

dr inż. Paweł Sulik^{1*)}
mgr inż. Piotr Turkowski¹⁾
mgr inż. Marek Łukomski¹⁾

Porównanie metod oceny odporności ogniowej konstrukcji stalowych

Comparison of assessment methods of fire resistance of steel structures

DOI: 10.15199/33.2015.11.19

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań odporności ogniowej belek stalowych i porównano je z uzyskanymi z analizy numerycznej oraz uproszczonej metody obliczeniowej wg PN-EN 1993-1-2. Czas osiągnięcia kryteriów nośności ogniowej w każdej z zastosowanych metod był podobny, przy czym najdłuższy w badaniach eksperymentalnych, co potwierdza skuteczność metod analitycznych, jednocześnie wskazując, że pozwalają najdokładniej ocenić odporność ogniową. Ponadto w artykule zamieszczono odpowiedzi na najczęściej zadawane pytania i związane z zabezpieczaniem konstrukcji stalowych.

Słowa kluczowe: konstrukcje stalowe, odporność ogniowa, nośność ogniowa, uproszczone metody obliczeniowe, metody numeryczne, badania ogniowe, zabezpieczenia ogniochronne.

Abstract. The work presents results of fire tests conducted on steel beams, compared with numerical analysis and simplified calculation methods given in PN-EN 1993-1-2. The resulting fire resistance time in each method was comparable, wherein it was the longest in the experimental tests, which confirms effectiveness of analytical methods, while pointing to testing as the most accurate fire resistance assessment method. Moreover, a short FAQ section is given, concerning fire protecting of steel structures.

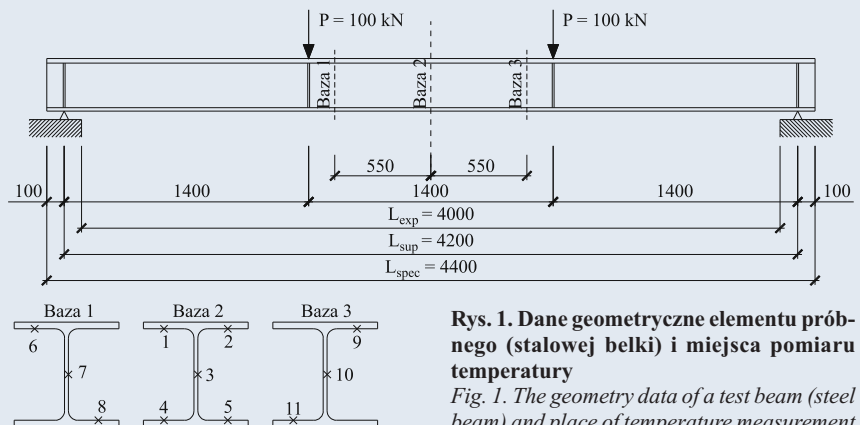
Keywords: steel structures, fire resistance, loadbearing capacity, simplified calculation methods, numerical methods, fire resistance tests, fire protection systems.

W listopadzie 2014 r., w Laboratorium Badań Ogniowych Instytutu Techniki Budowlanej (ITB), w ramach międzylaboratoryjnych badań porównawczych, prowadzonych przez EGOLF (European Group of Organisations for Fire Testing, Inspection and Certification), wykonano dwa badania odporności ogniowej belek stalowych, których wyniki porównano z uzyskanymi metodą obliczeniową podaną w PN-EN 1993-1-2 [1] oraz metodą numeryczną.

Badania dwóch identycznych belek HEB 300, ze stali S460, przeprowadzono zgodnie z PN-EN 1365-3 [2], przy nagrzewaniu wg krzywej standardowej. Na rysunku 1 podano wymiary geometryczne belek oraz wskazano miejsca pomiaru temperatury.

Temperatura stali

Temperaturę średnią stali obliczono jako średnią arytmetyczną temperatury stali półki dolnej, górnej i środknika. W metodzie obliczeniowej temperaturę nieostłoniętych elementów stalowych określono, zgodnie z PN-EN 1993-1-2 [1], wykorzystując wzór:



Rys. 1. Dane geometryczne elementu próbnego (stalowej belki) i miejsca pomiaru temperatury

Fig. 1. The geometry data of a test beam (steel beam) and place of temperature measurement

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} [(A_m/V)/c_a \rho_a] \dot{h}_{net,d} \Delta t \quad (1)$$

gdzie:

k_{sh} – współczynnik poprawkowy uwzględniający efekt zacienienia równy 0,5625 (informacyjnie obliczenia przeprowadzono również przy $k_{sh} = 1,0$);

A_m/V – nominalny wskaźnik ekspozycji przekroju nieostłoniętego HEB 300 równy 96 m^{-1} ;

c_a – ciepło właściwe stali zmienne wraz z temperaturą zgodnie z PN-EN 1993-1-2 [6];

$\dot{h}_{net,d}$ – wartość obliczeniowa przyjętego strumienia ciepła określona na jednostkę powierzchni zgodnie z PN-EN 1991-1-2 [4] (punkt 2.2);

Δt – krok czasowy równy 1 s;

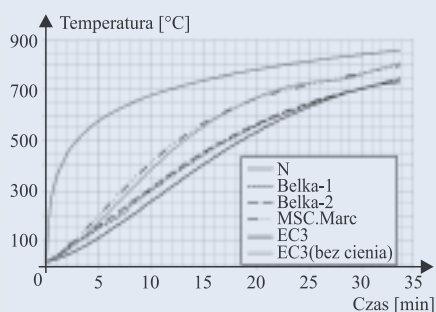
ρ_a – gęstość stali równa 7850 kg/m^3 .

Natomiast analizę numeryczną przeprowadzono na trójwymiarowym modelu belki w programie MSC. Marc 2013.1. Uwzględniono zmieniające się pod wpływem temperatury właściwości me-

chaniczne i termiczne stali (na podstawie PN-EN 1993-1-2 [1]). Zastosowano warunki brzegowe 3. rodzaju konwekcyjno-radiacyjne. Analizę sprzężoną termomechaniczną (ang. *coupled analysis*) przeprowadzono w stu dwudziestu krokach czasowych, oddziałujących przez 15 s. W każdej z trzech metod oddziaływanie pożaru odpowiadało nominalnej krzywej standardowej temperatura-czas (N), zdefiniowanej w PN-EN 1363-1 [3] i PN-EN 1991-1-2 [4]. Wykresy temperatury krzywej nagrzewania, temperatury średniej stali uzyskanej w badaniach, temperatury obliczonej numerycznie oraz zgodnie z PN-EN 1993-1-2 [1] przedstawiono na rysunku 2.

¹⁾ Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Badań Ogniowych

^{*)} Autor do korespondencji:
e-mail: p.sulik@itb.pl



Rys. 2. Wykres temperatury krzywej nargzewania (N) i średniej temperatury stali zarejestrowanej w badaniach (Belka-1, Belka-2), obliczonej wg PN-EN 1993-1-2 [1], uwzględniając efekt zacienienia $k_{sh} = 0,5625$ (EC3) i bez efektu zacienienia $k_{sh} = 1,0$ (EC3 – bez cienia), i obliczonej w analizie numerycznej (MSC.Marc)

Fig. 2. Standard temperature curve (N) and average steel temperature recorded in the study (Beam-1, Beam-2), calculated in accordance with EN 1993-1-2 [1] having regard to the shadow effect of the $k_{sh} = 0,5625$ (EC3) and without the shadow effect $k_{sh} = 1,0$ (EC3 – no shadow), and calculated in numerical analysis (MSC.Marc)

Nośność ogniowa

Wartości obliczeniowe efektu oddziaływań w pożarowej sytuacji projektowej, wyznaczone z uwzględnieniem ciężaru własnego belki stalowej, bloków z betonu komórkowego i belki obciążeniowej wyniosły:

- maksymalny moment zginający $M_{fi,d} = 145$ kNm;
- maksymalna siła ścinająca $V_{fi,d} = 103$ kN.

Nośność elementu obliczona zgodnie z PN-EN 1993-1-1 [10] i PN-EN 1993-1-2 [1], w chwili $t = 0$ wyniosła:

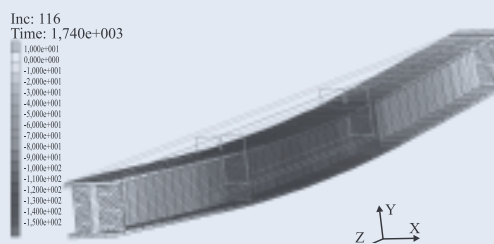
- na zginanie $M_{fi,0,Rd} = 693$ kNm;
 - na ścinanie $V_{fi,0,Rd} = 1260$ kN;
- natomiast wskaźniki wykorzystania nośności elementu w chwili $t = 0$ osiągnęły wartość:

- na zginanie $\mu_0 = M_{fi,d}/M_{fi,0,Rd} = 145/693 = 0,209$, stąd temperatura krytyczna $\theta_{a,cr} = 718$ °C;
- na ścinanie $\mu_0 = V_{fi,d}/V_{fi,0,Rd} = 103/1260 = 0,082$, stąd temperatura krytyczna $\theta_{a,cr} = 859$ °C.

W związku z tym, że wartość smukłości względnej zależy od temperatury, przeprowadzono iteracyjne sprawdzenie wartości temperatury krytycznej, do osiągnięcia zbieżności, ostatecznie wyznaczając wartość temperatury krytycznej jako $\theta_{a,cr} = 705$ °C. Podobne sprawdzenie można przeprowadzić

w przypadku wytrzymałości, tj. ustalając nośność belki zginanej w kolejnych czasach t trwania pożaru, co przedstawiono w tabeli 1.

Nośność ogniowa belki, obliczona zgodnie z PN-EN 1993-1-2 [1], wynosi 29 min i 55 s. W odniesieniu do badanych belek, wartości graniczne mają wartość: $D = L^2/400d = 147$ mm, $dD/dt = L^2/9000d = 6,53$ mm/min. Czas przekroczenia obu kryte-



Rys. 3. Widok modelu numerycznego zdeformowanej belki w przypadku $t = 29$ min
Fig. 3. View of the numerical model of deformed beams at $t = 29$ min

Tabela 1. Temperatura krytyczna badanej belki zginanej

Table 1. Critical temperature of steel of tested beam

Czas t [min]	$\theta_{com} = \theta_a$ [°C]	$k_{y,0}$	$k_{E,0}$	$\sqrt{k_{y,0}/k_{E,0}}$	$\lambda_{LL,0}$	$\phi_{LL,0}$	$\lambda_{LL,0}$	$M_{b,fi,Rd}$ [kN]
27	666	0,312	0,191	1,278	0,559	0,786	0,747	200,4
28	680	0,278	0,191	1,206	0,528	0,762	0,763	182,3
29	693	0,247	0,143	1,314	0,575	0,799	0,739	156,9
30	706	0,224	0,128	1,323	0,579	0,802	0,737	141,9
31	715	0,212	0,128	1,287	0,563	0,789	0,745	135,8
32	724	0,201	0,120	1,294	0,566	0,792	0,743	128,5
33	730	0,194	0,118	1,282	0,561	0,788	0,746	124,4

riów określa klasę odporności ogniowej elementu, zgodnie z PN-EN 13501-2 [5]. Warto dodać, że podstawowa norma badawcza PN-EN 1363-1 [3] podaje, że osiągnięcie nośności ogniowej R następuje już po uzyskaniu jednego z kryteriów. Klasyfikację badanych belek w zakresie odporności ogniowej przedstawiono w tabeli 2. W tabeli 3 porównano wartości ugięcia i szybkości narastania ugięć belek zarejestrowane w badaniach z wynikami otrzymanymi w obliczeniach numerycznych. Widok zdeformowanej belki w chwili uplastycznienia przekroju ($t = 29$ min) przedstawiono na rysunku 3.

Wszystkie trzy metody oceny odporności ogniowej, tj. badanie odporności ogniowej, obliczenia wg normy PN-EN 1993-1-2 [1] oraz analizy nu-

Tabela 2. Klasyfikacja w zakresie odporności ogniowej

Table 2. Fire resistance classification

Badany element	Czas osiągnięcia kryteriów nośności ogniowej		Klasa odporności ogniowej	
	D	dD/dt	wg PN-EN 13501-2	wg PN-EN 1363-1
Belka-1	33 min 15 s	28 min 15 s	R 30 (33,25 min)	R 20 (28,25 min)
Belka-2	33 min 15 s	28 min 0 s	R 30 (33,25 min)	R 20 (28,00 min)

mericzne, dały zbliżone wyniki (tabela 4). Warto zauważyć, że metoda eurokodowa i analiza numeryczna o ok. 10% zaniżyły rzeczywistą odporność ogniową uzyskaną w badaniach, co stawia je po bezpiecznej stronie. Z punktu widzenia klasyfikacji tych elementów jest to jednak różnica całej klasy.

Odpowiedzi na najczęściej zadawane pytania

W najnowszym poradniku [6] z serii wydawniczej „Projektowanie wg Eurokodów” Instytutu Techniki Budowlanej zamieszczono, w formie pytań i odpowiedzi, informacje dotyczące interpretacji zapisów aprobat technicznych w odniesieniu do zabezpieczeń konstrukcji stalowych. Zaprezentujemy niektóre z nich. Jednocześnie autorzy poradnika zachęcają do kontaktu i zadawania kolejnych pytań, nie tylko dotyczących konstrukcji stalowych.

Pytanie 1. W aprobacie podano jedynie tablice dotyczące grubości zabezpieczeń belek oraz słupów. W jaki sposób wyznaczyć grubość zabezpieczenia:

- słupa ściskanego mimośrodowo?
- elementów rozciąganych – np. pasów i krzyżulców w kratownicy?
- prętów, płaskowników i elementów ażurowych?

Tabela 3. Porównanie ugięcia i szybkości narastania ugięcia belek zmierzonych podczas badań i obliczonych numerycznie

Table. 3. Comparison of beam's deflection and rise of deflection values, calculated and recorded during tests

Czas [min]	Ugięcie D [mm]			Szybkość narastania ugięcia dD/dt [mm/min]		
	D-1	D-2	D-num	dD/dt-1	dD/dt-2	dD/dt-num
27	38,45	40,36	59,57	3,73	4,65	5,41
28	44,24	46,52	71,80	5,79	6,16	12,23
29	53,07	56,19	121,73	8,83	9,67	49,93
30	65,26	69,6	Uplastycznienie, brak nośności	12,19	13,41	Uplastycznienie, brak nośności
31	81,93	87,95		16,67	18,35	
32	105,08	111,32		23,15	23,37	
33	136,37	137,29		31,29	25,97	
33,25	143,84	144,06		32,06	26,34	

Tabela 4. Porównanie wynikowej odporności ogniowej belki zginanej HEB 300

Table. 4. Comparison of final fire resistance classification of HEB 300 beam

	Badania wg PN-EN 1365-3 i klasyfikacja wg PN-EN 13501-2	Obliczenia wg PN-EN 1993-1-2	Analiza numeryczna
Czas do zniszczenia	33 min 15 s	29 min 55 s	29 min 0 s
Klasa odporności ogniowej	R 30	R 20	R 20

Odpowiedź: Ad a) – jeśli w aprobacie podano osobne tablice dla belek i słupów, to zaleca się przyjęcie większej grubości zabezpieczenia; **Ad b)** – jeśli skuteczność ogniochronna systemu była oceniana na podstawie normy PN-ENV 13381-4:2004 [7], to elementy rozciągane mogą być zabezpieczane na podstawie tablic grubości zabezpieczenia słupów lub przekrojów otwartych; jeśli natomiast badania przeprowadzono zgodnie z PN-EN 13381-4:2013-09 [8] lub PN-EN 13381-8:2013-09 [9], to wymagana jest dodatkowa analiza, o ile w aprobacie nie podano odpowiednich zapisów lub tablic określających przydatność do stosowania w przypadku elementów rozciąganych. **Ad c)** – zakres stosowania wyników badań skuteczności ogniochronnej powłok pęczniejących, mas natryskowych i okładzin płytowych, przeprowadzonych zgodnie z PN-ENV 13381-4:2004 [7], PN-EN 13381-4:2013-09 [8] i PN-EN 13381-8:2013-09 [9] nie obejmuje prętów, płaskowników i elementów z otworami w środku.

Pytanie 2. W aprobacie podano osobne tablice grubości zabezpieczeń

belek oraz słupów. Czy można korzystać z tych tablic w celu wyznaczania grubości zabezpieczenia elementów nagrzewanych np. 2-stronnie, 1-stronnie lub częściowo?

Odpowiedź. Tak. Należy jedynie określić typ elementu oraz wskaźnik ekspozycji przekroju odpowiednio do sytuacji, w jakiej zostanie on wbudowany i będzie narażony na działanie ognia.

Pytanie 3. Czy można łączyć różne systemy zabezpieczeń ogniochronnych, np. słupy zabezpieczyć masą natryskową, belki farbą ogniochronną, a stropy sufitem podwieszonym?

Odpowiedź. Tak, aczkolwiek zaleca się ostrożność w stosowaniu tego typu rozwiązań. Ponadto należałoby przygotować dokumentację (w postaci rysunków) zabezpieczenia węzłów konstrukcji, w których łączy się różne systemy ogniochronne.

Pytanie 4. Czy można zabezpieczyć jeden element konstrukcyjny kilkoma systemami zabezpieczeń ogniochronnych, np. jedną połowę belki farbą ogniochronną, a drugą masą natryskową?

Odpowiedź. Nie, chyba że dany system ogniochronny dopuszcza taką możliwość. Autorom poradnika nie są znane takie systemy.

Pytanie 5. Czy elementy stalowe pokryte powłokami pęczniejącymi można dodatkowo zabezpieczyć węłową mineralną, masą ogniochronną lub innym materiałem dobrze przylegającym, by podnieść klasę odporności ogniowej?

Odpowiedź. Nie. Takie rozwiązanie nie ma sensu, gdyż powłoki pęczniejące potrzebują przestrzeni do spęcz-

nienia, w przeciwnym razie nie będą pełniły swojej funkcji. W aprobacie technicznej zwykle podane są parametry dotyczące wysokości i ciśnienia pęcznienia, np. 1 mm farby pęczniejącej może osiągnąć grubość nawet 100 mm.

Pytanie 6. Czy terminy „aktywne zabezpieczenia”, „termoaktywne zabezpieczenia”, „reaktywne zabezpieczenia” oznaczają to samo w odniesieniu do zestawów farb ogniochronnych?

Odpowiedź. Tak. Różne terminy są wynikiem zmian w tłumaczeniach norm i innych dokumentów europejskich. Obecnie proponowanym określeniem jest zabezpieczenie reaktywne, co pozwala uniknąć pomyłki z czynnymi (aktywnymi) środkami ochrony przeciwpożarowej, tj. tryskaczami, systemami detekcji pożaru, opisanymi w normie PN-EN 1991-1-2 [4].

Literatura

- [1] PN-EN 1993-1-2:2007. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-2: Reguły ogólne. Obliczanie konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe.
- [2] PN-EN 1365-3:2002. Badania odporności ogniowej elementów nośnych. Część 3: Belki.
- [3] PN-EN 1363-1:2012. Badania odporności ogniowej. Część 1: Wymagania ogólne.
- [4] PN-EN 1991-1-2:2006. Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-2: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania na konstrukcje w warunkach pożaru.
- [5] PN-EN 13501-2+A1:2010. Klasyfikacja ogniowa wyrobów budowlanych i elementów budynków. Część 2: Klasyfikacja na podstawie wyników badań odporności ogniowej, z wyłączeniem instalacji wentylacyjnej.
- [6] Turkowski P., Sulik P., Projektowanie konstrukcji stalowych z uwagi na warunki pożarowe według Eurokodu 3, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2015.
- [7] PN-ENV 13381-4:2004. Metody badawcze ustalania wpływu zabezpieczeń na odporność ogniową elementów konstrukcyjnych. Część 4: Zabezpieczenia elementów stalowych.
- [8] PN-EN 13381-4:2013-09. Metody badań w celu ustalania wpływu zabezpieczeń na odporność ogniową elementów konstrukcyjnych. Część 4: Bierne zabezpieczenia elementów stalowych.
- [9] PN-EN 13381-8:2013-09. Metody badań w celu ustalania wpływu zabezpieczeń na odporność ogniową elementów konstrukcyjnych. Część 8: Termoaktywne zabezpieczenia elementów stalowych.
- [10] PN-EN 1993-1-1:2006. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.

Przyjęto do druku: 01.09.2015 r.