

**PROJEKTOWANIE
WEDŁUG
EUROKODÓW**

Piotr Turkowski, Grzegorz Woźniak

**Projektowanie konstrukcji z betonu
z uwagi na warunki pożarowe
według Eurokodu 2**

Designing concrete structures
for fire conditions according to Eurocode 2



Instytut Techniki Budowlanej

Warszawa 2023

KOMITET REDAKCYJNY SERII

Redaktor naczelny	prof. dr hab. inż. LEONARD RUNKIEWICZ
Zastępca redaktora naczelnego	dr hab. inż. JADWIGA FANGRAT, prof. instytutu
Sekretarz	mgr DANUTA SZCZEPAŃSKA
Członkowie	dr inż. JAN BOBROWICZ
	dr hab. inż. BARBARA FRANCKE
	mgr inż. JAN SIECZKOWSKI

Recenzenci

dr hab. inż. MIROSŁAW KOSIOREK, prof. PW

dr inż. PIOTR PACHOWSKI

Redaktor prowadzący serii

mgr inż. JAN SIECZKOWSKI

Opracowanie redakcyjne

mgr DANUTA SZCZEPAŃSKA

Projekt okładki

Ewa Kossakowska

Niniejsza publikacja zastępuje wydanie z 2019 r.

Wydanie poprawione i uzupełnione

© Copyright by Instytut Techniki Budowlanej
Warszawa 2023

ISBN 978-83-249-8639-2, 978-83-249-8643-9 (PDF)

Wydawca i Autorzy dołożyli wszelkich starań, aby publikowane informacje pochodziły z rzetelnych źródeł. Wydawca nie ponosi odpowiedzialności ani też nie zaciąga zobowiązań w wyniku wykorzystania przez użytkowników treści niniejszej publikacji. W szczególności nie ponosi odpowiedzialności w stosunku do czytelników i/lub strony trzeciej za jakiegokolwiek poniesione straty, wydatki i szkody bezpośrednie i pośrednie, łącznie z utratą zysku i innych korzyści majątkowych, które mogły powstać lub być związane bezpośrednio lub pośrednio z treściami opublikowanymi, w tym ewentualnymi błędami lub pominięciami zawartymi w publikowanych materiałach.



Instytut Techniki Budowlanej

Dział Wydawnictw Naukowych

02-656 Warszawa, ul. Ksawerów 21, tel.: 22 843 35 19

tel.: 22 56 64 208, e-mail: wydawnictwa@itb.pl www.itb.pl

Spis treści

<i>Streszczenie</i>	5
<i>Summary</i>	5
Przedmowa	7
1. Wstęp	9
1.1. Ogólne informacje o projektowaniu z uwagi na warunki pożarowe według Eurokodów	9
1.2. Przeznaczenie i zakres stosowania poradnika	10
2. Podstawy projektowania konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe	11
2.1. Oddziaływania termiczne pożaru na konstrukcje	11
2.2. Kryteria odporności ogniowej według PN-EN 13501-2.....	13
2.3. Zasady ustalania obciążeń w warunkach pożarowych według PN-EN1991-1-2	15
3. Zachowanie się konstrukcji z betonu w warunkach pożarowych	19
3.1. Postanowienia ogólne	19
3.2. Właściwości betonu i stali w warunkach pożarowych	19
3.3. Mechanizmy zniszczenia konstrukcji z betonu w warunkach pożarowych	23
3.4. Specyfika konstrukcji sprężonych oraz konstrukcji z betonu wysokiej wytrzymałości (HSC).....	26
4. Odporność ogniowa monolitycznych konstrukcji z betonu według PN-EN 1992-1-2.....	28
4.1. Metody oceny według PN-EN 1992-1-2	28
4.2. Metoda danych tabelarycznych	29
4.3. Uprozczone metody obliczeń.....	52
4.4. Zaawansowane metody obliczeń	57
4.5. Profile temperatury w płycie betonowej.....	58
5. Odporność ogniowa prefabrykowanych elementów z betonu	63
5.1. Postanowienia ogólne	63
5.2. Stropy z prefabrykowanych płyt kanałowych według PN-EN 1168	63
5.3. Belkowo-pustakowe systemy stropowe według PN-EN 15037-1	69
5.4. Żebrowe elementy stropowe według PN-EN 13224	71
5.5. Dachy z elementów prefabrykowanych według PN-EN 13693	72
5.6. Płyty stropowe do zespolonych systemów stropowych według PN-EN 13747.....	72
5.7. Prętowe elementy konstrukcyjne według PN-EN 13225.....	73
5.8. Ściany z prefabrykatów ściennych według PN-EN 14992	74
5.9. Schody według PN-EN 14843.....	75
5.10. Nadproża według PN-EN 845-2.....	75

6. Zabezpieczenia ogniochronne konstrukcji z betonu.....	76
6.1. Systemy zabezpieczenia ogniochronnego	76
6.2. Równoważna grubość betonu	76
6.3. Tynki	78
7. Metodyka projektowania konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe.....	81
7.1. Metodyka podejścia do projektowania z uwagi na warunki pożarowe.....	81
7.2. Przykład obliczeniowy	82
Bibliografia	87

PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI Z BETONU Z UWAGI NA WARUNKI POŻAROWE WEDŁUG EUROKODU 2

Streszczenie

W pracy omówiono problematykę bezpieczeństwa pożarowego konstrukcji z betonu. Scharakteryzowano termiczne i mechaniczne oddziaływania na konstrukcje, właściwości betonu oraz elementów żelbetowych i sprężonych w warunkach pożarowych. Przedstawiono zasady i metody ustalania odporności ogniowej elementów monolitycznych i prefabrykowanych, podane w Eurokodzie PN-EN 1992-1-2 oraz w dziewięciu zharmonizowanych normach wyrobów z betonu, w tym metodę danych tabelarycznych, metodę izotermi 500°C oraz metodę strefową. Informacje zilustrowano przykładami obliczeniowymi. Opracowanie jest adresowane przede wszystkim do projektantów i wykonawców konstrukcji żelbetowych oraz rzeczoznawców ds. zabezpieczeń przeciwpożarowych.

DESIGNING CONCRETE STRUCTURES FOR FIRE CONDITIONS ACCORDING TO EUROCODE 2

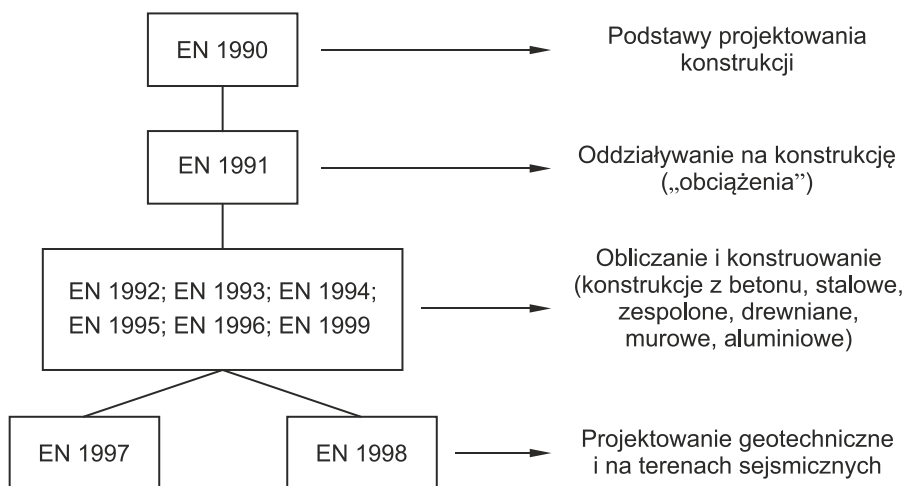
Summary

The work discusses issues concerning the fire safety of concrete structures. Thermal and mechanical actions on the structure and material properties of concrete and of reinforced concrete and prestressed concrete members exposed to fire are described. Principles and methods for determining the fire resistance of solid and prefabricated structural elements given in Eurocode PN-EN 1992-1-2 and in nine harmonised european product standards for concrete elements, including the tabulated data, 500°C isotherm and zone methods, are given. Relevant worked examples are provided. The book is addressed primarily to structural engineers, designers, contractors and fire safety experts.

PRZEDMOWA

Eurokody stanowią zestaw norm europejskich dotyczących projektowania konstrukcji budowlanych. Zostały one opracowane, aby służyć jako dokumenty odniesienia do wskazania zgodności budynków i budowli z wymaganiami podstawowymi zawartymi w dyrektywie 89/106/EWG dotyczącej wyrobów budowlanych i rozporządzeniu [21] oraz w ustawie Prawo budowlane.

Eurokodów, jak pokazano na schemacie poniżej, jest 10 i są one numerowane kolejno od EN 1990 do EN 1999. Każdy z Eurokodów, z wyjątkiem EN 1990, stanowi pakiet składający się z szeregu części, których łącznie jest 58.



Eurokody mogą być stosowane równoległe z normami PN-B dotyczącymi projektowania konstrukcji, zgodnie z załącznikiem nr 1 do rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. z 2022 r., poz. 1225). Normy PN-B zostały w marcu 2010 r. wycofane ze zbioru norm aktualnych i przewiduje się, że w niedługim czasie nie będą stosowane w praktyce projektowej.

Komisja Europejska, zdając sobie sprawę z trudności, jakie mogą wystąpić przy wdrażaniu Eurokodów do praktyki, w dokumencie informacyjnym L „Stosowanie i sposób wykorzystania Eurokodów” (tłumaczenie – ITB 2004 r.) przedstawiła krajom członkowskim postulat ich „obudowania” dokumentami aplikacyjnymi, bezpośrednio odpowiadającymi potrzebom warsztatu projektowego.

W tej sytuacji Instytut Techniki Budowlanej – wychodząc naprzeciw aktualnym potrzebom projektowym w budownictwie – podjął inicjatywę publikacji poradników w ramach serii wydawniczej pt. „Projektowanie według Eurokodów”.

Celem tej serii jest przybliżenie inżynierom wymagań i metod obliczeniowych zawartych w Eurokodach. Istotą serii nie jest dublowanie informacji zamieszczonych w Eurokodach, lecz przedstawienie komentarzy do poszczególnych postanowień oraz zilustrowanie ich przykładami obliczeniowymi.

Poradniki są przeznaczone dla osób zajmujących się projektowaniem konstrukcji budowlanych, mogą też służyć pomocą w procesie dydaktycznym na kierunkach budowlanych w szkolnictwie technicznym.

Seria Instytutu Techniki Budowlanej pt. „Projektowanie konstrukcji budowlanych według Eurokodów” powstała w ramach dotacji statutowej przyznanej ITB przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

* * *

Tytuły opublikowanych lub przewidzianych do publikacji w najbliższym okresie poradników z tej serii wydawniczej zamieszczone są zwykle na przedostatniej stronie okładki.

Komitet Redakcyjny
Serii „Projektowanie według Eurokodów”
Instytutu Techniki Budowlanej

1. WSTĘP

1.1. Ogólne informacje o projektowaniu z uwagi na warunki pożarowe według Eurokodów

Odporność ogniowa elementów konstrukcyjnych, która tradycyjnie była i jest ustalana w badaniach ogniowych, wraz z wejściem w życie Eurokodów stała się przedmiotem projektowania i oceny metodami obliczeniowymi, a obowiązek dokonywania takiej oceny spoczywa na projektantach i wykonawcach konstrukcji. Począwszy od marca 2010 r. system Polskich Norm jako jedyny zawiera aktualne w tym zakresie Eurokody. Wcześniejsze normy polskie są jednak nadal przywoływane (jako podstawa alternatywna) w rozporządzeniu Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [32].

Eurokody konstrukcyjne składają się z wielu części; warunkom pożarowym poświęcone są części 1-2 poniższych Eurokodów:

- PN-EN 1991 Eurokod 1 – Oddziaływania na konstrukcje,
- PN-EN 1992 Eurokod 2 – Projektowanie konstrukcji z betonu,
- PN-EN 1993 Eurokod 3 – Projektowanie konstrukcji stalowych,
- PN-EN 1994 Eurokod 4 – Projektowanie zespolonych konstrukcji stalowo-
-betonowych,
- PN-EN 1995 Eurokod 5 – Projektowanie konstrukcji drewnianych,
- PN-EN 1996 Eurokod 6 – Projektowanie konstrukcji murowych,
- PN-EN 1999 Eurokod 9 – Projektowanie konstrukcji aluminiowych.

Wszystkie części pożarowe Eurokodów przyjmują wspólne założenia podstawowe oraz metodykę projektowania i oceny odporności ogniowej konstrukcji. Eurokody stanowią zwarty system norm, pomiędzy którymi występują liczne odwołania. Szczególne znaczenie mają: Eurokod podstawowy PN-EN 1990 [1], podający zasady ogólne projektowania oraz Eurokod 1 – PN-EN 1991-1-2 [2], określający zasady ustalania oddziaływań i obciążeń przy projektowaniu z uwagi na warunki pożarowe. Wszystkie pozostałe Eurokody odwołują się do tych dwóch norm.

U podstaw Eurokodów leży rozróżnienie „zasad”, które muszą być stosowane przez projektantów, od nieobligatoryjnych „reguł stosowania”. Każdy z Eurokodów zawiera załącznik krajowy, w którym wyspecyfikowane zostały wartości parametrów krajowych obowiązujących w danym państwie.

1.2. Przeznaczenie i zakres stosowania poradnika

Poradnik dotyczy zasad projektowania elementów z betonu z uwagi na wymagania odporności ogniowej. Może także być stosowany przy ocenie odporności ogniowej konstrukcji w fazie ich odbioru i eksploatacji.

Podstawę do opracowania stanowiły:

- Eurokody PN-EN 1992-1-2 i PN-EN 1991-1-2,
- europejskie zharmonizowane normy wyrobów z betonów.

Poradnik jest przeznaczony dla projektantów i wykonawców konstrukcji budowlanych oraz dla rzeczoznawców budowlanych i do spraw zabezpieczeń przeciwpożarowych, a także osób i instytucji zajmujących się odbiorem i utrzymaniem właściwości użytkowych budynku. Poradnik dotyczy elementów z betonu projektowanych z uwzględnieniem oddziaływania wyjątkowego pożaru standardowego określonego normą PN-EN 1363-1 [24]. Opracowanie dotyczy także elementów konstrukcji z betonu bez dodatkowych zabezpieczeń ogniochronnych. W rozdziale 7 podano podstawowe informacje odnoszące się do zasad i metod zabezpieczania ogniochronnego tych konstrukcji.

Zakres opracowania obejmuje:

– elementy konstrukcji monolitycznych z betonu ujęte w PN-EN 1992-1-2 [4], zaprojektowane i skonstruowane zgodnie z PN-EN 1992-1-1 [3] (konstrukcje betonowe i żelbetowe, wykonywane na budowie z betonu zwykłego – o gęstości: $2000 \text{ kg/m}^3 < \rho \leq 2600 \text{ kg/m}^3$ – zgodnego z PN-EN 206 [20], na kruszywie krzemianowym lub wapiennym, klasy nie wyższej niż C45/55 oraz z betonu wysokiej wytrzymałości),

– elementy wykonane z prefabrykatów z betonu, dla których zostały opracowane europejskie zharmonizowane normy wyrobów:

- PN-EN 1168 Płyty kanałowe,
- PN-EN 15037-1 Belkowo-pustakowe systemy stropowe. Belki,
- PN-EN 13224 Żebrowe elementy stropowe,
- PN-EN 13693 Specjalne elementy dachowe,
- PN-EN 13747 Płyty stropowe do zespolonych systemów stropowych,
- PN-EN 13225 Prętowe elementy konstrukcyjne,
- PN-EN 14992 Elementy ścian,
- PN-EN 14843 Schody,
- PN-EN 845-2 Nadproża.

2. PODSTAWY PROJEKTOWANIA KONSTRUKCJI Z UWAGI NA WARUNKI POŻAROWE

2.1. Oddziaływania termiczne pożaru na konstrukcje

Podstawowe zasady dotyczące oddziaływań termicznych i mechanicznych na konstrukcje w warunkach pożaru oraz kryteriów R, E, I odporności ogniowej (zwanych również, zgodnie z PN-EN 13501-2 [22], charakterystykami skuteczności działania), wynikających z funkcji elementów w budynku, przedstawiono w rozdziale 2.2. Najbardziej istotne właściwości materiałowe dla zachowania konstrukcji z betonu w warunkach pożarowych scharakteryzowano w rozdziale 3.

Odporność ogniową określa się przy następujących podstawowych scenariuszach pożaru rozwiniętego, zwanych pożarami nominalnymi:

– krzywa standardowa (N)

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

– krzywa węglowodorowa (H)

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

– krzywa zewnętrzna (E)

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

gdzie:

T – temperatura pożaru [°C],

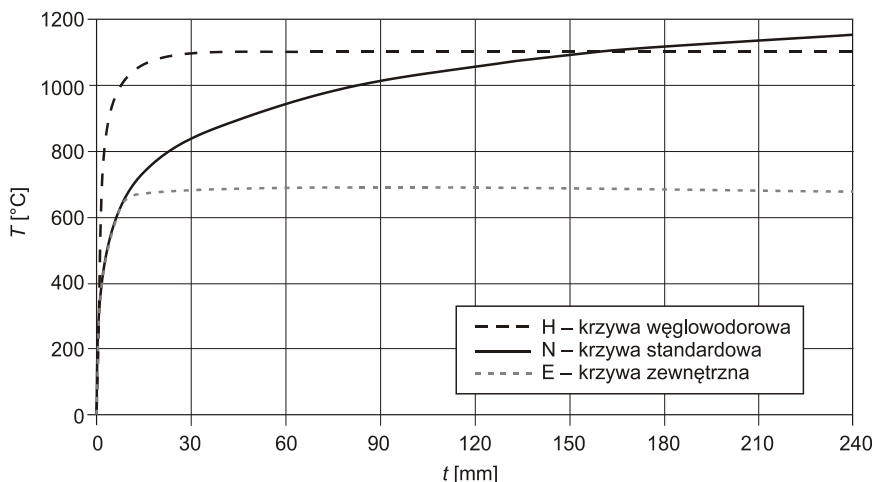
t – czas [min].

Krzywe nominalne temperatura-czas opisane zależnościami (1) do (3) przedstawiono na wykresie (rys. 1).

W przypadku konstrukcji z betonu istotne są wszystkie przedstawione krzywe: N (standardowa – powiązana z pożarem celulozowym), H (węglowodorowa – powiązana z pożarem produktów naftowych) oraz E (zewnętrzna – stosowana przy oddziaływaniu ognia na elementy budynku od strony elewacji).

Zgodnie z postanowieniami normy PN-EN 13501-2 [22] oraz rozporządzenia [32], klasyfikację w zakresie odporności ogniowej elementów z betonu ustala się dla scenariusza pożaru standardowego (krzywa N). W przypadku innych nominalnych scenariuszy pożarowych (węglowodorowy H lub zewnętrzny E) ocenę odporności ogniowej

można przeprowadzić, wykorzystując zaawansowane metody obliczeń (por. rozdz. 4.4) lub wyniki badań – jednak dokonana wtedy ocena nie będzie równoważna ustaleniu klasy odporności ogniowej elementu formalnie zgodnej z krajowymi przepisami.



Rys. 1. Nominalne krzywe charakteryzujące oddziaływania termiczne (pożar rozwinięty)

W normie PN-EN 1991-1-2 [2] wprowadzono i zdefiniowano także naturalne modele pożaru (lokalnego oraz strefowego), w którym warunki nagrzewania ustala się indywidualnie na podstawie analizy parametrów chemicznych i fizycznych procesu spalania oraz indywidualnego scenariusza rozwoju pożaru w pomieszczeniu lub obiekcie. Obecnie, na podstawie zapisów w załączniku krajowym do normy PN-EN 1991-1-2 [2] oraz postanowień rozporządzenia [32], naturalne modele pożaru nie powinny być wykorzystywane do analizy i oceny odporności ogniowej elementów z betonu. Z tego powodu zagadnienia oddziaływania pożarów naturalnych na konstrukcje zostały w poradniku pominięte.

Oddziaływania termiczne na konstrukcje określa gęstość strumienia ciepła na powierzchnię elementu. W obliczeniach pól temperatury, ustalając warunki brzegowe, należy uwzględnić wymianę ciepła przez:

- konwekcję (dla modelu pożaru standardowego współczynnik przyjmowania ciepła na powierzchni nagrzewanej $\alpha = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ oraz nienagrzewanej $\alpha = 9 \text{ W/m}^2\text{K}$),
- radiację (emisyjność powierzchni betonowej $\varepsilon = 0,7$).

Analiza pól temperatury w elementach poddawanych oddziaływaniu pożaru jest jedną z podstaw oceny odporności ogniowej konstrukcji. Ustalenie rozwoju i rozkładu temperatury w elemencie – z racji wykorzystywania metod i modeli pozwalających na realistyczną analizę konstrukcji w warunkach pożaru – zalicza się do zaawansowanych metod obliczeń. Z reguły analizę taką przeprowadza się z wykorzysta-

taniem technik komputerowych. W przypadku oceny elementów nośnych analizie termicznej towarzyszy zwykle, jako kolejny etap, analiza mechaniczna elementu lub konstrukcji. Oddziaływania mechaniczne na konstrukcje w warunkach pożaru omówiono w rozdziale 2.3.

2.2. Kryteria odporności ogniowej według PN-EN 13501-2

Wykorzystywane w normach i przepisach klasy odporności ogniowej są zdefiniowane w normie PN-EN 13501-2 [22]. W odniesieniu do konstrukcji z betonu najważniejsze są trzy charakterystyki skuteczności działania:

R – nośność ogniowa

Nośność ogniowa R jest to zdolność elementu konstrukcji do wytrzymania oddziaływania ognia przy określonych oddziaływaniach mechanicznych na jedną lub więcej powierzchni przez określony czas, bez utraty nośności lub stateczności, bądź przekroczenia dopuszczalnych wartości przemieszczeń lub odkształceń.

E – szczelność ogniowa

Szczelność ogniowa E jest to zdolność elementu konstrukcji, pełniącego funkcję oddzielającą, do wytrzymania oddziaływania ognia tylko z jednej strony, bez przeniesienia ognia na stronę nienagrzewaną w wyniku przeniknięcia płomieni lub gorących gazów, które mogą spowodować zapalenie powierzchni nienagrzewanej albo jakiegokolwiek materiału będącego w sąsiedztwie tej powierzchni.

Ocena szczelności ogniowej generalnie powinna być przeprowadzana na podstawie następujących efektów:

- powstania pęknięć lub otworów przekraczających określone wymiary,
- zapalenia tamponu z waty bawełnianej,
- utrzymywania się płomienia na stronie nienagrzewanej.

Utratę nośności ogniowej (kryterium „R”) należy uznawać również za utratę szczelności ogniowej.

I – izolacyjność ogniowa

Izolacyjność ogniowa I jest to zdolność elementu konstrukcji do wytrzymania oddziaływania ognia tylko z jednej strony, bez przeniesienia ognia w wyniku znaczącego przepływu ciepła ze strony nagrzewanej na stronę nienagrzewaną. Przenieszenie powinno być ograniczone tak, żeby powierzchnia nienagrzewana ani jakikolwiek materiał będący w jej otoczeniu, nie zapalił się. Element konstrukcji powinien stanowić również barierę dla ciepła, wystarczającą do ochrony ludzi w jego pobliżu.

Kryterium osiągnięcia izolacyjności ogniowej stanowi przyrost temperatury na powierzchni nienagrzewanej elementu. Jego zachowanie wymaga spełnienia dwóch warunków:

- przyrost średniej temperatury powierzchni nienagrzewanej elementu oddzielającego powinien być ograniczony do 140 K powyżej początkowej temperatury średniej,

– maksymalny przyrost temperatury powinien być ograniczony do 180 K w dowolnym punkcie tej powierzchni.

Wyczerpanie któregokolwiek z kryteriów szczelności ogniowej (kryterium „E”) należy również rozumieć jako utratę izolacyjności ogniowej, niezależnie od tego, czy poszczególne granice temperaturowe izolacyjności ogniowej zostały przekroczone. Kombinacja charakterystyk skuteczności działania tworzy określone klasy odporności ogniowej w zależności od funkcji elementów i spełnianych kryteriów.

W zależności od funkcji elementu w budynku, uwzględniającej jego cechy konstrukcyjne oraz oddzielające, poszczególne typowe elementy budowlane wykonane z betonu klasyfikuje się w klasach odporności ogniowej podanych w tabelicy 1.

Tablica 1. Klasy odporności ogniowej elementów z betonu w zależności od typu i funkcji

Element	Funkcja w budynku		Klasy odporności ogniowej
	nośna	oddzielająca	
Słup, belka, podciąg, rygiel, rama, balkon, kładka, schody	+	–	R
Strop, dach	+	–	R
	+	+	REI
Ściana wewnętrzna nośna	+	+	REI
	+	–	R
Ściana działowa	–	+	E
	–	+	EI
Ściana zewnętrzna nośna	+	+	RE
	+	+	REI
Ściana zewnętrzna nienośna	–	+	E
	–	+	EI
Oznaczenie klasy odporności ogniowej należy uzupełnić o odpowiednią wartość czasu, w którym wszystkie kryteria danej klasy odporności ogniowej są zachowane.			

Jako przykładową ilustrację wykorzystania klasyfikacji odporności ogniowej elementów w tabelicy 2 podano znane z rozporządzenia [32] wymagania w zakresie odporności ogniowej elementów budynku. Szczegółową definicję i sposób ustalania klas „A” do „E” odporności pożarowej budynków Czytelnik znajdzie w rozporządzeniu [32].

Tablica 2. Wymagania w zakresie odporności ogniowej elementów budynku

Klasa odporności pożarowej budynku	Klasa odporności ogniowej elementów budynku					
	główna konstrukcja nośna	konstrukcja dachu	strop	ściana zewnętrzna	ściana wewnętrzna	przekrycie dachu
„A”	R 240	R 30	REI 120	EI 120 (o↔i)	EI 60	RE 30
„B”	R 120	R 30	REI 60	EI 60 (o↔i)	EI 30	RE 30
„C”	R 60	R 15	REI 60	EI 30 (o↔i)	EI 15	RE 15
„D”	R 30	(-)	REI 30	EI 30 (o↔i)	(-)	(-)
„E”	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)

W tablicy 2 nie podano kilku odnośników, które znajdują się w rozporządzeniu [32] i stanowią ważne uzupełnienia do jego postanowień.

2.3. Zasady ustalania obciążeń w warunkach pożarowych według PN-EN1991-1-2

Zgodnie z Eurokodem podstawowym PN-EN 1990 [1], pożar należy traktować jako sytuację wyjątkową, a konstrukcję należy projektować, wykorzystując następującą kombinację wyjątkową obciążeń:

$$\sum G_k + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i} + \sum A_d(t) \quad (4)$$

gdzie:

- G_k – wartość charakterystyczna oddziaływań stałych,
- $Q_{k,1}$ – wartość charakterystyczna podstawowego oddziaływania zmiennego,
- $Q_{k,i}$ – wartość charakterystyczna pozostałych oddziaływań zmiennych,
- $A_d(t)$ – wartość obliczeniowa oddziaływań spowodowanych pożarem, tj. oddziaływań pośrednich i dodatkowych,
- $\psi_{1,1}, \psi_{2,i}$ – współczynniki do określania wartości reprezentatywnych obciążeń (wartości częste i wartości prawie stałe), które zależą od typu i kategorii obciążenia zmiennego i wynoszą $\psi_{1,1} = 0,2$ do $0,9$ oraz $\psi_{2,i} = 0$ do $0,8$.

W sytuacji gdy nie zachodzi konieczność uwzględniania pośrednich oddziaływań pożaru, norma PN-EN 1991-1-2 [2] dopuszcza uproszczone sposoby określania obciążeń konstrukcji, w których:

- uwzględnia się kombinację obciążeń (4) przy założeniu $t = 0$, tj. oddziaływania traktuje się jako niezmiennie w czasie trwania pożaru,
- efekt oddziaływań w sytuacji pożarowej ustala się według wzoru:

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} \cdot E_d \quad (5)$$

gdzie:

E_d – wartość obliczeniowa odpowiednich sił wewnętrznych i reakcji w temperaturze normalnej, wyznaczana dla podstawowej kombinacji obciążeń zgodnie z PN-EN 1990,

η_{fi} – współczynnik redukcyjny dla obliczeniowego obciążenia w przypadku pożaru, którego wartość wynosi:

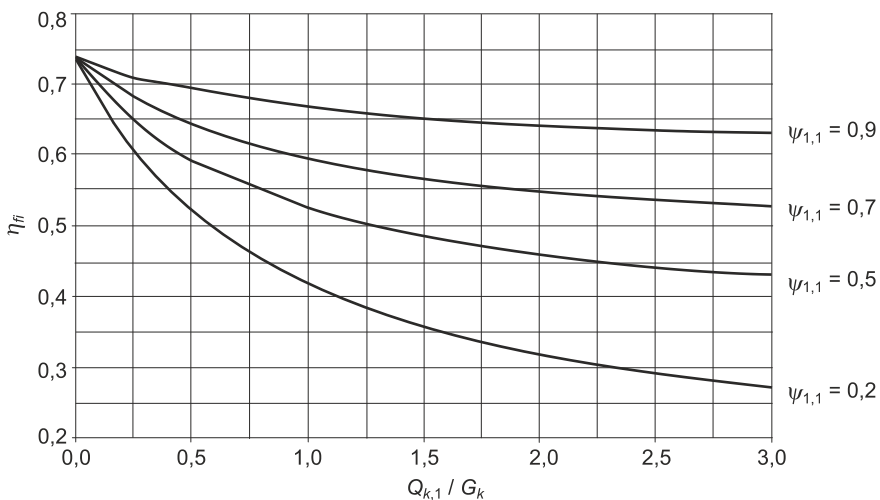
$$\eta_{fi} = \frac{1 + \psi_{fi} \beta}{\gamma_G + \gamma_Q \beta} \quad (6)$$

Wartość η_{fi} zależy od $\beta = Q_{k,1}/G_k$, czyli stosunku podstawowego obciążenia zmiennego do obciążeń stałych, współczynników częściowych γ_G i γ_Q dla obciążeń stałych i zmiennych przy projektowaniu w temperaturze normalnej oraz od kombinacyjnego współczynnika dla obciążeń zmiennych ψ_{fi} , który może być przyjmowany jako $\psi_{1,1}$ lub $\psi_{2,1}$. Przykładowy przebieg zależności $\eta_{fi}(\xi)$ dla kilku wartości ψ_{fi} przedstawiono na rysunku 2.

Zgodnie z załącznikiem krajowym do PN-EN 1991-1-2 [2] zaleca się przyjmowanie współczynnika kombinacyjnego $\psi_{fi} = \psi_{1,1}$ (wartość częsta).

Norma PN-EN 1992-1-2 [4], przy ustalaniu oddziaływań na konstrukcje żelbetowe i sprężone w warunkach pożaru, dopuszcza jako bezpieczne przyjmowanie z pominięciem dokładniejszej analizy współczynnika redukcyjnego obciążeń o wartości $\eta_{fi} = 0,7$.

Należy pamiętać, iż współczynniki częściowe γ_G i γ_Q dla obciążeń stałych i zmiennych uzyskują obecnie wartości według Eurokodu, tj. $\gamma_G = 1,35$ oraz $\gamma_Q = 1,50$. Wartości współczynników ψ_1 lub ψ_2 , w zależności od kategorii i sposobu użytkowania obiektu podanych w Eurokodzie (PN-EN 1990, tabl. A 1.1), przedstawiono w tablicy 3.



Rys. 2. Zmienność współczynnika redukcji obciążeń w warunkach pożarowych

Tablica 3. Zalecane wartości współczynników ψ_1 i ψ_2 dla budynków

Oddziaływania	ψ_1	ψ_2
Obciążenie zmienne w budynkach, kategoria (patrz PN-EN 1991-1-1)		
Kategoria A: powierzchnie mieszkalne	0,5	0,3
Kategoria B: powierzchnie biurowe	0,5	0,3
Kategoria C: miejsca zebrań	0,7	0,6
Kategoria D: powierzchnie handlowe	0,7	0,6
Kategoria E: powierzchnie magazynowe	0,9	0,8
Kategoria F: powierzchnie ruchu pojazdów; pojazdy ≤ 30 kN	0,7	0,6
Kategoria G: powierzchnie ruchu pojazdów 30 kN < ciężar pojazdu ≤ 160 kN	0,5	0,3
Kategoria H: dachy	0	0
Obciążenie budynków śniegiem (patrz PN-EN 1991-1-3)		
Miejscowości położone na wysokości $H > 1000$ m n.p.m.	0,50	0,20
Miejscowości położone na wysokości $H \leq 1000$ m n.p.m.	0,20	0
Obciążenie wiatrem (patrz PN-EN 1991-1-4)	0,20	0

Sposób ustalenia współczynnika redukcji obciążeń w warunkach pożarowych zilustrowano w przykładzie 1.

Przykład 1. Obciążenie stropu w budynku o przeznaczeniu handlowym

1. Kombinacja podstawowa obciążeń (warunki normalne):

obciążenie obliczeniowe w warunkach normalnych: $E_d = 1,35 G_k + 1,50 Q_{k,1}$

obciążenie stałe: $G_k = 4,00 \text{ kN/m}^2$

podstawowe obciążenie zmienne: $Q_{k,1} = 5,00 \text{ kN/m}^2$

podstawowa kombinacja obciążeń w warunkach normalnych:

$$E_d = 1,35 \cdot 4,00 + 1,50 \cdot 5,00 = 5,40 + 7,50 = 12,90 \text{ kN/m}^2$$

2. Kombinacja wyjątkowa obciążeń (warunki pożarowe):

$$E_{d,fi} = G_k + \psi_{1,1} Q_{k,1}$$

współczynnik kombinacyjny $\psi_{1,1} = 0,7$ (jak dla powierzchni handlowej)

wyjątkowa kombinacja obciążeń:

$$E_{d,fi} = 4,00 + 0,7 \cdot 5,0 = 7,50 \text{ kN/m}^2$$

3. Współczynnik redukcyjny obciążeń w warunkach pożarowych:

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

$$\eta_{fi} = 0,58$$

Warto zauważyć, iż zredukowane obciążenia w przytoczonym przykładzie ($\eta_{fi} = 0,58$) są istotnie niższe od tych, które należałoby przyjąć bez dokonywania obliczeniowej analizy ($\eta_{fi} = 0,70$). Dotyczy to większości realnie projektowanych konstrukcji. W konsekwencji – obliczenia i późniejsze stosowanie współczynnika redukcyjnego η_{fi} pozwalają na łatwiejsze spełnienie kryteriów nośności ogniowej elementów konstrukcji (np. poprzez stosowanie mniejszej otuliny zbrojenia).