

Wyznaczanie odporności ogniowej elementów konstrukcji wg. Eurokodów

W ciągu ostatnich kilku lat w Polsce – oraz w innych państwach Unii Europejskiej - wdrażany jest do stosowania zestaw zharmonizowanych norm dotyczących zasad projektowania konstrukcji budowlanych zwany Eurokodami. Obecnie większość Eurokodów jest już oficjalnie wdrożona w naszym kraju jako normy PN-EN a normy krajowe sprzeczne z Eurokodami są - lub też będą w niedługim czasie – wycofane. Z punktu widzenia projektantów i rzeczoznawców zajmujących się ochroną przeciwpożarową istotny jest fakt, że Eurokody dotyczące poszczególnych materiałów konstrukcyjnych zawierają części dotyczące projektowania z uwagi na warunki pożarowe.

Jednym z podstawowych wymogów w zakresie bezpieczeństwa pożarowego budynków jest zapewnienie – w razie pożaru – nośności konstrukcji przez założony okres czasu. Przepisy techniczno-budowlane [1] precyzują wymogi w zakresie klasy odporności ogniowej elementów konstrukcyjnych, w zależności od wymaganej dla danego budynku klasy odporności pożarowej.

W praktyce oznacza to, iż poszczególne elementy konstrukcyjne muszą być zaprojektowane lub zabezpieczone w sposób zapewniający osiągnięcie przez nie odporności ogniowej wynikającej z klasy odporności pożarowej budynku.

W zależności od funkcji elementu oraz klasy odporności pożarowej budynku, wymagane klasy odporności ogniowej elementów konstrukcji (nazywane nośnością ogniową) zawierają się w zakresie od 15 do 240 minut. Nośność ogniowa oznaczana jest symbolem R.

W wielu przypadkach zapewnienie odpowiedniej klasy odporności ogniowej elementu konstrukcyjnego nie wymaga od projektanta przeprowadzania skomplikowanych obliczeń i ogranicza się jedynie do doboru odpowiedniego systemu zabezpieczeń pasywnych np. przy pomocy farb ogniochronnych, natrysków lub płyt.

Ocenę skuteczności systemów ogniochronnych przeprowadza się na podstawie znormalizowanych badań odporności ogniowej, opierających się na tzw. krzywej standardowej temperatura-czas.

W niektórych sytuacjach konieczne może być określenie odporności ogniowej elementu konstrukcyjnego w sposób obliczeniowy. W szczególnych przypadkach dotyczyć może to również elementów konstrukcyjnych nie zabezpieczonych żadnym systemem ogniochronnym. Sytuacja taka może wystąpić w przypadku budynków istniejących (w tym również zabytkowych), nietypowych form konstrukcji a także w przypadku obiektów, dla których opracowano metodami inżynierii pożarowej indywidualną strategię bezpieczeństwa pożarowego.

Dla typowych materiałów takich jak stal, beton czy drewno metody obliczeniowego określenia odporności ogniowej elementów konstrukcyjnych istnieją od wielu lat. Opis takich metod znaleźć można w instrukcjach ITB [2,3], prasie fachowej a także w literaturze technicznej - zarówno krajowej [4] jak i zagranicznej [5,6,7]. Metody te były dotychczas stosowane jako zasady wiedzy technicznej.

Dzięki wprowadzeniu w ostatnim czasie serii norm europejskich zwanych Eurokodami, projektanci mają obecnie do dyspozycji spójny zestaw dokumentów normatywnych,

obejmujących kompleksowo zagadnienia związane z projektowaniem konstrukcji budowlanych, w tym również obliczenia odporności ogniowej elementów konstrukcyjnych.

W niniejszym artykule omówione zostaną podstawowe założenia i metodologia Eurokodów w zakresie wyznaczania odporności ogniowej konstrukcji oraz niektóre praktyczne aspekty takich obliczeń dla wybranych materiałów konstrukcyjnych.

Czynniki wpływające na zachowanie się elementów konstrukcyjnych w warunkach pożaru

Zanim przejdziemy do omówienia Eurokodów i zawartej w nich metodologii obliczeń odporności ogniowej elementów konstrukcyjnych, warto przypomnieć sobie najważniejsze czynniki wpływające na zachowanie się elementu konstrukcyjnego w sytuacji pożaru. Są nimi:

- Rodzaj materiału z jakiego wykonany jest rozpatrywany element
- Kształt elementu, w tym w szczególności stosunek pomiędzy polem jego powierzchni bocznych a objętością (tj. ilością zawartego w nim materiału konstrukcyjnego)
- Schemat statyczny elementu konstrukcyjnego
- Stopień wyęźnienia elementu
- Rodzaj pożaru na jaki może być narażony rozpatrywany element
- Rodzaj i grubość biernych zabezpieczeń przeciwpożarowych (o ile zabezpieczenia takie zastosowano dla rozpatrywanego elementu)

Wpływ rodzaju materiału z jakiego wykonany jest element konstrukcyjny na jego zachowanie się w sytuacji pożaru jest sprawą oczywistą.

Drewno, stal, beton czy konstrukcje murowe odmiennie reagują na wysokie temperatury spowodowane pożarem. Pierwszy z wymienionych materiałów jest materiałem organicznym – palnym. Dlatego też głównym powodem utraty nośności elementów drewnianych w sytuacji pożaru jest ubytek materiału i związana z nim redukcja charakterystyk geometrycznych przekroju.

W przypadku stali najistotniejszym czynnikiem jest pogorszenie się właściwości mechanicznych materiału wraz ze wzrostem temperatury.

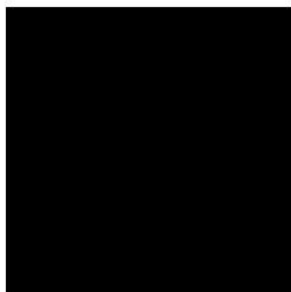
Również w przypadku konstrukcji betonowych oraz żelbetowych osłabienie cech wytrzymałościowych materiału wraz ze wzrostem temperatury ma znaczenie kluczowe, jednak dla bardzo wysokich temperatur istotnym czynnikiem może być również uszkodzenie mechaniczne związane ze zjawiskiem odpryskiwania betonu.

Dla drewna oraz betonu dodatkowymi parametrami determinującymi zachowanie materiału w wysokich temperaturach są jego gęstość oraz wilgotność początkowa.

Kształt i geometria przekroju poprzecznego jest kolejnym istotnym czynnikiem determinującym zachowanie się elementu konstrukcyjnego w sytuacji pożarowej. W przypadku elementów, których powierzchnia boczna jest duża w stosunku do objętości zawartego w nich materiału (np. zimnogięte kształtowniki stalowe) przepływ ciepła z otoczenia do elementu konstrukcyjnego jest bardzo szybki, dlatego elementy takie charakteryzują się niewielką odpornością na działanie pożaru. Z kolei elementy masywne, których powierzchnie boczne są niewielkie w porównaniu z objętością zawartego w nich materiału (np. duże belki o przekroju prostokątnym) będą wykazywał znacznie większą „wrodzoną” odporność na działanie pożaru.

Powyższa charakterystyka przekroju jest opisywana ilościowo poprzez wskaźnik masywności (w Eurokodach nazywany wskaźnikiem ekspozycji przekroju) definiowany jako A_m/V , gdzie A_m to pole powierzchni elementu na jednostkę długości a V to objętość elementu na jednostkę długości.

Sposób wyznaczania powyższego wskaźnika najłatwiej zobrazować na prostym przykładzie. Rozważmy słup o przekroju kwadratowym 0,30 x 0,30 m oraz analogiczny słup o przekroju dwuteowym 0,50 x 0,30 m mający takie samo pole powierzchni przekroju poprzecznego. W tym drugim przypadku pomimo tej samej ilości zawartego w nim materiału znacznie zwiększa się powierzchnia boczna elementu, przez którą wnikać może w niego strumień ciepła. Charakterystyki geometryczne dla obu przypadków przedstawione są poniżej.



$$\begin{aligned}A_m &= 1,20 \text{ m}^2/\text{m} \\V &= 0,09 \text{ m}^3/\text{m} \\A_m/V &= 13.3 \text{ m}^{-1}\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}A_m &= 2,00 \text{ m}^2/\text{m} \\V &= 0,09 \text{ m}^3/\text{m} \\A_m/V &= 22.2 \text{ m}^{-1}\end{aligned}$$

Rys 1. Porównanie wskaźników masywności dla różnych geometrii przekroju:

Jak widać przekrój dwuteowy charakteryzuje się znacznie wyższym wskaźnikiem ekspozycji przekroju.

Zarówno schemat statyczny elementu jak i stopień jego wyężenia wynikają z przyjętych założeń konstrukcyjnych i obliczeń wytrzymałościowych – informacje w tym zakresie pochodzą zawsze od projektanta konstrukcji.

W największym uproszczeniu powiedzieć można, iż dwa identyczne elementy konstrukcyjne różniące się jedynie wielkością przyłożonego obciążenia, w przypadku poddaniu ich takim samym warunkom pożarowym zachowają swoją nośność przez różne okresy czasu. Fakt ten jest dość intuicyjny i ma swoje odzwierciedlenie we wpływie stopnia wykorzystania nośności elementu (na początku pożaru) na jego odporność ogniową, co omówione zostanie w dalszej części artykułu.

Ostatnim czynnikiem, mającym jednak bardzo duże znaczenie, jest rodzaj sytuacji pożarowej na jaką wystawiony może być rozpatrywany przez nas element konstrukcyjny. Przewidywany rodzaj pożaru oraz geometria budynku determinują bowiem rzeczywistą krzywą temperatura-czas na jaką wystawiona będzie konstrukcja danego obiektu.

Rozważmy jako przykład dwa identyczne budynki magazynowe, o takiej samej konstrukcji nośnej i takiej samej gęstości obciążenia ogniowego na jednostkę powierzchni. W jednym składowane są ciecze łatwopalne, w sposób który może potencjalnie prowadzić do rozlania się takich cieczy i ekstremalnie szybkiego rozwoju pożaru. W drugim przechowywane są duże ilości materiałów palnych (skutkujące identycznym obciążeniem ogniowym) jednakże sposób ich składowania wyklucza szybki rozwój pożaru. Z punktu widzenia obowiązujących w naszym kraju Warunków Technicznych, wymogi w zakresie klasy odporności pożarowej będą takie same dla obu budynków. Jednakże dokładniejsza analiza z użyciem metod inżynierii bezpieczeństwa pożarowego prowadzi do wniosku, iż warunki termiczne na jakie narażone będą elementy konstrukcji w obu tych budynkach są diametralnie różne. Zatem rzeczywiste czasy przez które zachowana zostanie funkcja nośna konstrukcji mogą się znacząco różnić.

Czym są Eurokody?

Eurokody konstrukcyjne to seria zharmonizowanych norm europejskich dotyczących projektowania konstrukcji budowlanych. Eurokody – w ich obecnym kształcie - zostały opracowane przez Europejski Komitet Normalizacyjny (CEN) na podstawie mandatu udzielonego mu pod koniec lat osiemdziesiątych przez Komisję Wspólnoty Europejskiej.

Seria Eurokodów obejmuje następujące normy, zwykle składające się z szeregu części:

- EN 1990 Eurokod 0 Podstawy projektowania konstrukcji
- EN 1991 Eurokod 1 Oddziaływania na konstrukcje
- EN 1992 Eurokod 2 Projektowanie konstrukcji z betonu
- EN 1993 Eurokod 3 Projektowanie konstrukcji stalowych
- EN 1994 Eurokod 4 Projektowanie zespolonych konstrukcji stalowo-betonowych
- EN 1995 Eurokod 5 Projektowanie konstrukcji drewnianych
- EN 1996 Eurokod 6 Projektowanie konstrukcji murowych
- EN 1997 Eurokod 7 Projektowanie geotechniczne
- EN 1997 Eurokod 8 Projektowanie konstrukcji poddanych oddz. sejsmicznym
- EN 1999 Eurokod 9 Projektowanie konstrukcji aluminiowych

Ponieważ poszczególne państwa członkowskie mają prawo do indywidualnego ustalania wartości współczynników związanych z zachowaniem poziomu bezpieczeństwa konstrukcji, normy krajowe wdrażające Eurokody zawierają zazwyczaj tzw. załącznik krajowy, w którym podane są wartości takich współczynników odpowiednie dla danego kraju, a także inne niesprzeczne informacje uzupełniające, przydatne w stosowaniu Eurokodów.

Można powiedzieć, iż załączniki krajowe pozwalają na uwzględnienie lokalnych preferencji i uwarunkowań danego kraju, bez wprowadzania sprzeczności z zasadami ogólnymi obowiązującymi w Eurokodach.

W naszym kraju Eurokody wdrażane są przez Polski Komitet Normalizacyjny jako normy PN-EN.

Poszczególne Eurokody zawierają kilka lub nawet kilkanaście części. Część 1-2 każdego Eurokodu dotyczy projektowania z uwagi na warunki pożarowe:

- PN-EN 1991-1-2:2006 Oddziaływania na konstrukcje.
Cz. 1-2: Oddziaływania na konstrukcje w warunkach pożaru
- PN-EN 1992-1-2:2008 Projektowanie konstrukcji z betonu
Cz. 1-2: Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe
- PN-EN 1993-1-2:2007 Projektowanie konstrukcji stalowych
Cz. 1-2: Obliczanie konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe
- PN-EN 1994-1-2:2008 Projektowanie zespolonych konstrukcji stalowo-betonowych
Cz. 1-2: Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe
- PN-EN 1995-1-2:2008 Projektowanie konstrukcji drewnianych
Cz. 1-2: Projektowanie konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe
- PN-EN 1996-1-2:2005 Projektowanie konstrukcji murowych
Cz. 1-2: Projektowanie konstrukcji na wypadek pożaru (oryg.)
- PN-EN 1999-1-2:2007 Projektowanie konstrukcji aluminiowych
Cz. 1-2: Projektowanie konstrukcji na wypadek pożaru (oryg.)

Należy zwrócić uwagę, że ostatnie dwie normy podane powyżej nie zostały jeszcze przetłumaczone na język polski. Obecnie funkcjonują one jako normy uznane przez PKN za normy krajowe PN-EN, ale dostępne są tylko w oryginalnej wersji językowej.

W chwili obecnej dobiega końca okres przejściowy wprowadzania Eurokodów. Normy krajowe sprzeczne z Eurokodami powinny być wycofane do końca marca 2010 r.

W praktyce trudno jednak na razie mówić o powszechnym stosowaniu Eurokodów jako podstawy projektowania konstrukcji budowlanych w naszym kraju. Z wielu względów sposób wdrażania Eurokodów pozostawia wiele do życzenia, a w środowisku projektantów konstrukcji zauważyć można swego rodzaju opór wobec przejścia z dotychczas stosowanych Polskich Norm na Eurokody.

Istnieje kilka powodów takiego stanu rzeczy:

Ze względu na ogromną ilość materiału zawartego w tychże normach, nie udało się uniknąć sporej ilości błędów, pomyłek w oznaczeniach itd. Wiele z nich zostało skorygowanych dopiero po wydaniu poszczególnych dokumentów w ich końcowej, oficjalnej formie.

Przykładem może być tutaj ośmiostronicowy arkusz poprawek do normy PN-EN 1992-1-2 wydany niemalże od razu po jej publikacji.

Kolejnym powodem jest zapewne brak – na chwilę obecną - dostatecznej ilości materiałów pomocniczych ułatwiających zrozumienie metodologii projektowania oraz interpretację poszczególnych zaleceń Eurokodów.

Należy również pamiętać, iż wszystkie Eurokody wdrożone i wydane w naszym kraju w języku polskim są po prostu tłumaczeniami dokumentów opublikowanych w języku oryginalnym. Jakość tłumaczenia tych dokumentów ma zatem duże znaczenie dla łatwości interpretacji wymogów w nich zawartych. W przypadku niektórych zaleceń niefortunne przetłumaczenie ich na język polski powoduje, iż trudno jest zrozumieć intencję danego zapisu bez odwołania się do dokumentu w jednej z oficjalnych wersji językowych. Jako przykład odsyłam dociekliwych czytelników do punktu 4.2.2 (3) normy PN-EN 1991-1-2.

Wymienione powyżej problemy z pewnością nie czynią Eurokodów bardziej przyjaznymi dla ich użytkowników i utrudniają ich upowszechnienie.

Bez wątpienia można jednak stwierdzić, iż wprowadzenie ujednocionej na skalę europejską metodologii projektowania konstrukcji budowlanych, obejmującą swym zakresem również kwestię ich odporności ogniowej jest zjawiskiem jak najbardziej pożądanym. Wraz z upływem czasu problemy „wieku dojrzewania” przeminą, a Eurokody staną się powszechnie używanym narzędziem dla projektantów.

Z punktu widzenia projektantów i rzeczoznawców zajmujących się ochroną przeciwpożarową istotną zaletą Eurokodów jest fakt, iż kompleksowo traktują one zagadnienie projektowania konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe – w polskich normach stosowanych dotychczas w naszym kraju do projektowania konstrukcji budowlanych temat ten był właściwie nieobecny.

Zaletą Eurokodów jest również to, iż pozwalają one przeprowadzić analizę odporności ogniowej konstrukcji na różnych poziomach szczegółowości, w oparciu o metody charakteryzujące się różnym stopniem komplikacji. Możliwa jest analiza pojedynczego elementu, analiza części konstrukcji a także analiza całego ustroju.

Podstawą oceny niezawodności konstrukcji dokonywanej wg. Eurokodów jest metoda stanów granicznych. Wyróżniamy stany graniczne nośności odpowiadające katastrofie lub innym podobnym postaciom zniszczenia konstrukcji oraz stany graniczne użyteczności odpowiadające warunkom, po przekroczeniu których konstrukcja lub jej elementy przestają spełniać stawiane im wymagania użytkowe.

W kontekście sytuacji pożarowej rozważany jest zazwyczaj jedynie stan graniczny nośności.

PN-EN 1991-1-2 Oddziaływania na konstrukcję w warunkach pożaru

Cześć 1-2 Eurokodu 1 dotyczy oddziaływań termicznych i mechanicznych na konstrukcję w warunkach pożaru. Zawarte w niej informacje stanowią punkt wyjścia do dalszej analizy danej konstrukcji, która dokonywana jest w oparciu o szczegółowe zalecenia części pożarowej odnośnego Eurokodu.

Przez oddziaływania mechaniczne rozumie się tutaj zarówno oddziaływania bezpośrednie od obciążeń stałych i zmiennych, jak i oddziaływania pośrednie spowodowane wpływami termicznymi (o ile oddziaływania takie występują).

Oddziaływania termiczne

Aby wyznaczyć oddziaływanie termiczne na konstrukcję (rozumiane jako strumień ciepła netto na powierzchnię elementu) należy najpierw określić temperaturę gazu w otoczeniu danego elementu.

Norma PN-EN 1991-1-2 daje nam w tym zakresie do dyspozycji zarówno uproszczone podejście oparte na nominalnych krzywych temperatura-czas, jak i naturalne modele pożaru, wśród których wyróżniamy modele uproszczone (np. oparte na krzywych parametrycznych) oraz modele zawansowane, do których należą min. coraz powszechniej stosowane modele numerycznej mechaniki płynów (CFD).

W kategorii nominalnych krzywych norma PN-EN 1991-1-2 wyszczególnia:

a) Krzywą standardową temperatura-czas określaną wzorem:

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

b) Krzywą pożaru zewnętrznego określaną wzorem:

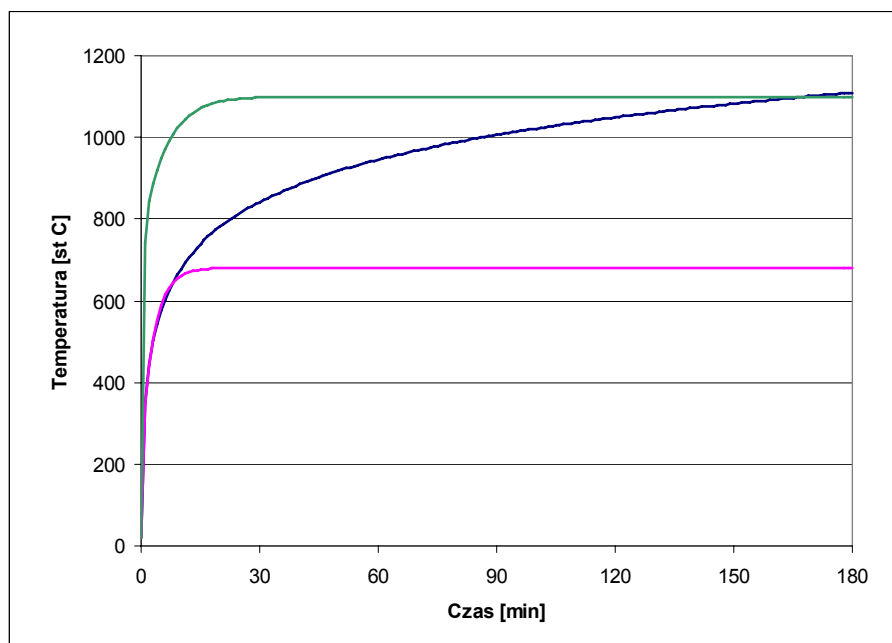
$$\theta_g = 660 (1 - 0,687 e^{-0,32 t} - 0,313 e^{-3,8 t}) + 20$$

c) Krzywą węglowodorową temperatura-czas określaną wzorem:

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

W powyższych wzorach θ_g oznacza odpowiednio temperaturę gazu w strefie pożarowej lub temperaturę gazu w pobliżu rozpatrywanego elementu [°C], natomiast t oznacza czas w minutach.

Na wykresie przedstawiono graficzne porównanie powyższych krzywych nominalnych.



Rys 2. Porównanie nominalnych krzywych temperatura-czas:
 (a) krzywa standardowa; (b) krzywa pożaru zewnętrznego; (c) krzywa węglowodorowa

W niektórych przypadkach projektowych może zdarzyć się, iż żadna z opisanych powyżej nominalnych krzywych temperatura-czas nie będzie odzwierciedlać przewidywanego przyrostu temperatury na skutek pożaru w przestrzeni, w której znajduje się rozpatrywany element konstrukcyjny. W takiej sytuacji uzasadnione byłoby wyznaczenie krzywej przyrostu temperatury w czasie w oparciu o jeden z naturalnych modeli pożaru. Należy w tym miejscu zwrócić uwagę, iż spośród kilku modeli tego typu wymienionych w normie europejskiej, załącznik krajowym NB do PN-EN 1991-1-2 zaleca do stosowania jedynie modele numerycznej mechaniki.

Przykładem sytuacji projektowej, w której zastosowanie nominalnej krzywej temperatura-czas nie jest podejściem ekonomicznym, i w której warto wykonać bardziej zaawansowaną analizę temperatury, jest projektowanie elementu konstrukcji dachu w dużym kubaturowo obiekcie o relatywnie niewielkim obciążeniu ogniowym. Przykładem takiego obiektu może być chociażby hala widowiskowo-sportowa, kryty tor kolarski itd. Dla konstrukcji dachu będzie tutaj zazwyczaj wymagana odporność ogniowa R15 lub R30. Jeżeli nie przewiduje się dodatkowych funkcji takiego budynku, które mogłyby skutkować znacznym zwiększeniem ilości materiałów palnych w nim występujących (np. organizacja targów i wystaw), to przyjąć można, iż temperatura w otoczeniu elementów konstrukcji dachu będzie znacznie niższa niż wynika to z krzywej standardowej temperatura-czas. W takim przypadku przeprowadzenie szczegółowej analizy temperatury - np. z użyciem modelu numerycznej mechaniki płynów (CFD) – może prowadzić do znacznych oszczędności w zakresie zabezpieczeń przeciwpożarowych elementów konstrukcji dachu.

Znając temperaturę gazu w otoczeniu rozpatrywanego elementu konstrukcyjnego możemy wyznaczyć strumień ciepła netto na jednostkę powierzchni poddanej działaniu pożaru. Jest on sumą strumienia konwekcyjnego i radiacyjnego zgodnie ze wzorem:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r}$$

Składowa konwekcyjna oraz składowa radiacyjna całkowitego strumienia ciepła netto ustalane są z następujących wzorów:

$$\text{Konwekcyjny strumień ciepła netto } \dot{h}_{net,c} = \alpha_c \cdot (\Theta_g - \Theta_m) \quad [\text{W/m}^2]$$

$$\text{Radiacyjny strumień ciepła netto } \dot{h}_{net,r} = \phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\Theta_r + 273)^4 - (\Theta_m + 273)^4] \quad [\text{W/m}^2]$$

Gdzie:

- α_c współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję [W/m²K]
- ϕ współczynnik konfiguracji – zaleca się przyjmowanie $\phi=1$. W celu ustalenia efektu położenia elementu wobec powierzchni promieniujących można użyć wartości współczynnika ϕ obliczonej zgodnie z metodą podaną w załączniku G do PN-EN 1991-1-2
- ε_m emisyjność powierzchni elementu - o ile nie ustalono inaczej, można przyjmować $\varepsilon_m=0,8$ (dla powierzchni betonowych oraz dla stali węglowych można przyjmować $\varepsilon_m=0,7$)
- ε_f emisyjność ognia - ogólnie przyjmuje się $\varepsilon_f=1,0$
- σ stała Stefana-Boltzmana = $5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m²K⁴
- Θ_g temperatura gazu w otoczeniu elementu poddawanego działaniu pożaru [°C]
- Θ_r efektywna temperatura promieniowania środowiska pożaru – w przypadku elementów całkowicie ogarniętych przez pożar można przyjmować temperaturę gazu w otoczeniu danego elementu [°C]
- Θ_m temperatura powierzchni elementu, wynikająca z analizy temperatury elementu [°C]

Wartość współczynnika przejmowania ciepła α_c którą należy używać w obliczeniach zależy od przyjętego modelu pożaru i rodzaju krzywej temperatura-czas. Przyjmuje on wartości od 25 do 50 W/m²K.

Ponieważ zarówno temperatura otoczenia jak i temperatura rozpatrywanego elementu zmieniają się wraz z upływem czasu, dlatego analiza strumienia ciepła musi odbywać się dla dostatecznie krótkich kroków czasowych – w tym celu przydatne jest stworzenie prostego arkusza kalkulacyjnego w jednym z dostępnych programów biurowych typu MS Excel, Open Office itd.

Oddziaływania mechaniczne

Przy sprawdzaniu stanu granicznego nośności konstrukcji w temperaturze normalnej, pod uwagę bierze się jedną (lub więcej) kombinację obciążeń, w której wartości charakterystyczne występujących w niej obciążeń są zwiększane przez zastosowanie odpowiednich współczynników częściowych. Współczynniki te uwzględniają możliwość niekorzystnych odchyłań rzeczywistych wartości obciążeń od wartości charakterystycznych (reprezentatywnych).

Zgodnie z podstawowymi zasadami projektowania konstrukcji wg. Eurokodów zawartymi w PN-EN 1990 pożar traktowany jest jako tzw. *wyjatkowa sytuacja obliczeniowa*. Oznacza to, iż kombinacja obciążeń branych pod uwagę przy sprawdzaniu nośności konstrukcji w warunkach pożaru opiera się o wartości charakterystyczne obciążeń stałych oraz odpowiednio zredukowaną wartość obciążeń zmiennych, nazywaną wartością reprezentatywną.

Upraszczając nieco wzór na kombinację oddziaływań w przypadku wyjątkowej sytuacji obliczeniowej podany w normie PN-EN 1990, możemy przyjąć, że dla prostej sytuacji projektowej kombinację taką można wyrazić w postaci:

$$\Sigma G_{k,j} + A_d + (\psi_{1,1} \text{ lub } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \Sigma \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Gdzie:

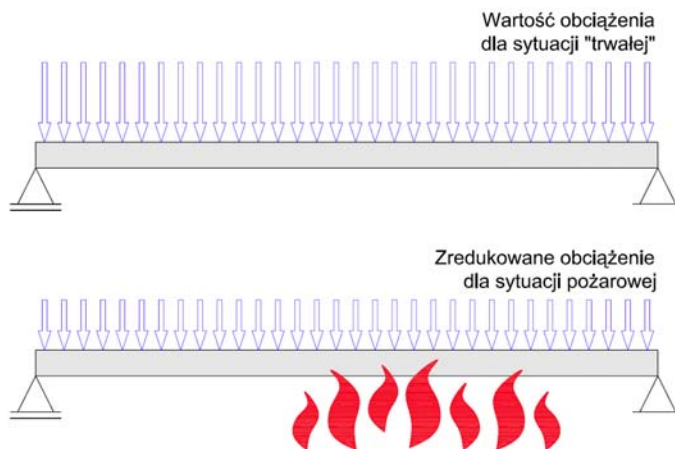
- G_k Wartość charakterystyczna obciążenia stałego
- A_d Wartość obliczeniowa obciążenia wyjątkowego (w przypadku pożaru uwzględniana zazwyczaj pośrednio)
- Q_k Wartość charakterystyczna obciążenia zmiennego
- ψ_1 Współczynnik dla wartości częstej oddziaływania zmiennego
- ψ_2 Współczynnik dla wartości prawie stałej oddziaływania zmiennego

Reprezentatywna wartość obciążenia zmiennego może być uwzględniana jako wartość prawie stała ($\psi_{2,1} Q_1$) lub jako wartość częsta ($\psi_{1,1} Q_1$). Tekst Normy Europejskiej zaleca stosowanie wartości prawie stałej, natomiast załącznik krajowy do polskiej wersji tej normy zaleca stosowanie wartości częstej. W praktyce różnica ta nie ma istotnego znaczenia, ponieważ dla większości obciążeń zmiennych wartości współczynników $\psi_{2,1}$ i $\psi_{1,1}$ są bardzo podobne.

W uproszczeniu można powiedzieć, iż obciążenia które są przyjmowane dla konstrukcji w warunkach pożarowych są wyraźnie niższe od wartości przyjmowanych przy projektowaniu w warunkach normalnej temperatury.

Rozpatrzmy prosty przykład belki swobodnie podpartej przenoszącej obciążenia z dachu budynku:

- Przy projektowaniu z uwagi na zwykłą sytuację obliczeniową dotyczącą normalnych temperatur, wartości obciążeń wynikających z ciężaru własnego konstrukcji dachu a także obciążeń zmiennych (np. obciążenia śniegiem) są zwiększane do wartości obliczeniowych.
- Przy sprawdzaniu nośności tego samego elementu pracującego w warunkach pożaru, kombinacja obciążeń przyjmowana w obliczeniach będzie opierać się o wartość charakterystyczną obciążenia stałego ciężarem własnym oraz istotnie zredukowane wartości obciążenia śniegiem.



Rys 3. Porównanie obciążeń dla sytuacji obliczeniowej trwałej oraz dla sytuacji wyjątkowej (tj. pożaru)

Wartość sumaryczna obciążeń przyjmowana dla sytuacji pożaru może być nawet o połowę niższa od sumarycznej wartości przyjmowanej dla normalnych temperatur. Jeżeli nie przeprowadzono dokładniejszej analizy to – dla większości konstrukcji – przyjmuje się redukcję obciążeń o 30%.

Dodatkowe informacje zawarte w PN-EN 1991-1-2

Norma PN-EN 1991-1-2 zawiera szereg załączników o charakterze informacyjnym, które dotyczą wybranych metod obliczeniowych oraz szczególnych sytuacji pożarowych:

- Załącznik A dotyczy parametrycznych krzywych temperatura-czas
- Załącznik B dotyczy uproszczonej metody obliczania oddziaływań termicznych na elementy zewnętrzne
- Załącznik C dotyczy tzw. pożarów lokalnych
- Załącznik D zawiera dodatkowe informacje nt. zaawansowanych modeli pożaru
- Załącznik E dotyczy gęstości obciążenia ogniowego
- Załącznik F omawia koncepcję równoważnego czasu oddziaływania pożaru
- Załącznik G zawiera metody obliczeniowe do wyznaczania współczynnika konfiguracji

Szczególnie ciekawe informacje i wytyczne zawarte są w załączniku E. Pozwalają one uwzględnić min. wpływ czynnych systemów ochrony przeciwpożarowej takich jak instalacja tryskaczowa na obliczeniową wartość gęstości obciążenia ogniowego.

Ponadto załącznik ten zawiera dane liczbowe dotyczące średniej gęstości obciążenia ogniowego dla obiektów innych niż produkcyjno-magazynowe (np. biur, przestrzeni handlowych, kin itd.), uzyskane w oparciu o badania statystyczne.

Zgodnie z obowiązujących w naszym kraju Warunkami Technicznymi dla budynków [1] gęstość obciążenia ogniowego jest parametrem brany pod uwagę tylko przy projektowaniu budynków klasyfikowanych jako produkcyjno-magazynowe.

Jednakże w przypadku zaawansowanej analizy dotyczącej zachowania konstrukcji w warunkach pożaru parametr ten staje się istotny również dla budynków klasyfikowanych jako ZL.

Budynki użyteczności publicznej mogą charakteryzować się różnymi gęstościami obciążenia ogniowego: od bardzo niskiej (np. dla holu na lotnisku lub sali kinowej), przez średnią (np. dla biur) do wysokiej (np. dla bibliotek czy obiektów handlowych).

Metody projektowe specyficzne dla poszczególnych materiałów konstrukcyjnych

Sposób wyznaczania nośności ogniowej elementów konstrukcji drewnianych w oparciu o Eurokod 5 był już omawiany na łamach Ochrony Przeciwpożarowej [6]. Jako uzupełnienie należy dodać, iż od czasu publikacji powyższego artykułu norma PN-EN 1995-1-2 ukazała się w polskiej wersji językowej, co powinno znacznie ułatwić jej stosowanie.

W dalszej części artykułu ograniczymy się do omówienia zawartych w Eurokodach metod projektowych dotyczących konstrukcji stalowych oraz żelbetowych.

PN-EN 1992-1-2 Projektowanie konstrukcji z betonu z uwagi na warunki pożarowe

W przypadku konstrukcji żelbetowych krytycznymi parametrami wpływającymi na odporność ogniową elementu są jego wymiary poprzeczne oraz odległość osiowa zbrojenia od najbliższej powierzchni narażonej na działanie pożaru. Odległość osiowa zbrojenia wiąże się bezpośrednio z grubością otuliny, a tym samym grubością warstwy betonu chroniącej zbrojenie przed wpływem wysokich temperatur.

Również klasa betonu ma wpływ na zachowanie się elementu w wysokich temperaturach – w przypadku betonów wysokiej wytrzymałości istnieje zwiększone ryzyko odpryskiwania w warunkach pożaru.

Wyznaczając odporność ogniową konstrukcji żelbetowych w oparciu o PN-EN 1992-1-2 można stosować dane tabelaryczne, uproszczone metody obliczeń a także zaawansowane modele obliczeniowe.

Dane tabelaryczne stosować można do analiz przeprowadzanych dla elementów konstrukcji. Tabele zawarte w normie dotyczą jedynie sytuacji pożaru standardowego, choć teoretycznie dane takie mogłyby być również opracowane dla innych krzywych pożarowych.

Uproszczone metody obliczeń omówione są w załączniku B normy. Metody te to metoda izotermi 500 °C i metoda strefowa. Powyższe metody można stosować przy analizie elementu oraz analizie części konstrukcji. Metody uproszczone mają zastosowanie dla pożaru opisanego krzywą standardową oraz krzywymi parametrycznymi.

Zaawansowane modele obliczeniowe można stosować w złożonych sytuacjach, w których prognozowanie warunków termicznych wywołanych działaniem pożaru odbywa się w oparciu o metody inżynierii bezpieczeństwa pożarowego. Modele takie mogą być stosowane zarówno w analizie elementu, analizie części konstrukcji a także globalnej analizie konstrukcji.

Niestety w zakresie zaawansowanych modeli obliczeniowych norma PN-EN 1992-1-2 podaje jedynie zasady podstawowe, dlatego możliwości praktycznego stosowania takich modeli przez projektantów są - w chwili obecnej - dosyć ograniczone.

Należy przypomnieć, iż metody określania odporności ogniowej elementów żelbetowych w oparciu o dane tabelaryczne zawarte w normie EN 1992-1-2 (a właściwie jej projekcie) są od kilku już lat dostępne dla projektantów i rzeczoznawcom w naszym kraju dzięki Instrukcji ITB [3], która była omawiana na łamach Ochrony Przeciwpożarowej [7] w 2006 r.

Obecnie projektanci i rzeczoznawcy mają do dyspozycji oficjalną wersję tej normy wdrożonej jako PN-EN 1992-1-2 i opublikowanej w języku polskim. Powinno to wpłynąć na szersze upowszechnienie zawartych w niej metod.

Norma PN-EN 1992-1-2 w części głównej zawiera zalecenia w zakresie podstaw projektowania na warunki pożarowe, procedury projektowania, wspomniane już dane tabelaryczne a także informacje nt. właściwości wytrzymałościowych i odkształceniowych betonu oraz stali (odpowiednio zbrojeniowej lub sprężającej) oraz właściwości termicznych betonu.

Podane są również specyficzne zalecenia dla elementów konstrukcyjnych z betonów wysokiej wytrzymałości.

Dla betonów wysokiej wytrzymałości (HSC) dodatkowe wymagania dotyczą przede wszystkim ochrony przed odpryskiwaniem w warunkach pożaru. Ponadto minimalne wymiary przekroju poprzecznego i odległości osiowej zbrojenia wymagana dla poszczególnych okresów odporności ogniowej różnią się nieco od wartości wymaganych dla betonów zwykłych.

Norma PN-EN 1992-1-2 zawiera także pięć załączników o charakterze informacyjnym, dotyczących specyficznych metod i sytuacji projektowych.

Załącznik A	zawiera obliczone profile temperatury dla płyt, belek i słupów
Załącznik B	zawiera informacje nt. uproszczonych metod obliczeń
Załącznik C	dotyczy wybożenia słupów w warunkach pożarowych
Załącznik D	zawiera metody obliczeniowe dla ścinania, skręcania i zakotwienia
Załącznik E	zawiera uproszczoną metodę obliczeniową dla belek i płyt

Jako przykład rozpatrzmy prosty przypadek zastosowania danych tabelarycznych zawartych w PN-EN 1992-1-2:

Musimy wyznaczyć minimalne wymiary oraz odległości osiowe dla żelbetowych słupów oraz belek ciągłych w budynku dla którego wymagana jest klasa B odporności pożarowej. Ponieważ powyższe elementy są głównej konstrukcji nośnej, dlatego wymagana jest dla nich nośność ogniowa R120.

Z informacji uzyskanych od projektanta wynika, iż stopień wykorzystania nośności w sytuacji pożarowej nie przekracza 0,50 dla żadnego z rozpatrywanych elementów.

- Zgodnie z tablicą 5.2a normy dla słupów wystarczające jest zapewnienie minimalnego wymiaru 350 mm przy odległości osiowej 45 mm (ew. wymiar minimalny 450 mm przy odległości osiowej 40 mm). Wymagane jest zastosowanie co najmniej 8 prętów zbrojeniowych oraz spełnienie kilku zaleceń dodatkowych właściwych dla metody A.
- Dla belek ciągłych żelbetowych o przekroju prostokątnym minimalne wymiary i odległości osiowe podane są w tablicy 5.6 normy. Dla odporności ogniowej R120 możliwych jest kilka kombinacji średniej odległości osiowej oraz szerokości belki np. 45mm/200mm, 35mm/300mm, 30mm/500mm.

Należy również pamiętać, że dla elementów o bardzo wysokiej klasie odporności ogniowej rzędu R240 minimalne wymagane odległości zbrojenia od powierzchni narażonej na działanie pożaru mogą wynosić 70 mm lub więcej. W takiej sytuacji – aby zapobiec odpryskiwaniu betonu - wymagane jest zastosowanie dodatkowego zbrojenia powierzchniowego.

PN-EN 1993-1-2 Obliczanie konstrukcji stalowych z uwagi na warunki pożarowe

Norma PN-EN 1993-1-2 w części głównej zawiera zalecenia w zakresie podstaw projektowania na warunki pożarowe, informacje nt. właściwości mechanicznych oraz termicznych stali węglowych i nierdzewnych a także procedury obliczania konstrukcji stalowych na wypadek pożaru z użyciem prostych i zaawansowanych modeli obliczeniowych.

Norma PN-EN 1993-1-2 zawiera dwa załączniki normatywne oraz trzy załączniki informacyjne:

Załącznik A	dotyczy umacniania stali węglowych w podwyższonych temperaturach
Załącznik B	dotyczy przepływu ciepła do zewnętrznych elementów stalowych
Załącznik C	dotyczy stali nierdzewnej
Załącznik D	dotyczy węzłów
Załącznik E	dotyczy przekrojów klasy 4

Zgodnie z zasadami zawartymi w PN-EN 1993-1-2 odporność ogniową konstrukcji stalowych można wyznaczać stosując proste lub zaawansowane modele obliczeniowe.

Podobnie jak dla konstrukcji z betonu, proste modele obliczeniowe znajdują zastosowanie w przypadku uproszczonych analiz przeprowadzanych dla pojedynczych elementów konstrukcji, w oparciu o ostrożne założenia upraszczające.

Zaawansowane modele obliczeniowe można stosować w bardziej złożonych sytuacjach, kiedy analizie podlega większa część lub też całość konstrukcji, a prognozowanie warunków termicznych wywołanych działaniem pożaru odbywa się w oparciu o metody inżynierii bezpieczeństwa pożarowego.

Norma dopuszcza również metody wykorzystujące badania doświadczalne, jednak nie są one stosowane w powszechnej praktyce projektowej i wykraczają poza zakres niniejszego artykułu.

Sprawdzenie nośności ogniowej konstrukcji stalowych przy użyciu prostych modeli obliczeniowych może się odbywać w dziedzinie nośności lub w dziedzinie temperatury. W obu przypadkach konieczne jest określenie temperatury stali po rozpatrywanym czasie trwania pożaru. Wyznaczoną temperaturę stali po odnośnym czasie pożaru możemy użyć do określenia zredukowanych właściwości mechanicznych stali lub – w przypadku weryfikacji wg. kryterium temperaturowego – porównać ją z temperaturą krytyczną.

Narastanie temperatury w stali

Przyrost temperatury $\Delta\theta_{a,t}$ w przedziale czasu Δt w nieosłoniętym elemencie stalowym określony jest następującym wzorem:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net,d} \Delta t$$

Gdzie:

k_{sh} współczynnik poprawkowy uwzględniający efekt zacienienia - dla przekrojów o kształcie wypukłym (np. rur) współczynnik ten jest równy jedności, dla przekrojów dwuteowych przyjęcie $k_{sh} = 1$ prowadzi do wyników po stronie bezpiecznej

A_m/V wskaźnik ekspozycji przekroju elementu nieosłoniętego [m^{-1}]

c_a ciepło właściwe stali (wartość c_a jest funkcją temperatury) [J/kgK]

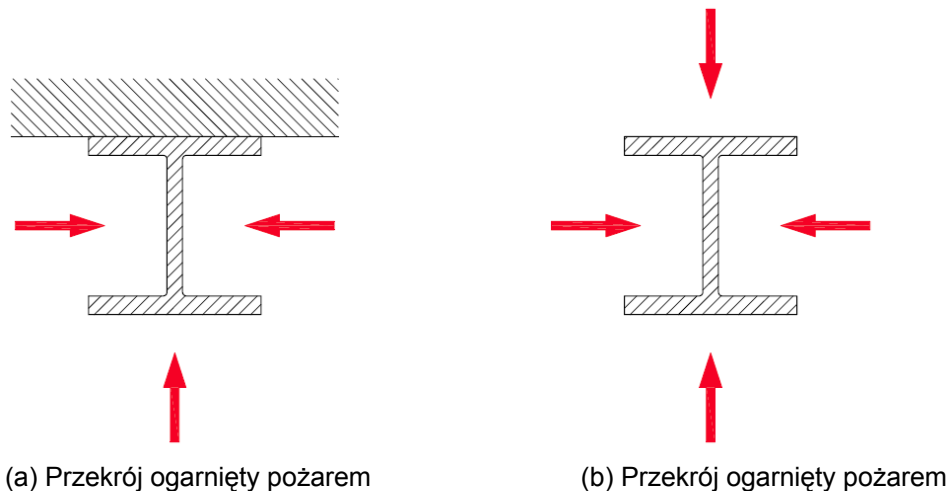
ρ_a gęstość stali = 7850 kg/m³

Δt przedział czasu [sekundy]

W oparciu o powyższy wzór oraz omówione wcześniej równania opisujące strumień ciepła można wyznaczyć historię przyrostu temperatury elementu stalowego w czasie.

W przeprowadzanej analizie należy przyjmować kroki czasowe nie większe niż 5 sekund.

Sposób wyznaczania współczynnika ekspozycji przekroju zależy również od tego, czy przekrój jest ogarnięty pożarem ze wszystkich strony, czy też przylega do elementu pełnego (np. ściany lub płyta żelbetowa stropu) z jednej strony (lub z kilku stron).



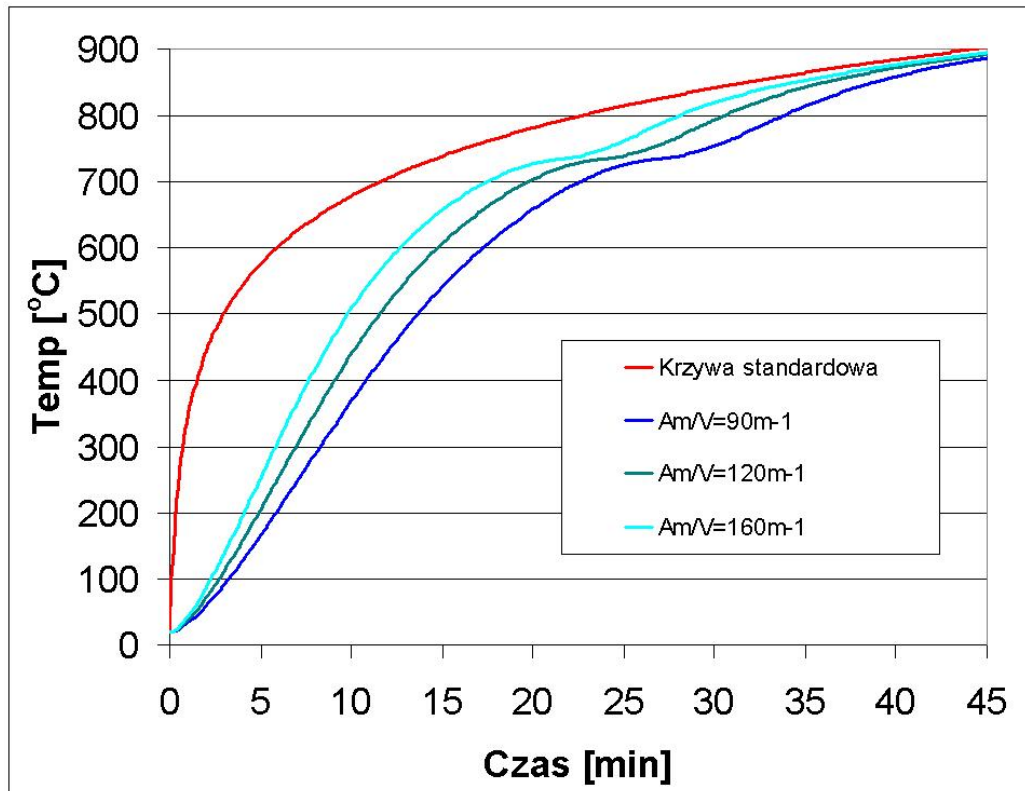
z trzech stron

ze wszystkich stron

Rys 4. Wskaźnik ekspozycji przekroju dla nieosłoniętych elementów stalowych

Jako przykład porównajmy wpływ współczynnika ekspozycji przekroju na wzrost temperatury elementu stalowego poddanego nagrzewaniu wg. krzywej standardowej temperatura-czas. Rozpatrzmy następujące przypadki:

- Kształtownik HEB320, ogrzewany z 3 stron – $A_m/V = 90 \text{ m}^{-1}$
- Kształtownik IPE550, ogrzewany z 3 stron – $A_m/V = 120 \text{ m}^{-1}$
- Kształtownik IPE450, ogrzewany z 4 stron – $A_m/V = 160 \text{ m}^{-1}$



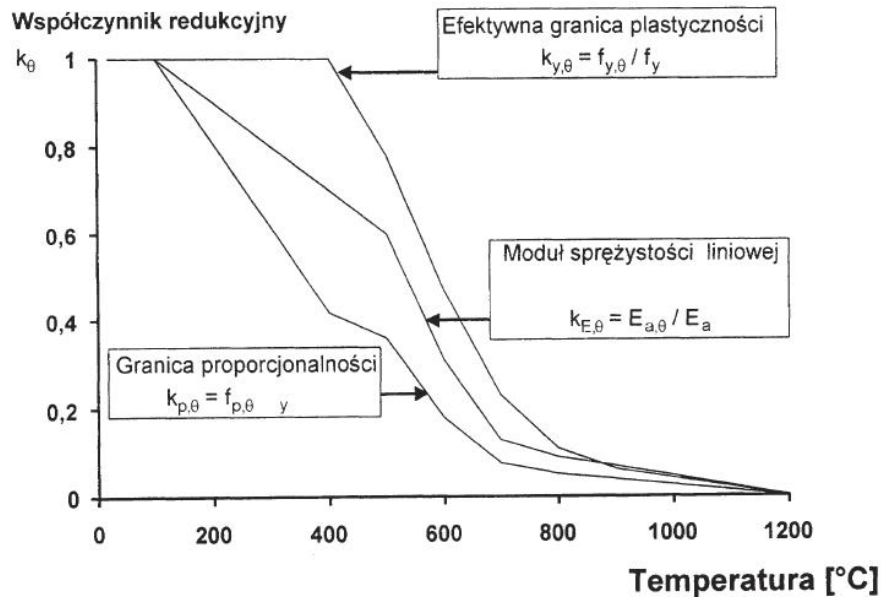
Rys 5. Porównanie temperatur w nieosłoniętych elementach stalowych o różnych współczynnikach ekspozycji, dla krzywej standardowej temperatura-czas

Dla masywnych przekrojów (niski wsp. A_m/V) przyrost temperatury stali jest znacznie wolniejszy. Dla standardowej krzywej temperatura-czas jest to szczególnie widoczne w ciągu pierwszych 10-20 minut pożaru.

Właściwości stali w wysokich temperaturach

Norma PN-EN 1993-1-2 podaje szczegółowe informacje dotyczące wpływu wysokich temperatur na właściwości mechaniczne oraz termiczne stali.

Z punktu widzenia nośności elementów stalowych w warunkach pożaru istotna jest redukcja właściwości wytrzymałościowych i odkształceniowych stali (w tym przede wszystkim efektywnej granicy plastyczności). Zależność odpowiednich współczynników redukcyjnych od temperatury podana jest w formie tabelarycznej i graficznej.



Rys 6. Współczynniki redukcyjne dla stali węglowej w podwyższonych temperaturach (źródło: PN-EN 1993-1-2)

W normie PN-EN 1993-1-2 podane są również zależności dla właściwości termicznych tj. wydłużalności termicznej, ciepła właściwego i przewodności cieplnej stali (w funkcji temperatury).

Sprawdzanie odporności ogniowej elementów stalowych wg. kryterium temperatury

Na zakończenie rozważań dotyczących konstrukcji stalowych rozważmy prosty przykład belki stalowej swobodnie podpartej podtrzymującej konstrukcję dachu, wykonanej z dwuteownika I400, dla której wymagana jest klasa odporności ogniowej R15.

Z informacji uzyskanych od projektanta konstrukcji wynika, że wskaźnik wykorzystania nośności μ_0 wynosi dla rozpatrywanej belki 0.5.

Naszym zadaniem jest sprawdzenie czy bez zabezpieczeń ogniochronnych rozpatrywana belka zachowa w warunkach pożaru nośność przez 15 minut.

Belka jest narażona na działanie pożaru z trzech stron. W oparciu o wymiary przekroju dostępne z tablic wyznaczamy współczynnik ekspozycji przekroju, który wynosi w tym przypadku $A_m/V=100 \text{ m}^{-1}$.

Założmy, iż rozpatrywany element podlega działaniu gazów pożarowych o temperaturze opisanej krzywą standardową (dla obiektów o niewielkim obciążeniu ogniowym w stosunku do kubatury jest to założenie bardzo ostrożne).

Korzystając z arkusza kalkulacyjnego wyznaczamy historię przyrostu temperatury stali w oparciu o metodologię opisaną powyżej. Po czasie $T=15$ minut temperatura rozpatrywanej belki wynosi $567 \text{ }^\circ\text{C}$. Temperaturę krytyczną odczytujemy z tablicy 4.1 normy. Dla wskaźnika wykorzystania nośności $\mu_0=0.5$ wynosi ona $\theta_{a,cr}= 585 \text{ }^\circ\text{C}$. Temperatura rzeczywista po czasie 15 minut nie przekracza temperatury krytycznej zatem rozpatrywana belka stalowa nie wymaga dodatkowych zabezpieczeń w celu osiągnięcia klasy odporności pożarowej R15.

Podsumowanie

Podsumowując można powiedzieć, że wdrożenie w naszym kraju Eurokodów konstrukcyjnych, a w szczególności tych ich części, które dotyczą projektowania z uwagi na warunki pożarowe, oddaje do dyspozycji projektantów spójną metodologię obliczeniowej weryfikacji odporności ogniowej elementów konstrukcji.

Wprowadź sposób publikacji Eurokodów a następnie ich wdrożenia w naszym kraju pozostawia wiele do życzenia, jednak ogólnie rzecz biorąc stworzenia zharmonizowanej w skali całej Unii Europejskiej metodologii projektowania konstrukcji budowlanych (w tym również z uwagi na warunki pożarowe) uznać należy z zjawisko pożądane.

Upowszechnienie Eurokodów zależy od dostępności materiałów pomocniczych, w tym publikacji interpretujących i wyjaśniających zalecenia poszczególnych części. Publikacje takie są już dostępne w języku angielskim [np. 10,11]. Należy mieć nadzieję, że opracowania takie zostaną wydane również w języku polskim.

Projektowanie konstrukcji ze względu na odporność ogniową jest jednym z fundamentalnych aspektów zapewnienia bezpieczeństwa pożarowego a także ochrony mienia w budynkach. Stosowanie odpowiednich części pożarowych poszczególnych Eurokodów może umożliwić w wielu przypadkach bardziej racjonalne strategie zapewnienia odporności ogniowej elementów konstrukcyjnych. Dotyczy to w szczególności konstrukcji stalowych i zespolonych.

Należy przy tym pamiętać, iż prawidłowe przeprowadzenie analizy odporności ogniowej elementów konstrukcyjnych wymaga współpracy ze strony rzeczoznawcy do spraw ochrony przeciwpożarowej, projektanta konstrukcji a w bardziej złożonych sytuacjach również inżyniera specjalizującego się w zaawansowanych metodach inżynierii bezpieczeństwa pożarowego.

Literatura:

- [1] Rozporządzenie ministra infrastruktury z 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. Nr 75, poz. 690 z późn. zmianami)
- [2] Instrukcja ITB 291, Wytoczne projektowania konstrukcji stalowych z uwagi na odporność ogniową, Warszawa, 1990
- [3] Instrukcja ITB 409/2005, Projektowanie elementów żelbetowych i murowych z uwagi na odporność ogniową, Warszawa, 2005
- [4] W. Skowroński, Teoria bezpieczeństwa pożarowego konstrukcji metalowych, PWN
- [5] A. Buchanan, Structural Design for Fire Safety, Wiley
- [6] Introduction to the fire safety engineering of structures, IStructE, Londyn, 2003
- [7] Guide to the advanced fire safety engineering of structures, IStructE, Londyn, 2007
- [8] P. Sulik, Odporność ogniowa konstrukcji drewnianych, "Ochrona Przeciwpożarowa" 4/2007
- [9] M. Kosiorek, G. Woźniak, Odporność ogniowa konstrukcji żelbetowych i murowych, "Ochrona Przeciwpożarowa" 1/2006
- [10] T. Lennon, D. Moore, Y. Wang, C. Bailey, Designer's guide to EN1991-1-2, EN1992-1-2, EN1993-1-2 and EN1994-1-2
- [11] J.M. Franssen, R. Zaharia, Design of Steel Structures subjected to Fire – Background and Design Guide to Eurocode 3, Les Editions de l'Universite de Liege, 2005