

*О.В. Добростан¹, канд. техн. наук, В.Л. Дрижд², канд. техн. наук, І.М. Шкарабура³,
І.Г. Маладика³, канд. тех. наук, доцент*

¹*Український науково-дослідний інститут цивільного захисту, Україна*

²*Наукове-виробниче підприємство «Спецматеріали», Україна*

³*Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля, НУЦЗ, Україна*

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

Наведено дані щодо різниці між результатами оцінювання вогнестійкості захищених несучих сталевих конструкцій (колон, балок) і вогнезахисної здатності двох типів вогнезахисних матеріалів – реактивного вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 400202», що спучується під тепловим впливом в умовах пожежі, та пасивного вогнезахисного матеріалу (плити) «Ендотерм 210104», отриманими за методом, у якого застосовано ознаку втрати вогнестійкості сталевій конструкції за досягненням критичної температури сталі, із врахуванням показників здатності вогнезахисного матеріалу до зчеплення та (або) його здатності залишатися неушкодженим під час вогневого впливу і без їхнього урахування. Встановлено, що різниця між значеннями тривалості досягнення критичної температури сталі, які не враховують і враховують показники здатності вогнезахисних матеріалів до зчеплення, для сталевих конструкцій з пасивним вогнезахисним матеріалом досягає 22,9 % і значно більша ніж для реактивного вогнезахисного матеріалу, для якого максимальна різниця становить 9,4 %. Різниця між значеннями мінімальної товщини вогнезахисного матеріалу, визначеними із врахуванням показників здатності реактивного та пасивного вогнезахисних матеріалів до зчеплення і без їхнього врахування, збільшується з підвищенням зведеної товщини сталевого профілю. Максимальне значення цієї різниці для реактивного і пасивного вогнезахисних матеріалів відповідно становить 28,0 % і 38,7 %.

Ключові слова: вогнезахисна здатність, вогнезахисний матеріал, критична температура, межа вогнестійкості, сталева конструкція

*O.V. Dobrostan¹, Cand. of Sc. (Eng.), V.L. Drizhd², Cand. of Sc. (Eng.),
I. M. Shkarabura³, I. G. Maladyka³, Cand. of Sc. (Eng.), assoc. Prof.*

¹*The Ukrainian Civil Protection Research Institute, Ukraine*

²*Scientific and production enterprise "Special materials", Ukraine*

³*Cherkasy Chernobyl Hero Fire Institute, NUCP, Ukraine*

THE INFLUENCE OF INDICATORS OF THE ABILITY TO CONNECT FIRE PROTECTION MATERIALS OF DIFFERENT TYPES ON THE RESULTS OF ASSESSMENT OF FIRE RESISTANCE OF STEEL CONSTRUCTIONS

The data on the difference between the results of evaluating the fire resistance of protected load-bearing steel structures (columns, beams) and the flame retardant capacity of two types of flame retardant materials – «Endotherm 400202» reactive flame retardant material, which inflate under heat conditions in a fire condition and paste «Endotherm 210104». These data were obtained by a method that uses a sign of loss of fire resistance of a steel structure when the critical temperature of the steel is reached, taking into account the indices of the flame retardant material's ability to adhere and (or) its ability to remain intact during and without fire action. It is established that the difference between the values of the duration of reaching the critical temperature of steel, which do not take into account the indexes of the ability of fire-retardant materials to grip, for steel structures with passive flame retardant material reaches 22.9 % and is much greater than for reactive flame retardant material, 9.4 %. The magnitude of this difference, both for the reactive and passive flame retardant material, depends essentially on the values of the consolidated thickness of the steel profile, the critical temperature of the steel, and the normalized limit of fire resistance of the steel structure. It is determined that the difference between the values of the minimum

thickness of the flame retardant material, determined taking into account the indicators of the ability of the reactive and passive flame retardant materials to grip and without taking them into account, increases with increasing the combined thickness of the steel profile. This difference also depends on the critical temperature of the steel and the normalized limit of fire resistance of the steel structure. Its maximum value for reactive and passive flame retardant materials is 28.0% and 38.7% respectively. An analysis of dependencies obtained is given.

Keywords: flame retardant, flame retardant material, critical temperature, limit of fire resistance, steel structure

1. Вступ

Для оцінювання вогнестійкості захищених сталевих конструкцій застосовують метод, який наведено в ДСТУ Б В.1.1-17 [1] і у якому застосовано ознаку втрати вогнестійкості сталеві конструкції за досягненням критичної температури сталі. Цей метод дозволяє визначати для широких діапазонів зведеної товщини сталевого профілю і критичної температури сталі значення мінімальної товщини вогнезахисного матеріалу, за яких забезпечуються нормовані величини межі вогнестійкості несучих сталевих конструкцій (колон та балок). При випробуваннях за цим методом проводять механічне навантажування зразків двох балок і враховують показники здатності вогнезахисного матеріалу до зчеплення та (або) його здатності залишатися неушкодженим під час вогневого впливу (далі – показники здатності до зчеплення). У цьому методі враховано можливість відшарування вогнезахисного матеріалу та (або) його ушкодження у наслідок деформації (наприклад, прогину) навантаженої сталеві конструкції під час вогневого впливу, що призводить до підвищення інтенсивності нагрівання конструкції і зменшення проміжку часу досягнення критичної температури сталі.

Однак реалізація метода, який наведено в ДСТУ Б В.1.1-17 [1], вимагає значних матеріальних витрат, пов'язаних з необхідністю застосування спеціальних вогневих печей з обладнанням для навантажування зразків сталевих конструкцій, зі створенням значної кількості стандартизованих зразків (сталевих колон і балок, облицьованих вогнезахисним матеріалом), на які має бути встановлено більше ніж 200 термопар. Для оцінювання вогнестійкості захищених сталевих конструкцій застосування такого метода не завжди є прийнятним. Є доцільним застосовувати метод, який вимагає значно менших матеріальних витрат ніж метод, встановлений в ДСТУ Б В.1.1-17 [1], і забезпечує прийнятну достовірність результатів оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій. Цей метод оцінювання (далі – спрощений метод) має ґрунтуватися на проведенні випробувань тільки ненавантажених зразків і їхня кількість повинна бути меншою, ніж у методі, встановленому в ДСТУ Б В.1.1-17 [1]. Для обґрунтування положень цього спрощеного методу (зокрема, параметрів зразків, діапазонів зведеної товщини сталевого профілю і критичної температури сталі) необхідно мати дані щодо впливу показників здатності до зчеплення вогнезахисних матеріалів різних типів на результати оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій. Ці дані дозволять визначити значення зведеної товщини сталевого профілю і критичної температури сталі, за яких різниця між значеннями мінімальної товщини вогнезахисного матеріалу, які отримані із врахуванням і без врахування показників здатності вогнезахисних матеріалів до зчеплення, не перевищує прийнятної допустимої величини.

2. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є визначення даних щодо впливу показників здатності до зчеплення вогнезахисних матеріалів різних типів на результати оцінювання вогнестійкості захищених сталевих конструкцій.

Для досягнення цієї мети були поставлені такі завдання:

– провести оцінювання тривалості досягнення критичної температури сталі зразків сталевих конструкцій в умовах вогневого впливу, із врахуванням показників здатності до зчеплення і без їхнього врахування, для вогнезахисних матеріалів різних типів;

– провести оцінювання збіжності між значеннями мінімальної товщини вогнезахисних матеріалів різних типів, за яких забезпечуються нормовані величини межі вогнестійкості сталевих конструкцій, отриманими із врахуванням показників здатності до зчеплення і без їхнього врахування.

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

Для оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій застосовано дані випробувань двох типів вогнезахисних матеріалів, які отримано за методом ДСТУ Б В.1.1-17 [1] і наведено в [2]. Під час цих випробувань використано такі зразки сталевих конструкцій: десять ненавантажених сталевих колон висотою 1,0 м і одну ненавантажenu сталеву колону висотою 2,0 м, дві навантажені сталеві балки довжиною 4,0 м і дві ненавантажені сталеві балки довжиною 1,0 м різних профілів двотаврового перерізу, на які було нанесено вогнезахисні матеріали.

Для створення зразків сталевих конструкцій для випробувань застосовано реактивний вогнезахисний матеріал «Ендотерм 400202» [3], що спучується під тепловим впливом в умовах пожежі, та пасивний вогнезахисний матеріал (плита) «Ендотерм 210104» [4] виробництва НВП «Спецматеріали». Реактивний вогнезахисний матеріал наносили на поверхню сталевих профілів, а із застосуванням пасивного вогнезахисного матеріалу створювали коробчасту систему вогнезахисту прямокутного перерізу, як показано на рисунку 1. Параметри зразків сталевих колон і результати визначення значень тривалості t_{cr} вогневого впливу за стандартним температурним режимом до досягнення критичної температури сталі θ_{cr} (далі – тривалості досягнення критичної температури сталі) на цих зразках наведено в таблицях 1 – 4. Дані щодо тривалості t_{cr} досягнення критичної температури сталі, наведені в таблицях 3, 4, не враховують можливе відшарування вогнезахисних матеріалів та (або) їх ушкодження унаслідок деформації навантажених сталевих колон під час пожежі.

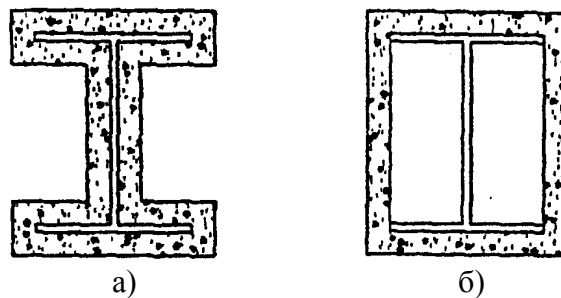


Рисунок 1 – Профільована (а) і коробчаста (б) системи вогнезахисту

Таблиця 1 – Параметри зразків сталевих колон з 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 – Параметри зразків сталевих колон з 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 3 – Значення тривалості t_{cr} досягнення критичної температури для зразків сталевих колон з реактивним вогнезахисним матеріалом

Критична температура сталі $\theta_{cr}, ^\circ C$	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 4 – Значення тривалості t_{cr} досягнення критичної температури для зразків сталевих колон з пасивним вогнезахисним матеріалом

Критична температура сталі $\theta_{cr}, ^\circ C$	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	–	–	–	–
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	–	–	–

За експериментальними даними, наведеними в таблицях 1 – 4, визначали дані щодо тривалості $t_{cr,mod}$ досягнення критичної температури сталі, які враховують показники здатності вогнезахисних матеріалів до зчеплення, і різницю $\delta_{t,mod}$ між цими даними і значеннями тривалості t_{cr} . Проводили апроксимацію даних щодо тривалості t_{cr} та $t_{cr,mod}$, із застосуванням рівняння числової лінійної регресії, яке встановлює залежність тривалості досягнення критичної температури сталі від значення цієї температури, товщини вогнезахисного матеріалу та зведеної товщини сталевго профілю. За отриманими коефіцієнтами регресії визначали значення мінімальної товщини вогнезахисного матеріалу, які враховують і не враховують показники здатності вогнезахисних матеріалів до зчеплення, та їхню різницю.

4. Результати оцінювання тривалості досягнення критичної температури сталі зразків сталевих конструкцій, із врахуванням показників здатності вогнезахисних матеріалів до зчеплення і без їхнього врахування

У таблицях 5, 6 наведено дані щодо тривалості $t_{cr,mod}$ досягнення критичної температури сталі, які враховують показники здатності реактивного і пасивного вогнезахисних матеріалів до зчеплення. Ці дані визначено за результатами порівняння значень температури сталеві поверхні на двох навантажених балках довжиною 4,0 м і двох ненавантажених балках довжиною 1,0 м, а для реактивного вогнезахисного матеріалу – також за результатами порівняння значень температури сталеві поверхні на колоні висотою 2,0 м і колоні висотою 1,0 м, за процедурою, вставленою в 12.2, 12.3 ДСТУ Б В.1.1-17 [1].

Таблиця 5 – Значення тривалості $t_{cr,mod}$ досягнення критичної температури для зразків сталевих колон, які враховують показники здатності реактивного вогнезахисного матеріалу до зчеплення

Критична температура сталі θ_{cr} , °C	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

Таблиця 6 – Значення тривалості $t_{cr,mod}$ досягнення критичної температури для зразків сталевих колон, які враховують показники здатності пасивного вогнезахисного матеріалу до зчеплення

Критична температура сталі $\theta_{cr}, ^\circ\text{C}$	350	400	450	500	550	600	650	700	750
№ зразка	Значення тривалості $t_{cr,mod}, \text{хв}$								
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 формулою (1) визначено дані щодо різниці $\delta_{t,mod}$ між значеннями тривалості досягнення критичної температури, які не враховують і враховують показники здатності реактивного і пасивного вогнезахисних матеріалів до зчеплення. На рисунку 2 наведено залежності цієї різниці від критичної температури сталі для зразків сталевих колон з реактивним та пасивним вогнезахисними матеріалами. Для кожної величини критичної температури сталі розраховано середні значення різниці $\delta_{t,mod,avg}$, які наведено в таблиці 7 та на рисунку 3.

$$\delta_{t,mod} = 100 (t_{cr} - t_{cr,mod}) / t_{cr} . \quad (1)$$

Таблиця 7 – Результати розрахунку середніх значень різниці $\delta_{t,mod,avg}$

Критична температура сталі $\theta_{cr}, ^\circ\text{C}$	350	400	450	500	550	600	650	700	750
Тип вогнезахисного матеріалу	Середні значення різниці $\delta_{t,mod,avg}, \%$								
реактивний	0,0	1,3	3,1	3,9	3,4	3,5	2,3	–	–
пасивний	0,5	0,7	1,2	2,7	4,2	8,2	10,8	15,0	19,2

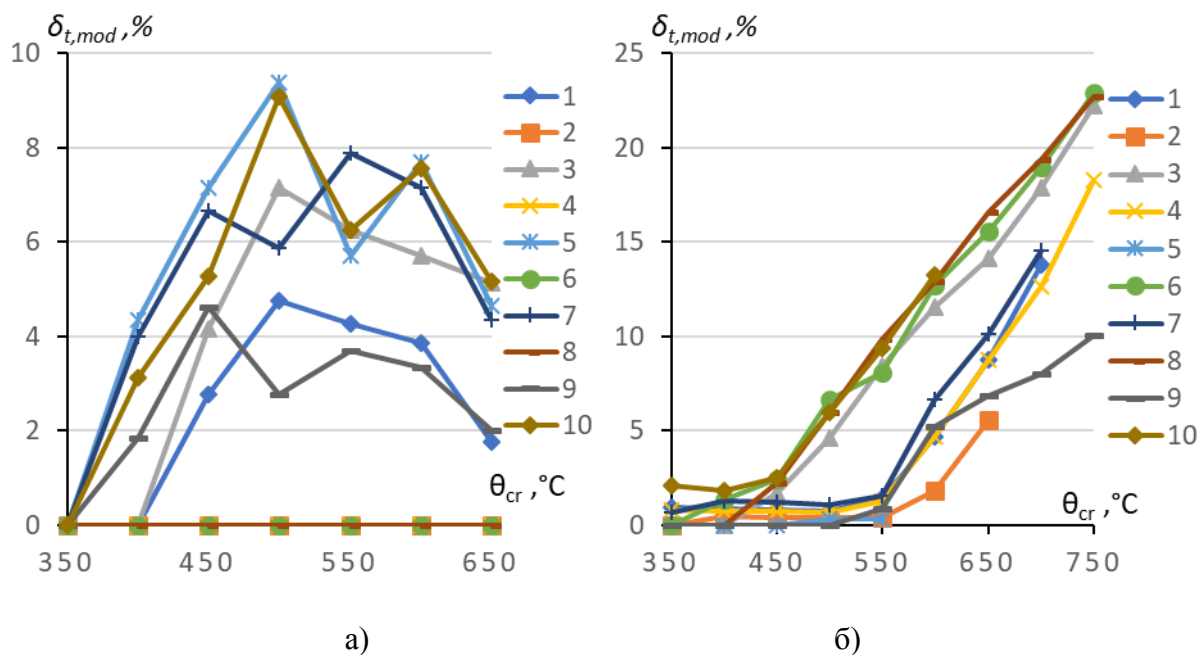


Рисунок 2 – Залежність різниці $\delta_{t,mod}$ від критичної температури сталі θ_{cr} для зразків сталевих колон з реактивним (а) та пасивним (б) вогнезахисними матеріалами

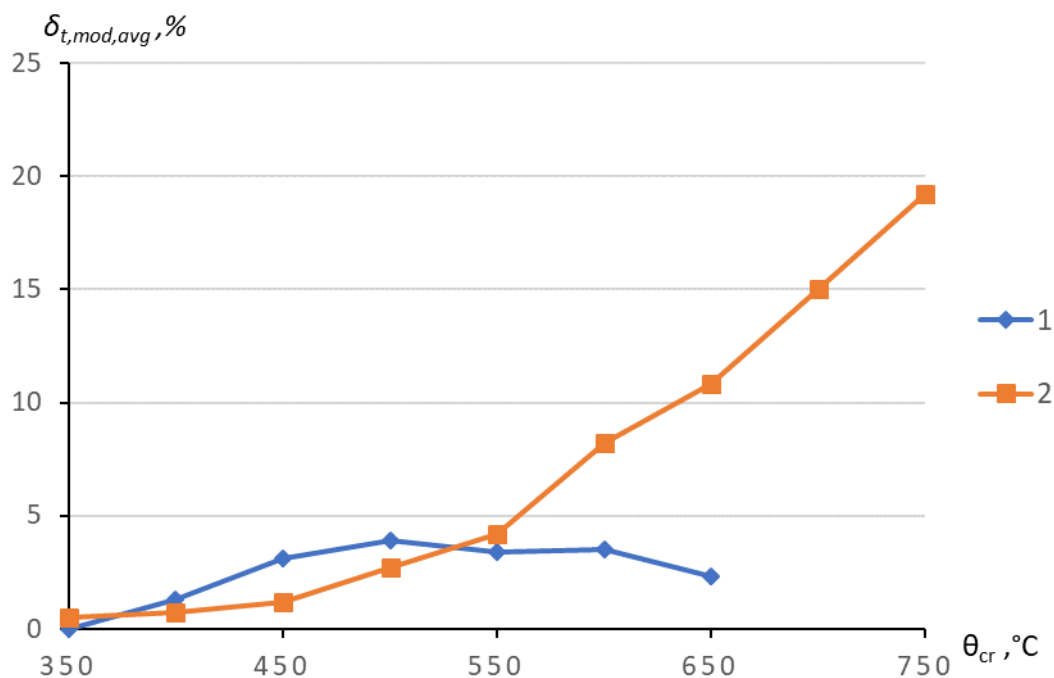


Рисунок 3 – Залежність середніх значень різниці $\delta_{t,mod,avg}$ від критичної температури сталі θ_{cr} для зразків сталевих колон з реактивним (1) та пасивним (2) вогнезахисними матеріалами

Із аналізу отриманих розрахункових даних випливає, що для зразків сталевих колон з пасивним вогнезахисним матеріалом різниця $\delta_{t,mod}$ досягає 22,9 % і значно більша ніж для зразків сталевих колон з реактивним вогнезахисним матеріалом, для яких максимальна різниця становить 9,4 %. Для зразків сталевих колон з реактивним вогнезахисним матеріалом різниця $\delta_{t,mod}$ збільшується при підвищенні критичної температури сталі до 500 °С, а при подальшому підвищенні цієї температури – зменшується. Для зразків сталевих

колон з пасивним вогнезахисним матеріалом при підвищенні критичної температури сталі до (450 – 550) °С значення різниці $\delta_{t,mod}$ незначні (до 2 %), а при подальшому підвищенні цієї температури різниця $\delta_{t,mod}$ значно збільшується і її найбільші величини мають місце при температурі 750 °С. Для зразків сталевих колон з реактивним вогнезахисним матеріалом середнє значення різниці $\delta_{t,mod,avg}$ при підвищенні критичної температури сталі до 500 °С збільшується до 3,9 %, а потім зменшується до 2,3 %. Для зразків сталевих колон з пасивним вогнезахисним матеріалом середнє значення різниці $\delta_{t,mod,avg}$ значно підвищується при критичній температурі сталі більше ніж 500 °С і досягає 19,2 %.

Такий хід залежностей різниці $\delta_{t,mod}$ та $\delta_{t,mod,avg}$ від критичної температури сталі пов'язано з тим, що для коробчастої системи вогнезахисту з пасивним вогнезахисним матеріалом після досягнення температури сталевих профілів значень (450 – 550) °С внаслідок деформації навантажених зразків (балок) відбувається значне ушкодження цього вогнезахисного матеріалу, що призводить до інтенсивного підвищення температури профілів. Для профільованої системи вогнезахисту з реактивним вогнезахисним матеріалом внаслідок деформації навантажених зразків під час вогневого впливу не відбувається значного ушкодження цього вогнезахисного матеріалу [5].

5. Результати оцінювання збіжності між значеннями мінімальної товщини вогнезахисних матеріалів різних типів, за яких забезпечуються нормовані величини межі вогнестійкості сталевих конструкцій, отриманими із врахуванням показників здатності до зчеплення і без їхнього врахування

Унаслідок наявності різниці $\delta_{t,mod}$ між значеннями тривалості досягнення критичної температури сталі, які не враховують і враховують показники здатності реактивного і пасивного вогнезахисних матеріалів до зчеплення, має місце різниця $\delta_{d,mod}$ і у розрахункових значеннях мінімальної товщини вогнезахисних матеріалів, за яких для певних величин критичної температури сталі та зведеної товщини сталевого профілю забезпечується нормована межа вогнестійкості несучих сталевих конструкцій. Для визначення даних щодо цієї різниці проведено оброблення даних, наведених в таблицях 3 – 6, за такою процедурою:

– апроксимація даних щодо тривалості t_{cr} , наведених в таблицях 3, 4, із застосуванням рівняння числової лінійної регресії (2) і встановленої в Ж.3 ДСТУ Б В.1.1-17 [1] процедури, яке встановлює залежність тривалості досягнення критичної температури сталі від значення цієї температури, товщини вогнезахисного матеріалу та зведеної товщини сталевого профілю, за результатами якої визначають значення восьми констант $a_0 – a_7$ цього рівняння. Апроксимація даних щодо тривалості $t_{cr,mod}$, наведених в таблицях 5, 6, із застосуванням рівняння числової лінійної регресії (2) (замість t_{cr} приймають $t_{cr,mod}$) і встановленої в Ж.3 ДСТУ Б В.1.1-17 [1] процедури;

– визначення значень мінімальної товщини d_p вогнезахисного матеріалу, які не враховують показники здатності реактивного і пасивного вогнезахисних матеріалів до зчеплення, за формулою (3) [1], для різних величин нормованої межі вогнестійкості ($t_{fi,requ}$), критичної температури сталі та зведеної товщини сталевого профілю, із врахуванням обмежень, наведених в 13.2 ДСТУ Б В.1.1-17 [1]. Визначення значень мінімальної товщини $d_{p,mod}$ вогнезахисного матеріалу, які враховують показники здатності реактивного і пасивного вогнезахисних матеріалів до зчеплення, за формулою (3) (замість d_p приймають $d_{p,mod}$ і застосовують значення коефіцієнтів $a_0 – a_7$, отримані за даними $t_{cr,mod}$), для різних величин нормованої межі вогнестійкості ($t_{fi,requ}$), критичної температури сталі та зведеної товщини сталевого профілю, із врахуванням обмежень, наведених в 13.2 ДСТУ Б В.1.1-17 [1]. Ці розрахунки проведено для значень нормованої межі вогнестійкості від 30 хв до 90 хв – для реактивного вогнезахисного матеріалу, та від 45 хв до 240 хв – для пасивного вогнезахисного матеріалу; критичної температури сталі від 350 °С до 650 °С – для реактивного вогнезахисного матеріалу, та від 350 °С до 750 °С – для пасивного вогнезахисного матеріалу;

зведеної товщини сталевго профілю від 2,9 мм до 14,3 мм – для реактивного вогнезахисного матеріалу, та від 4,0 мм до 20,0 мм – для пасивного вогнезахисного матеріалу.

– визначення різниці $\delta_{d,mod}$ між значеннями товщини $d_{p,mod}$ та d_p , які враховують і не враховують показники здатності реактивного і пасивного вогнезахисних матеріалів до зчеплення, за формулою (4).

$$t_{cr} = a_0 + a_1 d_p + a_2 d_p \frac{V}{A_m} + a_3 \theta_{cr} + a_4 d_p \theta_{cr} + a_5 d_p \frac{V}{A_m} \theta_{cr} + a_6 \frac{V}{A_m} \theta_{cr} + a_7 \frac{V}{A_m}, \quad (2)$$

де t_{cr} – тривалість досягнення критичної температури сталі, хв;

θ_{cr} – критична температура сталі, °C;

d_p – значення товщини вогнезахисного матеріалу на зразку, наведене в таблиці 1 або таблиці 2, мм;

V/A_m – зведена товщина сталевго профілю (таблиці 1, 2), мм;

$a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$ – константи (коефіцієнти регресії).

$$d_p = \frac{t_{cr} - a_0 - a_3 \theta_{cr} - a_6 \theta_{cr} \frac{V}{A_m} - a_7 \frac{V}{A_m}}{a_1 + a_4 \theta_{cr} + a_2 \frac{V}{A_m} + a_5 \theta_{cr} \frac{V}{A_m}}, \quad (3)$$

де $t_{cr} = t_{fi,requ}$ – нормована межа вогнестійкості, хв;

V/A_m – зведена товщина сталевго профілю для розрахунків, мм;

d_p – розрахункове значення мінімальної товщини вогнезахисного матеріалу, яке не враховує показники здатності вогнезахисного матеріалу до зчеплення, мм;

$$\delta_{d,mod} = 100 (d_{p,mod} - d_p) / d_p, \quad (4)$$

$\delta_{d,mod}$ – розрахункове значення мінімальної товщини вогнезахисного матеріалу, яке враховує показники здатності вогнезахисного матеріалу до зчеплення, мм.

Із аналізу отриманих розрахункових даних випливає, що залежності $\delta_{d,mod}$ від зведеної товщини сталевго профілю для реактивного вогнезахисного матеріалу мають в основному монотонний характер. Різниця $\delta_{d,mod}$ для більшості залежностей значно збільшується з підвищенням зведеної товщини сталевго профілю і її значення суттєво залежать від величини критичної температури сталі та нормованої межі вогнестійкості (див., наприклад, рис. 4). Максимальне значення різниці $\delta_{d,mod}$ становить 28,0 %. Для залежностей, отриманих для критичної температури сталі 350 °C і нормованої межі вогнестійкості 45 хв (рис. 4а) та 60 хв, з підвищенням зведеної товщини сталевго профілю різниця $\delta_{d,mod}$ зменшується і досягає –5,1 %. Наявність від'ємних значень різниці $\delta_{d,mod}$ можна пояснити похибками апроксимації даних щодо тривалості t_{cr} ($t_{cr,mod}$), проведеної із застосуванням рівняння числової лінійної регресії (2).

Отримані залежності $\delta_{d,mod}$ від зведеної товщини сталевго профілю для пасивного вогнезахисного матеріалу мають такий же характер, як і для реактивного вогнезахисного матеріалу (див., наприклад, рис. 5). Максимальне значення різниці $\delta_{d,mod}$ становить 38,7 %. Для залежностей, отриманих для критичної температури сталі 350 °C і 400 °C та нормованої межі вогнестійкості від 45 хв до 240 хв, з підвищенням зведеної товщини сталевго профілю різниця $\delta_{d,mod}$ зменшується і досягає –5,2 %. Причина наявності від'ємних значень різниці $\delta_{d,mod}$ така ж, як і для реактивного вогнезахисного матеріалу.

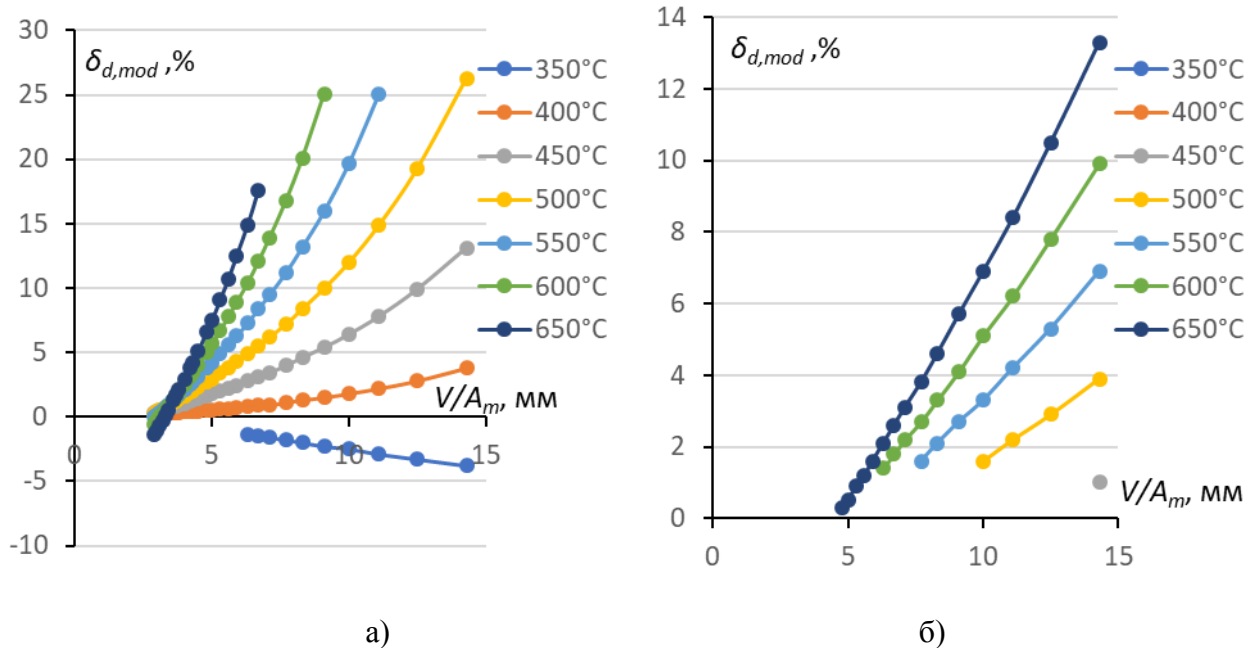


Рисунок 4 – Залежності різниці $\delta_{d,mod}$ від зведеної товщини сталевого профілю для нормованої межі вогнестійкості 45 хв (а) та 90 хв (б) для різних значень критичної температури сталі θ_{cr} (°C), визначені для реактивного вогнезахисного матеріалу

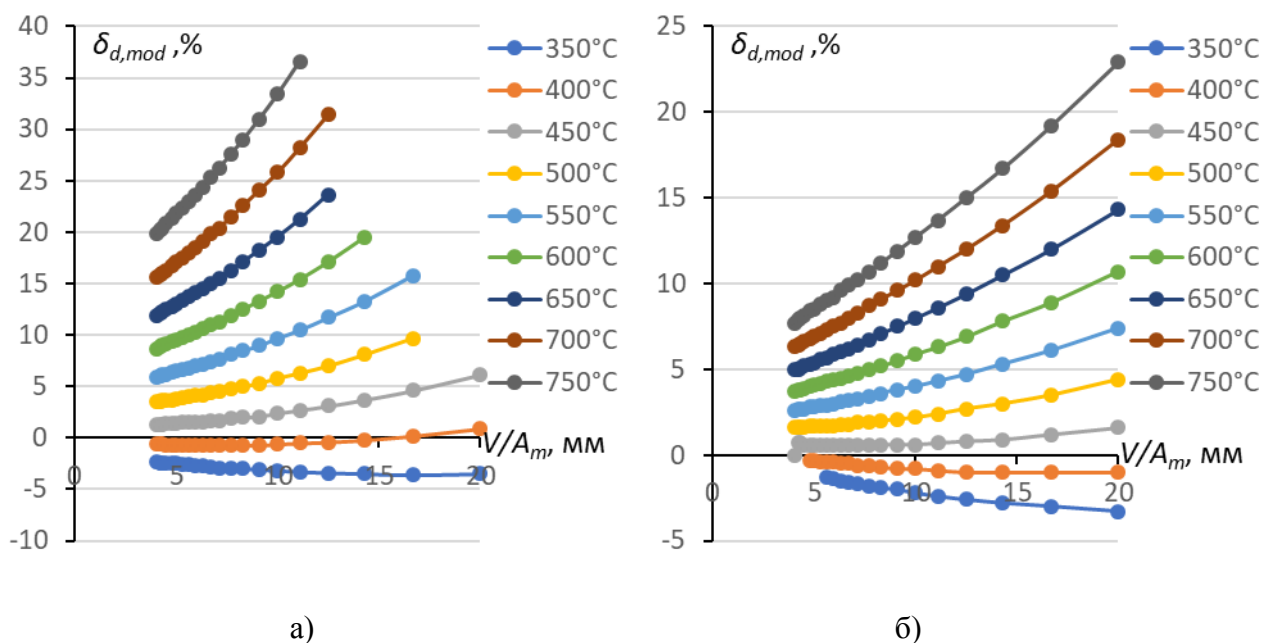


Рисунок 5 – Залежності різниці $\delta_{d,mod}$ від зведеної товщини сталевого профілю для нормованої межі вогнестійкості 120 хв (а) та 240 хв (б) для різних значень критичної температури сталі θ_{cr} (°C), визначені для пасивного вогнезахисного матеріалу

У таблицях 8, 9 для реактивного і пасивного вогнезахисних матеріалів наведено 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:

$$\delta_{d,mod,avg} = \sum_{j=1}^m (\delta_{d,modj}) \cdot m^{-1}, \quad (5)$$

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

Таблиця 8 – Показники різниці $\delta_{d,mod}$, отримані для реактивного вогнезахисного матеріалу і 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 9 – Показники різниці $\delta_{d,mod}$, отримані для пасивного вогнезахисного матеріалу і 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

Із аналізу наведених табличних даних випливає, що для реактивного вогнезахисного матеріалу і 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 % (при критичній температурі сталі 350 °C) до 0,2 % (при 450 °C), максимальне значення $\delta_{d,mod,max}$ – від 3,2 % (при 350 °C) до 28,0 % (при 650 °C), середнє значення $\delta_{d,mod,avg}$ – від 1,0 % (при 350 °C) до 5,5 % (при 500 °C). З підвищенням критичної температури сталі величина $\delta_{d,mod,max}$ значно збільшується, а значення $\delta_{d,mod,min}$ та $\delta_{d,mod,avg}$ змінюються не суттєво (див. таблицю 8, рис. 6а). Для пасивного вогнезахисного матеріалу і діапазону нормованої межі вогнестійкості від 45 хв до 240 хв (див. таблицю 9, рис. 6б) залежно від величини критичної температури сталі мінімальне значення $\delta_{d,mod,min}$ становить від -5,2 % (при критичній температурі сталі 350 °C) до -7,7 % (при 750 °C), максимальне значення $\delta_{d,mod,max}$ – від -1,2 % (при 350 °C) до 38,7 % (при 750 °C), середнє значення $\delta_{d,mod,avg}$ – від -3,0 % (при 350 °C) до 18,8 % (при 750 °C). З підвищенням критичної температури сталі величини $\delta_{d,mod,min}$, $\delta_{d,mod,max}$ та $\delta_{d,mod,avg}$ значно збільшуються (див. рис. 6б).

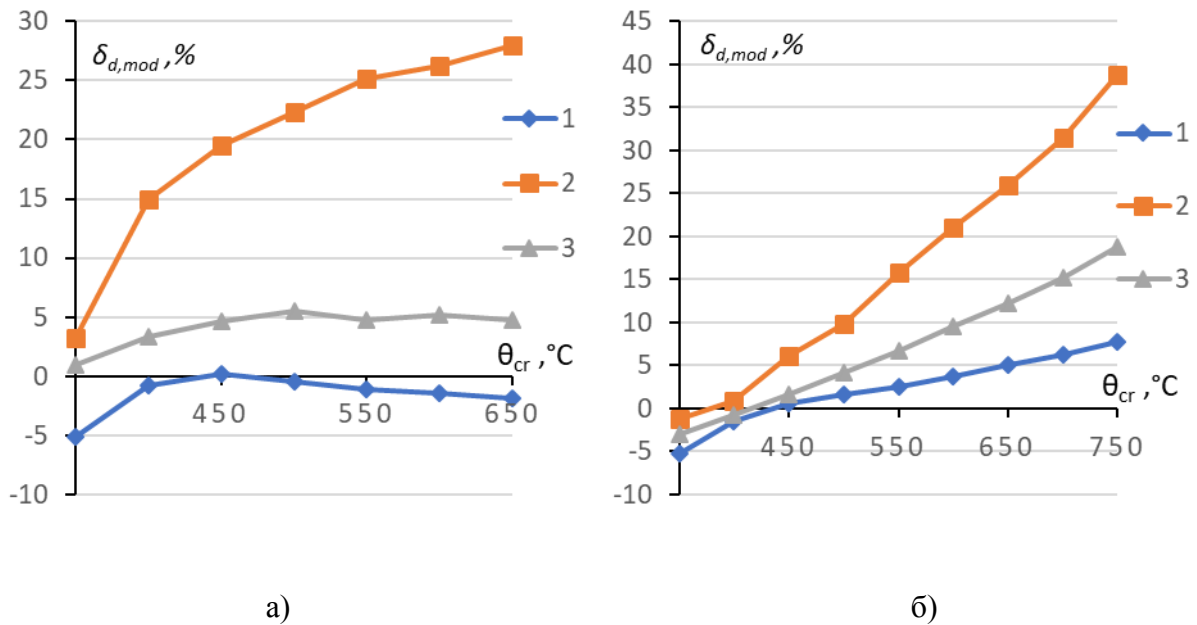


Рисунок 6 – Залежності мінімального значення $\delta_{d,mod,min}$ (1), максимального значення $\delta_{d,mod,max}$ (2) та середнього значення $\delta_{d,mod,avg}$ (3) від критичної температури сталі, визначені для реактивного (а) та пасивного (б) вогнезахисних матеріалів

Із порівняння даних, отриманих для реактивного вогнезахисного матеріалу, з даними, отриманими для пасивного вогнезахисного матеріалу, можна зробити висновок про те, що різниця між розрахунковими значеннями мінімальної товщини реактивного матеріалу, які враховують і не враховують показники здатності матеріалу до зчеплення, переважно незначна (середня її величина не перевищує 5,5 %), а для пасивного вогнезахисного матеріалу вона значно більша (середня величина різниці досягає 18,8 %). Така відмінність пов'язана з суттєвою різницею у значеннях $\delta_{t,mod}$, отриманих для реактивного та пасивного вогнезахисних матеріалів (див., наприклад, рис. 3).

6. Висновки

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», отриманими за методом ДСТУ Б В.1.1-17 [1], у якому застосовано ознаку втрати вогнестійкості сталевій конструкції за досягненням критичної температури сталі, із врахуванням показників здатності вогнезахисного матеріалу до зчеплення та (або) його здатності залишатися неушкодженим під час вогневого впливу і без їхнього врахування.

Встановлено, що різниця між значеннями тривалості досягнення критичної температури сталі, які не враховують і враховують показники здатності вогнезахисних матеріалів до зчеплення, для сталевих конструкцій з пасивним вогнезахисним матеріалом досягає 22,9 % і 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 з реактивним вогнезахисним матеріалом ця різниця збільшується при підвищенні критичної температури сталі до 500 °C, а при подальшому підвищенні цієї температури – зменшується. Для сталевих конструкцій з пасивним вогнезахисним матеріалом при підвищенні критичної температури сталі до (450 – 550) °C

значення цієї різниці незначні (до 2,5 %), а при подальшому підвищенні цієї температури різниця значно збільшується і її найбільші величини мають місце при температурі 750 °С.

Встановлено, що різниця між значеннями мінімальної товщини вогнезахисного матеріалу, визначеними із врахуванням показників здатності реактивного та пасивного вогнезахисних матеріалів до зчеплення і без їхнього врахування, 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 вогнезахисних матеріалів мають в основному монотонний характер. Різниця для більшості цих залежностей значно збільшується з підвищенням зведеної товщини сталевого профілю. Максимальне значення цієї різниці для реактивного і пасивного вогнезахисних матеріалів відповідно становить 28,0 % і 38,7 %. Середнє значення різниці для реактивного вогнезахисного матеріалу несуттєво залежить від критичної температури сталі і має максимальну величину 5,5 %. Для пасивного вогнезахисного матеріалу з підвищенням критичної температури сталі середнє значення різниці монотонно зростає і досягає 18,8 % при температурі 750 °С.

Отримані дані щодо різниці між результатами оцінювання вогнестійкості захищених несучих сталевих конструкцій із врахуванням показників здатності вогнезахисного матеріалу до зчеплення і без їхнього врахування придатні для обґрунтування положень спрощеного методу оцінювання вогнестійкості цих конструкцій. Ці дані дозволяють визначити значення зведеної товщини сталевого профілю і критичної температури сталі, за яких різниця між значеннями мінімальної товщини вогнезахисного матеріалу, які отримані з врахуванням і без врахування показників здатності вогнезахисних матеріалів до зчеплення, не перевищує прийнятної допустимої величини.

Література

1. ДСТУ Б В.1.1-17:2007 Вогнезахисні покриття для будівельних несучих металевих конструкцій. Метод визначення вогнезахисної здатності.

2. Новак С.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»/ С.В. Новак, В.Л. Дріжд, О.В. Добростан // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. – 2018. – № 2 (6). – С. 18–27.

3. ТУ У 13481691.005-2001 Суміш для вогнезахисного покриття “Ендотерм 400201”, “Ендотерм 400202”, “Ендотерм 650202”, “Ендотерм 250103”. Технічні умови.

4. ТУ У 24.3-13481691-007-2003 Склад для покриття «Ендотерм 210104». Технічні умови.

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