



Kontrola odporności elementów żelbetowych w warunkach pożaru wg zaleceń PN-EN 1992-1-2

Fire resistance assessment of RC elements due to requirements of PN-EN 1992-1-2 code

Budynek i urządzenia z nim powiązane powinny być zaprojektowane i wykonane w sposób zapewniający w razie pożaru nośność konstrukcji przez czas wynikający z rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dział VI, § 207.1 p. 1 [1]). Do określenia odporności pożarowej budynków ustanowiono pięć klas (ZL I, ZL II, ZL III, ZL IV i ZL V), zależnych od kategorii zagrożenia ludzi i wysokości budynku. Wymagania te nie dotyczą m.in. budynków mieszkalnych jednorodzinnych do trzech kondygnacji nadziemnych oraz budynków przeznaczonych do prowadzenia działalności gospodarczej do dwóch kondygnacji nadziemnych o kubaturze do 1000 m³.

W sytuacji pożaru elementy powinny spełniać kryteria: nośności (R); szczelności (E) oraz izolacyjności (I). Spełnienie kryterium nośności oznacza zachowanie funkcji nośnej w wymaganym czasie oddziaływania pożaru (podanym w minutach). Kryteria izolacyjności i szczelności dotyczą głównie elementów stanowiących przegrody ograniczające strefy pożarowe. Kryterium izolacyjności jest spełnione, jeśli na nienagrzewanej powierzchni średni przyrost temperatury nie przekracza 140 °C i jednocześnie lokalnie maksymalny przyrost nie przekracza 180 °C. Zależnie od typu elementu kryteria powinny być sprawdzane w trzech kombinacjach:

- wyłącznie kryterium „R” – w przypadku głównej konstrukcji nośnej, konstrukcji dachu;
- wszystkie kryteria „R”, „E” oraz „I” – w przypadku stropów;
- wyłącznie kryteria „E” oraz „I” – w przypadku ścian oraz przekrycia dachu.

Metody analizy odporności ogniowej opisane w normie PN-EN 1992-1-2 dotyczą głównie zasad sprawdzania warunków nośności, a zatem kryterium R. Odpowiednio do klasy odporności pożarowej, elementy konstrukcji budynku powinny spełniać wymagania nośności ogniowej budynku R [min] podane w tabeli [1].

Wymagania nośności ogniowej budynku

Klasa odporności pożarowej	Główna konstrukcja nośna	Konstrukcja dachu	Strop
A	R 240	R 30	R 120
B	R 120	R 30	R 60
C	R 60	R 15	R 60
D	R 30	–	R 30
E	–	–	–

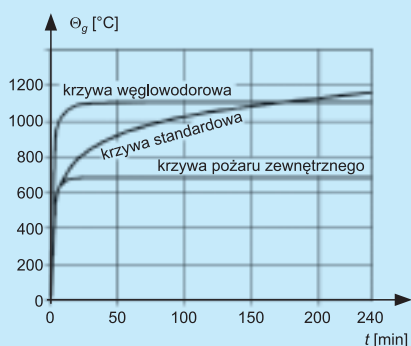
Większość elementów żelbetowych nie wymaga stosowania dodatkowych pasywnych systemów zabezpieczeniowych (natryski, płyty ogniochronne), pozwalających podwyższyć ich odporność ogniową. Beton w relatywnie niewielkim stopniu traci właściwości mechaniczne w warunkach podwyższonej temperatury, jednocześnie stosunkowo niska przewodność termiczna oraz dość duża bezwładność cieplna sprawiają, że stanowi on dobrą ochronę stali zbrojeniowej. Za krytyczne parametry wpływające na odporność ogniową elementu żelbetowego należy zatem uznać wymiary przekroju poprzecznego oraz grubość warstwy betonu, chroniącej zbrojenie (grubość otuliny). Pośredni wpływ ma również klasa betonu, z uwagi na zwiększone ryzyko odpryskiwania otuliny w przypadku betonów wysokiej wytrzymałości.

Modele pożaru

Analiza zachowania się elementu konstrukcji w sytuacji pożaru wymaga znajomości jego temperatury Θ w każdej chwili t od pojawienia się ognia. Prędkość nagrzewania się elementu $\Theta(t)$ zależy głównie od temperatury gazu Θ_g (spalin) w jego otoczeniu.

Rozwój pożaru determinujący rozkład temperatury spalin w strefie pożarowej zależy nie tylko od rodzaju i ilości nagromadzonych w niej materiałów palnych, ale także od ich rozmieszczenia oraz dopływu tlenu z otoczenia. Mnogość parametrów stanowi trudność w prognozowaniu rzeczywistego przebiegu pożaru. Eurokody dopuszczają stosowanie różnych modeli pożaru, od najprostszych, w których zmiany temperatury gazów spalinowych opisywane są za pomocą ujednoczonej krzywej nominalnej (**standardowy model pożaru**), przez **modele parametryczne**, kiedy fala wzrostu pożaru (przebieg krzywej wzrostu temperatury) może zależeć od różnych parametrów (np. liczby i rozmiarów otworów, przez które może występować dostęp tlenu z zewnątrz, geometrii pomieszczenia, nagromadzenia materiałów palnych), aż po **modele numeryczne**, wykorzystujące elementy teorii dynamiki płynów z zagadnieniami przepływu ciepła (zazwyczaj w rozwiązaniu wykorzystywane są techniki MES).

W praktyce należy oczekiwać, że ze względu na niewystarczającą wśród projektantów wiedzę z dziedziny pożarnictwa oraz małą dostępność specjalistycznego oprogramowania umożliwiającego analizy CFD, podstawowym narzędziem analizy bezpieczeństwa pożarowego pozostanie krzywa standardowa (rysunek 1), uzupełniona krzywymi nominalnymi dotyczącymi pożarów zbiorników paliwa i olejów (krzywa węglowodorowa) lub pożarów przebiegających



Rys. 1. Krzywe pożarowe

na zewnątrz budynków (krzywa pożaru zewnętrznego). Krzywe te są podstawą do określenia temperatury gazu w otoczeniu elementu poddanego działaniu pożaru Θ_g [°K].

Norma PN-EN 1992-1-2 definiuje obciążenie pożarem sumą strumienia ciepła konwekcyjnego i radiacyjnego netto na jednostkę powierzchni elementu:

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

gdzie konwekcyjny strumień ciepła netto ustala się ze wzoru:

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\Theta_g - \Theta_m)$$

natomiast radiacyjny strumień ciepła:

$$\dot{h}_{net,r} = \phi \cdot \epsilon_m \cdot \epsilon_f \cdot \sigma (\Theta_r^4 - \Theta_m^4)$$

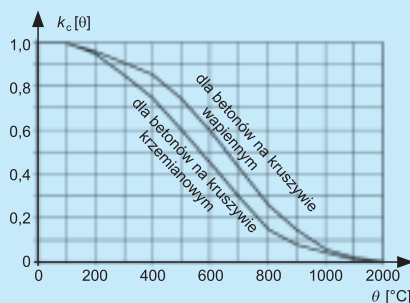
W przypadku elementów żelbetonowych można w przybliżeniu przyjmować $\phi = 1,0$, $\epsilon_m = 0,7$, $\epsilon_f = 1,0$, stała Stefana-Boltzmana $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$. α_c [W/m²K] jest współczynnikiem przejmowania ciepła przez konwekcję, który zależy od modelu pożaru i rodzaju krzywej temperatura – czas (np. dla krzywej standardowej $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Efektywną temperaturę promieniowania środowiska pożaru Θ_r [°K] w przypadku elementów całkowicie ogarniętych pożarem można przyjmować jako równą temperaturze gazu $\Theta_g = \Theta_r$. Temperatura powierzchni elementu Θ_m [°K] wynika z analizy temperatury elementu objętego pożarem. Na ogół analiza ta wymaga zastosowania metod numerycznych i programów MES. Zasadniczy wpływ na rozkład temperatury, obok właściwości materiałowych, takich jak przewodność i bezwładność cieplna, ma kształt elementu (elementy masywne, których stosunek powierzchni bocznych do objętości jest niewielki, będą nagrzewały się znacznie wolniej niż elementy smukłe). W związku z tym, że temperatura gazu w otoczeniu oraz temperatura na powierzchni elementu zmieniają się w czasie (co ma wpływ na wielkość strumienia ciepła), analiza temperatury elementu wymaga stosowania metod iteracyjno-przyrostowych dla możliwie krótkich odstępów czasowych.

Właściwości betonu i stali w warunkach pożaru

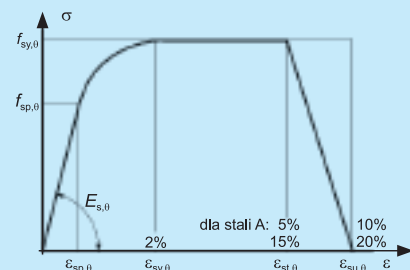
W części głównej norma PN-EN 1992-1-2 zawiera informacje dotyczące właściwości betonu i stali zbrojeniowej i wskazuje zalecenia do projektowania na warunki pożarowe oraz procedury projektowania. Wysoka temperatura powoduje zmiany cech mechanicznych materiałów konstrukcyjnych. Wraz ze wzrostem temperatury następuje redukcja wytrzymałości betonu oraz obniżenie granicy plastyczności zbrojenia.

Norma wskazuje metodę oszacowania zmniejszenia wytrzymałości betonu w wyniku przemnożenia przez współczynnik $k_{c\theta}$ (rysunek 2), który zależy od wzrostu temperatury.



Rys. 2. Zmiana współczynnika $k_{c\theta}$ pozwalającego na redukcję charakterystycznej wytrzymałości betonów zwykłych f_{ck}

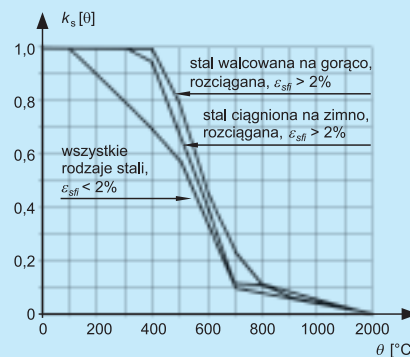
Warunki pożaru wpływają również na zmianę charakterystyki zachowania się stali zbrojenia. Granica plastyczności w normalnych warunkach pracy zostaje zastąpiona granicą plastyczności w warunkach podwyższonej temperatury $f_{sy,\theta}$ uzależnionej od zmiennej temperatury Θ (rysunek 3).



Rys. 3. Wykres $\sigma - \epsilon$ dla stali konstrukcyjnej w podwyższonej temperaturze [2]

Podobnie jak przy redukcji wytrzymałości betonu, norma zezwala na redukcję wytrzymałości stali wraz ze wzrostem temperatury, przez przemnożenie przez współczynnik zmniejszający $k_{s\theta}$ (rysunek 4).

W Eurokodzie podano trzy przypadki redukcji granicy plastyczności w zależności



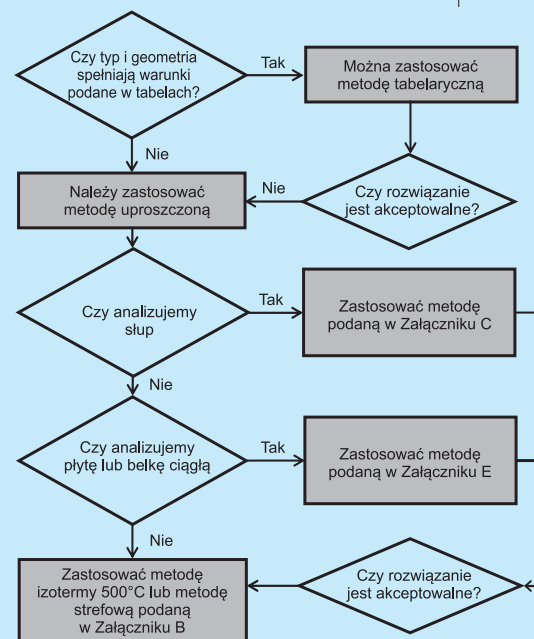
Rys. 4. Współczynnik $k_{s\theta}$ pozwalający na redukcję charakterystycznej wytrzymałości stali f_{yk}

od tego, czy zbrojenie będzie rozciągane czy ściskane. Osobne rozwiązania przewidziano dla stali sprężającej.

Modele analizy wpływu pożaru na konstrukcję

Norma PN-EN 1992-1-2 zawiera opis kilku modeli, o różnym stopniu zaawansowania, które należy stosować w zależności od stopnia złożoności rozpatrywanych sytuacji. Drogę wyboru najbardziej odpowiedniej metody pokazano schematycznie na rysunku 5.

Modele tabelaryczne można stosować w przypadku podstawowych elementów konstrukcji, jedynie w sytuacji pożaru standardowego. Metody tabelaryczne zastępują konieczność sprawdzenia nośności (dla ścian również izolacyjności i szczelności). Należy pamiętać, że wielkości podane w tabelicach opracowano na podstawie konser-



Rys. 5. Schemat wyboru metody analizy wpływu pożaru

watywnych założeń dla większości elementów konstrukcyjnych, gdyż powinny zapewniać duży zakres bezpieczeństwa w możliwie dużym zakresie przewodności cieplnej zastosowanych materiałów. Wartości te odnoszą się do betonów zwykłych na kruszywie krzemianowym (w przypadku kruszyw wapiennych lub lekkich wymiar przekroju poprzecznego można zredukować o 10%). Metody tabelaryczne znajdują zastosowanie w projektowaniu słupów, ścian, elementów rozciąganych oraz belek i płyt. W zawartych w normie [2] komentarzach do tabelic można znaleźć również opisy procedur służących do oceny w przypadkach wykraczających poza podstawowy zakres tablic. Podstawy metody tabelarycznej znajdują się w Instrukcji ITB 409/2005 częściowo opracowanej na podstawie projektu normy PN-EN 1992-1-2.

Omówione w Załączniku B **metody uproszczone** można stosować w przypadku mniej typowych elementów lub części konstrukcji, w sytuacji pożaru standardowego oraz opisanego krzywymi parametrycznymi. **Metodę izotermii** zaleca się do oddziaływań pożaru standardowego (lub innych oddziaływań cieplnych wywołujących podobne pola temperatury). Metoda ta polega na redukcji wymiarów przekroju poprzecznego w strefie zniszczonej przez pożar. Zakłada się, że zniszczony beton (o temperaturze ponad 500 °C) nie współpracuje w przenoszeniu obciążeń, natomiast pozostały przekrój poprzeczny betonu zachowuje początkowe wartości wytrzymałości i modułu sprężystości. Wytrzymałość zbrojenia redukuje się odpowiednio do wartości osiągniętej temperatury (temperaturę prętów zbrojeniowych można ustalać na podstawie profilów temperatury podanych w Załączniku A [2] i uwzględnić również pręty, które wypadają poza obszar przekroju zredukowanego izotermią 500 °C). Nośność przekroju oblicza się za pomocą powszechnie stosowanych równań równowagi.

Nieco bardziej pracochłonna, lecz dokładniejsza od metody izotermii 500 °C, jest **metoda strefowa**. Może ona być stosowana jedynie dla standardowej krzywej temperatura-czas. Przekrój poprzeczny analizowanego elementu dzieli się na przy-

najmniej 3 równoległe strefy o jednakowej grubości. Dla każdej z nich wyznacza się średnią temperaturę oraz odpowiadającą jej wytrzymałość i moduł sprężystości. Podobnie jak w metodzie izotermii 500 °C, zniszczenie części przekroju w pożarze uwzględnia się przez odrzucenie zniszczonej strefy szerokości a_z . Zniszczoną grubość a_z oblicza się na podstawie uśrednionego współczynnika redukcyjnego wytrzymałości na ściskanie kolejnych stref k_{co} . Dla zredukowanego przekroju prowadzi się obliczenia wg zasad, jak w temperaturze normalnej, ale dla obniżonych z uwagi na warunki pożarowe wytrzymałości i modułu sprężystości (oblicza się je dla temperatury w wybranym punkcie w zredukowanej strefie przekroju).

Obie metody uproszczone łączy zasada redukcji przekroju. W metodzie strefowej dodatkowo uwzględnia się pogorszenie cech wytrzymałościowych, dlatego też może ona zapewnić lepszą dokładność w analizie elementów cienkościennych. Z praktycznego punktu widzenia lepsza wydaje się metoda izotermii 500°C dzięki swej prostocie.

Norma PN-EN 1992-1-2 podaje również zasady podstawowe stosowania bardziej zaawansowanych modeli obliczeniowych, umożliwiających globalną analizę konstrukcji lub analizę jej części. Brak szczegółów sprawia jednak, że bez dodatkowej wiedzy z dziedziny inżynierii bezpieczeństwa pożarowego, praktyczne wykorzystanie tych metod przez projektantów jest raczej ograniczone.

Dodatkowym zjawiskiem, które może wymagać sprawdzenia, jest odpryskiwanie betonu, zazwyczaj będące efektem parowania wody niezwiązanej (kapilarnej) zawartej w betonie. W betonach o szczelnej strukturze (cecha betonów wysokiej wytrzymałości) uwalnianie się pary jest utrudnione i dlatego jej ciśnienie może osiągać duże wartości. Naprężenia spowodowane ciśnieniem pary wodnej zazwyczaj są skierowane do zewnętrznej, ogrzewanej powierzchni betonu i jeżeli osiągną wartość wytrzymałości betonu na rozciąganie, to często dochodzi do oderwania powierzchniowych fragmentów betonu. Odpryskiwa-

nie jest niebezpieczne, szczególnie gdy prowadzi do odsłonięcia zbrojenia, które niechronione ulega gwałtownemu nagrzananiu, tracąc cechy wytrzymałościowe.

Podsumowanie

Przed wprowadzeniem Eurokodów problem pożaru był w projektowaniu konstrukcji żelbetowych i sprężonych traktowany marginalnie. Europejskie przepisy normowe (poprzedzone Instrukcją ITB 409/2005 [4]) dają projektantom narzędzia służące do sprawdzenia odporności ogniowej z różną dokładnością. Wydaje się jednak, że w praktycznym zastosowaniu pozostaną metody tabelaryczne polegające na kontroli wymiarów i przekroju poprzecznego. Pozostałe metody, ze względu na pracochłonność i skomplikowanie, pozostaną raczej w sferze rozważań naukowych, przynajmniej do momentu rozwoju i upowszechnienia odpowiedniego oprogramowania komputerowego.

Abstract

The paper presents an overview of most important issues referring to fire resistance assessment for concrete structures in light on Eurocode 2 regulations. It lists the demands for providing appropriate level of safety for different types of buildings due to their height, function and importance. Authors described the models of fires and their impact on structural materials mechanical properties to conclude on the models of fire impact analysis for structures.

dr inż. Marcin Górski
dr inż. Rafał Krzywoń
Politechnika Śląska

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] PN-EN 1992-1-2 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-2: Reguły ogólne. Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe.
- [3] PN-EN 1991-1-2 Oddziaływanie na konstrukcję w warunkach pożaru.
- [4] Instrukcja ITB 409/2005 Projektowanie elementów żelbetowych i murowych z uwagi na odporność ogniową, Warszawa, 2005.

PARTNERZY DZIAŁU

