

dr inż. Krzysztof Chudyba*
dr inż. Krzysztof Kosiński*

Określanie odporności ogniowej ścian murowych metodą uproszczoną wg PN-EN 1996-1-2

Determination of masonry walls fire resistance by simplified method according to PN-EN 1996-1-2

Streszczenie. W artykule opisano metodę uproszczoną weryfikacji odporności ogniowej ścian murowych wg PN-EN 1996-1-2. Przedstawiono wyniki obliczeń uzyskane z jej zastosowaniem w odniesieniu do redukcji nośności ścian murowych z różnych materiałów (ceramika, silikaty, lekki beton kruszywowy) w efekcie oddziaływania temperatury pożarowej. Zakres przeprowadzonej analizy obliczeniowej obejmuje różne warunki ogrzewania, różne materiały i typy elementów murowych oraz różną grubość ścian. Na podstawie wyników redukcji nośności wnioskować można o poziomie odporności ogniowej R ścian murowych.

Słowa kluczowe: odporność ogniowa, ściany murowe, metoda uproszczona.

Abstract. In the paper there is briefly outlined the simplified method for masonry walls fire resistance verification according to PN-EN 1996-1-2. Results of calculations carried out by this method for load-bearing capacity reduction for masonry walls for some selected materials (ceramic, silicates, lightweight aggregate concrete) under fire action are presented. The scope of conducted analysis include different heating conditions, various materials and masonry elements types and different wall thickness. Presented results makes it possible to conclude about fire resistance level R of masonry walls.

Keywords: fire resistance, masonry walls, simplified method.

W normie [1] zamieszczone są dwie metody obliczeniowe do określania odporności ogniowej ścian murowych: uproszczona (w Załączniku C) oraz zaawansowana (w Załączniku D). Ogólne zasady projektowania ścian murowych z uwagi na warunki pożarowe zgodnie z normą [1] oraz inne metody weryfikacji odporności ogniowej takich elementów przedstawiono w publikacji [3].

Zgodnie z metodą uproszczoną, nośność określa się dla przekroju zredukowanego, ustalonego na podstawie zasięgu granicznych izoterm w przekroju analizowanej ściany murowej w ustalonym czasie trwania oddziaływania ogniowego. Metodę tę można stosować tylko w przypadku standardowych warunków oddziaływania pożarowego. W procedurze obliczeniowej najpierw należy określić rozkład (profil) temperatury w przekroju ściany, następnie zdefiniować przekrój zredukowany z uwzględnieniem odpowiednich wartości granicznych izoterm, a wreszcie obliczyć nośność przekroju zredukowanego wg ogólnych założeń jak w przypadku zwykłej temperatury (wg PN-EN 1996-1-1 [2]), ale z uwzględnieniem różnej wytrzymałości muru w poszczególnych (wydzielonych izotermami granicznymi) strefach przekroju ściany. Ostatecz-

* Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej

nie dokonuje się weryfikacji, czy obliczona nośność jest wystarczająca dla występujących kombinacji oddziaływań w warunkach pożarowych. Na rysunku 1 przedstawiono ogólny schemat do określania zasięgu odpowiednich stref w celu zdefiniowania przekroju zredukowanego w przypadku działania ognia z jednej strony ściany.



Rys. 1. Przekrój ściany z podziałem na strefy temperatury: poniżej θ_1 , pomiędzy θ_1 i θ_2 oraz powyżej temperatury θ_2 (obszar konstrukcyjnie nieefektywny): 1 – krawędź przekroju ściany; 2 – izoterma dla temperatury $\theta = \theta_2$; 3 – izoterma dla temperatury $\theta = \theta_1$

W warunkach pożarowych w stanie granicznym nośności należy wykazać, że obliczeniowa wartość obciążenia pionowego (N_{Ed}) nie przekracza nośności ściany murowej w warunkach pożarowych:

$$N_{Ed} \leq N_{Rd,fi(\theta)} \quad (1)$$

Obliczeniowa nośność ściany przy obciążeniu pionowym w warunkach pożarowych może być wyrażona jako:

$$N_{Rd,fi(\theta)} = \Phi(f_{d\theta 1} A_{\theta 1} + f_{d\theta 2} A_{\theta 2}) \quad (2)$$

gdzie:

$A_{\theta 1}$ – pole powierzchni przekroju ściany z temperaturą poniżej θ_1 ;

$A_{\theta 2}$ – pole powierzchni przekroju ściany z temperaturą w przedziale pomiędzy θ_1 i θ_2 ;

θ_1 – maksymalna temperatura, przy której można przyjmować wytrzymałość muru jak w warunkach zwykłej temperatury (tabela 1);

θ_2 – temperatura, powyżej której wytrzymałość muru może być pominięta (tabela 1);

$f_{d\theta 1}$ – wartość obliczeniowa wytrzymałości muru na ściskanie w przypadku temperatury nieprzekraczającej θ_1 ;

$f_{d\theta 2}$ – wartość obliczeniowa wytrzymałości muru na ściskanie w przypadku temperatury w przedziale od θ_1 do θ_2 , przyjęta jako równa $c f_{d\theta 1}$; c – stała określona z zależności naprężenie-odkształcenie uzyskanej z badań ogniowych dla rozważanego materiału muru (tabela 1);

Φ – współczynnik redukcyjny nośności w środkowej części wysokości ściany na podstawie normy [2] z uwzględnieniem dodatkowego mimośrodowość $e_{d\theta}$; $e_{d\theta}$ – mimośród dodatkowy wywołany oddziaływaniem pożarowym.

Wartość $e_{d\theta}$ można określać z zależności:

$$e_{d\theta} = \frac{1}{8} h_{ef}^2 \frac{\alpha_t (\theta_2 - 20)}{t_{Fr}} \leq \frac{h_{ef}}{20} \quad (3)$$

gdzie:

$e_{d\theta} = 0$ – w przypadku działania ognia z dwóch stron ściany;

h_{ef} – efektywna wysokość ściany;

α_t – współczynnik rozszerzalności termicznej ściany murowej wg PN-EN 1996-1-1 [2], p. 3.7.4; 20 °C – temperatura założona na nieogrzewanej powierzchni ściany;

t_{Fr} – grubość części przekroju, w przypadku której temperatura nie przekracza θ_2 .

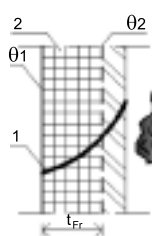
W tabeli 1 zestawiono wartości parametrów niezbędnych do obliczeń ścian murtowych obciążonych pionowo w warunkach pożarowych wg równania (2).

Tabela 1. Podstawowe wartości parametrów niezbędnych do przeprowadzenia obliczeń metodą uproszczoną wg PN-EN 1996-1-2 [1]

Materiał elementu murtowego i zaprawa	Parametr		
	c	θ_2 [°C]	θ_1 [°C]
Elementy ceramiczne ze zwykłą zaprawą	c_{cl}	600	100
Elementy silikatowe z zaprawą na cienkie spoiny	c_{cs}	500	100
Elementy z betonu lekkiego ze zwykłą zaprawą	c_{la}	400	100
Elementy z betonu ze zwykłą zaprawą	c_{da}	500	100
Elementy z betonu komórkowego z zaprawą na cienkie spoiny	c_{bac}	700	200

Na rysunku 2 schematycznie przedstawiono rozkład temperatury w przekroju ściany i sposób określania przekroju zredukowanego do obliczania nośności muru w warunkach pożarowych zgodnie z metodą uproszczoną.

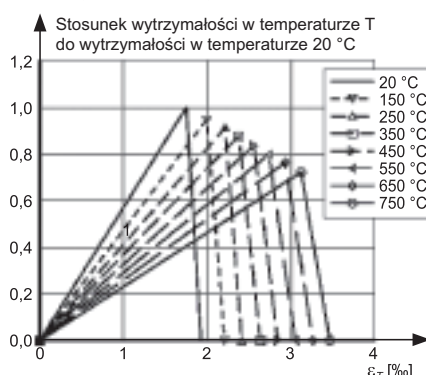
Rozkład temperatury w przekroju ściany i wartość temperatury, przy której materiał muru przestaje być konstrukcyjnie efektywny w warunkach pożarowych, powinny być ustalane na podstawie badań ogniowych albo danych uzyskanych z bazy wyników badań ogniowych. Pomoc projektową w tym zakresie mogą stanowić także dane o rozkładzie temperatury podane w Załączniku D PN-EN 1996-1-2 [1]. W tym samym załączniku zamieszczono ponadto informacje o wartościach parametrów potrzebnych do analizy mechanicznej w warunkach pożarowych w formie zależności naprężenie-odkształcenie dla elementów ceramicznych (rysunek 3), silikatowych i z betonu lekkiego.



Rys. 2. Rozkład temperatury w przekroju ściany i sposób określenia przekroju zredukowanego w metodzie uproszczonej obliczania nośności w warunkach pożarowych: 1 – rozkład temperatury; 2 – przekrój zredukowany zachowujący wytrzymałość materiału ($A_{\theta_1} + A_{\theta_2}$)

Chociaż w PN-EN 1996-1-2 [1] zamieszczono różnego typu pomoce projektowe, nie podano wprost wartości stałej c definiującej poziom redukcji wytrzymałości muru w obszarze pomiędzy dwoma izotermami granicznymi, co jest niezbędne do obliczenia nośności zgodnie z równaniem (2). W tym celu można jednak wykorzysta-

tać dane zamieszczone w Załączniku D (w szczególności: rozkład temperatury w przekroju i zależne od temperatury zależności naprężenie-odkształcenie dla różnych materiałów murtowych w warunkach pożaru standardowego). Należy jednak przy tym wskazać na pewne sprzeczności między zasadą metody uproszczonej i podanymi zależnościami naprężenie-odkształcenie. W metodzie bazującej na przekroju zredukowanym wytrzymałość muru, w obszarze pomiędzy dwoma zdefiniowanymi izotermami granicznymi, podlega redukcji (przez stałą c), podczas gdy w przypadku elementów silikatowych i z lekkiego betonu kruszywowego następuje przyrost wytrzymałości w stosunku do warunków normalnej temperatury.



Rys. 3. Wartości obliczeniowe zależności naprężenie-odkształcenie w funkcji temperatury w przypadku ściany z elementów ceramicznych (grupy 1) o wytrzymałości 12 N/mm² – 20 N/mm² i gęstości 900 kg/m³ – 1 200 kg/m³ [1]

Przykład zastosowania metody uproszczonej

Zakres analizy obliczeniowej obejmował różne warunki ogrzewania (ogień z jednej strony ściany lub ogień z obu stron) i czas trwania oddziaływania pożarowego, różne materiały (ceramika, silikaty i lekki beton kruszywowo) oraz grubość ścian. Rozkład temperatury w przekroju ściany został ustalony z wykorzystaniem danych zawartych w Załączniku D normy [1] dla różnego czasu trwania oddziaływania ognia. W celu ustalenia wartości liczbowej stałej c wykorzystano profile temperatury i zależności naprężenie-odkształcenie podane w tym samym załączniku. Dokonano dwóch oszacowań wartości stałej c ścian ceramicznych: w przypadku wartości średniej temperatury pomiędzy granicznymi izotermami (c = średnia – odpowiadająca temperaturze

($\theta_1 + \theta_2$)/2) i wartości minimalnej w tym obszarze (c = minimum – odpowiadające temperaturze θ_2). Z uwagi na wspomnianą sprzeczność pomiędzy metodą uproszczoną a zależnością naprężenie-odkształcenie dla silikatów i lekkiego betonu kruszywowego, w przeprowadzonej analizie założono wartość c = 1 (jako oszacowanie konserwatywne).

Wykonano obliczenia w przypadku ścian z elementów ceramicznych i z lekkiego betonu kruszywowego z normalną zaprawą oraz z silikatów łączonych na cienkie spoiny. Przyjęto grubość muru 180; 250 i 380 mm oraz wysokość ściany 2,60 m (w świetle), a także jej usztywnienie przez stropy żelbetowe na obu końcach. Założono, że ściana jest obciążona z mimośrodem początkowym $h_{ef}/450$. W przypadku ściany poddanej działaniu ognia z jednej strony ten mimośród powiększono o wartość $e_{\Delta\theta}$ zgodnie z równaniem (3).

Z powodu struktury formuł występujących w procedurze obliczania nośności względnej $N_{Rd,fi}/N_{Rd}$ końcowy rezultat nie zależy od wartości wytrzymałości muru na ściskanie. W efekcie przeprowadzonych obliczeń na podstawie PN-EN 1996-1-2 [1] i PN-EN 1996-1-1 [2] określono wartości $N_{Rd,fi}/N_{Rd}$ w poszczególnych analizowanych przypadkach. Takie podejście umożliwia wnioskowanie o poziomie odporności ogniowej (R) przez określenie z odpowiedniego wykresu takiej wartości czasu trwania oddziaływania ogniowego, dla której odpowiadająca wartość $N_{Rd,fi}/N_{Rd}$ wynosi 0,65 (poziom obciążenia dla warunków pożarowych, który może być założony wg [1]).

Wyniki obliczeń w przypadku ścian ceramicznych przedstawiono w tabelach 2 i 3, ścian silikatowych – w tabeli 4, natomiast ścian z lekkiego betonu kruszywowego – w tabeli 5. Na podstawie wyników dotyczących ścian ceramicznych przy działaniu ognia z jednej strony stwierdzono, że we wszystkich analizowanych przypadkach osiągnięty został poziom odporności ogniowej R90, a w przypadku ścian grubości 250 i 380 mm – nawet R120. Gdy oddziaływanie ogniowe występuje z obu stron ściany, uzyskane wartości $N_{Rd,fi}/N_{Rd}$ są mniejsze i w konsekwencji poziom odporności ogniowej jest niższy: R60 – ściany grubości 180 mm, R90 – 250 mm i R120 – 380 mm.

W przypadku ścian wykonanych z elementów silikatowych otrzymano podobne wyniki, przy czym ściany grubości 180 mm uzyskały tylko odporność ogniową R60 niezależnie od warunków ich

Tabela 2. Wyniki obliczeń ścian ceramicznych – oddziaływanie ognia z jednej strony ściany

Grubość ściany [mm]	Czas trwania oddziaływania pożarowego [min]	$N_{Rd,fi}/N_{Rd}$ (c = minimum)	$N_{Rd,fi}/N_{Rd}$ (c = średnia)
		ogień z jednej strony ściany	
180	60	0,71	0,74
	90	0,63	0,67
	120	0,59	0,62
250	60	0,82	0,85
	90	0,77	0,80
	120	0,74	0,77
380	60	0,90	0,92
	90	0,87	0,89
	120	0,85	0,87

Tabela 3. Wyniki obliczeń ścian ceramicznych – oddziaływanie ognia z obu stron ściany

Grubość ściany [mm]	Czas trwania oddziaływania pożarowego [min]	$N_{Rd,fi}/N_{Rd}$ (c = minimum)	$N_{Rd,fi}/N_{Rd}$ (c = średnia)
		ogień z obu stron ściany	
180	60	0,66	0,74
	90	0,52	0,59
	120	0,43	0,49
250	60	0,77	0,82
	90	0,66	0,72
	120	0,60	0,66
380	60	0,85	0,89
	90	0,78	0,83
	120	0,75	0,79

Tabela 4. Wyniki obliczeń ścian silikatowych

Grubość ściany [mm]	Czas trwania oddziaływania pożarowego [min]	$N_{Rd,fi}/N_{Rd}$ ogień z jednej strony	$N_{Rd,fi}/N_{Rd}$ ogień z obu stron
180	60	0,69	0,70
	90	0,62	0,57
	120	0,51	0,32
	180	0,42	0,14
250	60	0,82	0,80
	90	0,78	0,72
	120	0,71	0,57
	180	0,66	0,46
380	60	0,91	0,88
	90	0,88	0,83
	120	0,84	0,74
	180	0,81	0,67

ogrzewania, natomiast grubości 250 mm – R90 w przypadku ognia działającego z obu stron ściany.

Analizując wyniki dotyczące elementów z lekkiego betonu kruszywowego stwierdzono, że w przypadku ścian grubości 180 mm poddanych działaniu ognia z jednej

Tabela 5. Wyniki obliczeń murów z kruszywowego betonu lekkiego

Grubość ściany [mm]	Czas trwania oddziaływania pożarowego [min]	$N_{Rd,fi}/N_{Rd}$ ogień z jednej strony	$N_{Rd,fi}/N_{Rd}$ ogień z obu stron
180	60	0,74	0,70
	90	0,68	0,59
	120	0,63	0,48
	180	0,54	0,28
250	60	0,85	0,80
	90	0,81	0,74
	120	0,78	0,67
	180	0,72	0,54
380	60	0,92	0,88
	90	0,90	0,84
	120	0,88	0,80
	180	0,84	0,72

strony odporność ogniowa wynosi R90, a w przypadku działania ognia z dwóch stron R60. Dla pozostałych ścian grubości 250 mm i 380 mm poddanych działaniu ognia z dwóch stron uzyskano odpowiednio R120 i R180, a w przypadku działania ognia z jednej strony obie ściany charakteryzowały się odpornością ogniową R180.

W przypadku ścian ceramicznych różnice w wartościach redukcji nośności uzyskane przy założeniu różnych wartości stałej c nie przekroczyły 5%, niezależnie od rozważanych warunków ogrzewania. Wpływ wartości stałej c (c = średnia lub c = minimum) na redukcję nośności ściany ceramicznej jest odwrotnie proporcjonalny do grubości ściany. Zarówno ściany ceramiczne, silikatowe, jak i z lekkiego betonu kruszywowego, poddane działaniu ognia z obu stron charakteryzowały się większą redukcją nośności niż w przypadku oddziaływania pożarowego z jednej strony ściany. Różnicę w redukcji nośności można opisać jako odwrotnie proporcjonalną do grubości ściany. Należy zwrócić uwagę, że w przypadku działania ognia z obu stron ściany wartość dodatkowego mimośrodowego od temperatury $e_{\Delta\theta} = 0$. Kompensuje to w pewien sposób niekorzystny wpływ redukcji przekroju ściany z obu stron zamiast tylko z jednej.

Ostatecznie odporność ogniowa R jest określana jako wartość wyrażona w minutach (30, 60, 90, 120 min,...) i dla wszystkich przypadków nieosiągających danej wartości liczbowej przypisuje się element do niższej klasy. W ten sposób wpływ wartości liczbowej stałej c i jej ewentualnych niedokładności jest dodatkowo osłabiany przy obliczaniu nośności ściany i końcowym wnioskowaniu o odporności ogniowej.

Podsumowanie

Z uwagi na specyfikę i różnorodność materiałów stosowanych do wykonywania konstrukcji murowych niezbędne jest zdefiniowanie zestawu właściwości/parametrów, które występują w procedurze obliczeniowej w metodzie uproszczonej, niezależnie dla każdego materiału i typu elementu murowego (poziomy izoterm granicznych, wartości stałej c redukującej wytrzymałość muru na ściskanie w strefie pomiędzy granicznymi izotermami θ_1 i θ_2). Przedstawienie wyników obliczeń wg metody uproszczonej w postaci redukcji nośności w funkcji czasu trwania oddziaływania pożarowego ($N_{Rd,fi}/N_{Rd}$) umożliwia bezpośrednie wnioskowanie o odporności ogniowej R. W praktyce dokonuje się tego przez określenie z uzyskanego wykresu wartości czasu trwania oddziaływania pożarowego, dla którego redukcja nośności $N_{Rd,fi}/N_{Rd}$ przyjmuje wartość 0,65 (poziom obciążenia w sytuacji pożarowej, który można przyjmować zgodnie z [1]).

Pomimo wprowadzenia stałej c dla różnych materiałów elementów murowych (ogólne oznaczenia w tabeli 1) nie podano w [1] wartości liczbowych tych wielkości. Zaleca się, aby określać je na podstawie badań ogniowych. Wydaje się jednak uzasadnione, aby wykorzystać w tym względzie informacje zamieszczone w Załączniku D PN-EN 1996-1-2 [1] w postaci zależności naprężenie-odkształcenie w funkcji temperatury i zastosować je do określenia wartości stałej c.

Na podstawie przeprowadzonej analizy obliczeniowej w przypadku ścian ceramicznych można stwierdzić, że różnice redukcji nośności przy przyjęciu dwóch oszacowań wartości stałej c (średniej i minimalnej) wynoszą do 5%, niezależnie od rozważanych warunków ogrzewania (ogień z jednej lub z obu stron ściany). Wyniki redukcji nośności ścian murowych spowodowane niekorzystnym wpływem temperatury pożarowej obliczone na podstawie metody uproszczonej normy [1] są raczej mało wrażliwe na założoną wartość stałej c.

Literatura

- [1] PN-EN 1996-1-2: *Projektowanie konstrukcji murowych. Część 1 – 2. Reguły ogólne. Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe.*
- [2] PN-EN 1996-1-1: *Projektowanie konstrukcji murowych. Część 1 – 1. Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych.*
- [3] Chudyba K., Matysek P. *Projektowanie ścian murowych z uwagi na warunki pożarowe w świetle wymagań Eurokodów*, Materiały Budowlane, 7/2012, str. 84 – 87.