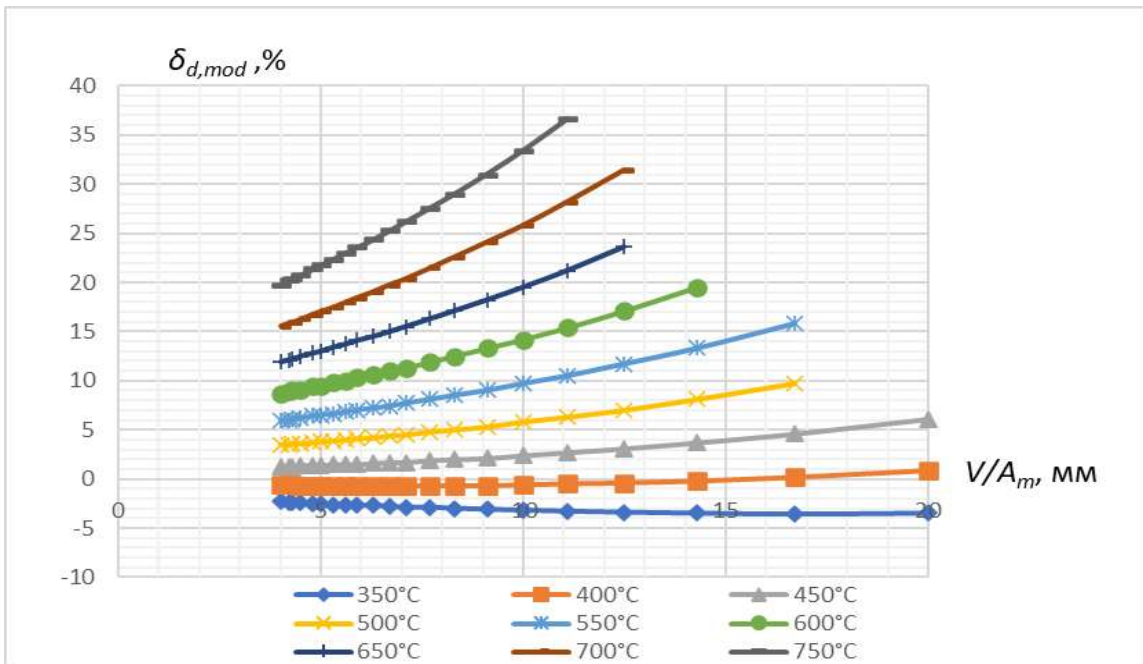


Рис. 2.11. – Залежність різниці $\delta_{d,mod}$ від зведеної товщини сталевого профілю для нормованої межі вогнестійкості 120 хв. і різних значень критичної температури сталі θ_{cr} , зафіксована для пасивного вогнезахисного матеріалу

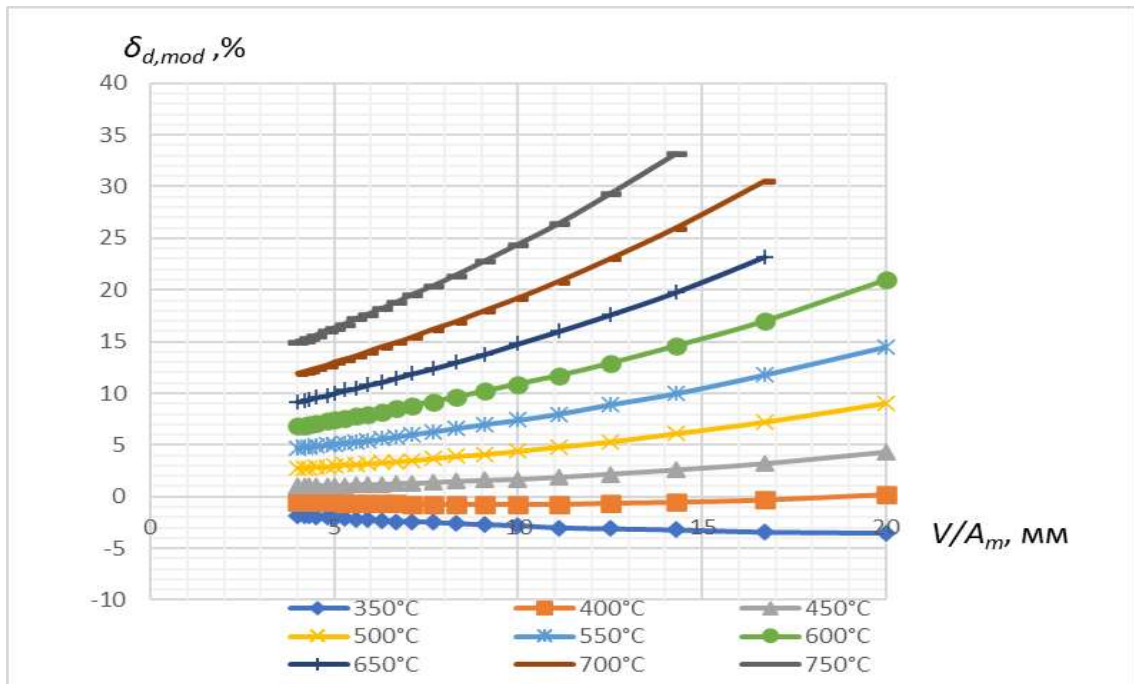


Рис. 2.12. – Залежність різниці $\delta_{d,mod}$ від зведеної товщини сталевого профілю для нормованої межі вогнестійкості 150 хв. і різних значень критичної температури сталі θ_{cr} , зафіксована для пасивного вогнезахисного матеріалу

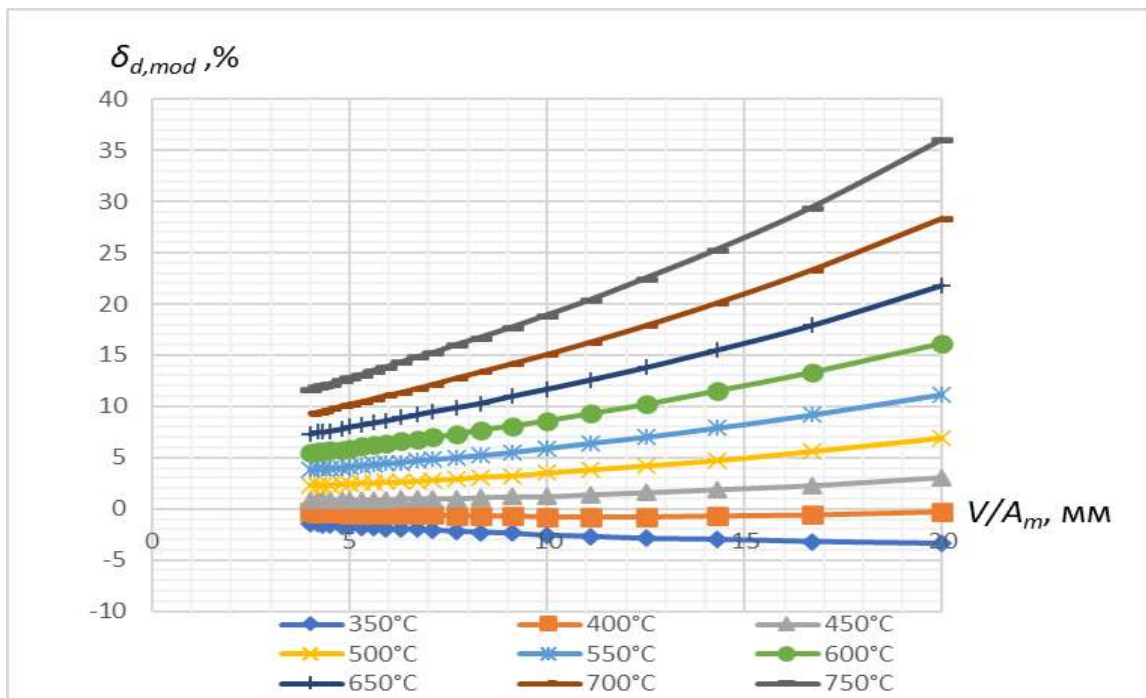


Рис. 2.13. – Залежність різниці $\delta_{d,mod}$ від зведеної товщини сталевого профілю для нормованої межі вогнестійкості 180 хв. і різних значень критичної температури сталі θ_{cr} , зафіксована для пасивного вогнезахисного матеріалу

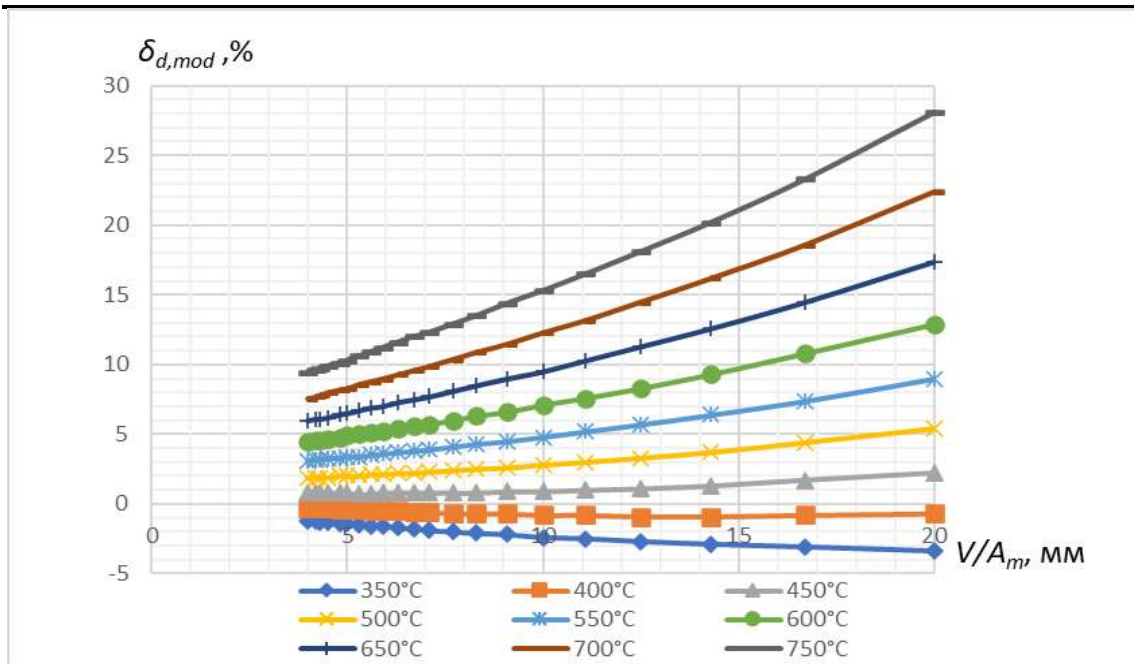


Рис. 2.14. – Залежність різниці $\delta_{d,mod}$ від зведеної товщини сталевого профілю для нормованої межі вогнестійкості 210 хв. і різних значень критичної температури сталі θ_{cr} , зафіксована для пасивного вогнезахисного матеріалу

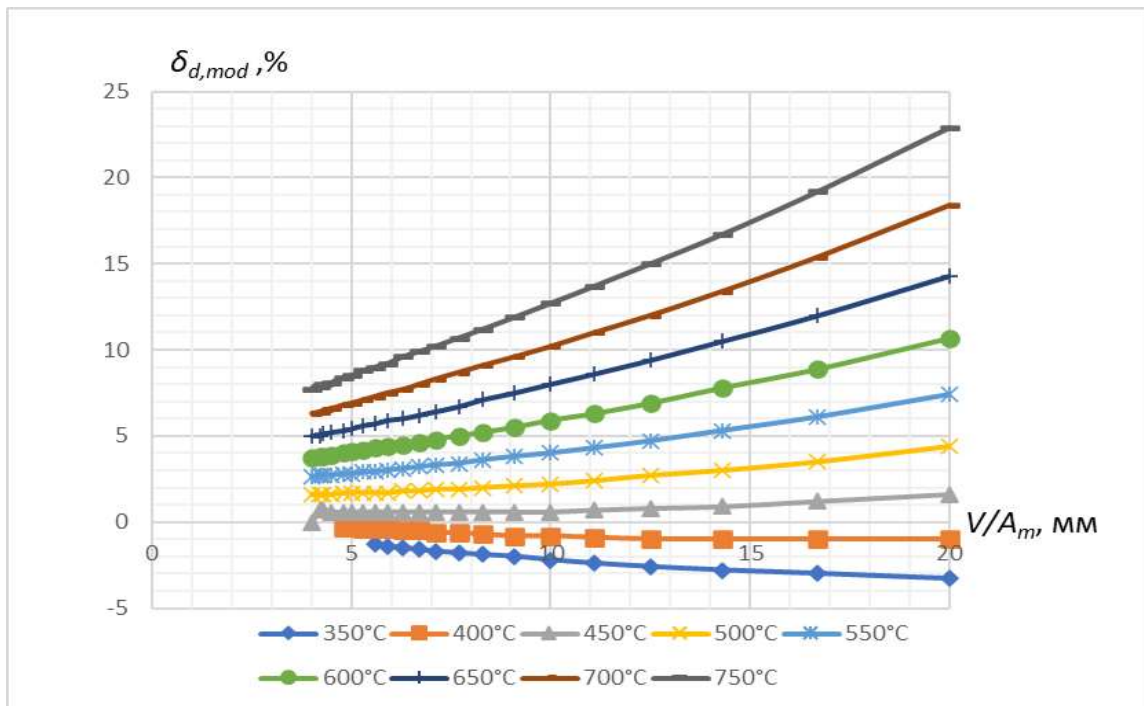


Рис. 2.15. – Залежність різниці $\delta_{d,mod}$ від зведеної товщини сталевого профілю для нормованої межі вогнестійкості 240 хв. і різних значень критичної температури сталі θ_{cr} , зафіксована для пасивного вогнезахисного матеріалу

Причина наявності від’ємних значень різниці $\delta_{d,mod}$ така сама, як і для реактивного вогнезахисного матеріалу: похибка апроксимації даних щодо тривалості t_{cr} і $t_{cr,mod}$, проведеної за рівнянням регресії виду (2.5).

У таблицях 2.13, 2.14 для реактивного й пасивного вогнезахисних матеріалів систематизовано узагальнені для всього діапазону нормованої межі вогнестійкості значення показників різниці $\delta_{d,mod}$. Середнє значення різниці $\delta_{d,mod,avg}$ для певної критичної температури сталі визначено за такою формулою:

$$\delta_{d,mod,avg} = \sum_{j=1}^m (\delta_{d,mod,j}) \cdot m^{-1}, \quad (2.8)$$

де m – кількість даних щодо різниці $\delta_{d,mod}$, визначених для певної критичної температури сталі.

Таблиця 2.13.

Показники різниці $\delta_{d,mod}$, отримані для реактивного вогнезахисного матеріалу й діапазону нормованої межі вогнестійкості від 30 хв. до 90 хв.

Критична температура сталі θ_{cr} , °C	350	400	450	500	550	600	650
Мінімальне значення $\delta_{d,mod,min}$, %	-5,1	-0,8	0,2	-0,4	-1,1	-1,4	-1,9
Максимальне значення $\delta_{d,mod,max}$, %	3,2	14,9	19,5	22,3	25,1	26,2	28,0
Середнє значення $\delta_{d,mod,avg}$, %	1,0	3,3	4,6	5,5	4,8	5,2	4,8

Таблиця 2.14.

Показники різниці $\delta_{d,mod}$, отримані для пасивного вогнезахисного матеріалу й діапазону нормованої межі вогнестійкості від 45 хв. до 240 хв.

Критична температура сталі θ_{cr} , °C	350	400	450	500	550	600	650	700	750
Мінімальне значення $\delta_{d,mod,min}$, %	-5,2	-1,5	0,6	1,6	2,6	3,7	5,0	6,3	7,7
Максимальне значення $\delta_{d,mod,max}$, %	-1,2	0,9	6,1	9,8	15,8	21,0	25,9	31,4	38,7
Середнє значення $\delta_{d,mod,avg}$, %	-3,0	-0,7	1,7	4,2	6,7	9,5	12,2	15,2	18,8

На підставі аналізу табличних відомостей зроблено висновок, що для реактивного вогнезахисного матеріалу й діапазону нормованої межі вогнестійкості від 30 хв. до 90 хв., залежно від величини критичної температури сталі, мінімальне значення $\delta_{d,mod,min}$ становить від 5,1 % (за критичної температури сталі 350 °C) до 0,2 % (за 450 °C), максимальне значення $\delta_{d,mod,max}$ – від 3,2 % (за 350 °C) до 28,0 % (за 650 °C), середнє значення $\delta_{d,mod,avg}$ – від 1,0 % (за 350 °C) до 5,5 % (за 500 °C). Із підвищенням критичної температури сталі величина $\delta_{d,mod,max}$ помітно збільшується, а значення $\delta_{d,mod,min}$ та $\delta_{d,mod,avg}$ змінюються несуттєво (рис. 2.16).

Для пасивного вогнезахисного матеріалу й діапазону нормованої межі вогнестійкості від 45 хв. до 240 хв. (таблиця 2.14, рис. 2.17), залежно від величини критичної температури сталі, мінімальне значення $\delta_{d,mod,min}$ становить від 5,2 % (за критичної температури сталі 350 °C) до 7,7 % (за 750 °C), максимальне значення $\delta_{d,mod,max}$ – від 1,2 % (за 350 °C) до 38,7 % (за 750 °C), середнє значення $\delta_{d,mod,avg}$ – від 3,0 % (за 350 °C) до 18,8 % (за 750 °C). Із підвищенням критичної температури сталі величини $\delta_{d,mod,min}$, $\delta_{d,mod,max}$ та $\delta_{d,mod,avg}$ суттєво збільшуються (рис. 2.17).

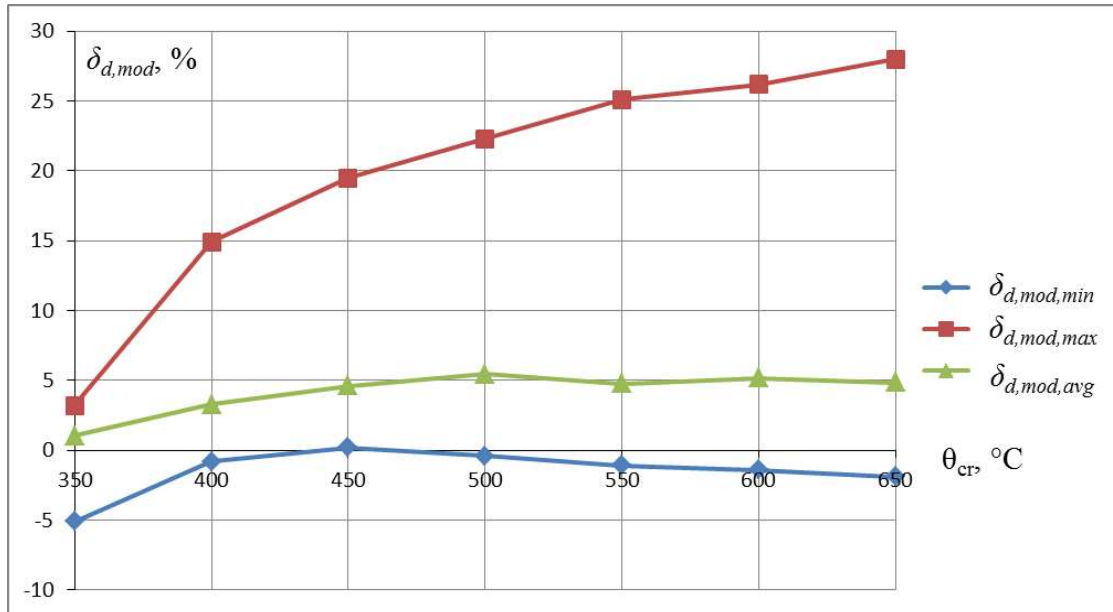


Рис. 2.16. – Залежності мінімального значення $\delta_{d,mod,min}$, максимального значення $\delta_{d,mod,max}$ та середнього значення $\delta_{d,mod,avg}$ від критичної температури сталі, зафіксовані для реактивного вогнезахисного матеріалу

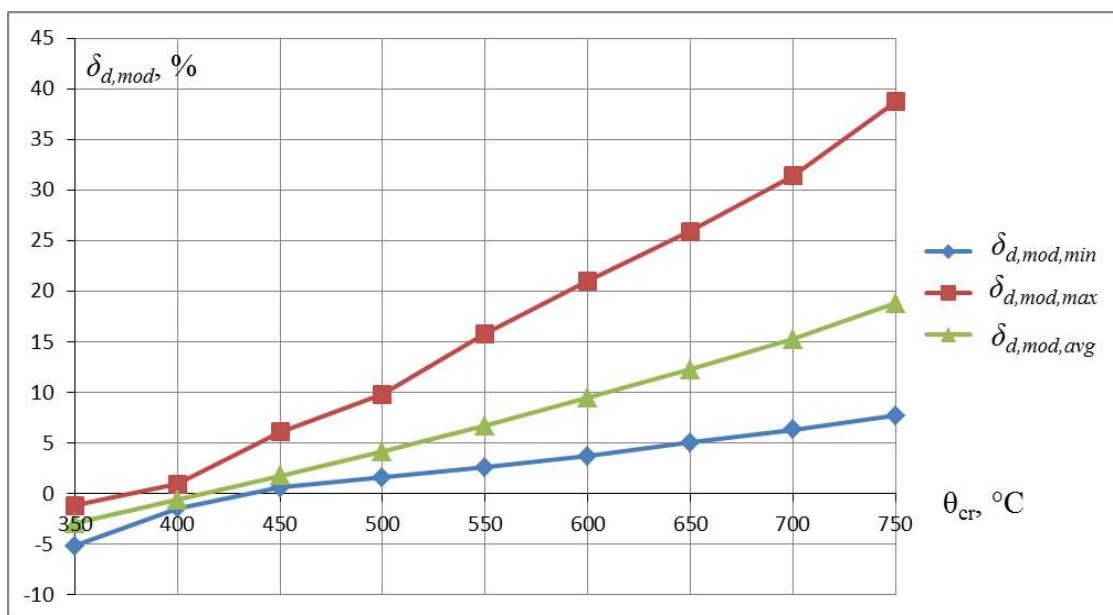


Рис. 2.17. – Залежності мінімального значення $\delta_{d,mod,min}$, максимального значення $\delta_{d,mod,max}$ та середнього значення $\delta_{d,mod,avg}$ від критичної температури сталі, зафіксовані для реактивного вогнезахисного матеріалу

Унаслідок порівняння відомостей, отриманих для реактивного вогнезахисного матеріалу, та даних, які одержані для пасивного вогнезахисного матеріалу, зроблено висновок про те, що різниця між розрахунковими значеннями мінімальної товщини реактивного вогнезахисного матеріалу, які враховують і не враховують показники здатності матеріалу до зчеплення, переважно несуттєва (середня її величина не перевищує 5,5 %), а для пасивного вогнезахисного матеріалу вона значно більша (середня величина різниці досягає 18,8 %).

Результати досліджень, що описані в розділі 2, представлено в працях [43; 44].

2.5. Висновки до розділу 2

За результатами проведених досліджень, що обґрунтовані в другому розділі, сформульовано низку висновків

1. Визначено дані щодо різниці між результатами оцінювання вогнестійкості захищених несучих сталевих конструкцій (колон, балок) двох типів вогнезахисних матеріалів – реактивного вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 400202», що спучується під тепловим впливом в умовах пожежі, та пасивного вогнезахисного матеріалу (плити) «Ендотерм 210104». Відомості отримано з урахуванням показників здатності вогнезахисного матеріалу до зчеплення та (або) його здатності залишатися неушкодженим під час вогневого впливу й без їх урахування.

2. Підсумовано, що різниця між значеннями тривалості досягнення критичної температури сталі, які не враховують і враховують показники здатності вогнезахисних матеріалів до зчеплення, для сталевих конструкцій із пасивним вогнезахисним матеріалом досягає 22,9 %, значно більша, ніж для реактивного вогнезахисного матеріалу, для якого максимальна різниця становить 9,4 %. Величина цієї різниці як для реактивного, так і для пасивного вогнезахисного матеріалу суттєво залежить від значення критичної температури сталі. Для сталевих конструкцій із реактивним вогнезахисним матеріалом така різниця збільшується в разі підвищення критичної температури сталі до 500 °С, а за подальшого підвищення цієї температури – зменшується. Для сталевих конструкцій із пасивним вогнезахисним матеріалом у разі підвищення критичної температури сталі до (450...550) °С значення цієї різниці незначні

(до 2,5 %), а за подальшого підвищення цієї температури різниця збільшується, її найбільші величини фіксують на рівні температури 750 °С.

3. Зафіксовано, що різниця між значеннями мінімальної товщини вогнезахисного матеріалу, які визначені з урахуванням показників здатності реактивного й пасивного вогнезахисних матеріалів до зчеплення та без їх урахування, залежить від величини зведеної товщини сталевго профілю, критичної температури сталі та нормованої межі вогнестійкості сталевго конструкції. Залежності цієї різниці від зведеної товщини сталевго профілю для вогнезахисних матеріалів мають переважно монотонний характер. Різниця для більшості цих залежностей суттєво збільшується з підвищенням зведеної товщини сталевго профілю. Максимальне значення цієї різниці для реактивного й пасивного вогнезахисних матеріалів становить 28,0 % і 38,7 %. Середнє значення різниці для реактивного вогнезахисного матеріалу несуттєво залежить від критичної температури сталі та має максимальну величину 5,5 %. Для пасивного вогнезахисного матеріалу з підвищенням критичної температури сталі середнє значення різниці монотонно зростає й досягає 18,8 % за температури 750 °С.

4. Отримані дані стосовно різниці між результатами оцінювання вогнестійкості захищених несучих сталевих конструкцій, що отримані з урахуванням показників здатності вогнезахисного матеріалу до зчеплення й без їх урахування, придатні для обґрунтування положень спрощеного методу оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій. Такі відомості дають змогу визначити значення зведеної товщини сталевго профілю та критичної температури сталі, за яких різниця між значеннями мінімальної товщини вогнезахисного матеріалу, отриманими з урахуванням і без урахування показників здатності вогнезахисних матеріалів до зчеплення, не перевищує допустимої величини.

РОЗДІЛ 3

ОБҐРУНТУВАННЯ СПРОЩЕНОГО МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАХИЩЕНИХ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

3.1. Завдання дослідження

Національний стандарт України ДСТУ Б В.1.1-17:2007 [26], як і європейські стандарти EN 13381-4:2013 [85] та EN 13381-8:2013 [86], регламентують методи випробування для вивчення впливу застосовуваних систем пасивного й реактивного вогнезахисту на вогнестійкість захищених сталевих будівельних конструкцій, що можуть бути використані як балки або колони. Ці методи вможливають визначення значень мінімальної товщини системи вогнезахисту (зокрема вогнезахисного матеріалу), за яких для широкого діапазону зведеної товщини сталевого профілю й критичної температури сталі забезпечено нормовані класи вогнестійкості сталевих конструкцій.

Під час випробувань за цими методами вогневого впливу (за стандартного температурного режиму) зазнає певна кількість сталевих конструкцій двотаврового профілю (I, або H) та (або) замкнутого профілю, які захищені системою вогнезахисту. Застосовують короткі ненавантажені колони й балки (розміром 1,0 м), навантажені колони (висотою 3,0 м), балки (довжиною 4,0 м), а для реактивних систем вогнезахисту – додатково високу колону (розміром 2,0 м). Кількість зразків сталевих конструкцій для випробування та їхні параметри залежать від обсягів оцінювання. Зокрема, під час оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій із реактивними системами вогнезахисту кількість цих зразків може сягати від 15 до 43. Під час випробувань вимірюють значення температури зразків сталевих конструкцій для різної тривалості вогневого впливу за стандартним температурним режимом. За результатами порівняння значень температури на навантажених і ненавантажених зразках визначають коефіцієнт коригування. Цей коефіцієнт засвідчує різницю в здатності системи вогнезахисту до зчеплення та (або) здатності залишатися неушкодженою під час вогневого впливу в ході її застосування на навантажених і ненавантажених сталевих конструкціях. У процесі використання цього коефіцієнта експериментальні дані щодо температури коротких конструкцій

коригують. Відповідно до відкоригованих даних, за допомогою одного з методів оцінювання, що описаний у названих вище європейських стандартах, визначають значення мінімальної товщини системи вогнезахисту, за яких для нормованої тривалості вогневого впливу (класу вогнестійкості) температура сталевих конструкцій не перевищує величини критичної температури сталі.

У дослідженнях границь застосування й точності методів оцінювання, що проведені з використанням обчислювального експерименту, з'ясовано, що всі ці методи дають змогу визначати значення мінімальної товщини системи вогнезахисту, за яких забезпечено нормовані класи вогнестійкості сталевих конструкцій [40]. Значення товщини суттєво завищені стосовно справжніх (точних) величин у разі їх розрахунку за методом числової регресії. Середньоквадратичне відхилення розрахункових значень від точних величин товщини для методу числової регресії досягає 190 %. Для інших двох методів оцінювання, що представлені в стандартах [26; 85–86], це відхилення не перевищує 43 %.

У працях [41–42] схарактеризовано результати досліджень збіжності даних щодо мінімальної товщини системи вогнезахисту, що отримані різними методами оцінювання. У цих дослідженнях, крім методів оцінювання, описаних у європейських стандартах [85–86], застосовано метод, заснований на розв'язанні оберненої задачі теплопровідності, упроваджений у Національний стандарт України ДСТУ Б В.1.1-17:2007 [26]. У ході досліджень використано експериментальні дані щодо температури зразків сталевих конструкцій, що отримані внаслідок застосування пасивної та реактивної систем вогнезахисту. За результатами цих досліджень з'ясовано, що найбільші відхилення товщини вогнезахисту наявні в разі порівняння розрахункових даних, які отримані за методом числової регресії, зі значеннями, що визначені за заснованим на розв'язанні оберненої задачі теплопровідності методом. Величина середньоквадратичного відхилення таких даних сягає 94 %. Водночас для методів оцінювання, які засновані на розв'язанні рівняння нестационарної теплопровідності [26; 85; 86], середньоквадратичне відхилення не перевищує 80 %. Значення цього відхилення для реактивної системи вогнезахисту значно більші (більше, ніж удвічі), ніж для пасивної системи вогнезахисту, яку застосовували в дослідженнях.

Одна з процедур, що використовують у методах [26; 85–86] – урахування можливого пошкодження системи вогнезахисту під час деформації навантаженої сталеві конструкції. Для цього проводять випробування навантажених і ненавантажених зразків, порівнюють значення їхньої температури й визначають коефіцієнт, за яким коригують експериментальні дані щодо температури коротких конструкцій. У деяких методах, зокрема в [27; 87–88], таку процедуру не застосовують, випробування проводять без механічного навантажування зразків і без урахування показників здатності системи вогнезахисту до зчеплення та (або) її здатності залишатися непошкодженою під час вогневого впливу.

За результатами досліджень, що представлені в розділі 2 роботи, зафіксовано дані стосовно різниці між результатами оцінювання вогнестійкості захищених сталевих конструкцій, отримані за методами [26; 85–86] з урахуванням показників здатності системи вогнезахисту до зчеплення та (або) її здатності залишатися непошкодженою під час вогневого впливу й без їхнього врахування. Різниця між значеннями мінімальної товщини системи вогнезахисту, що визначені з урахуванням і без урахування зазначених показників, залежить від величини зведеної товщини сталевого профілю, критичної температури сталі та нормованої межі вогнестійкості сталеві конструкції. Залежності цієї різниці від зведеної товщини сталевого профілю для досліджуваних пасивної та реактивної системи вогнезахисту мають переважно монотонний характер. Різниця для більшості цих залежностей суттєво зменшується зі зменшенням зведеної товщини сталевого профілю. Максимальні значення цієї різниці для пасивної та реактивної систем вогнезахисту становлять 38,7 % і 28,0 %. Середнє значення різниці для реактивної системи вогнезахисту несуттєво залежить від критичної температури сталі та має максимальну величину 5,5 %. Для пасивної системи вогнезахисту з підвищенням критичної температури сталі середнє значення різниці монотонно зростає й досягає 18,8 % за температури 750 °С.

З аналізу методів оцінювання вогнестійкості захищених сталевих конструкцій [26; 85–86] випливає, що ці методи дають змогу визначати для широких діапазонів зведеної товщини сталевого профілю та критичної температури сталі значення мінімальної товщини системи вогнезахисту, за яких забезпечені

нормовані класи вогнестійкості сталевих конструкцій. Однак практична реалізація описаних методів вимагає великих матеріальних витрат, які пов'язані, зокрема, із необхідністю застосування спеціальних вогневих печей з обладнанням для навантажування зразків сталевих конструкцій та зі створенням численної кількості стандартизованих зразків (сталевих колон і балок, оздоблених вогнезахисними матеріалами), на які необхідно встановити більш як 200 термопар. У ході оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій на етапі експлуатації будівель застосування таких методів не завжди прийнятне. Діапазон значень зведеної товщини сталевих конструкцій, які застосовують на будівельному об'єкті, зазвичай, вужчий, ніж той, що використовується у стандартах [26; 85–86]. На цьому етапі доцільно застосовувати метод, який вимагає менших матеріальних витрат, ніж названі методи, і забезпечує прийнятну достовірність результатів оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій. На цій підставі окреслено такі завдання дослідження:

- виокремити складники й процедури спрощеного методу оцінювання вогнестійкості захищених сталевих конструкцій, де застосовують зменшену кількість зразків (щодо методів [26; 85–86]) і не використовують навантажених зразків для випробувань;

- визначити значення зведеної товщини сталевого профілю зразків для випробувань та інші параметри, а також граничні величини критичної температури сталі, за яких досягають прийнятної збіжності результатів оцінювання вогнестійкості, що отримані з урахуванням і без урахування показників здатності системи вогнезахисту до зчеплення та (або) її здатності залишатися непошкодженою під час вогневого впливу;

- провести валідацію спрощеного методу оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій із застосуванням систем вогнезахисту різних типів.

3.2. Складники й процедури спрощеного методу оцінювання вогнестійкості захищених сталевих конструкцій, параметри зразків для випробувань та граничні величини критичної температури сталі

Виокремлення складників і процедур спрощеного методу оцінювання вогнестійкості захищених сталевих конструкцій проведено на основі положень європейських стандартів [85–86] і національних стандартів України [25–27; 87–88]. Запропонований спрощений метод має два складники – експериментальний і розрахунковий. В експериментальній частині проводять вимірювання температури зразків сталевих конструкцій в умовах вогневого впливу за стандартним температурним режимом. У розрахунковій частині за отриманими експериментальними даними щодо температури цих зразків визначають значення мінімальної товщини системи вогнезахисту, за яких забезпечені нормовані класи вогнестійкості сталевих конструкцій.

В експериментальній частині застосовують процедури щодо виготовлення зразків для випробувань, встановлення термодар на них, встановлення й кріплення зразків у печі, вимірювання температури в печі та на зразках.

У ході виготовлення зразків для випробувань, якщо оцінюванню підлягають колони й балки двотаврового профілю, зазвичай, використовують сталеві колони висотою 2,0 м двотаврового перерізу профілю № 20 за ДСТУ 8768:2018 [89].

Під час вибору форми зразків для випробувань аналізували зразки у формі пластин, що застосовують у методах [27; 45–46; 90–91]. У методі [27] використовують квадратні сталеві пластини зі стороною 500 мм завтовшки 5 мм, на обігрівну поверхню яких нанесено вогнезахист, із шаром теплової ізоляції з їхнього необігрівного боку. У методі [45–46], крім зазначених сталевих пластин, застосовують пластини товщиною 10 мм. У методах [90; 91], крім сталевих пластин зі стороною 500 мм і завтовшки 5 мм, використовують квадратні сталеві пластини зі стороною 200 мм і завтовшки 5 мм. За результатами досліджень, які наведено в [47–48], з'ясовано, що у разі використання сталевих пластин значення мінімальної товщини реактивної системи вогнезахисту мають переважно більші величини, ніж у разі застосування зразків із двотаврового профілю. Для пасивної системи вогнезахисту, навпаки, переважно більші величини мають дані щодо мінімальної товщини,

які отримані з використанням зразків двотаврового профілю. Різниця між значеннями мінімальної товщини реактивної системи вогнезахисту, одержані на зразках різної форми, досягає 79,0 %, а для пасивної системи вогнезахисту – 62,5 %. За результатами цих досліджень зроблено висновок стосовно неможливості застосування зразків у формі пластин для оцінювання вогнестійкості захищених сталевих конструкцій двотаврового профілю для всіх діапазонів зведеної товщини сталевого профілю й критичної температури сталі, що описано в [26; 85–86].

Вибір висоти зразків для випробувань, що становить 2,0 м, обґрунтований положеннями ДСТУ Б В.1.1-14:2007 (EN 1365-4:1999, NEQ) [88] і EN 13381-8:2013 [86]. Відповідно до 7.1.2 ДСТУ Б В.1.1-14:2007 (EN 1365-4:1999, NEQ) [88], висота зразка, який випробовують без навантаження, має бути не меншою за 1,0 м. Згідно з 6.2.4 і 6.2.5 EN 13381-8:2013 [86], ненавантажені короткі й високі колони повинні мати висоту 1,0 м і 2,0 м.

Вибір профілю № 20 для зразків аргументований чинниками, що зазначені нижче. За результатами досліджень, які описані в розділі 2, з'ясовано, що різниця між значеннями мінімальної товщини системи вогнезахисту, визначеними з урахуванням і без урахування показників її здатності до зчеплення та (або) здатності залишатися непошкодженим під час вогневого впливу, суттєво зменшується зі зменшенням зведеної товщини сталевого профілю V/A_m . Значення останньої визначають за співвідношенням об'єму сталі V і площі поверхні A_m , що зазнає теплового впливу. Для профільованої системи вогнезахисту (рис. 2.1а) A_m відповідає площі поверхні сталевого профілю, що зазнає теплового впливу, для коробчастої системи вогнезахисту (рис. 2.1б) – площі поверхні вогнезахисного матеріалу, що зазнає теплового впливу. Зокрема, для реактивної системи вогнезахисту, діапазону критичної температури сталі від 350 °С до 650 °С і зведеної товщини сталевого профілю 2,9 мм ця різниця не перевищує 5 % (рис. 2.4–2.7), а з підвищенням зведеної товщини різниця збільшується до 28 % (табл. 2.13, рис. 2.4–2.7). Для пасивної системи вогнезахисту, діапазону критичної температури сталі від 350 °С до 750 °С і зведеної товщини сталевого профілю 4,0 мм різниця не перевищує 28 % (рис. 2.8 – 2.15). При цьому різниця не перевищує 8 % для діапазону критичної температури сталі від 350 °С до 500 °С. Із підвищенням зведеної товщини сталевого профілю різниця збільшується до 39 %

(табл. 2.14, рис. 2.8 – 2.15). Це спонукає до висновку, що різниця $\delta_{d,mod}$ має менші значення для малої величини зведеної товщини сталевго профілю, ніж для великої величини цієї товщини. Тому сталеву конструкцію двотаврового перерізу профілю № 20, яка має найменше значення зведеної товщини сталевго профілю, що становить $V/A_m = 3,4$ мм, ніж інші конструкції, які широко застосовують у будівництві, зазвичай, використовують у зразках для випробувань за спрощеним методом оцінювання вогнестійкості. У деяких випадках для створення зразків під час випробувань можуть бути застосовані колони двотаврового профілю, які мають іншу зведену товщину. Такі зразки доцільно використовувати в разі, якщо за результатами аналізу параметрів сталевих конструкцій, які застосовують у конкретній будівлі, зафіксовано, що найменше значення їхньої зведеної товщини відрізняється від 3,4 мм.

Набір зразків для випробувань за спрощеним методом містить чотири колони двотаврового профілю, які мають однакову зведену товщину. На двох зразках застосовують систему вогнезахисту, яка має мінімальну товщину, на інших зразках – систему вогнезахисту, яка має максимальну товщину. Використання однакових зразків зумовлене вимогою 7.1.4 ДСТУ Б В.1.1-14:2007 (EN 1365-4:1999, NEQ) [88]. Застосування зразків, які мають мінімальну й максимальну товщину вогнезахисту, регламентоване положенням методів [26; 85–86].

Для вимірювання температури зразків на металеву поверхню кожного зразка встановлюють по три термомпари. Їх розташовують посередині висоти колони, по центру стінки двотавра й по центрах внутрішніх поверхонь полиць двотавра, як зображено на рис. 3.1. Така кількість і місця розташування термомпар узгоджені з 8.1.2 ДСТУ Б В.1.1-14:2007 (EN 1365-4:1999, NEQ) [88]. Вимірювання температури проводять до досягнення на всіх зразках температури, яка становить не менше, ніж 500 °С.

Зразки для випробувань або прикріплюють до плити покриття печі, як представлено на рис. 3.2, або встановлюють на її основу (безпосередньо чи на цоколь), як описано в 7.4 EN 13381-8:2013 [86]. Для уникнення передавання теплоти через торці конструкцій, між усіма поверхнями контакту сталевго колони та плитою покриття печі або її основою застосовують теплоізоляційний матеріал 2 (рис. 3.2). Розмір захисного елемента торця має бути більшим за загальні габаритні розміри системи вогнезахисту.

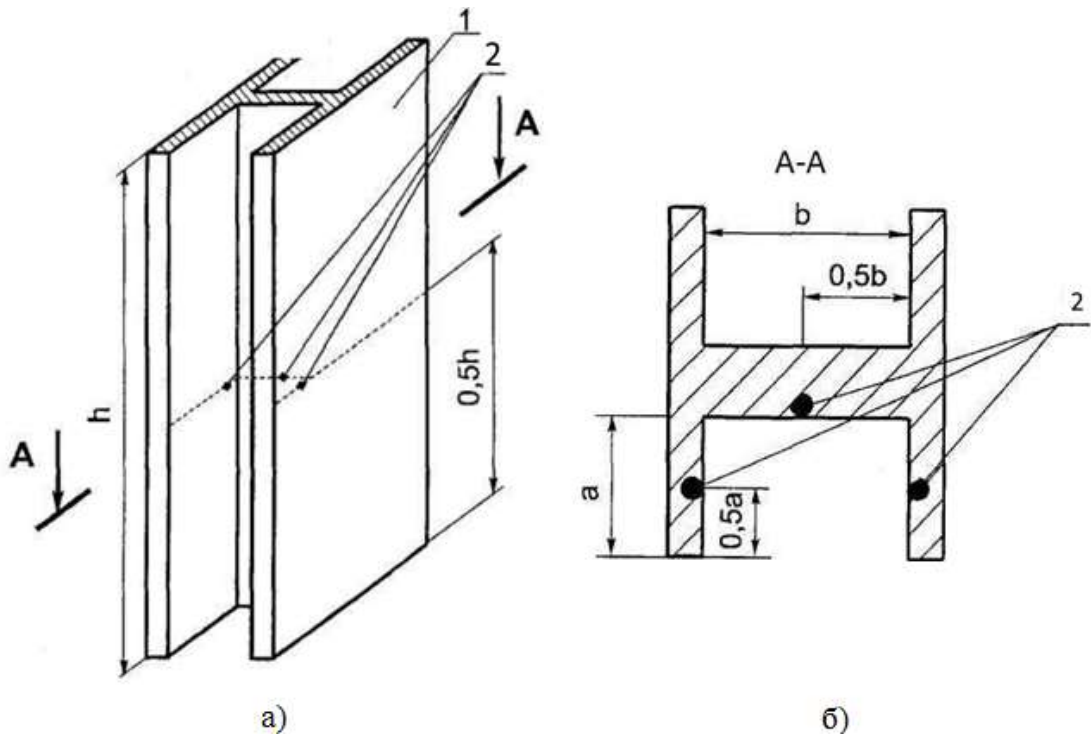


Рис. 3.1. – Схема розташування термопар на зразках: а) загальний вигляд; б) розріз А-А. Умовні позначення:
 1 – зразок колони двотаврового профілю;
 2 – місця встановлення термопар

Якщо метою випробувань є оцінювання вогнестійкості захищених сталевих конструкцій замкнутого профілю (прямокутного або круглого профілів, рис. 3.3), то замість чотирьох колон двотаврового перерізу застосовують чотири колони прямокутного або круглого профілю, які мають найменшу товщину стінки t_w . У цьому разі на металеву поверхню кожного зразка встановлюють по чотири термопари, які розташовують рівномірно по периметру посередині висоти колони.

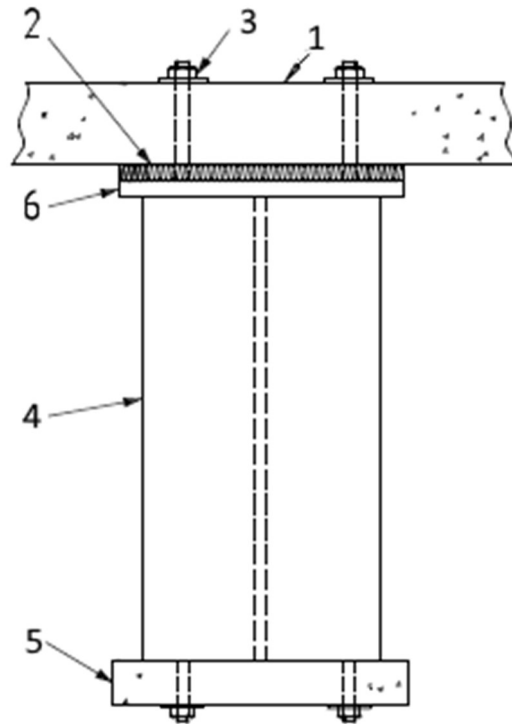


Рис. 3.2. – Кріплення до покривної плити печі зразка для випробування. 1 – покриття печі; 2 – теплоізоляційна плита; 3 – штифт / пластина / стопорна гайка; 4 – колона; 5 – теплоізоляційна плита – покриття торця; 6 – сталева плита

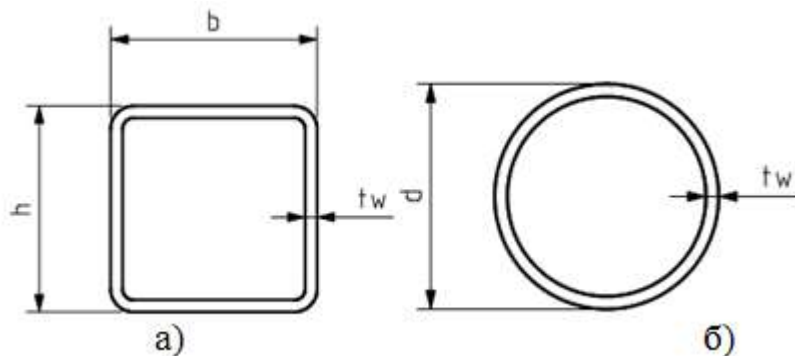


Рис. 3.3. – Пустотілі сталеві конструкції прямокутної (а) і круглої (б) форм

У розрахунковій частині спрощеного методу, за отриманими експериментальними даними щодо середньої температури цих зразків, визначають значення мінімальної товщини системи вогнезахисту, за яких забезпечені нормовані класи вогнестійкості сталевих конструкцій. При цьому застосовують низку процедур.

Визначають значення тривалості вогневого впливу за стандартним температурним режимом (далі – часу t_{cr}), за якими на зразках досягнуто критичної температури сталі [25]:

$$t_{cr} = t_{mes} - \Delta t, \quad (3.1)$$

де t_{cr} – час досягнення критичної температури сталі, хв.; t_{mes} – значення проміжку часу від початку випробування до досягнення критичної температури сталі, що зафіксоване за даними стосовно середньої температури зразка, хв.; Δt – похибка, хв.

Значення похибки визначають за такою формулою [25]:

$$\Delta t = (0,015t_{mes} + 3)(A_s - A_f)/(A_s - A_{min}), \quad (3.2)$$

де A_s, A_{min} – інтегральні значення (площі, що розташовані під кривими) стандартної температури T_s і мінімальної допустимої температури T_{min} у печі (рис. 3.4), відповідно до [25], $^{\circ}\text{C} \cdot \text{хв.}$; A_f – інтегральне значення (площа, що розташована під кривою) середньої температури в печі під час випробування, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{хв.}$

Якщо $A_f > A_s$, то $\Delta t = 0$.

Проводять апроксимацію даних щодо часу t_{cr} , застосовуючи рівняння числової лінійної регресії (3.3), яке виявляє залежність між часом досягнення критичної температури сталі й товщиною системи вогнезахисту, визначають значення чотирьох констант a_0 – a_3 цього рівняння.

$$t_{cr} = a_0 + a_1 d_p + a_2 \theta_{cr} + a_3 d_p \theta_{cr}, \quad (3.3)$$

де d_p – товщина системи вогнезахисту, мм; θ_{cr} – критична температура сталі, $^{\circ}\text{C}$; a_0, a_1, a_2, a_3 – константи (коефіцієнти регресії).

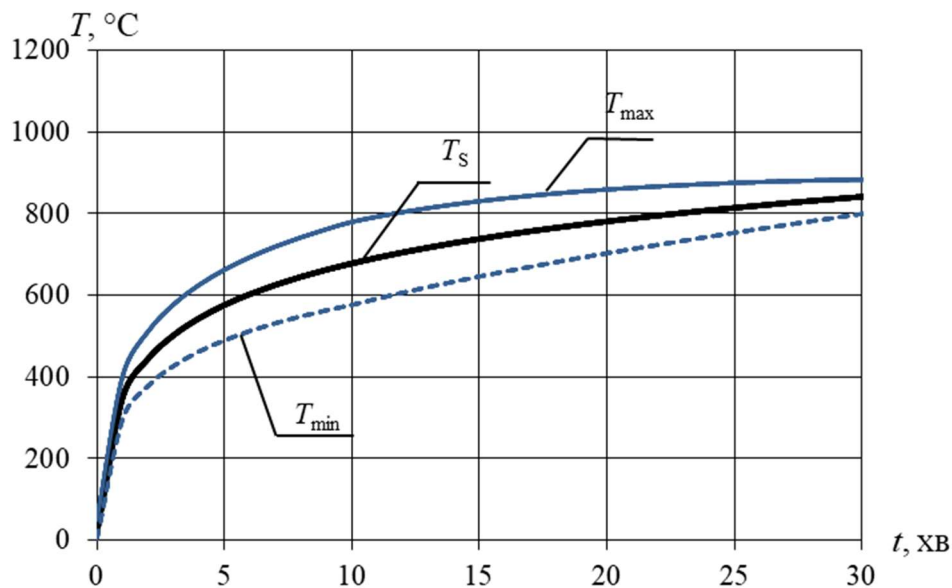


Рис. 3.4. – Залежності T_s , T_{min} , T_{max} від часу вогневого впливу для тривалості випробування, що становить 30 хв. [25]

Аналізують прийнятність одержаних значень констант $a_0 - a_3$ за такою процедурою. За рівнянням (3.3), застосовуючи отримані величини констант $a_0 - a_3$, визначають розрахункові значення часу $t_{cr,cul}$ і порівнюють їх зі значеннями часу t_{cr} , отриманими за формулою (3.1). Значення коефіцієнтів регресії вважають прийнятними за такими критеріями:

- для кожного зразка розрахунковий час $t_{cr,cul}$ не повинен перевищувати експериментальний час t_{cr} більш ніж на 30 %;
- середнє значення різниці між розрахунковим часом $t_{cr,cul}$ й експериментальним часом t_{cr} для кожного зразка повинно бути меншим від нуля;
- максимум 20 % усіх значень різниці між розрахунковим часом $t_{cr,cul}$ й експериментальним часом t_{cr} повинні бути більшими від нуля.

Якщо критерії прийнятності не виконані, то проводять модифікацію коефіцієнтів регресії (коригування значень $a_0 - a_3$). Для цього визначають лінійний коефіцієнт модифікації (значення якого менше, ніж 1,0), який застосовуваний для всіх констант регресії та призводить до того, що розрахунковий час $t_{cr,cul}$ задовольняє критерії прийнятності. За цією процедурою, описаною в Ж.3.1 ДСТУ Б В.1.1-17 [6], визначають модифіковані коефіцієнти регресії, які застосовують у подальших розрахунках.

За формулою (3.4) визначають значення мінімальної товщини системи вогнезахисту, за яких забезпечено нормовані

класи вогнестійкості сталевих конструкцій, що мають зведену товщину не меншу, ніж у зразків для випробування.

$$d_p = \frac{t_{fi,requ} - a_0 - a_2\theta_{cr}}{a_1 + a_3\theta_{cr}}, \quad (3.4)$$

де $t_{fi,requ}$ – межа вогнестійкості (тривалість вогневого впливу за стандартним температурним режимом), що відповідає нормованому класу вогнестійкості сталевій конструкції, хв.

Розрахунки мінімальної товщини системи вогнезахисту проводять для діапазону критичної температури сталі від 350 °С до 500 °С. Вибір такого діапазону вмотивований аналізом даних щодо різниці $\delta_{d,mod}$ між результатами оцінювання вогнестійкості захищених сталевих конструкцій, отриманими з урахуванням показників здатності системи вогнезахисту до зчеплення та (або) її здатності залишатися неушкодженою під час вогневого впливу й без їх урахування [10; 11]. За результатами аналізу з'ясовано, що в діапазоні критичної температури сталі від 350 °С до 500 °С різниця $\delta_{d,mod}$ має менші значення, ніж у діапазоні критичної температури, який був під час випробувань (табл. 2.13, 2.14). Зокрема, для пасивної системи вогнезахисту й діапазону критичної температури сталі від 350 °С до 750 °С різниця $\delta_{d,mod}$ досягає 39 %, натомість для діапазону критичної температури сталі від 350 °С до 500 °С вона не перевищує 10 % (табл. 2.14). Крім цього, значення критичної температури сталі, яке становить 500 °С, використовують у національних стандартах ДСТУ Б В.1.1-4 [18], ДСТУ Б В.1.1-13 [8], ДСТУ Б В.1.1-14 [9] для оцінювання вогнестійкості захищених сталевих конструкцій, що проводять із застосуванням тільки ненавантажених зразків для випробувань. Нижнє граничне значення діапазону критичної температури сталі, яке дорівнює 350 °С, відповідає значенню, регламентованому в європейських і національних стандартах [1–3; 20; 21].

Визначення мінімальної товщини системи вогнезахисту за формулою (3.4) проводять для критичної температури сталі 350 °С, 400 °С, 450 °С, 500 °С. Якщо метою оцінювання є визначення мінімальної товщини системи вогнезахисту тільки для конкретного значення критичної температури сталі, наприклад 500 °С [8–9; 18], або розрахункової величини, регламентованої за Єврокодом 3 [20–21], то замість рівняння (3.3) використовують рівняння, де відсутні складники $a_2\theta_{cr}$, $a_3d_p\theta_{cr}$, а

замість формули (3.4) – формулу без складників $a_2\theta_{cr}$, $a_3\theta_{cr}$. Результати оцінювання, що застосовуються для систем вогнезахисту в усьому діапазоні їхньої товщини, для якого проведено випробування (від мінімального до максимального значень товщини вогнезахисного матеріалу на зразках для випробувань).

3.3. Результати валідації спрощеного методу оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій із застосуванням систем вогнезахисту різних типів

Ключовим процесом в оцінюванні придатності методу до застосування є його валідація. Валідація методу – це процедура, яку використовують для з'ясування ступеня відповідності методу реальним процесам із погляду можливих цілей його застосування. Валідації підлягають нестандартизовані методи [92]. Валідація є одним з етапів розроблення стандартизованого методу. Для валідації методів використовують різні прийоми [92], серед яких для валідації спрощеного методу найбільш прийнятне порівняння з результатами, що отримані за іншими валідованими (стандартизованими) методами. Для валідації спрощеного методу проведено оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій із застосуванням систем вогнезахисту різних типів: профільованої системи (рис. 2.1а) із використанням реактивного вогнезахисного матеріалу, що спучується, «Ендотерм 400202» [83], коробчастої (рис. 2.1б) і профільованої систем із використанням пасивного вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 210104» [84], а також порівняння отриманих результатів із результатами, які одержані за стандартизованими методами [26; 85–86].

Мета оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій двотаврового профілю з профільованою реактивною системою вогнезахисту (рис. 2.1а), де застосовано вогнезахисне покриття, що спучується, із вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 400202» [83], – визначення значень мінімальної товщини вогнезахисного матеріалу, за яких забезпечено нормовані класи вогнестійкості сталевих конструкцій для діапазону критичної температури сталі від 350 °С до 500 °С.

На поверхню зразків для випробування (чотирьох сталевих колон висотою 2,0 м двотаврового профілю зі зведеною товщиною 5,8 мм) попередньо нанесено ґрунтовку завтовшки

0,07 мм. Товщина шару покриття (у сухому стані) із вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 400202» становила: 0,466 мм – для зразка № 1; 0,475 мм – для зразка № 2; 1,945 мм – для зразка № 3; 1,932 мм – для зразка № 4. Середня густина покриття дорівнювала 1760 кг/м³. Отримані експериментальні дані щодо середньої температури цих зразків і значення часу досягнення критичної температури сталі подано на рис. 3.5 та в табл. 3.1.

За результатами апроксимації даних щодо часу t_{cr} , описаних у табл. 3.1, визначено коефіцієнти регресії a_0 , a_1 , a_2 , a_3 , значення яких представлено в табл. 3.2. Розрахунки коефіцієнтів регресії виконані із застосуванням стандартної програми (функції) регресивного аналізу ЛИНЕЙН «Microsoft Excel» (ліцензійний пакет «Microsoft Office SBE 2003 with BCM №XII-45336»).

Результати визначення значень мінімальної товщини шару покриття з вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 400202», за яких забезпечено нормовані класи вогнестійкості сталевих конструкцій, отримані із застосуванням формули (3.4), систематизовано в табл. 3.3. Такі відомості поширюються на колони й балки двотаврової форми, які мають значення зведеної товщини сталевого профілю не менше, ніж 5,8 мм.

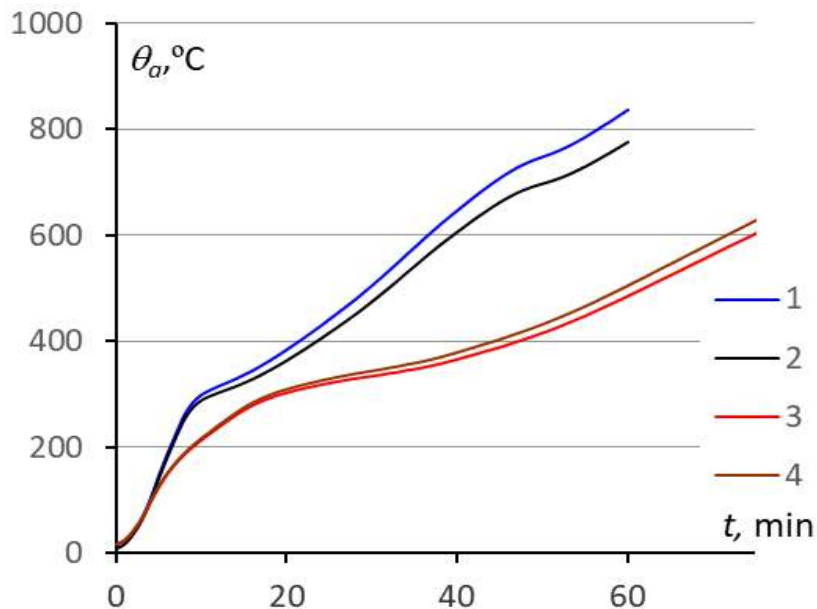


Рис. 3.5. – Залежності середньої температури зразків, у яких застосовано вогнезахисний матеріал «Ендотерм 400202», від тривалості вогневого впливу за стандартним температурним режимом

Таблиця 3.1.

Значення часу t_{cr} досягнення критичної температури зразків, у яких застосовано вогнезахисний матеріал «Ендотерм 400202»

Критична температура сталі θ_{cr} , °C		350	400	450	500
№ зразка	Товщина шару покриття d_p , мм	Значення часу досягнення критичної температури сталі t_{cr} , хв.			
1	0,466	17	21	26	30
2	0,475	18	23	28	32
3	1,945	36	47	55	62
4	1,932	33	45	53	59

Таблиця 3.2.

Результати визначення коефіцієнтів регресії для зразків, у яких застосовано вогнезахисний матеріал «Ендотерм 400202»

a_0	a_1	a_2	a_3
-11,086	-6,840	0,0650	0,05519

Таблиця 3.3.

Значення мінімальної товщини шару покриття з вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 400202», за яких забезпечено нормовані класи вогнестійкості сталевих конструкцій

Критична температура сталі θ_{cr} , °C	350	400	450	500
Клас вогнестійкості сталевих конструкцій	Мінімальна товщина шару покриття d_p , мм			
R 30	1,469	0,990	0,657	0,466
R 45	-	-	1,491	1,136
R 60	-	-	-	1,859

У табл. 3.4, 3.5, 3.6 узагальнено дані щодо мінімальної товщини шару покриття з вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 400202» для класів вогнестійкості R 30, R 45, R 60 і критичної температури сталі 350 °С, 400 °С, 450 °С, 500 °С. Ці відомості отримані за стандартизованим методом [26; 86], унаслідок випробування десяти коротких колон, однієї високої колони й чотирьох балок двотаврового профілю із застосуванням числового регресійного аналізу [26; 86]. Параметри зразків, отримані експериментальні дані та результати їх оброблення схарактеризовано в розділі 2. У табл. 3.7. запропоновано значення різниці δ_d між даними щодо мінімальної товщини шару покриття, отриманими за спрощеним і стандартизованим методами.

Таблиця 3.4.

Значення мінімальної товщини шару покриття з вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 400202», за яких забезпечено клас вогнестійкості сталевих конструкцій R 30

Критична температура сталі θ_{cr} , °С	350	400	450	500
Зведена товщина сталевого профілю V/A_m , мм	Мінімальна товщина шару покриття d_p , мм			
2,9	1,472	1,166	0,921	0,720
3,0	1,460	1,154	0,909	0,709
3,1	1,447	1,142	0,898	0,698
3,2	1,447	1,142	0,898	0,698
3,3	1,423	1,118	0,875	0,677
3,4	1,411	1,106	0,863	0,667
3,6	1,387	1,082	0,841	0,646
3,7	1,375	1,070	0,830	0,636
3,8	1,364	1,059	0,819	0,627
4,0	1,340	1,036	0,798	0,607
4,2	1,317	1,014	0,777	0,588
4,5	1,283	0,981	0,747	0,561
4,8	1,250	0,949	0,717	0,534
5,0	1,228	0,928	0,698	0,517
5,3	1,196	0,897	0,670	0,492

Продовження табл. 3.4.

5,6	1,164	0,867	0,643	0,468
5,9	1,133	0,838	0,616	0,445
6,3	1,092	0,800	0,582	0,415
6,7	1,052	0,763	0,550	0,386
7,1	1,013	0,727	0,518	-
7,7	0,955	0,676	0,473	-
8,3	0,900	0,626	0,430	-
9,1	0,829	0,564	0,376	-
10,0	0,753	0,498	-	-
11,1	0,664	0,423	-	-
12,5	0,559	-	-	-
14,3	0,432	-	-	-

Таблиця 3.5.

Значення мінімальної товщини шару покриття з вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 400202», за яких забезпечено клас вогнестійкості сталевих конструкцій R 45

Критична температура сталі $\theta_{cr}, ^\circ\text{C}$	350	400	450	500
Зведена товщина сталевого профілю $V/A_m, \text{мм}$	Мінімальна товщина шару покриття $d_p, \text{мм}$			
2,9	-	2,069	1,735	1,460
3,0	-	2,052	1,718	1,445
3,1	-	2,036	1,702	1,429
3,2	-	2,020	1,686	1,414
3,3	-	2,004	1,670	1,398
3,4	-	1,988	1,654	1,383
3,6	-	1,956	1,623	1,354
3,7	-	1,941	1,608	1,339
3,8	-	1,926	1,593	1,325
4,0	-	1,895	1,563	1,297
4,2	-	1,865	1,534	1,270
4,5	-	1,822	1,492	1,230
4,8	-	1,779	1,451	1,191

Продовження табл. 3.5.

5,0	-	1,751	1,424	1,167
5,3	-	1,710	1,385	1,130
5,6	-	1,670	1,348	1,095
5,9	2,059	1,631	1,311	1,062
6,3	2,007	1,581	1,263	1,018
6,7	1,957	1,532	1,218	0,977
7,1	1,908	1,484	1,174	0,937
7,7	1,836	1,416	1,111	0,880
8,3	1,767	1,350	1,052	0,827
9,1	1,678	1,267	0,977	0,760
10,0	1,582	1,180	0,899	0,691
11,1	1,471	1,079	0,811	0,614
12,5	1,337	0,962	0,709	0,526
14,3	1,179	0,825	0,592	0,427

Таблиця 3.6.

Значення мінімальної товщини шару покриття з вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 400202», за яких забезпечено клас вогнестійкості сталевих конструкцій R 60

Критична температура сталі $\theta_{cr}, ^\circ\text{C}$	350	400	450	500
Зведена товщина сталевого профілю $V/A_m, \text{мм}$	Мінімальна товщина шару покриття $d_p, \text{мм}$			
2,9	-	-	-	-
3,0	-	-	-	-
3,1	-	-	-	-
3,2	-	-	-	-
3,3	-	-	-	-
3,4	-	-	-	-
3,6	-	-	-	2,061
3,7	-	-	-	2,042
3,8	-	-	-	2,023
4,0	-	-	-	1,987
4,2	-	-	-	1,951

Продовження табл. 3.6.

4,5	-	-	-	1,899
4,8	-	-	-	1,849
5,0	-	-	-	1,816
5,3	-	-	-	1,769
5,6	-	-	2,052	1,723
5,9	-	-	2,005	1,679
6,3	-	-	1,945	1,622
6,7	-	-	1,886	1,568
7,1	-	-	1,830	1,516
7,7	-	-	1,750	1,441
8,3	-	2,074	1,673	1,372
9,1	-	1,971	1,578	1,285
10,0	-	1,861	1,477	1,194
11,1	-	1,736	1,364	1,093
12,5	-	1,589	1,234	0,978
14,3	1,925	1,419	1,085	0,848

Таблиця 3.7.

Значення різниці δ_d між даними щодо мінімальної товщини шару покриття з вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 400202», отриманими за спрощеним і стандартизованим методами

Критична температура сталі $\theta_{cr}, ^\circ\text{C}$	350	400	450	500
Клас вогнестійкості сталевих конструкцій	Різниця $\delta_d, \%$			
R 30	28,5	16,8	5,1	2,9
R 45	-	-	12,7	5,9
R 60	-	-	-	9,8

Розрахунок цієї різниці виконаний за такою формулою:

$$\delta_d = 100 (d_{p,non-st} - d_{p,st}) / d_{p,st}, \quad (3.5)$$

де $d_{p,non-st}$ – мінімальна товщина шару покриття, визначена за спрощеним (не стандартизованим) методом, мм; $d_{p,st}$ –

мінімальна товщина шару покриття, визначена за стандартизованим методом, мм.

У ході розрахунків різниці δ_d використано значення товщини $d_{p,st}$ (табл. 3.8), які виявлені через інтерполяцію даних (табл. 3.4, 3.5, 3.6) для зведеної товщини сталевого профілю (5,8 мм).

Риски в таблицях означають, що дані не були зафіксовані. Це пов'язане з тим, що розрахункові значення мінімальної товщини перевищують максимальну товщину шару покриття, яка була на зразках для випробувань. Відповідно до положення запропонованого спрощеного методу, результати оцінювання застосовано для систем вогнезахисту тільки для діапазону товщини системи вогнезахисту, для якого проведено випробування (від мінімального до максимального значень товщини вогнезахисного матеріалу на зразках для випробувань).

Таблиця 3.8.

Значення мінімальної товщини $d_{p,st}$ шару покриття з вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 400202», застосовані в ході розрахунку різниці δ_d

Критична температура сталі θ_{cr} , °C	350	400	450	500
Клас вогнестійкості сталевих конструкцій	Мінімальна товщина шару покриття $d_{p,st}$, мм			
R 30	1,143	0,848	0,625	0,453
R 45	-	-	1,323	1,073
R 60	-	-	-	1,694

Згідно з табл. 3.7, різниця між значеннями мінімальної товщини шару покриття, які отримані за спрощеним і стандартизованим методами, становить від 2,9 % до 28,5 %. Із підвищенням критичної температури сталі ця різниця зменшується. Зокрема, для класу вогнестійкості R 30 у разі підвищення критичної температури сталі від 350 °C до 500 °C різниця зменшується від 28,5 % до 2,9 %. З огляду на критерій прийнятності, регламентований у стандартизованому методі [26; 86] (для кожного зразка розрахунковий час $t_{cr,cul}$ не повинен перевищувати експериментальний час t_{cr} більш ніж на 30 %),

отримані дані щодо різниці δ_d засвідчують прийнятність одержаних результатів оцінювання вогнестійкості за спрощеним методом.

За спрощеним методом оцінено вогнестійкість сталевих конструкцій двотаврового профілю з коробчастою пасивною системою вогнезахисту (рис. 2.1б), де застосовано вогнезахисні плити з вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 210104» [84]. Мета оцінювання – визначення мінімальних значень товщини облицювання з вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 210104» [84], за яких забезпечено нормовані класи вогнестійкості сталевих конструкцій, для діапазону критичної температури сталі від 350 °С до 500 °С.

Для випробувань використано чотири сталеві колони висотою 2,0 м двотаврового перерізу зі зведеною товщиною 4,4 мм, які були облицьовані плитами (завтовшки 20,0 мм, густиною 1050 кг/м³) із вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 210104» [84]. Товщина облицювання становила: 40,0 мм – для зразка № 1; 40,0 мм – для зразка № 2; 60,0 мм – для зразків № 3 і № 4. На рис. 3.6 зображено експериментальні дані щодо середньої температури цих зразків. Значення часу досягнення критичної температури зразків подано в табл. 3.9.

За результатами проведення апроксимації даних щодо часу t_{cr} (табл. 3.9), визначено коефіцієнти регресії a_0, a_1, a_2, a_3 , значення яких систематизовано в табл. 3.10.

Результати визначення значень мінімальної товщини облицювання з вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 210104», за яких забезпечено нормовані класи вогнестійкості сталевих конструкцій, отримані із застосуванням формули (3.4), див. табл. 3.11. Представлені дані поширюються на колони й балки двотаврової форми, які мають значення зведеної товщини сталевого профілю не менше ніж 4,4 мм.

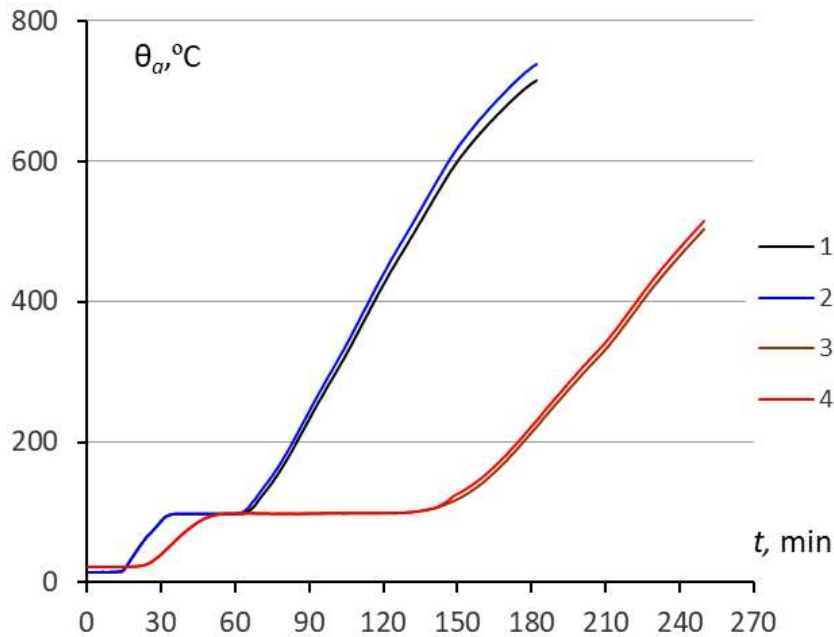


Рис. 3.6. – Залежності середньої температури зразків, у яких застосовано вогнезахисний матеріал «Ендотерм 210104», від тривалості вогневого впливу за стандартним температурним режимом

Таблиця 3.9.

Значення часу t_{cr} досягнення критичної температури зразків, у яких застосовано вогнезахисний матеріал «Ендотерм 210104»

Критична температура сталі $\theta_{cr}, ^\circ\text{C}$		350	400	450	500
№ зразка	Товщина облицювання d_p , мм	Значення часу досягнення критичної температури сталі t_{cr} , хв.			
1	40,0	109	116	124	133
2	40,0	107	114	122	130
3	60,0	214	225	237	249
4	60,0	212	223	234	246

Таблиця 3.10.
Результати визначення коефіцієнтів регресії для зразків, у яких застосовано вогнезахисний матеріал «Ендотерм 210104»

a_0	a_1	a_2	a_3
-106,55	3,98	0,011	0,00365

Таблиця 3.11.
Значення мінімальної товщини облицювання з вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 210104», за яких забезпечено нормовані класи вогнестійкості сталевих конструкцій

Критична температура сталі θ_{cr} , °C	350	400	450	500
Клас вогнестійкості сталевих конструкцій	Мінімальна товщина облицювання d_p , мм			
R 120	42,4	40,8	40,0	40,0
R 150	48,1	46,4	44,7	43,2
R 180	53,8	51,9	50,1	48,4
R 210	59,5	57,4	55,4	53,6
R 240	-	-	-	58,8

У табл. 3.12–3.16 систематизовано відомості щодо мінімальної товщини облицювання з вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 210104», для класів вогнестійкості R 120, R 150, R 180, R 210 і R 240 і критичної температури сталі 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C. Ці дані отримані за стандартизованим методом [26; 85] унаслідок випробувань десяти коротких колон, чотирьох балок двотаврового профілю із застосуванням числового регресійного аналізу [26; 85]. Параметри зразків, отримані експериментальні дані й результати їх оброблення викладено в розділі 2.

У табл. 3.17 запропоновано значення різниці δ_d між даними щодо мінімальної товщини облицювання, отриманими за спрощеним і стандартизованим методами. Розрахунок цієї різниці виконано за формулою (3.5). У ході розрахунку різниці δ_d використано значення товщини $d_{p,st}$ (табл. 3.18), зафіксовані внаслідок інтерполяції даних, представлених у таблицях 3.12-3.16, для зведеної товщини сталевого профілю, яка дорівнює 4,4 мм.

Відсутність в табл. 3.17 і 3.18 даних щодо різниці δ_d та мінімальної товщини облицювання $d_{p,st}$ для класів вогнестійкості R 210 і R 240 пов'язана з тим, що розрахункові значення мінімальної товщини, констатовані за стандартизованим методом [26; 85], перевищують максимальну товщину облицювання, яка була на зразках для випробувань. Відповідно до положення стандартизованого методу [26; 85], результати оцінювання, що застосовуються для систем вогнезахисту тільки для діапазону товщини системи вогнезахисту, для якого проведено випробування, з урахуванням його розширення на 10 % (зменшення на 5 % мінімального й збільшення на 5 % максимального значень товщини стосовно величини товщини, що на зразках для випробувань).

Табл. 3.17 доводить, що різниця між значеннями мінімальної товщини облицювання, отриманими за спрощеним і стандартизованим методами, не перевищує 9,9 %, це засвідчує прийнятність результатів оцінювання вогнестійкості за спрощеним методом.

Таблиця 3.12.

Значення мінімальної товщини облицювання з вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 210104», за яких забезпечено клас вогнестійкості сталевих конструкцій R 120

Критична температура сталі θ_{cr} , °C	350	400	450	500
Зведена товщина сталевого профілю V/A_m , мм	Мінімальна товщина облицювання d_p , мм			
4,0	45,1	43,1	41,2	39,5
4,2	44,7	42,7	40,8	39,1
4,3	44,2	42,2	40,4	38,6
4,5	43,8	41,8	39,9	38,1
4,8	43,3	41,3	39,4	37,6
5,0	42,8	40,8	38,9	37,1
5,3	42,2	40,2	38,3	36,5
5,6	41,6	39,6	37,7	35,9
5,9	40,9	38,9	37,0	35,2

Продовження табл. 3.12.

6,3	40,2	38,2	36,3	34,5
6,7	39,4	37,4	35,4	33,7
7,1	38,5	36,5	34,6	32,8
7,7	37,6	35,5	33,6	31,8
8,3	36,5	34,4	32,5	30,7
9,1	35,3	33,2	31,3	29,5
10,0	34,0	31,9	30,0	28,2
11,1	32,5	30,4	28,5	26,7
12,5	30,8	28,7	26,8	25,0
14,3	28,8	26,7	24,8	23,0
16,7	26,5	24,4	22,5	20,8
20,0	23,8	21,8	19,9	18,1

Таблиця 3.13.

Значення мінімальної товщини облицювання з вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 210104», за яких забезпечено клас вогнестійкості сталевих конструкцій R 150

Критична температура сталі θ_{cr} , °C	350	400	450	500
Зведена товщина сталевого профілю V/A_m , мм	Мінімальна товщина облицювання d_p , мм			
4,0	54,7	52,3	50,2	48,1
4,2	54,2	51,9	49,7	47,7
4,3	53,7	51,3	49,2	47,1
4,5	53,1	50,8	48,6	46,6
4,8	52,5	50,2	48,0	46,0
5,0	51,9	49,6	47,4	45,3
5,3	51,2	48,9	46,7	44,6
5,6	50,5	48,1	45,9	43,9
5,9	49,7	47,3	45,1	43,1
6,3	48,8	46,5	44,3	42,2
6,7	47,9	45,5	43,3	41,3
7,1	46,8	44,4	42,2	40,2
7,7	45,7	43,3	41,1	39,0

Продовження табл. 3.13.

8,3	44,4	42,0	39,8	37,8
9,1	42,9	40,6	38,4	36,3
10,0	41,3	39,0	36,8	34,7
11,1	39,5	37,2	35,0	33,0
12,5	37,5	35,1	32,9	30,9
14,3	35,1	32,8	30,6	28,6
16,7	32,3	30,0	27,9	25,9
20,0	29,1	26,8	24,7	22,8

Таблиця 3.14.

Значення мінімальної товщини облицювання з вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 210104», за яких забезпечено клас вогнестійкості сталевих конструкцій R 180

Критична температура сталі θ_{cr} , °C	350	400	450	500
Зведена товщина сталевого профілю V/A_m , мм	Мінімальна товщина облицювання d_p , мм			
4,0	52,96	51,61	50,29	48,99
4,2	52,63	51,25	49,89	48,56
4,3	52,47	51,07	49,69	48,34
4,5	52,15	50,71	49,30	47,92
4,8	51,67	50,17	48,71	47,29
5,0	51,35	49,82	48,33	46,88
5,3	50,88	49,30	47,77	46,27
5,6	50,42	48,79	47,21	45,68
5,9	49,96	48,29	46,67	45,10
6,3	49,36	47,63	45,95	44,34
6,7	48,77	46,98	45,26	43,60
7,1	48,19	46,34	44,58	42,88
7,7	47,33	45,42	43,58	41,83
8,3	46,50	44,51	42,62	40,82
9,1	45,42	43,35	41,39	39,53
10,0	44,24	42,09	40,06	38,14
11,1	42,86	40,62	38,51	36,54

Продовження табл. 3.14.

12,5	41,19	38,84	36,67	34,65
14,3	39,16	36,71	34,47	32,41
16,7	36,64	34,11	31,81	29,72
20,0	33,51	30,91	28,59	26,49

Таблиця 3.15.

Значення мінімальної товщини шару облицювання з вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 210104», за яких забезпечено клас вогнестійкості сталевих конструкцій R 210

Критична температура сталі θ_{cr} , °C	350	400	450	500
Зведена товщина сталевого профілю V/A_m , мм	Мінімальна товщина облицювання d_p , мм			
4,0	-	-	-	-
4,2	-	-	-	-
4,3	-	-	-	-
4,5	-	-	-	63,4
4,8	-	-	-	62,6
5,0	-	-	-	61,8
5,3	-	-	63,5	60,9
5,6	-	-	62,5	59,9
5,9	-	-	61,4	58,8
6,3	-	63,0	60,3	57,7
6,7	-	61,8	59,0	56,4
7,1	63,4	60,4	57,6	55,0
7,7	61,8	58,8	56,1	53,5
8,3	60,1	57,1	54,4	51,8
9,1	58,2	55,2	52,5	49,9
10,0	56,0	53,1	50,4	47,8
11,1	53,6	50,7	48,0	45,5
12,5	50,9	48,0	45,3	42,8
14,3	47,7	44,8	42,2	39,7
16,7	44,0	41,2	38,6	36,2
20,0	39,7	36,9	34,4	32,1

Таблиця 3.16.
Значення мінімальної товщини облицювання з вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 210104», за яких забезпечено клас вогнестійкості сталевих конструкцій R 240

Критична температура сталі θ_{cr} , °C	350	400	450	500
Зведена товщина сталевого профілю V/A_m , мм	Мінімальна товщина облицювання d_p , мм			
4,0	-	-	-	-
4,2	-	-	-	-
4,3	-	-	-	-
4,5	-	-	-	-
4,8	-	-	-	-
5,0	-	-	-	-
5,3	-	-	-	-
5,6	-	-	-	-
5,9	-	-	-	-
6,3	-	-	-	-
6,7	-	-	-	-
7,1	-	-	-	62,4
7,7	-	-	63,6	60,7
8,3	-	-	61,7	58,8
9,1	-	62,6	59,5	56,7
10,0	63,4	60,2	57,2	54,4
11,1	60,7	57,5	54,5	51,7
12,5	57,6	54,4	51,5	48,7
14,3	54,0	50,9	48,0	45,3
16,7	49,9	46,8	44,0	41,4
20,0	45,0	42,0	39,2	36,7

Таблиця 3.17.

Значення різниці δ_d між даними щодо мінімальної товщини шару покриття з вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 210104», що отримані за спрощеним і стандартизованим методами

Критична температура сталі θ_{cr} , °C	350	400	450	500
Клас вогнестійкості сталевих конструкцій	Різниця δ_d , %			
R 120	-3,6	-2,9	-0,4	-4,3
R 150	-9,9	-9,1	-8,6	-7,8
R 180	2,8	2,0	1,2	0,6

Таблиця 3.18.

Значення мінімальної товщини $d_{p,st}$ шару покриття з вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 210104», застосовані в ході розрахунку різниці δ_d

Критична температура сталі θ_{cr} , °C	350	400	450	500
Клас вогнестійкості сталевих конструкцій	Мінімальна товщина облицювання $d_{p,st}$, мм			
R 120	44,0	42,0	40,2	38,4
R 150	53,4	51,1	48,9	46,9
R 180	52,3	50,9	49,5	48,1

Із застосуванням вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 210104» [84] у формі штукатурки в профільованій пасивній системі вогнезахисту (рис. 2.1а), за спрощеним методом оцінено вогнестійкість сталевих конструкцій двотаврового профілю, захищених цією системою. Мета оцінювання – визначення мінімальних значень товщини шару покриття з вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 210104» [84], за яких забезпечено нормовані класи вогнестійкості сталевих конструкцій для критичної температури сталі, що становить 500 °C.

На поверхню зразків для випробування (чотирьох сталевих колон висотою 2,0 м двотаврового перерізу профілю № 20) попередньо наносили ґрунтовку завтовшки 0,05 мм. Товщина

шару покриття (у сухому стані) із вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 210104» [84] становила: 28,20 мм – для зразка № 1; 28,08 мм – для зразка № 2; 39,25 мм – для зразка № 3; 38,35 мм – для зразка № 4. Середня густина покриття дорівнювала 450 кг/м³. Отримані експериментальні дані щодо середньої температури цих зразків подано на рис. 3.7. Час досягнення критичної температури сталі 500 °С становить: 119 хв. – для зразка № 1; 118 хв. – для зразка № 2; 184 хв. – для зразка № 3; 178 хв. – для зразка № 4.

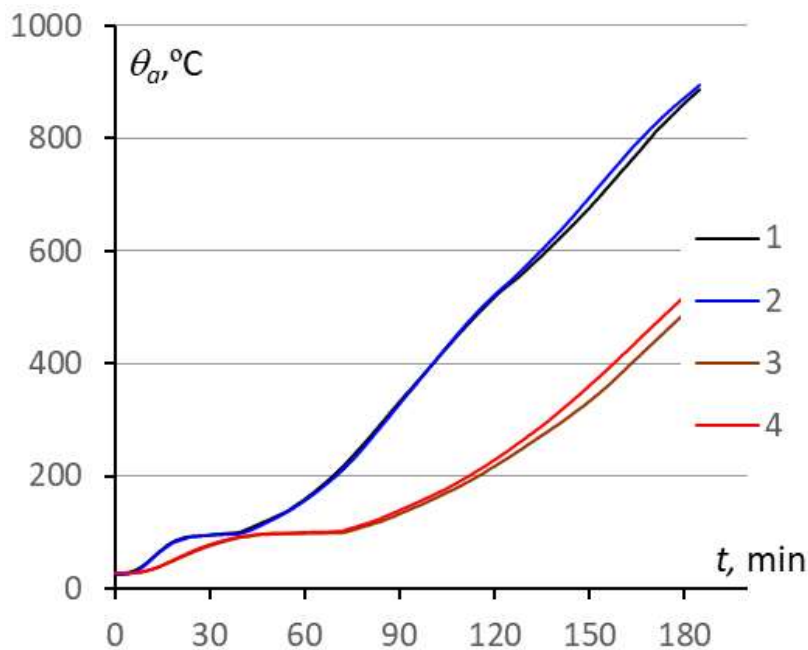


Рис. 3.7. – Залежності середньої температури зразків, у яких застосовано вогнезахисний матеріал «Ендотерм 210104», від тривалості вогневого впливу за стандартним температурним режимом

За результатами проведення апроксимації даних щодо часу t_{cr} і визначення коефіцієнтів регресії a_0 , a_1 , складено рівняння (3.6), яке виявляє залежність між часом досягнення критичної температури сталі, що становить 500 °С, і товщиною шару покриття з вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 210104».

$$t_{cr} = -47,628 + 5,868d_p, \quad (3.6)$$

де d_p – товщина шару покриття з вогнезахисного матеріалу, мм.

Результати визначення значень мінімальної товщини шару покриття з вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 210104», за яких

забезпечено нормовані класи вогнестійкості сталевих конструкцій, отримані із застосуванням рівняння (3.6), представлено в табл. 3.19. Систематизовані відомості поширюються на колони й балки двотаврової форми, які мають значення зведеної товщини сталевого профілю не менше, ніж 3,4 мм.

Таблиця 3.19.

Значення мінімальної товщини шару покриття з вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 210104», за яких забезпечено нормовані класи вогнестійкості сталевих конструкцій

Клас вогнестійкості сталевих конструкцій	Мінімальна товщина шару покриття d_p , мм
R 120	28,56
R 150	33,68
R 180	38,79

У табл. 3.20 узагальнено дані щодо мінімальної товщини облицювання для коробчастої пасивної системи вогнезахисту, у якій застосовано плити (товщиною 20 мм і густиною 1050 кг/м³) із вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 210104», призначені для класів вогнестійкості R 120, R 150, R 180 і критичної температури сталі 500 °С. Ці дані отримані за стандартизованим методом [26; 85] унаслідок випробувань десяти коротких колон і чотирьох балок двотаврового профілю із застосуванням числового регресійного аналізу [26; 85]. Параметри зразків, експериментальні дані й результати їх опрацювання схарактеризовані в розділі 2.

Таблиця 3.20.

Значення мінімальної товщини облицювання з вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 210104», зафіксовані для критичної температури сталі, що дорівнює 500 °С

Клас вогнестійкості сталевих конструкцій	R 120	R 150	R 180
Зведена товщина V/A_m , мм	Мінімальна товщина вогнезахисту d_p , мм		
4,0	39,5	48,1	56,8
4,2	39,1	47,7	56,3
4,3	38,6	47,1	55,7
4,5	38,1	46,6	55,0
4,8	37,6	46,0	54,3
5,0	37,1	45,3	53,6
5,3	36,5	44,6	52,8
5,6	35,9	43,9	51,9
5,9	35,2	43,1	51,0
6,3	34,5	42,2	49,9
6,7	33,7	41,3	48,8
7,1	32,8	40,2	47,6
7,7	31,8	39,0	46,3
8,3	30,7	37,8	44,8
9,1	29,5	36,3	43,1
10,0	28,2	34,7	41,3
11,1	26,7	33,0	39,2
12,5	25,0	30,9	36,9
14,3	23,0	28,6	34,2
16,7	20,8	25,9	31,1
20,0	18,1	22,8	27,4

Порівняння даних таблиць 3.19, 3.20 не зовсім прийнятне через наявність різниці у властивостях (зокрема, у густині) вогнезахисної штукатурки, яку виготовлено з матеріалу «Ендотерм 210104» [84], і вогнезахисної плити з цього ж матеріалу. Згідно з таблицею 3.20, для коробчастої системи значення мінімальної товщини облицювання суттєво залежать від зведеної товщини сталевих профілю. У разі її підвищення від 4,0 мм до 20,0 мм значення мінімальної товщини облицювання зменшується у 2,2 раза. Це дає змогу висловити припущення, що

значення мінімальної товщини шару покриття (штукатурки) із вогнезахисного матеріалу для величин зведеної товщини сталевих профілю, більших за 3,4 мм, будуть суттєво меншими (на десятки відсотків), ніж ті, які подано в табл. 3.19. Випробування за спрощеним методом призводять до отримання відомостей стосовно мінімальної товщини системи вогнезахисту, які можуть бути завищені на кілька десятків відсотків щодо значень, одержаних за стандартизованим методом [26; 85]. Такі значення різниці між результатами випробувань, що отримані за спрощеним і стандартизованим методами, можна вважати допустимими для характеристики вогнестійкості захищених сталевих конструкцій на етапі експлуатації будівель.

Описані результати валідації засвідчують прийнятність одержаних даних щодо оцінювання вогнестійкості захищених сталевих конструкцій за спрощеним методом. У дослідженні охоплена тільки профільована система вогнезахисту з використанням реактивного вогнезахисного матеріалу, що спучується, «Ендотерм 400202» [83], а також коробчаста й профільована системи з використанням пасивного вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 210104» [84]. Це спонукає до висновку, що для вогнезахисних матеріалів інших торгових марок можна отримати інші результати. Таке положення обмежує використання отриманих результатів і може бути потрактоване як недолік. Неможливість нейтралізувати ці обмеження доводить факт існування перспективних напрямів подальших досліджень, які варто спрямовувати на оцінювання збіжності між значеннями мінімальної товщини систем вогнезахисту для вогнезахисних матеріалів інших торгових марок.

Результати досліджень, що подані в розділі 3, представлено в працях [49–50].

3.4. Висновки до розділу 3

1. Розроблено спрощений метод оцінювання вогнестійкості захищених сталевих конструкцій, що передбачає використання в ході випробувань чотирьох ненавантажених сталевих колон (менше, ніж за вимогами стандартизованих методів [26; 85]). Виокремлено складники та процедури спрощеного методу. Обґрунтовано значення зведеної товщини зразків для випробувань та інші параметри. Доведено, що для виготовлення

зразків доцільно використовувати сталеві колони висотою 2,0 м, які мають найменше значення зведеної товщини.

2. Окреслено діапазон критичної температури сталі, що становить від 350 °С до 500 °С, для якого за спрощеним методом варто проводити розрахунки мінімальної товщини системи вогнезахисту. Вибір такого діапазону обґрунтований прийнятною різницею між даними щодо мінімальної товщини системи вогнезахисту, які визначені з урахуванням і без урахування показників її здатності до зчеплення та (або) здатності залишатися непошкодженим під час вогневого впливу. У цьому діапазоні різниця не перевищує 5,5 % (табл. 2.13, 2.14, $\delta_{d,mod,avg}$). Із підвищенням критичної температури сталі різниця різко збільшується й досягає 18,8 % для температури 750 °С.

3. Проведено валідацію спрощеного методу оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій із застосуванням коробчастих і профільованих систем вогнезахисту, із використанням реактивного й пасивного вогнезахисних матеріалів. Унаслідок порівняння результатів, отриманих за спрощеним і стандартизованим методами, зафіксовано придатність розробленого спрощеного методу для практичного застосування. Зокрема, для коробчастої системи вогнезахисту із використанням пасивного вогнезахисного матеріалу різниця між значеннями мінімальної товщини облицювання, які отримані за спрощеним і стандартизованим методами, не перевищує 9,9 % (табл. 3.17), що є прийнятним для оцінювання вогнестійкості конструкцій.

РОЗДІЛ 4

ВИЗНАЧАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ Й ПОЛОЖЕННЯ МЕТОДИКИ ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТА ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ЕТАПІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

4.1. Загальні положення. Обґрунтування параметрів методики

Оцінювання технічного стану та вогнестійкості виконано для з'ясування можливостей щодо подальшої експлуатації сталевих конструкцій у такій послідовності [93–102]:

- вивчення технічної (проектної, нормативної) документації;
- візуальне обстеження конструкцій, попередній висновок про технічний стан, відбір конструкцій для інструментального обстеження;
- інструментальне обстеження конструкцій, визначення параметрів конструкцій і фізико-механічних характеристик матеріалів;
- аналіз результатів візуального й інструментального обстеження, ухвалення рішення про необхідність розрахунків конструкцій із залученням сучасних ПК;
- виконання перевірочних розрахунків (за необхідності), з огляду на можливості розвитку особливих впливів (наприклад, пожежі, вибуху);
- оцінювання технічного стану та вогнестійкості на основі проведених досліджень;
- висновок про можливість подальшої експлуатації, розроблення рекомендацій (проекту) щодо посилення конструкцій (за необхідності);
- визначення залишкового ресурсу та вогнестійкості, з огляду на можливості розвитку особливих впливів (за необхідності).

Для оцінювання технічного стану та вогнестійкості конструкцій використано [102–105]:

- критерій відповідності конструкції (споруди) робочій документації (розміри, конструктивні особливості, засоби захисту від агресивних впливів навколишнього середовища, забезпечення вогнестійкості тощо);

– критерій відповідності конструкції (споруди) визначальним параметрам технічного стану та вогнестійкості (наявність недопустимих дефектів, відповідність застосованих матеріалів і засобів захисту конструкцій вимогам проекту й чинних нормативних документів України тощо).

Сучасний розвиток технологій відновлення дає змогу виконувати роботи з посилення сталевих конструкцій із різним ступенем пошкодження – як власне конструкцій, так і вогнезахисних матеріалів [106; 107].

Удосконалення методики розрахунку із залученням сучасних ПК на основі МСЕ для з'ясування залишкової несучої здатності сталевих конструкцій, що зазнали протягом певного часу різних чинників впливу, вимагає використання такої моделі деформування матеріалів, яка б охоплювала всі етапи роботи – від початку навантаження до повного руйнування [102; 108].

Для вдосконалення методики оцінювання технічного стану й вогнестійкості експлуатованих конструкцій будівель і споруд, для доповнення положень чинних нормативних документів [6–8; 14] необхідно виконати завдання [93; 98; 102]:

– узагальнити результати досліджень у сфері визначення НДС, несучої здатності, залишкового ресурсу та вогнестійкості сталевих конструкцій будівель і споруд після силових та високотемпературних впливів [93; 98–102; 103];

– окреслити комплекс взаємопов'язаних заходів із вивчення параметрів НДС, технічного стану, залишкового ресурсу та вогнестійкості [93; 104];

– визначити величини параметрів технічного стану, залишкового ресурсу та вогнестійкості сталевих конструкцій, будівель і споруд у цілому;

– розробити розрахункові моделі й методи розрахунку НДС, залишкової несучої здатності та вогнестійкості сталевих конструкцій будівель і споруд після пожежі;

– удосконалити методи оцінювання НДС, залишкової несучої здатності та вогнестійкості сталевих конструкцій будівель і споруд, можливості їх регулювання для подальшої експлуатації через ремонт, підсилення або заміну, зокрема з розробленням заходів щодо забезпечення вогнезахисту.

4.2. Особливості проведення обстежень та оцінювання технічного стану й вогнестійкості експлуатованих конструкцій будівель і споруд

Безпека експлуатації конструкцій починається на стадії проектування, що передбачає проведення розрахунків, попередніх випробувань, проектно-конструкторських та інших робіт, пов'язаних зі створенням конструкцій. На стадії експлуатації вживають контрольних заходів для огляду технічного стану, оцінювання ресурсів, вогнестійкості, окреслення реального залишкового ресурсу. Існує низка вимог до технічної діагностики – розроблення технології вивчення технічного стану й характеристик міцності матеріалів конструкцій у процесі експлуатації.

Оцінювання технічного стану конструкцій, будівель і споруд починають із вивчення технічної документації – нормативної, проектної, виконавчої й експлуатаційної [1; 2; 93; 102].

Технічна документація на вогнезахисні матеріали повинна містити:

- опис матеріалу;
- якісні характеристики матеріалу та показники його вогнезахисної ефективності, згідно з документами щодо оцінювання відповідності;
- дані про сировину й матеріали, із яких виготовлена вогнезахисна продукція;
- опис методів та (або) обладнання, за допомогою яких контролюють якість засобів, що виробляють, їхня ідентифікація й методи контролю під час і після вогнезахисного оброблення;
- настанови з вогнезахисного оброблення, а також зі збереження та транспортування засобів вогнезахисту (регламент робіт із вогнезахисту);
- довговічність (термін експлуатаційної придатності) та гарантійні зобов'язання;
- інша інформація, що описує всі елементи, пов'язані з виробництвом та з необхідною системою оцінювання (перевірки) сталості характеристик якості вогнезахисних засобів і робіт з їх застосування.

Для проведення вогнезахисних випробувань виробник або його вповноважений представник готують технічну документацію з вогнезахисного оброблення на кожен

вогнезахисний засіб (систему вогнезахисту). Ідеться про регламент робіт із вогнезахисту, що описує порядок та всі можливі процедури застосування й підтримання експлуатаційної придатності вогнезахисту.

Відповідальність за повноту й достовірність інформації, яку зазначено в технічній документації на вогнезахисні матеріали та в документації з вогнезахисного оброблення, покладена на виробника й (або) вповноваженого представника.

Особливу увагу під час з'ясування відповідальності треба звертати на документацію, що окреслює умови підтримання експлуатаційної придатності вогнезахисту.

Для сталевих конструкцій чинна єдина класифікація (номенклатура) можливих технічних станів, відповідно до нормативних документів [13–14]. Види технічних станів описано в таблиці 4.1 [13–14].

Конструкції з початку своєї експлуатації, унаслідок старіння та деградації, можуть послідовно перебувати в кожному з чотирьох технічних станів. З'ясування того, у якому з названих технічних станів перебуває конструкція або будівля в цілому в конкретний час, є завданням комплексу робіт з оцінювання технічного стану.

Таблиця 4.1.
Види технічних станів конструкцій та елементів

Стан конструкції	Характеристика стану
«1» – нормальний	Фактичні зусилля в елементах і перерізах не перевищують допустимих за розрахунком, відсутні дефекти й пошкодження, які знижують несучу здатність та довговічність або перешкоджають нормальній експлуатації.

Продовження табл. 4.1.

<p>«2» – задовільний</p>	<p>За експлуатаційними якостями конструкція відповідає категорії «1», але наявні часткові відхилення від вимог проекту, дефекти або пошкодження, які можуть знизити довговічність конструкції чи частково порушити вимоги другої групи технічних станів, що в конкретних умовах експлуатації не обмежує використання об'єкта за безпосереднім призначенням.</p>
<p>«3» – непридатний для нормальної експлуатації</p>	<p>Конструкція не відповідає категоріям «1», «2» щодо несучої здатності або нормальної реалізації захисних функцій, але аналіз дефектів і пошкоджень із перевірними розрахунками виявляє можливість забезпечення її цілісності до проведення ремонту, підсилення або заміни.</p>
<p>«4» – аварійний</p>	<p>Аналогічно до стану конструкції III. На основі перевірних розрахунків та аналізу дефектів і пошкоджень неможливо гарантувати цілісність конструкцій на період підсилення, особливо якщо можливий «крихкий» характер руйнування. Необхідно вивести людей із зони можливого обвалення, виконати негайне розвантаження, ужити інших заходів безпеки.</p>

Критеріями відмов і пошкоджень конструкцій слугують граничні величини контрольованих параметрів технічного стану (наприклад, наявність або відсутність тріщин, прогини, переміщення тощо).

Критерії затверджують згідно з вимогами проектної або нормативної документації. Вони необхідні для порівняння фактичних значень контрольованих і визначальних параметрів, які отримують у процесі оцінювання технічного стану та вогнестійкості конструкцій.

Особливу увагу під час з'ясування відповідальності потрібно звертати на документацію, що регламентує умови підтримання експлуатаційної придатності вогнезахисту.

Методика визначення значень параметрів, що характеризують механізм накопичення змін у сталевих конструкціях, потребує виконання низки процедур [1-2; 13-14; 102]:

- проведення спостережень за поточним станом сталевих конструкцій службами організації, яка експлуатує будівлю (постійний візуальний контроль);

- періодичні вимірювання геометричних параметрів конструкції, постійний контроль положення будівлі;

- систематичні геодезичні спостереження з фіксацією отриманих результатів;

- візуальний систематичний контроль технічного стану сталевих конструкцій службами організації, що експлуатує будівлю;

- періодичні обстеження сталевих конструкцій з окресленням контрольованих параметрів та їхнього технічного стану;

- опис механізму накопичення незворотних змін у сталевих конструкціях;

- оцінювання вогнестійкості експлуатованих сталевих конструкцій;

- прогноз стосовно зміни контрольованих параметрів і технічного стану сталевих конструкцій у часі, з'ясування залишкового ресурсу конструкцій, що проводять на основі механізму накопичення незворотних змін у сталевих конструкціях й аналізу результатів геодезичних спостережень.

Критеріями відмов і пошкоджень слугують граничні величини параметрів технічного стану (наявність або відсутність тріщин, прогини, переміщення, руйнування захисних покриттів

тощо), що регульоване в проектній або в нормативній документації.

Перелік найбільш характерних визначальних параметрів для оцінювання технічного стану сталевих конструкцій представлено в таблицях ДСТУ Б В.2.6-210:2016 [14].

На основі виявлених ознак із використанням прогнозованої зміни в часі окреслюють критерії вичерпання несучої здатності конструкцій, з описом наслідків такого виду відмови, а також розроблюють рекомендації щодо запобігання вичерпанню несучої здатності конструкцій.

Вихід із ладу конструкцій будівель і споруд, зазвичай, не виникає раптово, а стає результатом старіння – накопичення пошкоджень унаслідок дії корозійного середовища, підвищених температур, статичних, динамічних та особливих навантажень.

Візуальне обстеження технічного стану проводять через технічний огляд конструкцій. Візуальним методом виявляють видимі дефекти сталевих конструкцій, а також фіксують очевидні й передбачувані причини їх появи. Остаточні причини виникнення дефектів уточнюють після вивчення технічної документації, а також у ході інструментального обстеження.

Обстежуючи дефекти й пошкодження, порівнюють відповідність обстежуваних конструкцій та умов їх експлуатації вимогам нормативної і проектної документації.

Технічний стан вогнезахисту експлуатованих сталевих конструкцій перевіряють відповідно до проектної й технічної документації на застосовану систему вогнезахисту. Загалом достатньо аналізу зовнішнього вигляду й можливих змін у кольорі та фактурі матеріалів, надійності систем кріплення й інших фізичних показників. За необхідності вивчають характеристичні показники застосовуваних у системі вогнезахисту матеріалів, а саме [26–27]:

- у ході перевірки реактивних вогнезахисних покривів – визначення товщини покриву й коефіцієнта спучення;
- під час перевірки пасивних вогнезахисних покривів – визначення товщини покриву.

У процесі виконання перевірочних розрахунків передбачено [1; 2; 93; 102]:

- математичне моделювання конструкцій МСЕ, з огляду на виявлений деформований стан;

-
- розрахунок та аналіз отриманих зусиль і переміщень в конструкціях;
 - порівняння НДС реального об'єкта й розрахункової моделі, уточнення за необхідності характеристик матеріалу конструкцій;
 - розрахунок уточненої моделі, аналіз отриманих результатів розрахунку;
 - перевірка обмежень, що забезпечують виконання умов для розрахунку за граничними станами першої та другої груп, оцінювання технічного стану будівельних конструкцій;
 - проектування підсилення (за необхідності);
 - корегування розрахункової схеми споруди, з огляду на елементи підсилення й розрахунок нової моделі та вогнестійкості.

Остаточне оцінювання технічного стану й вогнестійкості конструкцій (споруди) проводять через зіставлення контрольованих параметрів з проектними параметрами.

Дані про температуру в приміщенні під час пожежі можна отримати на основі аналізу зміни зовнішнього вигляду й форми будівельних конструкцій і матеріалів, що залишилися після пожежі (таблиця 4.2 [94]).

Серед характерних особливостей конструкцій аварійного стану – залишкові прогини, що суттєво перевищують (у 2 й більше разів) допустимі, це регламентоване в чинних нормах проектування будівельних конструкцій (приблизно 1/20–1/50 прольоту). Для запобігання подальшому наростанню деформацій та обваленню під аварійні конструкції встановлюють тимчасові кріплення. Тип тимчасових страхувальних кріплень вибирають за результатами обстеження або згідно з відомими даними [14; 94–95].

Таблиця 4.2.
Характер пошкоджень сталевих конструкцій

Характер пошкоджень елементів сталевих конструкцій	Передбачуваний режим температурної дії, °С	Ступінь пошкодження	Висновок про використання конструкції
<p>Малодеформовані – невеликі вм'ятини та пробоїни другорядних і не сильно навантажених елементів; місцеві викривлення, що не знижують несучої здатності конструкцій; на поверхні нагар, що легко вилучити, й обгорілі кромки; твердість сталі відповідає її марці.</p>	<p>Нетривалий, за температури 400-600 °С</p>	<p>Слабкий</p>	<p>Ремонт можна не робити</p>

Продовження табл. 4.2.

<p>Пошкодження, що знижують несучу здатність окремих конструкцій, але не супроводжуювані втратою несучої здатності основних елементів; на поверхні – нагар і тонкий шар окалини, що місцями відшаровується; твердість сталі знижується на 10-15 %.</p>	<p>Аналогічно, за температури 700- 900 °С</p>	<p>Середній</p>	<p>Місцевий ремонт без демонтажу конструкцій; іноді потрібне облаштування додаткових стійок, розпірок, упорів тощо.</p>
<p>Втрата несучої здатності конструкції під час експлуатаційних навантажень; руйнування вузлів і з'єднань по всьому перерізу або суттєві викривлення по довжині основних елементів; є товстий шар окалини; твердість сталі знижується на 30 % і більше.</p>	<p>Тривалий, за температури понад 900 °С</p>	<p>Сильний</p>	<p>Ремонт конструкції, зазвичай, із демонтажем або установкою тимчасових кріплень, опор.</p>
<p>Руйнування окремих конструкцій і частин будівлі; оплавлення й перепад металу.</p>	<p>Тривалий, за температури близько 1400 °С</p>	<p>Аварійний</p>	<p>Заміна конструкцій</p>

Результатом роботи експертів щодо аналізу будівлі, де відбулася пожежа, і конструкцій, на які діяла висока температура під час пожежі, стає підготовка висновку, який повинен містити весь матеріал, що допомагає власникові будівлі, проектній організації розробити заходи з відновлення або з ліквідації конструкцій, які постраждали під час пожежі. Висновок підписують експерти, за необхідності – представник проектної організації.

Оцінювання вогнестійкості експлуатованих сталевих конструкцій і відновлення захисних покриттів виконують відповідно до чинних нормативних документів [14; 26–27]. Рекомендовано використовувати методику оцінювання вогнестійкості захищених сталевих конструкцій із застосуванням ненавантажених зразків для випробування, що представлено в додатку Б, або процедуру оцінювання вогнестійкості сталеві конструкції за спрощеним розрахунковим методом, згідно з Єврокодом 3, із використанням положення щодо критичної температури сталі.

На основі отриманих даних ухвалюють рішення про можливість подальшої експлуатації. Відповідно до вимог чинних нормативних документів [30–32; 96], елемент конструкції вважають працездатним, якщо дотримано серії нерівностей. Характерні нерівності такі:

умови міцності

$$\sigma \leq \gamma_c \cdot R; \quad (4.1)$$

умови стійкості

$$\sigma \leq \sigma_{cr}; \quad (4.2)$$

умови деформативності

$$f \leq f_u; \quad (4.3)$$

де: σ – напруження в елементі; R – розрахунковий опір матеріалу; γ_c – коефіцієнт умов роботи; σ_{cr} – критичні

напруження; f – прогин елемента; f_u – гранично допустимий прогин елемента [96].

Допустимо застосовувати прямі обмеження наступного типу на зміну характеристик міцності, конструктивних або інших визначальних параметрів:

$$\delta_{\min} \leq \delta; \quad (4.4)$$

$$R_{\min} \leq R; \quad (4.5)$$

де: δ_{\min} – мінімально допустима товщина елемента; δ – дійсна товщина елемента; R_{\min} – мінімальний допустимий розрахунковий опір матеріалу; R – дійсний розрахунковий опір матеріалу.

Мінімальні значення визначають через розрахунок або вибирають відповідно до проекту.

Граничного стану досягають, коли нерівність перетворюється на рівність.

Унаслідок корозійних процесів, дій підвищених температур, а також механічних напружень, в основному металі, зварних з'єднання відбуваються зміни в часі, тому деякі (чи всі) компоненти нерівностей, описані вище, є функціями часу.

На підставі алгебраїчних перетворень кожна з наведених нерівностей, а також інші нерівності, можуть бути записані у вигляді [77; 93; 104]:

$$F[x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t), y_1, y_2, \dots, y_n] \leq 1; \quad (4.6)$$

де F – функція компонентів нерівностей $x_1, x_2, \dots, x_m, y_1, y_2, \dots, y_n$ як складна функція також і функція часу. Вид функційної залежності вибирають унаслідок алгебраїчних перетворень нерівностей виду (4.1)...(4.5) із включенням до складу аргументів усіх величин, які залежать від часу.

У формулі (4.6) аргументи функції F розподілено на дві групи. Аргументи першої групи x_1, x_2, \dots, x_m залежать від часу, їх називають визначальними параметрами. Аргументи другої групи

y_1, y_2, \dots, y_n від часу не залежать і є константами. У процесі затвердження залишкового терміну служби використовують представлення нерівностей у формі (4.6).

Залежність визначальних параметрів від часу виявляється лінійною. Вона виражена формулою:

$$x_i(t) = x_i^0 + s_i \cdot t \quad (i = 1, 2, \dots, m); \quad (4.7)$$

де: x_i^0 – значення визначального параметра з номером i у момент обстеження; s_i – швидкість зміни визначального параметра з номером i ; t – час, що обчислюють від моменту обстеження.

Швидкість зміни визначального параметра обчислюють на підставі вимірів цього параметра у два різні моменти часу t_1 і t_2 . Для отримання достовірних результатів тимчасова база

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad (4.8)$$

має бути значною (вимірювана роками).

Швидкість зміни визначального параметра x_i обчислюють за формулою:

$$s_i = \frac{x_i^2 - x_i^1}{\Delta t} \quad (i = 1, 2, \dots, m); \quad (4.9)$$

де: x_i^1 – значення визначального параметра x_i у момент часу $t = t_1$; x_i^2 – значення визначального параметра x_i у момент часу $t = t_2$.

Рекомендовано виконати якомога більшу кількість незалежних вимірів одного й того самого визначального параметра. У цьому випадку: x_i^1 – середнє арифметичне результатів вимірів параметра x_i у момент часу $t = t_1$; x_i^2 – середнє арифметичне результатів вимірів параметра x_i у момент часу $t = t_2$.

Якщо виміри провести не можна, швидкість зміни визначального параметра визначають на підставі теоретичних або лабораторних досліджень.

Нерівності виду (4.6) складають для кожного можливого граничного стану кожного елемента. Мінімальне позитивне значення t , за якого нерівність (4.6) перетворюється на рівняння

$$F[x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t), y_1, y_2, \dots, y_n] = 1; \quad (4.10)$$

буде залишковим терміном служби для цього елемента щодо граничного стану.

Залишковий термін служби для цього елемента щодо граничного стану [14; 31]:

$$t_{p,q(p)}^* [p = 1, 2, \dots, u; q(p) = 1, 2, \dots, v(p)] \quad (4.11)$$

визначають як мінімальний позитивний корінь рівняння виду (4.10).

Усі ці рівняння мають бути розв'язані щодо t . У формулі (4.11) подано позначення для всіх обчислених залишкових термінів служби, де p і $q(p)$ – індекси. Позначення: p – номер елемента; u – кількість елементів; $q(p)$ – номер граничного стану для елемента з номером p ; $v(p)$ – кількість граничних станів, які враховують для елемента з номером p .

Залишковий термін служби для елемента з номером p визначають за формулою [14; 31]:

$$T_p^o = \min_{q(p)} t_{p,q(p)}^* (p = 1, 2, \dots, u). \quad (4.12)$$

Він дорівнює мінімальному значенню з усіх вичислених залишкових термінів служби для цього елемента.

Залишковий термін служби конструкції або об'єкта визначають за формулою:

$$T = \min_p T_p^o. \quad (4.13)$$

Він дорівнює мінімальному залишковому терміну служби серед усіх елементів.

Розроблена методика може набути практичного застосування в разі визначення НДС, залишкової несучої здатності та вогнестійкості сталевих конструкцій будівель і споруд, які отримали пошкодження під час експлуатації після різних впливів,

оцінювання можливості подальшої експлуатації через ремонт, підсилення або заміни, зокрема з розробленням заходів щодо забезпечення вогнестійкості конструкцій. Використання цієї методики сприятиме ухваленню обґрунтованого рішення щодо умов подальшої експлуатації конструкцій.

Проблему забезпечення вогнестійкості й відновлення сталевих конструкцій в процесі експлуатації неможливо аналізувати окремо від впливу на конструкції інших факторів – кліматичних, сейсмічних, удару важкого тіла та вибуху боєприпасів, вибухів речовин, які зберігаються в будівлі (паливо, хімічні речовини, газопароповітряні суміші тощо). Розрахунки конструкцій на такі види впливів, зазвичай, виконують експерти, тобто кваліфіковані спеціалісти, які мають досвід роботи на об'єктах підвищеної небезпеки.

За даними Центру пожежної статистики Міжнародної асоціації пожежно-рятувальних служб, щороку у світі на кожні сто тисяч населення виникає близько 200 пожеж, унаслідок яких гине 2 особи. [109–111]. Тільки порівняно з 2018 роком загальна кількість надзвичайних ситуацій (НС) в Україні у 2019 році збільшилася на 14,1 %, при цьому кількість НС техногенного характеру збільшилася на 25 % (через збільшення кількості НС унаслідок пожеж, вибухів та раптового руйнування будівель та споруд). [114].

Особливо небезпечними є виробництва, на яких може утворюватись вибухонебезпечне середовище із подальшим займанням. Саме тому прогнозування вибухів і наслідків відіграє важливу роль у забезпеченні технічного стану конструкцій на небезпечних об'єктах.

Проблемам прогнозування параметрів вибухонебезпечного середовища присвячено численну кількість праць, які варто розподілити за двома основними напрямками: перший пов'язаний із виявленням факту аварії, другий – із прогнозуванням параметрів вибухонебезпечного середовища та наслідків вибуху [112], що є необхідним для забезпечення технічного стану й відновлення сталевих конструкцій внаслідок вибухів на таких об'єктах.

Запропоновано способи запобігання вибуху на відкритих територіях. Розроблена технологія прогнозування параметрів вибухонебезпечного середовища може бути використана в післяаварійний період для уточнення полів вибухонебезпечного

середовища. Наявність даних щодо кількісного впливу вибухонебезпечного середовища дасть змогу виконати розрахунки на міцність будівель і споруд зі сталевим каркасом. Такі розрахунки можуть бути виконані на стадії проектування об'єкта та під час його експлуатації. Тому при оцінюванні технічного стану сталевих конструкцій в процесі експлуатації будівель та споруд вплив на конструкції різних факторів (кліматичних, сейсмічних, вибуху) необхідно враховувати. Даний напрямок має наукові перспективи та потребує подальших наукових досліджень.

4.3. Висновки до розділу 4

1. Удосконалено методику отримання визначальних параметрів технічного стану й вогнестійкості сталевих конструкцій. Передбачено, що конструкції та елементи від початку своєї експлуатації впродовж усього життєвого циклу внаслідок старіння, деградації й інших впливів (зокрема високотемпературних впливів через пожежу) можуть послідовно перебувати в кожному з чотирьох технічних станів.

2. Обґрунтовано, що критерії (кількісні та якісні показники) оцінювання технічного стану конструкцій і захисних покриттів доцільно визначати відповідно до вимог проектної й нормативної документації. Критерії необхідні для порівняння фактичних значень контрольованих і визначальних параметрів, що отримують у процесі обстеження конструкцій.

3. Удосконалено й запропоновано методику оцінювання залишкового ресурсу сталевих конструкцій після різних впливів. Суть методики полягає у визначенні НДС, залишкової несучої здатності та вогнестійкості сталевих конструкцій будівель і споруд, які отримали пошкодження під час експлуатації після різних впливів, в оцінюванні можливості подальшої експлуатації через ремонт, підсилення або заміну, зокрема з розробленням заходів щодо забезпечення вогнестійкості конструкцій. Отже, методика вможливорює прогнозування подальшої експлуатації, а також доводить необхідність відновлення конструкцій.

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано й узагальнено результати досліджень у сфері визначення вогнестійкості сталевих конструкцій, НДС конструкцій будівель і споруд після силових та високотемпературних впливів, обґрунтовано необхідність подальших досліджень. Констатовано, що сталеві конструкції протягом експлуатації та після пожежі можуть втрачати свої властивості внаслідок руйнування вогнезахисних покриттів, зміни характеристик міцності й деформативності сталі та нерівномірних деформацій через локальне високотемпературне розігрівання конструкцій.

2. Вивчено характер впливу показників здатності до зчеплення вогнезахисних матеріалів різних типів на результати оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій уточненим експериментальним способом, відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-17:2007 (ENV 13381-4:2002, NEQ). Виконано розрахунки й зафіксовано збіжність результатів оцінювання вогнестійкості, що отримані з урахуванням і без урахування показників здатності до зчеплення. Виявлено, що різниця між значеннями тривалості досягнення критичної температури сталі, які не враховують і враховують показники здатності вогнезахисних матеріалів до зчеплення, для сталевих конструкцій із пасивним вогнезахисним матеріалом досягає 22,9 %, це більше, ніж для реактивного вогнезахисного матеріалу, для якого максимальна різниця становить 9,4 %. Величина цієї різниці як для реактивного, так і для пасивного вогнезахисного матеріалу суттєво залежить від значень зведеної товщини сталевого профілю й критичної температури сталі. Різниця між значеннями мінімальної товщини вогнезахисного матеріалу, за якими досягають нормованих меж вогнестійкості сталевих конструкцій, що визначені з урахуванням показників здатності реактивного та пасивного вогнезахисних матеріалів до зчеплення й без їх урахування, збільшується з підвищенням зведеної товщини сталевого профілю. Максимальне значення цієї різниці для реактивного й пасивного вогнезахисних

матеріалів становить 28,0 % і 38,7 %.

3. Визначено складники й процедури спрощеного методу оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій, що передбачає застосування зменшеної кількості зразків стосовно стандартизованого методу відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-17:2007 (ENV 13381-4:2002, NEQ) і невикористання навантажених зразків для випробувань, а також обґрунтовано параметри зразків для випробувань.

Окреслено діапазон критичної температури сталі, що становить від 350 °С до 500 °С. Для такого діапазону потрібно проводити розрахунки мінімальної товщини системи вогнезахисту за спрощеним методом. Вибір діапазону обґрунтований прийнятною різницею між даними щодо мінімальної товщини системи вогнезахисту, які визначені з урахуванням і без урахування показників її здатності до зчеплення та (або) здатності залишатися непошкодженим під час вогневого впливу. У цьому діапазоні різниця не перевищує 5,5 %. Із підвищенням критичної температури сталі різниця різко збільшується й досягає 18,8 % для температури 750 °С.

4. Розроблено спрощений метод оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій із застосуванням вогнезахисних матеріалів різних типів. Проведено його валідацію з використанням реактивного вогнезахисного матеріалу, що спучується, «Ендотерм 400202» і пасивного вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 210104». За результатами валідації констатовано придатність методу для оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій із застосуванням коробчастих і профільованих систем вогнезахисту, де використовують реактивні й пасивні вогнезахисні матеріали. На підставі порівняння результатів, отриманих за спрощеним методом, із результатами, одержаними за стандартизованим методом, зафіксовано придатність розробленого спрощеного методу до практичного застосування. Зокрема, для коробчастої системи вогнезахисту з використанням пасивного вогнезахисного матеріалу різниця між значеннями мінімальної товщини облицювання, які отримані за спрощеним і стандартизованим методами, не перевищує 9,9 %, що прийнятне для оцінювання вогнестійкості конструкцій.

5. Удосконалено методикку оцінювання технічного стану та вогнестійкості сталевих конструкцій на етапі експлуатації будівель і споруд. Розроблено методи розрахунку конструкцій і

вогнестійкості, оцінювання технічного стану та можливості його регулювання для подальшої експлуатації конструкцій будівель і споруд. Методи розрахунку базовані на відомих принципах будівельної механіки, теплофізики, охорони праці тощо.

Запропоновано удосконалену методика оцінювання залишкового ресурсу сталевих конструкцій після різних впливів. Суть методики полягає у визначенні НДС, залишкової несучої здатності та вогнестійкості сталевих конструкцій будівель і споруд, що отримали пошкодження під час експлуатації після різних впливів, в оцінюванні можливості подальшої експлуатації через ремонт, посилення або заміну.

6. Отримані результати досліджень використано під час виконання практичних завдань. Розроблену методика оцінювання вогнестійкості захищених сталевих конструкцій із застосуванням ненавантажених зразків для випробування впроваджено в діяльність випробувального центру ТОВ «ТЕСТ», науково-дослідного центру технічного регулювання, науково-випробувального центру Українського науково-дослідного інституту цивільного захисту та в освітній процес Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Gordiuk M., Semynoh M., Holodnov O., Tkachuk I. Determination of the technical state of buildings and constructions after force and temperature influences. Technology audit and production reserves. 2019. № 4/1 (48). P. 4–10.
2. Отрош Ю., Іванов А., Голоднов О. Комплекс взаємозв'язаних заходів щодо визначення параметрів напружено-деформованого і технічного стану конструкцій при різних впливах. Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського. 2011. № 8. С. 98–109.
3. СОУ жкг 75.11–35077234.0015:2009. Правила визначення фізичного зносу житлових будинків. Київ: ЖКГ України, 2010. 49 с.
4. Перельмутер А., Гордєєв В., Горохов Є. Стан та залишковий ресурс фонду будівельних металевих конструкцій в Україні. Київ: Вид-во «Сталь», 2002. 166 с.
5. Голоднов А. Регулирование остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах и балках. Киев: Изд-во «Сталь», 2008. 150 с.
6. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. Київ: Мінрегіон України, 2017. 35 с.
7. ДБН В.1.2-7-2008. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Пожежна безпека. Основні вимоги до будівель і споруд. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 30 с.
8. ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016. Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. Київ: Мінрегіон України, 2017. 147 с.
9. ДСТУ-Н EN 1991-1-2:2010 (EN 1991-1-2:2002, IDT). Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1 – 2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі. Київ: Мінрегіонбуд України, 2013. 74 с.
10. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-1: 2010 (EN 1993-1-2:2005, IDT). Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1 – 1. Загальні положення. Загальні правила і правила для споруд. Київ: Мінрегіон України, 2013. 50 с.

-
11. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2: 2010 (EN 1993-1-2:2005, IDT). Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1 – 2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. Київ: Мінрегіон України, 2014. 98 с.
 12. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Київ: Мінрегіонбуд України, 2015. 199 с.
 13. ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 45 с.
 14. ДСТУ Б В.2.6-210:2016. Оцінка технічного стану сталевих будівельних конструкцій, що експлуатуються. Київ: Мінрегіон України, 2017. 53 с.
 15. Мосалков И., Плюсина Г., Фролов А. Огнестойкость строительных конструкций. М.: Спецтехника, 2001. 484 с.
 16. Кузнецов В. Металлические конструкции. В 3 т. Т. 1. Общая часть: Справочник проектировщика. М.: АСВ, 1998. 576 с.
 17. Кузнецов В. Металлические конструкции: В 3 т. Т. 3. Стальные сооружения, конструкции из алюминиевых сплавов. Реконструкция, обследование, усиление и испытание конструкций зданий и сооружений: Справочник проектировщика. М.: АСВ, 1999. 528 с.
 18. Пособие по определению пределов огнестойкости конструкций, пределов распространения огня по конструкциям и групп возгораемости материалов. М.: Стройиздат, 1985. 59 с.
 19. Шимановский В., Гарф Э., Пермяков В. Сварные строительные конструкции. Т. 2. Типы конструкций. Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1997. 680 с.
 20. Недосека А. Основы расчета и диагностики сварных конструкций. Киев: ИНДПРОМ, 2001. 815 с.
 21. Ребров И. Усиление стержневых металлических конструкций: Проектирование и расчет. Ленинград: Стройиздат, 1988. 288 с.
 22. Пособие по проектированию усиления стальных конструкций (к СНиП II-23-81*). М.: Стройиздат, 1989. 159 с.
 23. ДСТУ Б В.2.6-200:2014. Конструкції металеві будівельні. Вимоги до монтажу. Київ: Мінрегіон України, 2015. 46 с.
 24. ДСТУ Б В.2.6-193:2013. Захист металевих конструкцій від корозії. Вимоги проектування. Київ: Мінрегіон України, 2014. 46 с.

25. ДСТУ Б В.1.1-4-98*. Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. Київ: Держбуд України, 2005. 18 с.

26. ДСТУ Б В.1.1-17:2007 (ENV 13381-4:2002, NEQ). Вогнезахисні покриття для будівельних несучих металевих конструкцій. Метод визначення вогнезахисної здатності. Київ: Мінрегіонбуд України, 2008. 65 с.

27. ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010. Вогнезахисне оброблення будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 9 с.

28. Бертелеми Б., Крюпа Ж. Огнестойкость строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1989. 368 с.

29. Яковлев А. Расчет огнестойкости строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1988. 143 с.

30. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. Київ: Мінбуд України, 2007. 60 с.

31. ДСТУ-Н Б В.1.2-17:2016. Настанова щодо науково-технічного моніторингу будівель і споруд. Київ: Мінрегіон України, 2017. 45 с.

32. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Київ: Мінрегіон України, 2018. 30 с.

33. Smolka J., Slupik L., Fic A., Nowak A. J., Kosyrczyk L. CFD analysis of the thermal behaviour of heating walls in a coke oven battery. *International Journal of Thermal Sciences*. 2015. № 104. P. 186–193.

34. Caldas R., Fakury R., Sousa J., Batista M. Finite element implementation for the analysis of 3D steel and composite frames subjected to fire. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2014. № 11 (1). P. 1–18. <https://dx.doi.org/10.1590/S1679-78252014000100001>.

35. Vatulia G., Orel E., Kovalov M. Evaluation of steel-concrete beams fire resistance with the selection of effective fire protection. *Proceedings of the 6th International Conference on Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering, Zilina*, 2014. P. 327–331.

36. Фомин С., Избаш Ю., Плахотникова И. Экспериментальное исследование фрагментов

сталелезобетонных конструкций мостов при нагреве. Наукотехнічний, виробничий та інформаційно-аналітичний журнал «Наука та будівництво». Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій». 2018. Вип. 1 (15). С. 18–27.

37. Fomin S., Izbash Y., Plakhotnikova I., Butenko S., Shemet R. Improvement of the mathematical model of the diagram of deformation of the compressed composite steel and concrete structures. MATEC Web of Conferences. Transbud. 2017. № 116. С. 1–6. URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/20171160201>.

38. Fomin S., Izbash Y., Bondarenko Y., Butenko S., Plakhotnikova I. Complete «stress-strain» diagrams of rolled steel beams. MATEC Web of Conferences. Transbud. 2018. № 230. С. 1–6. URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201823002008>.

39. Varabash M., Genzerskyi I., Pikul A., Bashynska O. Methods of modeling of composite materials and composite structures on «LIRA-SAPR». Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. 2017. № 1(48). С. 129–137.

40. Новак С., Григорьян Н., Круковский П. Определение границ применимости и точности стандартизированных методов оценки огнезащитной способности покрытий несущих металлических конструкций. Науковий вісник УкрНДІПБ. 2017. № 1 (29). С. 50–59.

41. Новак С., Круковский П., Григорьян Н. Оценка огнезащитной способности вермикулито-цементной плиты «Эндотерм 210104» стандартизированными методами. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2017. № 1 (3). С. 11–19.

42. Новак С., Круковский П., Григорьян Н., Григорьян Б. Оценка огнезащитной способности вспучивающегося огнезащитного покрытия для несущих стальных конструкций стандартизированными методами. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2018. № 1 (5). С. 67–73.

43. Добростан О., Дріжд В., Шкарабура І., Маладика І. Вплив показників здатності вогнезахисних матеріалів до зчеплення на результати оцінювання їхньої вогнезахисної здатності. Надзвичайні ситуації: безпека та захист: матеріали ІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю (Черкаси, 24–25 жовт. 2019 р.). Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2019. С. 50–52.

44. Добростан О., Дріжд В., Шкарабура І., Маладика І. Вплив показників здатності до зчеплення вогнезахисних матеріалів різних типів на результати оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій. Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В.М.Шимановського. 2019. № 23. С.109–128.

45. Новак С. Обґрунтування параметрів зразків для експериментального визначення температури сталевих пластин з вогнезахисним покриттям в умовах вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2016. № 2 (2). С. 18–24.

46. Новак С., Добростан О., Долішній Ю., Ратушний О. Оцінювання збіжності результатів експериментального визначення тривалості вогневого впливу до досягнення критичної температури сталі. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2017. № 2 (4). С. 67–72.

47. Новак С. В., Дріжд В. Л., Добростан О. В. Порівняльний аналіз даних щодо досягнення критичної температури сталі, отриманих для стандартизованих зразків і зразків зменшених розмірів з вогнезахисними матеріалами «Ендотерм 400202» і «Ендотерм 210104». Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2018. № 2 (6). С. 18–27.

48. Novak S., Drizhd V., Dobrostan O., Maladyka L. Influence of testing samples' parameters on the results of evaluating the fireprotective capability of materials. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol.2/10 (98). P. 35–43. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.164743>.

49. Dobrostan O., Drizhd V., Shkarabura I., Maladyka I. Substantiation of the simplified method of evaluation of fire resistance of protected steel structures. Hungarian Journal «Scientific Heritage». 2020. № 43. P. 54–61.

50. Добростан О. В., Дріжд В. Л., Шкарабура І. М., Маладика І. Г. Валідації спрощеного методу оцінювання вогнестійкості із застосуванням вогнезахисних матеріалів торгової марки «Ендотерм». Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції / ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. Черкаси, 2020. С. 156–158.

51. Като Л. Вогнестійкість статично невизначених сталезалізобетонних конструкцій: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Харків, 2007. 25 с.

52. Кравців Л. Напружено-деформований стан сталезалізобетонних і залізобетонних елементів, що згинаються, при силових та температурних впливах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Харків, 2008. 19 с.

53. Кричевский А. Железобетонные тонкостенные сооружения, подвергающиеся воздействию повышенных и отрицательных температур: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук: 05.23.01. М., 1985. 47 с.

54. Милованов А. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре. М.: Стройиздат, 1998. 304 с.

55. Голоднов А., Гордюк Н., Ткачук И., Семиног Н. Определение остаточного ресурса изгибаемых элементов после различных воздействий. Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. 2015. № 151. С. 94–102.

56. Демчина Б. Вогнестійкість одно- і багатопарових просторових конструкцій житлових та громадських будівель: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01. Харків, 2004. 40 с.

57. Ватуля Г. Розрахунок і проектування комбінованих та сталобетонних конструкцій: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01. Харків, 2015. 40 с.

58. Поздеев С. Развитие научных основ визначення меж вогнестійкості несучих залізобетонних конструкцій: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 21.06.02. Харків, 2012. 40 с.

59. Некора О. Розрахунково-експериментальний метод визначення вогнестійкості стислих елементів залізобетонних будівельних конструкцій: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 21.06.02. Харків, 2007. 20 с.

60. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. 96 с.

61. ГОСТ 1497-84* (ИСО 6892-84, СТ СЭВ 417-77). Металлы. Методы испытания на растяжение. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1986. 36 с.

62. ГОСТ 7564-97. Прокат. Общие правила отбора проб, заготовок и образцов для механических и технологических испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1999. 15 с.

-
63. ГОСТ 9651–84*. Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах. М.: Изд-во стандартов, 1986. 6 с.
64. ГОСТ 11150–84*. Металлы. Методы испытаний на растяжение при пониженных температурах. М.: Изд-во стандартов, 1986. 8 с.
65. Должанский П. Контроль надежности металла объектов котлонадзора: справоч. пособ. М.: Недра, 1985. 263 с.
66. Борисов В., Бугай Н., Измайлов Ф. Контроль металла в энергетике. Киев: Техника, 1980. 134 с.
67. Пособие по контролю состояния строительных конструкций зданий и сооружений в агрессивных средах, проведению обследований и проектированию и восстановлению защиты конструкций от коррозии (к СНиП 2.03.11-85). М.: Стройиздат, 1989. 51 с.
68. ГОСТ 9012–59* (СТ СЭВ 468–88). Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю. М.: Изд-во стандартов, 1989. 31 с.
69. ГОСТ 9013–59. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу. М.: Изд-во стандартов, 1960. 6 с.
70. ГОСТ 2999–75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. М.: Изд-во стандартов, 1976. 25 с.
71. Бернштейн М., Займовский В. Механические свойства металлов. М.: Металлургия, 1979. 260 с.
72. ГОСТ 18835–73. Металлы. Метод измерения пластической твердости. М.: Изд-во стандартов, 1973. 8 с.
73. ГОСТ 23273–78*. Металлы и сплавы. Измерение твердости методом упругого отскока бойка (по Шору). М.: Изд-во стандартов, 1979. 4 с.
74. Варнелло В. Измерение твердости металлов. М.: Изд-во гос. ком. мер и измерит. приборов СССР, 1965. 195 с.
75. Іванов А. Визначення фактичних механічних характеристик сталей в експлуатованих конструкціях: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Київ, 2000. 20 с.
76. Голоднов А. Об остаточном ресурсе стальных колонн. Науковий вісник будівництва. Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2005. С. 76–78.
77. Gordiuk M., Semynoh M., Holodnov O., Tkachuk I., Ivanov B. Remaining resource of constructions of building and building is after different influences. Technology audit and production reserves. 2019. № 5/1 (49). P. 4–9.

78. Иванов Б. Определение остаточного ресурса стальных конструкций в условиях действующих предприятий с учетом наличия остаточного напряженного состояния. Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського. 2011. № 8. С. 110–120.

79. Сидоренко М. Научные проблемы оценки надежности натуральных строительных конструкций при дефиците исходной информации на примере объекта «Укрытие» ЧАЭС. Перша Всеукраїнська науково-практична конференція «Науково-практичні проблеми сучасного залізобетону»: зб. тез. Київ: НДІБК, 1996. С. 17–23.

80. Бамбура А. Экспериментальные исследования остаточной прочности узловых сопряжений ригелей с колоннами объекта «Укрытие». Перша Всеукраїнська науково-практична конференція «Науково-практичні проблеми сучасного залізобетону»: зб. тез. Київ: НДІБК, 1996. С. 40–42.

81. Голоднов А., Иванов А., Псюк В. Моделирование напряженно-деформированного состояния стальных конструкций по результатам выполненного обследования. Металеві конструкції. 2011. Т. 17. С. 3–67.

82. Голоднов О., Антошина Т., Отрош Ю. Про необхідність розрахунку будівель зі сталевим каркасом на температурні впливи. Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського. 2017. № 20. С. 65–84.

83. ТУ У 13481691.005-2001. Суміш для вогнезахисного покриття «Ендотерм 400201», «Ендотерм 400202», «Ендотерм 650202», «Ендотерм 250103». Технічні умови. Донецький центр стандартизації, метрології та сертифікації. Донецьк, 2001. 24 с.

84. ТУ У 24.3-13481691-007-2003. Суміш для покриття «Ендотерм 210104». Технічні умови. Донецький центр стандартизації, метрології та сертифікації. 2003. 25 с.

85. EN 13381-4:2013. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 4: Applied passive protection to steel members. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN. 83 p.

86. EN 13381-8:2013. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 8:

Applied reactive protection to steel members. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN. 80 p.

87. ДСТУ Б В.1.1-13:2007 (EN 1365-3:1999, NEQ). Балки. Метод випробування на вогнестійкість. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 10 с.

88. ДСТУ Б В.1.1-14:2007 (EN 1365-4:1999, NEQ). Колони. Метод випробування на вогнестійкість. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 20 с.

89. ДСТУ 8768:2018. Двотаври сталеві гарячекатані. Сортамент. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018. 9 с.

90. ETAG № 018-2:2013. Guide for the European technical approval of fire protective products – Part 2: Reactive coatings for fire protection of steel elements. URL: http://database.itc.cnr.it/itc_upload/aedilitia/.../AED_000246.pdf.

91. ETAG № 018-3:2013. Guide for the European technical approval of fire protective products – Part 3: Renderings and rendering kits intended for fire resisting applications. URL: <http://www.itb.pl/g/f/NDY1>.

92. ДСТУ ISO/IEC 17025:2017 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (ISO/IEC 17025:2017, IDT).

93. Маладика І. Г., Шкарабура І. М. Визначення технічного стану будівель зі сталевим каркасом після силових і високотемпературних впливів. Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій ім. В. М. Шимановського. 2016. № 17. С. 27–33.

94. Пособие по обследованию строительных конструкций зданий. М.: АО «ЦНИИПРОМЗДАНИЙ», 1995. 129 с.

95. Рекомендации по обследованию зданий и сооружений, поврежденных пожаром. М.: Стройиздат, 1987. 80 с.

96. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Прогини і переміщення. Вимоги проектування. Київ: Мінбуд України, 2007. 10 с.

97. Шкарабура І. М., Маладика І. Г. Поведінка сталевих конструкцій при дії високих температур. Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences: International research and practice conference (December 27–28, 2017 p.). Conference proceedings. Radom: Izevnieciba «Baltija Publishing», 2017. P. 133–137.

98. Шкарабура І. М., Маладика І. Г. Захист сталевих конструкцій при нагріванні до різних температур. Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку: матеріали 20 Всеукраїнської науково-практичної конференції (9–10 жовтня 2018 р., м. Київ). Київ: Видавничий дім «Гельветика», 2018. С. 505–507.

99. Маладика І. Г., Шкарабура І. М. Практичні методи визначення вогнестійкості сталевих конструкцій. Збірник наукових праць Донбаського державного технічного університету. Лисичанськ, 2018. Вип. 1 (47). С. 74–80.

100. Шкарабура І. М. Визначення вогнестійкості сталевих колон. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій. Матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції / ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. Черкаси, 2018. С. 221–222.

101. Маладика І. Г., Шкарабура І. М. Особливості поведінки металевих конструкцій при пожежі. Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель та споруд: матеріали VIII Міжнародної наукової конференції / Харківський національний університет будівництва та архітектури. Харків, 2017. С. 66–77.

102. Маладика І. Г., Шкарабура І. М., Антошина Т. В., Іванов Б. В. Забезпечення вогнестійкості експлуатованих сталевих конструкцій. Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини: зб. наук. праць. Одеса, 2020. Вип. № 24. С. 81–90.

103. Маладика І. Г., Шкарабура І. М. Забезпечення вогнестійкості будівель зі сталевим каркасом. Збірник наукових праць. Пожежна безпека. Львів, 2017. № 31. С. 97–102.

104. Маладика І. Г., Шкарабура І. М. Діагностика технічного стану і залишковий ресурс сталевих конструкцій після пожежі. Збірник наукових праць Харківського національного університету будівництва та архітектури. Харків, 2017. Т. 89. № 3. С. 226–229.

105. Маладика І. Г., Шкарабура І. М. Захист будівель зі сталевим каркасом від впливу високих температур. Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського. Київ: Вид-во «Сталь», 2017. Вип. 19. С. 54–65.

106. Маладика І. Г., Шкарабура І. М. Несуча здатність конструкцій будівель та споруд зі сталевим каркасом при високотемпературних впливах. Збірник наукових праць Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. Дніпро: Вид-во ПМП «Економіка», 2018. Вип. 105. С. 301–307.

107. Шкарабура І. М., Маладика І. Г. Ліквідація наслідків різних впливів на сталеві конструкції. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції / ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. Черкаси, 2019. С. 115–117.

108. Шкарабура І. М., Маладика І. Г. Особливості розрахунку сталевих конструкцій на вогнестійкість. Надзвичайні ситуації: безпека та захист: матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю / ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. Черкаси, 2017. С. 66–67.

109. Zemlianskiy O., Maladyka I., Miroshnik O., Shkarabura I., Kaplenko G. Forecasting the emergency explosive environment with the use of fuzzy data. Eastern-evropean journal of enterprise technologies. Kharkiv, 2017. № 6/4 (90). P. 19–27.

110. Pēteris Druķis, Līga Gaile, Leonīds Pakrastiņš. Inspection of Public Buildings Based on Risk Assessment. Procedia Engineering. 2017. № 172. P. 247–255. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.106>.

111. Denvid Lau, Qiwen Qiu, Ao Zhou, Cheuk Lun Chow. Long term performance and fire safety aspect of FRP composites used in building structures. Construction and Building Materials. 2016. № 126. P. 573–585. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.031>.

112. Білошицький М. В. Розбіжність у визначенні пожежної небезпеки виробничих процесів та приміщень за показниками нижньої концентраційної межі займання і розрахунковим значенням надлишкового тиску вибуху. Науковий вісник УкрНДІПБ. 2009. № 2 (20). С. 91–98.

113. A review of very large vapour cloud explosions: Cloud formation and explosion severity. GrahamAtkinson, EdmundCowpe, JulieHalliday, DavidPainter. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2017. Vol. 48. P. 367–375.

114. Звіт про основні результати діяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій у 2019 році URL: https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/17civik2018/zvit_2019/zvit-2019-dsns.pdf.

Наукове видання

Шкарабура І. М., Маладика І. Г., Мигаленко К. І., Лесечко Д. В.

**«ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ
СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ
НА ЕТАПІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД»**

МОНОГРАФІЯ

Підписано до друку 28.09.2022
Обл.-вид. арк. 4,98. Ум. друк. арк. 7,88.
Замовлення № 28.
ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України
вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034
