

mgr inż. Michał Surma¹⁾

ORCID: 0009-0003-6544-6417

dr inż. Krzysztof Marcinczak^{1)*}

ORCID: 0000-0002-8789-5243

dr inż. Łukasz Radosiński²⁾

ORCID: 0000-0002-9267-1113

mgr inż. Piotr Smardz³⁾

ORCID: 0009-0002-2860-1863

dr inż. Michał Chmiel⁴⁾

ORCID: 0000-0002-7364-6529

dr inż. Aleksandra Porębska⁵⁾

ORCID: 0000-0001-6804-1341

Experimental and computational analysis of reactive fire protection for steel structural element

Analiza doświadczalno-obliczeniowa reaktywnego zabezpieczenia ogniochronnego elementu konstrukcji stalowej

DOI: 10.15199/33.2026.09.13

Abstract. This paper presents the effect of a reactive fire protection system on the temperature development of steel elements exposed to a standard fire. The comparison is based on fire tests carried out on three unloaded short columns made of IPE 200 sections and protected with a water-based intumescent coating from an undisclosed manufacturer. Three dry film thicknesses (DFT) were analysed: 0.897 mm, 1.598 mm and 1.803 mm. The paper discusses the test procedure, temperature-time relationships and the calculation results obtained in accordance with PN-EN 1993-1-2 and PN-EN 13381-8, as well as by means of the SAFIR and ELEFIR-EN software.

Keywords: steel structure; fire engineering; intumescent coating; reactive fire protection.

Streszczenie. W artykule przedstawiono wpływ reaktywnego zabezpieczenia ogniochronnego na przebieg nagrzewania elementów stalowych poddanych oddziaływaniu pożaru standardowego. Materiał porównawczy stanowią wyniki prób ogniowych trzech nieobciążonych słupów krótkich wykonanych z kształtownika IPE 200 i zabezpieczonych wodorozcieńczalną farbą pęczniącą. Analizowano trzy grubości suchej powłoki (DFT): 0,897 mm; 1,598 mm oraz 1,803 mm. Omówiono przebieg badań, zależność temperatura-czas oraz wyniki obliczeń przeprowadzonych zgodnie z PN-EN 1993-1-2 i PN-EN 13381-8, a także z wykorzystaniem programów SAFIR oraz ELEFIR-EN.

Słowa kluczowe: konstrukcja stalowa; inżynieria pożarowa; farba pęczniąca; zabezpieczenia reaktywne.

The design of fire protection for steel structures includes both active and passive protection systems. The subject of fire protection systems is discussed in [1]. One of the passive protection methods is the use of reactive fire protection coatings, whose purpose is to limit the rate of temperature increase in steel during a fire. The results obtained in the tests made it possible to verify coating parameters available in the literature and compare them with the results obtained in accordance with PN-EN 1993-1-2 [2]. Effective parameters were determined using the standard provisions and subsequently verified in the SAFIR software. The behaviour of the member under fire conditions was also analysed. The objective of the study was to investigate the possibility of using the results of experimental tests carried out in accordance with PN-EN 13381-8 [3] to determine the required calculation parameters describing the behaviour of reactive fire protection coatings under standard fire conditions.

The experimental data were used to verify the thermal parameters of the coating, compare the results with calculations performed in accordance with PN-EN 1993-1-2 [1]

Projektowanie ochrony pożarowej konstrukcji stalowych obejmuje rozwiązania czynne i bierne. Tematyka zabezpieczeń ogniochronnych została opisana w [1]. Jedną z metod biernych jest użycie reaktywnych powłok ogniochronnych, których zadaniem jest ograniczenie przyrostu temperatury stali podczas pożaru. Wyniki uzyskane w badaniu pozwoliły na sprawdzenie parametrów powłoki reaktywnej, dostępnych w literaturze, które zostały porównane z wynikami zgodnymi z PN-EN 1993-1-2 [2]. Przy użyciu norm wyznaczono pewne parametry efektywne sprawdzone w programie SAFIR. Opisano również zachowanie się elementu w sytuacji pożaru. Celem pracy było podjęcie próby wykorzystania wyników badań eksperymentalnych zgodnie z PN-EN 13381-8 [3] do określenia niezbędnych parametrów obliczeniowych opisujących zachowanie reaktywnej powłoki ogniochronnej w warunkach pożaru standardowego.

Dane eksperymentalne wykorzystano do weryfikacji parametrów cieplnych powłoki, porównania wyników z obliczeniami prowadzonymi zgodnie z PN-EN 1993-1-2 [1] i PN-EN 13381-8 [3] oraz do oceny zgodności wyników uzyskanych w programach ELEFIR-EN i SAFIR. W analizie przyjęto podejście uproszczone, polegające na wyznaczeniu efektywnych, uśrednionych wartości parametrów cieplnych powłoki, które następnie zastosowano w obliczeniach prowadzonych z wykorzystaniem zaawansowanego programu SAFIR oraz prostszego narzędzia ELEFIR-EN. Oba narzędzia są często wykorzystywane w praktyce projektowej.

¹⁾ Politechnika Wrocławska; Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

²⁾ Politechnika Wrocławska; Wydział Chemiczny

³⁾ INBEPO Sp. z o.o.

⁴⁾ Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpowodzi Państwowy Instytut Badawczy

⁵⁾ Novasell Sp. z o.o.

^{*}) Correspondence address: krzysztof.marcinczak@pwr.edu.pl

and PN-EN 13381-8 [3], and assess the consistency of the results obtained using the ELEFIR-EN and SAFIR software. A simplified approach was adopted in the analysis, based on determining effective, averaged values of the thermal parameters of the coating. These values were subsequently used in calculations performed using the advanced SAFIR software and the simpler ELEFIR-EN tool. Both tools are frequently used in design practice. The obtained results were compared with the temperature development of the steel member recorded during the fire test, as well as with the results obtained using calculation methods applied in Eurocode-based design procedures.

SAFIR is an advanced numerical programme intended for the analysis of structural behaviour under fire conditions. It is based on the finite element method and accounts for material non-linearity. ELEFIR-EN, on the other hand, is a more simplified design-oriented tool, primarily intended for assessing the fire resistance of steel structural members in accordance with the Eurocode approach. This issue is of considerable practical importance because reactive fire protection coatings are characterised by a complex mechanism of action. During heating, the coating undergoes successive processes of decomposition, expansion, charring and degradation. These processes result in significant changes in its thermal resistance as a function of temperature and time. Consequently, describing the behaviour of an intumescent coating using a single constant value of thermal conductivity, density or specific heat represents a significant simplification. In design practice, there is still no general and universally applicable calculation method that accounts, in an unambiguous and sufficiently accurate manner, for the variable thermal properties of reactive fire protection systems.

The development of a procedure enabling the calibration of calculation parameters based on fire test results could represent an important step towards more reliable modelling of the behaviour of protected steel structures. Such an approach would make it possible to establish a better relationship between experimental results and numerical and engineering analyses, thereby increasing the safety level of structures under fire conditions. At the same time, it could facilitate the work of designers by reducing the need to adopt arbitrary material parameters and enabling a more informed assessment of the effectiveness of fire protection for a given cross-section, coating thickness and required critical temperature.

Description of the Test Specimens and Experimental Set-up

The experimental tests were carried out in a fire furnace adapted for fire-resistance testing in accordance with the requirements of PN-EN 13381-8 [3] and PN-EN 1363-1 [4]. The test facility enables controlled thermal exposures according to the standard cellulosic fire curve and hydrocarbon fire curves, allowing the behaviour of protected steel members to be assessed under conditions corresponding to standard fire scenarios.

The test specimens consisted of three 1000 mm long columns fabricated from IPE 200 sections made of S355 steel. A 160 × 240 mm base plate, 20 mm thick, and an M10

Uzyskane wyniki porównano z przebiegiem nagrzewania elementu stalowego zarejestrowanym podczas badania ogniowego, a także z wynikami metod obliczeniowych stosowanych w procedurach projektowych wynikających z Eurokodu.

SAFIR jest zaawansowanym programem numerycznym przeznaczonym do analizy zachowania konstrukcji w warunkach pożaru, bazującym na metodzie elementów skończonych z założeniem nieliniowości fizycznej (materiałowej). ELEFIR-EN natomiast jest narzędziem o bardziej uproszczonym, projektowym charakterze, przeznaczonym przede wszystkim do oceny odporności ogniowej stalowych elementów konstrukcyjnych zgodnie z podejściem Eurokodów. Zagadnienie to ma istotne znaczenie praktyczne, ponieważ reaktywne powłoki ogniochronne charakteryzują się złożonym mechanizmem działania. W czasie nagrzewania powłoka ulega kolejno procesom rozkładu, pęcznienia, zwęglania i degradacji, co powoduje istotną zmianę jej oporu cieplnego w funkcji temperatury i czasu. Z tego względu opis pracy farby pęczniącej za pomocą jednej stałej wartości przewodności cieplnej, gęstości lub ciepła właściwego stanowi duże uproszczenie. W praktyce projektowej nadal jednak brakuje ogólnej, powszechnie stosowanej metody obliczeniowej, która w sposób jednoznaczny i wystarczająco dokładny uwzględniałaby zmienny charakter właściwości cieplnych reaktywnych zabezpieczeń ogniochronnych.

Opracowanie procedury umożliwiającej kalibrację parametrów obliczeniowych na podstawie wyników badań ogniowych mogłoby stanowić ważny krok w kierunku bardziej wiarygodnego modelowania zachowania zabezpieczonych konstrukcji stalowych. Takie podejście pozwoliłoby lepiej powiązać wyniki eksperymentalne z analizami numerycznymi i inżynierskimi, zwiększając poziom bezpieczeństwa konstrukcji w warunkach pożaru. Jednocześnie mogłoby ułatwić pracę projektanta, ograniczając konieczność przyjmowania arbitralnych parametrów materiałowych oraz umożliwiając bardziej świadomą ocenę skuteczności zabezpieczenia ogniochronnego w przypadku określonego przekroju, grubości powłoki i wymaganej temperatury krytycznej.

Opis elementów i stanowiska do badań

Badania eksperymentalne przeprowadzono w piecu ogniowym, przystosowanym do prowadzenia badań odporności ogniowej zgodnie z wymaganiami PN-EN 13381-8 [3] oraz PN-EN 1363-1 [4]. Stanowisko umożliwia realizację kontrolowanych ekspozycji termicznych wg standardowej krzywej celulozowej oraz krzywych węglowodorowych, co pozwala ocenić zachowanie zabezpieczonych elementów stalowych w warunkach odpowiadających normowym scenariuszom pożarowym.

Badane elementy to trzy słupy długości 1000 mm z kształtowników IPE 200, wykonanych ze stali S355. Do jednego końca każdego słupa dospawano blachę podstawy o wymiarach 160 × 240 mm i grubości 20 mm oraz pręt gwintowany M10 o długości 500 mm, umożliwiający zamocowanie

threaded rod, 500 mm long, were welded to one end of each column to enable the specimen to be fixed to the furnace floor. The successive stages of application of the protection system were carried out in accordance with the manufacturer's technical instructions, including drying times, maximum layer thicknesses, permissible application conditions and other technological recommendations. Before application of the primer, the surfaces of the specimens were blast-cleaned to Sa 2, followed by dust removal and degreasing. The primer was applied using a brush in corners, around openings and in recesses, whereas a roller was used on flat surfaces.

Six Type K thermocouples were installed on each specimen and welded to the cleaned steel at locations that had previously been ground and degreased. The locations of the thermocouples are shown in Figure 1. The thermocouple wires were routed along the member and secured using fixing clips. Openings were provided in the base plate to allow the wires to pass through the furnace floor. Above the furnace floor, the wires were connected to an installation leading to the measurement cabinet, which was connected to a computer recording the test. After installation of the thermocouples, the weld locations were protected with primer. Before application of the fire protection coating, the surfaces were cleaned again and prepared in accordance with the requirements of the protection system.

The water-based intumescent coating was applied using airless spray equipment. During application, the wet film thickness was controlled using wet-film comb gauges, taking into account the maximum permissible thickness of a single layer and coating shrinkage during drying. After conditioning, the specimens were installed in the furnace (Photo 1, item 1). The contact between the base plate and the furnace floor was sealed using insulating material. An insulating plate mounted on the welded threaded rods was installed at the opposite end of the column. The test furnace chamber is shown in Photo 2. The furnace enables the specimen to be heated in accordance with the ISO 834 standard cellulosic fire curve specified in [4]. The temperature in the furnace chamber was monitored using sheathed thermocouples (Photo 1, item 2). The walls and ceiling of the furnace chamber

elementu do stropu pieca badawczego. Kolejne etapy aplikacji systemu wykonano zgodnie z instrukcją techniczną producenta, obejmującą czas schnięcia, maksymalną grubość warstw, dopuszczalne warunki aplikacji oraz pozostałe zalecenia technologiczne. Przed nałożeniem warstwy podkładowej powierzchnię elementów oczyszczono metodą śrutowania do klasy Sa 2, a następnie odpylono i odtłuszczone. Farbę podkładową наносzono pędzlem w narożach, otworach i wnękach, natomiast na powierzchniach płaskich – wałkiem.

Na każdym elemencie zamontowano sześć termopar typu K, zgrzanych do oczyszczonej stali w miejscach uprzednio wyszlifowanych i odtłuszczonych. Lokalizację termopar przedstawiono na rysunku 1. Przewody termopar prowadzono wzdłuż elementu i stabilizowano przeponami mocującymi. W blasze podstawy wykonano otwory umożliwiające wyprowadzenie przewodów przez strop pieca. Nad stropem przewody łączono z instalacją prowadzącą do szafy pomiarowej, połączonej z komputerem rejestrującym przebieg badania. Po zamontowaniu termopar miejsca zgrzewów zabezpieczono farbą podkładową. Przed aplikacją powłoki ogniochronnej powierzchnię ponownie odpylono i przygotowano zgodnie z wymaganiami systemu.

Wodorozcieńczalną farbę pęczniącą наносzono za pomocą agregatu malarskiego. W trakcie aplikacji kontrolowano grubość mokrej powłoki przy użyciu grzebleni malarskich, uwzględniając ograniczenia maksymalnej grubości pojedynczej warstwy oraz skurcz powłoki podczas schnięcia. Po sezonowaniu elementy zamontowano w piecu (fotografia 1, oznaczenie 1). Styk podstawy słupa ze stropem pieca uszczelniono materiałem izolacyjnym, a na przeciwnym końcu słupa zamontowano płytkę izolacyjną osadzoną na dospawanych prętach gwintowanych. Komorę pieca pokazano na fotografii 1a. Piec umożliwia nagrzewanie elementu zgodnie ze standardową krzywą celulozową ISO 834 wg [4]. Temperaturę w komorze monitorowano za pomocą termopar płaszczyznowych (fotografia 1, oznaczenie 2). Ściany i strop komory wyłożono materiałem izolacyjnym,

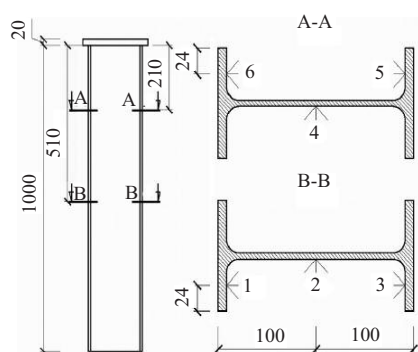


Fig. 1. Location of thermocouple sensors on the element

Rys. 1. Lokalizacja czujników termoparowych na elemencie

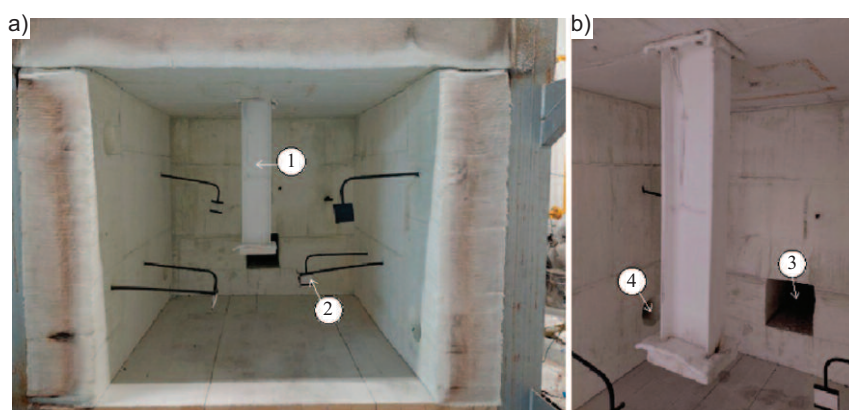


Photo 1. Test element mounted in the furnace prior to testing: a) front view of the furnace chamber; b) close-up of the element

Fot. 1. Badany element zamontowany w piecu przed badaniem: a) widok od frontu na komorę pieca; b) zbliżenie na element

were lined with insulating material, while the floor was constructed from refractory brick. The chamber is closed at the front by a door running on a roller system.

Test procedure

The sensors installed on the specimens and in the furnace chamber enabled continuous temperature recording during the test at a frequency of 0.33 Hz. The following sections present the results obtained for the member protected with a coating having a DFT (*Dry Film Thickness*) of 1.598 mm. A constant critical temperature of 550°C was adopted for the steel members, in accordance with the simplified design procedure permitted by PN-EN 1993-1-2 [2].

The effect of the coating reaction is shown in Photo 2. The tested intumescent coating began to react at approximately 230°C. At this point, the slope of the temperature curve changed and the temperature of the member began to increase more slowly than at the beginning of the test, indicating the onset of the coating reaction and the resulting thermal insulation of the member. The fire test lasted approximately 60 min. The expansion factor of the coating was determined by inserting a measuring gauge made from a graduated ruler into the expanded coating. The measured value was compared with the coating thickness before testing, excluding the primer layer. The resulting expansion factor was approximately 60, meaning that the initial coating thickness increased approximately sixtyfold during the test. Following the reaction, the coating exhibited a highly porous structure resembling a pumice-like material, with irregular pores and large surface bubbles.



Photo 2. The element after testing – two sides

Fot. 2. Element po badaniu – dwie strony

Selected test and simulation results

After the test, samples of the charred coating were collected. Its density was determined by making an impression in the coating using a container of known volume without destroying the structure of the material. The sample together with the container and the container itself were subsequently weighed. The resulting density was approximately 35 kg/m³. Figure 2 compares the temperature increase in the unprotected member calculated using the ELEFIR-EN software [5] with the test results for the protected member. The unprotected member reached the assumed critical temperature after approximately 10.5 min, whereas the member protected with a coating having a DFT of 1.598 mm reached this temperature after approximately 38.5 min. A subsequent simulation was performed assuming a constant coating thickness and temperature-dependent physical properties of the material. The model used the parameters available in the literature, listed in Table 1. The coating thickness of 5.76 mm adopted in the simulation was not directly related either to the initial DFT or to the final coating thickness after

natomiast podłogę wykonano z cegły szamotowej. Komo-
ra jest zamykana od frontu zasuwą prowadzoną w układzie
rolek.

Przebieg badania

Czujniki zamontowane na elementach oraz w komorze pie-
ca umożliwiały bieżącą rejestrację temperatury podczas ba-
dania z częstotliwością 0,33 Hz. W dalszej części artykułu
przedstawiono wyniki uzyskane w przypadku elementu za-
bezpieczonego powłoką o DFT (*Dry Film Thickness* – gru-
bość suchej powłoki) 1,598 mm. W analizie przyjęto stałą
wartość temperatury krytycznej elementów stalowych rów-
ną 550°C zgodnie z uproszczoną procedurą projektową do-
puszczaną przez normę PN-EN 1993-1-2 [2].

Efekt reakcji farby przedstawiono na fotografii 2. Badana
farba pęczniejąca zaczynała reagować w temperaturze
ok. 230°C, krzywa temperaturowa zaczęła zmieniać swoje
nachylenie, temperatura w elemencie zwiększała się wolniej
w porównaniu z początkiem badania, co oznaczało rozpoczę-
cie reakcji i skutkowało izolacją elemen-
tu. Próba ogniowa trwała ok. 60 min. Współczynnik spęcznienia powłoki okre-
ślono przez zagłębienie wskaźnika pomia-
rowego wykonanego z linijki z podziałką
w spęcznionej powłoce. Wynik porówna-
no z grubością powłoki przed badaniem
(bez uwzględniania warstwy podkłado-
wej). Wyznaczony współczynnik spęcz-
nienia wyniósł ok. 60 (grubość powłoki
początkowej zwiększyła się 60 razy w po-
równaniu z grubością po badaniu). Po re-
akcji powłoka miała strukturę bardzo po-
rowatą, zbliżoną do pumeksu, z widocz-
nymi na powierzchni nieregularnymi po-
rami i makropęcherzami.

Wybrane wyniki badań i symulacji

Po badaniu pobrano próbki zwęglonej powłoki. Jej gęstość
wyznaczono przez wykonanie odcisku w powłoce, naczyni-
em o znanej pojemności, bez niszczenia struktury materia-
łu. Następnie zważono próbkę z pojemnikiem oraz sam po-
jemnik. Uzyskana wartość gęstości wyniosła ok. 35 kg/m³.
Na rysunku 2 porównano zwiększenie temperatury w ele-
mencie niezabezpieczonym, obliczony w programie
ELEFIR-EN [5], z wynikami badań elementu zabezpieczonego.
Element niezabezpieczony osiągnął założoną temperaturę kry-
tyczną po ok. 10,5 min, natomiast element zabezpieczony po-
włoką o DFT 1,598 mm po ok. 38,5 min. Następnie wykona-
no symulację przy założeniu stałej grubości powłoki oraz
zmiennych parametrów fizycznych materiału. W modelu wy-
korzystano parametry dostępne w literaturze zestawione w ta-
beli 1. Przyjęta w symulacji grubość 5,76 mm nie była bezpo-
średnio związana z początkową grubością DFT, ani z końcową
grubością powłoki po spęcznieniu. Po przeprowadzeniu ob-
liczeń podjęto próbę interpolacji wyników w celu oszacowa-

intumescence. Following the calculations, an interpolation of the results was performed in order to estimate the actual DFT corresponding to the analysed case. According to [5], the reaction of an intumescent coating can be divided into the following stages: melting and thermal decomposition before reaching the reaction temperature (100–300°C); reaction and intumescence (200–450°C); charring associated with the formation of a char layer on the surface of the expanded coating (220–700°C); coating degradation (420–800°C).

For the test considered here (Figure 2), the stages of coating behaviour can be identified based on changes in the slope of the temperature curve. During the period from 0 to 6 min, the curve remains approximately constant and reaches about 230°C. After the reaction temperature is exceeded, the slope of the curve changes and the heating rate of the steel decreases between 6 and 18 min. The coating reacts and thermally insulates the member. Subsequently, between 18 and 50 min, the slope of the curve becomes more stable, suggesting that the coating parameters have reached a relatively stable state. At approximately 52 min, a further change in the slope of the curve occurs. This may be associated with changes in the material properties at elevated temperature, including a reduction in the mechanical properties of the steel and structural transformations.

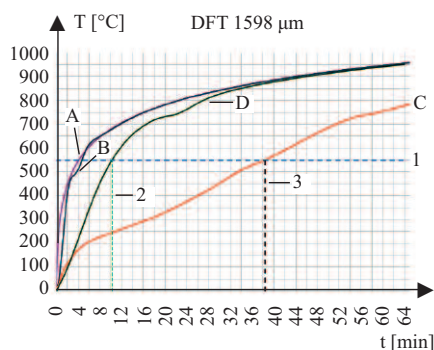
The temperature dependence of thermal conductivity was adopted on the basis of literature data. According to [5], specific heat was adopted using separate values before and after intumescence of the coating, together with the effective density of the coating after expansion. Additionally, the technical data sheet of the tested system was used, without identifying the manufacturer.

The ELEFIR-EN programme uses linear interpolation between the input values of the parameters. In calculations based on Eq. 4.27 [2], the parameters were corrected directly at successive calculation steps. The equation accounts for the variation of the specific heat of steel with temperature. The comparison of the results is presented in Figure 3.

Table 1. Coating parameters input into ELEFIR-EN software and calculations according to formula 4.27 from [2, 6, 7]

Tabela 1. Parametry powłoki wprowadzone do programu ELEFIR-EN oraz do obliczeń wg wzoru 4.27 z [2, 6, 7]

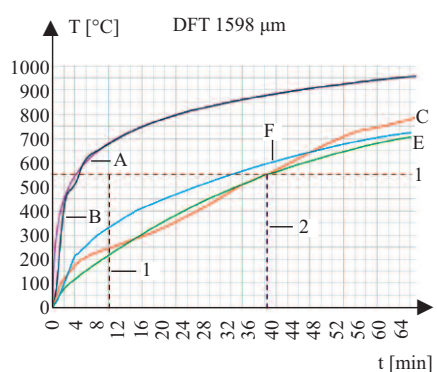
Temperature range [°C]/ Zakres temperatury [°C]	Coating thickness [mm]/ Grubość powłoki [mm]	Thermal conductivity [W/(m·K)]/ Przewodność cieplna [W/(m·K)]	Density [kg/m³]/ Gęstość [kg/m³]	Specific heat [J/(kg·K)]/ Ciepło właściwe [J/(kg·K)]
20 – 200	5,76	0,3	1410	1000
200 – 300		0,1	50	2000
300 – 400		0,07	45	2000
400 – 500		0,05	40	2000
500 – 1200		0,05	35	2000



Markings/Oznaczenia: A – cellulosic fire curve (purple)/A – krzywa celulozowa (fioletowa); B – furnace chamber temperature (navy blue)/B – temperatura w komorze pieca (granatowa); C – protected element (orange)/C – element zabezpieczony (pomarańczowa); D – unprotected element (green)/D – element niezabezpieczony (zielona); 1 – 550°C; 2 – 10,5 min; — 38,5 min

Fig. 2. Temperature rise over time

Rys. 2. Zwiększenie temperatury w czasie



Markings/Oznaczenia: A – cellulosic fire curve (purple)/A – krzywa celulozowa (fioletowa); B – furnace chamber temperature (navy blue)/B – temperatura w komorze pieca (granatowa); C – element temperature from test (orange)/C – temperatura elementu w badaniu (pomarańczowa); E – ELEFIR-EN results (green)/E – wyniki ELEFIR-EN (zielona); F – formula 4.27 results (blue)/F – wyniki obliczeń wg wzoru 4.27 (niebieska); 1 – 550°C; 2 – 10,5 min; — 38,5 min

Fig. 3. Comparison of results obtained using ELEFIR-EN software and manual calculations according to formula 4.27 [2]

Rys. 3. Porównanie wyników uzyskanych w programie ELEFIR-EN oraz w obliczeniach manualnych wg wzoru 4.27 [2]

nia rzeczywistej wartości DFT odpowiadającej analizowanemu przypadkowi. W pracy [5] reakcję farby pęczniącej podzielono na następujące etapy: topnienie i rozkład termiczny przed osiągnięciem temperatury reakcji (100–300°C); reakcja i pęcznienie (200–450°C); zwęglanie związane z tworzeniem zwęgliny na powierzchni spęcznionej powłoki (220–700°C), oraz degradację powłoki (420–800°C).

W przypadku przeprowadzonego badania (rysunek 2), fazy działania powłoki możemy podzielić w zależności od nachylenia wykresu. W przedziale czasowym 0–6 min. jest on stały i osiąga ok. 230°C. Po przekroczeniu temperatury reakcji następuje zmiana nachylenia wykresu, spowolnienie nagrzewania stali w czasie 6–18 min. Powłoka reaguje i izoluje element. Następnie od 18 do 50 min następuje ustabilizowanie nachylenia wykresu sugerujące ustabilizowanie się parametrów powłoki. Od ok. 52 min. badania nastąpiła kolejna zmiana nachylenia wykresu. Może być ona związana ze zmianami właściwości materiału w wysokiej temperaturze, w tym z obniżeniem parametrów mechanicznych stali oraz przemianami strukturalnymi.

Zależność współczynnika przewodności cieplnej od temperatury przyjęto na podstawie danych literaturowych. Zgodnie z [5] przyjęto ciepło właściwe, rozróżniając wartości przed spęcznieniem i po spęcznieniu powłoki, a także efektywną gęstość powłoki po spęcznieniu. Uzupełniając wykorzystano kartę techniczną badanego systemu, bez wskazywania producenta.

Program ELEFIR-EN stosuje interpolację liniową pomiędzy wprowadzonymi wartościami parametrów. W obliczeniach prowadzonych z wykorzystaniem wzoru 4.27 [2], parametry korygowano bezpośrednio w kolejnych krokach obliczeniowych. Wzór uwzględnia zmienność ciepła właściwego stali wraz z temperaturą. Porównanie wyników przedstawiono na rysunku 3.

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\frac{\lambda_p}{d_p} A_p * 1 * (\theta_{g,t} - \theta_{a,t}) * \Delta t}{(c_a * \rho_a * V) * (1 + \frac{\phi}{3})} - (e^{\frac{\phi}{10} - 1}) * \Delta\theta_{g,t} \quad (1)$$

where:

$$\phi = \frac{c_a * \rho_a * d_p * A_p}{(c_a * \rho_a * V)} \quad (2)$$

where:

d_p – thickness of the fire protection material layer;
 c_p – specific heat of the fire protection material;
 λ_p – thermal conductivity of the fire protection material;
 ρ_p – density of the fire protection material;
 $\theta_{g,t}$ – gas temperature at the current calculation step;
 c_a – specific heat of steel dependent on the temperature of the member;
 ρ_a – density of steel;
 V – volume of the protected member;
 A_p – perimeter of the fire protection;
 $\theta_{a,t}$ – steel temperature at the current calculation step;
 $\Delta\theta_{a,t}$ – difference between the gas temperature at the current and preceding calculation step;
 Δt – time increment adopted for the calculations.

The analysis of the curves indicates that, using the standard approach, the member reaches the critical temperature earlier than in the test. This indicates the conservative nature of this calculation method. The obtained results enable interpolation of the coating thickness in order to estimate the required protection thickness, for example, for a protection period of 40 min while maintaining the same critical temperature and the same member cross-section. The conversion of the calculated coating thickness obtained from the programme into the actual DFT is presented in Figure 4.

As the reference points in Step 1, the results of calculations performed using ELEFIR-EN were adopted. Two reference points are known: a protection time of 44.5 min corresponding to a calculated thickness of 6.97 mm (DFT = 1.803 mm); a protection time of 38.4 min corresponding to a calculated thickness of 5.76 mm (DFT = 1.598 mm). For the specified protection time of 40 min, the calculated thickness X is determined by linear interpolation. The resulting calculated

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\frac{\lambda_p}{d_p} A_p * 1 * (\theta_{g,t} - \theta_{a,t}) * \Delta t}{(c_a * \rho_a * V) * (1 + \frac{\phi}{3})} - (e^{\frac{\phi}{10} - 1}) * \Delta\theta_{g,t} \quad (1)$$

gdzie:

$$\phi = \frac{c_a * \rho_a * d_p * A_p}{(c_a * \rho_a * V)} \quad (2)$$

Oznaczenia:

d_p – grubość warstwy materiału ogniochronnego;
 c_p – ciepło właściwe materiału ogniochronnego;
 λ_p – przewodność cieplna materiału ogniochronnego;
 ρ_p – masa jednostkowa materiału ogniochronnego;
 $\theta_{g,t}$ – temperatura gazu w kroku obliczeniowym;
 c_a – ciepło właściwe stali zależne od temperatury elementu;
 ρ_a – masa jednostkowa stali;
 V – objętość zabezpieczonego elementu;
 A_p – obwód zabezpieczenia ogniochronnego;
 $\theta_{a,t}$ – temperatura stali w kroku obliczeniowym;
 $\Delta\theta_{a,t}$ – różnica temperatury gazu między obecnym a poprzednim krokiem obliczeniowym;
 Δt – różnica czasowa przyjęta do obliczeń (krok obliczeniowy).

Analiza wykresów wskazuje, że w podejściu normowym element osiąga temperaturę krytyczną wcześniej niż w badaniu. Oznacza to konserwatywny charakter tej metody obliczeniowej. Uzyskane wyniki umożliwiają interpolację grubości powłoki w celu oszacowania wymaganej grubości zabezpieczenia np. w czasie 40 min z zachowaniem tej samej temperatury krytycznej i tego samego przekroju elementu. Przeliczenie grubości obliczeniowych uzyskanych w programie na rzeczywistą grubość DFT powłoki przedstawiono na rysunku 4.

Jako punkty odniesienia w kroku 1 przyjęto wyniki obliczeń wykonanych w programie ELEFIR-EN. Znane są dwa punkty odniesienia: czas zabezpieczenia 44,5 min odpowiadający grubości obliczeniowej 6,97 mm (DFT = 1,803 mm) oraz czas 38,4 min odpowiadający grubości obliczeniowej 5,76 mm (DFT = 1,598 mm). W przypadku zadanego czasu zabezpieczenia wynoszącego 40 min metodą interpolacji liniowej szukamy grubości obliczeniowej X. Jest ona rów-

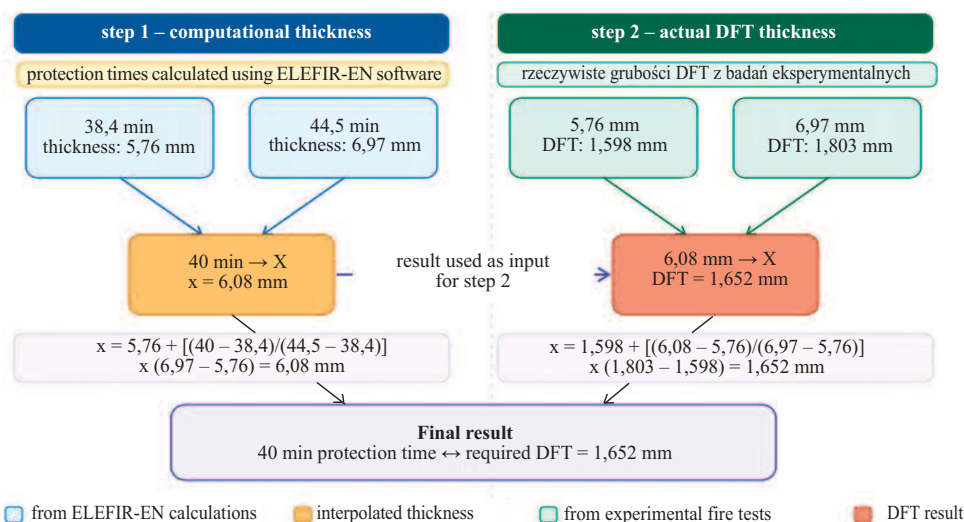


Fig. 4. Example of intermediate DFT calculation based on ELEFIR-EN software and fire tests

Rys. 4. Przykład obliczenia pośrednich wartości DFT na podstawie programu ELEFIR-EN oraz badań

thickness is 6.08 mm. In Step 2, this value is converted into the actual coating thickness, giving a DFT of 1.652 mm. The calculated protection thickness of 6.08 mm and the previously specified parameters (Table 1) were then entered into ELEFIR-EN. After 40.0 min, the section reached a temperature of 552.4°C, confirming the correctness of the interpolation.

An alternative approach, based on the available experimental results, consists in applying the procedure specified in [3]. This procedure provides effective values of specific heat and density while distinguishing between calculations using a constant and a variable thermal conductivity. Since the standard calculations are expressed in terms of DFT, it is possible to predict the results for a different coating thickness for the same member and the same critical temperature without carrying out additional coating-thickness tests.

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\frac{\lambda_p}{d_p} * A_p * 1 * \Delta t}{(c_a * \rho_a * V) * (\theta_{g,t} - \theta_{a,t})} \quad (3)$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{\Delta\theta_{a,t}}{d_p} * A_p * 1 * \Delta t}{(c_a * \rho_a * V) * (\theta_{g,t} - \theta_{a,t})} \quad (4)$$

After transforming Eq. (3), the direct relationship given by Eq. (4) for variable parameters is obtained. Using an iterative procedure, the standard method enables the thermal conductivity to be determined at 50°C intervals. Based on the three test results, the mean values of the parameters were obtained, as shown in Figure 5.

The second approach consists in determining an effective parameter by transforming Eq. (1). In this formulation, the only unknown parameter is the thermal conductivity. The calculations were therefore performed in such a way as to determine the value that reproduces the experimental results. Using Eq. (5) and linear least-squares regression, a value of 0.0137 W/(m·K) was obtained for all the test results for the three members with a DFT of approximately 1.6 mm.

$$\lambda = c_0 + \frac{c_1 * A_m}{V} + c_2 * d_p \quad (5)$$

where:

d_p – thickness of the fire protection material layer;
 A_m/V – section factor;
 c_0, c_1, c_2 – coefficients of the linear regression determined using the least-squares method.

The comparison between the test results and the temperature curves obtained after determining the parameters in accordance with [3] is presented in Figure 6. The mean value of thermal conductivity enables the time required for the member to reach

na 6,08 mm. W kroku 2 przeliczono ją na rzeczywistą grubość powłoki, uzyskując wartość DFT wynoszącą 1,652 mm. Wyznaczoną w interpolacji wartość grubości zabezpieczenia 6,08 mm oraz wcześniej zestawione parametry (tabela 1) wprowadzono do programu ELEFIR-EN, w wyniku czego po 40,0 min. kształtownik osiąga temperaturę 552,4°C, co potwierdza poprawność wyznaczonej interpolacji.

Alternatywne podejście, na bazie dostępnych wyników badań eksperymentalnych, polega na zastosowaniu procedury zgodnej z normą [3]. Podaje ona efektywne wartości ciepła właściwego i gęstości masowej, a jednocześnie rozróżnia warianty obliczeń ze stałym oraz zmiennym współczynnikiem przewodności cieplnej. W związku z tym, że obliczenia normowe odnoszą się do DFT, możliwe jest prognozowanie wyników w przypadku innej grubości powłoki przy tym samym elemencie i tej samej temperaturze krytycznej bez dodatkowej grubości powłoki.

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\frac{\lambda_p}{d_p} * A_p * 1 * \Delta t}{(c_a * \rho_a * V) * (\theta_{g,t} - \theta_{a,t})} \quad (3)$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{\Delta\theta_{a,t}}{d_p} * A_p * 1 * \Delta t}{(c_a * \rho_a * V) * (\theta_{g,t} - \theta_{a,t})} \quad (4)$$

Po przekształceniu wzoru (3) otrzymuje się bezpośrednią zależność (4) dotyczącą zmiennych parametrów. Po zastosowaniu procedury iteracyjnej metoda normowa umożliwia wyznaczenie przewodności cieplnej w odstępach co 50°C. Na podstawie trzech wyników badań uzyskano średnie wartości parametrów zestawione na rysunku 5.

Drugie z omawianych podejść polega na wyznaczeniu parametru efektywnego przez przekształcenie wzoru (1). Jedyną nieznaną w takim ujęciu jest współczynnik przewodności cieplnej, dlatego obliczenia prowadzono tak, aby wyznaczyć wartość umożliwiającą odwzorowanie wyników eksperymentalnych. Po zastosowaniu wzoru (5) oraz regresji liniowej metodą najmniejszych kwadratów, otrzymano w przypadku wszystkich wyników z badań trzech elementów dotyczących próbki o DFT 1,6 mm wartość 0.0137 W/(m·K).

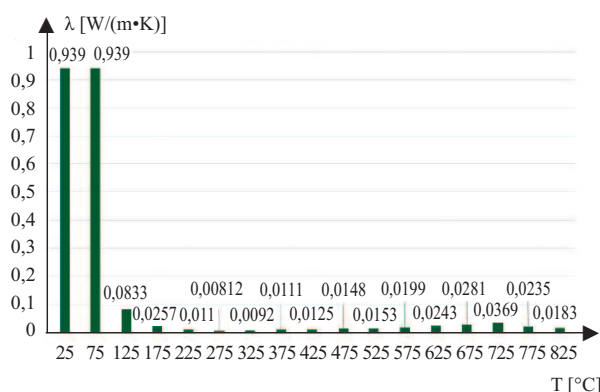


Fig. 5. Mean thermal conductivity [W/(m·K)] determined on the basis of test results and the procedure of [2]

Rys. 5. Średnia przewodność cieplna [W/(m·K)] wyznaczona na podstawie badania i procedury [2]

gdzie:

d_p – grubość warstwy materiału ogniochronnego;
 A_m/V – współczynnik masywności;
 c_0, c_1, c_2 – współczynniki regresji liniowej (metoda najmniejszych kwadratów).

Porównanie wyników badań z krzywymi temperaturowymi otrzymanymi po wyznaczeniu parametrów zgodnie z [3] przedstawiono na rysunku 6. Uśrednienie wartości

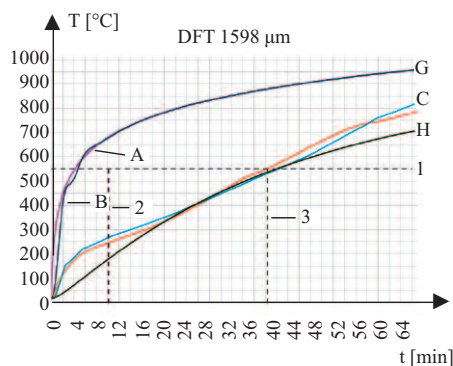
the critical temperature to be calculated in a manner close to that observed in the test (test: 38.4 min; calculation: approximately 40 min; difference: approximately 2 min). However, the remaining results do not fully reproduce the behaviour observed during the test. Using the thermal conductivity value allows a closer reproduction of the experimental results. When comparing the time required to reach the assumed critical temperature, the test result was 38.4 min, whereas the calculated value was approximately 40 min, giving a difference of approximately 2 min, similar to the result obtained using the constant-parameter approach.

Analysis of Temperature Development through the Cross-Section

In order to verify and illustrate the temperature development within the steel member, an analysis using the SAFIR programme [8] was performed. The model incorporated the parameters listed in Table 2 in accordance with [2]. SAFIR uses the finite element method. The model includes the geometry of the member and the protection layer, after which the edges exposed to fire are defined. The ASTM E119 heating curve [9], which is similar to the standard

cellulosic fire curve, was used in the analysis. When analysing the temperature curves over the duration of the simulation and test, i.e. up to approximately 60 min, the following differences can be identified. During the initial phase, from 0 to 5 min, ASTM E119 is characterised by a lower temperature increase (5 min; ISO 834 – 576°C; ASTM E119 – 576°C; difference – approximately 7%). Subsequently, during the period from 5 to 30 min, the ASTM E119 curve exhibits a greater temperature increase (30 min; ISO 834 – 843°C; ASTM E119 – 843°C). During the period from 30 to 60 min, the ISO curve again exhibits a greater temperature increase (60 min; ISO 834 – 945°C; ASTM E119 – 927°C; difference – approximately 1.9%). The result of the calculations is a temperature map of the member corresponding to the selected time step.

When comparing the approaches specified in [2, 3], it should be noted that the member temperature refers to the mean temperature across the cross-section. The finite element model indicates that the web heats up faster than the flanges. Consequently, the mean temperature does not imply that the entire cross-section has reached the same temperature. Figure 7 presents a screenshot corresponding to 44 min of the simulation in SAFIR. A higher temperature can be observed in the web and a lower temperature in the flanges. In addition, all results for the web and flanges were compiled in order to illustrate the phenomenon over the entire duration of the SAFIR simulation (Figure 8).



Markings/Oznaczenia: A – cellulosic fire curve (purple)/A – krzywa celulozowa (fioletowa); B – furnace chamber temperature (navy blue)/B – temperatura w komorze pieca (granatowa); C – element temperature from test (orange)/C – temperatura elementu w badaniu (pomarańczowa); G – results accounting for variable thermal conductivity (blue)/G – wyniki uwzględniające zmienny współczynnik przewodności cieplnej (niebieski); H – results accounting for constant thermal conductivity (green)/H – wyniki uwzględniające stały współczynnik przewodności cieplnej (zielony); 1 – 550°C; 2 – 10,5 min; 3 – 38,5 min

Fig. 6. Comparison of test results with temperature curves obtained after determining parameters in accordance with [2]

Rys. 6. Porównanie wyników badań z krzywymi temperaturowymi otrzymanymi po wyznaczeniu parametrów zgodnie z [2]

Table 2. Coating parameters input into SAFIR software

Tabela 2. Parametry powłoki wprowadzone do programu SAFIR

Temperature range [°C]/Zakres temperatury [°C]	Coating thickness [mm]/Grubość powłoki [mm]	Thermal conductivity [W/(m·K)]/Przewodność cieplna [W/(m·K)]	Density [kg/m³]/Gęstość [kg/m³]	Specific heat [J/(kg·K)]/Ciepło właściwe [J/(kg·K)]
20 – 1200	1,598	0,0137	100	1000

pozycji pożarowej. W analizie zastosowano krzywą nagrzewania ASTM E119 [9] zbliżoną do standardowej krzywej celulozowej. Analizując krzywe w czasie trwania symulacji i badania, czyli do ok. 60 min, możemy wyróżnić następujące różnice. W fazie początkowej od 0 do 5 min ASTM E119 cechuje się mniejszym wzrostem temperatury (5 min: ISO834 – 576°C, ASTM E119 – 576°C, błąd ok 7%). Następnie w przedziale czasowym 5 – 30 min krzywa ASTM E119 wykazuje większy wzrost temperatury (30 min: ISO834 – 843°C, ASTM E119 – 843°C). W fazie 30 – 60 min krzywa ISO ponownie cechuje się większym wzrostem temperatury (60 min: ISO834 – 945°C, ASTM E119 – 927°C, błąd ok 1,9%). Wynikiem obliczeń jest mapa temperatury elementu dotycząca wybranego kroku czasowego.

Porównując podejścia zgodne z [2, 3], należy uwzględnić, że temperatura elementu odnosi się do średniej temperatury w przekroju. Model MES wskazuje, że środek nagrzewa się szybciej niż półki. W konsekwencji średnia temperatura nie oznacza, że cały przekrój osiągnął tę samą wartość temperatury. Na rysunku 7 przedstawiono zrzut ekranu dotyczący 44 min symulacji w programie SAFIR. Widać większą temperaturę środka i mniejszą półek. Ponadto zestawiono wszystkie wyniki dotyczące środka i półki w celu pokazania zjawiska w skali całej symulacji w programie SAFIR (rysunek 8).

współczynnika przewodności cieplnej umożliwia obliczenie czasu osiągnięcia temperatury krytycznej w sposób zbliżony do badania (badanie 38,4 min, obliczenia ok 40 min – różnica ok. 2 min) jednak pozostałe wyniki nie odzwierciedlają rzeczywistości badania. Wykorzystanie wartości współczynnika przewodności cieplnej pozwala na bliższe odwzorowanie wyników uzyskanych w badaniu. Porównując osiągnięcie założonej temperatury krytycznej (badanie 38,4 min, obliczenia ok. 40 min – różnica ok. 2 min), czyli podobnie jak w przypadku podejścia ze stałym współczynnikiem.

Analiza nagrzewania się elementu w przekroju

W celu weryfikacji i zobrazowania sposobu nagrzewania się elementu stalowego przeprowadzono analizę programem SAFIR [8]. Do modelu

wprowadzono parametry (tabela 2) zgodnie z [2]. Program SAFIR wykorzystuje metodę elementów skończonych. Do modelu wprowadza się geometrię elementu oraz warstwę zabezpieczenia, a następnie definiuje krawędzie poddane eks-

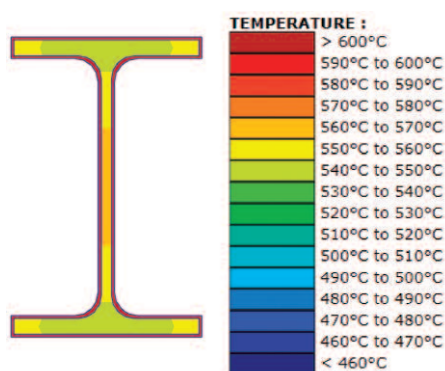


Fig. 7. Simulation result at minute 44 of the test
Rys. 7. Wynik symulacji w 44 min badania

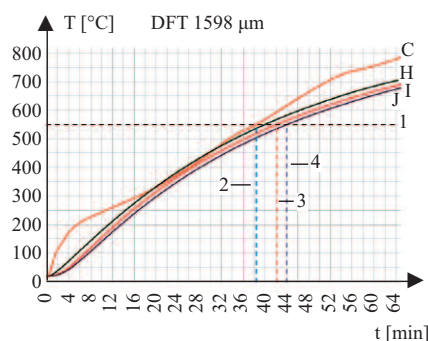


Fig. 8. Comparison of temperature rise in the element: test result, calculations according to formula (4.27), and SAFIR simulation for effective parameters in accordance with [2]
Rys. 8. Porównanie zwiększenia temperatury w elemencie: wynik badania, obliczenia wg wzoru (4.27) oraz symulacja SAFIR w przypadku parametrów efektywnych zgodnych z [2]

Summary

The paper compares the results of experimental tests with the results obtained using calculation and simulation tools for determining the temperature distribution in protected steel members. The analysis was performed using the procedures described in [2] and [3], assuming effective and variable thermal parameters for the reactive fire protection coating. For the single coating thickness analysed, good agreement was obtained between selected test and calculation results. However, the proposed approach requires further verification covering a wider range of protection thicknesses, different types of coatings and members with different section factors. Positive validation could provide a basis for extending the design methods used in the Eurocode with respect to reactive fire protection coatings.

The time required for a member to reach a specified temperature is of key importance from the point of view of the fire safety of steel structures. In [2], reaching the critical temperature is indicated as one of the criteria for assessing load-bearing capacity. The analysis demonstrates that coating parameters can be predicted on the basis of tests and calculations, but this requires extending the database of results to include members with different section factors and different critical temperatures. For the analysed case, the time required to reach the critical temperature, depending on the adopted calculation or simulation approach, is presented in Table 3.

Using the test results as reference points, the calculations were performed in two steps:

■ **step 1** uses the results of calculations according to Eq. 4.27 [2]. Two reference points are known: a calculated thickness of 5.76 mm provides protection for 32 min, whereas a thickness of 6.97 mm provides protection for 37 min. The calculated thickness X corresponding to the target protection time of 35 min is therefore determined by proportional interpolation. Since

Podsumowanie

W artykule porównano wyniki badań eksperymentalnych z wynikami uzyskanymi z zastosowaniem narzędzi obliczeniowych i symulacyjnych służących do określania rozkładu temperatury w zabezpieczonych elementach stalowych. Analizę przeprowadzono z wykorzystaniem procedur opisanych w [2 i 3] oraz przy założeniu efektywnych i zmiennych parametrów cieplnych reaktywnej powłoki ogniochronnej. W przypadku pojedynczej analizowanej grubości powłoki uzyskano dobrą zgodność wybranych wyników badania i obliczeń. Przedstawione podejście wymaga jednak dalszej weryfikacji, obejmującej większy zakres grubości zabezpieczenia, różne typy powłok oraz elementy o odmiennej masywności. Pozytywna walidacja mogłaby stanowić podstawę do uzupełnienia metod projektowania stosowanych w Eurokodzie w odniesieniu do reaktywnych powłok ogniochronnych.

Czas osiągnięcia określonej temperatury przez element ma kluczowe znaczenie z punktu widzenia bezpieczeństwa pożarowego konstrukcji stalowych. W normie [2] osiągnięcie temperatury krytycznej wskazano jako jedno z kryteriów oceny nośności. Przeprowadzona analiza pokazuje, że parametry powłoki można prognozować na podstawie badań i obliczeń, ale wymaga to poszerzenia bazy wyników o elementy o różnej masywności oraz o różne wartości temperatury krytycznej. W analizowanym przypadku czas osiągnięcia temperatury krytycznej, w zależności od przyjętego podejścia obliczeniowego lub symulacyjnego, zestawiono w tabeli 3.

Wykorzystując wyniki badań jako punkty odniesienia przyjęto wyniki obliczeń w ramach dwóch kroków:

■ **krok 1** operuje na wynikach obliczeń wg wzoru 4.27 [2]. Znane są dwa punkty odniesienia: grubość obliczeniowa 5,76 mm zapewnia ochronę przez 32 min, a 6,97 mm – przez 37 min. Szukamy grubości obliczeniowej X odpowiadającej do-

Table 3. Time to reach the critical temperature of 550°C for the element with DFT 1.598 mm depending on the adopted calculation or simulation approach

Tabela 3. Czas osiągnięcia temperatury krytycznej 550°C przez element z DFT 1,598 mm w zależności od przyjętego podejścia obliczeniowego lub symulacyjnego

Fire test/ Badanie	Equation 4.27/Wzór 4.27				SAFIR software/SAFIR
	values reported in the literature/parametry literaturowe	constant parameter (regression)/parametr stały (regresja)	variable parameters/parametry zmienne	constant parameter according to [2]/parametr stały wg [2]	
38,4 min	32 min	38,3 min	40,5 min	40,5 min	web 41 min/środek 41 min/flanges 44,5 min/półki – 44,5 min

35 min lies between 32 and 37 min, linear interpolation gives: $X = 6.49$ mm. This is, however, a calculated thickness rather than the actual thickness of the coating applied to the steel. The DFT is determined in the next step;

■ **step 2** converts the calculated thickness into the actual thickness that can be measured and applied in practice. Experimental tests indicate that calculated thicknesses of 5.76 mm and 6.97 mm correspond to actual DFT values of 1.598 mm and 1.803 mm, respectively. A second interpolation therefore gives: DFT = 1.721 mm for a calculated thickness of 6.49 mm.

Thus, the dry film thickness is 1.721 mm, providing protection for the analysed steel member for 35 min (Figure 9). After entering the obtained thickness and the parameters from Table 1 into Eq. 4.27, a temperature of 551°C was obtained at the calculation step corresponding to 35 min. The effectiveness of the analysed coating should be confirmed by the relevant approval and assessment

documents permitting the product to be used as a fire protection system for steel structures. The test results nevertheless indicate that reactive fire protection, depending on the coating thickness and the section factor of the member, significantly limits the temperature increase in the steel. In the analysed case, the unprotected member reached the critical temperature after approximately 10.5 min, whereas the member protected with an intumescent coating having a DFT of 1.598 mm reached the critical temperature after approximately 38.4 min. Due to the need to limit the number of tests for environmental reasons, the unprotected member was analysed only using the ELEFIR-EN software.

We would like to thank Novasell Sp. z o.o. for conducting the fire tests and INBEPO Sp. z o.o. for their technical support.

Received: 06.04.2026

Revised: 02.06.2026

Published: 23.09.2026

Literature

- [1] Gwóźdź M, Suchodoła M. Bezpieczeństwo pożarowe budowlanych konstrukcji metalowych.
- [2] PN-EN 1993-1-2 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-2: Reguły ogólne – Projektowanie konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe.
- [3] PN-EN 13381-8 Metody badań służące określeniu wpływu na odporność ogniową elementów konstrukcyjnych. Część 8: Zabezpieczenia reaktywne stosowane do stalowych elementów konstrukcyjnych.
- [4] PN-EN 1363-1 Badania odporności ogniowej – Część 1: Wymagania ogólne.
- [5] Franssen J.-M, Vila Real P. Fire Design of Steel Structures. 2nd edition, ECCS – European Convention for Constructional Steelwork, Ernst & Sohn, 2015.

celowemu czasowi 35 min. W związku z tym, że 35 min leży między 32 a 37, interpolujemy proporcjonalnie i otrzymujemy $X = 6,49$ mm. Jest to jednak grubość obliczeniowa, a nie rzeczywista grubość powłoki nanoszonej na stal. DFT ustalamy w następnym etapie;

■ **krok 2** przelicza tę grubość obliczeniową na rzeczywistą grubość, którą można zmierzyć i zastosować w praktyce. Wiemy z badań eksperymentalnych, że grubości obliczeniowe 5,76 mm i 6,97 mm odpowiadają rzeczywistym DFT wynoszącym odpowiednio 1,598 i 1,803 mm. Interpolując ponownie, wy-

znaczamy, że obliczeniowej grubości 6,49 mm odpowiada DFT = 1,721 mm.

Wynika z tego, że grubość suchej powłoki wynosi 1,721 mm i pozwala zabezpieczyć analizowany element stalowy na 35 min (rysunek 9). Po wprowadzeniu otrzymanej grubości oraz parametrów z tabeli 1 do wzoru 4.27 uzyskano temperaturę 551°C w kroku odpowiadającym 35 min obli-

lizowanej powłoki należy potwierdzać dokumentami dopuszczającymi produkt do stosowania jako zabezpieczenie konstrukcji stalowych. Wyniki badania wskazują jednak, że reaktywne zabezpieczenie ogniochronne, zależnie od grubości powłoki i współczynnika masywności elementu, wyraźnie ogranicza przyrost temperatury w stali. W analizowanym przypadku element niezabezpieczony osiągnął temperaturę krytyczną po ok. 10,5 min, natomiast zabezpieczony powłoką pęczniącą o DFT 1,598 mm – po ok. 38,4 min. Konieczność ograniczenia badań ze względów ekologicznych spowodowała, że element niezabezpieczony przeanalizowano jedynie w programie ELEFIR-EN.

Podziękowania dla firmy Novasell Sp. z o.o. za przeprowadzenie badań pomiarowych oraz firmy INBEPO Sp. z o.o. za wsparcie merytoryczne.

Artykuł wpłynął do redakcji: 06.04.2026 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 02.06.2026 r.

Opublikowano: 23.09.2026 r.

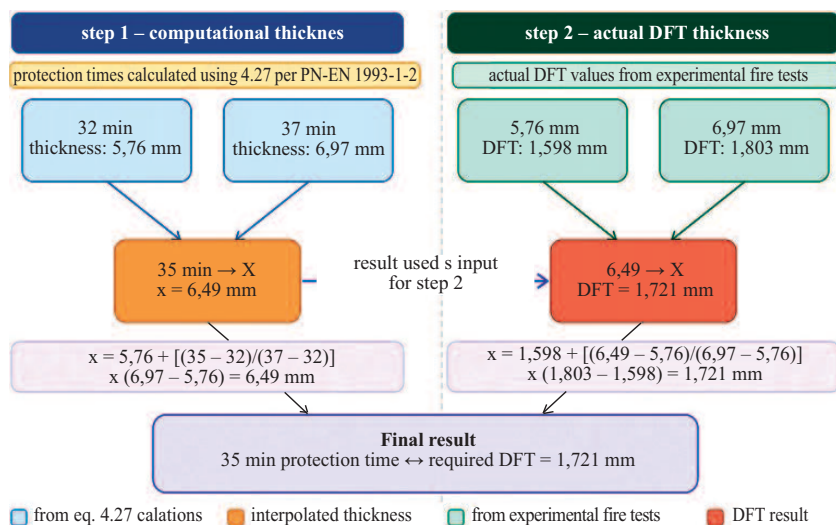


Fig. 9. Example of intermediate DFT calculation based on Eq. 4.27 and fire tests

Rys. 9. Przykład obliczenia DFT pośrednich na podstawie wzoru 4.27 oraz badań