

KONSTRUKCJE STALOWE W EUROPIE

**Jednokondygnacyjne
konstrukcje stalowe
Część 7: Inżynieria pożarowa**

**Jednokondygnacyjne
konstrukcje stalowe
Część 7: Inżynieria pożarowa**

PRZEDMOWA

Niniejsza publikacja stanowi siódmą część przewodnika projektanta zatytułowanego *Jednokondygnacyjne konstrukcje stalowe*.

Przewodnik *Jednokondygnacyjne konstrukcje stalowe* składa się z następujących 11 części:

- Część 1: Poradnik architekta
- Część 2: Projekt koncepcyjny
- Część 3: Oddziaływania
- Część 4: Projekt wykonawczy ram portalowych
- Część 5: Projekt wykonawczy kratownic
- Część 6: Projekt wykonawczy słupów złożonych
- Część 7: Inżynieria pożarowa
- Część 8: Przegrody zewnętrzne budynku
- Część 9: Wprowadzenie do oprogramowania komputerowego
- Część 10: Wzorcowa specyfikacja konstrukcji
- Część 11: Połączenia zginane

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

	Nr strony
PRZEDMOWA	iii
STRESZCZENIE	vi
1 WPROWADZENIE	1
2 ZAGROŻENIA POŻAROWE W BUDYNKACH JEDNOKONDYGNACYJNYCH	3
2.1 Cele zabezpieczenia przeciwpożarowego	3
2.2 Analiza zagrożenia pożarowego	3
2.3 Główne wymagania aktualnych przepisów przeciwpożarowych	5
3 PRAKTYCZNE ROZWIĄZANIA INŻYNIERII POŻAROWEJ W EUROKODACH	7
3.1 Aktualne metody projektowania	7
3.2 Analiza pożaru	8
3.3 Analiza wymiany ciepła	9
3.4 Analiza konstrukcyjna	10
4 WSKAZÓWKI DOTYCZĄCE ODPOWIEDNIEGO ROZWIĄZANIA INŻYNIERII POŻAROWEJ	12
4.1 Zakres zastosowań różnych metod obliczeniowych	12
4.2 Wybór optymalnej metody projektowania	13
5 BEZPOŚREDNIE ZASTOSOWANIE PROSTYCH OPCJI PROJEKTOWYCH DO STOSOWANIA PRZEZ OSOBY NIE BĘDĄCE SPECJALISTAMI	14
5.1 Modele pożaru	14
5.2 Modele termiczne	18
5.3 Modele konstrukcyjne	23
5.4 Szczegółowe zasady projektowania budynków jednokondygnacyjnych	34
5.5 Uproszczone metody obliczeniowe	36
5.6 Zalecenia projektowe	41
6 WYTYCZNE DOTYCZĄCE STOSOWANIA BARDZIEJ ZAAWANSOWANYCH ROZWIĄZAŃ	52
6.1 Modele pożaru	52
6.2 Modele termiczne	56
6.3 Modele konstrukcyjne	57
LITERATURA	63
ZAŁĄCZNIK A Niemiecka procedura bezpieczeństwa pożarowego jednokondygnacyjnych budynków przemysłowych i handlowych	64

STRESZCZENIE

Niniejszy dokument zawiera wskazówki dotyczące projektowania jednokondygnacyjnych konstrukcji stalowych z uwagi na warunki pożarowe. Zawiera on szczegółowe informacje umożliwiające inżynierom i projektantom lepsze zaznajomienie się z aktualnymi metodami projektowymi i modelami obliczeniowymi, które mogą być stosowane nie tylko w celu spełnienia wymagań tradycyjnych, lecz również do opracowania opartego na właściwościach projektu uwzględniającego bezpieczeństwo pożarowe. Metody projektowe przedstawione w przewodniku, od prostych zasad projektowania do bardziej zaawansowanych modeli obliczeniowych, zostały zaczerpnięte z norm EN 1993-1-2 i EN 1994-1-2. Obejmują one zarówno konstrukcje stalowe, jak i zespolone (niezabezpieczone i zabezpieczone). Ponadto podano kilka szczegółowych zasad projektowania umożliwiających proste sprawdzenie, czy zachowanie konstrukcji stalowych jednokondygnacyjnych budynków przemysłowych w sytuacji pożaru spełnia cele bezpieczeństwa na podstawie wymogu opartego na właściwościach.

1 WPROWADZENIE

Z uwagi na specyfikę budynków jednokondygnacyjnych cele związane z bezpieczeństwem osób na wypadek pożaru mogą być łatwo spełnione bez stosowania rygorystycznych wymagań dotyczących ognioodporności konstrukcji. Jeżeli jednak może być dopuszczone zniszczenie tych budynków lub ich części, należy uwzględnić inne cele bezpieczeństwa. W rezultacie wiele europejskich przepisów z zakresu bezpieczeństwa pożarowego budynków zmierza w kierunku dopuszczenia alternatywnego projektowania zgodnego z inżynierią bezpieczeństwa pożarowego. Zasady normatywne mogą zostać wówczas zastąpione wymaganiami opartymi na właściwościach, takich jak odpowiednie zachowanie konstrukcji w warunkach pożaru, które pozwalają na spełnienie celów zabezpieczenia pożarowego obejmujących bezpieczeństwo osób (użytkowników budynku i strażaków), ochronę środowiska, ochronę mienia oraz ciągłość działania. Zalety oraz skuteczne zastosowanie metody opartej na właściwościach w projektowaniu budynków uwzględniającym bezpieczeństwo pożarowe zostały już dobrze udowodnione w przypadku konstrukcji jednokondygnacyjnych, zwłaszcza tam, gdzie wymagana była ognioodporność, umożliwiając w niektórych przypadkach przyjęcie bardziej innowacyjnych, ekonomicznych i bezpiecznych rozwiązań.

W celu wspomagania projektowania konstrukcji budynków z uwagi na warunki pożarowe opracowano nowy zestaw norm europejskich, czyli Eurokody. Części Eurokodów dotyczące projektowania budynków jednokondygnacyjnych z uwagi na warunki pożarowe obejmują normę EN 1991-1-2^[1] (która zawiera główne koncepcje i reguły niezbędne do opisanie termicznych i mechanicznych oddziaływań na konstrukcje w warunkach pożaru) oraz części Eurokodów właściwych dla danego materiału związane z projektowaniem konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe, takie jak norma EN 1993-1-2^[2] dotycząca konstrukcji stalowych i norma EN 1994-1-2^[3] dotycząca stalowo-betonowych konstrukcji zespolonych.

Części Eurokodów dotyczące warunków pożarowych oferują obecnie szeroki wachlarz metod obliczeniowych. Umożliwiają one inżynierom przestrzeganie metody tradycyjnej w celu spełnienia wymagań bezpieczeństwa pożarowego zgodnych z krajowymi przepisami budowlanymi lub też projektowanie na podstawie reguł opartych na właściwościach zgodnie z inżynierią bezpieczeństwa pożarowego, co wymaga na ogół bardziej złożonej analizy obliczeniowej i pozwala na dokładniejsze spełnienie celów zabezpieczenia pożarowego.

Niniejszy przewodnik zawiera przegląd aktualnych metod obliczeniowych przydatnych do oceny właściwości pożarowych budynków jednokondygnacyjnych o konstrukcji stalowej lub zespolonej, jak również ich zakres zastosowań. Łatwe do zastosowania nieskomplikowane metody obliczeniowe oraz bardziej zaawansowane modele obliczeniowe zostały omówione oddzielnie. Ponadto w celu umożliwienia szybkiej oceny podano proste zasady projektowania pozwalające szybko ustalić, czy zachowanie konstrukcji stalowych budynków magazynowych i przemysłowych spełnia cele zabezpieczenia pożarowego wymagane przepisami bezpieczeństwa pożarowego dla budynków przemysłowych.

Niniejszy przewodnik ma również stanowić pomoc dla inżynierów w lepszym zrozumieniu różnych metodologii obliczeniowych i projektowaniu budynków jednokondygnacyjnych z uwagi na warunki pożarowe zgodnie z Eurokodami, poczynając od stosunkowo prostej analizy pojedynczych elementów konstrukcyjnych w warunkach pożaru standardowego do bardziej złożonej analizy w warunkach rzeczywistego pożaru.

2 ZAGROŻENIA POŻAROWE W BUDYNKACH JEDNOKONDYGNACYJNYCH

2.1 Cele zabezpieczenia przeciwpożarowego

Głównym celem większości przepisów bezpieczeństwa pożarowego jest zapewnienie ochrony życia ludzi (osób przebywających w budynku i strażaków), środowiska naturalnego oraz, do pewnego stopnia, mienia (zawartości budynku i samego budynku). Za pomocą wielu środków, włączając w to kombinację systemów czynnej i biernej ochrony przeciwpożarowej, realizowane są następujące cele:

- Ograniczenie występowania pożarów i zapobieganie im przez kontrolowanie zagrożeń pożarowych w budynku.
- Zapewnienie bezpiecznych dróg ewakuacyjnych umożliwiających opuszczenie budynku przez przebywające w nim osoby.
- Zapobieganie rozprzestrzenianiu się ognia ze strefy pożarowej na inne części budynku oraz na sąsiednie obiekty.
- Zapewnienie zachowania stateczności konstrukcyjnej budynku przez okres czasu wystarczający do ewakuacji osób przebywających w obiekcie i przeprowadzenia przez straż pożarną akcji ich ratowania, jeśli jest to konieczne.

2.2 Analiza zagrożenia pożarowego

Budynki jednokondygnacyjne pełniące funkcję fabryk, magazynów lub centrów handlowych stanowią powszechny obecnie rodzaj konstrukcji stalowej. W szczególnym przypadku magazynów, w zależności od układu przestrzeni magazynowej (włączając w to składowanie towarów wolnostojących, składowanie na regałach paletowych, składowanie na paletach słupkowych oraz składowanie na półkach pełnych lub listwowych) oraz palności przechowywanych materiałów, ogień może się bardzo szybko rozprzestrześć, a następnie zagrażać osobom przebywającym w budynku na długo, zanim jego konstrukcja ulegnie zniszczeniu. Istotnie, wzrost pożaru może mieć niezwykle duże znaczenie, ponieważ pionowe rozprzestrzenianie się płomienia następuje zwykle bardzo szybko. Pionowe i poziome szyby uformowane między sąsiadującymi paletami i regałami działają jak kominy, wzmagając rozprzestrzenianie się płomieni aż po dach. Dym szybko tworzy gorącą warstwę pod dachem, a następnie stopniowo opada w miarę rozprzestrzeniania się ognia. Oczywiście tempo, w jakim to następuje, zależy od zawartości materiałów palnych oraz od planu budynku. W przypadku braku wentylacji budynki jednokondygnacyjne mogą zostać całkowicie wypełnione dymem w ciągu kilku minut. Mimo że dym składa się głównie z „zaabsorbowanego” powietrza, zawarte w nim substancje toksyczne i duszące mogą w kilka minut spowodować obezwładnienie lub śmierć osób narażonych na jego działanie. Ponadto warstwa gorącego dymu będzie również emitować intensywny strumień ciepła na osoby ewakuujące się z miejsca pożaru. Warstwa gorącego gazu w temperaturze 500°C emituje strumień ciepła wynoszący około 20 kW/m² (co odpowiada energii promieniowania emitowanej przez

ciało doskonale czarne w temperaturze 500°C), a w takich warunkach termicznych już po kilku sekundach następuje oparzenie skóry⁴. Zazwyczaj przyjmuje się, że próg warunków bezpiecznej ewakuacji wynosi 2,5 kW/m², co jest wielkością znacznie mniejszą niż strumień ciepła mogący doprowadzić do zniszczenia elementów konstrukcyjnych. W rezultacie budynki mogą przetrwać dłużej niż przebywające w nich osoby, a zniszczenie konstrukcji stalowych budynków jednokondygnacyjnych zazwyczaj nie zagraża dodatkowo osobom ewakuującym się z miejsca pożaru.

Oдноśnie działań straży pożarnej na ogół przyjmuje się, że ze względu na szybki wzrost pożaru strażacy nie powinni wchodzić do budynków jednokondygnacyjnych. Zazwyczaj muszą oni prowadzić akcję gaśniczą z zewnątrz budynku, osłaniając sąsiadujące ściany za pomocą wody. W takiej sytuacji zagrożenie dla strażaków w przypadku zniszczenia konstrukcji jest zredukowane do zera, ponieważ następuje ono na takim poziomie temperatury, którego strażacy nie są w stanie wytrzymać (zakładając, że nie występuje postępujące zniszczenie konstrukcji w przypadku budynków podzielonych na strefy pożarowe ani zawalenie konstrukcji na zewnątrz^[5,6]). Jeśli na początku pożaru strażacy muszą wejść do budynku w celu ratowania ludzi, nie mogą oni przebywać wewnątrz budynku po osiągnięciu przez strumień ciepła wielkości większej niż 7 kW/m², która również jest bardzo odległa od tej, przy której występuje zagrożenie zniszczenia konstrukcji.

Z tego względu zbyteczne jest zwiększenie ognioodporności własnej budynków jednokondygnacyjnych. Należy jednak dokładnie przeanalizować ogólną stateczność konstrukcji i stateczność ścian przeciwpożarowych, aby uniknąć zniszczeń postępujących. Budynek jednokondygnacyjny ulega postępującemu zniszczeniu, gdy miejscowe zniszczenie podgrzanej części konstrukcji prowadzi do zniszczenia chłodnych konstrukcji przylegających. Ponadto w celu zapewnienia bezpieczeństwa strażakom przebywającym wokół budynku, zniszczenie konstrukcji budynku jednokondygnacyjnego (w tym elementów elewacji) musi nastąpić w kierunku do wewnątrz budynku.

Wiele przepisów krajowych uwzględnia wcześniejsze uwagi dotyczące jednokondygnacyjnych budynków przemysłowych i budynków użyteczności publicznej, nie wymagając określenia wskaźnika ognioodporności tego typu obiektów, lecz wprowadzając specjalne wymagania bezpieczeństwa w zakresie ogólnego zachowania konstrukcji i koncentrując wymagania na ułatwieniu ewakuacji oraz wczesnym wykrywaniu i/lub tłumieniu pożaru.

W odniesieniu do innych budynków jednokondygnacyjnych poddanych stosunkowo małym obciążeniom ogniowym zagrożenie życia w przypadku pożaru jest ograniczone, ponieważ ewakuacja osób przebywających w budynku oraz działania gaśnicze są proste.

2.3 Główne wymagania aktualnych przepisów przeciwpożarowych

2.3.1 Ognioodporność elementów konstrukcyjnych

Niezależnie od powyższych uwag, czasami w przypadku konstrukcji jednokondygnacyjnych wymagane jest określenie wskaźników ognioodporności^[7].

Ognioodporność jest wyrażana jako czas, w którym element budynku może wytrzymać działanie ognia, nie tracąc swojej funkcji (elementów nośnych lub elementu oddzielającego). Elementy budynku klasyfikuje się zwykle za pomocą trzech następujących kryteriów właściwości:

- nośność R , która jest odpornością elementu nośnego na działanie ognia bez utraty stateczności konstrukcyjnej;
- odporność na zniszczenie E , która jest zdolnością elementu oddzielającego poddanego działaniu ognia z jednej strony do zapobiegania przenikaniu przez niego płomieni i gorących gazów;
- izolacja I , będąca zdolnością elementu oddzielającego poddanego działaniu ognia z jednej strony do ograniczenia wzrostu temperatury powierzchni nieosłoniętych poniżej określonych wartości granicznych (na ogół o średniej wartości wynoszącej 140°C).

W zalecanych przepisach przeciwpożarowych wymagana ognioodporność elementu budynku jest wyrażana jako minimalny okresu czasu, w którym element ten poddawany działaniu standardowego ognia spełniałby swoją funkcję w sposób zadowalający.

Gdy podane są wymagania stateczności ogniowej budynków jednokondygnacyjnych, zwykle wahają się one od 15 minut (R15) do 60 minut (R60), zależnie od klasy użytkowej budynku, zaopatrzenia w instalację tryskaczową, wysokości budynku i wielkości strefy pożarowej.

2.3.2 Podział budynku na strefy pożarowe i oddzielenie budynku

Gdy powierzchnia stropu budynku przekracza dopuszczalną maksymalną wielkość strefy pożarowej, wówczas budynki jednokondygnacyjne muszą zostać podzielone na strefy pożarowe oddzielone ścianami przeciwpożarowymi. Ograniczenia dotyczące wielkości strefy pożarowej można pominąć, jeżeli budynek jest wyposażony w instalację tryskaczową.

Wpływ zastosowania podziału na strefy pożarowe na straty materialne polega na ograniczeniu bezpośredniego uszkodzenia do zawartości strefy pożarowej, w której rozpoczął się pożar, co zmniejsza prawdopodobieństwo jego dużego wzrostu. W odniesieniu do bezpieczeństwa osób, ludzie przebywający w innych częściach budynku mogą korzystać z dróg ewakuacyjnych, aby bezpiecznie opuścić obiekt, nie narażając się na działanie dymu lub gazów uwolnionych podczas pożaru.

W przypadku ścian przeciwpożarowych między strefami pożarowymi ognioodporność zazwyczaj mieści się w zakresie od REI 60 do REI 120.

Należy również zapobiegać rozprzestrzenianiu się ognia na sąsiednie budynki. Tradycyjnie osiąga się to przez zachowanie wystarczających odległości oddzielających lub zastosowanie elementów elewacji o odpowiedniej ognioodporności. W ramach francuskiego projektu badawczego pod nazwą Flumilog opracowano ostatnio metodę projektową w celu oceny wpływów promieniowania cieplnego emitowanego podczas pożarów w jednokondygnacyjnych budynkach magazynowych. Metoda ta umożliwia obliczenie bezpiecznych odległości oddzielających z uwzględnieniem głównych właściwości budynku, takich jak wyposażenie, rodzaj elementów elewacji i dachu itp.

2.3.3 Tłumienie pożaru

Krajowe przepisy przeciwpożarowe mogą wymagać zastosowania instalacji tryskaczowych. Oprócz oczywistego wpływu na ograniczenie wzrostu pożaru, ich użycie prowadzi zazwyczaj do obniżenia wymaganego poziomu ognioodporności konstrukcji. Pozwalają one również na zwiększenie wielkości stref pożarowych.

2.3.4 Systemy oddymiania

Krajowe przepisy przeciwpożarowe mogą wymagać wyposażenia budynków użyteczności publicznej, magazynów i obiektów przemysłowych w systemy oddymiania w celu ułatwienia ewakuacji dzięki zminimalizowaniu ryzyka obrażeń i wdychania dymu oraz, do pewnego stopnia, aby umożliwić strażakom lepszą widoczność pożaru, a tym samym jego szybsze i skuteczniejsze ugaszenie. Systemy oddymiania pomagają w usuwaniu dymu z miejsca pożaru i w ograniczaniu rozprzestrzeniania się gorącego gazu pod dachem, co opóźnia wypełnienie się strefy pożarowej dymem i zapewnia osobom przebywającym w budynku więcej czasu na bezpieczną ewakuację. Można to osiągnąć przez zastosowanie kombinacji wentylacji oddymiającej (mechanicznej lub naturalnej) oraz osłon (które zatrzymują dym w określonych obszarach).

2.3.5 Wykrywanie pożaru i systemy alarmowe

Konieczne jest zastosowanie odpowiednich środków mających na celu wykrycie każdego zarzewia pożaru oraz ostrzeżenie osób przebywających w budynku i straży pożarnej o wystąpieniu pożaru. W małych budynkach jednokondygnacyjnych, w których wszystkie wyjścia są widoczne, prawdopodobieństwo szybkiego wykrycia każdego pożaru przez osoby przebywające w budynku jest duże, a okrzyk „Pali się!” może być wystarczającym ostrzeżeniem. W większych budynkach jednokondygnacyjnych odpowiedni może być prosty sygnalizator akustyczny, taki jak urządzenie alarmowe zasilane bateriami lub obrotowy dzwonek alarmowy. W budynku przemysłowym należy uwzględnić hałas otoczenia, aby zapewnić, że alarm zostanie usłyszany przez wszystkie osoby przebywające w budynku.

2.3.6 Ułatwienia ewakuacji

W celu zapewnienia bezpiecznej ewakuacji konieczne są odpowiednie środki ewakuacji, takie jak prawidłowa liczba i szerokość wyjść ewakuacyjnych oraz prawidłowa długość, szerokość i wysokość przejść i dojść ewakuacyjnych. Drogi ewakuacyjne w małych budynkach jednokondygnacyjnych na ogół prowadzą bezpośrednio do bezpiecznego miejsca na zewnątrz budynku. Zazwyczaj nie wymagają one żadnego specjalnego traktowania. W większych budynkach, gdzie odległości do przebycia są większe i istnieje prawdopodobieństwo odcięcia przez pożar jedynych dróg ewakuacyjnych, może być konieczne zapewnienie alternatywnych sposobów ewakuacji. Należy również wziąć pod uwagę osoby niepełnosprawne.

3 PRAKTYCZNE ROZWIĄZANIA INŻYNIERII POŻAROWEJ W EUROKODACH

3.1 Aktualne metody projektowania

Korzystając z części Eurokodów dotyczących warunków pożarowych^[8,9], budynki jednokondygnacyjne można projektować za pomocą metody tradycyjnej lub metody opartej na właściwościach, gdzie zastosowanie mają zasady inżynierii pożarowej^[10].

Metodę tradycyjną stosuje się zazwyczaj w celu spełnienia standardowych wymagań dotyczących ognioodporności określonych zwykle w krajowych przepisach przeciwpożarowych. Zapewnia ona poziom bezpieczeństwa, który jest stosunkowo łatwy do osiągnięcia i wdrożenia. Może ona jednak być zachowawcza, wymagając zastosowania istotnej biernej ochrony przeciwpożarowej w celu zapewnienia wymaganego poziomu ognioodporności. Tę metodę wykorzystuje się zwykle przy projektowaniu stosunkowo prostych budynków i konstrukcji.

Jako alternatywa, lub gdy jest to zgodne z przepisami krajowymi, metoda oparta na właściwościach może umożliwić ocenę odpowiednich środków w celu spełnienia przyjętych określonych celów zabezpieczenia pożarowego, takich jak podane w akapicie 2.1, oraz odpowiadających im kryteriów właściwości. Za pomocą inżynierii pożarowej elementów konstrukcyjnych inżynierowie mogą ocenić ognioodporność wymaganą dla konstrukcji w celu uniknięcia rozprzestrzeniania się pożaru i/lub w celu zapobiegania przedwczesnemu zniszczeniu konstrukcji. W przypadku budynków jednokondygnacyjnych główną konstrukcję można zaprojektować tak, aby zachowała stateczność w warunkach pożaru na tyle długo, by osoby przebywające w budynku mogły się ewakuować. Taka metoda uwzględnia intensywność oddziaływania pożaru przez odpowiednie oszacowanie rzeczywistych obciążeń ogniowych i parametrów rozwoju pożaru, które można obliczyć w oparciu o działalność budynku.

Metoda oparta na właściwościach zapewnia elastyczność w wyborze rozwiązań technicznych w celu spełnienia celów zabezpieczenia przeciwpożarowego, ale zazwyczaj wymaga użycia zaawansowanych narzędzi projektowych. Inżynierowie i projektanci korzystający z zaawansowanych modeli obliczeniowych muszą być odpowiednio wyszkoleni w zakresie ich zastosowania i ograniczeń. Ponieważ inżynieria bezpieczeństwa pożarowego umożliwia wysoce efektywne projektowanie z niewielką nieprzydzieloną rezerwą nośności, wymagany jest doświadczony użytkownik, aby zapewnić, że zastosowano odpowiednie modele.

Tam gdzie krajowe przepisy przeciwpożarowe zezwalają na stosowanie metody opartej na właściwościach, organy regulacyjne mogą wymagać, aby projekt z uwagi na warunki pożarowe był sprawdzony przez osobę trzecią.

Właściwości pożarowe całej konstrukcji lub jej części są określane przez wykonanie — w przypadku danego obliczeniowego scenariusza pożaru — trzech kolejnych kroków inżynierii pożarowej konstrukcji^[1].

- Analiza pożaru. Do obliczania oddziaływań termicznych/poddania działaniu termicznemu — modele pożaru.
- Analiza termiczna. Do określenia szybkości ogrzewania i temperatur elementów konstrukcyjnych — modele termiczne.
- Analiza konstrukcyjna. Do obliczania odpowiedzi mechanicznej elementów konstrukcyjnych — modele konstrukcyjne.

Dostępne metody projektowe do oszacowania właściwości pożarowych konstrukcji pokrótce opisano poniżej. Metody te obejmują zakres od prostych obliczeń wykonywanych ręcznie, do korzystania z zaawansowanych modeli komputerowych. Ogólna złożoność projektu związanego z bezpieczeństwem pożarowym zależy od założeń i metod przyjętych do przewidywania każdego z trzech etapów projektowania.

3.2 Analiza pożaru

Głównym celem modelowania pożaru jest symulacja rozwoju pożaru i przewidywanie oddziaływań termicznych (temperatury gazu, strumienia ciepła) na elementy konstrukcyjne (w celu określenia, w następnym etapie, temperatury w elementach konstrukcyjnych).

Chociaż powszechną praktyką jest przedstawianie pożaru za pomocą krzywej pożaru standardowego, projektowanie z uwagi na warunki pożarowe może opierać się na pożarze projektowym, który zapewnia bardziej realistyczne warunki w strefie pożarowej. W ten sposób uwzględnia się parametry takie jak wielkość obciążenia ogniowego, prędkość wydzielania ciepła i współczynnik wentylacji, które odgrywają ważną rolę pod względem intensywności pożaru. Ponadto określenie odpowiednich i realistycznych obliczeniowych scenariuszy pożaru jest kluczowym aspektem projektu uwzględniającego zabezpieczenie przeciwpożarowe. Obliczeniowe scenariusze pożaru wykorzystywane do analizy pożaru budynku należy wyprowadzić na podstawie wszystkich możliwych scenariuszy pożaru. W większości budynków liczba możliwych scenariuszy pożaru jest nieskończona i należy ją ograniczyć. Opracowania będą wymagać tylko scenariusze „wiarygodnego najgorszego przypadku” pożaru. Gdy obliczeniowe scenariusze pożaru są wybrane, dostępnych jest wiele modeli pożaru do oceny intensywności pożaru i obliczenia odpowiadających im oddziaływań termicznych.

Różne poziomy modeli pożaru odpowiadają różnym etapom jego rozwoju. Kiedy zostaje zainicjowany pożar, jest on zlokalizowany w strefie pożarowej i zależnie od właściwości tej strefy i obciążenia ogniowego może on pozostać pożarem lokalnym lub rozszerzyć się na całą strefę pożarową. W przypadku małych stref pożarowych lub stref pożarowych, w których otwory wentylacyjne są małe w stosunku do wielkości strefy, pożar rozszerza się do pożaru w pełni rozwiniętego.

Dostępne są trzy poziomy modelowania do opisanie pożarów lokalnych i w pełni rozwiniętych, jak pokazano w tabeli 3.1.

Tabela 3.1 Poziomy modeli pożaru

Poziomy modelu	Pożar lokalny	Pożar rozwinięty
Model uproszczony	Model Hasemi'ego Model Heskestada	Požary o modelu parametrycznym
Modele strefowe	Model dwustrefowy	Model jednostrefowy
Model pola	CFD	CFD

Modele uproszczone są zazwyczaj modelami empirycznymi opartymi na założeniach konwencjonalnych. Modele strefowe uwzględniają główne parametry kontrolujące pożar, ale wprowadzają uproszczone założenia, które ograniczają zakres zastosowań. Miałyby one zastosowanie w prostych, łatwych do wyznaczenia geometriach strefy pożarowej. Modele pól są dokładniejsze, ale są one dość skomplikowane do wykorzystania jako ogólne narzędzie projektowe. Byłyby one wymagane w strefach pożarowych o złożonej geometrii lub w których sufity są wysokie i nieregularne.

Warunki stosowania omówiono pokrótce w rozdziale 6.

3.3 Analiza wymiany ciepła

Gdy obliczone są oddziaływania termiczne, należy obliczyć przewodnictwo termiczne do elementów konstrukcyjnych. Modele termiczne, które zostaną wykorzystane, powinny opierać się na uznanych zasadach i założeniach teorii wymiany ciepła.

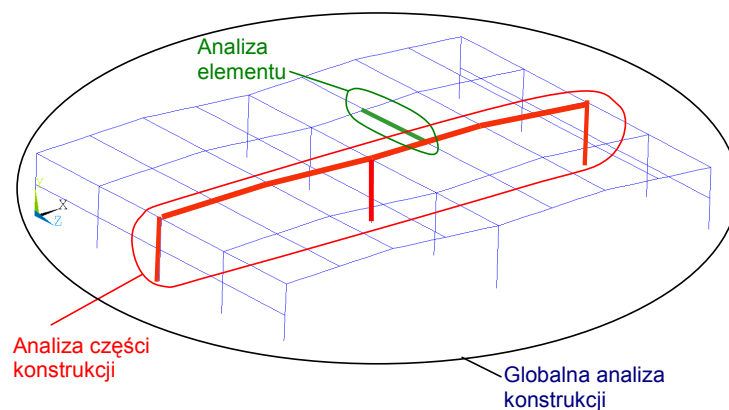
Można wykorzystać różne rodzaje modelowania w zależności od założeń i wymagań. W modelach termicznych zastosowano reguły analityczne umożliwiające uzyskanie szacunkowej jednolitej temperatury w przekroju poprzecznym, głównie w przypadku elementów stalowych. Istnieją również zaawansowane metody obliczeniowe oparte na metodzie elementów skończonych lub różnic skończonych, umożliwiające określenie dwu- lub trójwymiarowego rozkładu temperatury w elementach konstrukcyjnych (w przekroju poprzecznym i wzdłuż elementu). Modele zaawansowane można stosować do analizy każdego rodzaju elementu konstrukcyjnego przy projektowaniu z uwagi na warunki pożarowe.

Modele termiczne zostaną pokrótce omówione w następnych rozdziałach.

3.4 Analiza konstrukcyjna

Na podstawie uzyskanych wcześniej pól temperatury w elementach konstrukcyjnych oraz kombinacji obciążeń oddziaływań mechanicznych w warunkach pożarku można ocenić zachowanie konstrukcji za pomocą jednej z trzech możliwych metod:

- Analiza elementu, w której każdy element konstrukcji zostaje oceniony przez rozpatrzenie go w całkowitym oddzieleniu od innych elementów. Warunek połączenia z innymi elementami zostaje zastąpiony przez odpowiednie warunki brzegowe.
- Analiza części konstrukcji, w której część konstrukcji będzie bezpośrednio uwzględniona w ocenie przez zastosowanie odpowiednich warunków brzegowych, aby odzwierciedlić jej powiązania z innymi częściami konstrukcji.
- Globalna analiza konstrukcji, w której cała konstrukcja będzie zastosowana w ocenie.



Rysunek 3.1 Różne metody projektowe do określania odpowiedzi mechanicznej konstrukcji w warunkach pożaru

Analiza elementu jest łatwa w zastosowaniu, zwłaszcza z uproszczonymi metodami obliczeniowymi, i w związku z tym w dużej mierze wykorzystywana w warunkach pożaru standardowego. Analiza całej konstrukcji lub jej podzespołów uwzględnia łącznie co najmniej kilka elementów konstrukcyjnych, tak aby wpływ interakcji między nimi był potraktowany bezpośrednio. W ten sposób przeniesienie obciążenia z podgrzanych części (osłabionych części wewnątrz strefy pożarowej) na części chłodne (bardziej wytrzymałe części poza strefą pożarową) może być w dokładny sposób uwzględnione i z tego względu analiza globalna umożliwia znacznie lepsze zrozumienie ogólnego zachowania konstrukcji w warunkach pożaru.

Zgodnie z Eurokodami do oceny właściwości mechanicznych konstrukcji w warunkach pożaru można zastosować trzy rodzaje metod obliczeniowych w przypadku różnych metod projektowania opisanych powyżej. Projekt uwzględniający warunki pożarowe można wykonać za pomocą:

- Prostej metody obliczeniowej opartej na predefiniowanych danych tabelarycznych według normy EN 1994-1-2^[3]. Metoda ta ma zastosowanie jedynie w przypadku stalowo-betonowych konstrukcji zespolonych. Tabele zostały wyznaczone za pomocą modeli numerycznych i doświadczeń z uwzględnieniem: podstawowych rodzajów konstrukcji, takich jak płyty, belki i słupy, pewnego czasu ognioodporności, ogrzewania według krzywej pożaru nominalnego oraz określonego poziomu obciążenia. Tabele są proste i bezpieczne w zastosowaniu, ale obejmują tylko ograniczony zakres rodzajów kształtowników.
- Proste modele obliczeniowe. Ten rodzaj metody obliczeniowej można podzielić na dwie różne grupy. Pierwsza to metoda temperatury krytycznej powszechnie stosowana w analizie stalowych elementów konstrukcyjnych. Druga to użycie prostych modeli mechanicznych (weryfikacja w zakresie wytrzymałości) opracowanych w celu analizy zarówno stalowych, jak i zespolonych elementów konstrukcyjnych. Modele opracowano z uwzględnieniem standardowych elementów konstrukcyjnych, np. płyt, belek i słupów.
- Zaawansowane modele obliczeniowe. Ten rodzaj metody obliczeniowej może być stosowany w przypadku wszystkich rodzajów konstrukcji, a modele są na ogół oparte na metodzie elementów skończonych lub metodzie różnic skończonych. Powinny one zapewnić realistyczną analizę konstrukcji. Wyniki analizy są zazwyczaj uzyskiwane w postaci odkształceń konstrukcji podczas całego okresu pożaru.

Modele konstrukcyjne zostaną pokrótce omówione w następnych rozdziałach.

4 WSKAZÓWKI DOTYCZĄCE ODPOWIEDNIEGO ROZWIĄZANIA INŻYNIERII POŻAROWEJ

4.1 Zakres zastosowań różnych metod obliczeniowych

Poniższa tabela przedstawia zakres zastosowań dostępnych metod projektowania z uwagi na warunki pożarowe, uwzględniając projektowanie zgodnie z wymaganiami tradycyjnymi opartymi na pożarze standardowym lub projektowanie oparte na właściwościach^[11].

Tabela 4.1 Zakres zastosowań różnych metod obliczeniowych

Metoda	Narzędzia	Oddziaływania termiczne	Modelowanie termiczne	Modelowanie konstrukcyjne
Metoda tradycyjna (projektowanie w oparciu o pożar standardowy)	Gotowe dane pochodzące ze standardowych badań ogniowych (dane pochodzące od producentów)	Standardowa krzywa ISO EN 1991-1-2		
	Dane tabelaryczne pochodzące z normy EN 1994-1-2		EN 1994-1-2, § 4.2	
	Uproszczone modele obliczeniowe podane w Eurokodach		Stal EN 1993-1-2, § 4.2.5	Stal EN 1993-1-2, § 4.2.3 i § 4.2.4
			Elementy zespolone EN 1994-1-2, § 4.3	
			Stalowe i zespolone	
	Zaawansowane modele obliczeniowe		MES* lub MRS**	MES*
Metoda oparta na właściwościach (projektowanie w oparciu o pożar naturalny)	Uproszczone modele obliczeniowe	Pożar w pełni rozwinięty (pożar o modelu parametrycznym, standardowa krzywa ISO***) Pożar lokalny	Stal EN 1993-1-2, § 4.2.5	Stal EN 1993-1-2 §4.2.3 §4.2.4 Reguły szczegółowe oparte na pożarze w pełni rozwiniętym, § 5.4
		Zaawansowane modele obliczeniowe	Modele strefowe Modele pól	Stalowe i zespolone
	MES* lub MRS**		MES*	

*MES: Metoda Elementów Skończonych **MRS: Metoda Różnic Skończonych

*** Zniszczenie budynków jednokondygnacyjnych następuje zazwyczaj, gdy konstrukcja budynku (jej część lub cała konstrukcja) jest w pełni objęta pożarem. W takich warunkach pożarowych, ponieważ wzrost temperatury gazu nie ma znaczącego wpływu na model zniszczenia konstrukcji budynku, metoda oparta na właściwościach odnosząca się do oddziaływań termicznych opartych na standardowej krzywej pożaru jest odpowiednia w celu zbadania zachowania budynków jednokondygnacyjnych w warunkach pożaru. Metodę tę można wykorzystać do zobrazowania zniszczenia niepostępującego i zniszczenia wewnątrz konstrukcji budynku.

4.2 Wybór optymalnej metody projektowania

Wybór metody projektowania zależy od rodzaju budynku (budynek magazynowy, przemysłowy, handlowy itp.), od wymagań określonych w odpowiednich krajowych przepisach przeciwpożarowych oraz od tego, czy organy nadzorujące dopuszczają stosowanie metody opartej na właściwościach jako alternatywę dla zasad normatywnych.

Poniżej podano kilka propozycji wyboru metody projektowania z uwagi na warunki pożarowe.

Za względu na różnorodność wymagań najistotniejszym pierwszym krokiem jest podanie odpowiedzi na następujące pytania:

- Jaki jest wymagany poziom ognioodporności, jeśli jakiś występuje?
- Czy jest możliwe przeprowadzenie metody opartej na właściwościach?

Gdy ma być zastosowana metoda tradycyjna (w odniesieniu do projektowania w oparciu o pożar standardowy):

- Tam gdzie wymagany jest niski poziom ognioodporności (R15 lub R30) elementów konstrukcyjnych, może być właściwe korzystanie z uproszczonych modeli obliczeniowych.
- Zaawansowane modele obliczeniowe należy stosować tam, gdzie elementy konstrukcyjne nie są uwzględnione w uproszczonych modelach obliczeniowych. Można je również stosować z pewną korzyścią ekonomiczną w przypadku konstrukcji stalowych tam, gdzie wymagane są wysokie poziomy ognioodporności (wyższe niż R60), zmniejszając grubość ochrony przeciwpożarowej na stalowych elementach konstrukcyjnych.

Tam gdzie organy nadzorujące dopuszczają stosowanie metody opartej na właściwościach i gdzie wymagana jest stateczność konstrukcji:

- Metoda oparta na właściwościach może być najbardziej korzystna tam, gdzie konstrukcja jest nietypowa i może być niewystarczająco uwzględniona przez metody tradycyjne.
- Może być wymagana miejscowa ochrona przeciwpożarowa uwzględniająca ogólne zachowanie całej konstrukcji w warunkach rzeczywistego pożaru, aby zapewnić odpowiednie bezpieczeństwo osobom przebywających w budynku i strażakom.

Krajowe przepisy przeciwpożarowe mogą wymagać stosowania metody opartej na właściwościach w przypadku budynków jednokondygnacyjnych o wysokich zagrożeniach pożarowych (dużych obciążeniach ogniowych).

Krajowe przepisy przeciwpożarowe mogą zezwalać, aby projektowanie związane z bezpieczeństwem pożarowym oparte na właściwościach odwoływało się do prostych reguł i zaleceń projektowych dotyczących budynków jednokondygnacyjnych. Takie metody podano w § 5.4 i Załączniku A. Inne wskazówki i zalecenia projektowe można znaleźć w pozycji źródłowej^[12].

Metody czynnej ochrony przeciwpożarowej (wyposażenie w instalację tryskaczową, czujki pożarowe, sygnalizatory pożarowe i instalacje oddymiające) oraz metody biernej ochrony przeciwpożarowej (podział budynku na strefy pożarowe, ułatwienia ewakuacji itp.) są na ogół wdrażane w budynkach zgodnie z wymogami krajowych przepisów przeciwpożarowych.

5 BEZPOŚREDNIE ZASTOSOWANIE PROSTYCH OPCJI PROJEKTOWYCH DO STOSOWANIA PRZEZ OSOBY NIE BĘDĄCE SPECJALISTAMI

Niniejszy rozdział zawiera przegląd aktualnych, łatwych do zastosowania, „nieskomplikowanych” reguł obliczeniowych, służących do oceny ognioodporności stalowych i zespolonych stalowo-betonowych elementów konstrukcyjnych.

Podano szczegółowe proste zasady projektowania i zalecenia projektowe w celu spełnienia określonych wymagań bezpieczeństwa dotyczących zachowania konstrukcji, które zostały ostatnio wprowadzone w przepisach przeciwpożarowych odnoszących się do jednokondygnacyjnych budynków magazynowych i przemysłowych w wielu krajach europejskich. Odnotowano, że metody te mają zastosowanie także do innych rodzajów budynków jednokondygnacyjnych.

5.1 Modele pożaru

5.1.1 Nominalne krzywe zależności temperatury od czasu

W normie EN 1991-1-2^[1] podano trzy standardowe krzywe pożaru definiujące zależności między temperaturą dowolnego gorącego gazu a czasem, nie uwzględniające żadnych parametrów fizycznych obciążenia ogniowego ani strefy pożarowej. Zależnością najpowszechniej wykorzystywaną przy projektowaniu budynków i w przepisach regulacyjnych jest standardowa krzywa zmian temperatury w czasie (*pożar standardowy ISO*), która reprezentuje pożar w pełni rozwinięty w strefie pożarowej. Druga krzywa, będąca krzywą pożaru zewnętrznego, odnosi się do elementów elewacji, a trzecia krzywa jest krzywą węglowodorową pożaru reprezentującą pożar o węglowodorowym lub płynnym rodzaju paliwa.

Nominalne krzywe zależności temperatury od czasu zdefiniowano w następujący sposób:

- w przypadku standardowej krzywej zależności temperatury od czasu (*pożar standardowy ISO*):

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

- w przypadku krzywej pożaru zewnętrznego:

$$\theta_g = 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) + 20 \quad (2)$$

- w przypadku krzywej pożaru węglowodorowego:

$$\theta_g = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20 \quad (3)$$

gdzie:

θ_g jest temperaturą gazu w strefie pożarowej [°C],

t jest czasem [min].

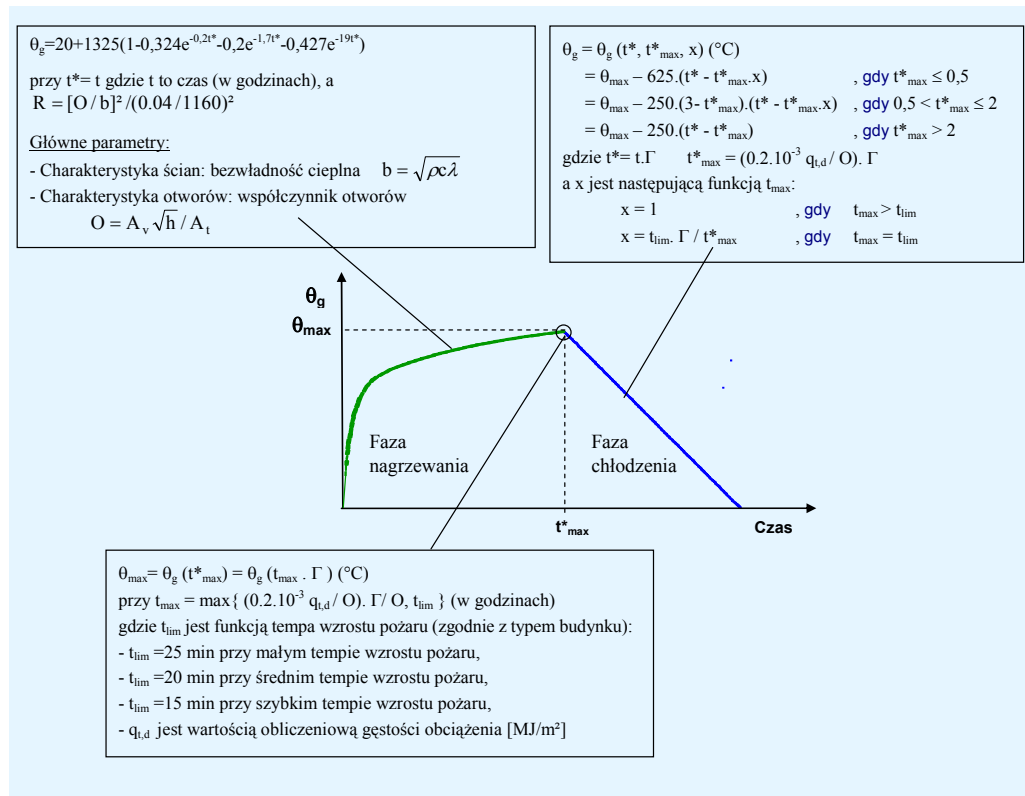
Ważne jest, aby pamiętać, że wyżej wymienione krzywe to krzywe odniesienia. Nie reprezentują one rzeczywistego wpływu termicznego pożaru. Temperatury wskazane przez te krzywe zawsze wzrastają w czasie, a ograniczone obciążenie ogniowe nie jest uwzględniane. Standardowy poziom ognioodporności wymagany w przypadku elementów konstrukcyjnych (wyrażony w formie czasu) nie wskazuje zatem rzeczywistego czasu, przez jaki przetrwają one w pożarze budynku.

5.1.2 Pożary o modelu parametrycznym

Modele parametryczne pożarów zapewniają dość prostą metodę projektową służącą do oszacowania temperatury gazu w strefie pożarowej, uwzględniając w uproszczony sposób główne parametry mające wpływ na rozwój pożaru, takie jak wielkość strefy pożarowej, obciążenie ogniowe (odpowiadające masie palnych materiałów w strefie pożarowej), warunki wentylacji (otwory) i właściwości termiczne (takie jak przewodność cieplna i ciepło właściwe) ścian i sufitów strefy pożarowej.

Podobnie jak nominalne krzywe zależności temperatury od czasu, parametryczne krzywe zależności temperatury od czasu podają zależności między temperaturą gazu a czasem do celów projektowania. Opierają się one na założeniu, że temperatura w strefie pożarowej jest jednolita, co ogranicza ich zakres zastosowania do pożarów po osiągnięciu punktu rozgorzenia (pożarów obejmujących całą strefę pożarową) w strefach pożarowych o racjonalnych wymiarach. Przewidywana krzywa pożaru obejmuje fazę nagrzewania reprezentowaną przez krzywą wykładniczą aż do temperatury maksymalnej, po której następuje malejąca liniowo faza chłodzenia aż do temperatury minimalnej, która jest zazwyczaj temperaturą otoczenia. Temperatura maksymalna i odpowiadający jej czas trwania pożaru to dwa główne parametry wpływające na zachowanie elementów konstrukcyjnych w warunkach pożaru. W rezultacie zostały one przyjęte we wzorach obliczeniowych pożarów o modelu parametrycznym jako parametry decydujące.

Taki model przedstawiono w Załączniku A do normy EN 1991-1-2. Ma on zastosowanie w przypadku stref pożarowych o powierzchni podłogi do 500 m², bez otworów w dachu i o maksymalnej wysokości strefy 4 m, w przypadku wykładzin strefy o bezwładności termicznej między 100 a 2200 J/m²s^{1/2}K, współczynnika otworów w zakresie od 0,02 do 0,20 oraz stref pożarowych o obciążeniu ogniowym głównie typu celulozowego. Ze względu na te ograniczenia model ma zastosowanie głównie do części biurowej budynków jednokondygnacyjnych.



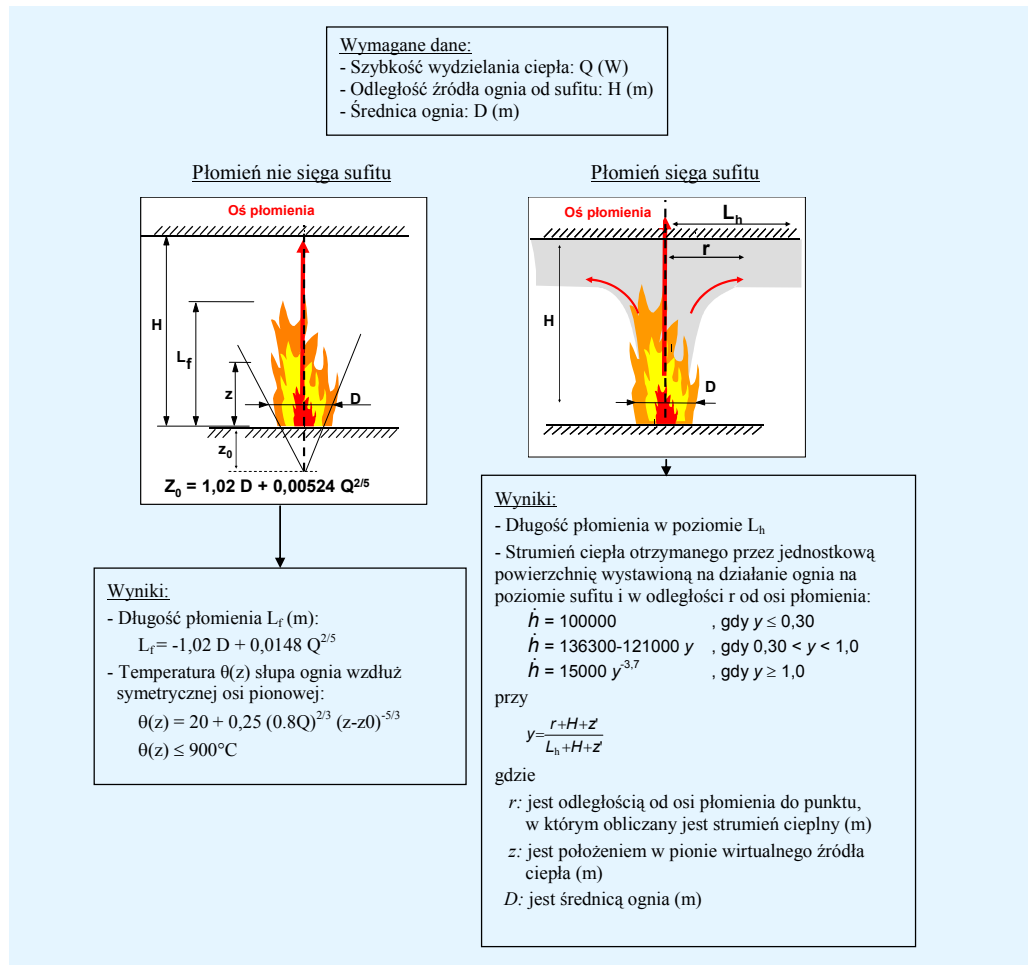
Rysunek 5.1 Pożar o modelu parametrycznym (Załącznik A do normy EN 1991-1-2)

Danymi wejściowymi krzywych pożaru o modelu parametrycznym są obliczeniowa gęstość obciążenia ogniowego, tempo wzrostu pożaru, warunki wentylacji (opisane za pomocą wielkości i położenia otworów) oraz właściwości termiczne (pojemność cieplna, gęstość i przewodność) ścian, służące do oszacowania strat ciepła wynikających z konwekcji i promieniowania na granicach strefy pożarowej. W przypadku gęstości obciążenia ogniowego powszechną praktyką podczas projektowania jest odwołanie się do wartości charakterystycznych podanych w normie EN 1991-1-2.

Chociaż te krzywe pożaru o modelu parametrycznym oferują znaczącą poprawę w porównaniu do standardowego „pożaru ISO”, nadal nie ma możliwości dokładnej oceny intensywności pożaru na podstawie pożarów o modelu parametrycznym. W rezultacie w niektórych krajach europejskich wykorzystywanie ich zalecane jest jedynie do obliczeń podczas projektowania wstępnego.

5.1.3 Pożar lokalny

W Załączniku C do normy EN 1991-1-2 podano proste sposoby wyznaczania oddziaływań termicznych pożarów lokalnych. Rozróżnia się dwie następujące sytuacje stosownie do wysokości płomienia względem sufitu strefy pożarowej: gdy płomień nie sięga sufitu (w oparciu o metodę Heskestada) oraz gdy płomień sięga sufitu (w oparciu o metodę Hasemi'ego).



Rysunek 5.2 Pożary lokalne (Załącznik C do normy EN 1991-1-2)

W przypadku sytuacji, gdy ogień nie sięga sufitu, podano wzór do obliczenia temperatury słupa ognia na wysokościach wzdłuż osi pionowej płomienia. W przypadku sytuacji, gdy ogień sięga sufitu, podano kilka prostych kroków w celu obliczenia strumienia ciepła otrzymanego przez powierzchnie poddane działaniu ognia na poziomie sufitu.

Modeli tych używa się najczęściej do obliczenia oddziaływań termicznych (wyrażonych jako strumień ciepła wynikający z promieniowania i konwekcji) na poziome elementy konstrukcyjne, takie jak belki. W chwili obecnej nie ma dostępnej metody w przypadku pionowych elementów stalowych objętych pożarem lokalnym.

Danymi wejściowymi są szybkość wydzielania ciepła (RHR), odległość między źródłem ognia a sufitem oraz średnica pożaru. Szybkość wydzielania ciepła na ogół wyznacza się przy użyciu normy EN 1991-1-2, rozdział E.4.

Metody te dotyczą jedynie przypadków, w których średnica pożaru D jest mniejsza niż 10 m, a szybkość wydzielania ciepła przez ogień Q jest mniejsza niż 50 MW.

5.2 Modele termiczne

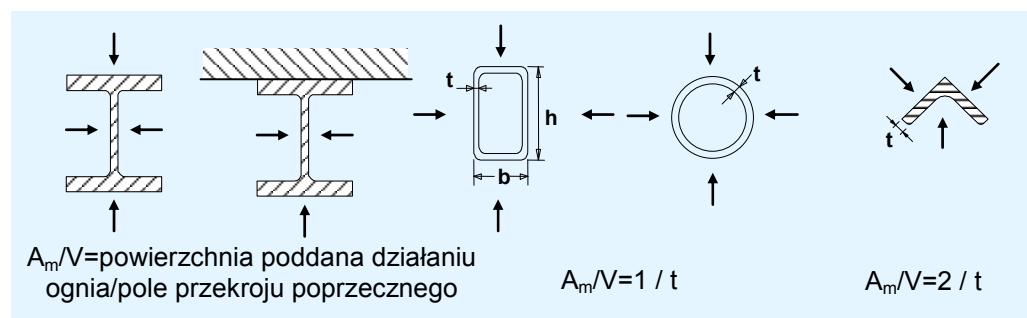
Biorąc pod uwagę wysoką przewodność cieplną stali i małą grubość kształtowników stalowych powszechnie używanych w budownictwie, pominięcie gradientów temperatury w przekrojach poprzecznych elementów konstrukcyjnych i założenie jednolitej temperatury przy jednolitym nagrzewaniu jest wystarczająco dokładne.

W rezultacie można używać prostych zależności obliczeniowych, aby przewidzieć temperaturę elementów stalowych w całości poddanych działaniu ognia lub elementów stalowych podtrzymujących płytę betonową i poddanych działaniu ognia z trzech stron. Istnieją podobne reguły dotyczące kształtowników stalowych zabezpieczonych przeciwogniowo, choć proponowany materiał ochronny musi charakteryzować się takimi parametrami termicznymi, których uzyskanie może być trudne.

W przypadku elementów zespolonych stalowo-betonowych, ściśle rzecz biorąc, nie ma uproszczonych modeli do oceny zmiany rozkładu temperatury w elementach w funkcji czasu. Aby uprościć projektowanie, w normie EN 1994-1-2 podano informacje na temat rozkładu temperatury w określonym czasie oddziaływania pożaru standardowego (tj. 30, 60, 90 i 120 minut).

5.2.1 Niezabezpieczony element stalowy

Nagrzewanie niezabezpieczonych elementów stalowych można wyznaczyć za pomocą prostej metody analitycznej podanej w normie EN1993-1-2. W metodzie tej wzrost temperatury zależy od oddziaływań termicznych (wyrażonych w postaci strumieni ciepła netto), właściwości termicznych stali oraz współczynnika przekroju elementu A_m/V zdefiniowanego jako stosunek powierzchni poddanej działaniu strumienia ciepła A_m [m²/m] do objętości elementu na jednostkę długości V [m³/m]. Współczynniki przekroju kilku niezabezpieczonych elementów stalowych pokazano na rysunku 5.3.



Rysunek 5.3 Przykład współczynnika przekroju niezabezpieczonych elementów stalowych

Zakładając równoważny jednolity rozkład temperatury w przekroju poprzecznym, wzrost temperatury $\Delta\theta_{a,t}$ w niezabezpieczonym elemencie stalowym w przedziale czasu Δt można wyznaczyć z następującej zależności:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net,d} \Delta t \quad \text{przy } \Delta t \leq 5 \text{ s} \quad (4)$$

gdzie:

- k_{sh} jest współczynnikiem korekcyjnym efektu cienia spowodowanego miejscowym ekranowaniem ruchu ciepła przez promieniowanie, wynikającym z kształtu profilu stalowego,
- C_a jest ciepłem właściwym stali [J/kgK],
- ρ_a jest masą jednostkową stali [kg/m³],
- $\dot{h}_{net,d}$ jest strumieniem ciepła netto na jednostkę pola powierzchni [W/m²].

Rozwiązanie równania przyrostowego krok po kroku pozwala uzyskać rozwój temperatury elementu stalowego podczas pożaru. W celu zapewnienia zbieżności numerycznej rozwiązania należy przyjąć pewną górną granicę dla przyrostu czasu Δt . W normie EN 1993-1-2 zaleca się, aby przyjęta wartość Δt nie była większa niż 5 sekund.

Oddziaływania termiczne wyznacza się za pomocą strumienia ciepła netto $\dot{h}_{net,r}$ pochłanianego przez element stalowy podczas oddziaływania pożaru. Jest on wyrażony w postaci temperatury gorącego gazu jako suma dwóch odrębnych strumieni: składowej konwekcyjnej $\dot{h}_{net,c}$ i składowej radiacyjnej $\dot{h}_{net,r}$.

Konwekcyjny strumień ciepła jest wyrażany jako:

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m) \quad (5)$$

gdzie:

- α_c jest współczynnikiem wymiany ciepła przez konwekcję [W/m²K],
- θ_g jest temperaturą gazu [°C],
- θ_m jest temperaturą powierzchni elementu [°C].

Radiacyjny strumień ciepła wyraża się zależnością:

$$\dot{h}_{net,r} = \phi \sigma_0 \varepsilon_m ((\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4) \quad (6)$$

gdzie:

- ϕ jest współczynnikiem konfiguracji uwzględniającym wpływ położenia i kształtu (<1),
- ε_m jest emisyjnością powierzchni elementu,
- θ_r jest temperaturą promieniowania środowiska pożaru [°C] ($\theta_r \approx \theta_g$),
- θ_m jest temperaturą powierzchni elementu [°C],
- σ_0 jest stałą Stefana-Boltzmannna [= 5,67 x 10⁻⁸ W/m² K⁴].

Zgodnie z normą EN 1991-1-2 w wielu przypadkach praktycznych współczynnik konfiguracji można przyjąć jako równy jedności. Współczynnik konwekcji (α_c) waha się od 25 W/m²K (warunki pożaru standardowego) do 50 W/m²K (warunki pożaru węglowodorowego). Emisyjność elementów ze stali węglowej i elementów zespolonych stalowo-betonowych można przyjąć jako $\varepsilon_m = 0,7$.

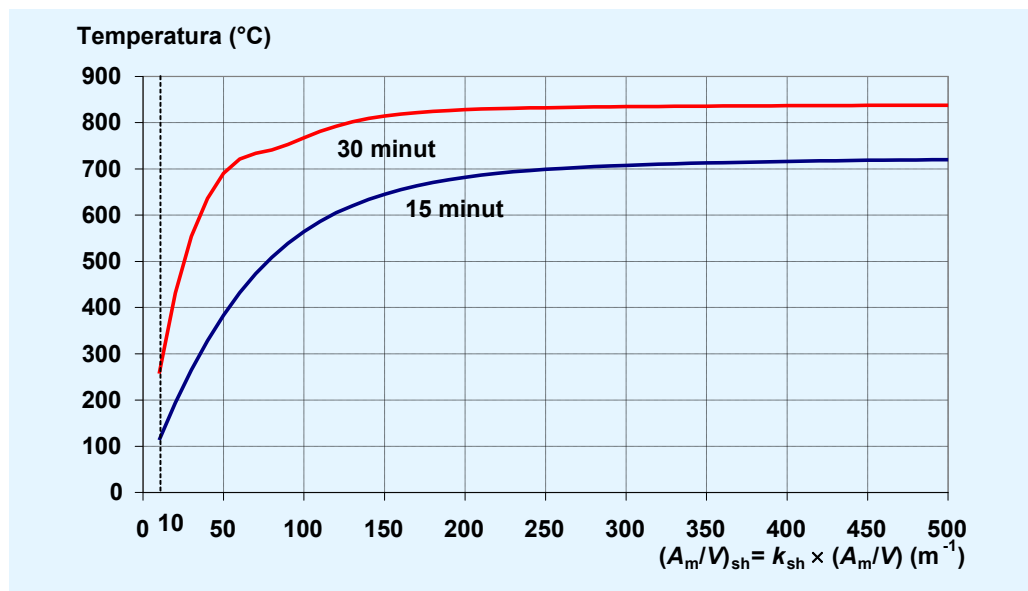
W przypadku przekrojów o kształcie wypukłym, takich jak zamknięte kształtowniki stalowe, w pełni objętych pożarem efekt cienia nie odgrywa żadnej roli i można przyjąć, że współczynnik $k_{sh} = 1$. W innym wypadku współczynnik korekcyjny efektów cienia k_{sh} wyraża się zależnością:

$$k_{sh} = \begin{cases} \frac{0,9[A_m/V]_b}{A_m/V} & \text{w przypadku dwuteowników poddanych} \\ & \text{oddziaływaniu pożaru nominalnego,} \\ \frac{[A_m/V]_b}{A_m/V} & \text{w pozostałych przypadkach,} \end{cases} \quad (7)$$

gdzie:

$[A_m/V]_b$ jest wartością współczynnika przekroju skrzynkowego [m⁻¹].

Zastosowanie metody obliczeniowej podanej w normie EN 1993-1-2 z czasem działania standardowego pożaru ISO wynoszącym 15 i 30 minut prowadzi do uzyskania krzywych temperatur przedstawionych na rysunku 5.4 i podanych w tabeli 5.1 jako funkcja współczynnika przekroju uwzględniającego efekt cienia $(A_m/V)_{sh} = k_{sh} A_m/V$.



Rysunek 5.4 Temperatura niezabezpieczonych elementów stalowych po 15 i 30 minutach oddziaływania pożaru standardowego ISO

Tabela 5.1 Temperatura niezabezpieczonych elementów stalowych po 15 i 30 minutach oddziaływania pożaru standardowego ISO

Współczynnik przekroju (A_m/V) _{sh}	Temperatura stali (°C)		Współczynnik przekroju (A_m/V) _{sh}	Temperatura stali (°C)	
	15 min	30 min		15 min	30 min
10	113	257	130	621	802
20	194	431	140	634	809
30	265	554	150	646	815
40	328	636	160	655	819
50	383	690	170	664	822
60	432	721	180	671	825
70	473	734	190	677	827
80	509	741	200	682	828
90	539	753	250	699	833
100	565	767	300	708	835
110	586	781	400	716	837
120	605	792	500	720	838

5.2.2 Zabezpieczony element stalowy

W normie EN 1993-1-2 podano również prostą metodę obliczeniową dotyczącą elementów izolowanych za pomocą materiałów biernej ochrony przeciwpożarowej. W takich przypadkach wzrost temperatury zależy od współczynnika przekroju A_p/V elementu stalowego izolowanego za pomocą materiału ogniochronnego (A_p jest odpowiednią powierzchnią materiału ogniochronnego na jednostkę długości, a V jest objętością elementu stalowego na jednostkę długości) oraz od charakterystyki izolacji. Materiały izolacyjne mogą mieć formę układów profilowanych lub skrzynkowych, ale ta prosta metoda nie obejmuje przeciwogniowych powłok ochronnych. Zakładając jednolity rozkład temperatury, wzrost temperatury $\Delta\theta_{a,t}$ w izolowanym elemencie stalowym w przedziale czasu Δt można wyznaczyć z następującej zależności:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p / d_p}{c_a \rho_a} \frac{A_p}{V} \left(\frac{1}{1 + \phi/3} \right) (\theta_{g,t} - \theta_{a,t}) \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \quad (8)$$

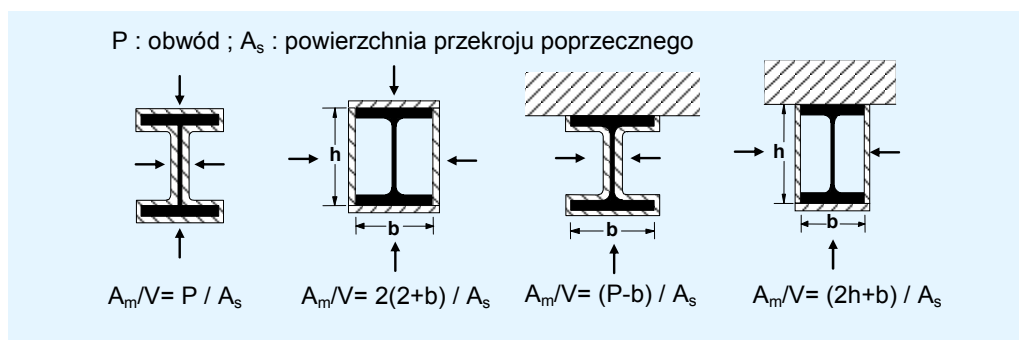
przy

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p \frac{A_p}{V} \quad (9)$$

gdzie:

- d_p jest grubością warstwy materiału ogniochronnego [m],
- C_p jest ciepłem właściwym materiału ogniochronnego [J/kgK],
- λ_p jest przewodnością cieplną materiału ogniochronnego [W/mK],
- ρ_p jest masą jednostkową materiału ogniochronnego [kg/m³],
- θ_g jest temperaturą gazu [°C].

Na rysunku 5.5 podano zależności służące do obliczenia współczynnika przekroju zabezpieczonych elementów stalowych.



Rysunek 5.5 Przykład współczynnika przekroju izolowanych elementów stalowych

Należy zauważyć, że charakterystykę termiczną materiałów ogniochronnych na ogół wyznacza się na podstawie badań ogniowych prowadzonych w warunkach pożaru standardowego. W rezultacie odnosząc się do oddziaływań termicznych opartych na pożarach naturalnych, należy z pewną ostrożnością stosować równanie (8) w obliczeniowej sytuacji pożarowej zabezpieczonych elementów stalowych. Obliczenia można wykonać tylko wtedy, gdy dostępne są odpowiednie dane lub gdy można wykazać, że warunki pożaru nie mają znaczącego wpływu na charakterystykę termiczną ani na odporność materiałów ogniochronnych na zniszczenie. Niemniej jednak powszechnie przyjmuje się, że właściwości termiczne materiału izolacyjnego można wykorzystać w warunkach pożaru naturalnego, gdy temperatury gorących gazów pozostają niższe niż maksymalna temperatura osiągana podczas standardowych badań ogniowych materiału izolacyjnego (na przykład około 1100°C w przypadku 4-godzinnej standardowej krzywej zależności temperatury od czasu).

Właściwości materiałowe podane w tabeli 5.2 można wykorzystać jako pierwsze przybliżenie w celu obliczenia nagrzewania zabezpieczonych elementów stalowych. Te wartości średnie pochodzą z badań ogniowych przeprowadzanych przez producentów materiałów.

Tabela 5.2 Uśrednione właściwości materiałowe podstawowych materiałów ogniochronnych

Materiał		Gęstość ρ_p [kg/m ³]	Przewodność λ_p [W/mK]	Ciepło właściwe C_p [J/kgK]
Powłoki natryskowe	włókno mineralne	300	0,12	1200
	vermikulit i cement	350	0,12	1200
	perlit	350	0,12	1200
Powłoki natryskowe o dużej gęstości	vermikulit (lub perlit) i cement	550	0,12	1100
	vermikulit (lub perlit) i gips	650	0,12	1100
Płyty	vermikulit (lub perlit) i cement	800	0,2	1200
	włókna krzemianowe lub włókna krzemianu wapnia	600	0,15	1200
	cement włóknisty	800	0,15	1200
	płyta gipsowa	800	0,2	1700
Płyty z włókien prasowanych	włókna krzemianowe, mineralne, wełna skalna	150	0,2	1200

5.3 Modele konstrukcyjne

Zgodnie z Eurokodami do oceny ognioodporności konstrukcji w warunkach pożaru można użyć kilku prostych metod obliczeniowych. Pierwszą jest metoda temperatury krytycznej stosowana powszechnie w analizie stalowych elementów konstrukcyjnych, a druga to proste modele mechaniczne opracowane na potrzeby analizy zarówno stalowych, jak i zespolonych stalowo-betonowych elementów konstrukcyjnych.

Należy pamiętać, że metody obliczeniowe dostępne w przypadku elementów zespolonych mają zastosowanie tylko w warunkach pożaru standardowego. Ponadto metody obliczeniowe dotyczące słupów powinno się stosować tylko w odniesieniu do elementów ram stężonych (w których nie występuje przemieszczenie poziome zakończeń słupów).

5.3.1 Metoda temperatury krytycznej

Temperaturę krytyczną oblicza się, korzystając z przyłożonych oddziaływań mechanicznych, nośności obliczeniowej w warunkach temperatury normalnej oraz utraty wytrzymałości stali w podwyższonej temperaturze. Ta temperatura krytyczna na ogół waha się od 500°C do 800°C. Można ją wyznaczyć na drodze obliczeń zgodnie z prostymi zasadami podanych w normie EN 1993-1-2 lub odwołać się do wartości domyślnych.

Zgodnie z metodą temperatury krytycznej ognioodporność elementu stalowego bez efektu niestateczności jest zapewniona po czasie t , jeżeli temperatura stali $\theta_{a,t}$ nie przekracza temperatury krytycznej θ_{cr} elementu:

$$\theta_{a,t} \leq \theta_{cr} \quad (10)$$

Temperaturę krytyczną elementu można obliczyć na podstawie wskaźnika wykorzystania nośności μ_0 w następujący sposób:

$$\theta_{cr} = 39,19 \ln \left[\frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482 \quad (11)$$

Wskaźnik wykorzystania nośności μ_0 wyznacza się z zależności:

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} \quad (12)$$

gdzie:

- $E_{fi,d}$ to wpływ oddziaływań na konstrukcję w obliczeniowej sytuacji pożarowej według normy EN 1991-1-2,
- $R_{fi,d,0}$ to odpowiednia nośność obliczeniowa elementu stalowego w obliczeniowej sytuacji pożarowej w czasie $t = 0$ (w warunkach temperatury normalnej), ale ze współczynnikiem bezpieczeństwa $\gamma_{M,fi}$ w warunkach pożarowych.

Wyrażenia określającego temperaturę θ_{cr} można używać w przypadku wszystkich klas przekrojów, z wyjątkiem bardzo smukłych przekrojów klasy 4, dla których powinno się stosować zachowawczą temperaturę krytyczną 350°C.

W zasadzie zależność (11) odnosi się do elementów poddanych czystemu zginaniu, krótkich słupów bez wyboczenia oraz elementów poddawanych rozciąganiu, nagrzewanych równomiernie lub z nieznacznym gradientem temperatury. Jednak w sytuacjach niestateczności (smukłe słupy, belki nieutwierdzone) metoda będzie miała zastosowanie przez określenie nośności obliczeniowej w obliczeniowej sytuacji pożarowej w czasie $t = 0$ przy wartości smukłości uwzględniającej wpływ temperatury na smukłość elementów konstrukcyjnych. Dla uproszczenia smukłość w sytuacjach pożaru można przyjąć jako $\bar{\lambda}_\theta = 1,3\bar{\lambda}$ (gdzie $\bar{\lambda}$ jest smukłością względną w temperaturze normalnej).

Alternatywnie do równania (11) temperatury krytyczne mogą być określone na poziomie krajowym i wówczas podane w Załączniku krajowym do normy EN 1993-1-2.

W przypadku elementów poddawanych rozciąganiu i belek utwierdzonych (w których zwichrzenie nie jest potencjalnym modelem zniszczenia) można też stosować następującą prostą i zachowawczą zależność dla μ_0 :

$$\mu_0 = \eta_{fi,t} \frac{\gamma_{M,fi}}{\gamma_M} \kappa_1 \kappa_2 \quad (13)$$

gdzie:

- $\eta_{fi,t}$ jest poziomem obciążenia w czasie t ,
- $\gamma_{M,fi}$ jest odpowiednim współczynnikiem częściowym bezpieczeństwa w warunkach pożarowych ($\gamma_{M,fi} = 1$),
- γ_{M0} jest współczynnikiem częściowym bezpieczeństwa w warunkach temperatury normalnej ($\gamma_{M0} = 1$),
- κ_1, κ_2 to współczynniki przystosowania uwzględniające nierównomierny rozkład temperatury w elemencie stalowym.

Poziom obciążenia w czasie t jest określony wzorem:

$$\eta_{fi,t} = \frac{E_{fi,d}}{R_d} \quad (14)$$

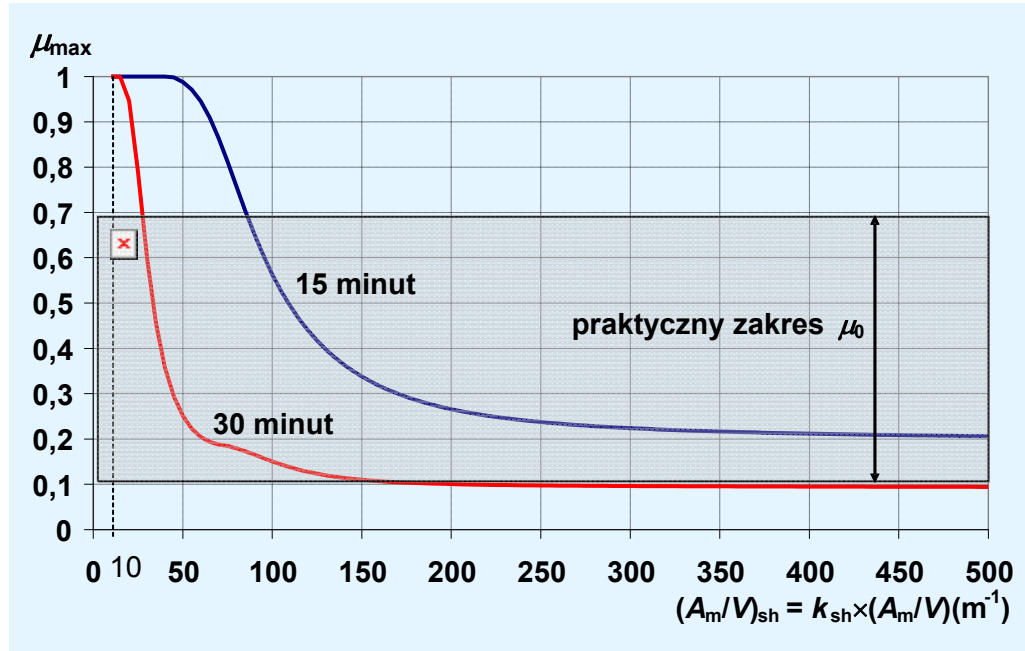
gdzie:

- $E_{fi,d}$ to wpływ oddziaływań na konstrukcję w obliczeniowej sytuacji pożarowej według normy EN 1991-1-2,
- R_d jest nośnością w warunkach temperatury normalnej.

Dla danego czasu trwania pożaru t , przyjmując że $\theta_{a,t} = \theta_{cr}$, wartość maksymalną poziomu wykorzystania nośności μ_0 niezabezpieczonych elementów stalowych zapewniającą wymaganą ognioodporność można łatwo obliczyć z zależności (11) jako funkcję współczynnika przekroju uwzględniającego efekt cienia $(A_m/V)_{sh}$. W ten sposób można przyjąć, że ognioodporność niezabezpieczonych elementów stalowych jest zapewniona po czasie t , jeżeli:

$$\mu_0 \leq \mu_{max} \quad (15)$$

Maksymalne wskaźniki wykorzystania nośności μ_{\max} obliczone dla standardowej ognioodporności R15 i R30 podano na rysunku 5.6. Należy zauważyć, że w przypadku ognioodporności R30 elementy niezabezpieczone o współczynniku przekroju $(A_m/V)_{\text{sh}}$ większym niż 50 m^{-1} mogą osiągać tylko bardzo małe wartości wskaźnika wykorzystania.



Rysunek 5.6 Maksymalny poziom wykorzystania nośności w funkcji współczynnika przekroju $(A_m/V)_{\text{sh}}$

5.3.2 Prosta metoda projektowania elementów stalowych

Zgodnie z normą EN 1993-1-2 należy przyjąć, że funkcja nośna elementu stalowego jest zachowana w czasie t , jeśli:

$$E_{\text{fi,d}} < R_{\text{d,fi,t}} \quad (16)$$

gdzie:

$E_{\text{fi,d}}$ jest wpływem oddziaływań na konstrukcję w obliczeniowej sytuacji pożarowej według normy EN 1991-1-2,

$R_{\text{d,fi,t}}$ jest odpowiednią nośnością obliczeniową elementu stalowego w obliczeniowej sytuacji pożarowej w czasie t .

Przedstawione poniżej uproszczone metody obliczeniowe umożliwiają projektantowi ocenę ognioodporności obliczeniowej (nośności na wyboczenie, nośności przy zginaniu) elementów stalowych. Opierają się one głównie na założeniu stałej temperatury wewnątrz kształtownika.

Słupy stalowe poddane wyłącznie ściskaniu

Nośność obliczeniową w przypadku obliczeniowej sytuacji pożarowej w czasie t elementu ściskanego o przekrojach poprzecznych klasy 1, 2 lub 3 w jednolitej temperaturze θ_a należy wyznaczyć z następującej zależności:

$$N_{fi,t,Rd} = \chi_{fi}(\bar{\lambda}_\theta) \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} k_{y,\theta} N_{Rd} \quad (17)$$

gdzie:

- $k_{y,\theta}$ jest współczynnikiem redukcyjnym granicy plastyczności stali przy temperaturze stali θ osiąganey w czasie t ,
- $\gamma_{M,fi}$ jest współczynnikiem częściowym bezpieczeństwa w warunkach pożarowych ($\gamma_{M,fi} = 1$),
- γ_{M0} jest współczynnikiem częściowym bezpieczeństwa w warunkach temperatury normalnej ($\gamma_{M0} = 1$),
- N_{Rd} jest nośnością obliczeniową przekroju poprzecznego $N_{pl,Rd}$ w warunkach temperatury normalnej według normy EN 1993-1-1,
- χ_{fi} jest współczynnikiem redukcyjnym wyboczenia giętnego w obliczeniowej sytuacji pożarowej.

Współczynnik redukcyjny χ_{fi} wyboczenia giętnego uzyskuje się ze smukłości względnej $\bar{\lambda}_\theta$ w temperaturze θ za pomocą następującego wyrażenia:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}}, \quad \text{ale} \quad \chi_{fi} \leq 1,0 \quad (18)$$

przy

$$\varphi_\theta = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_\theta + \bar{\lambda}_\theta^2 \right]$$

gdzie:

- α jest współczynnikiem niedoskonałości odpowiedniej krzywej wyboczeniowej wyrażonym zależnością $\alpha = 0.65 \sqrt{235 / f_y}$ przy czym f_y jest charakterystyczną granicą plastyczności stali.

Smukłość względna w temperaturze θ wyraża się zależnością:

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \sqrt{k_{y,\theta} / k_{E,\theta}} \quad (19)$$

gdzie:

- $k_{y,\theta}$ jest współczynnikiem redukcyjnym granicy plastyczności stali w temperaturze θ
- $k_{E,\theta}$ jest współczynnikiem redukcyjnym spadku zakresu liniowo-sprężystego w temperaturze θ
- $\bar{\lambda}$ jest smukłością względną w temperaturze normalnej według normy EN 1993-1-1.

Smukłość względna w temperaturze normalnej wyraża się zależnością:

$$\bar{\lambda} = \frac{\ell_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (20)$$

gdzie:

- ℓ_{cr} to długość wyboczeniowa w rozpatrywanej płaszczyźnie wyboczenia,
 i jest promieniem bezwładności względem odpowiedniej osi
 wyznaczonym za pomocą właściwości przekroju poprzecznego brutto.

W celu praktycznego zastosowania współczynnik redukcji χ_{fi} wyboczenia giętnego można obliczyć bezpośrednio w oparciu o wartości podane w tabeli 5.3, zgodnie z gatunkiem stali i smukłością względną elementu stalowego w temperaturze normalnej $\bar{\lambda}$. Wartości współczynnika redukcyjnego χ_{fi} w tabeli 5.3 obliczono, przyjmując smukłość w warunkach pożarowych równą $\bar{\lambda}_0 = 1,3\bar{\lambda}$. Do wyznaczenia wartości pośrednich względnej smukłości bezwymiarowej może być stosowana interpolacja liniowa.

Tabela 5.3 Wartości współczynnika redukcyjnego χ_{fi} w funkcji smukłości względnej w temperaturze normalnej $\bar{\lambda}$ i gatunku stali

$\bar{\lambda}$	Gatunek stali			$\bar{\lambda}$	Gatunek stali		
	S235	S275	S355		S235	S275	S355
0,2	0,8480	0,8577	0,8725	1,7	0,1520	0,1549	0,1594
0,3	0,7767	0,7897	0,8096	1,8	0,1381	0,1406	0,1445
0,4	0,7054	0,7204	0,7439	1,9	0,1260	0,1282	0,1315
0,5	0,6341	0,6500	0,6752	2	0,1153	0,1172	0,1202
0,6	0,5643	0,5800	0,6050	2,1	0,1060	0,1076	0,1102
0,7	0,4983	0,5127	0,5361	2,2	0,0977	0,0991	0,1014
0,8	0,4378	0,4506	0,4713	2,3	0,0903	0,0916	0,0936
0,9	0,3841	0,3951	0,4128	2,4	0,0837	0,0849	0,0866
1	0,3373	0,3466	0,3614	2,5	0,0778	0,0788	0,0804
1,1	0,2970	0,3048	0,3172	2,6	0,0725	0,0734	0,0749
1,2	0,2626	0,2691	0,2794	2,7	0,0677	0,0686	0,0699
1,3	0,2332	0,2387	0,2473	2,8	0,0634	0,0642	0,0653
1,4	0,2081	0,2127	0,2200	2,9	0,0595	0,0602	0,0612
1,5	0,1865	0,1905	0,1966	3	0,0559	0,0565	0,0575
1,6	0,1680	0,1714	0,1766				

Belki stalowe

Obliczeniowa nośność przy zginaniu w obliczeniowych warunkach pożaru belki nieusztynionej bocznie o przekroju poprzecznym klasy 1, 2 lub 3 w jednolitej temperaturze θ_a jest określona wzorem:

$$M_{fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} \left(\bar{\lambda}_\theta \right)^{\frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}}} k_{y,\theta} M_{Rd} \quad (21)$$

gdzie:

- $k_{y,\theta}$ jest współczynnikiem redukcyjnym granicy plastyczności stali przy temperaturze stali θ osiąganey w czasie t ;
- M_{Rd} jest nośnością przekroju poprzecznego brutto przy zginaniu (nośnością przy zginaniu plastycznym $M_{pl,Rd}$ lub nośnością przy zginaniu sprężystym $M_{el,Rd}$) w warunkach obliczeniowych temperatury normalnej, obliczoną zgodnie z normą EN 1993-1-1;
- $\chi_{LT,fi}$ jest współczynnikiem redukcyjnym ze względu na zwichrzenie w obliczeniowej sytuacji pożarowej. Można go obliczyć w taki sam sposób, jak współczynnik redukcyjny wyboczenia giętnego, lecz używając odpowiedniej smukłości względnej.

Tę samą metodę obliczeniową można stosować w przypadku belek usztynionych bocznie, przyjmując $\chi_{LT,fi} = 1$.

Często elementy konstrukcyjne nie będą miały jednolitej temperatury. Można wprowadzić współczynnik przystosowania κ_1 w celu uwzględnienia nierównomiernego rozkładu temperatury na całej wysokości kształtownika stalowego. Można również wprowadzić dodatkowy współczynnik przystosowania κ_2 , aby uwzględnić zmienność temperatury elementu konstrukcyjnego na jego długości, gdy belka jest statycznie niewyznaczalna. Wartości współczynników przystosowania κ_1 oraz κ_2 należy przyjmować zgodnie z normą EN 1993-1-2.

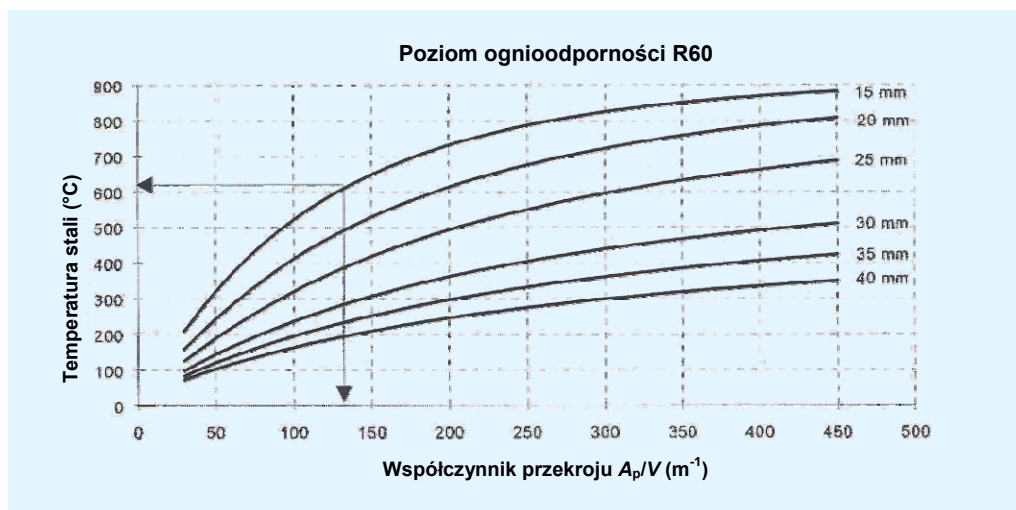
Elementy poddane łącznemu oddziaływaniu zginania i ściskania osiowego

Dostępna jest również uproszczona metoda obliczeniowa do sprawdzenia ognioodporności elementów stalowych poddanych łącznemu oddziaływaniu zginania i ściskania osiowego, takich jak smukłe słupy poddawane obciążeniu mimośrodowemu oraz długie belki ulegające wyboczeniu. W tej sytuacji prosty model obliczeniowy uwzględni łączny wpływ zginania i ściskania przez połączenie podanych wyżej dwóch modeli prostych warunków obciążenia. Szczegółowe informacje podano w normie EN 1993-1-2.

5.3.3 Wyznaczanie grubości warstwy materiału ogniochronnego

W sytuacjach, w których wymagania w zakresie ognioodporności są wysokie (na ogół więcej niż R30), stosowanie zasad normatywnych prowadzi zwykle do zapewnienia ochrony przeciwpożarowej konstrukcji stalowych. Gdy konieczna jest bierna ochrona przeciwpożarowa, wówczas znajomość temperatury krytycznej, współczynnika przekroju i wymaganego czasu ognioodporności umożliwia określenie grubości warstwy, którą należy zastosować w przypadku danego systemu ochrony przeciwpożarowej (powłoki nakładanej natryskowo, płyty ochronnej, powłoki przeciwożniowej). W praktyce dozwolone jest korzystanie wyłącznie z wyrobów zbadanych i ocenionych w ramach standardowych badań ogniowych przeprowadzonych według zaleceń normy europejskiej EN 13881.

Wymaganą grubość można zwykle określić na podstawie danych publikowanych przez producenta. Takie dane producenta mogą być podane w formie tabeli lub wykresu, jak pokazano na rysunku 5.7. Na ogół dane te odnoszą grubość warstwy materiału ogniochronnego do współczynnika przekroju elementu stalowego (A_p/V), temperatury krytycznej i wymaganego czasu ognioodporności. W przypadku typowej konstrukcji składającej się ze standardowych stalowych dwuteowników i dwuteowników szerokostopowych wartość A_m/V mieści się zwykle w zakresie 30–450 m⁻¹.



Rysunek 5.7 Przykładowy wykres dotyczący zabezpieczenia przeciwogniowego płytami — dokumenty francuskie

W rzeczywistym projekcie grubość warstwy danego materiału ogniochronnego można wyznaczyć zgodnie z następującą procedurą:

- Wybrać dane związane z wymaganym czasem ognioodporności.
- Obliczyć współczynnik przekroju zgodnie z kształtem kształtownika stalowego, obecnością osłony elementu konstrukcyjnego przed przejmowaniem ciepła od ognia podczas trwania pożaru (na przykład płyty betonowej umieszczonej na górnym pasie kształtownika), rodzajem ochrony przeciwogniowej (zgodnie z konturem kształtownika stalowego lub przekrojem skrzynkowym).
- Wyznaczyć grubość na podstawie danych producenta za pomocą temperatury krytycznej i współczynnika przekroju. Dopuszczalne jest wyznaczenie grubości metodą interpolacji liniowej.

Europejska Konwencja Konstrukcji Stalowych (ECCS) opracowała tak zwane Euro-nomogramy^[13], które dla danego czasu oddziaływania pożaru standardowego pokazują relację między temperaturą osiąganą przez izolowane elementy stalowe a współczynnikiem przekroju $(\lambda_p/d_p) \times (A_p/V)$ zależnie od charakterystyki zabezpieczenia przeciwogniowego (λ_p i d_p) oraz współczynnika przekroju A_p/V . Należy zauważyć, że te Euro-nomogramy zostały wyznaczone na podstawie wersji ENV części Eurokodu 3 dotyczącej warunków pożarowych. Z tego również powodu powinno się z nich korzystać z pewną ostrożnością. Ostatnio opracowano inne nomogramy oparte na normie EN 1993-1-2^[14].

5.3.4 Tabele obliczeniowe elementów zespolonych

Tabele obliczeniowe elementów zespolonych podano w normie EN 1994-1-2. Mają one zastosowanie tylko w przypadku elementów zespolonych stalowo-betonowych (belek zespolonych z częściową lub całkowitą osłoną betonową belki stalowej, słupów zespolonych z kształtownikami częściowo lub całkowicie pokrytymi betonem, słupów zespolonych z prostokątnymi lub okrągłymi stalowymi kształtownikami zamkniętymi wypełnionymi betonem). Wykorzystywane są w nich wartości predefiniowane, oparte głównie na wynikach standardowych badań ogniowych i zweryfikowane na drodze badań analitycznych. Tabele pozwalają konstruktorowi na szybkie uzyskanie wymiarów elementów (minimalnych wymiarów przekroju poprzecznego, wymaganej powierzchni stali zbrojeniowej i jej minimalnej osłony betonowej) w funkcji poziomu obciążenia dla ujednoliconych standardowych okresów ognioodporności. Najważniejszą zaletą tej metody jest łatwość jej stosowania. Jest ona jednak ograniczona bardzo ścisłym zestawem reguł geometrycznych, a otrzymane wyniki są bardziej zachowawcze w porównaniu do innych prostych lub zaawansowanych modeli obliczeniowych. W rezultacie powinno się ją stosować tylko do wstępnego projektowania budynku.

Szczegółowe informacje podano w normie EN 1994-1-2.

5.3.5 Uprozczone modele obliczeniowe elementów zespolonych

Przedstawione poniżej metody obliczeniowe opracowano w celu przewidywania nośności pojedynczych elementów konstrukcyjnych poddanych działaniu pożaru o krzywej standardowej. Nie mają one zatem zastosowania w przypadku pożarów „naturalnych”.

Poniżej opisano jedynie metody obliczeniowe dotyczące elementów zespolonych najczęściej wykorzystywanych w konstrukcjach jednokondygnacyjnych (słupów zespolonych i belek częściowo obetonowanych).

Słupy zespolone

Proste metody obliczeniowe słupów pozwalają projektantowi ocenić ognioodporność słupa zespolonego przez obliczenie jego nośności na wyboczenie za pomocą rozkładu temperatury w przekroju poprzecznym i odpowiadającej mu zredukowanej wytrzymałości materiału zdefiniowanej w wymaganym czasie ognioodporności. Metoda ta opiera się na koncepcji krzywej wyboczenia: wykorzystuje się nośność plastyczną przy ściskaniu osiowym $N_{fi,pl,Rd}$ i efektywną sztywność giętą $(EI)_{fi,eff}$ w celu uzyskania współczynnika redukcyjnego wyboczenia. Ta metoda ma zastosowanie w przypadku wszystkich rodzajów słupów zespolonych pod warunkiem, że zastosowano odpowiednią krzywą wyboczenia. Sprawdzenie słupa polega na dowiedzeniu, że oddziaływanie ściskania osiowego (przy kombinacji oddziaływań uwzględnionych w warunkach pożaru według normy EN 1991-1-2) jest mniejsze niż nośność słupa na wyboczenie.

Dla danego rozkładu temperatury w przekroju poprzecznym nośność obliczeniową słupa zespolonego $N_{fi,Rd}$ można wyznaczyć na podstawie odpowiedniej krzywej wyboczeniowej słupa, która opisuje związek nośności $N_{fi,Rd}$ z obciążeniem plastycznym $N_{fi,pl,Rd}$ i sprężystym obciążeniem krytycznym $N_{fi,cr}$ w następujący sposób:

$$N_{fi,Rd} = \chi(\bar{\lambda}_\theta) \cdot N_{fi,pl,Rd} \quad (22)$$

χ jest współczynnikiem redukcyjnym wyboczenia giętnego zależnym od smukłości w warunkach pożaru $\bar{\lambda}_\theta$. W przypadku słupów zespolonych współczynnik $\bar{\lambda}_\theta$ może być określony wzorem:

$$\bar{\lambda}_\theta = \sqrt{N_{fi,pl,R} / N_{fi,cr}} \quad (23)$$

gdzie:

$N_{fi,cr}$ jest obciążeniem krytycznym Eulera przy wyboczeniu,

$N_{fi,pl,R}$ jest wartością $N_{fi,pl,Rd}$ zgodnie z zależnością (24), gdy współczynniki częściowe bezpieczeństwa $\gamma_{M,fi,a}$, $\gamma_{M,fi,s}$ oraz $\gamma_{M,fi,c}$ materiałów przyjmuje się jako 1,0.

Współczynnik redukcyjny χ wyznacza się jak w warunkach temperatury normalnej, lecz stosując odpowiednią krzywą wyboczenia zdefiniowaną jako funkcja rodzaju słupa (kształtownik stalowy częściowo obetonowany, wypełniony kształtownik stalowy zamknięty).

Nośność plastyczną $N_{fi,pl,Rd}$ przekroju poprzecznego wyznacza się przez dodanie wytrzymałości wszystkich części przekroju (granicy plastyczności elementów stalowych, wytrzymałości elementów betonowych na ściskanie) pomnożonych przez odpowiadające im powierzchnie, uwzględniając wpływ temperatury na te elementy i pomijając interakcje między nimi (wynikające z różnicowych naprężeń termicznych), tzn.:

$$N_{fi,pl,Rd} = \sum_j (A_a \cdot \frac{f_{ay,\theta}}{\gamma_{M,fi,a}}) + \sum_k (A_s \cdot \frac{f_{s,\theta}}{\gamma_{M,fi,s}}) + \sum_m (A_c \cdot \frac{f_{c,\theta}}{\gamma_{M,fi,c}}) \quad (24)$$

$N_{fi,cr}$ jest obciążeniem krytycznym Eulera przy wyboczeniu obliczonym jako funkcja efektywnej sztywności giętniej przekroju poprzecznego $(EI)_{fi,eff}$ i długości wyboczeniowej ℓ_θ słupa w warunkach pożaru, tzn.:

$$N_{fi,cr} = \pi^2 \frac{(EI)_{fi,eff}}{\ell_\theta^2} \quad (25)$$

Sztywność efektywną $(EI)_{fi,eff}$ wyznacza się z następującej zależności:

$$(EI)_{fi,eff} = \sum_j (\varphi_{a,\theta} E_{a,\theta} I_{a,\theta}) + \sum_k (\varphi_{s,\theta} E_{s,\theta} I_{s,\theta}) + \sum_m (\varphi_{c,\theta} E_{c,sec,\theta} I_{c,\theta}) \quad (26)$$

gdzie:

$E_{i,\theta}$ jest charakterystycznym modułem materiału i w temperaturze θ .

W przypadku stali jest to moduł sprężystości. W przypadku betonu:

$E_{c,\theta} = 3 E_{c,sec} / 2$ gdzie $E_{c,sec,\theta}$ jest wartością charakterystyczną siecznego modułu sprężystości betonu w warunkach pożaru, uzyskiwaną w wyniku podzielenia $f_{c,\theta}$ przez $\varepsilon_{cu,\theta}$,

I_i jest geometrycznym momentem bezwładności powierzchni materiału i względem osi środkowej (y lub z) przekroju zespolonego.

$\varphi_{a,\theta}$ (w przypadku kształtowników stalowych), $\varphi_{s,\theta}$ (w przypadku zbrojenia) i $\varphi_{c,\theta}$ (w przypadku betonu) są współczynnikami redukcyjnymi wynikającymi z wpływów różnicowych naprężeń termicznych.

Szczegółowe informacje podano w normie EN 1994-1-2, §4.3.5.

Belki stalowe częściowo obetonowane

Prosta metoda obliczeniowa belek stalowych częściowo obetonowanych umożliwia projektantowi ocenę ognioodporności przez obliczenie nośności belki przy zginaniu w wymaganym czasie ognioodporności. Opiera się ona na prostej teorii momentu plastycznego. Metoda wymaga obliczenia osi obojętnej i odpowiadającej jej nośności przy zginaniu, z uwzględnieniem rozkładu temperatury w przekroju poprzecznym i odpowiedniej zredukowanej wytrzymałości materiału. Wyróżnia się nośność przy uginaniu (zwykle w połowie rozpiętości) i nośność przy przeginianiu (na podporach, w razie potrzeby). Jeżeli przyłożony moment jest mniejszy niż nośność belki przy zginaniu, uznaje się, że element ma odpowiednią ognioodporność.

Oś obojętna belki w stanie plastycznym jest wyznaczona tak, aby siła rozciągająca i siła ściskająca działające w kształtowniku były w równowadze:

$$\sum_{i=1}^n A_i k_{y,\theta,i} \left(\frac{f_{y,i}}{\gamma_{M,fi,a}} \right) + \sum_{j=1}^m A_j k_{c,\theta,j} \left(\frac{f_{c,j}}{\gamma_{M,fi,c}} \right) = 0 \quad (27)$$

gdzie:

$f_{y,i}$ jest nominalną granicą plastyczności w elementarnym polu przekroju stali A_i przyjmowaną jako wartość dodatnia po stronie ściskanej osi obojętnej w stanie plastycznym i jako wartość ujemna po stronie rozciąganej,

$f_{c,j}$ jest nominalną wytrzymałością na ściskanie w elementarnym polu przekroju betonu A_j przyjmowaną jako wartość dodatnia po stronie ściskanej osi obojętnej w stanie plastycznym i jako wartość ujemna po stronie rozciąganej.

Obliczeniową nośność przy zginaniu $M_{fi,t,Rd}$ można wyznaczyć na podstawie wzoru:

$$M_{fi,t,Rd} = \sum_{i=1}^n A_i z_i k_{y,\theta,i} \left(\frac{f_{y,i}}{\gamma_{M,fi,a}} \right) + \sum_{j=1}^m A_j z_j k_{c,\theta,j} \left(\frac{f_{c,j}}{\gamma_{M,fi,c}} \right) \quad (28)$$

gdzie:

z_i, z_j to odległości od osi obojętnej w stanie plastycznym do środka masy elementarnego pola przekroju A_i oraz A_j .

W celu obliczenia wartości nośności obliczeniowej przy zginaniu przekrój poprzeczny belki dzieli się na różne elementy, tzn.:

- pasy kształtownika stalowego,
- środnik (części dolne i górne) kształtownika stalowego,
- pręty zbrojeniowe,
- osłonę betonową.

Do każdej z tych części przekroju poprzecznego odnoszą się proste reguły definiujące wpływ temperatury i pozwalające na obliczenie zredukowanej wytrzymałości charakterystycznej w funkcji standardowej ognioodporności R30, R60, R90 lub R120.

Szczegółowe informacje podano w normie EN 1994-1-2, §4.3.4.

5.4 Szczegółowe zasady projektowania budynków jednokondygnacyjnych

W wielu krajach europejskich zmieniono ostatnio krajowe przepisy przeciwpożarowe, wprowadzając w przypadku jednokondygnacyjnych budynków magazynowych i przemysłowych o wysokim zagrożeniu pożarowym (dużych obciążeniach ogniowych) specjalne wymagania w zakresie bezpieczeństwa dotyczące zachowania się konstrukcji, jako alternatywę dla standardowych wymagań normatywnych. Wymagane jest spełnienie następujących kryteriów związanych z zachowaniem konstrukcji budynków magazynowych i przemysłowych (konstrukcji nośnej, elementów elewacji, pokrycia dachowego i ścian przeciwpożarowych) w celu zapewnienia odpowiedniego bezpieczeństwa osobom przebywającym w budynku i strażakom:

- W przypadku wystąpienia pożaru w jednej z komórek budynku jego konstrukcja (w tym elementy elewacji) nie może zawalić się na zewnątrz.
- W przypadku wystąpienia pożaru w jednej z komórek budynku zniszczenie miejscowe komórki nie może prowadzić do zniszczenia sąsiednich komórek.

Aby wspomóc projektowanie budynków magazynowych i przemysłowych o konstrukcji stalowej można korzystać z kilku prostych metod obliczeniowych^[5,6]. Metody te pozwalają projektantowi w prosty sposób wykazać, że zachowanie konstrukcji stalowej tych budynków w warunkach pożaru spełnia podane wyżej kryteria. Metody zaimplementowano w oprogramowaniu LUCA^[15].

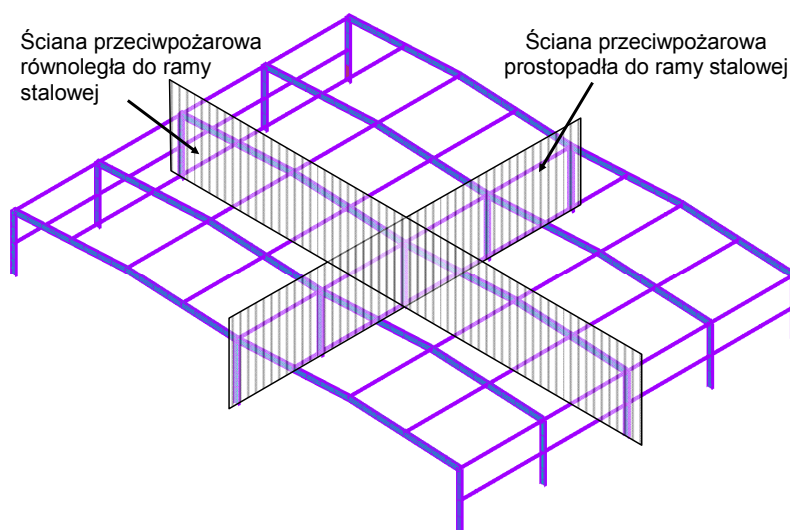
Metody obliczeniowe umożliwiają projektantowi:

- Oszacowanie sił wywołanych przez zniszczenie nagrzanej części konstrukcji. Siły te należy wykorzystać jako dodatkowe obciążenie poziome w celu sprawdzenia stateczności tej części ramy, która pozostaje chłodna podczas pożaru. Tę część można ocenić za pomocą narzędzi projektowych służących do analizy konstrukcji w warunkach normalnych.
- Określenie maksymalnych przemieszczeń poziomych powstających na końcach strefy objętej pożarem. Przemieszczenia te wykorzystywane są w celu zapewnienia, że ruchy konstrukcji w przypadku pożaru nie będą miały niekorzystnego wpływu na stateczność ścian przeciwpożarowych ani elewacji budynku. Metody obliczeniowe użyte do tej weryfikacji zależą od rodzaju ścian (takich jak wykonane z betonu lekkiego, betonu zbrojonego, pustaków, blachy stalowej z izolatorem, okładziny tynkowej, cegieł itp.) i ich połączenia z ramą stalową.

Przy użyciu tych metod można projektować następujące budynki:

- Budynki magazynowe i przemysłowe o konstrukcji stalowej. Stalowe ramy portalowe wykonane ze standardowych dwuteowników lub dwuteowników szerokostopowych walcowanych na gorąco bądź równoważnych blachownic spawanych, albo ramy stalowe zbudowane z belek kratowych ze słupami wykonanymi ze standardowych dwuteowników lub dwuteowników szerokostopowych walcowanych na gorąco bądź równoważnych blachownic spawanych.
- Budynki magazynowe i przemysłowe o konstrukcji opartej na ramach portalowych, podzielonej na kilka komórek oddzielonych od siebie ścianami przeciwpożarowymi. Ściany te mogą być albo prostopadłe, albo równoległe do stalowych ram portalowych (patrz rysunek 5.8).

Metody te opracowano z myślą o budynkach magazynowych i przemysłowych, lecz można je zastosować również w przypadku innych rodzajów budynków jednokondygnacyjnych.

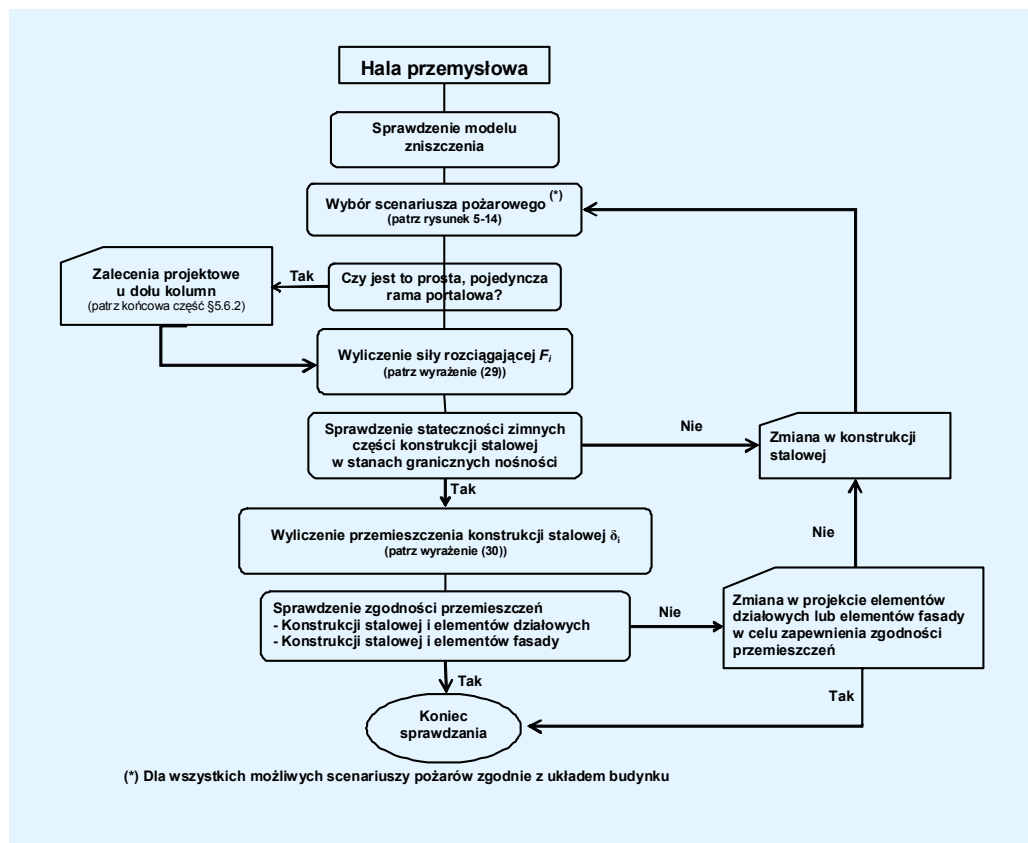


Rysunek 5.8 Usytuowanie ściany przeciwpożarowej w stosunku do ram stalowych

Metody obliczeniowe (patrz punkt 5.5) wymagane są jedynie, gdy ściany przeciwpożarowe są prostopadłe do ram stalowych budynku, a wysokość budynku przekracza 20 m⁵. Gdy ściany przeciwpożarowe są równoległe do ram stalowych, można w prosty sposób uniknąć ryzyka zawalenia się konstrukcji na zewnątrz i zniszczenia postępującego (między różnymi strefami pożarowymi), stosując się do zaleceń podanych w punkcie 5.5.3.

5.5 Uprozczone metody obliczeniowe

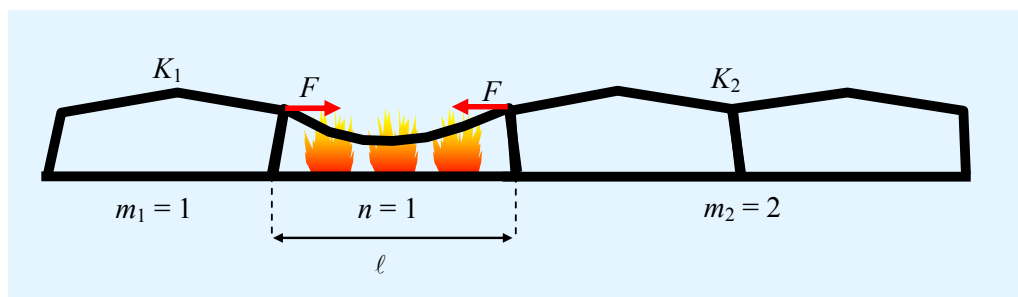
Na rysunku 5.9 pokazano schemat blokowy przedstawiający uproszczone metody obliczeniowe.



Rysunek 5.9 Schemat blokowy zastosowania metod obliczeniowych

Obliczenia siły rozciągającej i przemieszczeń bocznych na końcach strefy pożarowej muszą zostać wykonane dla wszystkich możliwych scenariuszy pożarowych. Przykłady scenariuszy zamieszczono w punkcie 5.5.3. Metody obliczeniowe podano w punktach 5.5.1 oraz 5.5.2.

5.5.1 Siła rozciągająca na końcach strefy pożarowej



Rysunek 5.10 Pozioma siła rozciągająca na końcach strefy pożarowej

Podczas powstania pożaru w strefie pożarowej budynku wartość poziomej siły rozciągającej F na końcach strefy występującej na skutek zawalenia się konstrukcji dachu (patrz rysunek 5.10) i potrzebnej do weryfikacji stateczności części zimnej konstrukcji można obliczyć ze wzoru:

$$F = c_p n_{\text{eff}} q \ell \quad (29)$$

gdzie:

c_p jest współczynnikiem empirycznym (zależnym od nachylenia dachu i rodzaju konstrukcji stalowej);

$$c_p = \begin{cases} 1,19 & \text{for } 0\% \text{ slope} \\ 1,16 & \text{for } 5\% \text{ slope} \\ 1,10 & \text{for } 10\% \text{ slope} \end{cases} \quad \text{w przypadku ram portalowych,}$$

$$1,45 \quad \text{w przypadku ram kratowych,}$$

n_{eff} jest współczynnikiem związanym z całkowitą liczbą naw o podwyższonej temperaturze n w strefie pożaru (patrz tabela 5.4);

q jest obciążeniem o rozkładzie liniowym działającym na dach [N/m] (równym gęstości obciążenia pomnożonej przez odstęp pomiędzy ramami) przyłożonym do belki i obliczanym w sytuacji pożaru ($q = G + \psi_1 \times S_n$), gdzie G jest obciążeniem stałym, łącznie z ciężarem własnym ramy stalowej oraz nadmiernymi obciążeniami instalacją, S_n jest obciążeniem śniegiem, a ψ_1 jest współczynnikiem obciążenia zgodnie ze współczynnikami kombinacji obciążeń określonymi w normie EN 1990 oraz w odpowiednich Załącznikach krajowych;

ℓ jest rozpiętością nawy o podwyższonej temperaturze połączonej ze słupem [m].

Tabela 5.4 Wartości współczynnika n_{eff}

Liczba naw objętych pożarem	Rama portalowa		Rama kratowa	
	Miejsce strefy objętej pożarem koniec	Miejsce strefy objętej pożarem środek	Miejsce strefy objętej pożarem koniec	Miejsce strefy objętej pożarem środek
$n = 1$	$n_{\text{eff}} = 0,5$	$n_{\text{eff}} = 1,0$	$n_{\text{eff}} = 0,6$	$n_{\text{eff}} = 1,0$
$n \geq 2$	$n_{\text{eff}} = 1,0$	$n_{\text{eff}} = 2,0$	$n_{\text{eff}} = 1,0$	$n_{\text{eff}} = 1,0$

W przypadku słupów ramy stalowej podpierających rozgraniczającą ścianę przeciwpożarową, słupy (z odpowiednio solidną podstawą) należy zaprojektować tak, aby były odporne na działanie siły poziomej obliczonej według równania (29), ale przy zastosowaniu współczynnika $n_{\text{eff}} = 1,0$.

5.5.2 Przesunięcia boczne na końcach strefy pożarowej

W przypadku wystąpienia pożaru ruchy stalowych konstrukcji jednokondygnacyjnych mogą wynosić kilkadziesiąt centymetrów, co może prowadzić do zniszczenia elewacji bądź elementów działowych, jeżeli nie są one dostatecznie plastyczne lub odpowiednio utwierdzone. Zatem istotne jest, aby elementy elewacji oraz ściany przeciwpożarowe pozostające w kontakcie z konstrukcją stalową odpowiadały przesunięciom bocznym na końcach stref pożarowych oraz zachowały integralność w celu uniknięcia zawalenia się na zewnątrz i postępującego zniszczenia konstrukcji pomiędzy poszczególnymi strefami pożarowymi.

Maksymalne przesunięcia boczne δ_i ($i = 1, 2$) występujące przy wierzchołkach słupów znajdujących się na końcach strefy pożarowej może zostać obliczone przy użyciu następującego wzoru (patrz rysunek 5.11):

$$\delta_i = \begin{cases} \frac{K_t}{K_i} c_{\text{th}} n \ell & \text{gdy pożar zlokalizowany jest} \\ & \text{w końcowej części budynku,} \\ \text{Max} \left\{ \frac{K_t}{K_i} c_{\text{th}} n \ell; \frac{F}{K_i} \right\} & \text{gdy pożar zlokalizowany jest} \\ & \text{w środkowej części budynku,} \end{cases} \quad (30)$$

gdzie:

- n jest liczbą naw o podwyższonej temperaturze,
- K_i jest równoważną sztywnością boczną rozważanej części i konstrukcji [N/m],
- K_t jest sztywnością równoważną (zależną od sztywności równoważnych K_1 oraz K_2) wyrażoną wzorem:

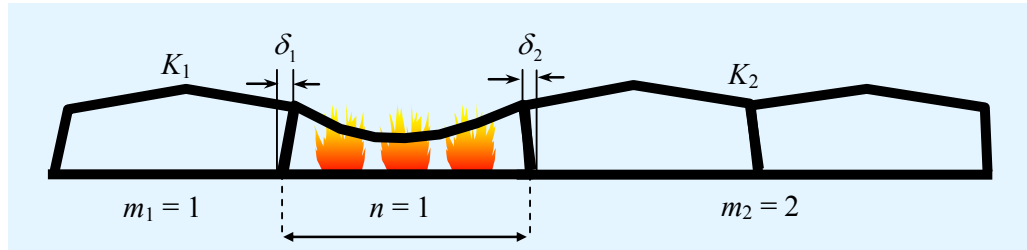
$$K_t = \frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2}$$

- ℓ jest rozpiętością jednej nawy o podwyższonej temperaturze połączonej ze słupem [m],
- F jest siłą rozciągającą [N],
- c_{th} jest współczynnikiem empirycznym (zależnym od nachylenia dachu i rodzaju konstrukcji stalowej),

$$c_{\text{th}} = \begin{cases} 0,01 & \text{dla } 0\% \text{ slope} \\ 0,011 & \text{dla } 5\% \text{ slope} \\ 0,015 & \text{dla } 10\% \text{ slope} \\ 0,009 & \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{w przypadku ram portalowych,} \\ \\ \\ \text{w przypadku ram kratowych.} \end{matrix}$$

Sztywność boczna K w przypadku pożaru występującego w środkowej części ramy

Jeżeli strefa pożarowa znajduje się pośrodku ramy, jak zilustrowano na rysunku 5.11, współczynniki K_1 oraz K_2 należy wyliczyć przy zastosowaniu metody sprężystej.



Rysunek 5.11 Pożar umiejscowiony w komórce w środkowej części budynku

Jednak w przypadku zwykłych ram stalowych (standardowa rozpiętość, równe profile stalowe od jednego przęsła do drugiego) równoważna sztywność boczna K_i po każdej stronie pożaru może być wyliczona w przybliżeniu zgodnie z liczbą zimnych przęseł po danej stronie (m_i) za pomocą następujących zależności:

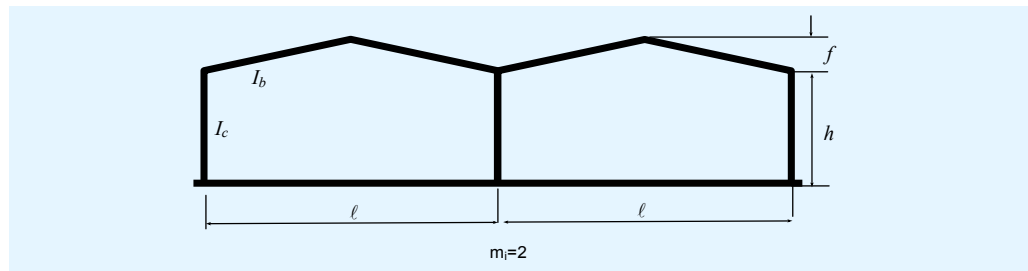
$$K_i = \begin{cases} k & \text{for } m_i = 1 \\ ck & \text{for } m_i \geq 2 \end{cases} \quad (31)$$

przy

$$\begin{aligned} k &= \frac{\alpha}{1 + 2\alpha} \frac{12EI_c}{(h + f)^3} \\ c &= 1 + \sum_{j=2}^{m_i} \frac{j}{2} \frac{2\alpha + 1}{1 + 2j\alpha} \\ \alpha &= \frac{I_b}{I_c} \frac{h + f}{l} \left(1 - \frac{f}{0,6h}\right) \end{aligned} \quad (32)$$

gdzie dla każdej strony kolejno ($i = 1, 2$):

- h jest wysokością słupów,
- f jest wysokością belki kalenicowej,
- L jest rozpiętością przęsła,
- I_y jest geometrycznym momentem bezwładności powierzchni belki względem osi,
- I_y jest geometrycznym momentem bezwładności powierzchni słupa względem osi,
- E jest modułem sprężystości stali w warunkach normalnej temperatury.



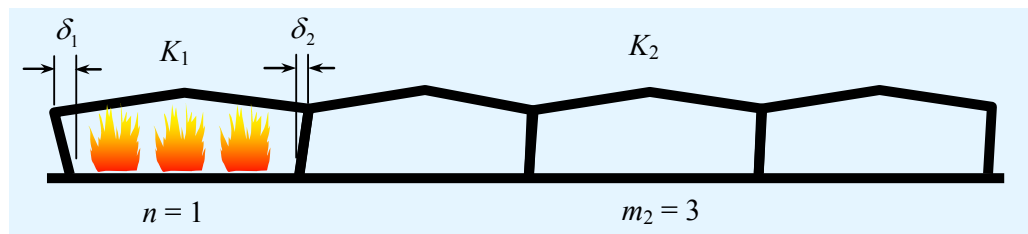
Rysunek 5.12 Definicja parametrów części zimnych po stronie i ramy

Sztywność boczna K w przypadku pożaru występującego w końcowej części ramy

Jeżeli strefa pożarowa znajduje się w końcowej części ramy, współczynnik K_2 należy wyliczyć jak w przypadku pożaru w strefie środkowej. Współczynnik K_1 , określany jako sztywność boczna ramy stalowej podgrzanej strefy pożarowej, należy obliczyć w następujący sposób:

$$K_1 = \begin{cases} \left. \begin{array}{ll} 0,065 k & \text{dla } n = 1 \\ 0,13 k & \text{dla } n = 2 \\ 0,13 c k & \text{dla } n > 2 \end{array} \right\} & \text{w przypadku ram portalowych,} \\ \left. \begin{array}{ll} 0,2 K_2 & \text{dla } n = 1 \\ 0,3 K_2 & \text{dla } n \geq 2 \end{array} \right\} & \text{w przypadku ram kratowych,} \end{cases} \quad (33)$$

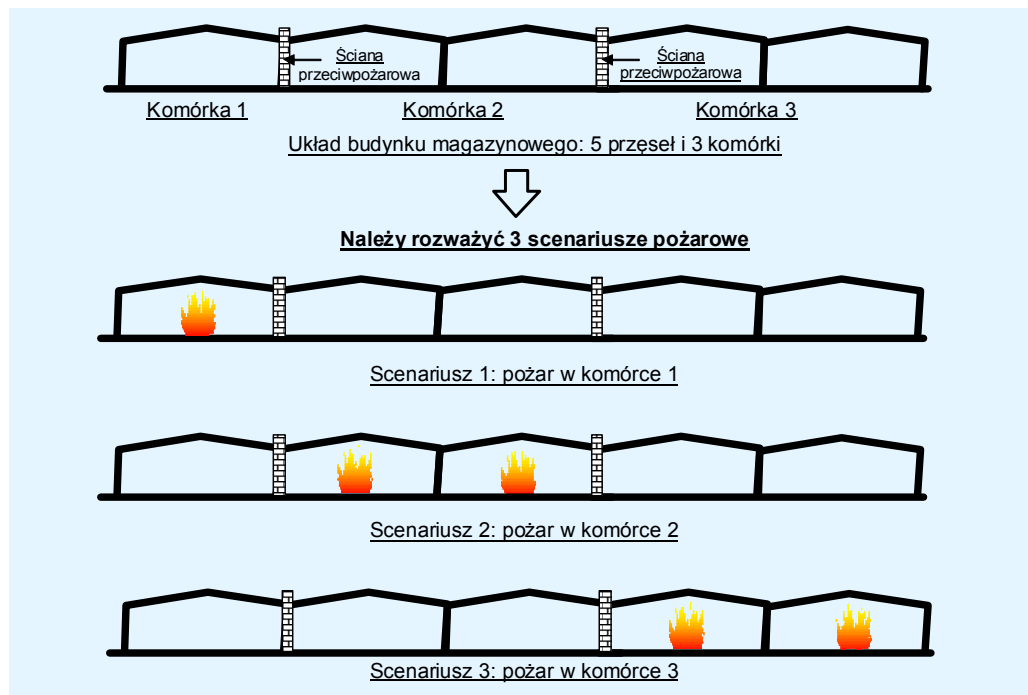
gdzie k oraz c są obliczane z wyrażenia (32) ze współczynnikiem $m_1 = n - 1$, gdzie n jest liczbą naw o podwyższonej temperaturze, jak pokazano na rysunku 5.13.



Rysunek 5.13 Pożar w strefie w końcowej części budynku

5.5.3 Przykładowe scenariusze pożarowe

Powyższe obliczenia należy wykonać w przypadku wszystkich możliwych scenariuszy pożarowych. Scenariusze te są określone w zależności od układu budynku magazynowego (konstrukcji i ścian działowych), jak zilustrowano na przykładzie na rysunku 5.14.



Rysunek 5.14 Scenariusze pożarowe w zależności od układu budynku

5.6 Zalecenia projektowe

Aby zapobiec zawaleniu się na zewnątrz oraz postępującemu zniszczeniu konstrukcji stalowej, należy zastosować dodatkowe zalecenia projektowe w przypadku ścian przeciwpożarowych, elementów fasad oraz układów stężających. Oczywiście zalecenia dopuszczają również zniszczenie konstrukcji stalowej w warunkach pożaru z dowolnej strony ściany przeciwpożarowej bez zniszczenia tej ściany.

5.6.1 Ściany przeciwpożarowe

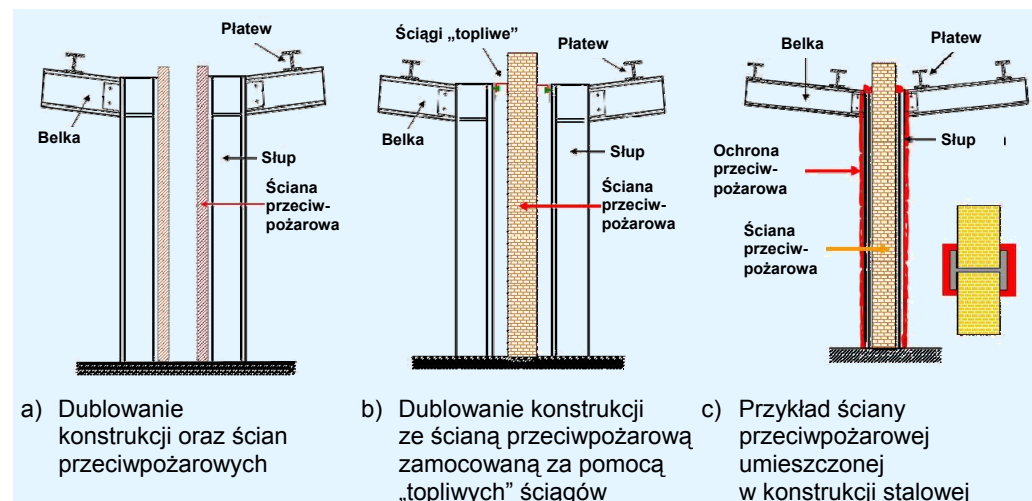
Aby zapobiec rozprzestrzenianiu się pożaru na sąsiednie pomieszczenia z pomieszczenia objętego pożarem, można podzielić budynek na niezależne strefy pożarowe przez zastosowanie jednego z opisanych poniżej rozwiązań konstrukcyjnych.

- Dwie niezależne ściany przeciwpożarowe (takie jak panele warstwowe, panele prefabrykowane itd.) każda przytwierdzona do niezależnej ramy konstrukcyjnej (patrz rysunek 5.15 (a)). W takim przypadku, kiedy jedna konstrukcja ze ścianą przeciwpożarową ulegnie zniszczeniu podczas pożaru, ogień nie rozprzestrzeni się na sąsiednią konstrukcję, która pozostanie stateczna i zabezpieczona przed ogniem przez drugą ścianę przeciwpożarową.
- Pojedyncza ściana przeciwpożarowa umieszczona pomiędzy obiema konstrukcjami. Ściana ta może być samostateczna i w pełni niezależna. Ściana przeciwpożarowa może być również zamocowana w górnej części do obu konstrukcji za pomocą „topliwych” ściągów (patrz rysunek 5.15 (b)), które w przypadku pojawienia się ognia w pobliżu ściany zwalniają połączenie z „gorącą” konstrukcją (zazwyczaj kiedy śruby nagrzewają się do temperatury od 100 do 200°C), nie powodując żadnych uszkodzeń ściany (pozostaje ona połączona z konstrukcją stalową umiejscowioną po „zimnej” stronie) ani utraty stateczności sąsiedniej, zimnej konstrukcji.

W praktyce ściany samostateczne stosuje się powszechnie. Jednak podczas pożaru rozwiązanie to może być niebezpieczne dla ludzi (osób przebywających w budynku i strażaków), ponieważ na skutek rosnącej temperatury ściany uginają się i ulegają zawaleniu. Tak więc powinny być stosowane jedynie wtedy, gdy ich zachowanie zostało przeanalizowane za pomocą zaawansowanego modelu obliczeniowego uwzględniającego efekty drugiego rzędu. Dodatkowo, tam gdzie odległość ściany samostatecznej do sąsiadującej konstrukcji stalowej nie jest wystarczająca, należy upewnienie się, że ściana przeciwpożarowa jest w stanie wytrzymać siłę, jaka może zostać wywołana ruchami budynku wynikającymi z wydłużenia cieplnego konstrukcji dachu (belki oraz płatwi) na skutek wzrostu temperatury w strefie objętej pożarem.

Rozwiązaniem alternatywnym do przedstawionych powyżej jest umieszczenie ściany przeciwpożarowej w konstrukcji stalowej budynku jednokondygnacyjnego, jak pokazano na rysunku 5.15 (c). Ściana taka może być zarówno prostopadła, jak i równoległa do ramy stalowej. Można zatem rozważyć kilka rozwiązań: ściana przeciwpożarowa umieszczona w linii słupów, ściana przeciwpożarowa przymocowana do słupów lub ściana przeciwpożarowa wyniesiona poza linię słupów. W przypadku tych rozwiązań należy przedsięwziąć stosowane środki zapobiegające zawaleniu się ściany na skutek znacznych przemieszczeń bocznych konstrukcji stalowej. Środki te obejmują:

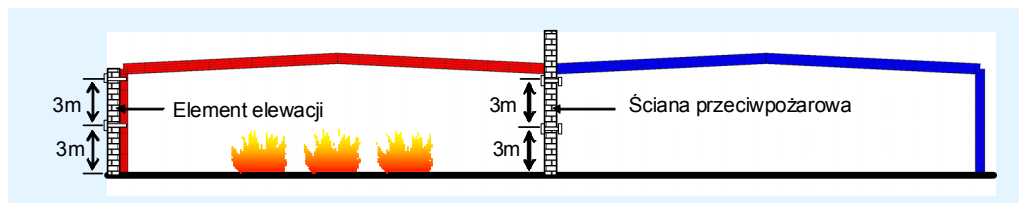
- mocowanie ścian przeciwpożarowych do konstrukcji stalowej,
- ochronę przeciwpożarową konstrukcji stalowej znajdującej się w pobliżu ścian przeciwpożarowych,
- system dachowy ponad ścianami pożarowymi,
- układ stężający.



Rysunek 5.15 Przykłady rozwiązań ścian przeciwpożarowych

Zamocowanie elementów elewacji oraz ścian przeciwpożarowych do konstrukcji stalowej

Ściany przeciwpożarowe i elementy elewacji zamocowane do konstrukcji stalowej w budynkach jednokondygnacyjnych muszą pozostawać trwale zamocowane, aby zapobiec zniszczeniu tych elementów na skutek znacznych przemieszczeń bocznych konstrukcji w przypadku pożaru i tym samym uniknąć ryzyka postępującego zniszczenia i zawalenia się konstrukcji na zewnątrz.



Rysunek 5.16 Szczegółowe rozwiązania projektowe elementów elewacji i ścian przeciwpożarowych

Jedno z rozwiązań polega na zamocowaniu tych elementów do słupów konstrukcji nośnej budynku za pomocą odpowiednich systemów zamocowań rozłożonych równomiernie na całej wysokości budynku. Maksymalny rozstaw pomiędzy tymi zamocowaniami jest określony przez producenta ścian. Zaleca się, aby rozstaw nie przekraczał 3 m w przypadku ścian wznoszonych na placu budowy (beton, ściany murowane itd.).

Dodatkowo mocowania używane do łączenia ścian przeciwpożarowych i elementów elewacji ze słupami muszą być zaprojektowane tak, aby były odporne na działanie sił związanych z oddziaływaniem wiatru oraz ciężarem własnym elementów działowych w przypadku przesunięcia bocznego wywołanego przez ramę stalową budynku. Jeżeli te mocowania wykonane są ze stali i nie są zabezpieczone przed oddziaływaniem ognia, każde z nich musi być zaprojektowane tak, aby w temperaturze otoczenia było odporne na działanie następującej siły:

$$F = W + 5 p \delta_i d / n \quad (34)$$

gdzie:

- W jest charakterystycznym oddziaływaniem wiatru przyjętym w projekcie dla temperatury otoczenia i stosowanym do każdego mocowania [N],
- p jest ciężarem własnym ściany [N/m²],
- d jest rozstawem ram [m],
- n jest całkowitą liczbą mocowań (rozłożonych równomiernie na całej wysokości),
- δ_i jest maksymalnym przemieszczeniem bocznym obliczonym z zależności (26) [m].

Ochrona przeciwpożarowa elementów stalowych znajdujących się w pobliżu ścian przeciwpożarowych

Z wymagania związanego z zatrzymaniem rozprzestrzeniania się pożaru pomiędzy poszczególnymi strefami i zapobieganiem postępującemu zawaleniu się konstrukcji (tj. spełnienia warunku zapewnienia odporności na zniszczenie ścian przeciwpożarowych oraz stateczności żurawów części konstrukcji) wynika konieczność zapewnienia tego samego stopnia ognioodporności w przypadku słupów służących jako podpory ścian przeciwpożarowych co w przypadku ścian przeciwpożarowych. Zazwyczaj te wymagania dotyczące ognioodporności prowadzą do zastosowania ochrony przeciwpożarowej słupów. Z kolei słupy, które nie stanowią podpory ścian przeciwpożarowych, nie wymagają zastosowania ochrony przeciwpożarowej.

Dodatkowo elementy konstrukcyjne mogące doprowadzić do uszkodzenia ścian przeciwpożarowych (takie jak belki i płatwie znajdujące się w pobliżu lub przechodzące przez ściany przeciwpożarowe) muszą również zostać objęte ochroną przeciwpożarową.

5.6.2 Zalecenia dotyczące stalowych ram portalowych

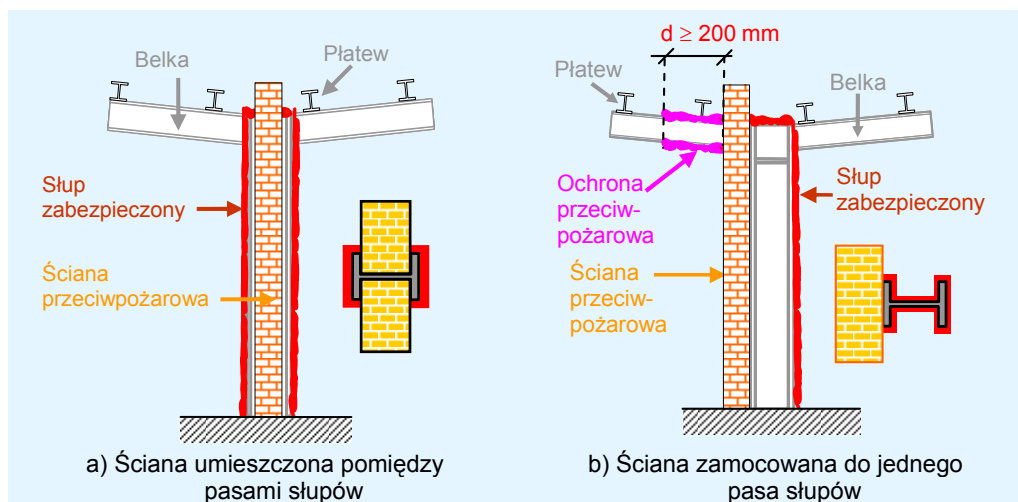
Ściana przeciwpożarowa prostopadła do ramy stalowej

Rysunek 5.17 przedstawia sytuację, w której ściana przeciwpożarowa jest umieszczona prostopadłe do ramy stalowej. W takiej konfiguracji:

- Słupy wbudowane w ścianę lub znajdujące się blisko niej muszą być objęte ochroną przeciwpożarową.
- Gdy ściana przeciwpożarowa jest umieszczona pomiędzy pasami słupów, belki dachowe nie wymagają dodatkowej ochrony przeciwpożarowej (rysunek 5.17 (a)).
- Gdy ramy portalowe nie mają skosów, a ściana przeciwpożarowa jest zamocowana do jednego pasa słupów, ochroną przeciwpożarową należy objąć wszystkie belki przechodzące przez ścianę przeciwpożarową (po stronie ściany) na minimalnej długości 200 mm poza granicę ściany. Ten sposób zabezpieczenia pozwala na przemieszczenie przegubów plastycznych w kierunku od ścian, zapobiegając tym samym zniszczeniu ściany w wyniku zawalenia się belki (patrz rysunek 5.17 (b)). Gdy ramy portalowe mają skosy, ochrona przeciwpożarowa belek nie jest wymagana.
- Ponieważ płatwie nie przechodzą przez ścianę przeciwpożarową, nie ma potrzeby rozważania żadnych szczególnych czynników.

Grubość warstwy materiału ogniochronnego zastosowanego w przypadku słupów można obliczyć, przyjmując temperaturę krytyczną 500°C i stosując te same warunki ognioodporności co w przypadku ścian przeciwpożarowych. Ochroną przeciwpożarową należy objąć słupy na całą ich wysokość.

Jeżeli belki są częściowo zabezpieczone, grubość warstwy materiału ogniochronnego można obliczyć, przyjmując w przypadku współczynnika przekroju narażenie kształtownika stalowego na działanie ognia z czterech stron, oddziaływanie pożaru standardowego przez jedną godzinę oraz temperaturę krytyczną wynoszącą 500°C.



Rysunek 5.17 Szczegół projektowy w pobliżu ścian przeciwpożarowych prostopadłych do stalowej ramy portalowej

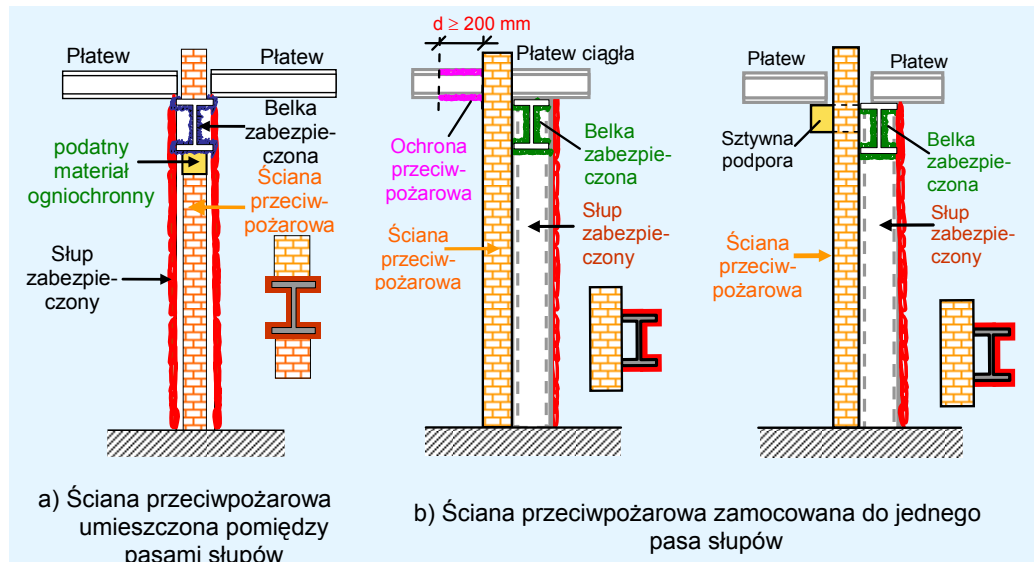
Ściana przeciwpożarowa równoległa do ramy stalowej

Rysunek 5.18 przedstawia sytuację, w której ściana przeciwpożarowa jest umieszczona równolegle do ramy stalowej.

W takiej konfiguracji:

- Ściana przeciwpożarowa jest umiejscowiona pomiędzy dwiema ramami bądź znajduje się w płaszczyźnie ramy, pomiędzy powierzchniami czołowymi słupów i belek.
- Słupy i belki znajdujące się wewnątrz ściany przeciwpożarowej lub w jej pobliżu muszą być objęte ochroną przeciwpożarową.
- Płatwie przechodzą przez ściany przeciwpożarowe. Dlatego też należy objąć ochroną przeciwpożarową płatwie ciągle (na przestrzeni 200 mm od ściany) lub zaprojektować układ wykorzystujący płatwie nieciągłe. Przykładowo, jeżeli ściana przeciwpożarowa znajduje się w płaszczyźnie ramy, elementy stalowe zamocowane do belek powinny przechodzić przez ścianę w celu podparcia płatwi.

Grubość warstwy materiału ogniochronnego zastosowanego w przypadku słupów i belek można obliczyć, przyjmując temperaturę krytyczną 500°C i stosując te same warunki ognioodporności co w przypadku ścian przeciwpożarowych. Ochroną przeciwpożarową należy objąć słupy na całej ich wysokości.

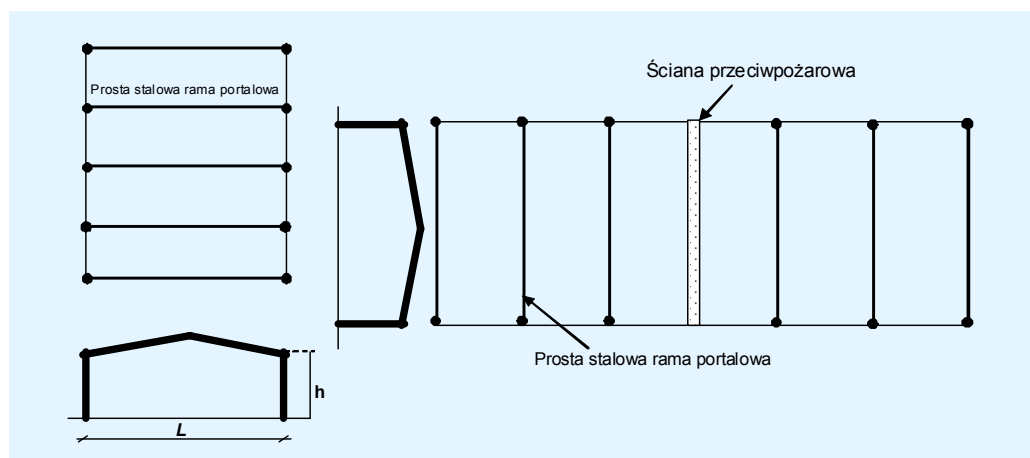


Rysunek 5.18 Szczegół projektowy w pobliżu ścian przeciwpożarowych równoległych do stalowej ramy portalowej

Jeżeli płatwie są częściowo zabezpieczone, grubość warstwy materiału ogniochronnego można obliczyć, przyjmując w przypadku współczynnika przekroju narażenie kształtownika stalowego na działanie ognia z czterech stron, oddziaływanie pożaru standardowego przez jedną godzinę oraz temperaturę krytyczną wynoszącą 500°C.

Dodatkowe zalecenia projektowe dotyczące prostych stalowych ram portalowych

W przypadku jednokondygnacyjnych budynków o prostych stalowych ramach portalowych, w których stosunek wysokości słupa do rozpiętości belki ramy (h/l) jest większy od wartości 0,4, model zniszczenia w kierunku na zewnątrz może zostać wyeliminowany przez zaprojektowanie połączeń pomiędzy słupami i fundamentem oraz samego fundamentu w taki sposób, by uzyskać wystarczającą nośność do przeniesienia obciążeń pionowych w warunkach pożaru oraz dodatkowego momentu zginającego wynoszącego 20% wartości granicznej momentu plastycznego w temperaturze normalnej.



Rysunek 5.19 Budynki jednokondygnacyjne z prostą stalową ramią portalową

Przykłady ścian przeciwpożarowych

Ściany przeciwpożarowe, w których zastosowano niektóre z powyższych zaleceń, zilustrowano na rysunku 5.20. Widać na nich wyraźnie, że ściany przeciwpożarowe nie zostały uszkodzone pomimo zniszczenia konstrukcji stalowej.



a) Samostateczna ściana przeciwpożarowa umieszczona pomiędzy dwoma niezależnymi konstrukcjami stalowymi



b) Częściowo zabezpieczona przed ogniem stalowa belka krzyżująca się ze ścianą przeciwpożarową przymocowaną do stalowych słupów

Rysunek 5.20 Zdjęcia ścian przeciwpożarowych po pożarze jednokondygnacyjnej konstrukcji stalowej

5.6.3 Zalecenia dotyczące ram stalowych zbudowanych z belek kratowych

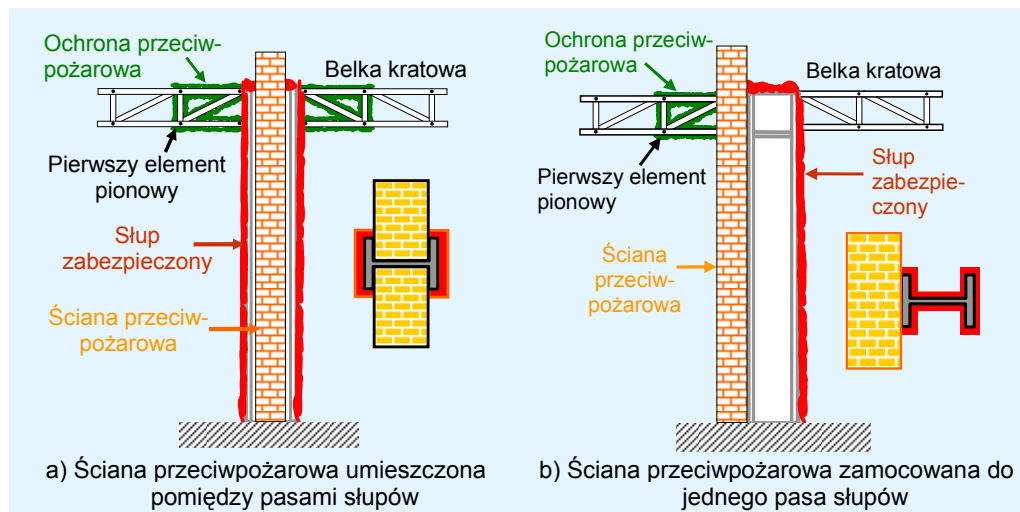
Ściana przeciwpożarowa prostopadła do ramy stalowej

Rysunek 5.21 przedstawia sytuację, w której ściana przeciwpożarowa jest umieszczona prostopadłe do ramy stalowej. W takiej konfiguracji:

- Słupy wbudowane w ścianę lub znajdujące się blisko niej muszą w każdym wypadku być objęte ochroną przeciwpożarową.
- Gdy ściana przeciwpożarowa umieszczona jest pomiędzy pasami, belki kratowe powinny być objęte ochroną przeciwpożarową po obu stronach tej ściany (patrz rysunek 5.21 (a)).
- Gdy ściana przeciwpożarowa jest przymocowana do jednego pasa, objęte ochroną powinny być tylko belki kratowe znajdujące się po stronie ściany. Belki te powinny być objęte ochroną przeciwpożarową co najmniej na długości równej odległości ściany do pierwszego pionowego elementu ramy kratowej (patrz rysunek 5.21 (b)).
- Ponieważ płatwie nie przechodzą przez ścianę przeciwpożarową, nie ma potrzeby rozważania żadnych szczególnych czynników.

Grubość warstwy materiału ogniochronnego zastosowanego w przypadku słupów można w prosty sposób obliczyć, przyjmując temperaturę krytyczną 500°C i stosując te same warunki ognioodporności co w przypadku ścian przeciwpożarowych. Ochroną przeciwpożarową należy objąć słupy na całej ich wysokości.

Jeżeli belki kratowe chronione są częściowo, grubość materiału ogniochronnego można obliczyć, zakładając w przypadku współczynnika przekroju: narażenie kształtownika stalowego na działanie ognia z czterech stron — w odniesieniu do dolnych pasów dźwigarów kratowych, elementów pionowych i krzyżulców — oraz z trzech stron — w odniesieniu do górnych pasów dźwigarów kratowych. Można zastosować oddziaływanie pożaru standardowego przez jedną godzinę oraz temperaturę krytyczną wynoszącą 500°C.



Rysunek 5.21 Szczegóły projektowe w pobliżu ścian przeciwpożarowych prostopadłych do stalowej ramy z belką kratową

Ściana przeciwpożarowa równoległa do ramy stalowej

Rysunek 5.22 przedstawia sytuację, w której ściana przeciwpożarowa jest umieszczona równolegle do ramy stalowej. W takiej konfiguracji:

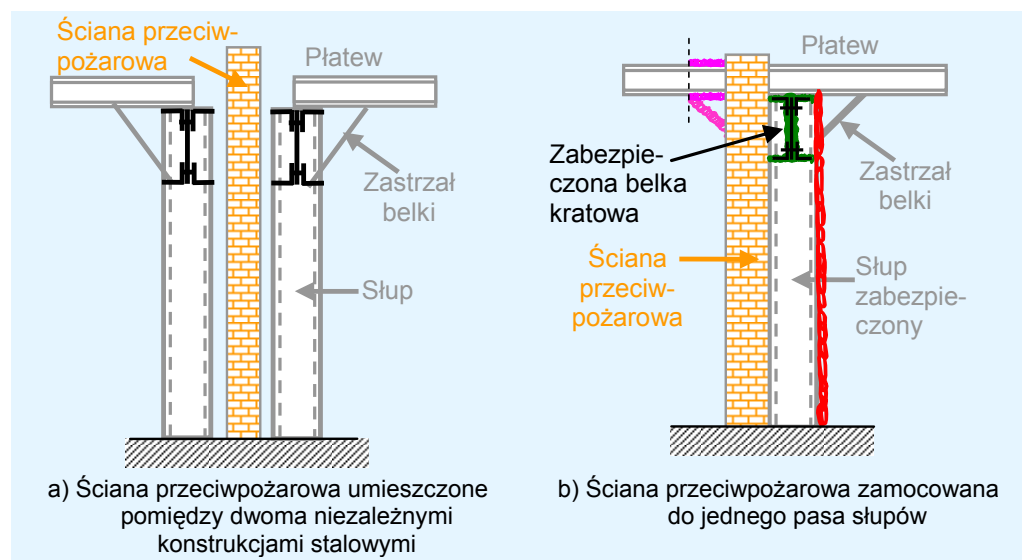
- Postawienie ściany w tej samej płaszczyźnie co rama nie jest praktyczne, gdyż trudno utrzymać jej ciągłość na całej wysokości belki kratowej. Z tego względu ściany przeciwpożarowe równoległe do ramy są zwykle umieszczane albo obok ramy stalowej, stykając się z nią, albo pomiędzy dwiema niezależnymi konstrukcjami stalowymi.
- Gdy ściana przeciwpożarowa jest przymocowana do ramy stalowej, słupy oraz belki muszą być objęte ochroną przeciwpożarową (patrz rysunek 5.22 (b)). Dodatkowo, gdy konstrukcja dachu wykonana jest z płatwi, płatwie oraz zastrzały belki znajdujące się w pobliżu ściany muszą być zabezpieczone przed ogniem co najmniej na długości odpowiadającej odległości pomiędzy ścianą a połączeniem płatew/zastrzał belki.
- Gdy ściana przeciwpożarowa umieszczona jest pomiędzy dwiema niezależnymi konstrukcjami stalowymi, nie jest wymagana żadna ochrona przeciwpożarowa (patrz rysunek 5.22 (a)).

Jeśli słupy są objęte ochroną przeciwpożarową, grubość warstwy materiału ogniochronnego można obliczyć, przyjmując temperaturę krytyczną 500°C i stosując te same warunki ognioodporności co w przypadku ścian przeciwpożarowych. Ochroną przeciwpożarową należy objąć słupy na całej ich wysokości.

Jeżeli belki kratowe są chronione, grubość materiału ogniochronnego można obliczyć, zakładając w przypadku współczynnika przekroju: narażenie kształtownika stalowego na działanie ognia z czterech stron — w odniesieniu do dolnych pasów dźwigarów kratowych, elementów pionowych i krzyżulców — oraz

z trzech stron — w odniesieniu do górnych pasów dźwigarów kratowych. Można założyć oddziaływanie pożaru standardowego przez jedną godzinę oraz temperaturę krytyczną wynoszącą 500°C . Ochroną przeciwpożarową należy objąć belki kratowe na całej ich długości.

Grubość warstwy materiału ogniochronnego zabezpieczającego płatwie oraz zastrzały belki można łatwo obliczyć, przyjmując w przypadku współczynnika przekroju narażenie kształtownika stalowego na działanie ognia z czterech stron, oddziaływanie pożaru standardowego przez jedną godzinę oraz temperaturę krytyczną wynoszącą 500°C .



Rysunek 5.22 Szczegół projektowy w pobliżu ścian przeciwpożarowych równoległych do stalowej ramy z belką kratową

5.6.4 Zalecenia dotyczące układu stężeń

Wymaganie dotyczące zabezpieczenia budynku przed zawaleniem się konstrukcji na zewnątrz w kierunku wzdłużnym (prostopadle do ram stalowych) można spełnić przez zastosowanie odpowiednich układów stężeń. W szczególności każda ze stref musi mieć swój własny układ stężeń.

Ściana przeciwpożarowa prostopadła do ramy stalowej

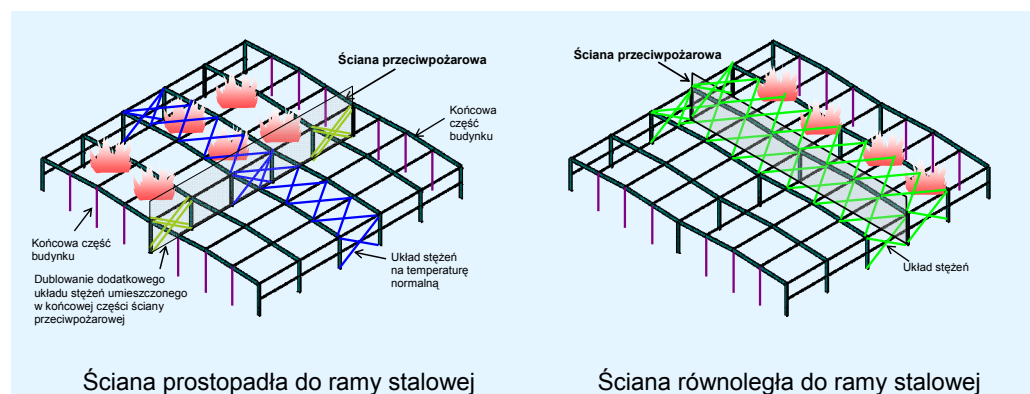
Rysunek 5.23 (a) przedstawia sytuację, w której ściana przeciwpożarowa jest umieszczona prostopadle do ramy stalowej. W takiej konfiguracji:

- Aby zapewnić integralność ściany przeciwpożarowej, należy zastosować dodatkowe układy stężeń pionowych na obu jej końcach. Takie układy stężeń powinny być projektowane z myślą o podtrzymywaniu obciążenia poziomego, którego wartość przyjmuje się na poziomie 20% normalnego obciążenia wiatrem (zgodnie z kombinacją oddziaływań w warunkach pożaru), obliczonego dla powierzchni ściany szczytowej ograniczonej na szerokości do obszaru pomiędzy jej słupkami.
- Należy zastosować podwójne układy stężeń (tj. układy stężeń po obu stronach ścian przeciwpożarowych) lub zapewnić ochronę układu stężeń.
- Układy stężeń należy rozplanować w taki sposób, aby nie przysparzały problemów w przypadku obliczeń w warunkach temperatury normalnej, np. przez dostosowanie ruchu złącza kompensacyjnego.

Ściana przeciwpożarowa równoległa do ramy stalowej

Rysunek 5.23 (b) przedstawia sytuację, w której ściana przeciwpożarowa jest umieszczona równolegle do ramy stalowej. W takiej konfiguracji:

- Należy zamontować układy stężeń (stężenie pionowe i poziome na dachu) w każdej ze stref. Rozwiązanie to może wymagać stosowania dodatkowych układów stężeń w warunkach normalnych.
- Projekt każdego układu stężeń powinien gwarantować odpowiednią stateczność w warunkach normalnych, a w warunkach pożaru zapewniać przeniesienie rozłożonego równomiernie obciążenia poziomego [N/m] przyjmującego wartość $F = 1,19 \times (G + \psi_1 \times S_n) \times l_f$, gdzie l_f jest odstępem pomiędzy ramami stalowymi, G jest oddziaływaniem stałym obejmującym nadmierne obciążenie instalacją, S_n jest obciążeniem śniegiem, a ψ_1 jest odpowiednim współczynnikiem kombinacji częściej podanym we właściwym Załączniku krajowym do normy EN 1990.
- Jeżeli ściana przeciwpożarowa jest przymocowana do jednego pasa słupów, elementy układów stężeń muszą być przymocowane do sztywnych elementów stalowych podpierających płatwie po stronie tej ściany.



Rysunek 5.23 Zalecenia dotyczące układu stężeń

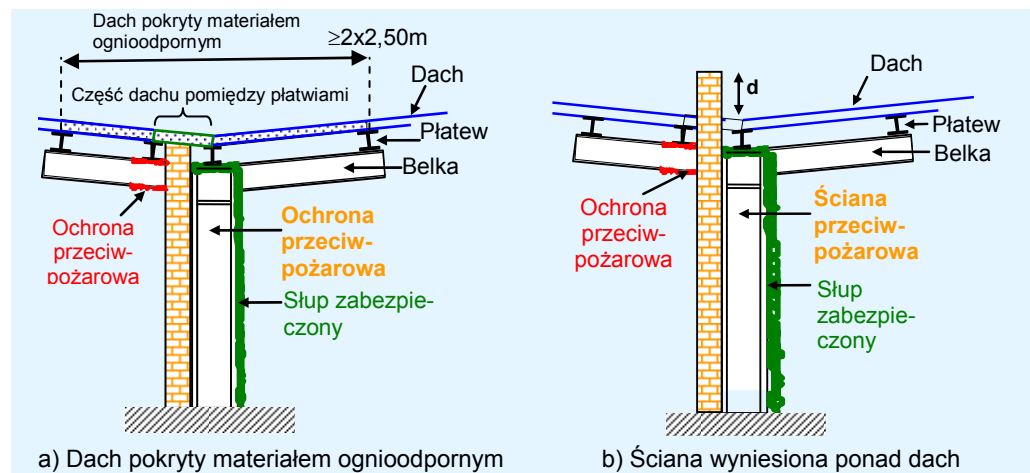
5.6.5 Zalecenia dotyczące systemów dachowych nad elementami oddzielającymi

Części dachu nad poszczególnymi strefami powinny być niezależne i skonstruowane w oparciu o następujące zalecenia (patrz rysunek 5.24 (a)):

- płatwie powinny znajdować się po każdej stronie ściany przeciwpożarowej,
- dach powinien być uszczelniony po obu stronach ściany przeciwpożarowej,
- dach po każdej stronie ściany powinien być zabezpieczony przeciwpożarowo na szerokości ponad 2,50 m.

Rozwiązaniem alternatywnym jest wydłużenie ściany ponad dach na określoną wysokość d (patrz rysunek 5.24 (b)).

Przepisy krajowe mogą określać inne specjalne wymagania dotyczące pokrycia dachów przyległych do ścian przeciwpożarowych.



Rysunek 5.24 System dachowy nad elementami oddzielającymi

6 WYTYCZNE DOTYCZĄCE STOSOWANIA BARDZIEJ ZAAWANSOWANYCH ROZWIĄZAŃ

Niniejszy rozdział zawiera przegląd zaawansowanych modeli obliczeniowych dostępnych w modelowaniu pożaru, modelowaniu termicznym oraz konstrukcyjnym, które można wykorzystać podczas projektowania ze względu na warunki pożarowe^[9,16].

6.1 Modele pożaru

Do modelowania rozwoju prawdziwych pożarów dostępne są dwa rodzaje modeli numerycznych: modele strefowe oraz modele pól. Modele te pozwalają wyliczyć wartość temperatury, określić sposób opadania dymu, rozprzestrzeniania się ognia, czas do rozgorzenia i wiele innych zjawisk.

6.1.1 Modele strefowe

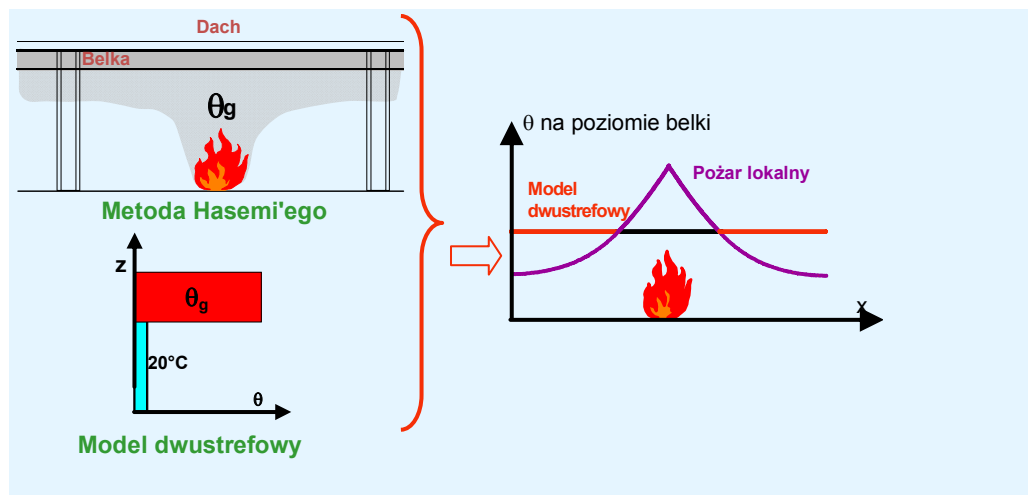
Najprostszym modelem jest jednostrefowy model pożarów w pełni rozwiniętych (po osiągnięciu punktu rozgorzenia), w którym zakłada się, że warunki panujące w strefie pożaru są jednolite i reprezentowane przez jedną wartość temperatury.

Model dwustrefowy może być stosowany do opisanie warunków przed osiągnięciem punktu rozgorzenia, głównie w fazie rozwoju pożaru. Model ten oparty jest na hipotezie stratyfikacji dymu dzielącej strefę pożarową na dwie wyraźne warstwy: gorącą warstwę wyższą (w której gromadzi się większa część dymu i ciepła pożarowego) oraz chłodną warstwę niższą (która pozostaje stosunkowo wolna od dymu). Słup ognia zasila strefę gorącą znajdującą się bezpośrednio nad miejscem pożaru. Temperatura każdej warstwy obliczana jest na podstawie zasady zachowania energii, ilość toksycznych produktów spalania w każdej warstwie — na podstawie prawa stałości składu związków chemicznych, a rozmiar każdej strefy — z zasady zachowania masy. Porywanie kropelek cieczy przez strumień gazu, wymianę ciepła pomiędzy strefami oraz przepływ masy przez otwory łączące przyległe strefy regulują proste zasady. W wyniku symulacji otrzymuje się zmiany temperatury gazu w każdej z dwóch warstw, temperatury ściany, strumienia przepływającego przez otwory oraz grubości każdej z warstw w funkcji czasu. Grubość warstwy niższej, która pozostaje raczej chłodna i nie zawiera produktów spalania, jest ważnym czynnikiem oceny warunków bezpiecznej ewakuacji osób przebywających w danej strefie. Często efekt lokalny w pobliżu pożaru można przeanalizować, używając prostego modelu, jak np. metodologia Hasemi'ego z modelami dwustrefowymi. Połączenie obu modeli umożliwia zatem wyznaczenie temperatury gazu w polu znajdującym się w pobliżu pożaru i w większej odległości od niego (patrz rysunek 6.1).

Gdy grubość warstwy niższej jest zbyt mała w porównaniu z wysokością strefy, założenie dwustrefowe przestaje obowiązywać i lepszym rozwiązaniem jest użycie modelu jednostrefowego. Ponadto model jednostrefowy będzie zwykle lepszym założeniem od modelu dwustrefowego, jeżeli obszar objęty pożarem jest duży w porównaniu z powierzchnią podłogi.

Niektóre modele strefowe oferują możliwość zmiany z modelu dwustrefowego na jednostrefowy, gdy zaistnieją pewne warunki dotyczące temperatury, powierzchni objętej pożarem oraz grubości warstwy dymu (odpowiadające rozgorzeniu).

Nadal jest również możliwy wybór strategii dwustrefowej bądź jednostrefowej na cały czas trwania pożaru. Za pomocą tych strategii cała symulacja przeprowadzana jest z uwzględnieniem jednej lub dwóch stref — od momentu rozpoczęcia do zakończenia obliczeń. Nie są wprowadzane żadne zmiany dotyczące szybkości wydzielania ciepła, poza tymi w modelach spalania.



Rysunek 6.1 Połączenie modelu dwustrefowego z metodą Hasemi'ego

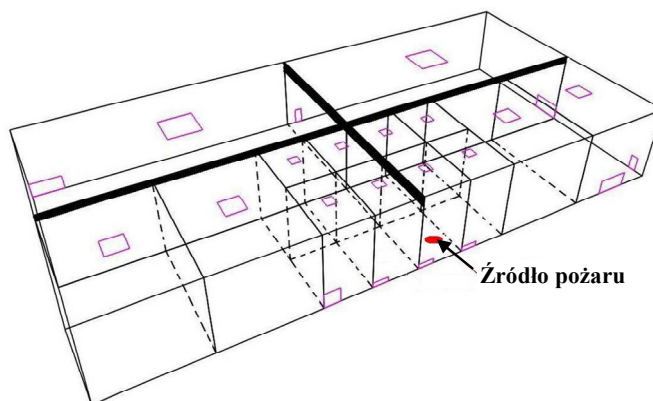
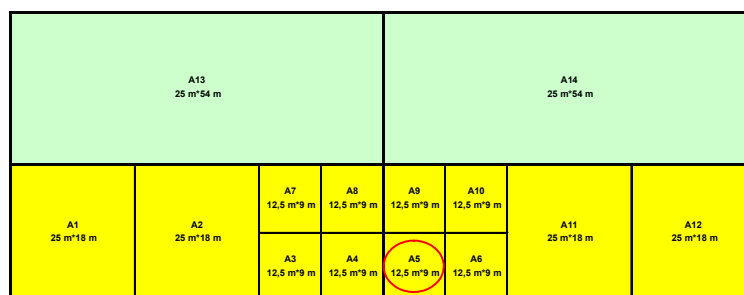
Niektóre spośród bardziej złożonych modeli strefowych umożliwiają przeprowadzanie obliczeń promieniowania pomiędzy warstwą wyższą a obiektami znajdującymi się w pomieszczeniu. Mogą także udostępniać analizę wielu słupów ognia oraz wielu stref pożarowych z uwzględnieniem wymiany mas między każdą ze stref (patrz rysunek 6.2).

Danymi wejściowymi są zwykle: geometria pomieszczenia, konstrukcja pomieszczenia (wraz z wszystkimi ścianami, podłogami i sufitami), liczba kanałów wentylacyjnych (lub otworów) i ich wymiary, charakterystyka wyposażenia pomieszczenia oraz dane pożarowe (takie jak krzywa szybkości wydzielania ciepła, intensywność pirolizy, ciepło spalania paliwa). Danymi wyjściowymi są zwykle: przewidywany czas aktywacji tryskacza oraz czujnika pożarowego, czas do osiągnięcia punktu rozgorzenia, temperatura górnej i dolnej warstwy, wysokość warstwy dymu oraz obecność związków chemicznych.

Obciążenie ogniowe można uważać za rozłożone równomiernie, jeżeli materiał palny jest obecny w mniejszym lub większym stopniu na całej powierzchni podłogi w strefie objętej pożarem i gdy gęstość tego obciążenia (ilość paliwa na jednostkę powierzchni podłogi) jest mniej więcej stała. Obciążenie ogniowe powinno z kolei zostać uznane za „lokalne”, jeżeli materiał palny jest zgrupowany na dość małej powierzchni w porównaniu do pozostałej, wolnej od tego materiału powierzchni podłogi.

Istotnym parametrem w zaawansowanych modelach pożaru jest szybkość wydzielania ciepła. Przyjętą praktyką podczas projektowania jest odwoływanie się do wartości podanych w normie EN 1991-1-2.

W przypadku nieregularnych lub skomplikowanych geometrii budynku, złożonych systemów wentylacji oraz tam, gdzie w określonych punktach wymagana jest większa dokładność określenia poziomów narażenia na oddziaływanie ciepła konwekcyjnego lub radiacyjnego, należy rozważyć użycie modelu pola.



Rysunek 6.2 Przykład modelowania pożaru w budynku przemysłowym za pomocą modeli strefowych

6.1.2 Modele pól

Modele pól (modele obliczeniowej mechaniki płynów) są najbardziej zaawansowanymi modelami deterministycznymi do symulacji pożarów wewnętrznych. Obejmują one podmodele dla turbulencji, wymiany ciepła oraz spalania.

Technika modelowania metodą obliczeniowej mechaniki płynów (CFD) oparta jest na rozwiązaniu pełnego, trójwymiarowego układu zależnych od czasu równań podstawowych zasad zachowania (masy, pędu i energii). Rozpatrywana kubatura, zazwyczaj strefa pożarowa, jest dzielona na bardzo dużą liczbę (czasem setki tysięcy lub nawet miliony) komórek. Przybliżona liczba komórek odpowiednia dla rozpatrywanej strefy będzie zależeć od jej geometrii, żądanej dokładności oraz, z praktycznego punktu widzenia, od szybkości komputera i dostępnej pamięci.

Istnieją trzy rodzaje modeli pól w zależności od zastosowanej w modelu metody analizy przepływów turbulentnych:

- Bezpośrednie symulacje numeryczne (DNS, Direct Numerical Simulations): podstawowe równania są rozwiązywane bezpośrednio, ale wymagają zastosowania bardzo małych kroków w czasie i przestrzeni w celu przeprowadzenia symulacji całego czasu i wszystkich skali przestrzennych procesów turbulentnych i chemicznych. Metoda DNS wymaga użycia komputerów o dużej mocy obliczeniowej i jest wykorzystywana w badaniach akademickich lub ograniczona do prostych zastosowań.
- Symulacja metodą wielkich wirów (LES, Large Eddy Simulation): metoda pozwala na obliczanie dużych przepływów, podczas gdy efekty na mniejszą skalę są modelowane przy zastosowaniu modelu niższego poziomu (sub-grid scale model). Najczęściej wykorzystywanym modelem niższego poziomu jest model Smagorinskiego.
- Metoda RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes): podstawowe równania zostają uśrednione i modelowane są przepływy turbulentne we wszystkich skalach. Najczęściej wykorzystywanym modelem jest model $k - \varepsilon$.

Dane wejściowe są takie same jak w przypadku modelu strefowego, natomiast wymagany jest większy poziom szczegółowości. Danymi wejściowymi są zwykle: geometria pomieszczenia, konstrukcja pomieszczenia (wraz z wszystkimi ścianami, podłogami i sufitami), liczba kanałów wentylacyjnych (lub otworów) i ich wymiary, charakterystyka wyposażenia pomieszczenia, charakterystyka paliwa/spalania, parametry turbulencji oraz promieniowania.

Danymi wyjściowymi są: ruchy dymu i ciepła, przewidywany czas aktywacji tryskacza oraz czujnika pożarowego, czas do osiągnięcia punktu rozgorzenia, temperatura w danym obszarze, prędkości, wysokość warstwy dymu oraz obecność związków chemicznych.

Ze względu na złożoność oraz wymagany czas procesora modele pól są sporadycznie wykorzystywane do oceny ognioodporności konstrukcji, zwłaszcza w przypadku w pełni rozwiniętego pożaru. W dziedzinie inżynierii pożarowej zastosowanie modeli pól jest często ograniczone do szczególnych przypadków o skomplikowanej geometrii.

6.2 Modele termiczne

Do wykonania obliczeń rozkładu temperatur w konstrukcji objętej pożarem można wykorzystać zaawansowane modele wymiany ciepła. Opierają się one w większości na metodzie różnic skończonych bądź metodzie elementów skończonych. Wykorzystywane są często do oszacowania gradientów temperatury w elementach konstrukcyjnych zbudowanych głównie z materiałów o niskiej przewodności cieplnej i/lub dużej zawartości wilgoci, takich jak beton. Dodatkowo zaawansowane modele wymiany ciepła można stosować w odniesieniu do elementów konstrukcyjnych w warunkach pożaru nominalnego lub pożaru naturalnego.

Metody te muszą uwzględniać nieliniowość wywołowaną zależnością temperatury od własności materiałów oraz warunków granicznych. Jak powszechnie przyjmuje się w procesie projektowania z uwagi na warunki pożarowe, podczas pożaru ciepło przenoszone jest na nieosłonięte powierzchnie głównie przez mechanizmy konwekcji i promieniowania. Wewnątrz materiałów jednorodnych, takich jak stal, ciepło przenoszone jest wyłącznie na zasadzie przewodzenia. Z kolei w przypadku materiałów porowatych, takich jak beton, lub materiałów, w których występują wgłębienia, wymiana ciepła jest problemem bardziej złożonym. Trzy procesy: przewodzenie, konwekcja oraz promieniowanie mogą występować jednocześnie. Dodatkowo może zachodzić również wymiana masy. Jednak dla uproszczenia analiza termiczna obejmuje bezpośrednio wyłącznie proces dominujący, a procesy drugorzędne uwzględniane są na drodze odpowiednich modyfikacji. Przy projektowaniu z uwagi na warunki pożarowe przyjmuje się zazwyczaj, że beton jest materiałem jednorodnym, a wymiana ciepła następuje głównie przez przewodzenie. Wymiana ciepła przez konwekcję oraz promieniowanie zachodząca w porach jest postrzegana jako proces drugorzędny i nie jest uwzględniana bezpośrednio, ale we właściwościach termicznych dostępnych w przypadku betonu (przewodność, ciepło właściwe). Ponadto wymiana masy jest zazwyczaj pomijana i uwzględniane jest jedynie parowanie wilgoci zawartej w betonie. Wpływ wilgoci (przy założeniu jej równomiernego rozłożenia w betonie) jest analizowany w sposób uproszczony, zakładający, że gdy temperatura części betonowych osiąga 120°C, całość ciepła przenoszonego do tej części zużywana jest na odparowanie wody. Przemieszczenia wilgoci są rzadko modelowane. W przypadku elementów zespolonych styk pomiędzy częściami stalowymi a betonowymi można uważać za idealny (bez szczelin). Promieniowanie w kanałach wewnętrznych (jak stalowe kształtowniki zamknięte) powinno zostać rozpatrzone w analizie termicznej.

Zasadniczo tam, gdzie wpływ ognia ma charakter lokalny i ogranicza się do części struktury, rozkład temperatury wzdłuż elementów konstrukcyjnych może być mocno nierównomierny. Tak więc precyzyjne obliczenia temperatury powinny zostać przeprowadzone na drodze pełnej, trójwymiarowej analizy termicznej. Jednak z powodu zbyt długiego czasu obliczeniowego takiej analizy często dopuszczalnym uproszczeniem jest przeprowadzenie szeregu dwuwymiarowych analiz termicznych przekrojów poprzecznych elementów konstrukcyjnych. Obliczenia przeprowadzane są wówczas w odpowiednim miejscu na długości każdego elementu konstrukcyjnego i na ich drodze uzyskiwane są gradienty temperatury przy założeniu liniowej odchyłki pomiędzy przyległymi profilami temperaturowymi. Takie podejście daje zwykle wystarczające przybliżenie do rzeczywistego profilu temperaturowego

elementów i pozwala na znaczące zmniejszenie nakładów związanych z modelowaniem i obliczeniami numerycznymi. W dwuwymiarowej analizie termicznej przekroje poprzeczne elementów są zwykle poddawane dyskretyzacji za pomocą trójkątnych bądź czworobocznych elementów płaskich zdolnych przewodzić ciepło. Tym samym istnieje możliwość utworzenia modeli wszystkich kształtowników stosowanych w budownictwie. Każdy z elementów płaskich opisujących przekrój poprzeczny może być wykonany z innego, zależnego od temperatury materiału, np. ze stali, betonu lub z materiałów izolacyjnych.

Warunkami brzegowymi mogą być zalecane temperatury bądź zalecany oddziałujący strumień ciepła w celu symulacji wymiany ciepła przez konwekcję i promieniowanie od źródła ognia do wystawionych na jego działanie powierzchni czołowych elementów konstrukcyjnych. Wpływ nierównomiernego wystawienia na oddziaływanie termiczne może być uwzględniony podczas modelowania za pomocą odpowiednich warunków brzegowych.

Wpływ odkształceń mechanicznych (np. wyboczenia elementu stalowego, pęknięcia i kruszenia betonu itp.) na wzrost temperatury elementów konstrukcyjnych zostaje pominięty, co jest standardową praktyką. W rezultacie geometria elementów konstrukcyjnych nie zmienia się podczas analizy.

Podobnie jak w przypadku modeli prostych, korzystanie z modeli zaawansowanych wymaga wiedzy na temat geometrii elementów konstrukcyjnych, właściwości termicznych materiałów (przewodności cieplnej, ciepła właściwego, gęstości, wilgotności...) oraz na temat współczynników wymiany ciepła na granicach elementu (emisyjność, współczynnik wymiany ciepła przez konwekcję).

Zazwyczaj w projektowaniu z uwagi na warunki pożarowe zależne od temperatury termiczne właściwości materiałowe betonu oraz stali są przyjmowane na podstawie norm EN 1992-1-2 oraz EN 1993-1-2, natomiast współczynniki wymiany ciepła są odpowiednio podane w normie EN 1991-1-2.

6.3 Modele konstrukcyjne

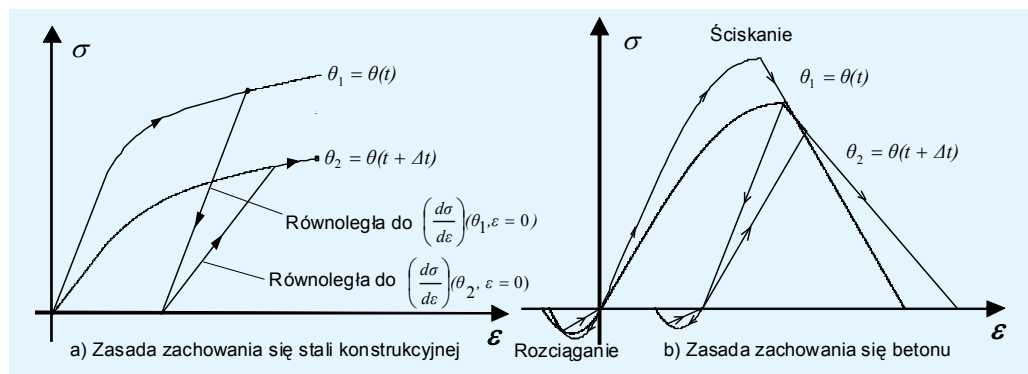
Zaawansowane modele numeryczne do analizy odpowiedzi mechanicznej powinny opierać się na uznanych zasadach i założeniach teorii mechaniki budowli. Są to zazwyczaj modele elementów skończonych. Mogą one symulować zachowanie się części bądź całości konstrukcji w modelach statycznych lub dynamicznych, dostarczając informacji o przemieszczeniach, stanach naprężeń i odkształceń w elementach konstrukcyjnych oraz o czasie zawalenia się całego budynku, jeżeli dochodzi do niego podczas trwania pożaru. Analiza zachowania się konstrukcji w warunkach pożaru może uwzględniać zmiany własności mechanicznych wraz ze wzrostem temperatury, jak również nieliniowe własności geometryczne i materiałowe. Przejściowe warunki nagrzewania się konstrukcji podczas pożaru są modelowane raczej przy zastosowaniu procedur krokowych rozwiązań iteracyjnych, niż analizy stanu ustalonego.

Niniejszy rozdział przedstawia niektóre spośród głównych aspektów związanych z modelowaniem zachowania się konstrukcji jednokondygnacyjnych z ramami stalowymi bądź zespolonymi w warunkach pożarowych, ze szczególnym uwzględnieniem modeli materiałowych, procedur obliczeniowych, modelowania konstrukcyjnego itd.

Zaawansowane modele obliczeniowe mogą być stosowane w powiązaniu z krzywą ogrzewania pod warunkiem, że znane są właściwości materiału w stosownych zakresach temperatur, a modele materiałowe odzwierciedlają zachowanie rzeczywiste. W podwyższonej temperaturze krzywa naprężenie-odkształcenie dla stali bazuje na liniowo-eliptycznym modelu plastycznym, w przeciwieństwie do obliczeń konstrukcji w warunkach temperatury normalnej, gdzie stosowany jest model sprężysto-plastyczny. W przypadku stali i betonu powszechnie stosowane są zależności naprężenie-odkształcenie podane w normach EN 1993-1-2 oraz EN 1994-1-2.

W warunkach pożaru pole temperatury elementu konstrukcyjnego zmienia się wraz z czasem. Ponieważ zależności naprężenie-odkształcenie materiałów są nieliniowe i zależne od temperatury, w zaawansowanym modelowaniu numerycznym należy zastosować odpowiedni model materiałowy, który umożliwi przejście z jednej krzywej zachowania na drugą w każdym kroku czasowym (a zatem i temperaturowym). W przypadku konstrukcji stalowych stosowany jest zwykle tak zwany kinematyczny model materiałowy przy założeniu, że przejście z jednej krzywej naprężenie-odkształcenie na inną podyktowane zmianą temperatury jest dokonywane przy pozostawieniu stałej wartości odkształcenia plastycznego (patrz rysunek 6.3). Model ten może być użyty w dowolnym stanie naprężeń stali (rozciągania lub ściskania). W przypadku betonu jest to bardziej skomplikowane, ponieważ materiał ten zachowuje się inaczej podczas rozciągania i podczas ściskania. Dlatego też konieczne są różne zasady przechodzenia pomiędzy krzywymi, gdy materiał poddawany jest ściskaniu lub rozciąganiu. Zazwyczaj ten model kinematyczny stosowany jest w najbardziej zaawansowanych modelach obliczeniowych do zastosowań inżynierii pożarowej.

Zachowanie stali często modelowane jest za pomocą konturu plastyczności Von Misesa obejmującego umocnienie. Zachowanie betonu poddawanego ściskaniu jest modelowane za pomocą konturu plastyczności Druckera-Pragera obejmującego umocnienie.



Rysunek 6.3 Kinematyczne modele materiałowe stali i betonu

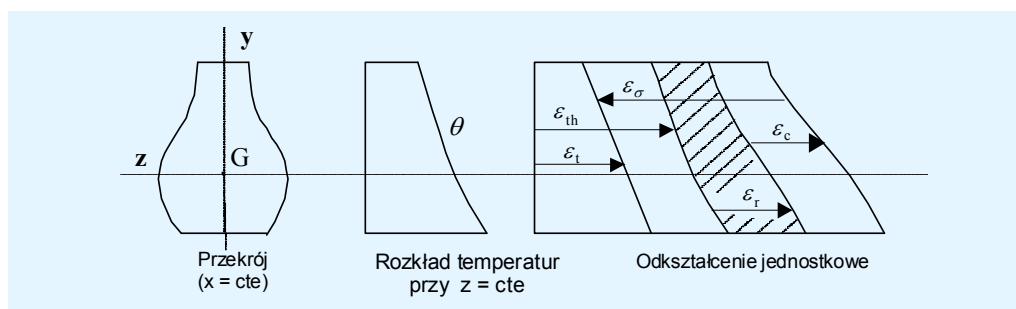
Kolejnym wartym odnotowania aspektem stosowania zaawansowanych modeli obliczeniowych w przypadku stali oraz konstrukcji zespolonych znajdujących się w warunkach pożaru naturalnego jest zachowanie się materiału w fazie chłodzenia. Jak powszechnie wiadomo, w przypadku najczęściej stosowanych gatunków stali zmiana właściwości mechanicznych występująca wraz ze zmianą temperatury uważana jest za odwracalną, co oznacza, że stal po ostygnięciu ma takie same właściwości mechaniczne, jakie miała pierwotnie. Jednakże zjawisko to nie występuje w przypadku betonu, którego skład po podgrzaniu do wyższej temperatury ulega całkowitej zmianie. Po ochłodzeniu beton nie odzyskuje swojej pierwotnej wytrzymałości. W rzeczywistości jego wytrzymałość może być mniejsza po ostygnięciu niż w momencie, gdy temperatura była maksymalna.

Należy uwzględnić wpływ rozszerzalności cieplnej. Jest to realizowane przez założenie, że całkowite odkształcenie elementów konstrukcyjnych wyraża się sumą niezależnych warunków:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{th} + (\varepsilon_\sigma + \varepsilon_c + \varepsilon_{tr}) + \varepsilon_r \quad (30)$$

gdzie ε_{th} , ε_σ , ε_r oraz ε_c są odkształceniami spowodowanymi kolejno: rozszerzalnością cieplną, naprężeniem, naprężeniem szczątkowym i pełzaniem. Współczynnik ε_{tr} jest odkształceniem spowodowanym przejściowymi i niejednorodnymi warunkami nagrzewania betonu (zwykle pomijane).

Zakłada się, że w Eurokodach odkształcenie pełzania uwzględnione jest pośrednio w zależnościach naprężenie-odkształcenie stali i betonu. Naprężenie szczątkowe jest zwykle pomijane, za wyjątkiem niektórych specjalistycznych analiz konstrukcyjnych. Odkształcenie termiczne to rozszerzanie cieplne ($\Delta L/L$), które zachodzi w większości materiałów podczas ich podgrzewania. Odkształcenia termiczne nie są ważne w projektowaniu z uwagi na warunki pożarowe swobodnie podpartych elementów konstrukcyjnych, ale muszą być uwzględnione w przypadku elementów zespolonych, ram oraz złożonych układów konstrukcyjnych, w szczególności, gdy elementy konstrukcyjne utwierdzone są przez inne części konstrukcji (jak w przypadku konstrukcji jednokondygnacyjnych podzielonych na pomieszczenia oddzielone od siebie ścianami pożarowymi), ponieważ naprężenia indukowane termicznie — powodowane zarówno wzrostem, jak i różnicami temperatury — mogą generować znaczące, dodatkowe siły wewnętrzne.



Rysunek 6.4 Sumowanie odkształceń materiału w zaawansowanym modelowaniu numerycznym

Zazwyczaj analiza konstrukcyjna w warunkach pożaru oparta jest na analizie stanu granicznego nośności, przy którym występuje równowaga pomiędzy nośnością a obciążeniem konstrukcji. Jednak znaczące przemieszczenie konstrukcji będzie nieuniknione zarówno z powodu zmiękczenia materiału, jak i jego rozszerzalności cieplnej, prowadzących do znacznego uplastycznienia materiału. Tym samym zaawansowana analiza pożaru obejmuje nieliniowe obliczenia sprężysto-plastyczne, w których zarówno wytrzymałość, jak i sztywność zmieniają się nieliniowo. Z matematycznego punktu widzenia rozwiązania takiej analizy nie można uzyskać w sposób bezpośredni, ale należy wykorzystać procedurę iteracyjną:

- W celu wyznaczenia stanu równowagi konstrukcji w różnych momentach (przy różnych polach temperaturowych) przeprowadzana jest analiza krokowa.
- W każdym kroku czasowym stan równowagi konstrukcji zachowującej się w sposób sprężysto-plastyczny wyznaczany jest w procedurze rozwiązania iteracyjnego.

Wykorzystywane są zazwyczaj różne rodzaje zbieżności, jak np. podstawowa metoda Newtona-Raphsona oraz zmodyfikowana metoda Newtona-Raphsona. Podstawowa metoda Newtona-Raphsona jest zalecana w przypadku konstrukcji wykonanych z elementów belkowych, natomiast zmodyfikowana metoda Newtona-Raphsona jest zalecana w przypadku konstrukcji wykonanych z elementów powłokowych.

Analiza statyczna jest zwykle wystarczająca w przypadku modelowania zachowania konstrukcji objętej pożarem. Jednakże miejscowe zniszczenie bądź niestateczność elementu konstrukcyjnego (jak np. zwichrzenie płatwi) nie prowadzą do zniszczenia całej konstrukcji. W konsekwencji analiza powinna przyjąć formę szeregu kolejnych analiz statycznych i dynamicznych umożliwiających ocenę niestateczności i pozwalających na uzyskanie kompletnego mechanizmu zniszczeń, dzięki któremu można przewidzieć wpływ miejscowego zniszczenia na zachowanie całej konstrukcji i śledzić jej ostateczne postępujące zniszczenie. Należy pamiętać o tym, że nie jest tu celem precyzyjne modelowanie zjawisk dynamicznych. Tak więc w celu określenia zjawisk przyspieszenia oraz tłumienia można stosować domyślne wartości zaszytych w modelach parametrów głównych.

Występujące warunki brzegowe powinny zostać właściwie odzwierciedlone. Częstą praktyką w projektowaniu konstrukcji jest założenie w przypadku podstaw słupów warunków odpowiadających podporom przegubowym. Jednak ze względu na to, że w praktyce podstawy słupów nigdy nie są w pełni przegubowe, dopuszczalne jest także zastosowanie połączeń półsztywnych — o ile dostępne są odpowiednie dane. Gdy modelowana jest jedynie część konstrukcji, należy we właściwy sposób uwzględnić niektóre warunki utwierdzenia tej części konstrukcji, która nie jest modelowana. Wybór warunków utwierdzenia, które zostaną zastosowane na granicach pomiędzy modelowaną częścią konstrukcji a częścią pozostałą, leży w gestii projektanta. Przykładowo, w przypadku granicy symetrii w modelu uwzględniane są ograniczenia przesunięcia równoległego w poprzek granicy symetrii oraz ograniczenia ruchu rotacyjnego względem dwóch osi głównych w płaszczyźnie symetrii.

Zwykle w projektowaniu z uwagi na warunki pożarowe ram stalowych oraz zespolonych ram stalowo-betonowych połączenia belka-słup są uważane za całkowicie sztywne. Jednak w przypadku ram stalowych zbudowanych z belek kratowych połączenia pomiędzy elementami belek kratowych oraz połączenia pomiędzy górnymi i dolnymi pasami dźwigarów belek kratowych oraz słupów mogą być uznane za przegubowe lub w pełni sztywne, w zależności od rodzaju kratownicy.

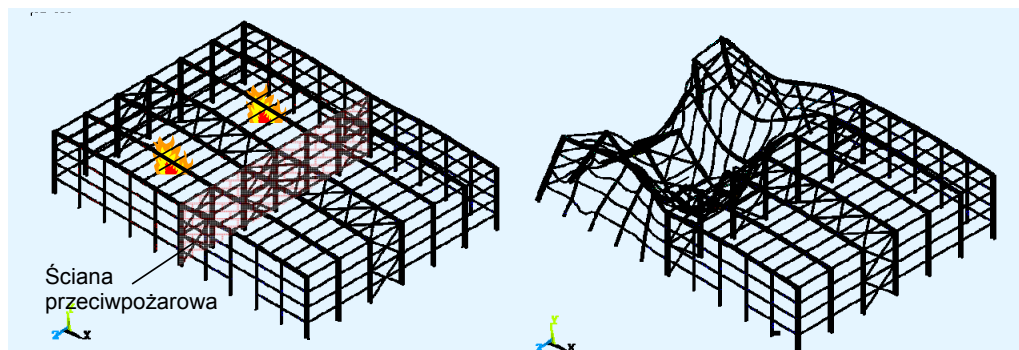
W przypadku konstrukcji o podwyższonej temperaturze należy przyjąć dwa rodzaje oddziaływań. Pierwszy rodzaj to obciążenie statyczne. Musi ono odpowiadać obciążeniu w warunkach pożaru. Na rodzaj drugi składa się wzrost temperatury (powyżej temperatury otoczenia) elementów konstrukcyjnych otrzymany z poprzednich analiz termicznych. Zakłada się, że warunki brzegowe przy podporach, jak również zastosowane obciążenia grawitacyjne pozostają stałe przez cały czas oddziaływania ognia.

Ważny jest wybór właściwej strategii modelowania konstrukcyjnego. Symulacja zachowania się (właściwości mechanicznych) konstrukcji jednokondygnacyjnej w warunkach pożaru może być przeprowadzona w formie analizy dwu- lub trójwymiarowej.

W analizie dwuwymiarowej symulacja przeprowadzana jest w płaszczyźnie każdej ramy portalowej, przy założeniu trójwymiarowych reakcji ramy, uwzględniających niestateczność poprzeczną elementów konstrukcyjnych (słupów, belek). W takim modelowaniu należy przyjąć odpowiednie warunki utwierdzenia w celu zapewnienia stateczności poprzecznej ramy. W rzeczywistości te utwierdzenia ograniczające wyboczenie z płaszczyzny są zapewniane przez konstrukcję dachu (np. płatwie), jak również przez elementy fasady przymocowane do słupów (ściany betonowe, panele warstwowe, blachy stalowe), dzięki czemu nie dochodzi do zniszczenia z płaszczyzny.

W analizie trójwymiarowej kilka równoległych ram portalowych, konstrukcja dachu (płatwie) oraz układ stężeń są modelowane w sposób bezpośredni (patrz rysunek 6.5). Główną cechą wyróżniającą analizę trójwymiarową jest to, że zjawiska oddziaływań wzajemnych zachodzące pomiędzy elementami będą rozpatrywane bezpośrednio. Możliwe jest dokładne uwzględnienie sposobu przenoszenia obciążenia z części podgrzanych (osłabionych części wewnątrz strefy pożarowej) na części chłodne (bardziej wytrzymałe części poza strefą pożarową), a także przeanalizowanie globalnego zachowania konstrukcji, co pozwala uzyskać bardziej realistyczną odpowiedź mechaniczną konstrukcji objętej pożarem. Koszt przeprowadzenia analizy trójwymiarowej jest znaczny ze względu na dużą liczbę elementów wykorzystywanych w modelowaniu.

Wybór pomiędzy analizą dwu- i trójwymiarową będzie zależny od kilku czynników, takich jak rodzaj konstrukcji (rama stalowe lub zespolona), wymiary budynku jednokondygnacyjnego, scenariusz pożarowy oraz cele projektowania z uwagi na warunki pożarowe (spełnienie wymagań metody tradycyjnej lub weryfikacja modelu zniszczenia).



Rysunek 6.5 Przykład trójwymiarowego modelowania mechanicznego

Podstawowe struktury elementów skończonych wykorzystanych do modelowania elementów konstrukcyjnych ramy przedstawiono poniżej. Pominęto elementy bryłowe, gdyż ich odwzorowanie numeryczne jest zbyt drogie.

LITERATURA

- 1 EN 1991-1-2:2002 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje — Część 1-2: Reguły ogólne — Oddziaływania na konstrukcje w warunkach pożaru
- 2 EN 1993-1-2:2003 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych — Część 1-2: Reguły ogólne — Obliczanie konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe
- 3 EN 1994-1-2:2003 Eurokod 4: Projektowanie konstrukcji zespolonych stalowo-betonowych — Część 1-2: Reguły ogólne — Oddziaływania na konstrukcje w warunkach pożaru
- 4 HOCKEY, S.M., REW, P.J.
Human response to thermal radiation
HSE Books, Wielka Brytania, 1996.
- 5 VASSART, O., CAJOT, L-G., ZHAO, B., DE LA QUINTA, J.MARTINEZ DE ARAGON, J., GRIFFIN, A.
Fire Safety of industrial halls and low-rise buildings: Realistic fire design, active safety measures, post-local failure simulation and performance based requirements
Projekt badawczy ECSC nr 7210-PR-378.
- 6 Badania RFCS: Fire safety of industrial hall, Przewodnik projektanta, ArcelorMittal, CTICM, Labein tecnalía, ULG, Directorate-General for research, Research Fund for Coal and Steel Unit, RFS2-CR-2007-00032, Luksemburg, 2007.
- 7 Raport dla ECCS: Fire building regulations for single-storey buildings in 9 European countries. Dokument RT915. Wersja z 2 czerwca 2002 r.
- 8 LENNON, T., MOORE, D., WANG, B. Y. C., BAILEY, G.
Designers' Guide to EN 1991-1-2, EN 1992- 1-2, EN 1993-1-2 and EN 1994-1-2
Actions on Structures Exposed to Fire and Structural Fire Design
Thomas Telford, 2007.
- 9 DIFISEK - Dissemination of Structural Fire Safety Engineering Knowledge
Projekt badawczy ECSC nr RFS-C2-03048.
- 10 PURKISS, J.A.
Fire safety design of structures
Butterworth-Heinemann, Oxford, Wielka Brytania
- 11 Risk Based Fire Resistance Requirements Competitive (RISK -REI),
projekt badawczy ECSC nr 7210-PR-378.
- 12 SIMMS, W.I., NEWMAN, G.M.
Single-storey steel framed building in fire boundary conditions (P313)
The Steel Construction Institute, 2002.
- 13 ECCS TC3: Euro-nomograms for fire exposed steelwork.
- 14 SD005a-EN-EU, Dane: Nomogram dla elementów stalowych osłoniętych,
www.steel-access.com
- 15 Badania RFCS: Fire safety of industrial hall, Przewodnik projektanta, ArcelorMittal, CTICM, Labein tecnalía, ULG, Directorate-General for research, Research Fund for Coal and Steel Unit, RFS2-CR-2007-00032, Luksemburg, 2007.
- 16 FRANSSEN J. M., KODUR V., ZAHARIA R.
Designing steel structures for fire safety
Balkema Book, 2009.

ZAŁĄCZNIK A Niemiecka procedura bezpieczeństwa pożarowego jednokondygnacyjnych budynków przemysłowych i handlowych

W Niemczech budynki handlowe i przemysłowe muszą spełniać wymagania wzorcowego prawa „Musterbauordnung” (MBO) oraz wszystkich państwowych przepisów budowlanych „Bauliche Anlagen und Räume besonderer Art und Nutzung” („Obiekty strukturalne i przestrzenie podlegające specjalnym wymaganiom i użytkowaniu”). W takich przypadkach oraz w celu spełnienia podstawowych wymagań (dotyczących bezpieczeństwa ludzi, bezpieczeństwa publicznego i ochrony środowiska) możliwe jest przyjęcie rozwiązań alternatywnych w stosunku do tradycyjnych państwowych przepisów budowlanych.

To ogólne stwierdzenie należy rozpatrywać w kontekście fizycznych i technicznych wymagań dotyczących ochrony przeciwpożarowej budynków w nawiązaniu do dokumentu „Wohngebäude und vergleichbare Nutzungen” („Zastosowania mieszkalne i podobne”), zgodnie z państwowymi przepisami budowlanymi. W przypadku obiektów handlowych i przemysłowych zastosowanie państwowych przepisów budowlanych nie jest ani konieczne, ani odpowiednie. Jeżeli chodzi o spełnienie ogólnych celów ochrony przeciwpożarowej, ważniejsze jest indywidualne rozpatrywanie poszczególnych budynków.

Zaleca się stosowanie standardowej procedury oceny wymagań, przy wykorzystaniu metod naukowych.

Ponieważ w świetle definicji zawartej w § 51 Abs.1 MBO budynki przemysłowe uważane są za „Sonderbauten” („budynki specjalne”) i zazwyczaj nie mogą być wyłączone z zakresu obowiązujących przepisów, celem wytycznych MIndBauRI (techniczne wymagania budowlane) jest określenie minimalnych wymagań dotyczących zapobiegania pożarom w tego typu konstrukcjach. Wytyczne MIndBauRI wykorzystują również procedury projektowe zawarte w normie DIN 18230-1: Warunki ochrony przeciwpożarowej budynków przemysłowych — projektowanie z uwagi na ognioodporność.

Odnosnie § 3 Abs. 3, Satz 3 MBO, który dopuszcza odchylenia od technicznych norm budowlanych, procedura ta ogranicza je do metod dozwolonych dla inżynierii pożarowej i wymaga, by były wyszczególnione zgodnie z Załącznikiem 1.

Celem tej procedury jest określenie minimum wymagań względem ochrony przeciwpożarowej budynków przemysłowych, w szczególności tych dotyczących:

- ognioodporności elementów oraz łatwopalności materiałów budowlanych;
- rozmiaru stref pożarowych i obszarów gaszenia pożaru;
- dostępności, lokalizacji oraz długości dróg ewakuacyjnych.

Dzięki tej procedurze właściciele budynku, projektanci, kreślarze oraz specjaliści uzyskują prostszy projekt, a władze otrzymują uzasadnienie złagodzenia stosowanych alternatywnie zasad MBO lub odejścia od nich. Procedura zapewnia kontrolę na budynkiem a organom zatwierdzającym dostarcza wzorzec dla zagrożeń równoważnych. Opracowano metodę projektową, która nie wymaga szczegółowych analiz inżynierskich ani specjalnych obliczeń. Jest odpowiedzią na zobowiązania prawne i oferuje prostą formę zatwierdzenia.

Wytyczne MIndBauRI odnoszą się do wszystkich budynków przemysłowych bez względu na ich wielkość. Nie mają zastosowania w przypadku:

- budynków przemysłowych, które używane są jedynie do przechowywania urządzeń i osprzętu technicznego, ani do budynków, do których dostęp wymagany jest jedynie tymczasowo w celach konserwacyjnych i inspekcyjnych;
- budynków przemysłowych, których większa część powierzchni jest otwarta, takich jak np. zadaszone obszary zewnętrzne lub otwarte magazyny;
- budynków, które ze względu na ich zachowanie podczas pożaru mogą zostać zasymilowane.

Dodatkowo procedura ta nie może być stosowana w przypadku półek wyższych niż 9,0 m (liczone do górnej krawędzi składowanego materiału).

Procedura ta może być także stosowana w celu dopuszczenia i uzasadnienia ustępstw w zakresie przepisów zgodnych z § 51 MBO dot. budynków i obiektów strukturalnych, które nie są bezpośrednio objęte zakresem MIndBauRI, chociaż pod względem zagrożenia pożarowego są porównywalne do konstrukcji przemysłowych.

Uzasadnienie rozluźnienia warunków § 51 Abs. 1 MBO może być uzyskane za pomocą jednej z następujących procedur.

- Procedura uproszczona

W procedurze zgodnie z Abs. 6 maksymalna powierzchnia strefy pożarowej dla obszaru części przeciwpożarowej będzie zależeć od klasyfikacji ognioodporności elementów podpierających i usztywniających, jak również od technicznej infrastruktury przeciwpożarowej danej konstrukcji.

- Procedura weryfikacji kompletnej

W procedurze zgodnie z Abs. 7 maksymalna powierzchnia obszaru oraz wymagania względem elementów zgodne z klasami ochrony przeciwpożarowej dla strefy pożarowej będą bazować na procedurze obliczeniowej zgodnej z normą DIN 18230-1.

- Metody inżynierii

Zamiast postępować według wymagań Abs. 6 oraz 7 można zastosować metody projektowe inżynierii pożarowej.

Korzystając z wymogów MIndBauRI, osoba opracowująca koncepcję ochrony przeciwpożarowej może wybrać, którą metodę (Abs. 6 czy 7) zastosuje. Jakkolwiek niedopuszczalne jest łączenie procedur.

W zakresie metod inżynierii pożarowej wymogi MIndBauRI określają zasady i warunki hipotez takiego projektowania. Regulują sposób weryfikacji i sprawdzania, jak również wykonania dokumentacji.

Wymagania MIndBauRI, który zostały wprowadzone jako standard w dziedzinie przepisów budowlanych we wszystkich landach niemieckich, są prawnie obowiązujące. W ramach stosowania wymagań MIndBauRI wyróżnia się kilka metod proceduralnych. Te same wymagania ogólne znajdują zastosowanie w przypadku wszystkich weryfikacji. Są one identyczne dla wszystkich procedur i muszą być przestrzegane. Obejmują wymagania dotyczące wody gaśniczej, systemów oddymiania, lokalizacji i dostępności, wyjść ewakuacyjnych oraz rozprzestrzeniania się ognia.

Wymagania dotyczące wody gaśniczej muszą zostać uzgodnione z jednostką straży pożarnej, pod którą podlega dany budynek i muszą uwzględniać powierzchnie oraz obciążenia ogniowe. Należy założyć spełnienie warunków zapotrzebowania na wodę gaśniczą przez okres dwóch godzin:

- minimum 96 m³/h w przypadku powierzchni do 2500 m²,
- minimum 192 m³/h w przypadku powierzchni większej niż 4000 m².

Wartości pośrednie mogą być interpolowane liniowo.

W przypadku budynków przemysłowych z automatycznymi systemami gaszenia pożarów objętość wody rzędu co najmniej 96 m³/h dostarczana przez jedną godzinę jest wystarczającą ilością do zgaszenia pożaru.

Każdy zakład przemysłowy lub magazyn o powierzchni przekraczającej 200 m² musi mieć w ścianie lub suficie otwory wentylacyjne zapewniające drogę ujścia dla dymu.

Poszczególne przestrzenie, których powierzchnie przekraczają 1600 m² muszą być wyposażone w system oddymiania, który umożliwi przeprowadzenie akcji gaśniczej. Wynika to z faktu, że udowodniono matematycznie możliwość wystąpienia warstwy dymu o wysokości 2,5 m.

Oprócz tego ważna jest lokalizacja oraz dostępność do każdej ze stref pożarowych — przynajmniej jeden z boków powinien być zlokalizowany przy jednej ze ścian zewnętrznych i z tego miejsca powinien być dostępny dla straży pożarnej. Warunek ten nie dotyczy stref pożarowych z automatycznym systemem gaszenia pożaru.

Niezależne oraz powiązane konstrukcje przemysłowe o fundamentach większych niż 5000 m² powinny być dostępne dla pojazdów straży pożarnej z każdej strony. Te drogi dostępne muszą spełniać wymagania użyteczności dla straży pożarnej.

Drogi dostępne dla straży pożarnej, obszary akcji oraz inne drogi powinny być zawsze przejezdne. Powinny być zawsze łatwo rozpoznawalne.

Do wyjść ewakuacyjnych budynków przemysłowych zaliczane są główne korytarze produkcyjne oraz powierzchnie magazynowe, wyjścia z tych obszarów, klatki schodowe oraz wyjścia prowadzące na zewnątrz. Każde pomieszczenie o powierzchni przekraczającej 200 m² musi mieć co najmniej dwa wyjścia.

W zakresie maksymalnej dopuszczalnej długości dróg ewakuacyjnych urządzenia i ochrona przeciwpożarowa konstrukcji są od siebie zależne.

Maksymalna długość dróg ewakuacyjnych ograniczona jest przepisami do 35 m w przypadku wysokości prześwitu sięgającej 5 m. Jednak zainstalowanie systemu przeciwpożarowego zwiększa tę długość do 50 m.

Maksymalne zwiększenie długości w odniesieniu do wysokości efektywnej sięgającej 50 m wynosi 70 m.

Odległości mierzone są w przestrzeni, ale nie przez elementy konstrukcyjne lub komponenty. Rzeczywista długość nie powinna przekraczać 1,5-krotnej wartości odległości zmierzonej w przestrzeni. Należy zwrócić uwagę na to, że dojście do głównego przejścia z dowolnego punktu pomieszczenia nie powinno zajmować więcej niż 15 minut.

W warunkach pożaru dachy często w znacznym stopniu przyczyniają się do rozprzestrzeniania ognia. Zniszczenia będą zależeć do tego, jakie środki zapobiegania pożarom konstrukcji zostały zastosowane na dachu.

W odniesieniu do rozprzestrzeniania się ognia, gdy pożar rozpoczyna się w partiach dolnych, typowe są następujące mechanizmy uszkodzeń:

- Przepalenie „Durchbrand”. Jest to przypadek najgorszy, w którym ogień rozprzestrzenia się na szczycie dachu, a następnie przez istniejące w dachu otwory przechodzi do obszarów znajdujących się niżej.
- Uszkodzenie nośnego poszycia dachu przez jego ześlizgnięcie z podpór, np. przy dużych rozpiętościach.
- Rozprzestrzenianie się ognia poniżej dachu.
- Rozprzestrzenianie się ognia wewnątrz poszycia dachu. Jest to bardzo niebezpieczne, gdyż ognia nie widać z dołu. Niezwykle dramatyczną może stać się sytuacja, gdy za plecami walczących ze źródłem ognia strażaków pojawi się nagle nowe ognisko pożaru.

Tabela A.1 Wielkości stref pożarowych

Kategoria bezpieczeństwa	Maksymalny rozmiar strefy pożarowej (m ²)	
	Bez wymagania ognioodporności R0	Z wymaganiem ognioodporności R30
K1 Bez wymagań	1800*	3000
K2 Wykrywanie ognia	2700*	4500
K3 Akcja ratownicza	3200 - 4500*	5400-7500
K4 Tłumienie pożaru (instalacja tryskaczowa)	10000	10000

* obszar wydzielania ciepła $\geq 5\%$ i szerokość budynku ≤ 40 m

Metoda uproszczona oparta jest na zależności pomiędzy dozwoloną powierzchnią obszaru strefy pożarowej a kategorią bezpieczeństwa, liczbą kondygnacji oraz klasyfikacją ognioodporności komponentów.

Wielkość powierzchni podano w tabeli A.1 i całkowicie mieści się w zakresie środków bezpieczeństwa najwyższego stopnia.

W przypadku budynków przemysłowych z istniejącą instalacją tryskaczową (kategoria bezpieczeństwa K4) maksymalna powierzchnia strefy pożarowej wynosząca 10 000 m² może być uzyskana bez względu na wymagania odnośnie ognioodporności komponentów konstrukcji.

Jeśli nie ma wymagań dotyczących ochrony przeciwpożarowej, powierzchnie nie przekraczające 1800 m² mogą pozostać niechronione.

W przypadku budynków przemysłowych, których nie można ocenić, stosując procedurę uproszczoną, cała procedura weryfikacji powinna być oparta na wymaganiach normy DIN 18230-1.

Po pierwsze, za pomocą tej metody określany jest równoważny czas trwania pożaru. Przy użyciu równoważnego czasu trwania pożaru generowana jest zależność pomiędzy efektem zarzewia pożaru naturalnego a krzywą ETK („Einheitstemperaturzeitkurve”, krzywą normową czas-temperatura). Równoważność odnosi się do maksymalnej temperatury komponentów konstrukcji objętych pożarem naturalnym.

Po wyznaczeniu równoważnego czasu trwania pożaru dostępne są dwie różne metody.

Pierwsza metoda polega na wyznaczeniu maksymalnej powierzchni kondygnacji na podstawie tabeli A.2. Gdy korzysta się z tej tabeli, nie ma konieczności formułowania żadnych wymagań dotyczących ognioodporności komponentów konstrukcji.

Druga metoda jest nieco bardziej wymagająca. Po pierwsze, na podstawie wzoru wyliczana jest maksymalna powierzchnia kondygnacji. W tej procedurze należy sprawdzić poziom ognioodporności komponentów konstrukcji. Jest to realizowane przez zapewnienie wymaganej ognioodporności.

Tabela A.2 Maksymalna powierzchnia kondygnacji (m²) zgodnie z kategorią bezpieczeństwa oraz równoważnym czasem trwania pożaru

Kategoria bezpieczeństwa	Równoważny czas trwania pożaru			
	15	30	60	90
K1 Bez wymagań	9000*	5500*	2700*	1800*
K2 Wykrywanie ognia	13500*	8000*	4000*	2700*
K3 Akcja ratownicza	1600-22500*	10000-13500*	5000-6800*	3200-4500*
K4 Tłumienie pożaru (instalacja tryskaczowa)	30000	20000	10000	10000
Minimalny obszar wydzielania ciepła	1	1	3	4
Maksymalna szerokość budynku	80	60	50	40

W tabeli A.2 maksymalna dopuszczalna powierzchnia kondygnacji może być określona przez odwołanie do jej kategorii bezpieczeństwa i równoważnego czasu trwania pożaru. Dodatkowo może zostać określona analogiczna powierzchnia wydzielania ciepła, wyrażona jako % powierzchni kondygnacji oraz odpowiadająca jej maksymalna szerokość budynku.

Gdy w przypadku całej procedury weryfikacyjnej stosowana jest druga metoda, maksymalna powierzchnia kondygnacji (m^2) jest obliczana przy pomocy wartości podstawowej dla powierzchni $3000 m^2$ oraz współczynników od F1 do F5.

$$A = 3000 \times F1 \times F2 \times F3 \times F4 \times F5$$

gdzie:

- F1 równoważny czas trwania pożaru,
- F2 kategoria bezpieczeństwa,
- F3 : wysokość najniższych kondygnacji,
- F4 : liczba kondygnacji,
- F5 : rodzaje otworów kondygnacji.

Sumaryczna powierzchnia nie powinna przekraczać $60\,000 m^2$.

Zgodnie z tabelą A.2, gdy w przypadku komponentów konstrukcji, względem których nie są stawiane wymagania, używana jest procedura uproszczona, wynikiem jest maksymalna możliwa powierzchnia $10\,000 m^2$.

Przy procedurze pełnej weryfikacji, zgodnie z tą tabelą, maksymalna możliwa powierzchnia wynosi $30\,000 m^2$. W przypadku korzystania z procedury pełnej weryfikacji w uzupełnieniu do obliczeń ognioodporności można otrzymać powierzchnię rzędu $60\,000 m^2$.

Pod bardzo szczególnymi warunkami można uzyskać jeszcze większe powierzchnie, nawet do $120\,000 m^2$.

Przykład:

Procedurę oraz możliwości związane z zastosowaniem wytycznych MIndBauRI można najlepiej przedstawić i wyjaśnić na przykładzie:

Parametry budynku

Długość:	100 m
Szerokość:	50 m
Średnia wysokość:	6 m
Wielkość:	$5000 m^2$
Liczba kondygnacji:	1
Otwory w dachu:	$135 m^2$
Drzwi, okna:	$132 m^2$
Obciążenie ogniowe:	$q_R = 126 kWh/m^2$

Automatyczne systemy przeciwpożarowe: kategoria bezpieczeństwa K2

Brak wewnętrznych ścian przeciwpożarowych

Pierwszą możliwością jest zastosowanie metody uproszczonej zgodna z tabelą A.1. Budynek przemysłowy, aby mógł spełnić powyższe warunki, musi być wyposażony w automatyczną instalację tryskaczową.

W celu odpowiedniego wdrożenia metody pełnej weryfikacji należy określić równoważny czas trwania pożaru. W tym przypadku potrzebny jest współczynnik wydzielania ciepła w . Współczynnik ten jest wyznaczany przez uwzględnienie powierzchni powiązanych otworów. Powierzchnie takich otworów stanowią wartości pomocnicze. Należy po prostu podzielić powierzchnię otworów w dachu przez powierzchnię podłoża, a następnie powierzchnię otworów w ścianach przez powierzchnię podłoża.

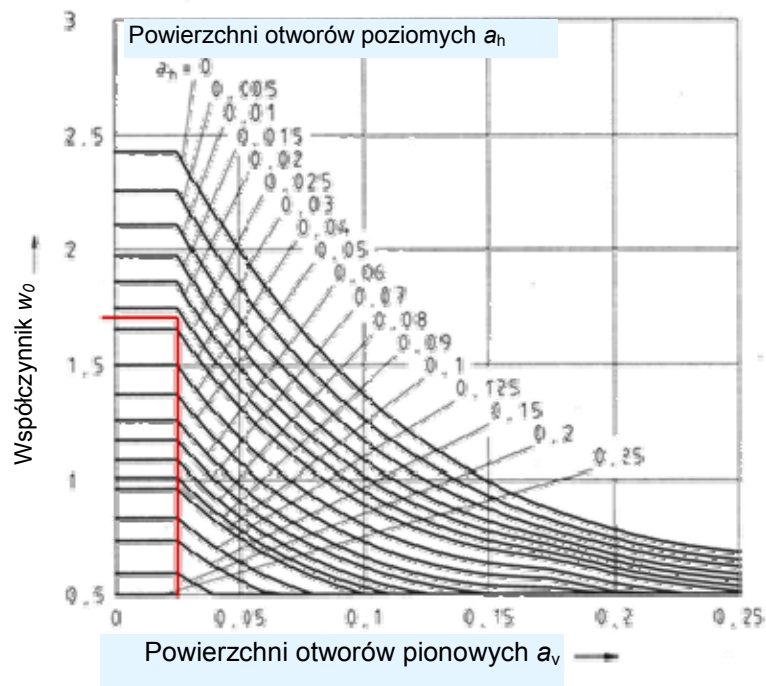
- Określenie powierzchni powiązanych otworów poziomych a_h :

$$a_h = A_h / A = 135 \text{ m}^2 / 5000 \text{ m}^2 = 0,027$$

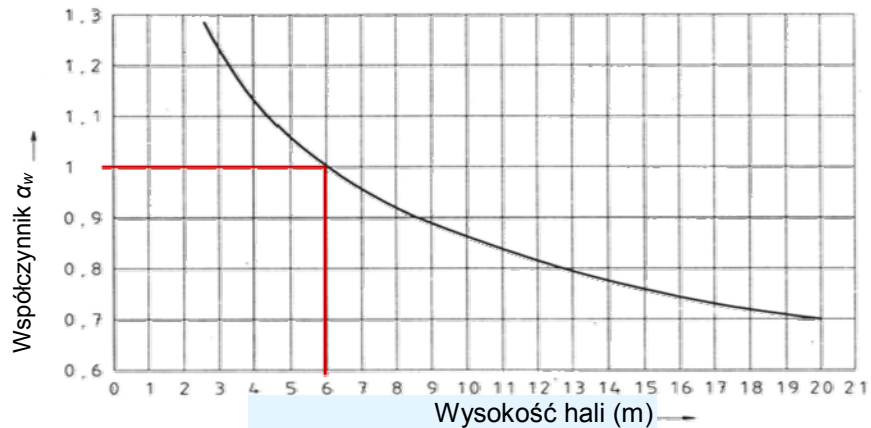
- Określenie powierzchni powiązanych otworów pionowych a_v :

$$a_v = A_v / A = 132 \text{ m}^2 / 5000 \text{ m}^2 = 0,026$$

Wartości powierzchni powiązanych otworów przedstawiono na rysunku A.1 i na jego podstawie można określić wartość w_0 . Na rysunku A.2 uwzględniono wysokość hali.



Rysunek A.1 Współczynnik w_0 odpowiadający powierzchni otworów



Rysunek A.2 Współczynnik α_w odpowiadający wysokości hali

Wartość współczynnika wydzielania ciepła budynku wynosi:

$$a_w (w = w_0 \times a_w = 1,70 \times 1,0 = 1,70)$$

Równoważny czas trwania pożaru (t_a) określony jest w oparciu o następujące współczynniki: gęstość obciążenia ogniowego, współczynnik wydzielania ciepła oraz współczynnik c , który uwzględnia powierzchnię wydzielania ciepła elementów znajdujących się na obrzeżu konstrukcji. W tym przykładzie w celu uproszczenia podano najmniej korzystną wartość współczynnika c .

$$t_a = q_R \times c \times w = 126 \times 0,25 \times 1,70 = 54,0 \text{ min}$$

Przez interpolację na podstawie tabeli A.2 dla kategorii bezpieczeństwa K2 oraz równoważnego czasu trwania pożaru wynoszącego 54 minuty można określić maksymalną powierzchnię rzędu 4800 m². Na tym etapie warto, aby projektant wykonał dodatkową pracę i sprawdził dane wejściowe. Czy obciążenie ogniowe nie jest za wysokie? Co się stanie, gdy powierzchnie otworów zostaną zmienione i jednocześnie zmianą ulegnie również najniższa kondygnacja? Albo inaczej — co z powierzchniami? Czy powierzchnia może zostać zmniejszona o 200 m²? Zadaniem projektanta jest przedstawienie i wyjaśnienie klientowi różnych możliwości oraz przygotowanie zestawienia kosztów.

Druga możliwość z zastosowaniem metody pełnej weryfikacji jest dokładniejsza. Maksymalna powierzchnia kondygnacji obliczana jest przy pomocy wartości podstawowej 3000 m² pomnożonej przez współczynniki od F1 do F5. Wartości współczynników podane są w tabelach w normie DIN 18230-1 i nie muszą być wyznaczane.

Zgodnie z tabelą 3 normy DIN 18230-1 współczynnik F1 wynosi: 1,9

Zgodnie z tabelą 5 normy DIN 18230-1 współczynnik F2 wynosi: 1,5

Zgodnie z tabelą 6 normy DIN 18230-1 współczynnik F3 wynosi: 1,0

Zgodnie z tabelą 7 normy DIN 18230-1 współczynnik F4 wynosi: 1,0

Zgodnie z tabelą 7 normy DIN 18230-1 współczynnik F5 wynosi: 0,7.

Po podstawieniu do wzoru:

$$A = 3000 \times F1 \times F2 \times F3 \times F4 \times F5 = 3000 \times 1,9 \times 1,5 \times 1,0 \times 1,0 \times 0,7$$

$$A = 5989 \text{ m}^2.$$

W tej metodzie klasyfikacja ognioodporności komponentów konstrukcji musi być obliczona za pomocą następującego równania:

$$\text{wymagany czas utrzymania ognioodporności } t_f = t_a \times \gamma \times \alpha_L.$$

Projektowanie czasu utrzymania ognioodporności obejmuje następujące współczynniki:

- równoważny czas trwania pożaru wynoszący 54 minuty,
- współczynnik bezpieczeństwa γ wynoszący 0,6 zgodnie z tabelą 2 normy DIN 18230-1 oraz
- współczynnik alfa L uwzględniający infrastrukturę przeciwpożarową wynoszący 0,9 zgodnie z tabelą 4 normy DIN.

$$\text{Stąd: } t_f = 54 \times 0,6 \times 0,9 = 29,16 \text{ min} \Rightarrow \text{R30}$$

Tabela A.3 Zestawienie maksymalnych rozmiarów stref pożarowych

Kategoria bezpieczeństwa	Powierzchnia uzyskana przy wykorzystaniu metody uproszczonej (m ²)	
	Bez wymagania ognioodporności	Z wymaganiem ognioodporności
K1		
K2	2700	4500
K3		5400-7500
K4	10 000	
	R0	R30

Porównanie tych metod, dostępne opcje oraz obowiązki projektanta można znaleźć w tabeli A.3. Gdy stosowana jest metoda uproszczona, w celu zawarcia budynku przemysłowego w pojedynczej strefie pożarowej bez wymagań względem konstrukcji nośnej konieczne jest zamontowanie automatycznej instalacji tryskaczowej. W przypadku stosowania metody pełnej weryfikacji oraz przestrzegania podanych warunków możliwe jest uzyskanie strefy pożarowej o powierzchni 4800 m². Aby uzyskać pojedynczą strefę pożarową o powierzchni 5000 m², konieczna jest obecność przynajmniej jednej jednostki pożarowej w zakładzie.

Gdy wymagana jest ognioodporności konstrukcji nośnej rzędu R30, w przypadku metody uproszczonej konieczna jest obecność przynajmniej jednej jednostki pożarowej w zakładzie (zgodnie z tabelą). Jednak gdy zakład wyposażony jest w system czujników pożarowych, można uzyskać tylko jedną strefę pożarową o powierzchni 4500 m². W przypadku metody pełnej weryfikacji możliwe jest uzyskanie strefy pożarowej o powierzchni 5989 m².

W oparciu o wyniki uzyskane z różnych metod zadanie projektanta staje się jasno zdefiniowane. Powinien nie tylko opracować jedną koncepcję ochrony przeciwpożarowej, ale także przedstawić klientowi alternatywne i bardziej ekonomiczne procedury związane z różnymi procesami produkcyjnymi.