

dr inż. Piotr Turkowski<sup>1)</sup>  
ORCID: 0000-0002-0020-0091

# Odporność ogniowa stalowych elementów rozciąganych zabezpieczonych ogniochronnie

## *Fire resistance of tensile fire-protected steel elements*

DOI: 10.15199/33.2022.11.59

**Streszczenie.** W artykule zaprezentowano wyniki badania odporności ogniowej stalowego kształtownika o profilu IPE przy działaniu siły rozciągającej i podobnego elementu nieobciążonego. Elementy zabezpieczono ogniochronnie farbą pęczniejącą. W trakcie badania prowadzono pomiar temperatury obu elementów stalowych i wydłużenia elementu obciążonego. Wpływ obciążenia ustalono na podstawie czasu osiągnięcia kolejnych wartości temperatury projektowej, za pomocą tzw. współczynnika korekcyjnego. Uzyskane wyniki pokazują, że nieskuteczność systemu ogniochronnego, określona na elementach zginanych, jest znacznie większa niż możliwa do osiągnięcia na elementach rozciąganych. W celu określenia, jak duża jest to różnica, konieczne jest przeprowadzenie badań odporności ogniowej. Obliczony spadek skuteczności ogniochronnej wyniósł ok. 50%, co wskazuje na konieczność mocniejszych, niż wskazane w niemieckich przepisach, ograniczeń stosowania izolacji na elementach rozciąganych.

**Słowa kluczowe:** element rozciągany; odporność ogniowa; zabezpieczenie ogniochronne; farby pęczniejące.

**Abstract.** This study presents the results of fire resistance tests of an IPE steel profile under tensile force, and of a similar unloaded element. The elements were protected against fire with intumescent paint. During the test, the temperature of both steel elements and the elongation of the loaded element were measured. The effects of load were determined based on times to reach specific design temperatures with the use of the so-called "correction factor". The obtained results demonstrate that a direct transfer of results from fire protection system effectiveness tests conducted on bent elements onto tensile ones is impossible. The calculated reduction in fire protection effectiveness was approx. 50%, which points to the need for stricter restrictions on the application of fire protection onto tensile elements than those present in German legislation.

**Keywords:** tensile element; fire resistance; fire protection; intumescent paints.

Elementy rozciągane znajdują się obecnie praktycznie w każdej konstrukcji stalowej. Mogą to być części kratownic, stężenia, wieszaki lub inne elementy wsporcze. Przekroje tych elementów są zróżnicowane, od kształtowników gorącwalcowanych o przekroju otwartym (dwuteowniki, ceowniki, teowniki, etc.), po przekroje zamknięte okrągłe i prostokątne lub pręty oraz płaskowniki. Elementy te, tak jak wszystkie inne stalowe, muszą być zabezpieczone w celu zachowania nośności w warunkach pożarowych [1 – 6].

W odniesieniu do elementów o bardzo małym przekroju, tj. prętów i płaskowników o wymiarach do 130 mm, europejski system normatywny przedstawił w tym roku nową część normy do ustalania wpływu zabezpieczeń na odporność ogniową tych elementów (EN 13381-10:2020 [7]) i trwają dalsze prace nad kolejną częścią (prEN 13381-

XX:V4). Elementy większe, wykonane z kształtowników dwuteowych lub innych o przekroju otwartym lub zamkniętym, zostały w 2013 r. wykluczone z zakresu normy EN 13381-4:2002 [8]. Wskazano jedynie w dwóch nowelizacjach tej normy (EN 13381-4:2013 [9] i EN 13381-8:2013 [10]) na konieczność indywidualnej analizy systemu zabezpieczenia ogniochronnego pod kątem skuteczności na elementach rozciąganych. Rozdzielenie norm przyniosło również możliwość oceny pasywnych materiałów ogniochronnych na elementach o przekroju zamkniętym bez konieczności badań, podczas gdy zabezpieczenia reaktywne nadal ich wymagają [11].

Przypuszcza się, że zabezpieczenie ogniochronne elementów rozciąganych o dużych wymiarach (ponad 100 mm), za pomocą farb pęczniejących, mas natryskowych czy płyt, może zapewnić nośność ogniową na co najmniej takim samym poziomie, jak analogicznych elementów zginanych i ściskanych. W celu potwierdzenia tej hipotezy za-

projektowano specjalne badanie odporności ogniowej. W artykule przedstawiono wyniki badania odporności ogniowej stalowego elementu rozciąganego wykonanego z kształtownika gorącwalcowanego IPE 200, zabezpieczonego systemem farb pęczniejących. Uzyskane pomiary temperatury odniesiono do analogicznego elementu nieobciążonego i na tej podstawie sformułowano wnioski.

### Uproszczona metoda obliczeniowa

Eurokody podają uproszczoną metodę obliczeniową na potrzeby projektowania elementów poddanych rozciąganiu, która z uwagi na brak możliwości utraty stateczności wskutek wyboczenia i zwiczenia, sprowadza się do sprawdzenia warunku naprężeń w stali. Obliczeniowa nośność  $N_{fi,0,Rd}$  elementu rozciąganego o równomiernej temperaturze  $\theta_a$  wg EN 1993-1-2 [12] jest określona wzorem:

$$N_{fi,0,Rd} = k_{y,0} N_{Rd}(\gamma_{M,0}/\gamma_{M,fi}) \quad (1)$$

<sup>1)</sup> Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Badań Ogniowych; p.turkowski@itb.pl

gdzie:

$k_{\gamma,\theta}$  – współczynnik redukcji granicy plastyczności stali w temperaturze  $\theta_a$  osiągniętej w czasie trwania pożaru  $t$ ;

$N_{Rd}$  – obliczeniowa nośność przekroju równa  $N_{pl,Rd}$  w normalnej temperaturze wg EN 1993-1-1 [13];

$\gamma_{M,0}$  – współczynnik częściowy dotyczący nośności przekroju poprzecznego równy 1,00;

$\gamma_{M,fi}$  – współczynnik częściowy dotyczący właściwości materiału w sytuacji pożarowej (wartość zalecana 1,00).

Dalsze projektowanie elementu rozciąganego z uwagi na warunki pożarowe sprowadza się do bezpośredniego porównania oddziaływania  $E_{fi,d}$  z obliczoną nośnością  $N_{fi,\theta,Rd}$  lub do obliczenia temperatury krytycznej stali, wg wzoru [12]:

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln[1/0,9674\mu_0^{3,8333} - 1] + 482 \quad (2)$$

gdzie:

$\mu_0$  – wskaźnik wykorzystania nośności w czasie  $t = 0$ .

W przypadku elementów rozciąganych współczynnik  $\eta_{fi}$  jest równy wskaźnikowi  $\mu_0$ . Temperatura krytyczna stali  $\theta_{a,cr}$  odpowiadająca 100% wykorzystaniu nośności na rozciąganie elementu w warunkach normalnych, przy współczynniku redukcyjnym dla obliczeniowego obciążenia w przypadku pożaru  $\eta_{fi} = 0,65$ , obliczona wg wzoru (2) wynosi  $540^\circ\text{C}$ , a przy  $\eta_{fi} = 0,50$  jest to  $585^\circ\text{C}$ . Ta uproszczona metoda obliczeniowa została zweryfikowana w badaniach odporności ogniowej w pełnej skali, a także symulacjami numerycznymi z wykorzystaniem modelu trójwymiarowego i połączonej analizy termomechanicznej. Wykazano dużą zgodność między wszystkimi trzema metodami oceny [14].

Metoda obliczeniowa, w przeciwieństwie do metod badania skuteczności ogniochronnej, w żaden sposób nie uwzględnia wpływu deformacji elementu zarówno na nośność, jak i na skuteczność ogniochronną systemu zabezpieczenia ogniochronnego. Przyczepność izolacji na elemencie odkształconym do ugięcia granicznego wynoszącego  $L_{sup}/30$ , gdzie  $L_{sup}$  – rozpiętość elementu, jest kluczowym aspektem w ocenie zabezpieczenia wg norm EN 13381-4 [9] i EN 13381-8 [10]. Związany z nią współczynnik korekcyjny silnie wpływa na obliczeniową grubość izolacji ogniochronnej.

Można sądzić, że elementy rozciągane, które nie są narażone na utratę stateczności i podlegają tylko wydłużeniu, powin-

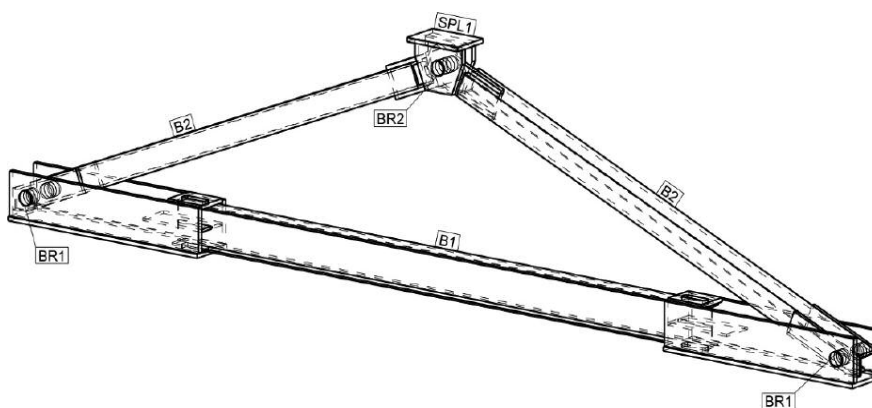
ny zapewniać dobre warunki pracy izolacji ogniochronnej, zbliżone do występujących na elementach nieobciążonych. Jak jednak wykazano w [15 – 17], tak nie jest. Warunki te są nawet mniej korzystne niż w części rozciąganej elementu zginanego. W przypadku stalowych prętów poddanych rozciąganiu, zabezpieczonych zestawem farb pęczniających, wskazują na znaczny spadek skuteczności izolacji ogniochronnej przy wysokich stopniach wyężenia. W związku z tym w regulacjach niemieckich wprowadzono ograniczenie stopnia wykorzystania nośności elementów rozciąganych zabezpieczanych ogniochronnie do  $\mu_0 = 0,50$ , bez potwierdzenia ich skuteczności w badaniach [18 – 20].

### Konfiguracja badawcza

**Element rozciągany.** Zaprojektowano konstrukcję stalową, umożliwiającą wywołanie siły rozciągającej w elemencie próbnym o żądanej wielkości, przykładając siłę ściskającą w innej jego części. Element próbny został zaprojektowany jako konstrukcja w kształcie trójkąta o całkowitej szerokości 5 m oraz wysokości 1,22 m, o przegubowym schemacie statycznym. Wymiary te były podyktowane konstrukcją pieca i dostępną przestrzenią pod układem przekazywania obciążenia. W prezentowanym układzie statycznym, siła pionowa  $P$  działająca na element SPL1 wywołuje siłę rozciągającą  $P_{B1}$  w elemencie B1 równą  $P_{B1} = 1,25 \times P$  (rysunek 1). Długość elementu B1, w postaci gorącowałcowanego kształtownika o przekroju otwartym IPE 200, wynosiła 3160 mm,

uwzględniając połączenia z pozostałą częścią konstrukcji o długości 200 mm po każdej stronie. Część narażona na działanie temperatury miała długość  $L_{exp} = 2760$  mm. Przekrój ten jest najbardziej zbliżony kształtem do typowej belki obciążonej (IPE 400) wybieranej do badań wg EN 13381-4 [9] i EN 13381-8 [10], przy jednoczesnej możliwości uzyskania maksymalnego wyężenia elementu w tym układzie statycznym. Zastosowanie kształtownika IPE 400 nie było możliwe ze względu na ograniczenia konstrukcyjne zastosowanego układu wymuszone przez geometrię stanowiska badawczego. Pozostałe elementy musiałyby bowiem zostać znacznie powiększone, a układ gniazd w ścianach pieca to unie możliwiał.

Podczas przykładania obciążenia na zimno konieczne okazało się ograniczenie siły, ze względu na deformację górnego przegubu konstrukcji. Ostatecznie przyłożono siłę o wartości 100 kN, co odpowiada sile rozciągającej w elemencie B1 równej 125 kN. Badaniu poddano również krótki słupek nieobciążony UB1 wykonany z tego samego kształtownika. Wskaźnik ekspozycji przekroju zabezpieczonego wynosił  $A_p/V = 270 \text{ m}^{-1}$ , a pole nominalne przekroju stalowego  $A = 28,5 \text{ cm}^2$ , natomiast granica plastyczności stali elementu B1 –  $R_s = 397 \text{ MPa}$ . Nośność elementu wynosiła zatem  $N_{pl,Rd} = 1131,5 \text{ kN}$ , a wskaźnik wykorzystania nośności  $\mu_0 = 0,11$ . Obliczona zgodnie z EN 1993-1-2 [12] i podanymi wcześniej informacjami, temperatura krytyczna elementu B1 wyniosła  $\theta_{a,cr} = 815^\circ\text{C}$ .



Rys. 1. Schemat ogólny układu konstrukcyjnego

Fig. 1. General arrangement of the structural system

**Zabezpieczenie ogniochronne** konstrukcji stalowych może być bierne i reaktywne. **Materiały bierne** to te, które nie zmieniają swojej postaci fizycznej podczas ogrzewania i zapewniają ochronę dzięki właściwościom fizycznym lub cieplnym. Z kolei działanie **materiałów reaktywnych** polega na reakcjach chemicznych wywołujących ich pęcznienie lub endotermiczną reakcję chłodzenia ablacyjnego, najczęściej w formie cienkich powłok malarskich [21, 22].

**Farby pęczniące to materiały reaktywne**, które aktywują się w temperaturze powyżej 100°C, a farby ogólnodostępne w temperaturze 200 – 300°C [23]. Swoje właściwości ogniochronne zawdzięczają pęcznieniu, czasami nawet ponadstukrotnemu w porównaniu z suchą warstwą (DFT), powodującemu zamknięcie gazów w pianie i w ten sposób tworzą barierę przed działaniem ognia. Modelowanie numeryczne farb, opis zjawisk w nich zachodzących i ich wpływ na odporność ogniową jest przedmiotem ciągłych badań [24, 25]. Do badań wybrano powłokę reaktywną pęczniącą, z uwagi na jej największą podatność na obniżenie skuteczności ogniochronnej wskutek deformacji próbki. Ze względu na stałą wartość siły rozciągającej w całym elemencie, nawet pojedyncze uszkodzenie izolacji ogniochronnej może skutkować podwyższeniem temperatury w przekroju, a w dalszej kolejności prowadzić do utraty nośności. Zmierzona grubość izolacji na elemencie rozciągany B1 wynosiła 2,659 mm, a na elemencie nieobciążonym UB1 – 2,168 mm. Izolacja o tej grubości, zgodnie z aprobatą techniczną wyrobu, powinna zapewnić utrzymanie temperatury stali poniżej temperatury krytycznej przez co najmniej 90 min (element B1).

**Warunki badania.** Badania wykonano w Laboratorium Badań Ogniowych Instytutu Techniki Budowlanej w Pionkach, w komorze K1 pieca CHIMERA, wykonanej z konstrukcji stalowej o ścianach izolowanych wełną ceramiczną o małej przewodności cieplnej i dużej emisyjności powierzchni. Komora ma wymiary 4,30 × 3,30 × 3,70 m (długość × szerokość × wysokość) i wyposażona jest w 10 palników gazowych o mocy

maksymalnej 6,2 MW, umieszczonych na jej krótszych ścianach.

Nagrzewanie prowadzono zgodnie z krzywą standardową temperatura/czas określoną w EN 1363-1 [26], dotrzymując postawionych tam wymagań dotyczących parametrów i tolerancji wyposażenia badawczego, warunków nagrzewania, temperatury otoczenia, ciśnienia w piecu i obciążenia. Badanie trwało 62 min i zostało zakończone ze względu na szybko zwiększające się wydłużenie elementu.

## Wyniki badania

Orientacja elementu obciążonego B1 i elementu referencyjnego UB1 była w badaniu różna, przy czym nie miało to wpływu na uzyskane wyniki. W powszechnie stosowanych metodach oceny systemów zabezpieczenia ogniochronnego konstrukcji stalowych [9, 10] możliwe jest przenoszenie tzw. współczynników korekcyjnych ustalonych na elementach belkowych do elementów słupowych 1 : 1.

Utratę nośności ogniowej określono kryterium własnym, jako wydłużenie elementu  $E_{lim}$  ponad 1/100 jego długości po przyłożeniu pełnego obciążenia, a przed rozpoczęciem nagrzewania, czyli 27,6 mm. Kryterium przyjęto arbitralnie na podstawie doświadczeń z wielu badań odporności ogniowej, w których osiągnięcie podobnych wartości przemieszczeń oznaczało nadchodzące zniszczenie elementu. Kryterium to zostało osiągnięte po czasie badania  $t = 52,00$  min. Temperatura stali w obu

elementach osiągała kolejne progi temperatury projektowej szybciej, niż wynikałoby to z dokumentacji technicznej systemu ogniochronnego. Elementy próbne przed badaniem pokazano na fotografii 1, a belkę B1 po badaniu na fotografii 2. Oględziny elementów próbnych po badaniu nie ujawniły jednego miejsca awarii. Nie zaobserwowano miejsca zwężenia przekroju czy wyciągnięcia stali. Należy uznać, że wydłużeniu uległ cały ele-



Fot. 1. Belka B1 i element UB1 przed badaniem

Photo 1. B1 beam and UB1 element before the test

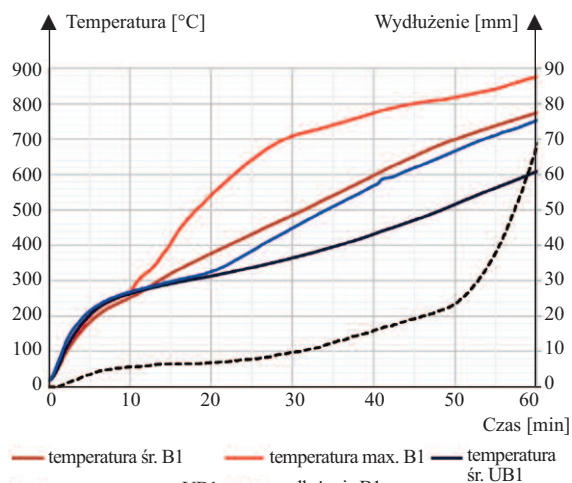


Fot. 2. Belka B1 po badaniu

Photo 2. B1 beam after the test

ment. Na rysunku 2 przedstawiono wykres temperatury i ugięcia elementów próbnych, a dokładne wartości zarejestrowanej temperatury podano w tabeli 1.

Porównując czas do osiągnięcia określonej temperatury obliczeniowej w zakresie 350 – 700°C, w sposób podobny do opisanego w EN 13381-8:2013 [10], ustalono wartości współczynników korekcyjnych  $k$  elementów rozciąganych (tabela 2). W obliczeniach uwzględniono liniową korekcję ze względu na różnicę w grubości izolacji.



Rys. 2. Wyniki badania temperatury

Fig. 2. Test results temperatures



**Tabela 1. Temperatura elementów stalowych**

*Table 1. Temperature of steel elements*

Miejsce pomiaru	Temperatura [°C] po czasie badania					
	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
B-1 średnia	252,0	376,9	484,7	597,2	699,4	773,7
B-1 maks.	270,2	542,5	708,7	773,6	817,7	876,1
UB-1 średnia	263,4	313,0	364,3	431,7	515,7	607,4
UB-1 maks.	268,8	325,3	448,6	568,3	666,5	751,9

**Tabela 2. Współczynnik korekcyjny k w przypadku temperatury projektowej**

*Table 2. Correction factor k for the design temperature*

Stosunek czasu osiągnięcia temperatury obliczeniowej między elementem obciążonym i nieobciążonym, po korekcie ze względu na różnicę grubości izolacji							
350°C	400°C	450°C	500°C	550°C	600°C	650°C	700°C
0,49	0,46	0,45	0,46	0,46	0,49	0,52	0,54

## Wnioski i dyskusja

■ Obciążony element rozciągany nagrzewał się szybciej w porównaniu z nieobciążonym elementem referencyjnym, mimo takich samych warunków nagrzewania, a nawet mimo 20% grubszej izolacji ogniochronnej. Współczynniki korekcyjne wyznaczone wg zasad analogicznych do tych podanych w EN 13381-8: 2013 [10] są na poziomie 0,48. Oznacza to ponaddwukrotny spadek skuteczności izolowania na elemencie rozciągany względem elementu nieobciążonego.

■ Znacznie większa różnica między temperaturą średnią i maksymalną w elemencie rozciągany, w porównaniu z elementem nieobciążonym, przy jednoczesnym braku wyraźnego zwiększenia temperatury i obserwowanego odpadania izolacji, wskazuje na degradację materiału pod wpływem wydłużenia elementu, wpływającą na szybkość nagrzewania. Przypuszcza się, że w materiale ogniochronnym powstają rysy i pęknięcia, których efektem są lokalne gorące punkty w konstrukcji, a w dłuższym okresie następuje nawet jej odstonięcie na bezpośrednie oddziaływanie ognia.

■ Przełożenie wyników badań uzyskanych na elementach zginanych i ściskanych wg EN 13381-8:2013 [10] na elementy rozciągane o tym samym kształcie wiąże się z koniecznością zwiększenia obliczeniowych grubości izolacji współczynnikiem wynoszącym co najmniej 2,18. Współczynnik ten można ustalać indywidualnie dla każdego materiału, powtarzając proponowane badanie.

■ Ograniczenie stopnia wykorzystania nośności do  $\mu_0 = 0,50$ , obecne w niemieckich przepisach krajowych, wyda-

je się niewystarczające, gdyż wpływa ono tylko na wartość temperatury krytycznej, a nie na wymaganą grubość izolacji ogniochronnej.

■ Systemy zabezpieczenia ogniochronnego w postaci płyt i biernych mas natryskowych mogą powodować znaczne zmniejszenie wpływu deformacji zabezpieczonego elementu na szybkość jego nagrzewania. Potrzebne są dalsze badania tego typu materiałów w celu sprawdzenia hipotezy.

## Literatura

- [1] Kotsovinos K, Rackauskaite E, Deeny S. The role of transfer beams on the global structural fire response of tall steel framed buildings. *Fire Saf. J.* 2020; <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103172>.
- [2] Wang W, Kodur V. Tensile test on steels at elevated temperatures, in: *Mater. Prop. Steel Fire Cond.* 2020; <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813302-6.00003-5>.
- [3] Franssen JM. Calculation of temperature in fire-exposed bare steel structures: Comparison between ENV 1993-1-2 and en 1993-1-2, *Fire Saf. J.* 2006; <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2005.11.007>.
- [4] Sun R, Huang Z, Burgess IW. Progressive collapse analysis of steel structures under fire conditions, *Eng. Struct.* 2012; <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.10.009>.
- [5] Molkens T, Rossi B. *On the Simulation of Real Fire for Post Fire Resistance Evaluation of Steel Structures*, Springer US, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10694-020-01025-6>.
- [6] Franssen J-M, Kodur V, Zaharia R. *Designing Steel Structures for Fire Safety*, CRC Press, 2009. <https://doi.org/10.1201/9780203875490>.
- [7] CEN, EN 13381-10:2020. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 10: Applied protection to solid steel bars in tension, (2020).
- [8] CEN, ENV 13381-4:2002. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Applied protection to steel members, (2002).
- [9] CEN, EN 13381-4:2013. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of

structural members. Applied passive protection products to steel members, (2013).

[10] CEN, EN 13381-8:2013. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Applied reactive protection to steel members, (2013).

[11] Mesquita L, Piloto P, Roque S, Vaz M. Fire resistance of steel members protected with intumescent coatings, YIC2012 – First ECCOMAS Young Investig. Conf. 2012.

[12] CEN, EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3. Design of steel structures. General rules. 2005.

[13] CEN, EN 1993-1-1:2005+A1: 2014. Eurocode 3. Design of steel structures. General rules and rules for buildings. 2014.

[14] Łukowski M, Turkowski P, Roszkowski P, Papis B. Fire Resistance of Unprotected Steel Beams-Comparison between Fire Tests and Calculation Models, *Procedia Eng.* 2017; 172: 665 – 672. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.078>.

[15] Hothan S, Grundlagen zur Erweiterung des Anwendungsbereiches für reaktive Brandschutzsysteme auf Stahlbauteilen im nationalen Zulassungsverfahren, *DIBt Mitteilungen.* 2011; 42: 187 – 189. <https://doi.org/10.1002/dibt.201130046>.

[16] Häbler D, Hothan S. Numerical and experimental analysis of reactive fire protection systems applied to solid steel rods in tension, *J. Struct. Fire Eng.* 2015; 6: 275 – 282. <https://doi.org/10.1260/2040-2317.6.4.275>.

[17] Häbler M, Häbler D, Hothan S, Krüger S. Fire tests of steel tension rod systems with intumescent coating, *J. Struct. Fire Eng.* 2019; 22 – 32; <https://doi.org/10.1108/JSFE-01-2019-0005>.

[18] Stopp V, Proschek P. Reaktive Brandschutzsysteme auf Stahlbauteilen mit reiner Zugbeanspruchung, *DIBt Mitteilungen.* 2011; <https://doi.org/10.1002/dibt.201130045>.

[19] Hothan S, Häbler D. Summary of the German national regulations regarding the scope of application of intumescent (reactive) fire protection coatings on steel tension members, (2020).

[20] DIN, German proposal for determining the fire resistance of steel tension bars with fire protection systems based on mechanically loaded fire tests (NA 005-52-02 AA), (2015).

[21] Mróz K, Hager I, Korniejko K. Material Solutions for Passive Fire Protection of Buildings and Structures and Their Performances Testing, *Procedia Eng.* 2016; 151: 284 – 291. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.388>.

[22] P. Sulik, Biernie zabezpieczenia przeciwpożarowe konstrukcji, *Izolacje.* 2018; 3: 118 – 122.

[23] Anderson CE, Dziuk J, Mallow WA, Buckmaster J. Intumescent reaction mechanisms. 1985; <https://doi.org/10.1177/073490418500300303>.

[24] Lucherini A, Torero JL, Maluk C. Effects of substrate thermal conditions on the swelling of thin intumescent coatings, *Fire Mater.* 2020; 1–14. <https://doi.org/10.1002/fam.2840>.

[25] de Silva D, Bilotta A, Nigro E. Approach for modelling thermal properties of intumescent coating applied on steel members. *Fire Saf. J.* 2020; 116: 103200. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103200>.

[26] CEN, EN 1363-1:2020. Fire resistance tests. General requirements. 2020.

*Przyjęto do druku: 22.08.2022 r.*