

Ю.І. Орловський, Т.М. Шналь, Ю.Е. Павлюк
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра будівельних конструкцій і мостів

РОЗРАХУНОК НАГРІВУ НЕЗАХИЩЕНИХ ПОВЕРХОНЬ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ТА ВПЛИВУ ВОГНЕЗАХИСНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ВІДПОВІДНО ДО ЄВРОПЕЙСЬКИХ НОРМ

© Орловський Ю.І., Шналь Т.М., Павлюк Ю.Е., 2004

Описано методику розрахунку незахищених поверхонь металевих конструкцій та оцінку впливу вогнезахисної ізоляції відповідно до Європейських норм.

Постановка проблеми. Україна в найближчому майбутньому може увійти повноправним членом до Європейського Союзу, тому всі нормативні документи, прийняті Європейською конвенцією у сфері проектування та розрахунку будівельних конструкцій, в тому числі сталевих, вже зараз становлять значний інтерес. У статті дається аналіз та пояснюються деякі положення до Європейських норм ENV “Eurocod”, які стосуються розрахунку незахищених та захищених теплоізоляцією від дії високих температур елементів сталевих конструкцій.

Аналіз останніх досліджень. Сьогодні в Україні відсутній комплекс нормативних документів, які би визначав методику оцінки вогнестійкості металевих конструкцій. Вогнестійкість металевих конструкцій визначається в більшості випадків експериментальним шляхом або, зважаючи на досвід проектування аналогічних будівель та споруд, що як правило не завжди доцільне з економічного погляду. З іншого боку, оцінити вогнестійкість унікальних об’єктів експериментальним шляхом є просто не можливо. Дослідження вогнестійкості металевих конструкцій проводилось у Всесоюзному науково-дослідному інституті протипожежної оборони (ВНИИПО) м. Москва. Незважаючи на великий обсяг випробувань та теоретичних досліджень, розроблені нормативні документи ВНИИПО, які регламентували пожежну безпеку будівель та споруд, на жаль не містили методик розрахунку меж вогнестійкості металевих будівельних конструкцій.

Постановка завдання. Оцінити методичні підходи до розрахунку незахищених елементів металевих конструкцій, з використанням рівнянням балансу енергії ізотропного тіла, та розрахунку захищених металевих елементів, з рівнянь, отриманих диференціюванням рівняння Фур’є, викладених в Європейських нормах ENV “EUROCOD” 3 та 9.

Виклад основного матеріалу.

1. Розрахунок незахищених металевих елементів конструкцій

При впливі високих температур та відкритого вогню при пожежі на незахищені елементи конструкцій, потік тепла повністю адсорбується поверхнею та їх внутрішня енергія збільшується. Для опису механізму цього процесу можна скористатись рівнянням балансу енергії ізотропного тіла, який описує енергію рівноваги вигляду:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} dVdt = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] dVdt + q_v dVdt. \quad (1)$$

При цьому необхідно враховувати складний характер процесу поглинання тепла будівельним елементом в умовах пожежі, пов’язаний як з конвекцією, так із випромінюванням. Приріст температури металевих елементів $\Delta T_{m,t}$ в інтервалі часу Δt можна визначити відповідно до вимог Єврокодів 3 та 9 [1, 2] за допомогою методу “step by step” з виразу:

$$\Delta T_{m,t} = \frac{1}{c_m \rho_m} \cdot \frac{A_m}{V_m} \cdot q_w \cdot \Delta t, \quad (2)$$

де A_m – поле поверхні елемента, на яке розповсюджується пожежа; V_m – об’єм металевих елементів; ρ_m – щільність металу; c_m – теплоємність металу; q_w – щільність теплового потоку, що

падає на поверхню елемента, який розраховується, яка є сумою $q_{w,c} + q_{w,r}$, доданки якої визначаються залежностями відповідно до норм Єврокоду 1 [3], які впливають з рівнянь:

– закону Ньютона, який виражає показаний на рис.1 розподіл температури поблизу постійного тіла при цьому

$$q_{w,c} = \alpha(T_w - T_f), \quad (3)$$

де $q_{w,c}$ – щільність теплого потоку (пов'язаного з конвекцією) на поверхні тіла; T_w – температура поверхні тіла (наприклад, стіни на яку розповсюджується пожежа); T_f – температура газів, що горять на відповідній відстані від тіла (метод визначення температури T_f встановлений нормами); α – коефіцієнт теплосасвоєння, що визначає інтенсивність теплообміну;

– закону Стефана–Больцмана, відповідно до якого енергія випромінювання через абсолютно чорні тіла пропорційна четвертому степені абсолютної температури цього тіла, звідки:

$$q_{w,r} = \varphi \varepsilon_r \sigma \left[(T_r^{(K)})^4 - (T_w^{(K)})^4 \right], \quad (4)$$

$q_{w,r}$ – щільність теплового потоку (пов'язана з випромінюванням) на поверхні тіла; $T^{(K)}$ – абсолютна температура (К), причому $T_r^{(K)}$ означає температуру джерела тепла; φ – коефіцієнт конфігурації, кутовий коефіцієнт опромінення; ε_r – коефіцієнт випромінювання; σ – стала Стефана ($5,6693 \cdot 10^{-8}$ – розрахункове значення, $5,729 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К) – експериментальне значення).

Обмеження, що стосуються практичного застосування виразу (2), наведені в нормах Єврокоду 3 та 9.

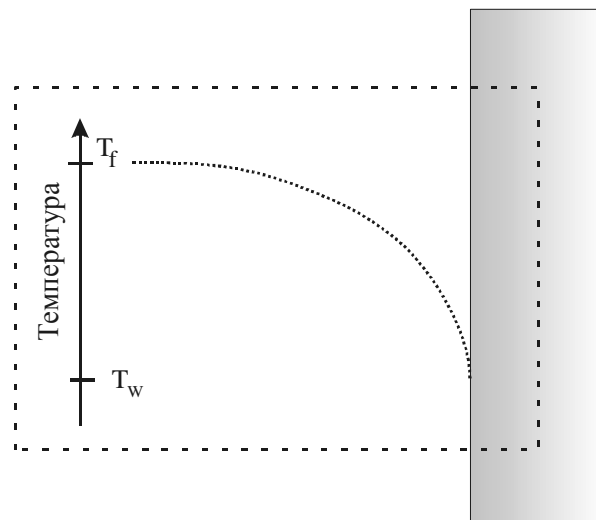


Рис. 1. Схема розподілу температури горючих газів поблизу поверхні стіни, яка обмежує приміщення, що знаходиться в умовах пожежі

При використанні виразу (2), згідно з вищевказаними нормами, величина коефіцієнта теплосасвоєння (коефіцієнта, який впливає з закону Ньютона) приймається залежно від зміни умов процесів горіння в зоні охопленій пожежею. Наприклад, коли температура горіння змінюється за стандартною кривою пожежі, то відповідно до Єврокоду 1 $\alpha = 25$ Вт/(м² К). Очевидно, що значення цього коефіцієнта може змінюватись в часі, а також вздовж та поперек поверхні елемента, охопленого пожежею; при цьому змінюється також температура поверхні та температура горючих газів, які оточують поверхню елемента. Коли прийняти, що відомі температура горючих газів під час пожежі T_f температура поверхні розглядуваного елемента конструкції T_w , а середні значення

$$\bar{T}_f = \frac{1}{T} \int_0^t T_f dt, \quad (5)$$

$$\bar{T}_w = \frac{1}{t} \int_0^T T_w dt, \quad (6)$$

тоді можливе усереднення величин коефіцієнтів теплозасвоєння відповідно до формули

$$\bar{a} = \frac{q}{\bar{T}_w - \bar{T}_f} = \frac{\int_0^t a(T_w - T_f) dt}{\int_0^t (T_w - T_f) dt}. \quad (7)$$

У розглядуваній ситуації керуються положенням про рівномірний розподіл температури в елементі конструкції в зв'язку з високою теплопровідністю металів. Враховуючи, що розглядується елемент конструкції без теплоізоляції, можна температуру T_w ототожнювати з T_f .

У загальному випадку коефіцієнт теплозасвоєння є функцією багатьох змінних. Його величина залежить від таких термофізичних властивостей газу, як: власне тепло, щільність, коефіцієнт теплопровідності, коефіцієнт в'язкості. Необхідно також додати, що всі ці властивості змінюються залежно від температури, тиску, швидкості та характеру потоку газів, які виділяються під час горіння.

Коефіцієнт конфігурації (кутовий коефіцієнт опромінення) призначається згідно з нормами Єврокоду 3, що стосуються сталевих конструкцій, та Єврокоду 9, що стосується конструкцій з алюмінію.

Цими ж нормами встановлюється величина коефіцієнта випромінювання ε_r , який входить в рівняння (2) та в явному вигляді в (4). Величина цього коефіцієнта для різних випадків пожежі наведена в табл. 1.

Таблиця 1

Коефіцієнти випромінювання ε_r відповідно до [4]

Характеристика конструктивних елементів	ε_r (-)
Сталеві балки коробчатого перерізу, завантажені бетонною плитою перекриття	0,7
Сталеві балки двотаврового перерізу, завантажені бетонною плитою перекриття, опертою на нижню полицку двотавра	0,5
Сталеві балки двотаврового перерізу, завантажені бетонною плитою перекриття, опертою на верхню полицку двотавра (відношення ширини до висоти поперечного перерізу $\geq 1/2$)	0,5
Те саме, відношення $< 1/2$	0,7
Ферми, завантажені бетонними плитами покрить	0,7
Колони в будівлях, які нагріваються з 4 сторін	0,7
Колони на зовнішньому фасаді будівель	0,3

У виразі (2) значення співвідношення A_m/V_m називається проектним показником масивності перерізу металевих елементів, що нагріваються при пожежі. Цей показник для деяких перерізів елементів металевих конструкцій наведений в табл. 2.

Таблиця 2

Показник масивності для перерізів елементів

Характеристика поперечного перерізу (нагрів зі всіх сторін)	A_m/V_m , M^{-1}
Двотавр рівнополочний висотою h , шириною s (g – товщина стінки) площа перерізу A	$\frac{(2h + 4s - 2g)}{A}$
Кільцевий переріз із зовнішнім діаметром D та внутрішнім d ; $D - d = 2g$	$\frac{1}{g}$
Рівносторонній кутниковий профіль (g – товщина полицки)	$\frac{2}{g}$

Вказівки ECCS (European Convention for Constructional Steelwork) [5] містять результати розрахунків температур незахищених сталевих елементів в умовах пожежі, наведені в табл. 3 для показників масивності в межах від 10 м^{-1} до 100 м^{-1} . Розрахунки виконані відповідно до рівняння (2) з кроком $\Delta t = 30 \text{ с}$. При цьому прийнято, що температура поверхні, яка нагрівається, зростає відповідно до стандартної кривої пожежі, а коефіцієнт випромінювання $\varepsilon_r = 0,5$.

Таблиця 3

Температура незахищених сталевих конструкцій в умовах пожежі [5]

Час, хв	Температура горіння, °С	Показник A_m/V_m , м^{-1}				
		10	20	30	50	100
0	20	20	20	20	20	20
15	739	95	164	226	333	514
30	842	215	367	484	637	781
45	902	343	552	682	808	877
60	945	467	700	814	897	930

Як бачимо, температура незахищеного елемента сталеві конструкції в умовах пожежі дуже швидко досягає значень, які дорівнюють $1/3$ абсолютної температури плавлення сталі та порівняно швидко перевищує значення, яке дорівнює $1/2$ температури плавлення. Такий інтенсивний нагрів несучих конструкцій недопустимий з умови забезпечення пожежної безпеки об'єктів та в кінцевому підсумку евакуації людей [6].

2. Розрахунок захищених металевих елементів конструкцій

Невигідні ефекти нагріву при пожежі будівельних елементів металевих конструкцій потребують заходів з вогнезахисту, завданням яких є відокремлення конструктивних елементів від джерела пожежі (рис. 2).

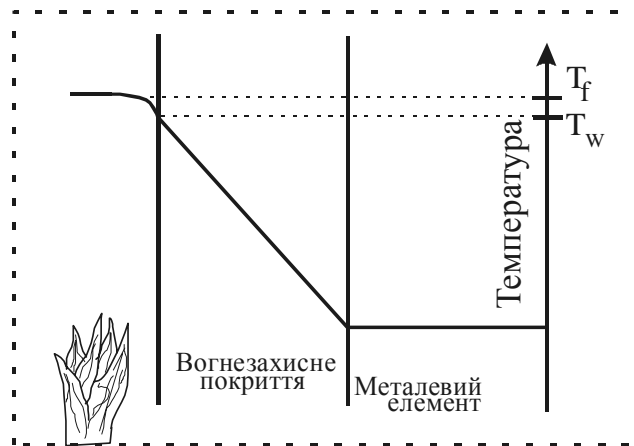


Рис. 2. Схема розподілу температури в металевому елементі, захищеному вогнезахисним покриттям в умовах пожежі

Вплив пожежі на вогнезахисне покриття по сталевих конструкціях викладено в нормах Єврокоду 3 (ENV 1993-1-2:1995) [1] та Єврокоду 9 (ENV 1999-1-2:1998) [2] виразом, отриманим диференціюванням рівняння Фур'є. Згідно з цими нормами приріст температури в металевому елементі, захищеному покриттям $\Delta T_{m,t}$ в інтервалі часу Δt можна розрахувати шляхом "step by step" за допомогою формули:

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta T_{m,t} &= \left(1 - e^{-\xi/10}\right) \Delta T_{f,t} + \frac{\lambda_p}{c_m \rho_m} \cdot \frac{A_p}{V_m} \cdot \frac{T_f - T_m}{1 + \xi/3} \Delta t, \\ \Delta T_{m,t} &\geq 0 \end{aligned} \right. \quad (8)$$

причому

$$\xi = \frac{A_p}{V_m} \cdot \frac{c_p \rho_p}{c_m \rho_m} d_p, \quad (9)$$

де $\Delta T_{f,t}$ – приріст температури газів, які утворюються під час пожежі; параметри $c_p, \rho_p, \lambda_p, d_p$, які характеризують вогнезахисне покриття відповідно теплоємність матеріалу покриття, щільність, коефіцієнт теплопровідності, товщину покриття; A_p – периметр внутрішньої поверхні покриття, яка повністю повторює форму поверхні захищаного елемента.

Якщо покриття не контактує з поверхнею захищаного елемента, тоді у формулах (8) та (9) периметр A_p менший за периметр зовнішньої поверхні елемента. Швидкість нагрівання елемента залежить від способів влаштування покриття, показаних на рис. 3.

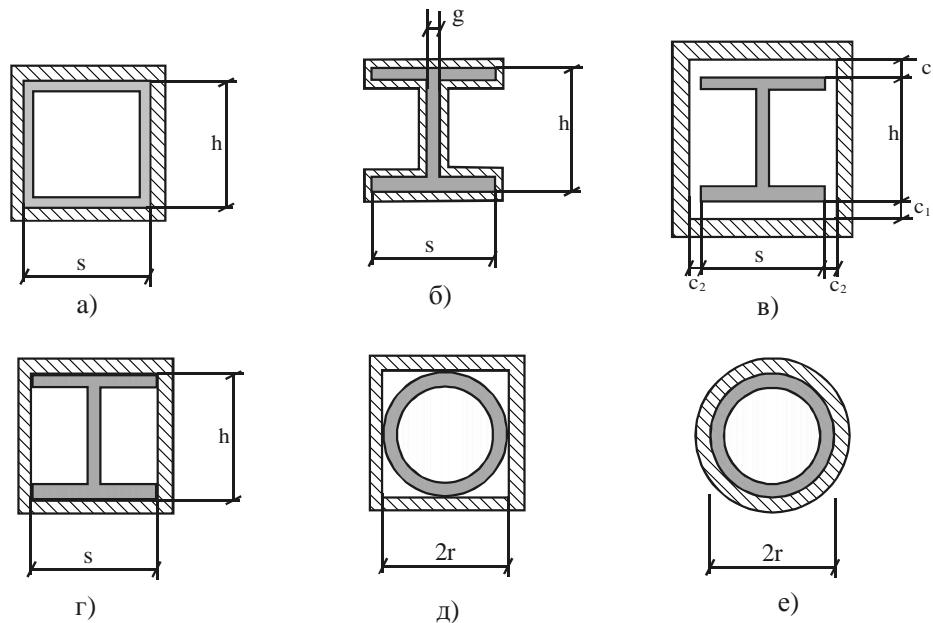


Рис. 3. Приклади влаштування вогнезахисного покриття по металевих профілях (до табл. 4)

Показники масивності перерізу елемента, захищеного покриттям, розраховують від способу влаштування покриття та наведені в табл. 4 на прикладі елементів, які нагріваються зі всіх сторін. Детальні таблиці для різних варіантів нагрівання та різних перерізів елементів наведені в нормах [7].

Таблиця 4

Показники масивності захищених покриттям металевих профілів, показаних на рис. 3

Характеристика поперечного перерізу, що нагрівається зі всіх сторін	$\frac{A_p}{V_m}, M^{-1}$
Коробчатий переріз (рис. 3, а)	$\frac{2(h+s)}{A}$
Двотавровий переріз з покриттям по контуру елемента (рис.3, б)	$\frac{(2h+4s-2g)}{A}$
Двотавровий переріз з коробчатим покриттям (рис. 3, в), які не дотикаються з поверхнею елемента, причому $c_1 < h/4$, $c_2 < h/4$	$\frac{2(h+s)}{A}$
Двотавровий переріз з коробчатим покриттям частково контактують з елементом (рис. 3, г)	$\frac{2(h+s)}{A}$
Кільцевий переріз з коробчатим покриттям (рис. 3, д)	$\frac{8r}{A}$
Кільцевий переріз з контурним покриттям (рис. 3, е)	$\frac{2\pi r}{A}$

Показники масивності перерізу елементів, які нагріваються не з усіх сторін, мають значення, менші за наведених в табл. 4. Наприклад, коли сталева балка двотаврового перерізу з плитою покриття, яка опирається на верхню полицьку двотавра, захищена покриттям, тоді показник масивності дорівнює $\frac{A_p}{V_m} = \frac{(2h+3s-2g)}{A}$, де A – периметр поперечного перерізу балки.

Швидкість нагрівання такої балки порівняно з балкою, яка нагрівається з 4 сторін, для якої $\frac{A_p}{V_m} = \frac{(2h+4s-2g)}{A}$, зростає меншою мірою.

Зростання температури нагрівання сталевій конструкції в умовах пожежі залежить також від вологості матеріалу покриття. Пов'язане з цим “запізнення” в часі, показане схематично на рис. 4, можна розрахувати за формулою:

$$t_v = 0,1 \frac{u \rho_p d_p^2}{\lambda_p}, \quad (10)$$

де u – вологість матеріалу покриття, %.

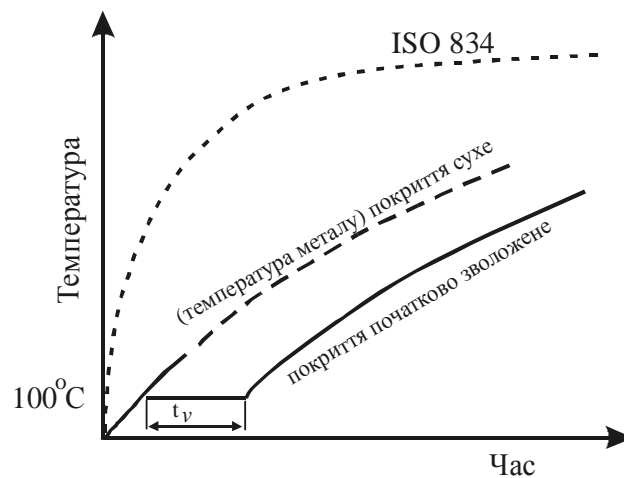


Рис. 4. Схема зростання температури в металевому елементі, захищеному зволоженими вогнезахисним покриттям в умовах пожежі

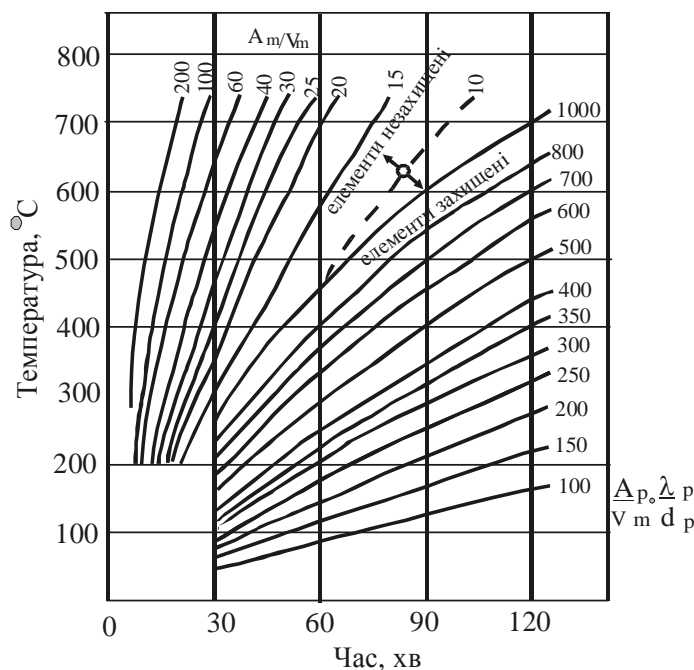


Рис. 5. Номограма, яка відображає зростання температури в сталевому елементі в умовах пожежі

Аналіз стрижневих металевих конструкцій, що нагріваються в умовах пожежі, може бути виконаний за допомогою номограм, наведених на рис. 5. Цей фрагмент є частиною номограми “Euro - Nomogram”, розробленої з метою спрощення проектування конструкцій [7, 8] та показує залежність температури від часу нагрівання сталевих елементів як захищених, так і незахищених від впливу високих температур.

Час нагрівання до температури T сталевого елемента, захищеного покриттям в умовах пожежі, завтовшки d_p з легкого теплоізоляційного матеріалу, можна визначити з виразу [8]:

$$t = 40(T - 140) \left[\frac{d_p A_m}{\lambda_p V_m} \right]^{0,77} . \quad (11)$$

Це час більш тривалого порівняно з часом нагріву до температури T незахищеного елемента, який можна оцінити за допомогою виразу [8]:

$$t = 0,54(T - 50) \left[\frac{A_m}{V_m} \right]^{-0,60} . \quad (12)$$

Всі вищенаведені залежності спрощені, але дозволяють у визначених рамках правильно оцінити швидкості нагрівання сталевих елементів конструкцій в умовах пожежі.

Висновки. Короткий виклад Європейських норм ENV “EUROCOD” 3 та 9 дозволяє оцінити методичний підхід до розрахунку та проектування вогнезахисту металевих конструкцій в умовах високих температур.

На наш погляд такий підхід в певному ступені є дещо умовним, однак перевіркowi розрахунки за нормами ENV показують, що прийнята методика дозволяє з достатньою для інженерної практики надійністю оцінити швидкості нагрівання елементів будівельних конструкцій та розробити рекомендації щодо їх захисту від дії вогню.

Це не виключає використання в практиці розрахунку та проектування багатого вітчизняного досвіду, що ґрунтується на чисельних натурних вогневих випробуваннях та результатах обстеження стану будівельних конструкцій після пожежі.

1. *Design of Steel Structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design, Eurocode 3 -Part 1-2, Brussels, CEN, ENV 1993-1-2, 1995.* 2. *Design of Aluminum Structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design, Eurocode 9 -Part 1-2; Brussels, CEN, ENV 1999-1-2, 1998.* 3. *Basis of design and actions on structures – Part 1-2: Actions on structures exposed to fire Eurocode 1- Part 1-2: Brussels, CEN, ENV 1991-2-2, 1994.* 4. *Thor J. Radiation effects of fire on steel structures either without insulation or insulated by a ceiling, Bulletin N29, Division of Structural Mechanics and Concrete Construction, Lund Institute of Technology, Lund, 1972.* 5. *European Recommendations for the fire safety of steel structures. Calculation of the fire resistance of load bearing elements and structural assemblies exposed to the standard fire, ECCS – Technical Committee 3, European Convention for Constructional Steelwork, Amsterdam-Oxford – New York, 1983.* 6. *Murzewki J. Pelzanie elementow konstrukcji stalowych w temperaturach pożarowych, XLV Konferencja Naukowa KILiW PAN I KN PZITB, Krynica’99, Referaty T.3, Wroclaw-Krynica, 1999, S.103-110.* 7. *Explanatory Document for ECCS N 89, “Euro-Nomogram” Fire resistance of steel structures, ECCS-Technical Committee 3- Fire Safety of Steel Structures, European Convention for Constructional Steelwork, Brussels, Belgium, 1996.* 8. *Wider Vocational Initiative in Structural Steelwork, CD-ROM, Pilot for Beta- site testing, The Steel Constructions Institute, Ascot, UK, 1999 (version 1), 2001(version 2).* 9. *Skowronski W. Teoria bezpieczeństwa pożarowego konstrukcji metalowych. – Warszawa:Wydaw. Naukowe PWN, 2001. – 208 s.*