

УДК 614.841.45

## **Вплив показників здатності до зчеплення вогнезахисних матеріалів різних типів на результати оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій**

<sup>1</sup>Добростан О. В., канд. техн. наук, <sup>2</sup>Дріжд В. Л., канд. техн. наук,  
<sup>3</sup>Маладика І. Г., канд. тех. наук, <sup>3</sup>Шкарабура І. М.

<sup>1</sup>Український науково-дослідний інститут цивільного захисту, Україна

<sup>2</sup>Науково-виробниче підприємство «Спецматеріали», Україна

<sup>3</sup>Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля, НУЦЗ, Україна

**Анотація.** Для оцінювання вогнестійкості захищених сталевих конструкцій застосовують метод, основні положення якого викладено в ДСТУ Б В.1.1-17:2007. Цей метод базується на припущенні, що ознакою втрати вогнестійкості сталевій конструкції вважається досягнення критичної температури сталі, і дозволяє визначати для широких діапазонів зведеної товщини сталевого профілю та критичної температури сталі значення мінімальної товщини вогнезахисного матеріалу, за яких забезпечуються нормовані величини межі вогнестійкості несних сталевих конструкцій (колон та балок). Під час випробувань 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.

В статті наведено дані щодо різниці між результатами оцінювання вогнестійкості захищених несних 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 якому застосовано ознаку втрати вогнестійкості сталевій конструкції у разі досягнення критичної температури сталі, з урахуванням показників здатності вогнезахисного матеріалу до зчеплення та (або) його здатності залишатися неушкодженим під час вогневого впливу та без їх урахування.

Встановлено, що різниця між значеннями тривалості досягнення критичної температури сталі, які не враховують та 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 з урахуванням 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 та пасивного вогнезахисних матеріалів відповідно становить 28,0 % та 38,7 %.

**Ключові слова:** вогнезахисний матеріал, вогнестійкість, оцінювання вогнестійкості, показники здатності до зчеплення, сталева конструкція.

### **1. Вступ**

Для оцінювання вогнестійкості захищених сталевих конструкцій застосовують метод, який наведено в ДСТУ Б В.1.1-17 [1] і в якому застосовано ознаку втрати вогнестійкості сталевій конструкції за досягнення 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). Під час випробувань 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 внаслідок 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, наведеного в ДСТУ Б В.1.1-17 [1], вимагає значних матеріальних витрат, пов'язаних із 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 їх кількість має 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 ненавантажену 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.

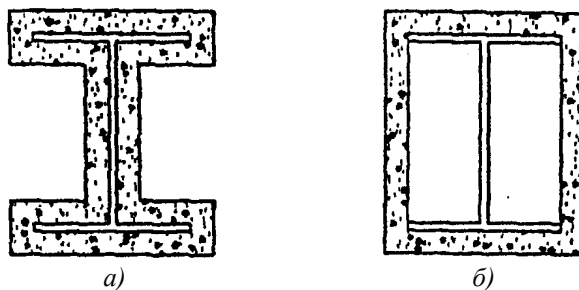


Рис. 1. Профільована (а) і коробчаста (б) системи вогнезахисту

Параметри зразків сталевих колон і результати визначення значень тривалості  $t_{cr}$  вогневого впливу за стандартним температурним режимом до досягнення критичної температури сталі  $\theta_{cr}$  (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 внаслідок деформації навантажених сталевих колон під час пожежі.

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	ІРЕ200	3,266	1,193
2	ІРЕ200	3,266	1,854
3	НЕА200	4,268	0,429
4	НЕА200	4,268	1,919
5	НЕА300	5,886	0,385
6	НЕА300	5,886	1,886
7	НЕВ300	7,710	0,413
8	НЕВ450	9,798	1,992
9	НЕМ280	13,050	1,155
10	НЕМ280	13,050	0,373

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 та 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 сталевого 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.

Таблиця 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 3

**Значення тривалості  $t_{cr}$  досягнення критичної температури для зразків  
сталевих колон із реактивним вогнезахисним матеріалом**

Критична температура сталі $\theta_{cr}$ , °C	350	400	450	500	550	600	650	700	750
	Значення тривалості $t_{cr}$ , хв.								
№ зразка									
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

Кінець таблиці 3

Критична температура сталі $\theta_{cr}$ , °C	350	400	450	500	550	600	650	700	750
№ зразка	Значення тривалості $t_{cr}$ , хв.								
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 із пасивним вогнезахисним матеріалом

Критична температура сталі $\theta_{cr}$ , °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	–	–	–	–
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 та 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 сталевого 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 сталевій 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 сталевій 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 $\theta_{cr}$ , °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

Кінець таблиці 5

Критична температура сталі $\theta_{cr}$ , °C	350	400	450	500	550	600	650
№ зразка	Значення тривалості $t_{cr,mod}$ , хв.						
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 $\theta_{cr}$ , °C	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 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 матеріалам. 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

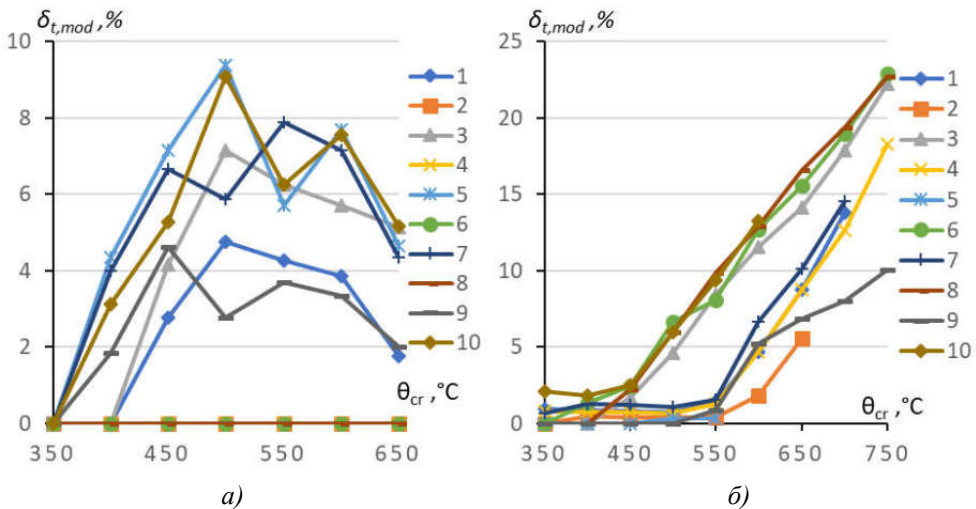


Рис. 2. Залежність різниці  $\delta_{t,mod}$  від критичної температури сталі  $\theta_{cr}$  для зразків сталевих колон з реактивним (а) та пасивним (б) вогнезахисними матеріалами

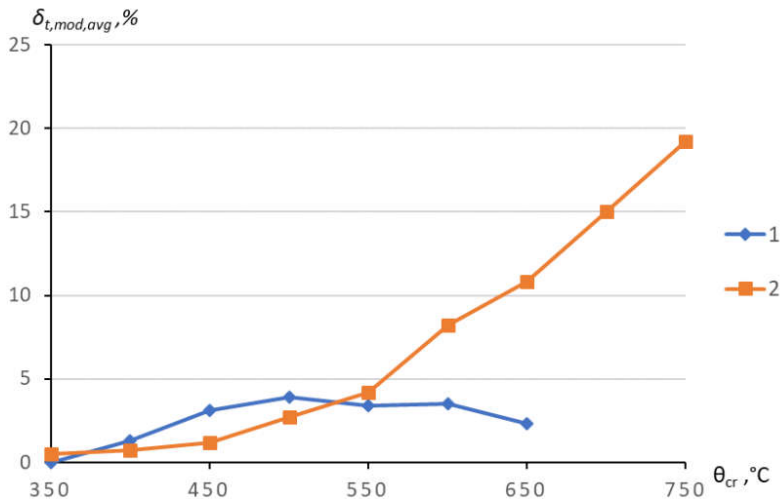


Рис. 3. Залежність середніх значень різниці  $\delta_{t,mod,avg}$  від критичної температури сталі  $\theta_{cr}$  для зразків сталевих колон із реактивним (1) та пасивним (2) вогнезахисними матеріалами

Із аналізу отриманих розрахункових даних випливає, що для зразків сталевих колон із 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 із реактивним вогнезахисним матеріалом різниця  $\delta_{t,mod}$  збільшується за підвищення критичної температури сталі до 500 °C, а за подальшого підвищення цієї температури – зменшується. Для зразків сталевих колон із пасивним вогнезахисним матеріалом у разі підвищення критичної температури сталі до (450–550) °C значення різниці  $\delta_{t,mod}$  незначні (до 2 %), а за подальшого підвищення цієї температури різниця  $\delta_{t,mod}$  значно збільшується, і її найбільші величини мають місце за температури 750 °C. Для зразків сталевих колон з реактивним вогнезахисним матеріалом середнє значення різниці  $\delta_{t,mod,avg}$  за підвищення критичної температури сталі до 500 °C збільшується до 3,9 %, а потім зменшується до 2,3 %. Для зразків сталевих колон із пасивним вогнезахисним матеріалом середнє значення різниці  $\delta_{t,mod,avg}$  значно підвищується за критичної температури сталі більше ніж 500 °C та досягає 19,2 %.

Такий хід залежностей різниці  $\delta_{t,mod}$  та  $\delta_{t,mod,avg}$  від критичної температури сталі пов'язаний з тим, що для коробчастої системи вогнезахисту з пасивним вогнезахисним матеріалом після досягнення температури сталевих профілів значень 450–550 °C 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 їх врахування**

Унаслідок наявної різниці  $\delta_{t,mod}$  між значеннями тривалості досягнення критичної температури сталі, які не враховують і враховують показники здатності реактивного та пасивного вогнезахисних матеріалів до зчеплення, має місце різниця  $\delta_{d,mod}$  та в розрахункових значеннях мінімальної товщини вогнезахисних матеріалів, за яких для певних величин критичної температури сталі та зведеної товщини сталевго 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 зазначеної 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 сталевго 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 процедури, встановленої в Ж.3 стандарту ДСТУ Б В.1.1-17 [1];
- 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 сталевго 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 сталевго 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.;

$\theta_{cr}$  – критична температура сталі, °С;

$d_p$  – 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.

З 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 °С і нормованої межі вогнестійкості 45 хв. (рис. 4, а) 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).

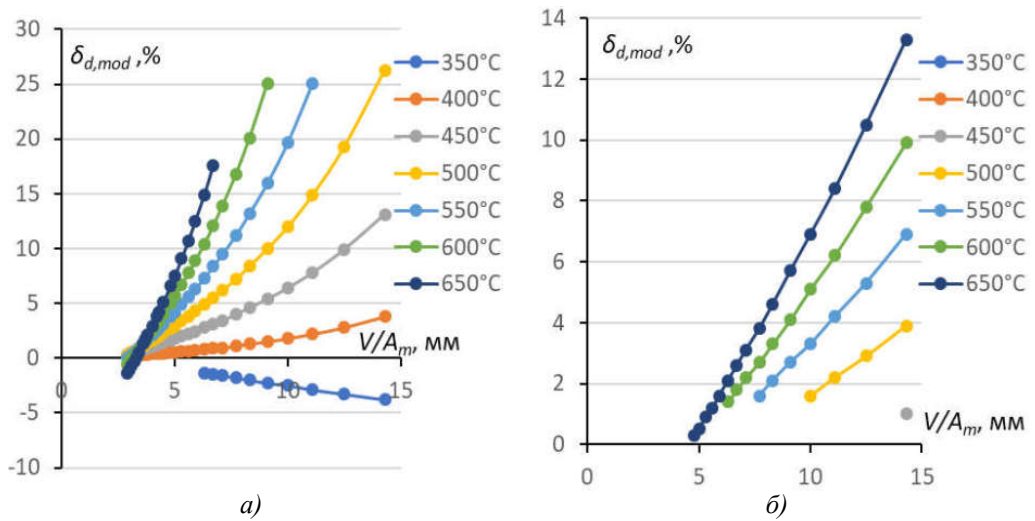


Рис. 4. Залежності різниці  $\delta_{d,mod}$  від зведеної товщини сталевго профілю для нормованої межі вогнестійкості 45 хв. (а) та 90 хв. (б) для різних значень критичної температури сталі  $\theta_{cr}$  (°С), визначені для реактивного вогнезахисного матеріалу

Отримані залежності  $\delta_{d,mod}$  від зведеної товщини сталевго профілю для пасивного вогнезахисного матеріалу мають такий самий 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 °С та 400 °С та нормованої межі вогнестійкості від 45 хв. до 240 хв., із 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.

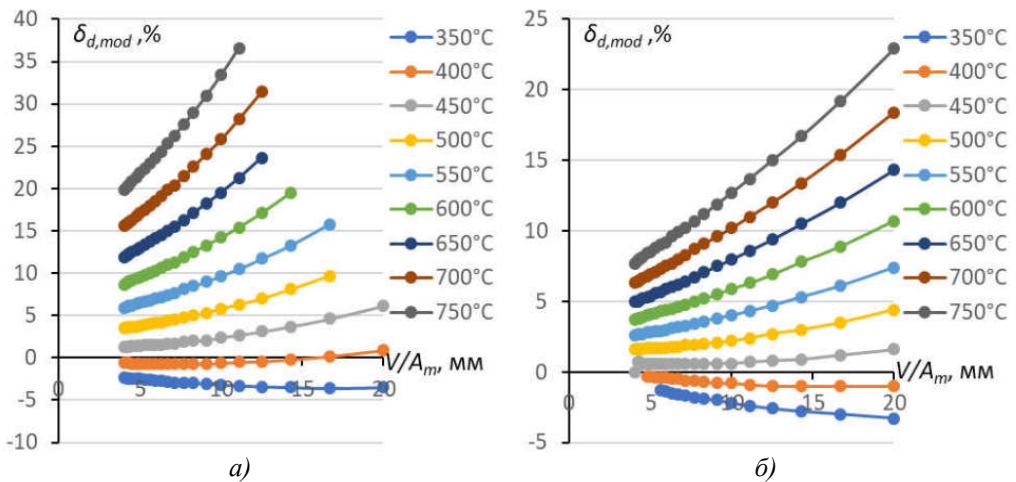


Рис. 5. Залежності різниці  $\delta_{d,mod}$  від зведеної товщини сталевого профілю для нормованої межі вогнестійкості 120 хв. (а) та 240 хв. (б) для різних значень критичної температури сталі  $\theta_{cr}$  (°C), визначені для пасивного вогнезахисного матеріалу

Таблиця 8

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

Критична температура сталі $\theta_{cr}$ , °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

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:

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

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

Таблиця 9

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

Критична температура сталі $\theta_{cr}$ , °С	350	400	450	500	550	600	650	700	750
Мінімальне значення $\delta_{d, \text{mod}, \text{min}}$ , %	-5,2	-1,5	0,6	1,6	2,6	3,7	5,0	6,3	7,7
Максимальне значення $\delta_{d, \text{mod}, \text{max}}$ , %	-1,2	0,9	6,1	9,8	15,8	21,0	25,9	31,4	38,7
Середнє значення $\delta_{d, \text{mod}, \text{avg}}$ , %	-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  $\delta_{d, \text{mod}, \text{min}}$  становить від  $-5,1$  % (за критичної температури сталі  $350$  °С) до  $0,2$  % (при  $450$  °С), максимальне значення  $\delta_{d, \text{mod}, \text{max}}$  – від  $3,2$  % (при  $350$  °С) до  $28,0$  % (при  $650$  °С), середнє значення  $\delta_{d, \text{mod}, \text{avg}}$  – від  $1,0$  % (при  $350$  °С) до  $5,5$  % (при  $500$  °С). З підвищенням критичної температури сталі величина  $\delta_{d, \text{mod}, \text{max}}$  значно збільшується, а значення  $\delta_{d, \text{mod}, \text{min}}$  та  $\delta_{d, \text{mod}, \text{avg}}$  змінюються не суттєво (див. таблицю 8, рис. 6, а). Для пасивного вогнезахисного матеріалу і діапазону нормованої межі вогнестійкості від 45 хв. до 240 хв. (див. таблицю 9, рис. 6, б), залежно від величини критичної температури сталі, мінімальне значення  $\delta_{d, \text{mod}, \text{min}}$  становить від  $-5,2$  % (за критичної температури сталі  $350$  °С) до  $-7,7$  % (при  $750$  °С), максимальне значення  $\delta_{d, \text{mod}, \text{max}}$  – від  $-1,2$  % (при  $350$  °С) до  $38,7$  % (при  $750$  °С), середнє значення  $\delta_{d, \text{mod}, \text{avg}}$  – від  $-3,0$  % (при  $350$  °С) до  $18,8$  % (при  $750$  °С). З підвищенням критичної температури сталі величини  $\delta_{d, \text{mod}, \text{min}}$ ,  $\delta_{d, \text{mod}, \text{max}}$  та  $\delta_{d, \text{mod}, \text{avg}}$  значно збільшуються (див. рис. 6, б).

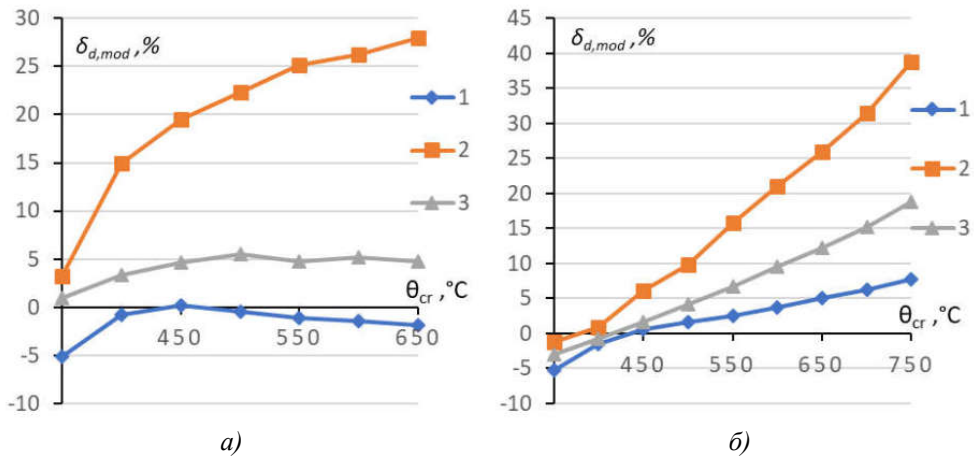


Рис. 6. Залежності мінімального значення  $\delta_{d,mod,min}$  (1), максимального значення  $\delta_{d,mod,max}$  (2) та середнього значення  $\delta_{d,mod,avg}$  (3) від критичної температури сталі, визначені для реактивного (а) та пасивного (б) вогнезахисних матеріалів

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 (її середня 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 досягнення критичної температури сталі, із врахуванням показників здатності вогнезахисного матеріалу до зчеплення та (або) його здатності залишатися неушкодженим під час вогневого впливу і без їх 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 °С, а за подальшого підвищення цієї температури – зменшується. Для сталевих конструкцій з пасивним вогнезахисним матеріалом при підвищенні критичної температури сталі до 450–550 °С значення цієї різниці незначні (до 2,5 %), а за подальшого підвищення цієї температури різниця значно збільшується, і її найбільші величини мають місце за температури 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 % та 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 та 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] Вогнезахисні покриття для будівельних несучих металевих конструкцій. Метод визначення вогнезахисної здатності : ДСТУ Б В.1.1-17:2007 (ENV 13381-4:2002, NEQ). – Офіц. вид. – К. : Мінрегіонбуд України, 2007. – 66 с. – (Захист від пожежі. Національний стандарт України).

- [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. Дрижд, О. В. Добростан // Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека. – 2018. – № 2 (6). – С. 18–27.
- [3] Суміші для вогнезахисних покриттів «Ендотерм 400201», «Ендотерм 400202», «Ендотерм 650202», «Ендотерм 250103». Технічні умови : ТУ У 13481691.005-2001. – Офіц. вид. – Донецьк : Донецький центр стандартизації, метрології та сертифікації, 2001. – 24 с. – (Технічні умови України).
- [4] Суміш для покриття «Ендотерм 210104». Технічні умови : ТУ У 24.3-13481691-007-2003. – Офіц. вид. – Донецьк : Донецький центр стандартизації, метрології та сертифікації, 2003. – 25 с. – (Технічні умови України).
- [5] Influence of testing samples' parameters on the results of evaluating the fire protective capability of materials [Electronic resource] / [Novak S., Drizhd V., Dobrostan O., Maladyka L.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 2/10(98). – P. 35–43. – Access address doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.164743> – Screen title.

## **Влияние показателей способности к сцеплению огнезащитных материалов различных типов на результаты оценки огнестойкости стальных конструкций**

<sup>1</sup>Добростан А. В., канд. техн. наук, <sup>2</sup>Дрижд В. Л., канд. техн. наук,  
<sup>3</sup>Маладыка И. Г., канд. тех. наук, <sup>3</sup>Шкарабура И. Н.

<sup>1</sup>Украинский научно-исследовательский институт гражданской защиты, Украина

<sup>2</sup>Научно-производственное предприятие «Спецматериалы», Украина

<sup>3</sup>Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля, НУГЗ, Украина

**Аннотация.** Для оценки огнестойкости защищенных стальных конструкций применяют метод, основные положения которого изложены в ДСТУ Б В.1.1-17:2007. Этот метод основан на предположении, что признаком потери огнестойкости стальной конструкции считается достижение критической температуры стали, и позволяет определять для широких диапазонов сводной толщины стального профиля и критической температуры стали значения минимальной толщины огнезащитного материала, при которых обеспечиваются нормированные величины границы огнестойкости несущих стальных конструкций (колонн и балок). При испытаниях по этому методу проводят механическое нагружение образцов двух балок и учитывают показатели способности огнезащитного материала к сцеплению и (или) его способности оставаться невредимым во время огневого воздействия.

В статье приведены данные о разнице между результатами оценки огнестойкости защищенных несущих стальных конструкций (колонн, балок) и огнезащитной способности двух типов огнезащитных материалов – реактивного огнезащитного

матеріала «Ендотерм 400202», вспучиваючогося под тепловим впливом в умовах пожеги, і пасивного огнезащитного матеріала (плити) «Ендотерм 210104», отриманими по методу, в якому застосовано ознаку втрати огнестійкості сталевих конструкцій при досягненні критичної температури сталі, з урахуванням показувачів здатності огнезащитного матеріала к сцепленію і (или) його здатності залишатися невредимим во время огневого впливу і без їх урахування.

Встановлено, що різниця між значеннями тривалості досягнення критичної температури сталі, які не враховують і враховують показувачі здатності огнезащитних матеріалів к сцепленію, для сталевих конструкцій з пасивним огнезащитним матеріалом досягає 22,9 % і значно більше, ніж для реактивного огнезащитного матеріала, для якого максимальна різниця становить 9,4 %. Різниця між значеннями мінімальної товщини огнезащитного матеріала, визначеними з урахуванням показувачів здатності реактивного і пасивного огнезащитних матеріалів к сцепленію і без їх урахування, збільшується з підвищенням загальної товщини сталевих профілів. Максимальне значення цієї різниці для реактивного і пасивного огнезащитних матеріалів відповідно становить 28,0 % і 38,7 %.

**Ключевые слова:** огнезащитный материал, огнестойкость, оценка огнестойкости, показатели способности к сцеплению, стальная конструкция.

## **Influence of Adhesion Indicators of Fire Protection Materials of Various Types on Results of Assessing the Steel Structures Fire Resistance**

<sup>1</sup>**O. Dobrostan**, Cand. Sc. (Eng.), <sup>2</sup>**V. Drizhd**, Cand. Sc. (Eng.),

<sup>3</sup>**I. Maladyka**, Cand. Sc. (Eng.), <sup>3</sup>**I. Shkarabura**

<sup>1</sup>Ukrainian Civil Protection Research Institute, Ukraine

<sup>2</sup>Scientific and production enterprise «Specmaterials», Ukraine

<sup>3</sup>Cherkasy Chernobyl Hero Fire Institute, NUCP, Ukraine

**Abstract.** To assess the fire resistance of protected steel structures, a method is used, the main provisions of which are set out in DSTU B V.1.1-17:2007. This method is based on the assumption that critical temperature of steel is considered to be a feature of lost fire resistance of steel structure, and allows, for wide ranges of the steel profile combined thickness and critical temperature of steel, determining the values of the fire protection material minimum thickness, at which specified fire resistance limit values are provided for load-bearing steel structures (columns and beams). When tested by this method, mechanical loading of specimens of two beams is carried out and the adhesion indicators of the fire protection material and (or) its ability to remain undamaged during fire exposure are taken into account.

The article provides data on the difference between the results of assessing the fire resistance of protected load-bearing steel structures (columns, beams) and the fire protection capacity of two types of fire protection materials – «Endotherm 400202» reactive fire protection material, which inflates under heat in a fire, and passive fire protection material (slab) «Endotherm 210104». These data were obtained according to the method in which the feature of loss of the steel structure fire resistance is applied when the critical temperature of steel is reached, taking into account adhesion indicators of the fire-protection material and (or) its ability to remain undamaged during fire exposure and without taking them into account.

It is determined that the difference between the values of the period duration for reaching the critical steel temperature, which do not take into account and take into account the adhesion

indicators of fire protection materials, reaches 22,9 % for steel structures with passive fire protection material and is much greater than for reactive fire protection material, for which the maximum difference makes 9,4 %. The difference between the values of the fire protection material minimum thickness, determined taking into account the adhesion indicators of reactive and passive fire protection materials and without taking them into account, increases with increasing composite thickness of the steel section. The maximum value of this difference is 28.0 % and 38.7 % respectively for reactive and passive fire protection materials.

**Key words:** adhesion indicators, assessment of fire resistance, fire resistance, fire protection material, steel structure.

*Надійшла до редколегії 15.11.2019 р.*