

# **KONSTRUKCJE STALOWE W EUROPIE**

**Wielokondygnacyjne  
konstrukcje stalowe  
Część 6: Inżynieria pożarowa**



**Wielokondygnacyjne  
konstrukcje stalowe  
Część 6: Inżynieria pożarowa**



## PRZEDMOWA

Niniejsza publikacja stanowi szóstą część przewodnika projektanta zatytułowanego *Wielokondygnacyjne konstrukcje stalowe*.

Przewodnik *Wielokondygnacyjne konstrukcje stalowe* składa się z 10 następujących rozdziałów:

- Część 1: Poradnik architekta
- Część 2: Projekt koncepcyjny
- Część 3: Oddziaływania
- Część 4: Projekt wykonawczy
- Część 5: Projektowanie połączeń
- Część 6: Inżynieria pożarowa
- Część 7: Wzorcową specyfikacja konstrukcji
- Część 8: Opis kalkulatora do obliczania nośności elementów konstrukcyjnych
- Część 9: Opis kalkulatora do obliczania nośności połączeń prostych
- Część 10: Wskazówki dla twórców oprogramowania do projektowania belek zespolonych

*Wielokondygnacyjne konstrukcje stalowe* to jeden z dwóch przewodników projektanta. Drugi przewodnik nosi tytuł *Jednokondygnacyjne konstrukcje stalowe*.

Obydwa przewodniki projektanta powstały w ramach europejskiego projektu „Wspieranie rozwoju rynku kształtowników na potrzeby hal przemysłowych i niskich budynków (SECHALO) RFS2-CT-2008-0030”.

Przewodniki projektanta zostały opracowane pod kierownictwem firm ArcelorMittal, Peiner Träger oraz Corus. Treść techniczna została przygotowana przez ośrodki badawcze CTICM oraz SCI współpracujące w ramach joint venture Steel Alliance.



## Spis treści

	<b>Nr strony</b>
PRZEDMOWA	iii
STRESZCZENIE	vi
1 WPROWADZENIE	1
2 INŻYNIERIA POŻAROWA	3
2.1 Definicja inżynierii pożarowej	3
2.2 Cele bezpieczeństwa pożarowego	3
2.3 Koncepcje inżynierii pożarowej elementów konstrukcyjnych	5
3 METODY OCHRONY PRZECIWPOŻAROWEJ	15
3.1 Czynna ochrona przeciwpożarowa	15
3.2 Bierna ochrona przeciwpożarowa	16
3.3 Konstrukcja ognioodporna	22
4 PROSTE MODELE OBLICZENIOWE	29
4.1 Rozprzestrzenianie się pożaru i oddziaływania termiczne	29
4.2 Przewodnictwo cieplne	33
4.3 Analiza strukturalna	34
4.4 Proste metody projektowania konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe	35
5 ODDZIAŁYWANIE MEMBRANY ROZCIĄGANEJ	42
5.1 Badania ogniowe w Cardington	42
5.2 Badania ogniowe FRACOF	45
6 WYKORZYSTANIE PODDANIA DZIAŁANIU POŻARU NATURALNEGO I ZAAWANSOWANE MODELOWANIE KONSTRUKCJI	49
6.1 Ogólne	49
6.2 Modelowanie intensywności pożaru	50
6.3 Modelowanie przenikalności cieplnej	50
6.4 Zaawansowane modele konstrukcyjne	51
6.5 Walidacja i weryfikacja modeli zaawansowanych	51
6.6 Dopuszczenie prawne	52
LITERATURA	53
DODATKOWA LITERATURA	53
Przykład praktyczny: Strategie bezpieczeństwa pożarowego i metoda projektowania stalowych belek stropowych	57

## STRESZCZENIE

Niniejsza publikacja dostarcza inżynierom szeroki wachlarz strategii i metod projektowych związanych z bezpieczeństwem pożarowym konstrukcji wielokondygnacyjnych. Zawiera również informacje pomocnicze oraz założenia projektowe dotyczące inżynierii pożarowej. Formy konstrukcji ujęte w tej publikacji obejmują zarówno zabezpieczone, jak i niezabezpieczone elementy stalowe oraz elementy zespolone. Pod względem strategii bezpieczeństwa pożarowego dokument ten zawiera wytyczne dotyczące czynnej i biernej ochrony pożarowej, jak również alternatywne rozwiązania konstrukcyjne oraz omawia projektowanie z uwagi na warunki pożarowe.

W niniejszym przewodniku przedstawione zostały trzy różne metody projektowania z uwagi na warunki pożarowe:

- Zastosowanie uznanych arkuszy danych.
- Proste modele obliczeniowe wg norm EN 1993-1-2 i EN 1994-1-2.
- Zaawansowane modele obliczeniowe.

W celu zapewnienia bezpieczeństwa pożarowego konstrukcji wielokondygnacyjnych inżynierowie mogą skorzystać z gotowych arkuszy danych. Ekonomiczniejszym rozwiązaniem projektowania z uwagi na warunki pożarowe jest zastosowanie prostych modeli obliczeniowych przedstawionych w normach EN 1993-1-2 i EN 1994-1-2 lub przeprowadzenie zaawansowanych analiz opartych na podstawach projektowania oraz metodach elementów skończonych. Specjaliści z zakresu pożarnictwa stosują na ogół drugą z tych metod.



## 1 WPROWADZENIE

Bezpieczeństwo pożarowe stanowi jedną z kluczowych kwestii w projektowaniu nowoczesnych konstrukcji wielokondygnacyjnych. Pojęcie *bezpieczeństwo pożarowe* określa środki zapobiegawcze mające na celu zminimalizowanie prawdopodobieństwa i wpływu pożaru, który może powodować obrażenia, być przyczyną śmierci i strat materialnych. Na rysunku 1.1 przedstawiono przykłady pożarów konstrukcji wielokondygnacyjnych.

Projektowanie ze względu na bezpieczeństwo pożarowe ma ogólnie na celu ochronę życia ludzi, włączając w to osoby przebywające w budynku i strażaków, oraz zminimalizowanie zakłóceń w działalności firm, uszkodzeń budynku, mienia znajdującego się wewnątrz oraz otoczenia.



**Rysunek 1.1 Pożary konstrukcji wielokondygnacyjnych**

Aby osiągnąć powyższe cele, w dyrektywie w sprawie wyrobów budowlanych 89/106/EWG<sup>[1]</sup>, Załącznik I — *Podstawowe wymagania*, określono, że w celu zapewnienia bezpieczeństwa na wypadek pożaru:

„Obiekty budowlane muszą być zaprojektowane i wykonane w taki sposób, aby w przypadku pożaru:

- nośność konstrukcji mogła być zapewniona przez założony okres czasu,
- powstawanie i rozprzestrzenianie się ognia i dymu w obiektach było ograniczone,
- rozprzestrzenianie się ognia na sąsiednie obiekty było ograniczone,
- mieszkańcy mogli opuścić obiekt lub być uratowani w inny sposób,
- uwzględnione było bezpieczeństwo ekip ratowniczych.”

Projektując konstrukcje wielokondygnacyjne pod względem bezpieczeństwa w razie pożaru, inżynierowie muszą ściśle współpracować z architektami, wykonawcami, producentami i dostawcami, aby spełnić odpowiednie wymagania określone w przepisach. Mimo że wiele kwestii związanych z ochroną pożarową uwzględnianych jest już na etapie projektu architektonicznego, inżynierowie muszą brać pod uwagę bezpieczeństwo pożarowe ze szczególnym uwzględnieniem inżynierii pożarowej elementów konstrukcyjnych. W pewnych okolicznościach, aby konstrukcje wielokondygnacyjne spełniały wszelkie niezbędne wymagania bezpieczeństwa pożarowego, inżynierowie muszą zastosować szeroki wachlarz strategii bezpieczeństwa pożarowego i metod projektowych.

Części Eurokodów dotyczące projektowania wielokondygnacyjnych konstrukcji stalowych ze stropami zespolonymi ze względu na warunki pożarowe obejmują:

- EN 1991-1-2, Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje w warunkach pożaru<sup>[2]</sup>.
- EN 1993-1-2, Eurokod 3. Konstrukcje stalowe — Obliczanie konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe<sup>[3]</sup>.
- EN 1994-1-2, Eurokod 4. Projektowanie konstrukcji zespolonych — Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe<sup>[4]</sup>.

Poza ogólnymi wymaganiami, zasadami i regułami dokumenty te zawierają również zalecenia dotyczące współczynników częściowych oraz wpływu obciążeń na konstrukcje ze względu na warunki pożarowe. Przedstawiono w nich liczne równania/modele służące do obliczeń wzrostu temperatury, temperatury krytycznej oraz nośności przy docisku elementów konstrukcyjnych w warunkach pożaru.

Niniejszy przewodnik dostarcza inżynierom szeroki wachlarz strategii związanych z bezpieczeństwem pożarowym przy projektowaniu konstrukcji wielokondygnacyjnych. Mniej doświadczeni konstruktorzy znajdą w tej publikacji wytyczne dotyczące stosowania arkuszy danych umożliwiających spełnienie wymagań bezpieczeństwa pożarowego określonych przepisami. Inżynierowie z większym doświadczeniem przekonają się, że stosowanie zawartych w Eurokodach prostych modeli obliczeniowych jest wyjątkowo łatwe i pozwala uzyskać bardziej ekonomiczne rozwiązania.

## 2 INŻYNIERIA POŻAROWA

W niniejszym rozdziale opisano podstawy inżynierii pożarowej ze szczególnym uwzględnieniem odporności ogniowej konstrukcji i metod projektowania konstrukcji wielokondygnacyjnych, zapewniających odpowiedni poziom bezpieczeństwa osób, zgodnie z przepisami krajowymi.

### 2.1 Definicja inżynierii pożarowej

Inżynieria pożarowa to nauka interdyscyplinarna opisująca zastosowanie zasad nauki i technologii w celu ochrony ludzi, mienia i środowiska przed działaniem pożaru. Inżynieria pożarowa elementów konstrukcyjnych lub projektowanie pod względem ognioodporności stanowi jedynie niewielki wycinek inżynierii pożarowej.

### 2.2 Cele bezpieczeństwa pożarowego

Celem bezpieczeństwa pożarowego jest ograniczenie ryzyka strat spowodowanych pożarem. Straty te można definiować pod względem ofiar lub obrażeń wśród osób przebywających w budynku bądź strażaków, pod względem strat finansowych spowodowanych uszkodzeniami zawartości budynku lub zakłóceniami w działalności firmy, jak również strat w środowisku naturalnym spowodowanych skażeniem przez wodę gaśniczą lub przez niebezpieczne substancje uwolnione do atmosfery.

Przepisy krajowe określają zazwyczaj minimalne wymagania bezpieczeństwa pożarowego zapewniające odpowiedni poziom bezpieczeństwa osób, jednakże zainteresowane strony, jak np. klient, ubezpieczyciel budynku lub rządowa agencja ochrony środowiska mogą również określić inne wymagania obniżenia ryzyka strat finansowych i środowiskowych.

Wymagany poziom bezpieczeństwa jest określony w przepisach krajowych. Mimo że przepisy te różnią się pomiędzy sobą w poszczególnych krajach członkowskich, mają one na celu osiągnięcie następujących kluczowych celów określonych w dyrektywie w sprawie wyrobów budowlanych 89/106/EWG<sup>[1]</sup>:

„Obiekty budowlane muszą być zaprojektowane i wykonane w taki sposób, aby w przypadku pożaru:

- nośność konstrukcji mogła być zapewniona przez założony okres czasu,
- powstawanie i rozprzestrzenianie się ognia i dymu w obiektach było ograniczone,
- rozprzestrzenianie się ognia na sąsiednie obiekty było ograniczone,
- mieszkańcy mogli opuścić obiekt lub być uratowani w inny sposób,
- uwzględnione było bezpieczeństwo ekip ratowniczych.”

Chociaż zapewniając odpowiednią ognioodporność konstrukcji, nie można spełnić wszystkich wymienionych wyżej celów bezpieczeństwa pożarowego, to zazwyczaj uważa się ją za kluczowy element strategii ochrony pożarowej budynków.

### 2.2.1 Inżynieria pożarowa elementów konstrukcyjnych

Inżynierię pożarową elementów konstrukcyjnych można sklasyfikować jako specjalną dyscyplinę w ramach inżynierii pożarowej dotyczącą analizy zachowania konstrukcji w warunkach pożaru.

Podstawy projektowania konstrukcji budynków z uwagi na warunki pożarowe określone zostały w normie EN 1990, w której podano, że projektowanie takie powinno być oparte na analizie rozprzestrzeniania się ognia, reakcji termicznej i odporności mechanicznej. Wymagane parametry konstrukcji można wyznaczyć przez analizę globalną, analizę poszczególnych modułów lub elementów, jak również przez zastosowanie danych tabelarycznych wyznaczonych na podstawie analiz i badań oraz wyników indywidualnych testów ognioodporności.

Analiza rozprzestrzeniania się pożaru umożliwia konstruktorowi wyznaczenie oddziaływań termicznych, na które narażone będą elementy konstrukcyjne. W metodzie tradycyjnej oddziaływanie termiczne można wyznaczyć bezpośrednio, stosując nominalną krzywą czas-temperatura określoną w normie EN 1991-1-2. W przypadku konstrukcji budowlanych stosuje się zazwyczaj standardową krzywą czas-temperatura (krzywą ISO).

Po wyznaczeniu oddziaływań termicznych należy przeanalizować reakcje termiczne konstrukcji, stosując odpowiednią metodę analizy przewodnictwa cieplnego w celu wyznaczenia wykresu wzrostu temperatury w czasie dla danej konstrukcji.

Na koniec można dokonać oceny odporności mechanicznej elementu konstrukcyjnego przez analizę i badania mające na celu wyznaczenie jego nośności z uwzględnieniem wykresu wzrostu temperatury w czasie.

W zależności od zakładanej funkcji elementu konstrukcyjnego można dokonać oceny dopuszczalności jego wytrzymałości mechanicznej pod względem jednego lub więcej z poniższych kryteriów wyznaczonych na podstawie analizy lub testu ognioodporności.

- *Nośność (R)* — zdolność do wytrzymania określonych oddziaływań bez zawalenia się w wymaganym czasie podczas trwania pożaru.
- *Izolacja (I)* — zdolność do ograniczenia wzrostu temperatury powierzchni nieodsłoniętych poniżej określonych wartości granicznych wynoszących 140°C (średnio) i 180°C (maksymalnie) w celu zapobieżenia zapłonowi na powierzchniach przyległych.
- *Odporność na zniszczenie (E)* — zdolność do ograniczenia powstawania i rozwoju otworów przelotowych o znacznych rozmiarach w celu zapobieżenia przenikaniu gorących gazów i rozprzestrzenianiu się ognia na przyległe pomieszczenia.

W przepisach krajowych każda z tych trzech kategorii oznaczona jest za pomocą podanych wyżej liter wraz z cyfrowym oznaczeniem czasu odporności. Na przykład wymóg, aby nośność danego elementu konstrukcyjnego zachowana została co najmniej przez 60 minut, wyrażony będzie oznaczeniem R60.

Należy zauważyć, że nośność ( $R$ ) wymagana jest w przypadku wszystkich elementów nośnych konstrukcji. Izolacja ( $I$ ) i odporność na zniszczenie ( $E$ ) są, jednakże, wymagane wyłącznie dla elementów oddzielających, takich jak płyty stropowe i ściany, stanowiących granice stref ogniowych.

## 2.3 Koncepcje inżynierii pożarowej elementów konstrukcyjnych

Projektowanie elementów konstrukcyjnych ze względu na warunki pożarowe może odbywać się metodą tradycyjną, w której okresy ognioodporności określone są przez przepisy krajowe, lub też za pomocą metody opartej na właściwościach, w której konstruktor musi określić poziom ryzyka i dowieść, że jest on dopuszczalny. Należy zauważyć, że o dopuszczalności metody opartej na właściwościach decydują krajowe organa nadzoru, z którymi należy skontaktować się w tej sprawie na wczesnym etapie procesu projektowania. Tabela 2.1 zawiera zestawienie narzędzi dostępnych w każdej z opisanych wyżej metod.

**Tabela 2.1 Metody projektowania z uwagi na warunki pożarowe**

Metoda	Narzędzia	Obciążenia ogniowe (oddziaływania termiczne)	Wpływ pożaru (temperatura elementu)	Ognioodporność (nośność elementu)
Metoda tradycyjna (standardowa)	Gotowe arkusze danych	Standardowe badania ogniowe ISO wg: <ul style="list-style-type: none"> <li>EN 1363-1, § 5</li> <li>EN 1365-2, § 5</li> </ul>	Stosowne informacje omówione w: <ul style="list-style-type: none"> <li>zestawach informacji podawanych przez producentów środków ochrony pożarowej,</li> <li>dokumentach opublikowanych przez Access-Steel,</li> <li>EN 1994-1-2, § 4.2.</li> </ul>	
	Proste reguły i modele	Standardowe obliczenia pożarowe ISO wg normy EN 1991-1-2, §3.2	Elementy stalowe wg normy EN 1993-1-2 § 4.2.5	§ 4.2.3 § 4.2.4
	Reguły i metody zaawansowane		Elementy zespolone wg normy EN 1994-1-2 Załącznik D2, § 4.3.4.2.2	Załącznik E-F, § 4.3.1 § 4.3.4.2.4 § 4.3.4.2.3
Metoda oparta na właściwościach (metody pożaru naturalnego)	Reguły i metody zaawansowane	Pożar o modelu parametrycznym Pożar lokalny	Uwzględnić interakcję pomiędzy elementami konstrukcyjnymi i oddziaływanie membrany rozciąganej.	Modele fizyczne przewodnictwa cieplnego Metoda elementów skończonych
	Proste reguły i modele	Pożar o modelu parametrycznym Pożar lokalny	Elementy stalowe wg normy EN 1993-1-2 § 4.2.5	Modele fizyczne reakcji konstrukcji elementów skończonych Metoda elementów skończonych
	Reguły i metody zaawansowane	Pożar naturalny wg normy EN 1991-1-2, § 3.3 Załącznik A do F Miejscowy, strefy, CFD	Uwzględnić interakcję pomiędzy elementami konstrukcyjnymi i oddziaływanie membrany rozciąganej.	Modele fizyczne reakcji konstrukcji elementów skończonych Metoda elementów skończonych

### 2.3.1 Metoda tradycyjna

Metoda tradycyjna to wciąż powszechnie stosowana metoda projektowania ze względu na warunki pożarowe. Ma ona na celu wyłącznie zapewnienie odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa osób, tak aby spełnione zostały wymagania dotyczące ognioodporności określone w krajowych przepisach budowlanych. Tradycyjne przepisy będą zawierały wymagania niezbędne do zrealizowania kluczowych celów bezpieczeństwa pożarowego określonych w punkcie 2.2.

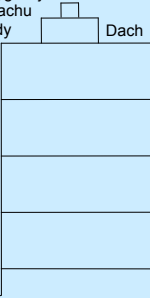
#### Ognioodporność konstrukcji

W tradycyjnych przepisach istnieje wymóg podzielenia budynków za pomocą konstrukcji ognioodpornych. W wymaganiach określone są zazwyczaj maksymalne rozmiary pojedynczej strefy i zalecenia dotyczące ognioodporności elementów konstrukcyjnych oddzielających poszczególne strefy ogniowe. Pionowy i poziomy podział konstrukcji wielokondygnacyjnych na wiele stref ogniowych umożliwia ograniczenie rozprzestrzeniania się ognia i dymu wewnątrz budynku, pozostawiając osobom przebywającym wewnątrz wystarczająco dużo czasu na ewakuację. Niektóre przepisy krajowe zezwalają na pewne rozluźnienie ograniczeń dotyczących wielkości pojedynczej strefy ogniowej, jeśli budynek jest wyposażony w instalację tryskaczową.

Wymagania dotyczące ognioodporności konstrukcji określone są zazwyczaj jako czas, przez który konstrukcja lub element konstrukcyjny zachowa swoje właściwości dotyczące nośności, izolacji i odporności na zniszczenie.

Wymagania dotyczące ognioodporności konstrukcji wielokondygnacyjnych określa się generalnie w zależności od przeznaczenia i wysokości budynku, jak przedstawiono w tabeli 2.2. Wymagania dotyczące ognioodporności konstrukcji wielokondygnacyjnych wahają się od 60 minut (R60) do 120 minut (R120), ale w niektórych przepisach krajowych mogą znajdować się wymagania wynoszące nawet 4 godziny. W przypadku, gdy budynek wyposażony jest w instalację tryskaczową, przepisy tradycyjne zezwalają na obniżenie okresu ognioodporności wymaganego dla elementów konstrukcyjnych.

**Tabela 2.2** Typowe wymagania dotyczące ognioodporności

	Ognioodporność (min) dla wysokości do najwyższej kondygnacji (m)				
	<5	≤18	≤30	>30	
Mieszkalne (zamieszkania zbiorowego)	30	60	90	120	<div><p>Wysokość ostatniej kondygnacji nie obejmuje obszarów dachu przeznaczonych na ogrody</p><p>Wysokość ostatniej kondygnacji mierzona od górnej powierzchni stropu ostatniej kondygnacji do poziomu terenu z najniższej strony budynku</p></div>
Biurowe	30	60	90	120*	
Sklepy, obiekty handlowe i rekreacyjno-wypoczynkowe	30	60	90	120*	
Parkingi zabudowane	30	60	90	120	
Parkingi niezabudowane	15	15	15	60	
* Wymagana jest instalacja tryskaczowa, ale ognioodporność stropu może wynosić jedynie 90 minut.					

Dane w niniejszej tabeli oparte są na przepisach obowiązujących w Wielkiej Brytanii. W innych krajach europejskich mogą obowiązywać inne wymagania.



Jako zobrazowanie różnic w wymaganiach dotyczących ochrony pożarowej można przytoczyć przykład Niemiec, gdzie przepisy nie wymagają jakiegokolwiek ognioodporności (R0) w przypadku niezabudowanych parkingów wielokondygnacyjnych.



**Rysunek 2.1 Niezabezpieczony parking wielokondygnacyjny w Niemczech (R0)**

W przypadku metody tradycyjnej nie jest wymagane modelowanie rozprzestrzeniania się pożaru, a wartości oddziaływań termicznych powinny opierać się na standardowym wykresie wzrostu temperatury w czasie (krzywa ISO).

Metoda obliczeń przewodnictwa cieplnego zastosowana w celu wyznaczenia wykresu wzrostu temperatury konstrukcji w czasie ma charakter iteracyjny i zazwyczaj obliczenia te należy w pewien sposób zautomatyzować. W normie EN 1993-1-2<sup>[3]</sup> oraz EN 1994-1-2<sup>[4]</sup> przedstawione zostały proste równania dla stalowych kształtowników zabezpieczonych i niezabezpieczonych. Można również zastosować jeden z wielu dostępnych na rynku pakietów oprogramowania opartych na analizie za pomocą metody elementów skończonych lub różnic skończonych. W przypadku zespolonych elementów konstrukcyjnych stalowo-betonowych metody projektowe przedstawione w Załącznikach informacyjnych do normy EN 1994-1-2 zawierają również dane tabelaryczne pozwalające uniknąć konieczności wykonywania analizy przewodnictwa cieplnego, jednakże zakres stosowania tych metod jest ograniczony.

Spełnienie wymagań tradycyjnych można zademonstrować za pomocą analiz, wyników analiz i/lub badań w formie tabelarycznej bądź indywidualnych wyników uzyskanych na podstawie standardowych badań ogniowych.

Obliczenia statyczne konstrukcji mogą opierać się na prostych modelach projektowych uwzględniających poszczególne elementy konstrukcyjne lub modelach wykorzystujących metodę elementów skończonych umożliwiającą analizę podzespołów konstrukcyjnych lub całych konstrukcji.

### *Dane tabelaryczne*

Dane tabelaryczne dotyczące własności pożarowych mogą obejmować dane ogólne lub dane charakterystyczne określonego wyrobu. Ogólne dane tabelaryczne dotyczące konstrukcji stalowych i zespolonych konstrukcji stalowo-betonowych są dostępne w normach EN 1993-1-2 i EN 1994-1-2. Z kolei metoda temperatury krytycznej przedstawiona w normie EN 1993-1-2 obejmuje tabelę danych dotyczących temperatur krytycznych wyrażonych w postaci stopnia użytkowalności. Dane służące do obliczeń szerokiego wachlarza zespolonych belek i słupów stalowo-betonowych są również dostępne w formie tabelarycznej w normie EN 1994-1-2.

Dane tabelaryczne charakterystyczne dla określonych wyrobów są powszechnie dostępne dla materiałów zabezpieczeń przeciwpożarowych, które można zastosować dla konstrukcji stalowych. Wymagana grubość warstwy zabezpieczenia przeciwpożarowego wyrażona jest zazwyczaj w funkcji okresu ognioodporności, współczynnika przekroju oraz temperatury krytycznej. Do wielu innych wyrobów budowlanych, takich jak blachy stalowe pokrycia stropów zespolonych, również dołączane są tabele projektowe danych charakterystycznych dla tych wyrobów.

### *Proste modele obliczeniowe*

Zamiast stosowania danych tabelarycznych konstruktorzy mogą również wykonać proste obliczenia w celu wyznaczenia nośności elementu po określonym czasie wystawienia na działanie ognia. Oddziaływanie ognia uwzględniane jest w Eurokodach w postaci standardowego wykresu wzrostu temperatury w czasie. Nośność elementu uzależniona jest od poziomu przyłożonego obciążenia oraz stopnia utraty wytrzymałości materiału w warunkach pożarowych i oblicza się ją zgodnie z zasadami przedstawionymi w Eurokodach.

Zastosowanie prostych modeli obliczeniowych stanowi najbardziej praktyczne rozwiązanie w przypadku oceny projektu niezabezpieczonych konstrukcji stalowych, zazwyczaj, gdy wymagana jest ognioodporność R30 lub niższa. Natomiast, gdy wymagane jest zabezpieczenie ogniowe konstrukcji stalowej, bardziej przydatne są standardowe dane tabelaryczne dostarczone przez producentów materiałów zabezpieczeń przeciwpożarowych.

Wadą wspomnianych modeli obliczeniowych jest to, iż zakres ich zastosowania jest ograniczony do pojedynczych elementów konstrukcyjnych i nie uwzględniają one interakcji pomiędzy elementem konstrukcyjnym a otaczającą konstrukcją.

### *Zaawansowane modele obliczeniowe*

W zaawansowanych modelach obliczeniowych podczas obliczeń konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe wykorzystuje się zarówno podstawy projektowania, jak i metody elementów skończonych. Reakcje termiczne i konstrukcyjne na oddziaływanie pożarowe można wyznaczyć za pomocą zaawansowanych modeli fizycznych.



Ten rodzaj analizy pozwala zazwyczaj uzyskać ekonomiczniejsze rozwiązania niż w przypadku metody tradycyjnej lub prostych modeli obliczeniowych. Metoda ta umożliwia konstruktorom zaprojektowanie bardziej innowacyjnych rozwiązań konstrukcji budynków i często dowodzi, że pozostawienie niektórych elementów konstrukcyjnych bez zabezpieczenia nie stanowi jakiegokolwiek zagrożenia i nie powoduje obniżenia ognioodporności konstrukcji.

Zaawansowane modele obliczeniowe wymagają przeprowadzenia wielu obliczeń i sporego doświadczenia od konstruktora w zakresie inżynierii pożarowej elementów konstrukcyjnych, jak również metod elementów skończonych.

### **Klasyfikacja materiałów wykładzin**

Przepisy krajowe nakładają obowiązek kontroli materiałów, z których wykonane są wykładziny ścian i sufitów budynków. Materiały te muszą wytrzymywać rozprzestrzenianie się płomieni na ich powierzchniach i nie mogą znacząco przyczyniać się do rozwoju pożaru w zakresie wydzielania ciepła i dymu. Materiały wykładzin klasyfikuje się na podstawie wyników badania reakcji na ogień.

### **Rozprzestrzenianie się ognia na zewnątrz**

Aby umożliwić kontrolowanie rozmiaru pożaru, przepisy krajowe zawierają zazwyczaj wymóg uwzględnienia możliwości rozprzestrzenienia się ognia na sąsiadujące budynki. W niektórych przypadkach wymagania dotyczące ognioodporności ścian zewnętrznych są uzależnione od odległości pomiędzy budynkami, wskazując na fakt, że promieniowanie ciepłe stanowi główne zagrożenie pożarowe dla budynków sąsiadujących. Wraz ze wzrostem odległości pomiędzy budynkami maleje natężenie strumienia ciepła.

### **Sposoby ewakuacji**

Tradycyjne przepisy zawierają również wymóg zapewnienia dróg ewakuacyjnych umożliwiających osobom przebywającym w budynku przejście w razie pożaru w bezpieczne miejsce na zewnątrz budynku. W zależności od przeznaczenia budynku oraz potencjalnej liczby osób w nim przebywających w przepisach może zostać określona wymagana ilość wyjść, szerokość schodów lub korytarzy wykorzystywanych jako drogi ewakuacyjne oraz maksymalna odległość, jaką należy przebyć od najbardziej oddalonego punktu w budynku do wyjścia.

Dane przedstawione w tabeli 2.3 pozwalają uświadomić sobie wagę odległości do przebycia podczas projektowania schodów ewakuacyjnych. Należy zwrócić uwagę, że maksymalna odległość do przebycia może różnić w poszczególnych krajach.

**Tabela 2.3**      **Typowe maksymalne odległości (m) do obszarów zabezpieczonych pożarowo lub do schodów ewakuacyjnych**

Rodzaj budynku	Jeden kierunek	Wiele kierunków
Mieszkalny	9	18
Biurowy	18	45
Handlowy	18	45

Projekt środków ewakuacji wpływa na układ budynku pod względem rozmieszczenia drzwi, korytarzy oraz, w szczególności, ilości i lokalizacji klatek schodowych w budynku.

### **Dostęp dla służb ratowniczych**

W tradycyjnych przepisach istnieje wymóg zapewnienia dostępu i ułatwień dla straży pożarnej umożliwiających przeprowadzenie akcji gaśniczej i ratowniczej. W przypadku budynków wielokondygnacyjnych może istnieć wymóg zapewnienia szybu pożarowego, łącznie z klatką schodową i/lub windami, w celu umożliwienia straży pożarnej wprowadzenia personelu i wniesienia sprzętu na kondygnację objętą pożarem. W szybie pożarowym może również biec pionowo w górę mokra lub sucha główna rura ciśnień, którą można wykorzystać dla zapewnienia dopływu wody niezbędnej podczas akcji gaśniczej. Szyb pożarowy ma zapewnić strażakom względnie bezpieczne miejsce, z którego mogą rozpocząć akcję gaśniczą prowadzoną w strefie objętej pożarem. Szyby pożarowe zajmują zazwyczaj więcej powierzchni stropu niż standardowy szyb klatki schodowej i windy, więc wymagania te mogą znacząco wpływać na projekt budynku i należy uwzględnić je na wczesnym etapie projektowania. Otoczenie budynku musi również umożliwiać dostęp dla pojazdów służb ratowniczych, zazwyczaj do obszaru względnie blisko przyłączy wodnych mokrej lub suchej rury ciśnień.

### **2.3.2 Metoda oparta na właściwościach**

Należy jasno udokumentować procedurę projektowania ze względu na warunki pożarowe opartą na właściwościach, tak aby jej reguły i założenia były w prosty sposób zrozumiałe dla osób trzecich. Procedura ta może obejmować następujące główne etapy:

- Przegląd projektu architektonicznego budynku.
- Ustalenie celów zabezpieczenia przeciwpożarowego.
- Określenie zagrożeń pożarowych oraz ewentualnych skutków pożaru.
- Określenie możliwych strategii zabezpieczenia przeciwpożarowego.
- Określenie kryteriów odbioru oraz metod przeprowadzania analiz.
- Określenie scenariuszy pożarów do przeanalizowania.

### **Przegląd projektu architektonicznego**

Przegląd ten powinien mieć na celu określenie wszelkich wymogów architektonicznych i klienta, które mogą wpływać na opracowanie rozwiązań zabezpieczenia przeciwpożarowego, na przykład:

- Przyszłe przeznaczenie budynku wraz z jego przewidywaną zawartością, jak również przewidywane oddziaływania stałe, zmienne i termiczne.
- Rodzaj konstrukcji i układ budynku.
- Obecność wentylacji oddymiającej lub tryskaczowej.
- Klasyfikacja osób przebywających na stałe w budynku, szacowana ilość osób, które mogą w nim przebywać, oraz ich rozmieszczenie.
- Rodzaj systemu wykrywania pożaru i systemu alarmowego.

- Stopień obsługi budynku w okresie jego użytkowania (na przykład podejmowanie działań związanych z czynnym bezpieczeństwem przeciwpożarowym lub zapobieganie gromadzeniu się materiałów palnych w newralgicznych obszarach).

### **Cele zabezpieczenia przeciwpożarowego**

Cele bezpieczeństwa przeciwpożarowego należy jasno określić na wczesnym etapie procesu projektowania. Najlepiej, aby proces ten odbywał się w porozumieniu z klientem, organami nadzoru i innymi zainteresowanymi stronami.

Główne cele bezpieczeństwa przeciwpożarowego, które można rozpatrzeć, to bezpieczeństwo osób, ograniczenie strat materialnych oraz ochrona środowiska.

Cele związane z bezpieczeństwem osób zostały już określone w przepisach tradycyjnych, ale powinny one zawierać zapisy zapewniające ewakuację osób przebywających w budynku w sposób możliwie bezpieczny, prowadzenie akcji przez straż pożarną w sposób możliwie bezpieczny oraz wymagania, aby ewentualne zawalenie się budynku nie zagrażało osobom przebywającym w jego pobliżu.

Pożar może mieć ogromny wpływ na ciągłość prowadzenia działalności przez firmę, w związku z czym należy zminimalizować potencjalne uszkodzenia konstrukcji i materiałów, z których wykonany jest budynek, jego zawartości, jak również szkody w ciągłości efektywnego prowadzenia działalności i wizerunku firmy. Poziom środków ostrożności uznanych za konieczne w przypadku określonego budynku uzależniony będzie od wielkości i rodzaju działalności w nim prowadzonej. W niektórych przypadkach istnieje możliwość łatwego przeniesienia działalności do pomieszczeń zastępczych bez poważnych zakłóceń dla jej ciągłości. Natomiast w innych przypadkach działalność może zostać wstrzymana do chwili przywrócenia budynku do stanu użytkowalności. Wiele firm, w których siedzibach wybuchł pożar, bankrutuje zanim przywrócona zostanie normalna działalność.

Duże pożary, w wyniku których do otoczenia uwolnione zostają niebezpieczne substancje, mogą mieć znaczny wpływ na środowisko. Skażenia mogą rozprzestrzeniać się poprzez powietrze lub wodę, w związku z tym, że do akcji gaśniczej niezbędne są znaczne ilości wody.

### **Określenie zagrożeń pożarowych oraz ewentualnych skutków pożaru**

Przegląd potencjalnych zagrożeń pożarowych może obejmować analizę możliwych źródeł zaprószenia ognia, objętości i rozmieszczenia materiałów palnych, działań prowadzonych w budynku oraz wszelkich czynników specjalnych. Podczas oceny znaczenia tych zagrożeń należy uwzględnić ich potencjalne skutki i wpływ na osiągnięcie celów zabezpieczenia przeciwpożarowego.

### **Możliwe strategie zabezpieczenia przeciwpożarowego**

Ocena poziomu osiągniętego bezpieczeństwa przeciwpożarowego wymaga zaproponowania co najmniej jednej strategii zabezpieczenia przeciwpożarowego. Będą to zazwyczaj najbardziej ekonomiczne strategie pozwalające osiągnąć cele bezpieczeństwa przeciwpożarowego.

Strategia zabezpieczenia przeciwpożarowego stanowi integralny pakiet działań na etapie projektowania konstrukcji wielokondygnacyjnych. Podczas opracowywania strategii zabezpieczenia przeciwpożarowego należy uwzględnić następujące kwestie:

- Działania związane z automatycznym tłumieniem (np. instalacje tryskaczowe) mające na celu obniżenie prawdopodobieństwa rozprzestrzenienia się ognia i dymu.
- Automatyczne systemy wykrywania ognia ostrzegające o wystąpieniu pożaru na jego wczesnym etapie.
- Podział budynku na strefy ogniowe za pomocą konstrukcji ognioodpornych oraz umieszczenie ognioodpornych elementów konstrukcyjnych w celu zapewnienia stabilności konstrukcji.
- Środki ewakuacji w postaci odpowiedniej ilości dróg ewakuacyjnych (o odpowiedniej długości i szerokości) uwzględniające liczbę osób, które mogą przebywać w budynku w dowolnym czasie.
- Układy automatyczne, takie jak drzwi lub żaluzje przeciwpożarowe z systemem samoczynnego zamykania, umożliwiające ograniczenie rozprzestrzeniania się ognia i dymu.
- Automatyczne systemy oddymiania zapewniające wolne od dymu drogi ewakuacyjne.
- Systemy alarmowe i ostrzegawcze, umożliwiające zaalarmowanie osób przebywających w budynku.
- Strategia ewakuacji.
- Środki pierwszej pomocy i sprzęt przeciwpożarowy.
- Ułatwienia dla straży pożarnej.
- Zarządzanie bezpieczeństwem pożarowym.

#### **Określenie kryteriów odbioru oraz metod przeprowadzania analiz**

Podstawą kryteriów dopuszczalnych wartości właściwości w przypadku projektowania opartego na właściwościach będzie globalna analiza określonej strategii zabezpieczenia przeciwpożarowego. Kryteria te należy określić i zweryfikować po przeprowadzeniu dyskusji pomiędzy konstruktorami a klientami, przy użyciu metod porównawczych, ilościowych lub jakościowych.

Metody porównawcze umożliwiają ocenę poziomu bezpieczeństwa pożarowego osiągniętego w wyniku projektowania opartego na właściwościach w stosunku do metody tradycyjnej, w celu zapewnienia osiągnięcia równoważnego poziomu bezpieczeństwa pożarowego. Metody ilościowe służą do oceny wpływu najbardziej niekorzystnego scenariusza pożarowego oraz wykazania, że wpływ ten nie przekroczy określonych kryteriów odbioru. Natomiast metody jakościowe mają na celu wykazanie, że przyjęta strategia bezpieczeństwa pożarowego pozwala w dostatecznym stopniu obniżyć prawdopodobieństwo wystąpienia znacznych strat.

### Określenie scenariuszy pożarowych

Liczba możliwych scenariuszy pożarowych w dowolnym budynku może okazać się dość znaczna i zwykle brak jest środków na analizę ich wszystkich. W związku z tym szczegółowa analiza musi być ograniczona do najważniejszych scenariuszy pożarowych lub do przypadku zaistnienia najmniej korzystnych warunków. Scenariusze pożarowe muszą również uwzględniać ewentualną awarię systemów zabezpieczających. W przypadku większości budynków wymagane jest przeprowadzenie szczegółowej analizy więcej niż jednego scenariusza pożarowego.

### 2.3.3 Wybór optymalnej metody

Wybór optymalnej metody obliczania konstrukcji wielokondygnacyjnych ze względu na warunki pożarowe uzależniony jest od różnych parametrów, takich jak geometria, cechy konstrukcyjne, funkcja użytkowa oraz wiedza konstruktora z dziedziny obliczania konstrukcji ze względu na warunki pożarowe. W tabeli 2.4 przedstawione zostały pewne sugestie co do tego, która z metod może prowadzić do bardziej ekonomicznego rozwiązania.

Ogólnie biorąc, w przypadku niskich budynków o niewielkiej powierzchni stropów, najbardziej optymalną metodą może być zastosowanie gotowych arkuszy danych. Natomiast w przypadku wysokich budynków o dużej powierzchni stropów lub w celu skorzystania z dobrodziejstw czynnej ochrony przeciwpożarowej, optymalnym rozwiązaniem pod względem ekonomicznym może być zastosowanie zaawansowanych modeli obliczeniowych. W przypadku większości budynków średniej wysokości najbardziej ekonomiczne rozwiązania można uzyskać stosując proste modele obliczeniowe.

**Tabela 2.4 Wybór optymalnej metody obliczania konstrukcji ze względu na warunki pożarowe**

Cechy budynku	Arkusze danych	Proste modele obliczeniowe	Zaawansowane modele obliczeniowe
1. Wielkość budynku — powierzchnia stropów na kondygnację, $A$			
Mały: $A < 200 \text{ m}^2$	✓✓		
Średni: $200 \text{ m}^2 < A < 2000 \text{ m}^2$	✓✓		
Duży: $A > 2000 \text{ m}^2$	✓	✓	✓
2. Wysokość budynku — liczba kondygnacji, $n$			
Niski: $n \leq 5$	✓✓	✓	
Wysoki: $n > 6$	✓	✓	✓

✓✓ Najbardziej ekonomiczne rozwiązanie

✓ Rozwiązanie prawdopodobnie ekonomiczne

Zastosowanie środków czynnej ochrony przeciwpożarowej, takich jak czujniki, alarmy i instalacja tryskaczowa, daje korzyści w przypadku użycia zaawansowanych metod obliczeniowych. Należy zwrócić uwagę, że niektóre przepisy krajowe i/lub władze lokalne zezwalają na obniżenie obciążenia ogniowego, jeśli powyższe środki zostały zastosowane.

Dostępność specjalistów obliczeń konstrukcji pod względem warunków pożarowych ułatwi stosowanie zaawansowanych metod. Jakkolwiek, konstruktorzy nie posiadający doświadczenia w tej dziedzinie mogą uzyskać bardziej ekonomiczne rozwiązania poprzez zastosowanie prostych metod obliczeniowych lub gotowych arkuszy danych, ponieważ na etapie projektowania można osiągnąć znaczne oszczędności.

W tym zakresie, w tabeli 2.5 przedstawiono metody zalecane w zależności od doświadczenia konstruktora oraz wskazano punkty niniejszego przewodnika, w których znajdują się odpowiednie informacje.

**Tabela 2.5      Wpływ umiejętności konstruktora na przyjęte rozwiązanie zabezpieczenia przeciwpożarowego**

<b>Wiedza w dziedzinie obliczania konstrukcji ze względu na warunki pożarowe</b>	<b>Zalecana metoda obliczeniowa (punkt opisujący daną metodę)</b>
Niespecjalista	Czynna ochrona przeciwpożarowa (3.1) Bierna ochrona przeciwpożarowa (3.2) Alternatywne systemy zabezpieczeń przeciwpożarowych (3.3)
Ograniczona wiedza	Proste metody obliczeniowe (4) Oddziaływanie membrany rozciąganej (5)
Specjalista	Zaawansowane metody obliczeniowe (6)



## 3 METODY OCHRONY PRZECIWPOŻAROWEJ

### 3.1 Czynna ochrona przeciwpożarowa

Środki czynnej ochrony przeciwpożarowej obejmują montaż czujników, alarmów i instalacji tryskaczowych umożliwiających wykrycie ognia lub dymu i stłumienie pożaru w jego najwcześniejszej fazie.

Wymienione systemy ochrony przeciwpożarowej mogą mieć znaczny wpływ na poziom bezpieczeństwa osób i ochrony mienia, który można osiągnąć w budynku. W przepisach tradycyjnych zazwyczaj występuje wymóg zamontowania systemów alarmowych, które zwykle stanowią, wraz z instalacją tryskaczową, istotny element strategii bezpieczeństwa pożarowego w przypadku projektów opartych na właściwościach.

#### 3.1.1 Czujniki i alarmy

W ramach strategii opartej na czynnych środkach ochrony przeciwpożarowej w budynku wielokondygnacyjnym należy zamontować określoną liczbę czujników. Urządzenia te umożliwiają wykrycie ciepła, dymu i płomieni. Systemy alarmów przeciwpożarowych umożliwia ostrzeżenie osób przebywających w budynku o potrzebie ewakuacji w związku z wybuchem pożaru. Na rysunku 3.1 przedstawiony został typowy czujnik pożarowy i urządzenie alarmowe.



Rysunek 3.1 Czujnik pożarowy i urządzenie alarmowe

#### 3.1.2 Instalacja tryskaczowa

Instalacja tryskaczowa to urządzenie pozwalające na automatyczne stłumienie niewielkiego pożaru, zarówno bezpośrednio po jego wybuchu, jak i krótko potem.

Jak pokazano na rysunku 3.2, tryskacz wyposażony jest zazwyczaj w szklaną bańkę, w której znajduje się lotna ciecz i która zamyka dyszę wodną. W przypadku wybuchu pożaru podgrzana ciecz zwiększa swoją objętość, rozrywając bańkę, w wyniku czego uruchomiona zostaje głowica tryskaczowa.

Instalacja tryskaczowa zwiększa zarówno bezpieczeństwo przeciwpożarowe konstrukcji, jak i ochronę mienia znajdującego się w budynku. W niektórych krajach zastosowanie instalacji tryskaczowej w budynkach wielokondygnacyjnych może wiązać się z obniżeniem wymagań dotyczących okresów ognioodporności, ale należy to sprawdzić w odpowiednich przepisach krajowych.



Rysunek 3.2 Tryskacz i jego uruchomienie

### 3.2 Bierna ochrona przeciwpożarowa

Wysoka temperatura wytworzona wewnątrz budynku na skutek wybuchu pożaru wpływa na wszystkie materiały budowlane. Ich wytrzymałość i sztywność spada wraz ze wzrostem temperatury. Często istnieje konieczność zapewnienia zabezpieczenia przeciwpożarowego elementom konstrukcyjnym stalowych konstrukcji wielokondygnacyjnych, aby opóźnić utratę przez nie nośności. Elementy konstrukcyjne mogą być izolowane za pomocą materiałów ognioochronnych, takich jak płyty, warstwy natryskowe lub przeciwogniowe powłoki ochronne. Właściwości tych materiałów ognioochronnych są badane i weryfikowane zgodnie z normą EN 13381<sup>[5]</sup>.

Grubość warstwy ochronnej wymagana w określonym budynku uzależniona jest od rodzaju wybranych materiałów ognioochronnych, okresu ognioodporności wymaganego przez krajowe przepisy budowlane, współczynnika przekroju elementu konstrukcyjnego, który ma być zabezpieczony, oraz temperatury krytycznej tego elementu.



### 3.2.1 Metody i materiały ochrony przeciwpożarowej

Istnieją dwa rodzaje materiałów służących do biernej ochrony przeciwpożarowej, tzn. materiały niereaktywne i reaktywne. Niereaktywne materiały zabezpieczające poddane działaniu ognia zachowują swoje właściwości. Do najpopularniejszych materiałów niereaktywnych należą płyty i powłoki natryskowe. Natomiast reaktywne materiały zabezpieczające charakteryzuje zmiana własności w wyniku poddania działaniu ognia. Najszerzej znanym przykładem tego typu zabezpieczeń jest powłoka przeciwogniowa.

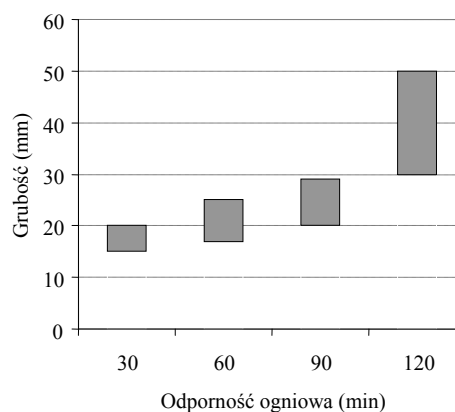
#### Płyty

Jako zabezpieczenie elementów stalowych powszechnie stosuje się płyty dostępne w szerokim zakresie grubości od 15 do 50 mm, pozwalające uzyskać okres ognioodporności od 30 do 120 minut.

Płyty zazwyczaj produkowane są z włókien mineralnych lub występujących w naturze materiałów w postaci płyt, takich, jak wermikulit lub mika, połączonych spoiwem cementowym i/lub krzemianowym. Płyty mogą być przymocowane do elementów stalowych mechanicznie za pomocą śrub, taśm i/lub kątowników cynkowanych, lub przyklejone i unieruchomione kołkami.



(a)



(b)

**Rysunek 3.3 Ochrona przeciwpożarowa płytami (a) Mocowanie płyt do stalowego słupa; (b) Ognioodporność**

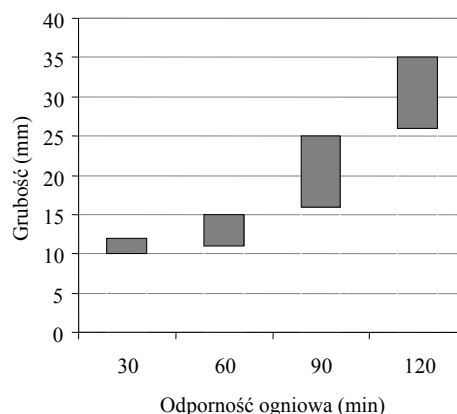
Płyty są wytwarzane fabrycznie i w związku z tym można uznać, że zarówno ich grubość, jak i jakość jest gwarantowana. Zapewniają one estetyczny wygląd zamkniętej zabudowy i dostępne są w wersji z wstępnym wykończeniem lub przygotowane do dalszych prac wykończeniowych. Jakkolwiek, płyt nie można w łatwy sposób przytwierdzić do elementów o złożonych kształtach. Ogólnie biorąc, płyty są droższym rozwiązaniem niż warstwy natryskowe lub powłoki ogniowe, należy jednak pamiętać, że można wybrać płyty niedekorowane, które są tańsze od dekorowanych. Ponadto, czas potrzebny na zamocowanie płyt jest znacznie dłuższy w porównaniu z czasem nakładania powłok ogniowych. Powoduje to nie tylko zwiększenie kosztu konstrukcji, ale wpływa również na harmonogram realizacji budynków wielokondygnacyjnych.

### Natryskowe powłoki niereaktywne

Proces nakładania tego typu zabezpieczenia pokazany został na rysunku 3.4(a). Natryskowe powłoki niereaktywne o grubości od 10 do 35 mm są szeroko stosowane w ochronie elementów konstrukcji stalowych i umożliwiają uzyskanie okresu ognioodporności od 30 do 120 minut, jak pokazano na rysunku 3.4(b).



(a) Nakładanie



(b) Ognioodporność przy określonej grubości

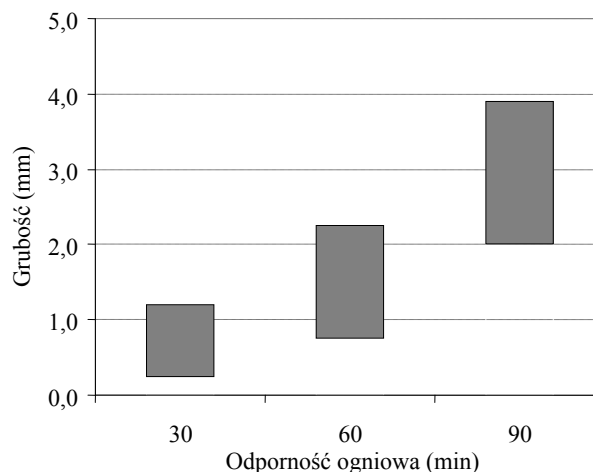
**Rysunek 3.4 Natryskowa niereaktywna ochrona przeciwpożarowa (a) Nakładanie; (b) Ognioodporność**

Natryskowe powłoki niereaktywne wykonane są z materiałów opartych w głównej mierze na cemencie lub gipsie zawierających włókna mineralne, spęczniony wermikulit i/lub inne lekkie kruszywa lub masy wypełniające. Ten rodzaj ochrony jest nakładany na miejscu i jest on szczególnie odpowiedni dla elementów o skomplikowanych kształtach, które są niewidoczne podczas użytkowania. Jakkolwiek, natryskiwanie zabezpieczenia na miejscu może wymagać zastosowania wielu osłon, a co za tym idzie, może wpływać na harmonogram budowy.

### Przeciwogniowe powłoki ochronne

W przeciwieństwie do niereaktywnych płyt i powłok natryskowych, przeciwogniowe powłoki ochronne reagują na działanie ognia, zmieniając swoje właściwości z początkowej farby dekoracyjnej na przeciwogniową warstwę zwęgloną i pęczniącą około 50-krotnie w stosunku do pierwotnej grubości. Typowa grubość początkowa wynosząca od 0,25 do 2,5 mm pozwala zapewnić okres ognioodporności od 30 do 120 minut, jak pokazano na rysunku 3.5.

Przeciwogniowe powłoki ochronne przypominają wyglądem konwencjonalne farby i mogą to być środki rozpuszczalnikowe lub wodorozcieńczalne. Powłoki te składają się z trzech warstw: kompatybilnej farby gruntującej, warstwy przeciwogniowej oraz warstwy wierzchniej, czyli warstwy uszczelniającej (zwykle dostępnej w szerokiej gamie kolorów). Obecnie większość przeciwogniowych powłok ochronnych nakładana jest poza placem budowy, co pozytywnie wpływa na harmonogram realizacji projektu.

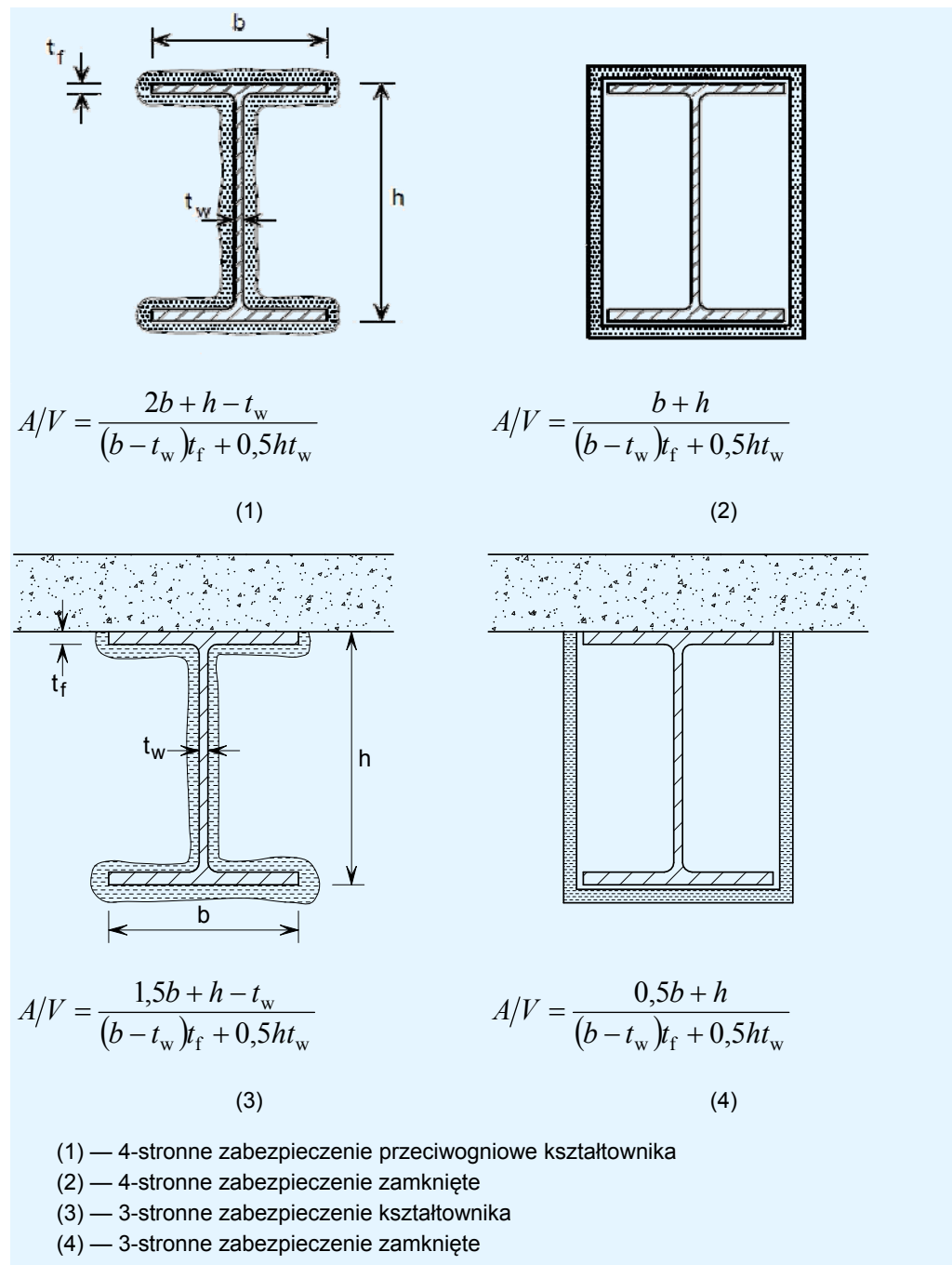


**Rysunek 3.5 Przeciwogniowe powłoki ochronne**

Niektóre przeciwogniowe powłoki ochronne stosowane są również do zastosowań zewnętrznych oraz ochrony zabytków, gdzie zachowany musi zostać oryginalny wygląd budynku.

### 3.2.2 Grubość warstwy materiałów ognioochronnych

Grubość warstwy ognioochronnej określonego wyrobu jest uzależniona od wymaganej ognioodporności oraz od współczynnika przekroju elementów stalowych. Współczynnik przekroju przybiera różne wartości w zależności od wybranego rodzaju zabezpieczenia przeciwogniowego oraz typu i wielkości elementu stalowego. Na rysunku 3.6 przedstawione zostały wyrażenia służące do obliczania współczynnika przekroju na podstawie konfiguracji zabezpieczenia przeciwogniowego oraz cech geometrycznych kształtownika stalowego.



Rysunek 3.6 Układ zabezpieczenia i współczynnik przekroju

Wymagany okres ognioodporności określony jest w krajowych przepisach budowlanych każdego państwa. Na podstawie arkuszy danych, takich jak np. Tabela 3.1 dla zabezpieczenia płytami, Tabela 3.2 dla zabezpieczenia niereaktywną powłoką natryskową oraz Tabela 3.3 dla przeciwogniowych powłok ochronnych, można w prosty sposób wyznaczyć wymaganą grubość warstwy materiału zabezpieczenia.

Arkusze danych są zazwyczaj publikowane przez producentów. W niektórych krajach arkusze danych producentów zostały zestawione w jednolitą dokumentację źródłową opublikowaną przez stosowne władze i zatwierdzoną do stosowania przez konstruktorów.

**Tabela 3.1 Przykładowy arkusz danych zabezpieczenia przeciwogniowego płytami**

Grubość zabezpieczenia płytami (mm)	Maksymalny współczynnik przekroju $A_m/V$ ( $m^{-1}$ ) dla belek i słupów			
	R30	R60	R90	R120
20	260	260	125	70
25			198	110
30			260	168
35				232
40				256
45				260

**Tabela 3.2 Przykładowy arkusz danych dla natryskowych powłok niereaktywnych**

Współczynnik przekroju $A_m/V$ ( $m^{-1}$ )	Wymagana grubość (mm) natryskowych powłok niereaktywnych			
	R30	R60	R90	R120
40	10	10	11	15
80	10	12	16	21
120	10	14	19	24
160	10	15	21	26
200	10	16	22	28
240	10	16	23	29
280	10	17	23	30

**Tabela 3.3 Przykładowy arkusz danych dla przeciwogniowych powłok ochronnych o stopniu ognioodporności R60**

Współczynnik przekroju $A_m/V$ ( $m^{-1}$ )	3 strony — belka dwuteowa	4 strony — belka dwuteowa	4 strony — słup z kształtownika
40	0,25	0,26	0,26
80	0,31	0,39	0,39
120	0,39	0,53	0,53
160	0,48	0,66	0,66
200	0,69	0,83	0,83
240	0,90	1,00	1,00
280	1,08	1,74	1,74

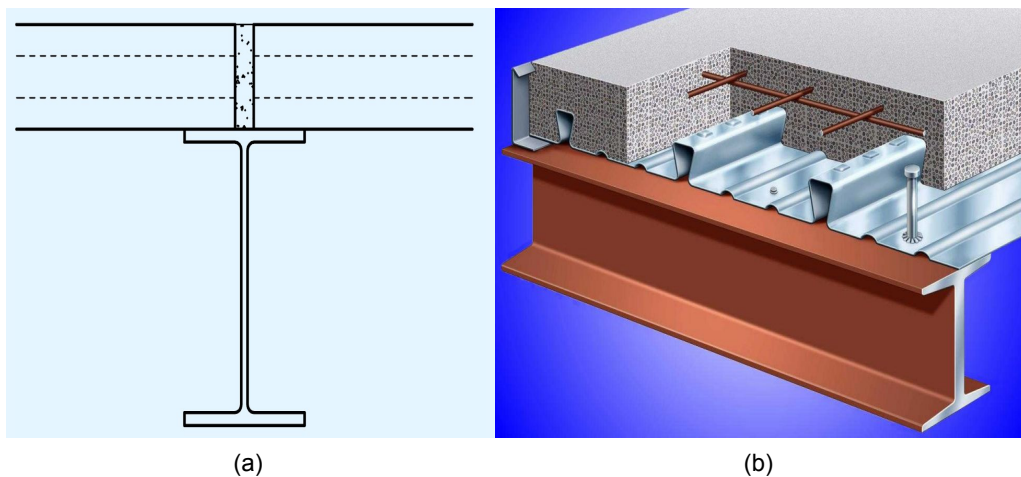
### 3.3 Konstrukcja ognioodporna

Uwzględniając wagę ognioodporności konstrukcji oraz koszty materiałów biernej ochrony przeciwpożarowej, opracowano pewne alternatywne systemy konstrukcyjne wykorzystujące charakterystyczną dla nich ognioodporność pozwalającą uniknąć konieczności stosowania specjalnych zabezpieczeń przeciwpożarowych. Systemy te obejmują stropy zespolone, belki zintegrowane oraz obetonowane konstrukcje stalowe.

#### 3.3.1 Strop zespolony

Prefabrykowane płyty stropowe charakteryzuje ognioodporność do 120 minut, pod warunkiem zapewnienia odpowiedniego zbrojenia. Jakkolwiek, płyty zazwyczaj spoczywają na górnej półce podciagu (patrz Rysunek 3.7(a)), odsłoniętego z trzech stron i wymagającego zabezpieczenia przeciwpożarowego.

W budynkach wielokondygnacyjnych, zamiast prefabrykowanych stropów betonowych powszechnie stosuje się stropy zespolone, pokazane na rysunku 3.7(b).

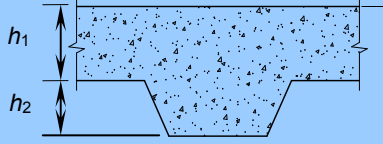
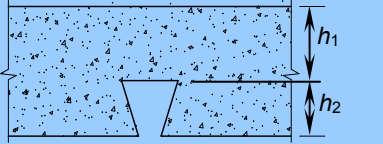


**Rysunek 3.7 (a) Prefabrykowany strop betonowy na podciagu; (b) stropy zespolone ze stalową blachą profilowaną**

Stropy zespolone zbudowane są ze stalowej blachy profilowanej trapezowej lub wklęsłej, na której opiera się od góry element betonowy. W stropach zespolonych beton jest zbrojony przy użyciu włókien lub prętów zbrojeniowych w celu ograniczenia pęknięć spowodowanych rozciąganiem ze zginaniem na podporach stropu, jak również kurczeniem i osiadaniem betonu. Poza ograniczaniem pęknięć pręty zbrojeniowe zapewniają również nośność stropu przy zginaniu na podporach w warunkach pożarowych.

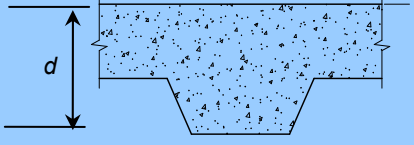
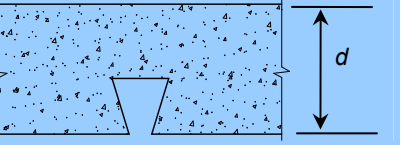
W przypadku stropu zespolonego o odsłoniętej powierzchni dolnej kryterium izolacji jest zazwyczaj spełnione dzięki zastosowaniu izolacyjnej warstwy betonu o odpowiedniej grubości dla wymaganego okresu ognioodporności, jak pokazano w tabeli 3.4. Im dłuższy wymagany okres ognioodporności, tym grubszą izolacyjną warstwę betonu należy zastosować. Kryterium odporności konstrukcji na zniszczenie spełnione zostaje generalnie poprzez zastosowanie ciągłego pokrycia stalową blachą profilowaną.

**Tabela 3.4** Typowa minimalna grubość warstwy izolacyjnej betonu (mm),  $h_1$ , w stropach zespolonych

Wymagany okres ognioodporności (w minutach)	Trapezowa stalowa blacha profilowana		Blacha stalowa o profilu wklęsłym	
				
	Beton zwykły	Beton lekki	Beton zwykły	Beton lekki
60	70	60	90	90
90	80	70	110	105
120	90	80	125	115

W tabeli 3.5 przedstawione zostały typowe wysokości i rozpiętości stropów zespolonych wykonanych z betonu zwykłego poddanych równomiernie rozłożonemu obciążeniu wynoszącemu  $5,0 \text{ kN/mm}^2$ .

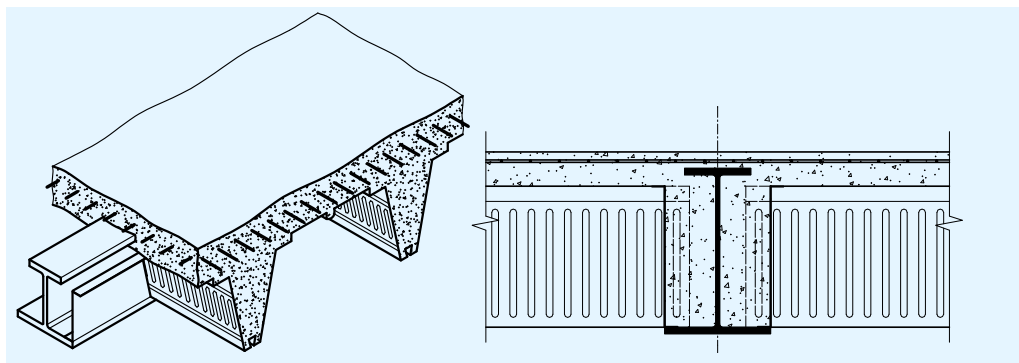
**Tabela 3.5** Typowe wysokości i rozpiętości stropów zespolonych

Wymagany okres ognioodporności (w minutach)	Trapezowa stalowa blacha profilowana				Blacha stalowa o profilu wklęsłym			
								
	Pojedyncze przęsło		Podwójne przęsło		Pojedyncze przęsło		Podwójne przęsło	
	Wysokość (mm)	Rozpiętość (m)	Wysokość (mm)	Rozpiętość (m)	Wysokość (mm)	Rozpiętość (m)	Wysokość (mm)	Rozpiętość (m)
60	140	3,8	140	4,2	101	3,0	101	3,4
90	150	3,1	150	3,3	105	2,9	105	3,3
120	160	3,1	160	3,4	115	2,4	115	2,9

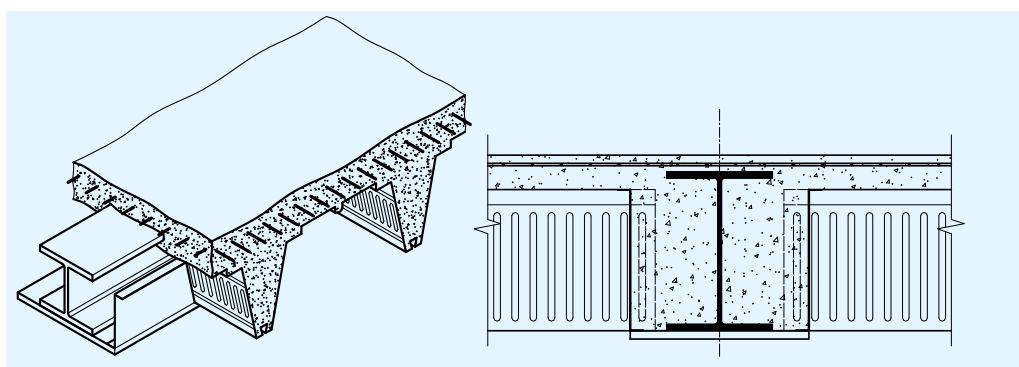


### 3.3.2 Belki zintegrowane

Belki zintegrowane stanowią część konstrukcji stropu, gdzie belki stalowe są wbudowane w warstwę płyty betonowej wylewanej na miejscu lub prefabrykowanej, zamiast rozwiązania, w którym płyta oparta jest na górnych półkach belek. W rezultacie zminimalizowana zostaje całkowita wysokość stropu. Cały kształtownik stalowy, poza dolną półką, posiada zabezpieczenie przeciwogniowe w postaci otaczającego betonu.



Rysunek 3.8 ASB — Belka zintegrowana (asymetryczna stalowa belka walcowana)



Rysunek 3.9 IFB — Belka zintegrowana (dwuteownik z blachą przyspawaną do dolnej półki)

Istnieją dwa rodzaje belek zintegrowanych z kształtowników otwartych: asymetryczna belka stalowa (ASB) oraz zintegrowana belka wytwarzana z części (IFB), jak pokazano odpowiednio na rysunku 3.8 i rysunku 3.9.

Ogólnie biorąc, belki zintegrowane mogą osiągnąć ognioodporność do 60 minut bez stosowania zabezpieczenia przeciwogniowego. W przypadku zastosowania dodatkowego zbrojenia wzdłużnego możliwe jest uzyskanie ognioodporności 90 minut przy niezabezpieczonej półce dolnej. Całkowite wysokości konstrukcyjne i typowe rozpiętości belek zintegrowanych przedstawione zostały w tabeli 3.6, którymi konstruktor może kierować się na etapie projektu wstępnego budynków wielokondygnacyjnych.

Tabela 3.6 Wysokość konstrukcyjna i typowa rozpiętość belek zintegrowanych

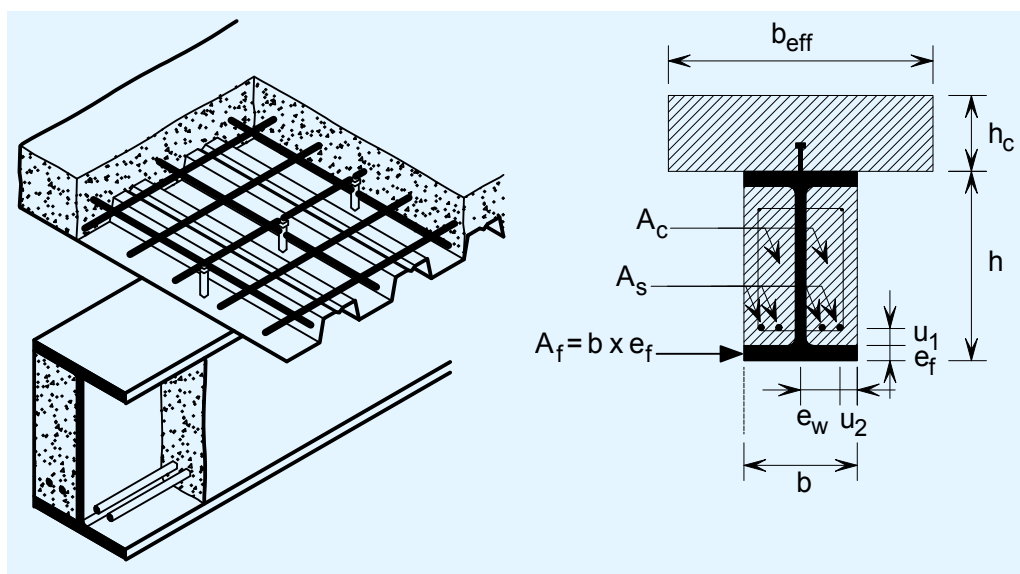
Typ stropu	Wysokość (mm)	Rozpiętość (m)
Belka zintegrowana ASB	od 280 do 400	od 6 do 9
Belka zintegrowana IFB	od 250 do 450	od 6 do 9



### 3.3.3 Belki i słupy częściowo obetonowane

Belki i słupy częściowo obetonowane są wytwarzane poprzez wypełnienie przestrzeni pomiędzy półkami dwuteowników betonem lub żelbetem, jak pokazano na rysunku 3.10 i rysunku 3.11.

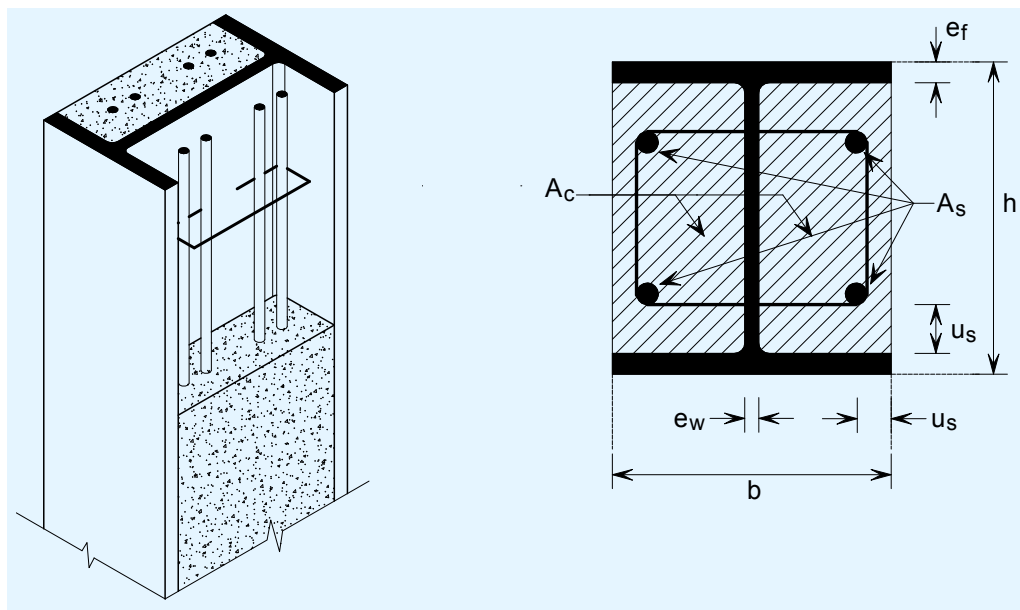
W porównaniu z dwuteownikami niezabezpieczonymi, których ognioodporność wynosi jedynie około 15 minut, kształtowniki częściowo obetonowane mogą osiągnąć ognioodporność wynoszącą ponad 60 minut, która zazwyczaj pozwala spełnić wymagania przeciwpożarowe wielu budynków wielokondygnacyjnych. Wydłużenie okresu ognioodporności związane jest z pokryciem większości powierzchni konstrukcji stalowej betonem, którego cechuje niska przewodność cieplna. Dłuższe okresy ognioodporności można również osiągnąć, zwiększając ilość zbrojenia wbudowanego w beton, kompensując tym samym utratę wytrzymałości konstrukcji stalowej w warunkach pożarowych.



Rysunek 3.10 Belka częściowo obetonowana

W §4.2.2 i §4.2.3 normy EN 1994-1-2 przedstawione zostały względnie proste reguły oraz arkusze danych służące do obliczeń belek i słupów zespolonych pod względem warunków pożarowych, łącznie z częściowo obetonowanymi kształtownikami stalowymi. Reguły te dotyczą ognioodporności elementów zespolonych w zależności od ich obciążenia (poziom obciążenie oznaczony został jako  $\eta_{fi,t}$  i omówiony w punktach 4.4.2 i 4.4.3 niniejszego przewodnika), stosunku  $h/b$ , rodzaju elementu konstrukcyjnego oraz pola przekroju zbrojenia  $A_s$ .

Zwiększenie ognioodporności lub poziomu obciążenia wymaga na ogół zastosowania większych przekrojów poprzecznych oraz dodatkowego zbrojenia kształtowników częściowo obetonowanych. Można użyć arkuszy danych do określenia minimalnych wymiarów przekrojów poprzecznych (takich jak szerokość przekroju  $b_{min}$ ) oraz stopnia zbrojenia  $A_{s,min}$  kształtowników częściowo obetonowanych, aby osiągnąć wymagany okres ognioodporności.



Rysunek 3.11 Słup częściowo obetonowany

W tabeli 3.7 przedstawiono arkusz danych zaczerpnięty z normy EN 1994-1-2 do projektowania kształtowników częściowo obetonowanych z uwagi na warunki pożarowe. Korzystając z tego rodzaju danych obliczeniowych, można w następujący sposób obliczyć poziom obciążenia  $\eta_{fi,t}$ :

$$R_{fi,d,t} = \eta_{fi,t} \cdot R_d$$

gdzie:

$R_{fi,d,t}$  to nośność obliczeniowa elementu konstrukcyjnego w warunkach pożaru w czasie  $t$ .

$R_d$  to nośność obliczeniowa elementu konstrukcyjnego w warunkach temperatury normalnej.

Przy obliczaniu poziomu obciążenia zaleca się w normie EN 1994-1-2, aby nośność obliczeniowa w warunkach temperatury normalnej,  $R_d$ , była obliczana dla długości wyboczeniowej równej dwukrotnej długości wyboczeniowej stosowanej przy obliczaniu z uwagi na warunki pożarowe.

**Tabela 3.7** Typowe arkusze danych do projektowania przekrojów częściowo obetonowanych z uwagi na warunki pożarowe

Element konstrukcyjny	Wskaźnik przekroju $h/b$	Poziom obciążenia	Szerokość $b_{min}$ (mm)/stopień zbrojenia $A_{s,min}$ (%) dla wymaganego okresu ognioodporności (min)				
			R30	R60	R90	R120	R180
Belka	>1,5	$\eta_{fi,t} \leq 0,5$	80/0,0	150/0,0	200/0,2	240/0,3	300/0,5
		$\eta_{fi,t} \leq 0,7$	80/0,0	240/0,3	270/0,4	300/0,6	
	>3,0	$\eta_{fi,t} \leq 0,5$	60/0,0	100/0,0	170/0,2	200/0,3	250/0,3
		$\eta_{fi,t} \leq 0,7$	70/0,0	170/0,2	190/0,4	270/0,5	300/0,8
Słup	Minimum $h/b$	$\eta_{fi,t} \leq 0,47$	160/-	300/4,0	400/4,0		
		$\eta_{fi,t} \leq 0,66$	160/1,0	400/4,0			

Rozważmy jako przykład belkę częściowo obetonowaną o stosunku  $h/b > 3$ , pod umiarkowanym obciążeniem ( $\eta_{fi,t} \leq 0,5$ ).

Dla okresu ognioodporności wynoszącego 60 minut (R60):

- Szerokość nie powinna być mniejsza niż 100 mm, co prowadzi do  $h > 3b = 300$  mm. Zatem, minimalne pole przekroju poprzecznego wynosi  $100 \times 300$  mm
- Nie jest wymagane zbrojenie,  $A_s = 0$ .

Aby osiągnąć okres ognioodporności wynoszący 120 minut (R120):

- Szerokość nie powinna być mniejsza niż 200 mm. Stąd, wysokość  $h > 3b = 600$  mm, a zatem minimalne pole przekroju poprzecznego wynosi  $200 \times 600$  mm
- Pole przekroju zbrojenia,  $A_s$ , nie powinno być mniejsze niż 0,3% powierzchni obetonowanej  $A_c$ , tj.  $A_s \geq 0,003A_c$ .

### 3.3.4 Zewnętrzna konstrukcja stalowa

W niektórych przypadkach główne elementy konstrukcyjne, takie jak słupy czy belki, można umieścić poza zewnętrzną przegrodą budynku bez żadnej ochrony przeciwpożarowej, jak pokazano na rysunku 3.12. Wymagania dotyczące ochrony przeciwpożarowej zewnętrznej konstrukcji stalowej są znacząco zmniejszone, ponieważ temperatura takiej konstrukcji jest niższa w porównaniu z elementami konstrukcyjnymi wewnątrz strefy pożarowej.

Dalsze wskazówki dotyczące zastosowania zewnętrznych konstrukcji stalowych przy projektowaniu z uwagi na warunki pożarowe można znaleźć w normie EN 1993-1-2, §4.2.5.4.



Rysunek 3.12 Zastosowanie zewnętrznych konstrukcji stalowych

### 3.3.5 Połączone rozwiązania dla uzyskania ognioodporności

Poprzez staranny dobór rozwiązań konstrukcyjnych można zapewnić do 60 minut ognioodporności budynków wielokondygnacyjnych, bez stosowania materiałów ognioochronnych. Zazwyczaj będzie to wymagało użycia belek zintegrowanych oraz słupów częściowo obetonowanych lub wypełnionych betonem. W tabeli 3.8 przedstawiono okres ognioodporności konstrukcji, jaki może być osiągnięty przy użyciu omówionych powyżej kombinacji konstrukcji z belek i słupów. W tabeli tej uwzględniono ognioodporność poszczególnych elementów, ale zazwyczaj można osiągnąć mniej zachowawcze wyniki, rozważając projektowanie z uwagi na warunki pożarowe w oparciu o zestawy elementów konstrukcyjnych za pomocą takich metod jak FRACOF (patrz punkt 5.2).

**Tabela 3.8 Połączone rozwiązania dla ramy stalowej z ochroną przeciwpożarową lub bez niej**

	Belka niezabezpieczona	Belka zewnętrzna	Belki zintegrowane	Belka obetonowana	Belka zabezpieczona
	Okres ognioodporności (min)				
Słup stalowy niezabezpieczony	15	15	15	15	15
Słup zewnętrzny	15	>30	>30	>30	>30
Słup obetonowany	15	>30	>60	>60	>60
Słup zabezpieczony	15	>30	>60	>60	>60

Uwaga: Podany okres ognioodporności jest wartością niższą dla konstrukcji z belek lub słupów.

## 4 PROSTE MODELE OBLICZENIOWE

W poprzednich punktach przedstawiono tradycyjną metodę projektowania z uwagi na warunki pożarowe z wykorzystaniem arkuszy danych zapewniającą bezpieczne rozwiązanie. Niekoniecznie jednak metoda ta oferuje konstrukcję najbardziej efektywną. Za pomocą prostych modeli obliczeniowych opisanych w Eurokodach projektant może wykazać, że niektóre lub wszystkie elementy konstrukcyjne wymagają mniejszej ochrony lub nie wymagają jej wcale, co prowadzi do bardziej ekonomicznego rozwiązania przy projektowaniu z uwagi na warunki pożarowe.

Istnieją dwie metody powyższych prostych obliczeń: metoda temperatury krytycznej i metoda nośności. W oparciu o te metody projektant może w racjonalny sposób zdecydować, czy ochrona przeciwpożarowa jest konieczna.

Metody te dotyczą jednak poszczególnych elementów konstrukcyjnych poddanych działaniu pożaru standardowego, a nie całej konstrukcji w warunkach pożaru naturalnego. Dlatego w przeciwieństwie do analizy opartej na właściwościach (patrz punkt 6), nie uwzględniają one rzeczywistych zachowań elementu konstrukcyjnego w warunkach prawdziwego pożaru.

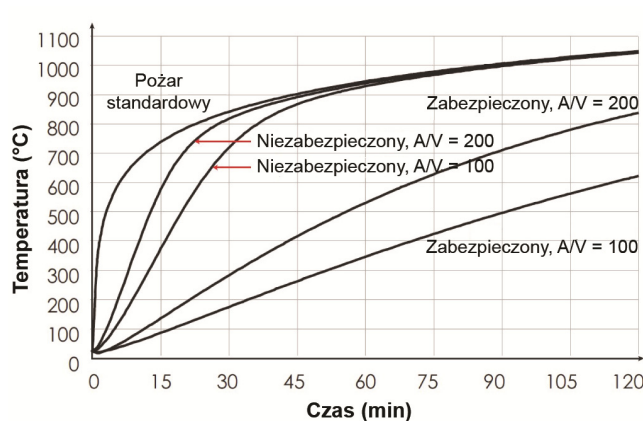
Aby ułatwić zrozumienie uzasadnienia prostych metod podanych w Eurokodzie i opisanych w punktach 4.4.2 i 4.4.3 niniejszego przewodnika, w punkcie 4.1 przedstawiono wprowadzenie do efektów termicznych pożaru.

### 4.1 Rozprzestrzenianie się pożaru i oddziaływania termiczne

#### 4.1.1 Oddziaływanie pożaru i pożar standardowy

Pożar jest bardzo złożonym zjawiskiem, które obejmuje różne rodzaje reakcji chemicznych. W trakcie pożaru uwalniana jest energia cieplna w postaci płomieni i dymu w strefie ogniowej budynku, jak pokazano na rysunku 4.1(a).

Podczas wybuchu pożaru temperatura gazu w strefie ogniowej budynku gwałtownie wzrasta. Do celów projektowania z uwagi na warunki pożarowe oddziaływanie pożaru jest przedstawione w postaci standardowej krzywej wzrostu temperatury w czasie, zgodnie z normą EN 1991-1-2. Ta krzywa jest oznaczona jako „pożar standardowy” na rysunku 4.1(b).



(a) Pożar (test w Cardington)

(b) Krzywa pożaru standardowego i wzrost temperatury elementów konstrukcyjnych

#### Rysunek 4.1 Oddziaływanie pożaru

Wzrost temperatury elementu konstrukcyjnego w warunkach pożaru jest regulowany głównie przez mechanizmy promieniowania i konwekcji w procesie dyfuzji złożonej. Zależy on od właściwości cieplnych materiałów i grubości warstwy ochronnej, jeśli materiał jest zabezpieczony przeciwpożarowo.

Na skutek szybkiego wzrostu temperatury gazu energia cieplna uwolniona podczas pożaru (tj. oddziaływanie termiczne) przepływa przez nieosłonięte powierzchnie do elementu konstrukcyjnego, ogrzewając go. W rezultacie temperatura elementu wzrasta, zazwyczaj zgodnie z krzywymi przedstawionymi na rysunku 4.1(b) dla różnych scenariuszy uwzględniających zabezpieczone i niezabezpieczone elementy konstrukcyjne.

#### 4.1.2 Modelowanie rozprzestrzeniania się pożaru

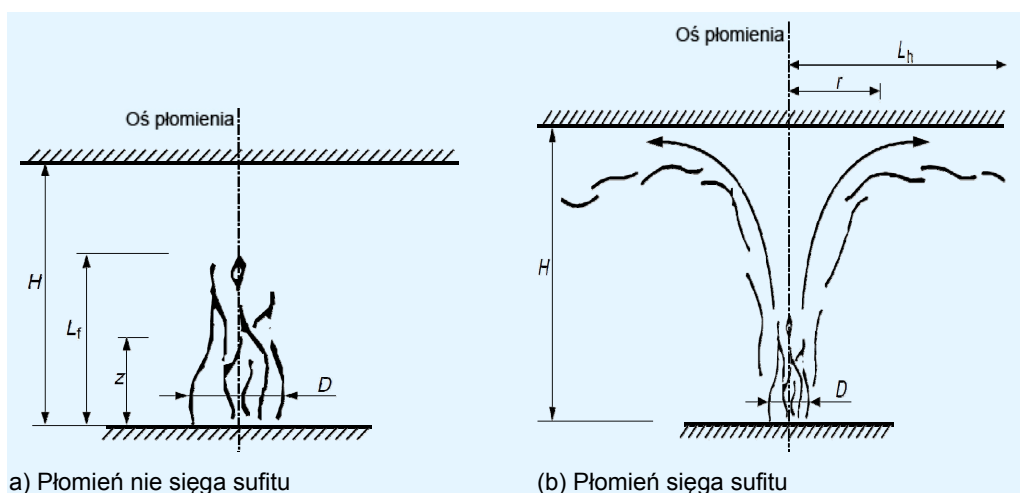
Pod względem oddziaływania termicznego na konstrukcje budynków pożary mogą zostać zaklasyfikowane jako pożary lokalne lub w pełni rozwinięte.

##### Pożar lokalny

Pożar lokalny jest w fazie przed osiągnięciem punktu rozgorzenia i obejmuje tylko pewną część strefy pożarowej. Ze względu na powolne rozprzestrzenianie się i osiąganą niską temperaturę jest mało prawdopodobne, aby pożar lokalny rozszerzył się na całą strefę pożarową i spowodował rozgorzenie. Pożar lokalny zazwyczaj modeluje się za pomocą modelu pióropusza, modeli strefowych i modelu obliczeniowej dynamiki płynów (CFD).

### Model pióropusza ognia

W Załączniku C do normy EN 1991-1-2 przedstawiono tak zwany model pióropusza ognia używany do określania oddziaływania termicznego pożaru lokalnego. Jeżeli płomień nie sięga sufitu, jak pokazano na rysunku 4.2 (a), model używany jest do obliczenia temperatury odpowiadającej płomieniowi wzdłuż jego osi pionowej. Jeżeli jednak płomień sięga sufitu, jak przedstawiono na rysunku 4.2 (b), wówczas model wyznacza strumień ciepła na poziomie sufitu wraz z długością płomienia.

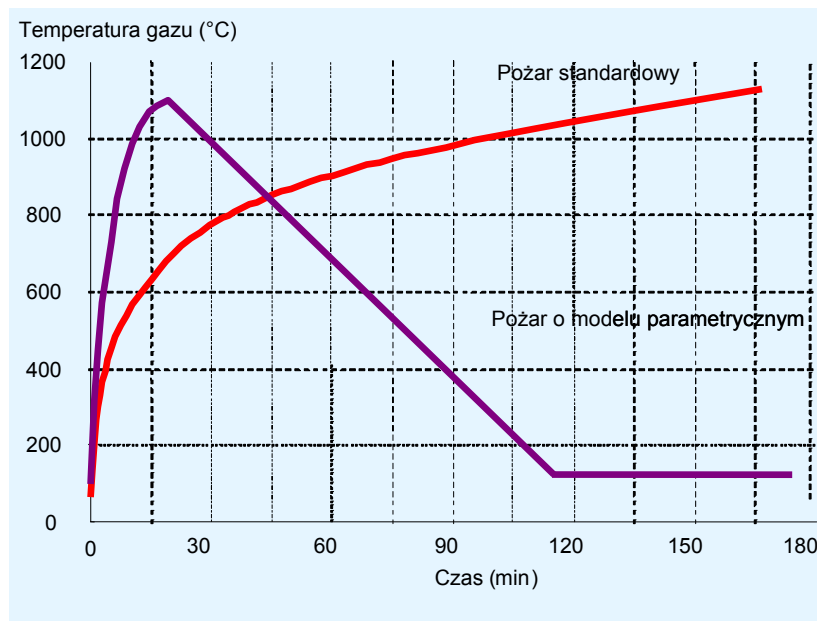


**Rysunek 4.2 Model pióropusza dla pożaru lokalnego według normy EN 1991-1-2**

### 4.1.3 Pożar w pełni rozwinięty

Pożar jest w pełni rozwinięty, gdy wszystkie dostępne materiały palne w obrębie strefy pożarowej płoną jednocześnie i uwalniana jest maksymalna ilość ciepła. Pożar w pełni rozwinięty powszechnie modeluje się jako pożar standardowy lub parametryczny, jak pokazano na rysunku 4.3. Nasilenie pożaru w pełni rozwiniętego regulowane jest przez warunki wentylacji oraz ilość i rodzaj paliwa w strefie pożarowej.





Rysunek 4.3 Model pożaru w pełni rozwiniętego

#### 4.1.4 Nominalna krzywa zależności temperatury od czasu

##### Pożar standardowy

W normie EN 1991-1-2, §3.2 użyto standardowej krzywej zależności temperatury od czasu do przedstawienia oddziaływania termicznego pożaru w pełni rozwiniętego. Za pomocą „pożaru standardowego” klasyfikuje się właściwości pożarowe materiałów i elementów konstrukcyjnych w badaniach standardowego spalania w warunkach pożaru. W oparciu o pożar standardowy wyznacza się czas ognioodporności i nośność elementów konstrukcyjnych przy użyciu prostych modeli obliczeniowych według norm EN 1993-1-2 i EN 1994-1-2. Stosuje się go również w analizie opartej na właściwościach przy projektowaniu całości konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe.

#### 4.1.5 Model pożaru naturalnego

##### Pożar o modelu parametrycznym

W Załączniku A do normy EN 1991-1-2 zdefiniowano parametryczną krzywą zależności temperatury od czasu dla stref pożarowych o powierzchni stropu do 500 m<sup>2</sup>. „Pożar o modelu parametrycznym” obejmuje fazy nagrzewania, chłodzenia i zaniku. Fazę nagrzewania zazwyczaj przedstawia się za pomocą krzywej wykładniczej aż do temperatury maksymalnej. Fazę chłodzenia opisuje się za pomocą linii prostej opadającej aż do osiągnięcia fazy zaniku. W pożarze o modelu parametrycznym faza ogrzewania zależy od warunków wentylacji i właściwości termicznych granicy strefy pożarowej. Czas trwania ogrzewania oraz maksymalna temperatura są regulowane przez gęstość obciążenia ogniowego i warunki wentylacji. Fazę chłodzenia reguluje czas trwania ogrzewania oraz maksymalna osiągnięta temperatura.

Pożar o modelu parametrycznym do pewnego stopnia przedstawia właściwości pożaru naturalnego. Jednak jego dokładność przy szacowaniu reakcji termicznej pożaru zależy od dokładności danych wejściowych, takich jak obciążenie ogniowe, warunki wentylacji, rozmiar strefy pożarowej i właściwości termicznych warunków granicznych.



## 4.2 Przewodnictwo ciepłe

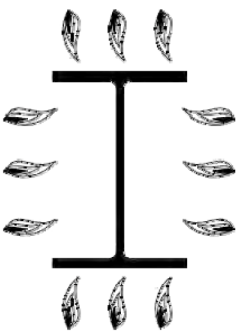

W niniejszym punkcie wyjaśniono oddziaływania pożarowe i ewolucję temperatury w elementach konstrukcyjnych poddanych działaniu pożaru standardowego, ze szczególnym uwzględnieniem pojęć pożaru standardowego i współczynnika przekroju.

### Współczynnik przekroju $A_m/V$

Istotnym parametrem szybkości wzrostu temperatury elementu konstrukcyjnego jest stosunek  $A_m/V$  elementu, powszechnie znany jako współczynnik przekroju. Współczynnik przekroju zdefiniowano jako stosunek pola nieosłoniętej powierzchni elementu do jego objętości na jednostkę długości.

Wpływ współczynnika przekroju przedstawiono na rysunku 4.1(b) dla zabezpieczonych i niezabezpieczonych elementów konstrukcyjnych. Wyższy współczynnik przekroju prowadzi do szybszego nagrzewania się elementu konstrukcyjnego. Na przykład po 15 minutach poddawania oddziaływaniu pożaru temperatura niezabezpieczonego elementu konstrukcyjnego o współczynniku przekroju  $A_m/V = 200$  wzrasta do około 580°C, podczas gdy temperatura elementu niezabezpieczonego o współczynniku  $A_m/V = 100$  osiąga tylko 380°C.

Ta różnica wynika z faktu, że wysoka wartość współczynnika przekroju oznacza dużą powierzchnię nieosłoniętą w porównaniu do jej objętości, a zatem element konstrukcyjny otrzymuje więcej ciepła niż element o niskim współczynniku przekroju oznaczającym małą powierzchnię nieosłoniętą. Zostało to przedstawione na rysunku 4.4.

Współczynnik przekroju = $A_m/V$ gdzie: $A_m$ to pole nieosłoniętej powierzchni elementu na jednostkę długości, $V$ to objętość elementu na jednostkę długości.			
			
Duża wartość $A_m$		Mała wartość $A_m$	
Mała wartość $V$		Duża wartość $V$	
skutek		skutek	
Szybkie nagrzewanie		Wolne nagrzewanie	

**Rysunek 4.4** Definicja współczynnika przekroju  $A_m/V$  elementu konstrukcyjnego w warunkach pożaru

### Temperatura elementu w czasie $t$

Temperaturę  $\theta_{a,t}$  elementu w czasie  $t$  można obliczyć za pomocą prostych modeli obliczeniowych podanych w §4.2.5 normy EN 1993-1-2 lub §4.3.4.2 normy EN 1994-1-2.

Jeżeli temperatura krytyczna przekracza temperaturę obliczeniową, tzn.  $\theta_{cr} > \theta_{a,t}$ , wówczas ognioodporność niezabezpieczonego elementu jest wystarczająca dla danego czasu trwania.

Jeżeli element niezabezpieczony nie jest odpowiedni, należy przedsięwziąć środki w celu poprawienia jego ognioodporności w następujący sposób:

- Dobierając większy przekrój poprzeczny elementu stalowego.
- Dobierając wyższy gatunek stali.
- Stosując konieczną ochronę przeciwpożarową.

### 4.3 Analiza strukturalna

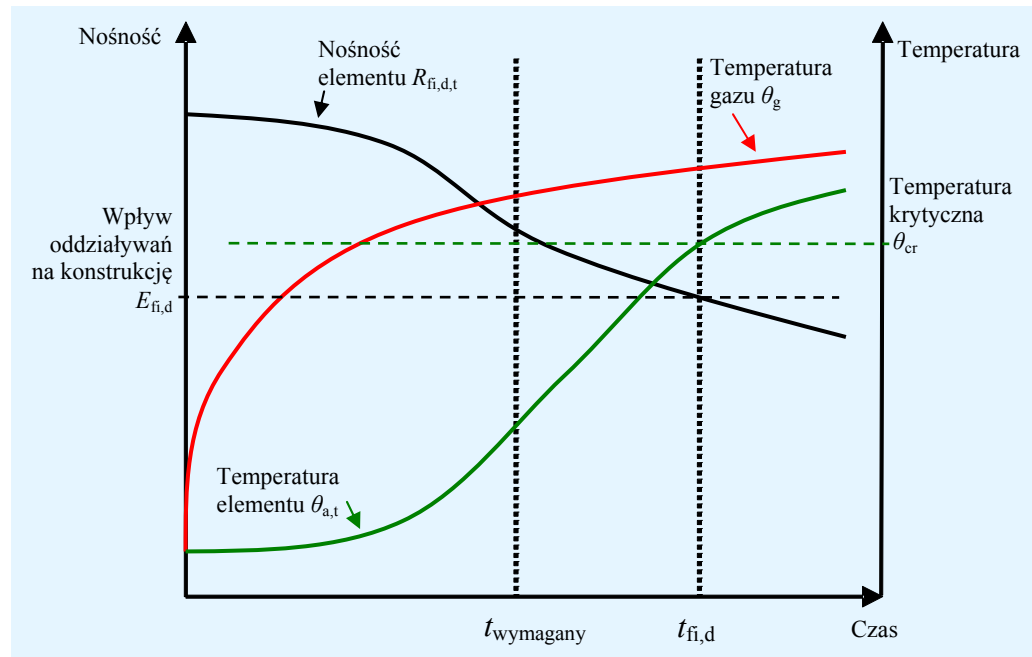
Na rysunku 4.5 przedstawiono ogólne zachowanie elementu konstrukcyjnego pod wpływem pożaru standardowego oraz występujących oddziaływań. Gdy temperatura gazu  $\theta_g$  wzrasta, temperatura elementu  $\theta_{a,t}$  zwiększa się, a jego nośność  $R_{fi,d,t}$  maleje.

Temperatura krytyczna  $\theta_{cr}$  została zdefiniowana jako temperatura, przy której element nie może dalej wytrzymywać wpływu oddziaływań na konstrukcję. Wpływy oddziaływań (nazywane także skutkami oddziaływań) na element to siły zewnętrzne lub momenty wywołane przez te oddziaływania. Na przykład wiatr wiejący na konstrukcję jest oddziaływaniem (oddziaływanie wiatru), natomiast siły zewnętrzne i momenty zginające wywołane w konstrukcji słupa są wpływami.

W przypadku konstrukcji poddanej różnym oddziaływaniom (np. wiatru, grawitacji), element jest poddawany wpływowi o wartości obliczeniowej  $E_d$ . Przy tych samych oddziaływaniach, lecz dodatkowo w sytuacji pożarowej, wpływy na element konstrukcyjny są zmodyfikowane i oznaczone jako  $E_{fi,d}$ .

W związku z tym temperaturę krytyczną  $\theta_{cr}$  definiuje się jako temperaturę w czasie zniszczenia, gdy nośność elementu jest równa wpływowi na niego działającemu:

$$R_{fi,d,t} = E_{fi,d}.$$



**Rysunek 4.5 Zachowanie elementu konstrukcyjnego w sytuacji pożarowej**

Aby spełnić wymagania inżynierii pożarowej, projektant musi zapewnić spełnienie jednego z następujących warunków:

- W czasie  $t_{fi,wymagany}$  temperatura elementu jest niższa niż temperatura krytyczna:  $\theta_{cr} \geq \theta_{a,t}$  lub
- W czasie  $t_{fi,wymagany}$  nośność elementów jest większa niż wpływy na konstrukcję:  $R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d}$ .

## 4.4 Proste metody projektowania konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe

### 4.4.1 Wprowadzenie

Proste metody projektowania są zgodne z zasadą obliczania nośności granicznych jak w warunkach normalnej temperatury. Projekt jest zgodny z wymaganiami bezpieczeństwa pożarowego, gdy spełnia powyższe warunki.

Proste modele obliczeniowe uwzględniają zmniejszenie wpływu oddziaływań przy projektowaniu z uwagi na warunki pożarowe oraz zmienność właściwości materiałów w podwyższonych temperaturach. Proste modele obliczeniowe mają szersze zastosowanie niż w metoda tradycyjna i mogą być stosowane przy projektowaniu:

- niezabezpieczonych elementów stalowych, w tym elementów konstrukcji pracujących na rozciąganie, belek stalowych oraz słupów stalowych;
- niezabezpieczonych elementów zespolonych, w tym płyt i belek zespolonych, belek i słupów obetonowanych, słupów drażonych wypełnionych betonem;
- zabezpieczonych elementów stalowych i zespolonych.

### Wpływ oddziaływań na konstrukcję $E_{fi,d}$

Oddziaływanie pożaru oznaczono jako oddziaływanie wyjątkowe w częściach Eurokodów dotyczących warunków pożarowych. Ze względu na małe prawdopodobieństwo jednoczesnego wystąpienia poważnego pożaru i pełnych oddziaływań zewnętrznych wpływ oddziaływań na konstrukcję w warunkach pożaru można określić przez zmniejszenie wpływów oddziaływań zewnętrznych na konstrukcję dla standardowej sytuacji obliczeniowej, stosując współczynnik redukcyjny  $\eta_{fi}$ :

$$E_{fi,d} = \eta_{fi} E_d$$

gdzie:

$E_d$  to wpływ oddziaływań na konstrukcję w standardowej sytuacji obliczeniowej według normy EN 1990

$\eta_{fi}$  to współczynnik redukcyjny wpływu  $E_d$  na konstrukcję w warunkach pożarowych, obliczany jako

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}} \text{ dla kombinacji 6.10 podanej w normie EN 1990}$$

$G_k$  to wartość charakterystyczna oddziaływania stałego

$Q_{k,1}$  to wartość charakterystyczna głównego oddziaływania zmiennego

$\psi_{fi}$  to współczynnik kombinacji wyrażony jako  $\psi_{1,1}$  lub  $\psi_{2,1}$ , patrz norma EN 1991-1-2

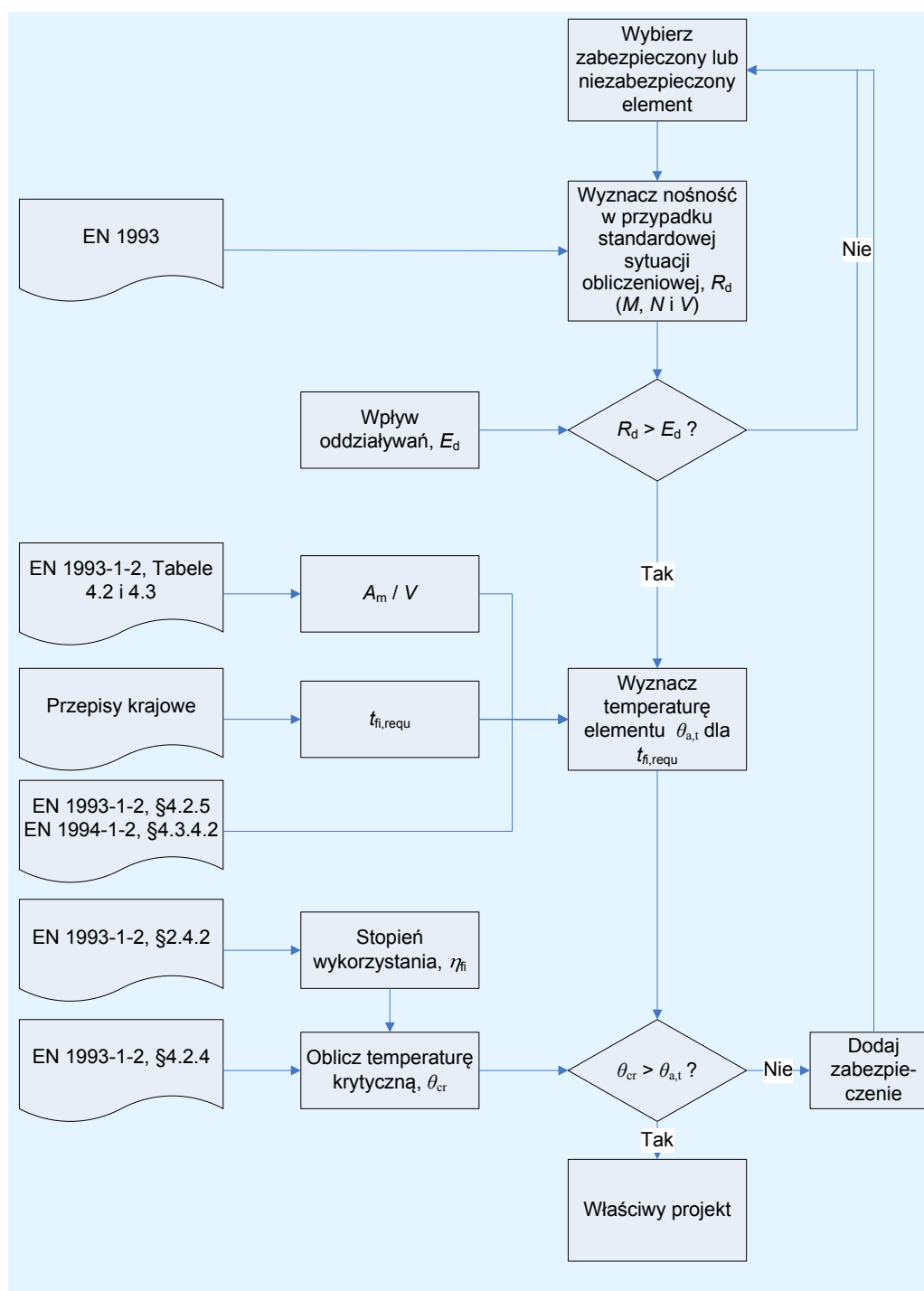
$\gamma_G$  to współczynnik częściowy dla oddziaływań stałych

$\gamma_{Q,1}$  to współczynnik częściowy dla głównego oddziaływania zmiennego

Informacje na temat obliczania współczynnika redukcyjnego do zastosowania z kombinacją 6.10a i 6.10b można znaleźć w normie EN 1993-1-2, §2.4.2.

#### 4.4.2 Metoda temperatury krytycznej

Podstawą tej metody jest obliczenie temperatury elementu po upływie wymaganego okresu ognioodporności i porównanie jej z temperaturą krytyczną, przy której nastąpiłoby zawalenie się elementu. Procedurę stosowania metody temperatury krytycznej przedstawiono na rysunku 4.6.



Rysunek 4.6 Projektowanie elementów konstrukcyjnych z uwagi na warunki pożarowe za pomocą metody temperatury krytycznej.

### Temperatura krytyczna

Prosty model metody temperatury krytycznej można zastosować dla poszczególnych elementów tylko wtedy, gdy nie trzeba uwzględniać ich kryteriów odkształcenia ani czynników stateczności. Metodę tę dopuszcza się tylko w przypadku elementów konstrukcji pracujących na rozciąganie oraz belek utwierdzonych, lecz nie w przypadku belek nieutwierdzonych ani słupów, gdy wyboczenie jest potencjalnym sposobem zniszczenia.

Temperaturę krytyczną jednorodnego elementu stalowego można obliczyć za pomocą prostego modelu podanego w §4.2.4 normy EN 1993-1-2. Temperatura krytyczna zmniejsza się wraz ze stopniem wykorzystania elementu,  $\mu_0$ , zdefiniowanym jako stosunek wpływu oddziaływań na konstrukcję w podwyższonej temperaturze,  $E_{fi,d}$ , do nośności elementu w temperaturze normalnej, lecz z zastosowaniem podanych poniżej współczynników częściowych przy projektowaniu z uwagi na warunki pożarowe  $R_{fi,d,0}$ :

$$\mu_0 = E_{fi,d}/R_{fi,d,0}$$

W przypadku przekrojów klasy 4 zaleca się temperaturę krytyczną 350°C.

Temperaturę krytyczną elementów zespolonych podano w §4.3.4.2.3 normy EN 1994-1-2.

### 4.4.3 Metoda nośności

Ta metoda jest oparta na obliczeniu nośności elementu po upływie wymaganego okresu ognioodporności i porównaniu jej z wpływem oddziaływań na konstrukcję w podwyższonej temperaturze  $E_{d,fi}$ . Procedurę stosowania metody nośności przedstawiono na rysunku 4.7.

### Klasyfikacja przekroju

Tak, jak w przypadku obliczeń konstrukcji w warunkach temperatury normalnej, przekroje poprzeczne są klasyfikowane zgodnie z tabelą 5.2 w normie EN 1993-1-1.

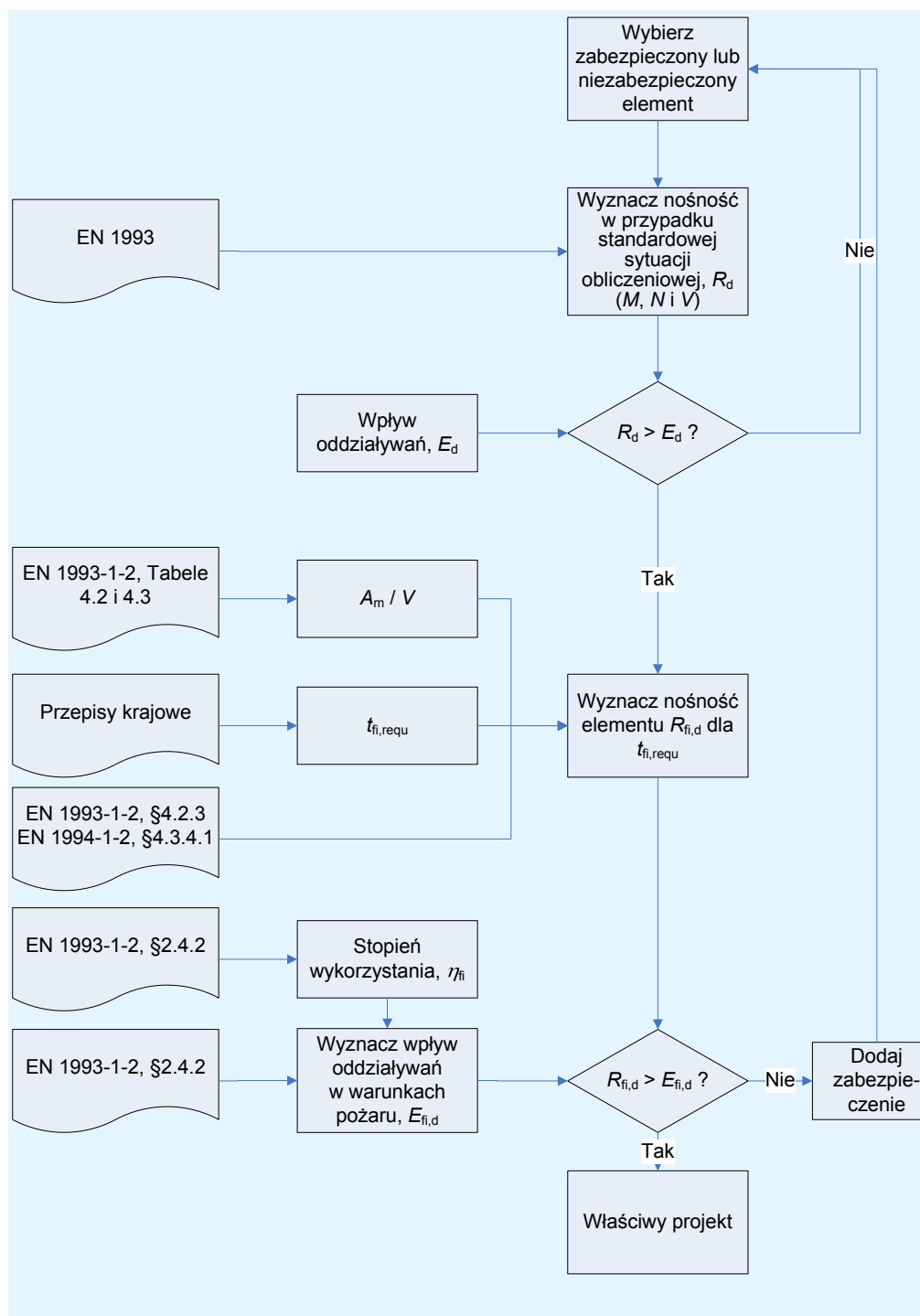
Współczynnik  $\varepsilon$  modyfikuje się przez zastosowanie czynnika 0,85, aby uwzględnić obniżenie granicy plastyczności i modułu sprężystości elementów stalowych w podwyższonych temperaturach, jak określono w §4.2.2 normy EN 1993-1-2. Ta modyfikacja obniża wartości graniczne  $c/t$  dla różnych klas przekrojów, tak więc niektóre przekroje mogą być zaklasyfikowane bardziej surowo niż w standardowej sytuacji obliczeniowej.

### Nośność przy rozciąganiu, ścinaniu i zginaniu elementów stalowych w warunkach pożarowych

Proste modele obliczeniowe do obliczania nośności konstrukcji przy rozciąganiu, ścinaniu i zginaniu elementów stalowych w warunkach pożaru standardowego podano w §4.2.3.1, §4.2.3.3 i §4.2.3.4 normy EN 1993-1-2.

Modele te opierają się na założeniu, że rozkład temperatury elementów konstrukcyjnych jest równomierny, i wykorzystują obniżoną granicę plastyczności oraz odpowiednie współczynniki częściowe przy projektowaniu z uwagi na warunki pożarowe.

W rzeczywistości jednak rozkład temperatury na szerokości i długości elementu konstrukcyjnego prawie nigdy nie jest jednolity, co wpływa na odporność mechaniczną tego elementu. Na przykład, jeżeli belka stalowa wspiera płytę betonową w jej górnym pasie, wówczas temperatura w górnym pasie jest niższa niż w pasie dolnym, a zatem jej granica nośności przy zginaniu jest wyższa, niż granica dla jednolitej temperatury równej temperaturze dolnego pasa.



Rysunek 4.7 Projektowanie elementów z uwagi na warunki pożarowe za pomocą metody nośności

Można wykorzystać zalety takiego gradientu cieplnego, dzieląc przekrój poprzeczny na wiele elementów konstrukcyjnych i przypisując obniżoną granicę plastyczności dla każdego elementu zgodnie z jego temperaturą. Całkowitą nośność przekroju poprzecznego można obliczyć, sumując nośność poszczególnych elementów. Alternatywnie, korzystny wpływ gradientu cieplnego na nośność tych elementów można obliczać zachowawczo za pomocą dwóch empirycznych współczynników przystosowania,  $\kappa_1$  and  $\kappa_2$ , jak podano w §4.2.3.3 normy EN 1993-1-2.

#### **Nośność niezamocowanych belek i słupów**

Proste modele obliczeniowe do obliczania nośności na wyboczenie niezamocowanych belek i słupów o jednolitej temperaturze podano w §4.2.3.3, §4.2.3.4 i §4.2.3.2 normy EN 1993-1-2. Zasady te opracowano, stosując następujące modyfikacje odpowiednich modeli podanych w normie EN 1993-1-1 dla standardowej sytuacji obliczeniowej, aby uwzględnić wpływ podwyższonej temperatury:

- Obniżona granica plastyczności przy podwyższonej temperaturze.
- Zastosowanie współczynników częściowych przy projektowaniu z uwagi na warunki pożarowe.
- Zwiększona smukłość względna.
- Długość wyboczeniową słupów w warunkach pożaru przyjmuje się jako 0,5 i 0,7 długości systemu odpowiednio dla górnej kondygnacji i pozostałych kondygnacji.
- Specjalne krzywe wyboczeniowe dla warunków pożarowych.

#### **Nośność elementów zespolonych w warunkach pożarowych**

Proste modele obliczeniowe do obliczania nośności elementów zespolonych w warunkach pożarowych podano w §4.3 oraz w Załącznikach D, E, F, G i H normy EN 1994-1-2 dla płyt zespolonych, belek zespolonych, belek obetonowanych, słupów obetonowanych oraz słupów wypełnionych.

Ponieważ temperatura w obrębie przekroju poprzecznego zwykle nie rozkłada się równomiernie, nośność obliczeniową elementu zespolonego w warunkach pożarowych należy zazwyczaj obliczać przez podzielenie przekroju na wiele elementów. Aby obliczyć nośność całego przekroju poprzecznego, określa się temperaturę i odpowiadające jej współczynniki redukcyjne dla nośności stali i betonu w każdym elemencie i sumuje nośności obliczeniowe wszystkich elementów.

Proste modele obliczeniowe dla elementów zespolonych są bardziej złożone niż obliczenia dla elementów stalowych bez pokrycia. Z tego powodu większość obliczeń dla wzrostu temperatury oraz nośności elementów zespolonych przeprowadza się przy użyciu oprogramowania komputerowego. Dodatkowo, nośności wielu rozwiązań projektowania elementów zespolonych z uwagi na warunki pożarowe zestawiono w formie tabeli podanej w §4.2 normy EN 1994-1-2.



### **Nośność płyt zespolonych**

Proste modele projektowania płyt zespolonych z uwagi na warunki pożarowe są określone w §4.3.1, §4.3.2 i §4.3.3 normy EN 1994-1-2. Jak w przypadku elementów działowych, płyty zespolone muszą spełniać kryteria dotyczące izolacji „I”, odporności na zniszczenia „E” oraz nośności „R”. Spełnienie tych kryteriów należy potwierdzić za pomocą badań ogniowych i/lub obliczeń projektowych.

Obliczanie nośności płyt przy zginaniu momentem zginającym i przeginającym opiera się na różnych założeniach i rozkładach temperatury, jak podano w D.2 i D.3 normy EN 1994-1-2. Wpływ stalowej blachy profilowanej zazwyczaj uwzględnia się przy obliczeniach nośności przy zginaniu momentem zginającym, lecz zachowawczo pomija przy obliczeniach nośności przy zginaniu momentem przeginającym.

### **Nośność belek zespolonych**

Belki zespolone składają się z przekrojów stalowych konstrukcyjnie przymocowanych za pomocą łączników ścinanych do płyty betonowej lub zespolonej, z obetonowaniem lub bez. Przestrzenie utworzone przez kształt blachy nad pasami belki są zazwyczaj wypełnione, aby górny pas belki stalowej pozostawał względnie chłodny w warunkach pożarowych.

Belki zespolone mogą być swobodnie podparte lub ciągłe. Ich obliczeniowe nośności przy zginaniu momentem zginającym lub przeginającym, jak również nośności przy ścinaniu poziomym i wzdłużnym, można określać za pomocą prostych modeli obliczeniowych podanych w §4.3.1, §4.3.4 oraz w Załączniku E do normy EN 1994-1-2.

### **Nośność słupów zespolonych**

Prosty model obliczeniowy nośności na wyboczenie słupów zespolonych opiera się na założeniu, że budynek jest usztywniony, a słup nie jest poziomo przemieszczony. Reguły obliczeń podano w §4.3.5 i Załącznikach G i H do normy EN 1994-1-2.

## 5 ODDZIAŁYWANIE MEMBRANY ROZCIĄGANEJ

Kompleksowe badania ogniowe oraz badania w warunkach rzeczywistego pożaru w budynkach wielokondygnacyjnych wykazały, że gdy w stropie powstaje oddziaływanie membrany rozciąganej, może on osiągnąć większą ognioodporność, niż wykazują obliczenia i badania pojedynczych elementów. Aby uwzględnić to korzystne zachowanie budynków wielokondygnacyjnych w warunkach pożaru, opracowano nowy model projektowy, pozwalający na bardziej ekonomiczne rozwiązania przy projektowaniu z uwagi na warunki pożarowe. Model ten sprawdzono na drodze badań.

### 5.1 Badania ogniowe w Cardington

Metoda tradycyjna oraz uproszczone modele obliczeniowe opisane w niniejszym przewodniku są dobrze ugruntowanymi metodami projektowania budynków wielokondygnacyjnych z uwagi na warunki pożarowe.

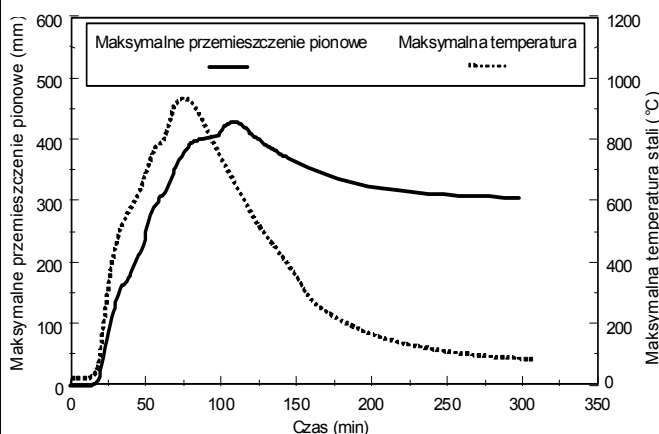
Zastosowanie takich metod w przypadku niezabezpieczonego budynku wielokondygnacyjnego określa okres ognioodporności jako nie więcej niż 30 minut. Jednak na przestrzeni lat kompleksowe badania ogniowe oraz badania w warunkach rzeczywistego pożaru wykazały, że można osiągnąć pewne oszczędności przy projektowaniu ramy z uwagi na warunki pożarowe, i opracowano nową uproszczoną metodę obliczeniową (tzw. metodę BRE-BM).

#### 5.1.1 Kompleksowe badania ogniowe

W ślad za badaniami budynków zniszczonych przez rzeczywiste pożary w Broadgate i Basingstoke w Wielkiej Brytanii przeprowadzono badania ogniowe w Cardington (Wielka Brytania), których obiektem był ośmiokondygnacyjny budynek naturalnej wielkości o szkieletie stalowo-zespolonym, z niezabezpieczonymi belkami i trapezoidalną płytą zespoloną, jak pokazano na rysunku 5.1(a).



(a) Budynek naturalnej wielkości badany w Cardington



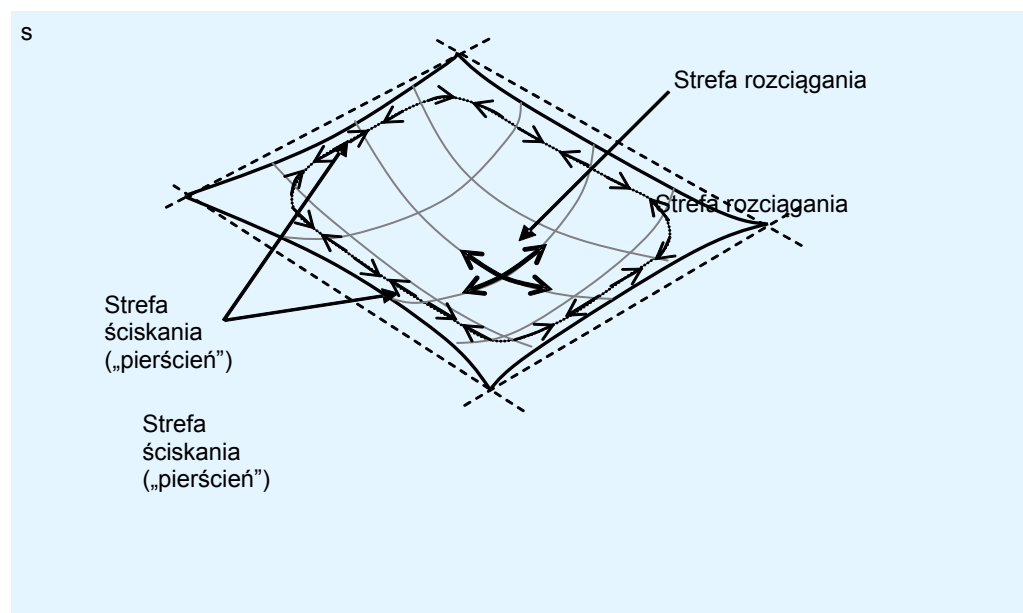
(b) Temperatura i przemieszczenie belki drugorzędnej

**Rysunek 5.1 Badania ogniowe w Cardington**

Spostrzeżenia z testów ogniowych i badań rzeczywistych pożarów jednoznacznie wykazały, że właściwości całości budynku o konstrukcji stalowej w warunkach pożaru różnią się znacząco od właściwości jego poszczególnych elementów. W warunkach występujących oddziaływań i prawdziwego pożaru w rzeczywistych konstrukcjach zachodzą istotne interakcje między elementami konstrukcyjnymi różnego rodzaju i zasadniczo zmieniają się ich mechanizmy nośności. Niezabezpieczone elementy stalowe w budynku o konstrukcji stalowej nawet w warunkach poważnego pożaru wykazują znacznie lepsze wewnętrzne właściwości pożarowe niż wskazywałyby standardowe badania ogniowe.

Jak pokazano na rysunku 5.1(b), zamiast całkowitego zawalenia się, jak można by oczekiwać na podstawie standardowych badań ogniowych, typowa belka drugorzędna w badaniach ogniowych w Cardington zachowała stateczność, nawet gdy jej temperatura osiągnęła  $954^{\circ}\text{C}$ . Jej przemieszczenie pionowe wynosiło 428 mm w szczytowej temperaturze  $954^{\circ}\text{C}$ , a po fazie chłodzenia powróciło do przemieszczenia stałego wynoszącego 296 mm. Oznacza to, że istnieją duże rezerwy w zakresie ognioodporności budynków o konstrukcji stalowej. Stopień ochrony przeciwpożarowej stosowanej do elementów stalowych może być w niektórych przypadkach nadmierny i niepotrzebny.

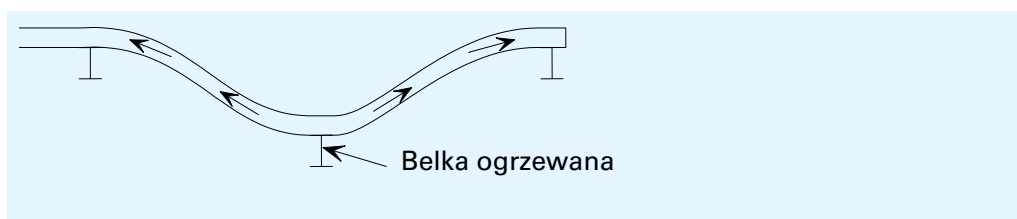
Główną przyczyną powyższych dużych rezerw ognioodporności wielokondygnacyjnych konstrukcji stalowych jest oddziaływanie membrany rozciąganej stropów stalowo-zespolonych, jak pokazano na rysunku 5.2 i jak wyjaśniono poniżej.



**Rysunek 5.2** Oddziaływanie membrany w płycie betonowej utwardzonej bocznie

Jak opisano w punkcie 4, proste modele obliczeniowe do projektowania z uwagi na warunki pożarowe dotyczą każdego poszczególnego elementu konstrukcyjnego. Te proste modele zakładają, że płyta stropu jest belką rozpościerającą się w jednym kierunku, znoszącą oddziaływania poprzez zginanie i ścinanie. Spostrzeżenia z badań w Cardington pokazują jednak, że gdy belki stalowe tracą nośność, płyta zespolona wykorzystuje swoją pełną nośność, przy zginaniu, gdy rozpościerają się między sąsiadującymi, chłodniejszymi elementami konstrukcji. Wraz ze wzrostem przemieszczenia, płyta działa jak rozciągana membrana, przenosząc obciążenia przy rozciąganiu, jak pokazano na rysunku 5.3.

Jeżeli płyta jest dobrze podparta przeciw ugięciu pionowemu wzdłuż linii dzielących ją na płaszczyzny zbliżone kształtem do kwadratu, na przykład przez belki główne i drugorzędne na osi siatki słupów, wówczas może być generowane oddziaływanie membrany rozciąganej jako mechanizmu nośności. Płyta jest wówczas wypychana do podwójnej krzywizny i zwiesza się ona w środkowych rejonach jak membrana rozciągana. Obwodowy ściskający „pierścień” jest generowany albo wokół podpieranego przez niego obrzeża albo w jego belkach krawędziowych, jak pokazano na rysunku 5.2.

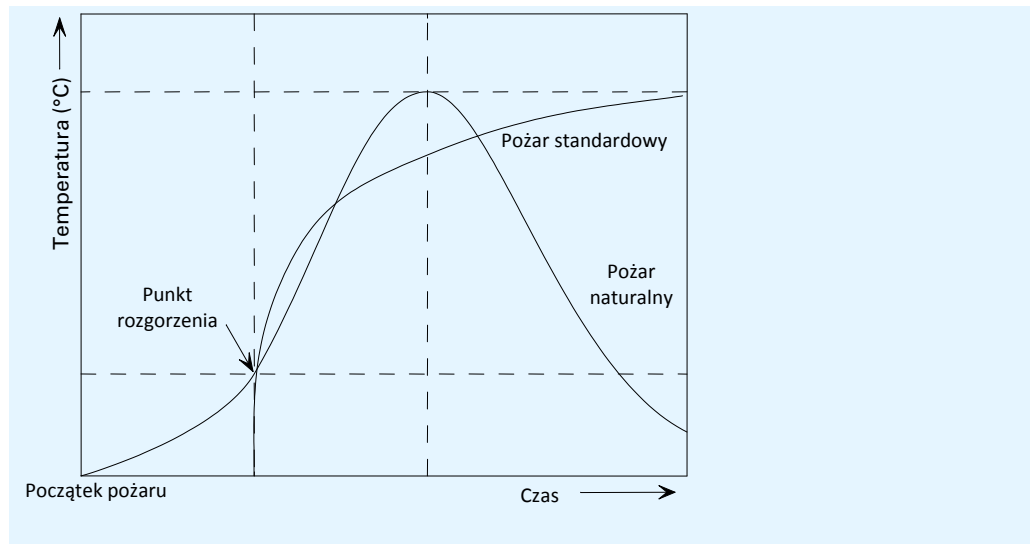


**Rysunek 5.3 Płyta mostkująca przez oddziaływanie membrany rozciąganej**

W ten sposób formuje się samorównoważący się mechanizm, który podpira obciążenie płyty. Jeżeli temperatura nadal wzrasta, konstrukcja może się zawalić albo na skutek zniszczenia krawędziowej podpory płyty albo pęknięcia płyty przy jej brzegach lub w środkowym rejonie.

### 5.1.2 Rzeczywiste pożary w porównaniu z pożarem standardowym

Oprócz różnicy między zachowaniem pojedynczych elementów i elementów będących częścią całej konstrukcji, występuje również różnica między rzeczywistymi pożarami a stosowanym w prostych modelach obliczeniowych pożarem standardowym. Rzeczywisty pożar w budynku obejmuje trzy fazy — wzrost początkowy, pełny rozwój i zanik poszczytowy. Fazy te przedstawiono na rysunku 5.4. Wzrost temperatury jest najszybszy, gdy wszystkie materiały organiczne w strefie pożarowej zapalają się samoistnie. Ten moment nazywany jest punktem rozgorzenia. Fazy wzrostu i zaniku prawdziwego pożaru są zależne od ilości i rodzaju dostępnego paliwa, a także od warunków wentylacji w strefie pożarowej.



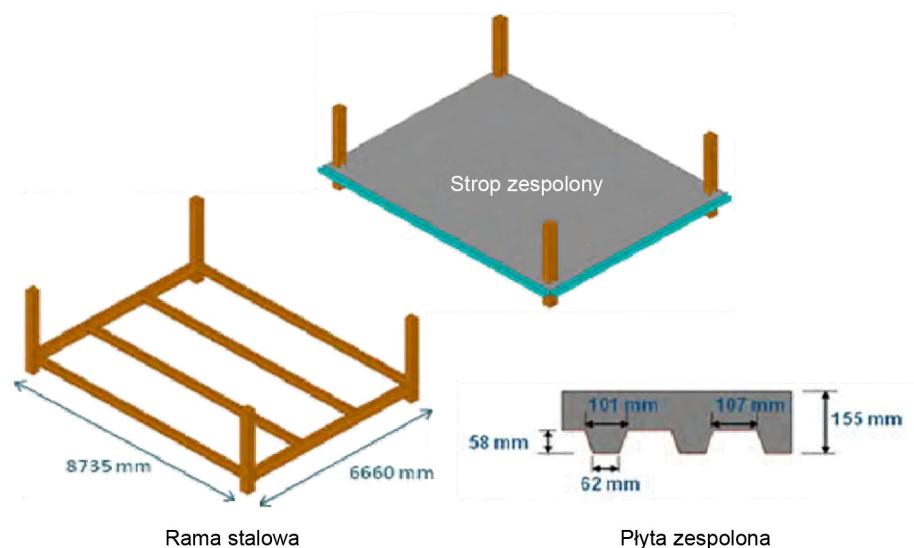
**Rysunek 5.4** Krzywe rzeczywistego pożaru naturalnego i pożaru standardowego

Czas ognioodporności elementu konstrukcyjnego, oparty na standardowych badaniach ogniowych i prostych modelach obliczeniowych, nie odzwierciedla faktycznych właściwości pożarowych elementu jako fragmentu całości budynku w warunkach prawdziwego pożaru. Nie określa on rzeczywistego czasu przetrwania elementu konstrukcyjnego w budynku w warunkach pożaru.

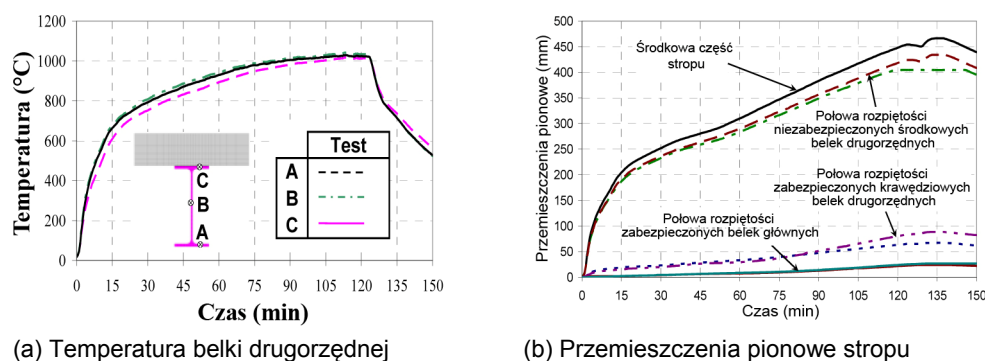
## 5.2 Badania ogniowe FRACOF

Aby wykazać rzeczywiste zachowanie i nośność stropów zespolonych poddanych działaniu pożaru standardowego, w ramach projektu FRACOF finansowanego wspólnie przez firmę ArcelorMittal i organizację Steel Alliance w Maizienes-les-Metz (Francja) w roku 2008 przeprowadzono badania ogniowe w pełnej skali.

Na rysunku 5.5 przedstawiono strop zespolony o powierzchni użytkowej większej niż 60 m<sup>2</sup> i odsłoniętej powierzchni dolnej. Wszystkie elementy konstrukcyjne stropu zespolonego zaprojektowano zgodnie z odpowiednimi Eurokodami z uwzględnieniem standardowej sytuacji obliczeniowej. Strop został równomiernie obciążony za pomocą worków z piaskiem. Cztery słupy stalowe i cztery belki graniczne zabezpieczono przeciwpożarowo, lecz dwie pośrednie belki drugorzędne pozostawiono niezabezpieczone.



**Rysunek 5.5** Szczegóły badań ogniowych stropu zespolonego w pełnej skali, użytego w projekcie FRACOF



**Rysunek 5.6** Wyniki badań ogniowych stropów zespolonych w pełnej skali

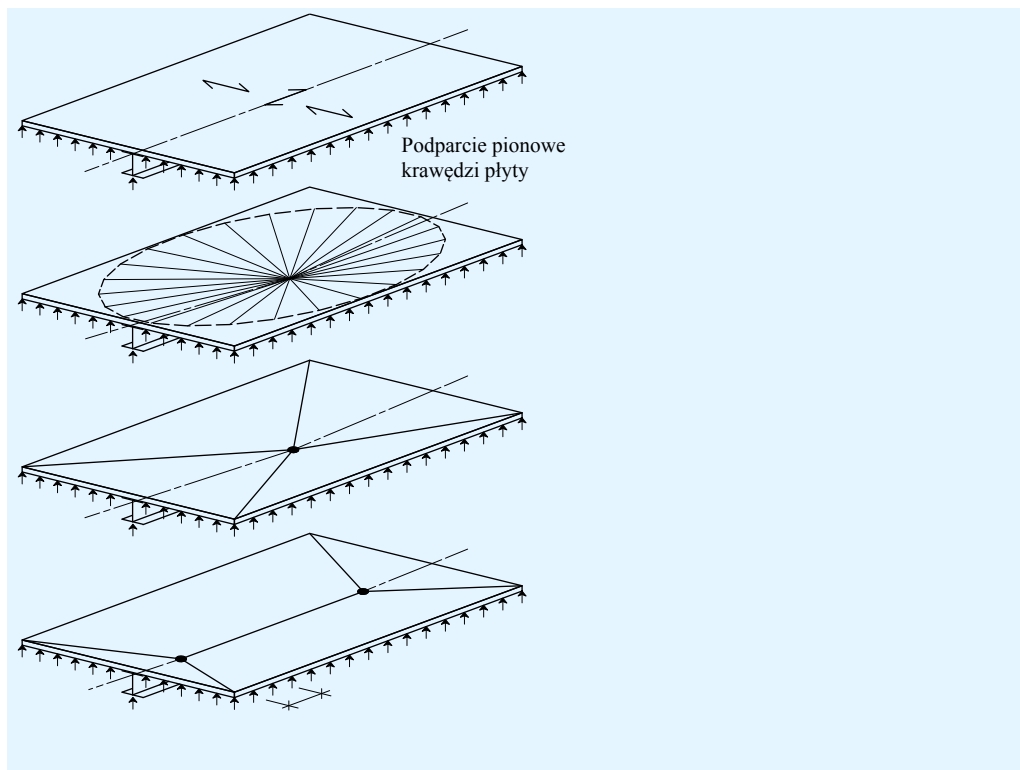
Jak pokazano na rysunku 5.6, w warunkach pożaru standardowego i przy przyłożonych obciążeniach, nawet wtedy, gdy temperatura niezabezpieczonej belki wzrosła do 1040°C a środkowe ugięcie zwiększyło się do 448 mm, konstrukcja stropu zespolonego zachowała stateczność konstrukcyjną przez okres dłuższy niż 120 minut. Dowodzi to, że ognioodporność stropów zespolonych z niezabezpieczonymi belkami drugorzędnymi jest znacznie większa niż 15 minut przewidziane na podstawie standardowych badań ogniowych.

### 5.2.1 Koncepty projektowe

W oparciu o wyniki badań ogniowych w pełnej skali i obserwacje w warunkach rzeczywistych pożarów opracowano nową koncepcję projektową w celu oceny właściwości pożarowych budynków wielokondygnacyjnych wykonanych w konstrukcji stalowej ze stropami zespolonymi.

### 5.2.2 Modele projektowe

W tym modelu stosuje się podejście holistyczne, a nie elementarne. Oblicza się wytrzymałość resztkową stropów zespolonych za pomocą linii uplastycznienia i oddziaływania membrany, jak pokazano na rysunku 5.7.



**Rysunek 5.7 Linia uplastycznienia i oddziaływanie membrany stropu zespolonego w warunkach pożaru**

W modelu projektowym uwzględniono interakcję pomiędzy elementami stropu zespolonego i stwierdzono, że niektóre belki mogą pozostać niezabezpieczone, zachowując przy tym wymagany poziom bezpieczeństwa przeciwpożarowego. Zatem model projektowy oferuje bardziej ekonomiczne i odpowiednie dla danej lokalizacji rozwiązanie bezpieczeństwa przeciwpożarowego, z istotną liczbą belek stalowych i stropów zespolonych pozostawionych bez zabezpieczenia.

Model projektowy skalibrowano w oparciu o badania ogniowe i uzupełniono o tabele obliczeniowe oraz oprogramowanie komputerowe. Wymaga on jednak specjalistycznej wiedzy w zakresie projektowania budynków wielokondygnacyjnych z uwagi na warunki pożarowe. Dalsze informacje można znaleźć w publikacji P388 wydanej przez ośrodek badawczy SCI<sup>[6]</sup>.

### 5.2.3 **Możliwość zastosowania**

Model projektowy FRACOF można stosować do wykazania ognioodporności konstrukcji częściowo zabezpieczonej tylko wtedy, gdy krajowe przepisy budowlane zezwalają na stosowanie metody opartej na właściwościach do projektowania budynków z uwagi na warunki pożarowe. Ponadto model projektowy ma zastosowanie jedynie do konstrukcji stalowych zespolonych z następującymi ograniczeniami.

- Rama jest stężona i niepodatna na wyboczenie w przypadku przechyłu.
- Zespolone płyty stropowe składają się z profilowanej blachy stalowej i betonu zbrojonego.
- Belki stropowe zaprojektowano jako zespolone z płytą stropu.

Model nie może być stosowany w przypadku prefabrykowanych betonowych systemów stropowych.



## **6 WYKORZYSTANIE PODDANIA DZIAŁANIU POŻARU NATURALNEGO I ZAAWANSOWANE MODELOWANIE KONSTRUKCJI**

W niniejszym rozdziale przedstawiono zaawansowane modele obliczeniowe stosowane w celu przedstawienia rzeczywistego zachowania budynków wielokondygnacyjnych w warunkach pożaru oraz do badania bardziej ekonomicznych rozwiązań projektowania tych budynków z uwagi na warunki pożarowe.

### **6.1 Ogólne**

Zarówno metoda danych tabelarycznych, jak i proste modele obliczeniowe były do tej pory powszechnie stosowane przy projektowaniu budynków wielokondygnacyjnych z uwagi na warunki pożarowe. Okazały się one wystarczające do spełnienia minimalnych wymagań w zakresie ochrony życia i bezpieczeństwa. Nie uwzględniają one jednak właściwości rzeczywistego pożaru ani interakcji pomiędzy elementami konstrukcyjnymi w warunkach pożarowych. Ponadto wzrost innowacyjności w zakresie projektowania, budowy i użytkowania nowoczesnych budynków utrudnia w niektórych sytuacjach ekonomiczne spełnienie przepisów przeciwpożarowych przy użyciu prostych modeli obliczeniowych. Dlatego opracowano zaawansowane modele obliczeniowe do projektowania budynków wielokondygnacyjnych z uwagi na warunki pożarowe.

Zaawansowane modele obliczeniowe opierają się na podstawowym opisie fizycznym rozprzestrzeniania się ognia, przenikalności cieplnej i reakcji konstrukcji symulowanych za pomocą modeli numerycznych. Dlatego też są mogą one zapewnić bardziej realistyczne i ekonomiczne rozwiązanie projektowania konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe. Zaawansowane modele obliczeniowe można stosować w celu przedstawienia zachowania poszczególnych elementów, całej konstrukcji lub jej modułów. Pozwalają one uświadomić sobie, jakie jest rzeczywiste zachowanie budynków w warunkach pożaru, i umożliwiają projektowanie bardziej odpornych konstrukcji.

Projektowanie oparte na właściwościach wymaga określenia kryteriów właściwości, zdefiniowania oddziaływań pożaru, modelowania przenikalności cieplnej oraz symulacji odpowiedzi konstrukcji na wynikające podwyższone temperatury, jak pokrótce opisano poniżej.

## **6.2 Modelowanie intensywności pożaru**

### **6.2.1 Model dwustrefowy**

W załączniku D do normy EN 1991-1-2 przedstawiono model dwustrefowy używany do określania temperatury spowodowanej pożarem lokalnym. Zakłada on, że produkty spalania wewnątrz strefy pożarowej gromadzą się w warstwie poniżej sufitu. Dzieli on całą strefę pożarową o różnych warunkach pożarowych na wiele odrębnych stref. Przyjęto, że warunki pożarowe w każdej strefie są jednolite, a temperaturę gazu zdefiniowano jako funkcję czasu, uwzględniając zachowanie masy i energii w strefie pożarowej. Za pomocą oprogramowania komputerowego rozwiązano odpowiednie równania różnicowe dla wartości temperatury w każdej strefie.

### **6.2.2 Obliczeniowa mechanika płynów (CFD)**

W załączniku D normy EN 1991-1-2 zaproponowano model obliczeniowej mechaniki płynów (CFD) w przypadku pożaru lokalnego. CFD dotyczy przepływu płynu, przewodnictwa cieplnego oraz związanych z nimi zjawisk. Wykorzystuje serię równań różniczkowych cząstkowych do określenia temperatury w strefie pożaru w wyniku działania pożaru lokalnego. Model CFD jest bardzo pracochłonny i wymaga wiedzy specjalistycznej, aby zdefiniować parametry wejściowe i ocenić poprawność wyników.

### **6.2.3 Pożar w pełni rozwinięty**

Definicję pożaru w pełni rozwiniętego podano w punkcie 4.1.3, w którym przedstawiono również opis pożaru standardowego i pożaru parametrycznego. Krzywe tych pożarów odnoszą się zarówno do modeli zaawansowanych, jak i do metod prostych.

## **6.3 Modelowanie przenikalności cieplnej**

Wzrost temperatury elementu konstrukcyjnego w warunkach pożaru jest spowodowany przewodzeniem ciepła od gazu w strefie pożarowej do elementu. Wzrost temperatury elementu konstrukcyjnego w warunkach pożaru jest regulowany głównie przez mechanizmy promieniowania i konwekcji.

Modele zaawansowane mają na celu zapewnienie bardziej realistycznego rozwiązania wzrostu temperatury wzdłuż przekroju elementu. Modele zaawansowane uwzględniają:

- oddziaływania termiczne przedstawione w normie EN 1991-1-2,
- niejednolite poddanie działaniu termicznemu,
- niejednolite przewodnictwo cieplne,
- warunki graniczne zależne od czasu,
- właściwości materiału zależne od czasu i temperatury.

Zaawansowane modele przewodnictwa cieplnego opracowano w oparciu o dwu- lub trójwymiarowe metody różnic skończonych lub elementów skończonych. W związku z tym można je stosować tylko przy użyciu komercyjnych pakietów oprogramowania komputerowego.

## 6.4 Zaawansowane modele konstrukcyjne

Zaawansowane modele odpowiedzi konstrukcji zarówno na oddziaływania termiczne, jak i na oddziaływania przyłożone opierają się na podstawach inżynierii budowlanej i są obliczane za pomocą metod elementów skończonych.

Rozpatrywaną konstrukcję zazwyczaj dzieli się na wiele mniejszych dwu- lub trójwymiarowych elementów o różnych warunkach początkowych i granicznych. Mimo że symulacja metodą elementów skończonych w jasny sposób przedstawia informacje istotne dla projektantów, takie podejście wymaga zachowania należytej staranności. Istnieją potencjalne problemy związane z:

- wyborem oprogramowania,
- ustawieniem opcji oprogramowania,
- sposobem modelowania konstrukcji,
- stosowanymi kryteriami odbioru.

## 6.5 Walidacja i weryfikacja modeli zaawansowanych

Ponieważ dostępnych jest wiele zaawansowanych modeli obliczeniowych do modelowania oddziaływania pożaru oraz odpowiedzi termicznej i odpowiedzi konstrukcji budynków, należy przeprowadzić zarówno walidację, jak i weryfikację, aby zapewnić uzyskanie optymalnego rozwiązania.

Walidacja polega na wykazaniu przydatności modelu projektowego lub metody pod względem zamierzonego celu, w tym przewidywań dotyczących intensywności pożaru, przewodnictwa cieplnego i odpowiedzi konstrukcji.

Weryfikacja polega na ocenie, czy model projektowy podaje prawidłowe wyniki. Polega ona na dokładnym sprawdzeniu danych wejściowych pod kątem zgodności wyników podanych przez model z wynikami przewidywanymi na podstawie analizy jakościowej oraz pod kątem stopnia ryzyka związanego z potencjalnymi błędami. Modele zaawansowane należy weryfikować na podstawie wyników odpowiednich testów i innych metod obliczeniowych. Należy je sprawdzić pod kątem zgodności z normalnymi zasadami technologii, stosując badania podatności.

W ramach walidacji i weryfikacji modeli i wyników w normie ISO 16730<sup>[7]</sup> podano podstawy oceny, walidacji i weryfikacji wszystkich metod obliczeniowych stosowanych jako narzędzia inżynierii bezpieczeństwa pożarowego. Ta norma międzynarodowa nie zajmuje się określonymi modelami pożarowymi, lecz przeznaczona jest do stosowania zarówno w przypadku metod prostych, jak i zaawansowanych.

## 6.6 Dopuszczenie prawne

Złożoność uzyskania dopuszczenia prawnego jest różna w zależności od kraju. Organy regulacyjne mogą jednak zażądać od projektanta przedstawienia projektu z uwagi na warunki pożarowe w postaci umożliwiającej łatwe sprawdzenie przez osobę trzecią, z jasno udokumentowanym każdym krokiem projektu, w tym wszystkich przyjętych założeń i przybliżeń. Należy sporządzić listę kontrolną, obejmującą ogólne podejście projektowe, model pożarowy, przewodnictwo cieplne i odpowiedź konstrukcji.

## LITERATURA

1. Dyrektywa Rady z dnia 21 grudnia 1988 r. w sprawie zbliżenia przepisów ustawowych, wykonawczych i administracyjnych Państw Członkowskich odnoszących się do wyrobów budowlanych, 89/106/EWG.
2. EN 1991-1-2:2002 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Oddziaływania ogólne. Oddziaływania na konstrukcje w warunkach pożaru
3. EN 1993-1-2:2005 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Reguły ogólne. Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe
4. EN 1994-1-2:2005 Eurokod 4. Projektowanie konstrukcji zespolonych stalowo-betonowych. Reguły ogólne. Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe
5. EN 13381 Metody badawcze ustalania wpływu zabezpieczeń na odporność ogniową elementów konstrukcyjnych.  
EN 13381-4 Zabezpieczenia elementów stalowych  
EN 13381-8 Termoaktywne zabezpieczenia elementów stalowych (obie części do publikacji w 2010 r.)
6. SIMMS, W. I., ZHAO, B  
Fire resistance assessment of partially protected composite floors (FRACOF) design guide (P388)  
The Steel Construction Institute, 2009.
7. ISO 16730: 2008, wyd. I, Inżynieria pożarowa — Ocena, weryfikacja i walidacja metod obliczeniowych

## DODATKOWA LITERATURA

1. Serwis: One stop shop in structural fire engineering  
<http://www.mace.manchester.ac.uk/project/research/structures/strucfire/>
2. Metody badawcze ustalania wpływu zabezpieczeń na odporność ogniową elementów konstrukcyjnych. Zabezpieczenia elementów stalowych
3. Introduction to fire safety of structures  
Institution of Structural Engineers, 2003
4. HAM, S. J., NEWMAN, G. M., SMITH, C. I., NEWMAN, L. C.  
Structural fire safety - A handbook for architects and engineers (P197)  
The Steel Construction Institute, 1999
5. British Automatic Sprinkler Association Ltd (BASA), Information file, sprinklers in warehouse, <http://www.bafsa.org.uk/snews.php>  
(informacje z dnia 24 czerwca 2009 r.)
6. ECCS, Fire design information sheets, publikacja nr 82, Bruksela 1997 r.
7. KIRBY, B. R.  
Fire resistance of steel structure  
British Steel, 1991
8. Fire protection for structural steel in buildings (4<sup>th</sup> edition)  
Association for Specialist Fire Protection, 2008

9. Fire resistance of steel-framed buildings  
Corus, 2006
10. LAWSON, R. M., NEWMAN, G. M.  
Structural fire design to EC3 and EC4, and comparison with BS 5950 (P159)  
The Steel Construction Institute, 1996
11. RACKHAM, J. W., COUCHMAN, G. H., HICKS, S. J.  
Composite slabs and beams using steel decking: Best practice for design and construction - Revised edition (P300),  
The Steel Construction Institute, 2009
12. LAWSON, R. M.  
Design of composite slab (P055)  
The Steel Construction Institute, 1989
13. Comflor<sup>®</sup>, Composite floor decks  
Corus, 2007
14. LAWSON, R. M., MULLETT, D. L., RACKHAM, J. W.  
Design of asymmetric *slimflor* beam using deep composite decking (P175)  
The Steel Construction Institute, 1997
15. MULLETT, D. L., LAWSON, R. M.  
Design of *slimflor* fabricated beam using deep composite decking (P248)  
The Steel Construction Institute, 1999
16. MULLETT, D. L.  
Slim floor design and construction (P110)  
The Steel Construction Institute, 1992
17. MULLETT, D. L.  
Design of RHS *Slimflor* edge beam (P169)  
The Steel Construction Institute, 1992
18. BAILEY, C. G., NEWMAN, G. M., SIMMS, W. I.  
Design of steel framed buildings without applied fire protection (P186)  
The Steel Construction Institute, 1999
19. LAWSON, R. M., O'BRIEN, T.  
Fire safety of external steelwork (P009)  
The Steel Construction Institute, 1981
20. NEWMAN, G. M., ROBINSON, J. T., BAILEY, C. G.,  
Fire safe design: A new approach to multi-storey steel-framed buildings - Second Edition (P288)  
The Steel Construction Institute, 2006
21. BAILEY, C. G., MOORE, D. B.  
The structural behaviour of steel frames with composite floor slabs subject to fire, Part 1: Theory  
The Structural Engineer, 2000
22. BAILEY, C. G., MOORE, D. B.  
The structural behaviour of steel frames with composite floor slabs subject to fire, Part 2: Design  
The Structural Engineer, 2000
23. ZHAO, B., ROOSEFID, M., VASSART, O.  
Full scale test of a steel and concrete composite floor exposed to ISO fire and corresponding numerical investigation  
Eurosteel Conference 2008, V Europejska Konferencja nt. Konstrukcji Stalowych i Zespolonych w Graz, Austria, 2008

24. PURKISS, J. A.  
Fire safety engineering design of structures  
Butterworth-Heineman, 1996
25. BAILEY, C. G, MOORE, D. B.  
Membrane action of slab/beam composite floor systems in fire  
Engineering Structures 26, Elsevier, 2004
26. Guide to the advanced fire safety of structures  
Institution of Structural Engineers, 2007

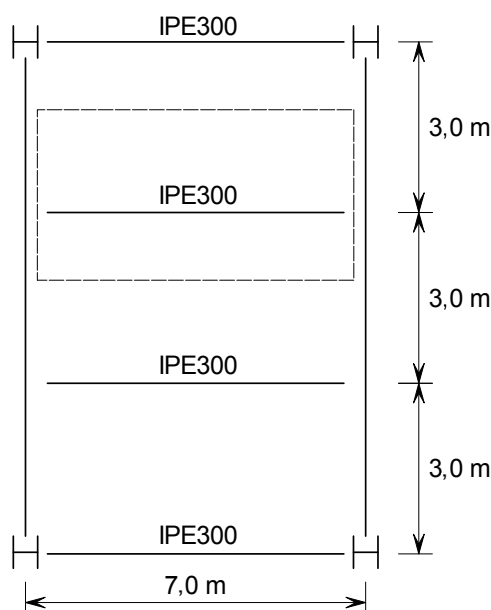




## Przykład praktyczny: Strategie bezpieczeństwa pożarowego i metoda projektowania stalowych belek stropowych

Niniejszy przykład praktyczny ilustruje projekt związany z bezpieczeństwem pożarowym swobodnie podpartej belki stalowej przy wykorzystaniu strategii przeciwpożarowych i metod projektowych opisanych w niniejszej publikacji. Omówiono pięć różnych strategii, aby przedstawić projektantowi różne warianty rozwiązań z zakresu bezpieczeństwa pożarowego. Obejmują one ochronę bierną, alternatywne rozwiązania konstrukcyjne, proste modele obliczeniowe, oddziaływanie membrany rozciąganej i oprogramowanie FRACOF. Aby sprawdzić ognioodporność belki, zastosowano metodę tradycyjną i proste modele obliczeniowe.

Rysunek poniżej przedstawia system stropów typowego wielokondygnacyjnego biurowca. Belki są swobodnie podparte i w warunkach pożaru standardowego powinny się charakteryzować 60-minutową odpornością ogniową, czyli R60. W przykładzie skupiono się na projekcie jednej z belek drugorzędnych. Belka została wykonana z kształtownika IPE 300 ze stali S275 i powinna wytrzymać i przenieść obciążenie pola zaznaczonego na rysunku kreskami.



**Konstrukcja stropu**

### 1. Dane obliczeniowe

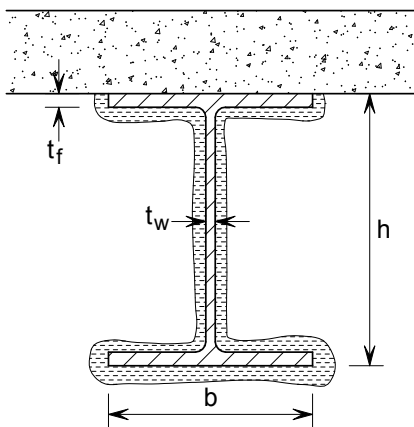
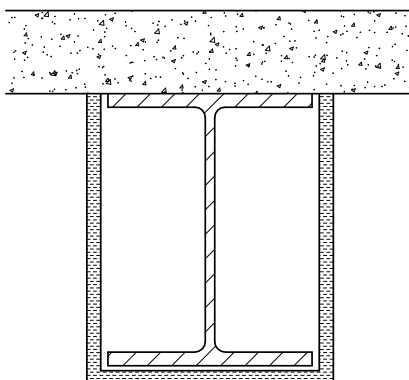
#### 1.1. Właściwości konstrukcji stalowej

Granica plastyczności:  $f_y = 275 \text{ N/mm}^2$

Moduł sprężystości:  $E = 210 \text{ kN/mm}^2$

Masa jednostkowa:  $\rho_a = 7850 \text{ N/mm}^2$

Tytuł	Przykład praktyczny — Strategie bezpieczeństwa pożarowego i metoda projektowania stalowych belek stropowych	2 z 10
<p><b>1.2. Przyłożone oddziaływania</b></p> <p>Oddziaływania stałe: <math>g_k = 3,5 \text{ kN/m}^2</math> (ciężar własny belki i płyty)</p> <p>Oddziaływania zmienne: <math>q_k = 3,0 \text{ kN/m}^2</math> (obciążenia użytkowe stropu)</p> <p><b>1.3. Częstkowe współczynniki bezpieczeństwa</b></p> <p>Oddziaływania stałe: <math>\gamma_G = 1,35</math></p> <p>Oddziaływania zmienne: <math>\gamma_Q = 1,5</math></p> <p>Projektowany przekrój poprzeczny w warunkach temperatury normalnej:  <math>\gamma_{M0} = 1,0</math></p> <p>Projekt uwzględniający warunki pożarowe: <math>\gamma_{M,fi} = 1,0</math></p> <p><b>1.4. System stropów</b></p> <p>Rozstaw belek: <math>B = 3,0 \text{ m}</math></p> <p>Rozpiętość belki: <math>L = 7,0 \text{ m}</math></p> <p><b>2. Weryfikacje dla warunków temperatury normalnej</b></p> <p><b>2.1. Oddziaływania w temperaturze normalnej</b></p> <p>Wartość charakterystyczna oddziaływań:  <math>w_k = 3,5 + 3,0 = 6,50 \text{ kN/m}^2</math></p> <p>Wartość obliczeniowa oddziaływań:  <math>w_d = 1,35 \times 3,5 + 1,5 \times 3,0 = 9,23 \text{ kN/m}^2</math></p> <p>Moment zginający:  <math>M_{Ed} = w_d B L^2 / 8 = 9,23 \times 3 \times 7^2 / 8 = 169,5 \text{ kNm}</math></p> <p>Siła ścinająca:  <math>V_{Ed} = w_d B L / 2 = 9,23 \times 3 \times 7 / 2 = 96,9 \text{ kN}</math></p> <p><b>2.2. Nośność w temperaturze normalnej</b></p> <p><b>2.2.1. Klasyfikacja przekroju</b></p> <p>W oparciu o własności geometryczne kształtownika IPE300 i zgodnie z zasadami podanymi w punkcie 5.5 normy EN 1993-1-1, kształtownik IPE 300 należy do klasy 1.</p> <p><b>2.2.2. Obliczanie nośności</b></p> <p>Przyjmuje się, że strop betonowy zapewnia pełne podparcie boczne pasa ściskanego. W związku z tym zwichrzenie belki nie musi być uwzględniane. Przekrój poprzeczny należy sprawdzić, uwzględniając:</p> <p><b>Nośność przy zginaniu:</b></p> $M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{628 \times 10^3 \times 275}{1,0} \times 10^{-3} = 172,7 \text{ kNm} > M_{Ed} = 169,5 \text{ kNm}$		<p>EN 1993-1-1, §5.5</p> <p>EN 1993-1-1, §6</p> <p>∴ OK</p>

Tytuł	Przykład praktyczny — Strategie bezpieczeństwa pożarowego i metoda projektowania stalowych belek stropowych	3 z 10
<p><b>Nośność przy ścinaniu:</b></p> $V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = \frac{2567 \times 275}{\sqrt{3} \times 1,0} = 407,7 \text{ kN} > V_{Ed} = 96,6 \text{ kN}$ <p><b>2.2.3. Ugięcie</b></p> $\delta = \frac{5}{384} \frac{w_k BL^4}{EI} = \frac{5}{384} \frac{6,5 \times 3000 \times 7000^4}{210000 \times 8356 \times 10^4} \times 10^{-3} = 34,7 \text{ mm} < \frac{L}{200} = 35 \text{ mm}$ <p>Wybrany kształtownik IPE 300 spełnia więc wymagania w warunkach temperatury normalnej.</p> <p><b>3. Strategie zabezpieczenia przeciwpożarowego i metody projektowe</b></p> <p>Celem projektu uwzględniającego zabezpieczenie przeciwpożarowe jest wykazanie, że belka spełnia określone w przepisach wymagania 60-minutowej odporności ogniowej, czyli R60.</p> <p><b>3.1. Bierna ochrona przeciwpożarowa</b></p> <p>Do ochrony biernej zalicza się płyty, warstwy natryskowe i przeciwogniowe powłoki ochronne.</p> <p><b>3.1.1. Współczynnik przekroju belki niezabezpieczonej/zabezpieczonej</b></p> <div><div><math display="block">A/V = \frac{1,5b + h - t_w}{(b - t_w)t_f + 0,5ht_w}</math></div><div><math display="block">A/V = \frac{0,5b + h}{(b - t_w)t_f + 0,5ht_w}</math></div></div> <p><b>Możliwości zabezpieczenia 3-stronnego i stosunki A/V (a) 3-stronne zabezpieczenie kształtownika; (b) 3-stronne zabezpieczenie zamknięte</b></p> <p>W przypadku kształtownika niezabezpieczonego, jak i 3-stronnego zabezpieczenia za pomocą warstw natryskowych lub przeciwogniowych powłok ochronnych, jak pokazano na rysunku (a), współczynnik przekroju wynosi:</p> $A_m/V = \frac{(1,5b + h - t_w)}{[(b - t_w)t_f + 0,5ht_w]} = \frac{(1,5 \times 150 + 300 - 7,1)}{[(150 - 7,1)10,7 + 0,5 \times 300 \times 7,1]} = 200 \text{ m}^{-1}$		<p>∴ OK</p> <p>∴ OK</p>

Tytuł	Przykład praktyczny — Strategie bezpieczeństwa pożarowego i metoda projektowania stalowych belek stropowych	4 z 10
<p>W przypadku 3-stronnego zabezpieczenia zamkniętego za pomocą płyty ogniochronnej, jak pokazano na rysunku (b) powyżej, współczynnik przekroju wynosi:</p> $[A_m/V]_b = \frac{(0,5b + h)}{[(b - t_w)t_f + 0,5ht_w]} = \frac{(0,5 \times 150 + 300)}{[(150 - 7,1)10,7 + 0,5 \times 300 \times 7,1]} = 145 \text{ m}^{-1}$ <p><b>3.1.2. Płyty ogniochronne</b></p> <p>Współczynnik przekroju belki</p> $A_m/V = 200 \text{ m}^{-1} < [A_m/V]_{\max} = 260 \text{ m}^{-1}$ <p>∴ Płyta ogniochronna o grubości 20 mm jest wystarczająca dla zapewnienia stopnia ognioodporności R60.</p> <p><b>3.1.3. Powłoki natryskowe</b></p> <p><math>A_m/V = 200 \text{ m}^{-1}</math>, powłoka natryskowa o grubości 16 mm jest wystarczająca dla zapewnienia stopnia ognioodporności R60.</p> <p><b>3.1.4. Przeciwoogniowe powłoki ochronne</b></p> <p><math>A_m/V = 200 \text{ m}^{-1}</math>, przeciwoogniowa powłoka ochronna o grubości 0,69 mm jest wystarczająca dla zapewnienia stopnia ognioodporności R60.</p> <p><b>3.2. Alternatywne rozwiązania konstrukcyjne</b></p> <p>Aby uniknąć wydatków na materiały ochronne i obniżyć koszty budowy, preferuje się stosowanie kształtowników niezabezpieczonych, o ile spełnione jest wymaganie R60 przez zastosowanie alternatywnych rozwiązań konstrukcyjnych. Rozwiązania te polegają na obetonowaniu belki lub zastosowaniu płyty zespolonej. Obie opcje omówiono w następnych punktach.</p> <p><b>3.2.1. Belka częściowo obetonowana</b></p> <p>Poziom obciążenia: <math>\eta_{fi} = 0,477 &lt; 0,5</math></p> <p>Wskaźnik przekroju: <math>h/b = 300/150 = 2,0 &gt; 1,5</math>.</p> <p>Stąd dla stopnia ognioodporności R60 belka częściowo obetonowana bez zbrojenia może spełnić wymagania R60.</p> <p>Należy zauważyć, że dodatkowy ciężar betonu powinien być dodany do oddziaływania stałego.</p> <p><b>3.2.2. Belki zintegrowane</b></p> <p>W konstrukcji zintegrowanej wykorzystuje się asymetryczne kształtowniki stalowe z belką stalową w granicach wysokości prefabrykowanych płyt betonowych. To rozwiązanie może spełniać wymaganie R60 bez konieczności zabezpieczenia przeciwpożarowego.</p>		<p>Tabela 3.1</p> <p>Tabela 3.2</p> <p>Tabela 3.3</p> <p>3.7</p> <p>Część 3.3.2</p>

Tytuł	Przykład praktyczny — Strategie bezpieczeństwa pożarowego i metoda projektowania stalowych belek stropowych	5 z 10
<p><b>3.3. Proste modele obliczeniowe</b></p> <p>Aby sprawdzić ognioodporność belki w stanie granicznym nośności w warunkach pożaru, stosuje się prosty model obliczeniowy przedstawiony w normie EN 1993-1-1, zgodnie ze schematem blokowym podanym w części 4.4 niniejszej publikacji. Model ten stosuje się w przypadku kształtowników niezabezpieczonych i kształtowników zabezpieczonych za pomocą płyt ogniochronnych.</p> <p>W następnej części przedstawiono obliczenie za pomocą metody nośności. W celu uzyskania optymalnego projektu w przykładzie praktycznym zastosowano różne grubości ochrony, aż do uzyskania grubości optymalnej.</p> <p>Metodę obliczania krytycznego, którą można stosować tylko wtedy, gdy temperatura w całym przekroju poprzecznym jest jednolita, pominięto w niniejszym przykładzie.</p> <p><b>3.3.1. Temperatura belki po 60 minutach działania ognia</b></p> <p>Wzrost temperatury kształtowników niezabezpieczonych i zabezpieczonych określa się przy użyciu procedury obliczeń przyrostowych i następujących modeli podanych w normie EN 1993-1-2 §4.5.2.1.</p> <p>W przypadku kształtownika niezabezpieczonego:</p> $\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{1}{c_a \rho_a} \frac{A_m}{V} \dot{h}_{net} \Delta t$ <p><math>k_{sh}</math> to współczynnik korekcyjny efektu cienia. W przypadku kształtownika IPE podaje się go jako:</p> $k_{sh} = 0,9 \frac{A_m / V}{[A_m / V]_b} = 0,9 \frac{145}{200} = 0,652$ <p>W przypadku kształtowników zabezpieczonych (przyjmując, że zastosowano tylko płyty ochronne):</p> $\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p}{d_p c_a \rho_a} \frac{A_p}{V} \left( \frac{1}{1 + \phi/3} \right) (\theta_{g,t} - \theta_{a,t}) \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t}$ $\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p \frac{A_p}{V}$ <p>Strumień ciepła netto wynosi: <math>\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r}</math></p> <p>Konwekcja:</p> $\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m) = 25 \times (\theta_g - \theta_{at})$ <p>Promieniowanie:</p> $\begin{aligned} \dot{h}_{net,r} &= \sigma \varepsilon_m \varepsilon_f \Phi [(\theta_t + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \\ &= 5,67 \times 10^{-8} \times 0,7 \times 1,0 \times 1,0 \times [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_{at} + 273)^4] \end{aligned}$		

Krzywa nominalnego pożaru standardowego wyraża się następującą zależnością:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10} (8t + 1)$$

Powyższe równania oblicza się w oparciu o następujące własności termiczne stali i materiałów płyt ochronnych:

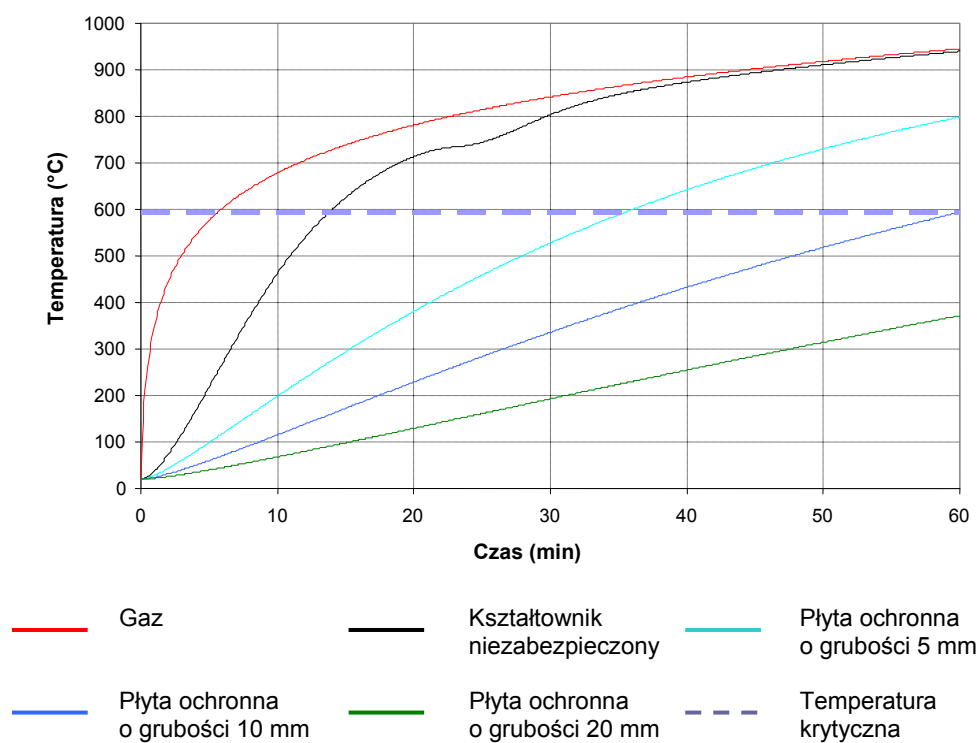
$$c_a = 600 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \quad c_p = 1200 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \quad d_{p,5} = 0,005 \text{ m}$$

$$\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3 \quad \rho_p = 300 \text{ kg/m}^3 \quad d_{p,10} = 0,01 \text{ m}$$

$$\Delta t = 5 \text{ s} \quad \lambda_p = 0,1 \text{ W/m}^\circ\text{C} \quad d_{p,20} = 0,02 \text{ m}$$

Na podstawie tych danych i równań można sporządzić wykres, jak na rysunku poniżej. Przedstawia on zmianę temperatury w powietrzu, kształtowniku niezabezpieczonym i kształtowniku zabezpieczonym o trzech grubościach ochrony: 5 mm, 10 mm i 20 mm.

Wzrost temperatury gazu oraz elementu



Wzrost temperatury gazu i belki w wyniku działania ognia w pożarze naturalnym

### 3.3.2. Nośność

#### Wpływ na konstrukcję dla projektu uwzględniającego warunki pożarowe

Zgodnie z uproszczoną zasadą podaną w normie EN 1991-1-2 wpływ oddziaływań na konstrukcję w warunkach pożarowych można określić, zmniejszając wartość wpływów w warunkach normalnych za pomocą współczynnika  $\eta_{fi}$ .



Tytuł	Przykład praktyczny — Strategie bezpieczeństwa pożarowego i metoda projektowania stalowych belek stropowych	7 z 10
	<p>W przypadku obiektów biurowych współczynnik kombinacji oddziaływań wyjątkowych w warunkach pożaru z oddziaływaniem zmiennym <math>\psi_{fi} = \psi_{2.1} = 0,3</math>, a współczynnik redukcyjny:</p> $\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_k}{\gamma_G G_k + \gamma_Q Q_k} = \frac{3,5 + 0,3 \times 3,0}{1,35 \times 3,5 + 1,50 \times 3,0} = 0,477$ <p>Zatem wpływ oddziaływań na konstrukcję w warunkach pożaru:</p> <p>Moment zginający: <math>M_{fi,Ed} = \eta_{fi} M_{Ed} = 0,477 \times 169,5 = 80,9 \text{ kNm}</math></p> <p>Siła ścinająca: <math>V_{fi,Ed} = \eta_{fi} V_{Ed} = 0,477 \times 96,9 = 46,2 \text{ kN}</math></p> <p><b>Klasyfikacja przekroju</b></p> <p>W przypadku projektu uwzględniającego warunki pożaru wartość parametru <math>\varepsilon</math> jest równa 85% jego standardowej wartości</p> $\varepsilon = 0,85 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,85 \times \sqrt{\frac{235}{275}} = 0,72$ <p>Wskaźniki wyboczenia miejscowego elementów kształtownika są następujące:</p> <p>Pas: <math>c_f/t_f = 5,28 &lt; [c_f/t_f]_{lim} = 9\varepsilon = 7,07</math></p> <p>Środek: <math>c_w/t_w = 35,01 &lt; [c_w/t_w]_{lim} = 72\varepsilon = 56,57</math></p> <p>Przekrój należy do klasy 1.</p> <p><b>Nośność belki po 60 minutach działania ognia</b></p> <p>Nośność przy zginaniu belki o niejednorodnej temperaturze wzdłuż wysokości jej przekroju poprzecznego można obliczyć jako:</p> $M_{fi,Rd} = M_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta} W_{pl,y} f_y / (\kappa_1 \kappa_2)$ <p>Gdzie</p> <p><math>k_{y,\theta}</math> to współczynnik redukcyjny efektywnej granicy plastyczności,</p> <p><math>\kappa_1, \kappa_2</math> to współczynniki przystosowania niejednorodnego rozkładu temperatury w przekroju poprzecznym i wzdłuż belki.</p> <p><b>Belka niezabezpieczona</b></p> <p>Temperatura niezabezpieczonej belki po 60 minutach działania ognia, wyznaczona jak na rysunku w arkuszu 6, wynosi:</p> $\theta_{at} = 935^\circ\text{C}$ <p>Współczynnik redukcyjny efektywnej granicy plastyczności można określić dla:</p> $\theta_a = 900^\circ\text{C} \quad k_{y,\theta} = 0,060$ $\theta_a = 1000^\circ\text{C} \quad k_{y,\theta} = 0,040$ <p>Przez interpolację dla <math>\theta_a = 935^\circ\text{C}</math> otrzymujemy:</p> $k_{y,\theta} = 0,052$	<p>EN 1993-1-2; §4.2.2</p> <p>EN 1993-1-2; Tabela 3.1</p> <p>EN 1993-1-2; §4.2.3.3</p>

Tytuł	Przykład praktyczny — Strategie bezpieczeństwa pożarowego i metoda projektowania stalowych belek stropowych	8 z 10
	<p>W przypadku belki niezabezpieczonej odsłoniętej z trzech stron z płytą zespoloną lub betonową z czwartej strony:</p> $\kappa_1 = 0,70$ <p>w każdym przypadku, gdy podpory belki nie są statycznie niewyznaczalne:</p> $\kappa_2 = 0,85$ <p>Zatem nośność belki przy zginaniu wynosi:</p> $M_{fi,Rd} = 0,052 \times 628 \times 10^3 \times 275 / (0,7 \times 1,0) \times 10^{-6} = 12,83 \text{ kNm} \leq 80,9 \text{ kNm}$ <p>Zatem kształtownik niezabezpieczony nie jest bezpieczny.</p> <p><b>Płyta ochronna o grubości 10 mm</b></p> <p>Konieczne jest więc jakieś zabezpieczenie belki. Jak wynika z ustaleń poprzednich uproszczonych obliczeń w oparciu o temperaturę, pierwszą opcją, którą należy przeanalizować, jest płyta ochronna o grubości 10 mm. Rozwiązanie to zostało już uznane za bezpieczne.</p> <p>Zgodnie z rysunkiem powyżej przy tym rozwiązaniu temperatura po 60 minutach działania ognia wynosi:</p> $\theta_{at} = 594^\circ\text{C}$ <p>Współczynnik redukcyjny efektywnej granicy plastyczności można określić dla:</p> $\theta_a = 500^\circ\text{C} \quad k_{y,\theta} = 0,780$ $\theta_a = 600^\circ\text{C} \quad k_{y,\theta} = 0,470$ <p>Przez interpolację dla <math>\theta_a = 594^\circ\text{C}</math></p> $k_{y,\theta} = 0,46$ <p>Współczynniki <math>\kappa_1</math> i <math>\kappa_2</math> są takie, jak wyznaczono wcześniej.</p> <p>Nośność przy zginaniu belki w pełni utwardzonej o niejednorodnej temperaturze wzdłuż wysokości jej przekroju poprzecznego:</p> $M_{fi,Rd} = k_{y,\theta} \frac{W_{pl,y} f_y}{\kappa_1 \kappa_2} = 0,46 \frac{628 \times 10^3 \times 275}{0,7 \times 1,0} \times 10^{-6} = 113 \text{ kNm} > 80,9 \text{ kNm}$ <p>Nośność przy ścinaniu można wyliczyć w następujący sposób:</p> $V_{fi,Rd} = k_{y,\theta} \frac{A_v f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = 0,46 \frac{2567 \times 275}{\sqrt{3} \times 1,0} = 187,5 \text{ kN} > 96,6 \text{ kN}$ <p>Kształtownik o 3-stronnym zabezpieczeniu zamkniętym za pomocą płyt o grubości 10 mm jest bezpieczny.</p>	<p>∴ NIEPOWODZENIE</p> <p>∴ OK</p> <p>∴ OK</p> <p>∴ OK</p>

Tytuł	Przykład praktyczny — Strategie bezpieczeństwa pożarowego i metoda projektowania stalowych belek stropowych	9 z 10
<div><div><h3>3.4. Wykorzystanie oddziaływania membrany rozciąganej</h3><p>Na podstawie badań ogniowych w pełnej skali i badań w warunkach rzeczywistego pożaru wyciągnięto wniosek, że zastosowanie stropów zespolonych ze stalową blachą profilowaną prowadzi do uzyskania znacznie większej odporności ogniowej, niż wartość przewidywana na podstawie obliczeń prostych przyjętych w Eurokodzie i przedstawionych w niniejszym przykładzie.</p><p>Zademonstrowano, że dopóki płyta jest dobrze podparta przeciw ugięciu pionowemu wzdłuż linii dzielących ją na płaszczyzny zbliżone do kwadratów, może być generowane oddziaływanie membrany rozciąganej jako mechanizmu przenoszącego obciążenia, zapewniając w ten sposób rezerwę nośności nie uwzględnianą przez modele uproszczone.</p><p>W rezultacie można przyjąć, że belka w niniejszym przykładzie może pozostać niezabezpieczona przy jednoczesnym zachowaniu poziomu bezpieczeństwa wymaganego przez Eurokod 3. Zademonstrowano, że taki system konstrukcyjny zapewnia większą ognioodporność belek drugorzędnych, lecz nie belek głównych, dlatego należy zachować ostrożność, przyjmując to rozwiązanie.</p></div><div><h3>3.5. Metoda FRACOF</h3><p>Oprogramowanie FRACOF można stosować w celu określenia, czy niezabezpieczone stalowe belki drugorzędne są wystarczające, gdy stosowana jest konstrukcja zespolona.</p><p>Dla celów demonstracyjnych belkę IPE 300 S275 rozważaną w tym przykładzie zastosowano jako belkę zespoloną, przy następujących założeniach do przyjęcia w metodzie FRACOF:</p><ul style="list-style-type: none"><li>• Belki główne IPE 550 S275</li><li>• Blacha Cofrastra 40</li><li>• Płyta o wysokości 130 mm z betonu C25/30</li><li>• Siatka ST 40 C, 500 N/mm<sup>2</sup></li><li>• Przyjęto, że wszystkie belki mają połączenie ścinane w 100%.</li></ul><p>Wartość obliczeniowa oddziaływań w warunkach temperatury normalnej wynosi 9,23 kN/m<sup>2</sup>. Współczynnik redukcyjny w warunkach pożaru obliczono jako 0,477, co daje wartość oddziaływania pożaru wynoszącą 4,4 kN/m<sup>2</sup>.</p><p>Przy takich danych wejściowych zgodnie z obliczeniami wykonanymi w programie FRACOF ustalono, że użycie niezabezpieczonej belki drugorzędnej IPE 300 pozwala uzyskać stopień ognioodporności R60. Szczegóły podsumowano w poniższej tabeli i przedstawiono graficznie na rysunku poniżej.</p></div></div>		Część 8.

Czas	Belka	Siatka	Górna część płyty	Dolna część płyty	Nośność belki	Maksymalne dopuszczalne ugięcie	Uplastycznienie płyty	Zwiększenie	Nośność płyty	Całkowita nośność	Współczynnik interakcji
min	°C	°C	°C	°C	kN/m <sup>2</sup>	mm	kN/m <sup>2</sup>		kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	
0	20	20	20	20	20,25	190	2,66	1,97	5,25	25,50	0,32
5	247	21	20	173	20,25	233	2,66	2,20	5,85	26,11	0,32
10	534	24	20	387	13,96	292	2,66	2,52	6,70	20,66	0,40
15	692	31	21	534	5,31	333	2,66	2,74	7,28	12,59	0,66
20	761	39	24	631	3,36	359	2,66	2,88	7,66	11,01	0,75
25	802	48	28	697	2,35	377	2,66	2,97	7,90	10,25	0,80
30	832	60	33	746	2,02	389	2,66	3,03	8,08	10,10	0,82
35	857	70	39	784	1,76	398	2,66	3,08	8,20	9,96	0,83
40	879	86	47	815	1,53	404	2,66	3,12	8,30	9,82	0,84
45	897	91	55	841	1,33	409	2,66	3,14	8,37	9,70	0,85
50	914	112	63	864	1,24	413	2,66	3,17	8,43	9,67	0,85
55	928	127	71	883	1,18	416	2,66	3,18	8,47	9,65	0,86
60	942	138	78	901	1,12	419	2,66	3,20	8,51	9,63	0,86

Maksymalny współczynnik interakcji

0,86

Płyta stropowa odpowiednia

Zgodnie z danymi przedstawionymi w tabeli po 20 minutach działania ognia nośność belki wynosi  $3,36 \text{ kN/m}^2 < 4,4 \text{ kN/m}^2$  oddziaływania pożaru.

Uwzględniając nośności płyty, po 60 minutach działania ognia nośność całkowita pozostaje na poziomie powyżej  $9 \text{ kN/m}^2$ , co oznacza, że belka nie wymaga zabezpieczenia.

