BUDOWNICTWO
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
CIVIL ENGINEERING
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
2-B/2011
ZESZYT 18
ROK 108
ISSUE 18
YEAR 108

KRZYSZTOF CHUDYBA, PIOTR MATYSEK*

ODPORNOŚĆ OGNIOWA ŚCIAN MUROWYCH

FIRE RESISTANCE OF MASONRY WALLS

Streszczenie

W artykule przedstawiono zagadnienie określania odporności ogniowej ścian murowych. Podano podstawowe wymagania właściwości użytkowych dla konstrukcji murowych w warunkach pożarowych, metody analizy konstrukcji oraz szczegółowe procedury projektowania według PN-EN 1996-1-2 (na podstawie danych tabelarycznych, uproszczonych i zaawansowanych inżynierskich metod obliczeniowych oraz badań ogniowych ścian). Przedstawiono także wyniki badań doświadczalnych ścian z elementów murowych ceramicznych, silikatowych i elementów z keramzytobetonu przeprowadzonych w krajowych i zagranicznych laboratoriach akredytowanych (ITB Warszawa–Polska, MPA Brunszwik–Niemcy, FIRES – Batizovce, Słowacja), analizując uzyskane wyniki pod kątem wymagań normy PN-EN 1996-1-2.

Słowa kluczowe: konstrukcje murowe, odporność ogniowa, metody weryfikacji, badania ogniowe

Abstract

In the paper there are presented questions of determination of fire resistance for walls made of masonry elements. There are given the basic requirements for properties of masonry structures, methods of analysis for structures in fire conditions and detailed design procedures according to PN-EN 1996-1-2 (based on tabulated data, simplified and advanced calculations or fire tests for elements). Tests descriptions and results of fire resistance for wall elements carried out in different laboratories (ITB Warszawa – Poland, MPA Braunschweig – Germany, FIRES – Batizovce, Slovakia) are included and commented within the light of code PN-EN 1996-1-2 requirements.

Keywords: masonry structures, fire resistance, verification methods, fire tests

* Dr inż. Krzysztof Chudyba, dr inż. Piotr Matysek, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1. Wstęp

Zgodnie z Dyrektywą Rady Wspólnoty Europejskiej dotyczącą wyrobów budowlanych 89/106/EWG obiekty budowlane muszą być zaprojektowane i wykonane w taki sposób, aby w przypadku pożaru:
– nośność konstrukcji mogła być zapewniona przez założony okres czasu,
– powstanie i rozprzestrzenianie się ognia i dymu w obiektach było ograniczone,
– rozprzestrzenianie się ognia na sąsiednie obiekty było ograniczone,
– użytkownicy mogli bezpiecznie opuścić obiekt,
– uwzględnione zostało bezpieczeństwo ekip ratunkowych.

Dokument Interpretacyjny nr 2 „Bezpieczeństwo pożarowe" [1] stanowi, że tak sformułowane wymagania mogą zostać spełnione poprzez stosowanie w krajach członkowskich odpowiednich strategii bezpieczeństwa pożarowego, takich jak konwencjonalne scenariusze pożarowe (pożary normowe) lub „rzeczywiste/naturalne" (parametryczne) scenariusze pożaru, łącznie ze środkami biernej lub aktywnej ochrony przeciwpożarowej.

Oddziaływania na konstrukcje w warunkach pożaru (traktowanego jako wyjątkowa sytuacja obliczeniowa) określać należy na podstawie normy PN-EN 1991-1-2 [2]. Dotyczy ona oddziaływań termicznych oraz mechanicznych na konstrukcje, analizowanych w temperaturach pożarowych, i jest przeznaczona do stosowania łącznie z częściami Eurokodów do projektowania konstrukcji w warunkach pożarowych, które określają zasady projektowania konstrukcji wykonanych z różnych materiałów ze względu na odporność ogniową – w przypadku konstrukcji murowych właściwą normą jest PN-EN 1996-1-2 [3].

2. Podstawowe wymagania dotyczące właściwości użytkowych konstrukcji murowych

Podstawowe wymagania dla konstrukcji murowych w warunkach pożaru to:
– nośność (R) – zdolność do przejęcia określonych oddziaływań podczas odpowiedniego scenariusza pożarowego, zgodnie ze szczegółowymi kryteriami,
– szczelność (E) – zdolność elementu oddzielającego konstrukcji budowlanej, poddanego oddziaływaniu pożaru z jednej strony, do zapobiegania przedostawaniu się płomieni i gorących gazów oraz do zapobiegania wystąpieniu płomieni po stronie nienagrzewanej,
– izolacyjność (I) – zdolność elementu oddzielającego konstrukcji, poddanego oddziaływaniu pożaru z jednej strony, do ograniczenia wzrostu temperatury powierzchni nienagrzewanej poniżej określonego poziomu.

W przypadku pożaru nominalnego (standardowego) kryterium nośności R uważa się za spełnione, gdy funkcja nośności zostaje zachowana przez wymagany czas oddziaływania pożaru. Kryterium izolacyjności I można uznać za spełnione, gdy średni przyrost temperatury na całej powierzchni nie poddanej działaniu ognia nie przekracza 140 K oraz gdy maksymalny przyrost temperatury w dowolnym punkcie na tej powierzchni nie przekracza 180 K.

Dla pożaru parametrycznego funkcja nośna zostaje zachowana, jeżeli zapobiegnie się zawaleniu konstrukcji przez cały czas trwania pożaru (łącznie z fazą zaniku) lub przez określony czas. Funkcja oddzielająca w odniesieniu do izolacji jest zachowana w następujących przypadkach:

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

– gdy średni przyrost temperatury w stosunku do powierzchni niepoddanej działaniu ognia nie przekracza 140 K, zaś maksymalny przyrost temperatury w dowolnym punkcie na tej powierzchni nie przekracza 180 K w chwili osiągnięcia maksymalnej temperatury gazu,
– gdy średni przyrost temperatury w stosunku do powierzchni nieogrzewanej nie przekracza 180 K, a maksymalny przyrost temperatury w dowolnym punkcie na powierzchni nie przekracza 220 K w trakcie fazy zaniku pożaru lub przez wymagany okres czasu.

W praktyce funkcje związane z odpornością ogniową odpowiednich elementów konstrukcyjnych przekładają się na wymagania odnośnie klas ich odporności ogniowej, podawanych w minutach (30, 45, 60, 90, 120, 180, 240), dla kryteriów nośności (R), szczelności (E) oraz izolacyjności (I) przy oddziaływaniu standardowego pożaru.

3. Metody analizy konstrukcji murowych w warunkach pożarowych

W warunkach pożarowych analizę konstrukcji można przeprowadzać na poziomie wydzielonego elementu, dla części lub całości konstrukcji (globalnie). Modele pożaru stosowane do analizy mogą także wykazywać różny stopień złożoności i dokładności – od pożarów nominalnych (standardowych) do rzeczywistych wieloparametrycznych. W obrębie poszczególnych kombinacji modelu pożaru i poziomu analizy konstrukcji zastosowanie znajdować mogą różne metody weryfikacji odporności pożarowej konstrukcji i jej elementów składowych: dane tabelaryczne, uproszczone lub zaawansowane obliczenia inżynierskie, badania ogniowe, kombinacje badań i obliczeń.

W przypadku konstrukcji murowych (tak jak w przypadku konstrukcji z innych materiałów) dla określonego czasu oddziaływania pożaru należy wykazać spełnienie ogólnego warunku:

$$E_{fi} \leq R_{fi,td} \tag{1}$$

gdzie:

E_{fi} – obliczeniowy efekt oddziaływań w warunkach pożarowych, wyznaczony zgodnie z PN-EN 1991-1-2 [2], uwzględniający efekty odkształceń termicznych,

$R_{fi,t,d}$ – odpowiednia nośność obliczeniowa w sytuacji pożaru, określona z uwzględnieniem niekorzystnego wpływu temperatury pożarowej na właściwości mechaniczne materiałów muru (lub w ogólnym przypadku – innego materiału konstrukcyjnego).

W celu weryfikacji wymagań standardowej odporności ogniowej wystarczające jest zwykle dokonanie analizy na poziomie wydzielonego elementu konstrukcyjnego.

Ogólne zasady ustalania odporności ogniowej na podstawie wyników badań doświadczalnych lub badań połączonych z obliczeniami zamieszczone zostały w normie PN-EN 1990 [4].

Badania ogniowe mogą być wykonywane w zakresie od wydzielonych elementów aż do konstrukcji w skali naturalnej. W przypadku konstrukcji murowych testy w komorze ogniowej prowadzone są zwykle na wydzielonych ścianach murowych i nie zawsze możliwe jest w takich warunkach odwzorowanie elementów przylegających oraz rodzaju i wielkości więzów. Dlatego też ich rezultaty rzadko mogą być bezpośrednio uogólnione na elementy o odmiennej geometrii, innym układzie obciążenia czy warunkach podparcia. Jednakże przewagą

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

badań nad prostymi metodami weryfikacji, takimi jak dane tabelaryczne czy uproszczone metody obliczeniowe, jest to, iż dostarczają one informacji o rzeczywistym rozkładzie temperatury w ścianie i jej deformacjach przy ogrzewaniu, a także o ewentualnych słabych lub wrażliwych miejscach (np. połączeniach), trudnych do wykrycia w inny sposób niż w trakcie rzeczywistego oddziaływania pożarowego. Uzyskane wyniki badań ogniowych ścian zależą od przyjętych szczegółowych procedur i warunków testów oraz dokładności zastosowanych urządzeń pomiarowych – stąd oczywiście wynika potrzeba zharmonizowania testów stosowanych w różnych krajach, aby wyniki badań były jednoznaczne i porównywalne. W przypadku ścian murowych nośnych taką procedurę badania ogniowego sformułowano i podano w normie PN-EN 1365-1 [5], natomiast dla ścian nienośnych – w normie PN-EN 1364-1 [6].

4. Procedury projektowania ścian murowych z uwagi na odporność ogniową według PN-EN 1996-1-2 [3]

Z uwagi na funkcję ogniochronną rozróżnia się ściany nienośne i nośne oraz ściany oddzielające i niepełniące funkcji oddzielających. Ściany oddzielające służą do ograniczenia rozprzestrzeniania się pożaru między pomieszczeniami i są poddawane działaniu ognia tylko z jednej strony (np. ściany wzdłuż dróg ewakuacyjnych, klatek schodowych, oddzielające ściany stref pożarowych w budynkach). Ściany nośne bez funkcji oddzielającej są poddawane działaniu ognia z dwóch stron. Ściany oddzieleń przeciwpożarowych są ścianami oddzielającymi, od których wymaga się oprócz spełnienia kryteriów REI odpowiedniej odporności na uderzenia mechaniczne – kryterium M, weryfikowane na podstawie normy PN-EN 1363 (część 2) [7].

Przy projektowaniu na warunki pożarowe należy ponadto uwzględnić: zastosowanie materiałów niepalnych; oddziaływania na ścianę oddzielenia przeciwpożarowego pochodzące od reakcji i wydłużeń termicznych przyległych konstrukcji, usytuowanych blisko takiej ściany; oddziaływania na ścianę w warunkach pożaru pochodzące od przemieszczeń słupów i belek usytuowanych w sąsiedztwie ściany.

W przypadku ścian szczelinowych, gdy obie ich warstwy są nośne i przenoszą w przybliżeniu równe obciążenia, odporność ogniowa takiej ściany o warstwach w przybliżeniu równej grubości może być określona jako odporność ekwiwalentnej ściany jednowarstwowej równej sumie grubości warstw, pod warunkiem, że w szczelinie nie znajdują się materiały palne. Jeżeli tylko jedna warstwa ściany szczelinowej jest nośna, to odporność ściany szczelinowej jest zazwyczaj większa niż wartość uzyskana tylko dla warstwy nośnej rozpatrywanej jako ściana jednowarstwowa. Odporność ogniową ściany szczelinowej składającej się z dwóch warstw nienośnych określać można jako sumę odporności ogniowych poszczególnych warstw, ograniczoną do maksimum 240 minut.

Odporność ogniową ścian murowanych można podwyższać poprzez zastosowanie warstwy odpowiedniego wykończenia powierzchni, na przykład tynku gipsowego (zgodnie z PN-EN 13279-1 [8]) albo tynku LW lub T (zgodnie z PN-EN 998-1 [9]). Dla ścian szczelinowych lub nieprzewiązanych wykończenie powierzchni wymagane jest wtedy tylko na zewnętrznych powierzchniach warstw. W celu podniesienia odporności ogniowej ściany można także wykonać dodatkową warstwę murową lub okładzinę murową.

Zachowanie ścian murowych w warunkach oddziaływania wysokiej temperatury pożarowej zależy od wielu czynników:

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

– materiału elementów murowych – ceramika, silikaty, autoklawizowany beton komórkowy, beton zwykły lub kruszywowy lekki, kamień naturalny lub sztuczny,
– typu elementu murowego – pełny, z otworami (rodzaj i wielkość otworów, procentowy udział w objętości elementu murowego), grubość ścianek zewnętrznych i wewnętrznych,
– typu zaprawy – zwykła, do cienkich spoin, lekka,
– stosunku wartości obliczeniowej obciążenia do nośności obliczeniowej ściany,
– smukłości ściany,
– mimośrodu obciążenia,
– gęstości elementów murowych,
– typu konstrukcji ściany,
– typu i sposobu wykończenia powierzchni ściany.

Z podanego wyszczególnienia parametrów (materiałowych, konstrukcyjnych, geometrycznych i obciążeniowych) warunkujących zachowanie ścian murowych w warunkach pożaru widać wyraźnie, że analiza konstrukcji murowych w takiej sytuacji jest zagadnieniem bardzo złożonym. Dodatkowo, w dokładnej analizie konstrukcji należałoby uwzględnić odpowiedni realistyczny scenariusz pożarowy, zmienność cech materiałowych (fizycznych, termicznych, mechanicznych) w funkcji temperatury pożarowej oraz odkształcenia termiczne i deformacje konstrukcji.

4.1. Określanie odporności ogniowej ścian na podstawie danych tabelarycznych

Ocenę odporności ogniowej ścian murowanych można w sposób najprostszy przeprowadzić z wykorzystaniem danych tabelarycznych przedstawionych w Załączniku B normy [3]. Zamieszczone tabele podają minimalne grubości ściany, niezbędne do uzyskania wymaganego okresu odporności ogniowej, dla danego rodzaju ściany oraz sposobu jej obciążenia. Tablice mogą być stosowane dla ścian spełniających wymagania norm PN-EN 1996-1-1 [10], PN-EN 1996-1-2 [3] i PN-EN 1996-1-3 [11], odpowiednio co do typu i funkcji ściany. Podana w tablicach minimalna grubość ściany dotyczy samego muru, bez warstw wykończeniowych.

Warto nadmienić, że w ostatecznej wersji normy PN-EN 1996-1-2 [3] przyjęto wprost wartości minimalnych grubości ścian, takie jak w EN 1996-1-2.

W tabelach 1 i 2 zestawiono wymagania odnośnie minimalnych grubości ścian dla zapewnienia właściwych poziomów odporności ogniowej odpowiednio dla kryterium REI oraz EI. W przypadku występowania dwóch rzędów wartości liczbowych w tabelach 1 i 2, pierwszy zestaw określa odporność ogniową ścian pozbawionych odpowiedniego wykończenia powierzchni, zaś drugi – podany w nawiasie – dotyczy ścian posiadających takie wykończenie, o minimalnej grubości 10 mm po obu stronach ściany jednowarstwowej lub po stronie narażonej na działanie ognia dla ściany szczelinowej. Jeżeli w tablicach podano dwie wartości w jednym rzędzie (np. 70/90), oznacza to, że zalecana grubość mieści się w danym przedziale (np. od 70 do 90 mm).

Należy nadmienić, że wymagania o analogicznym charakterze (choć różniące się szczegółowymi wartościami minimalnej grubości ścian murowanych) sformułowano – przed ostatecznym przyjęciem w Polsce norm PN-EN – w wytycznych projektowania konstrukcji murowych z uwagi na warunki pożarowe, opracowanych przez Instytut Techniki Budowlanej [12]. Podane w [12] minimalne grubości ścian były z reguły wyższe niż wymagane według PN-EN 1996-1-2 [3].

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Tabela 1

Minimalne grubości jednowarstwowych nośnych ścian oddzielających (kryteria REI) z uwagi na wymagania odporności ogniowej według PN–EN 1996–1–2 – mury na zaprawach zwykłych z elementów murowych Grupy 1

Rodzaj elementów murowych w ścianie		Minimalna grubość ściany [mm] dla uzyskania klasyfikacji ogniowej REI dla czasu [minuty] $t_{fi,d}$						
		REI 30	REI 45	REI 60	REI 90	REI 120	REI 180	REI 240
ceramiczne(1)	$\alpha \le 1{,}0$	90/100 (70/90)	90/100 (70/90)	90/100 (70/90)	100/170 (70/90)	100/140 (100/140)	170/190 (110/170)	190/210 (170/190)
	$\alpha \le 0{,}6$	90/100 (70/90)	90/100 (70/90)	90/100 (70/90)	100/140 (70/90)	140/170 (100/140)	140/170 (110/170)	190/200 (170/190)
silikatowe(2)	$\alpha \le 1{,}0$	90/100 (90/100)	90/100 (90/100)	90/100 (90/100)	100 (90/100)	140/200 (140)	190/240 (170/190)	190/240 (140)
	$\alpha \le 0{,}6$	90/100 (90/100)	90/100 (90/100)	90/100 (90/100)	100 (100)	120/140 (100)	170/200 (140)	190/200 (140)
z betonu zwykłego(3)	$\alpha \le 1{,}0$	90/170 (90/140)	90/170 (90/140)	90/170 (90/140)	90/170 (90/140)	100/190 (90/170)	140/240 (100/190)	150/300 (100/240)
	$\alpha \le 0{,}6$	70/140 (60/100)	90/140 (70/100)	70/140 (70/100)	90/170 (70/100)	90/170 (70/140)	100/190 (90/170)	140/240 (100/190)
z betonu kruszywow. lekkiego(4)	$\alpha \le 1{,}0$	90/170 (90/140)	90/170 (90/140)	90/170 (90/140)	100/170 (90/140)	100/190 (90/170)	140/240 (100/190)	150/300 (100/240)
	$\alpha \le 0{,}6$	70/140 (60/100)	70/140 (60/100)	70/140 (60/100)	90/170 (70/100)	90/170 (70/140)	100/190 (90/170)	100/240 (90/190)
z autoklaw. betonu komórkowego $350 \le \rho \le 500$	$\alpha \le 1{,}0$	90/115 (90/115)	90/115 (90/115)	90/140 (90/115)	90/200 (90/200)	90/225 (90/225)	140/300 (140/240)	150/300 (150/300)
	$\alpha \le 0{,}6$	90/115 (90/115)	90/115 (90/115)	90/115 (90/115)	100/150 (90/115)	90/175 (90/150)	140/200 (140/200)	150/200 (150/200)
z autoklaw. betonu komórkowego $500 \le \rho \le 1000$	$\alpha \le 1{,}0$	90/100 (90/100)	90/100 (90/100)	90/150 (90/100)	90/170 (90/150)	90/200 (90/170)	125/240 (100/200)	150/300 (100/240)
	$\alpha \le 0{,}6$	90/100 (90/100)	90/100 (90/100)	90/100 (90/100)	90/150 (90/100)	90/170 (90/125)	125/240 (125/140)	150/240 (150/200)

(1) 5 MPa $\le f_b \le$ 75 MPa; $1000 \le \rho \le 2400$ kg/m^3; (2) 12 MPa $\le f_b \le$ 15 MPa; $1400 \le \rho \le 2400$ kg/m^3
(3) 6 MPa $\le f_b \le$ 35 MPa; $1200 \le \rho \le 2400$ kg/m^3; (4) 2 MPa $\le f_b \le$ 15 MPa; $400 \le \rho \le 1600$ kg/m^3
f_b – znormalizowana wytrzymałość na ściskanie elementów murowych [MPa]
ρ – gęstość objętościowa [kg/m^3]

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Tabela 2

Minimalne grubości nienośnych ścian oddzielających (kryteria EI) z uwagi na wymagania odporności ogniowej według PN-EN 1996-1-2 – mury na zaprawach zwykłych

Rodzaj elementów murowych w ścianie		Minimalna grubość ściany [mm] dla uzyskania klasyfikacji ogniowej EI dla czasu [minuty] $t_{fi,d}$						
		30	45	60	90	120	180	240
ceramiczne $500 \le \rho \le 2400$ kg/m^3		60/100 (50/70)	90/100 (50/70)	90/100 (70/100)	100/140 (70/100)	100/170 (90/140)	160/190 (110/140)	190/210 (170)
silikatowe $600 \le \rho \le 2400$ kg/m^3		70 (50)	70/90 (70)	70/90 (70)	100 (90)	100/140 (90/140)	140/170 (140)	140/200 (170)
z betonu zwykłego $1200 \le \rho \le 2400$ kg/m^3		50 (50)	70 (50)	70/90 (50/70)	90/140 (70)	90/140 (70/90)	100/190 (90/100)	100/190 (100/170)
z betonu kruszyw. lekkiego $400 \le \rho \le 1600$kg/m^3		50 (50)	70 (50)	70/90 (50/70)	70/140 (60/70)	70/140 (70/140)	90/170 (70/140)	100/190 (70/170)
z autoklawizow. betonu komórkowego	ρ_1	50/70 (50)	60/65 (60/65)	60/75 (60/75)	60/100 (60/70)	70/100 (70/90)	90/150 (90/115)	100/190 (100/190)
	ρ_2	50/70 (50)	60 (50/60)	60 (50/60)	60/100 (50/60)	60/100 (60/90)	90/150 (90/100)	100/190 (100/190)
ρ_1 = 350–500 kg/m^3; ρ_2 = 500–1000 kg/m^3								

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

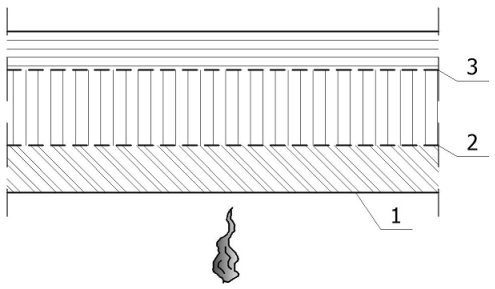
Zgodnie z normą PN-EN 1996-1-1 [10] minimalna grubość ścian konstrukcyjnych z muru o wytrzymałości $f_k \geq 5$ MPa nie może być mniejsza niż 100 mm, a w przypadku $f_k < 5$ MPa – 150 mm (f_k – charakterystyczna wytrzymałość muru na ściskanie). Minimalna grubość ścian usztywniających powinna wynosić 180 mm. W praktyce jako konstrukcyjne stosowane są w Polsce ściany o grubości przynajmniej 180 mm (z bloczków z betonu komórkowego – 200 mm), co oznacza (patrz: tabela 1), że spełniają kryterium REI 90, a w przypadku wielu materiałów (nawet przy minimalnych grubościach 180 mm) także REI120 (dotyczy również ścian z elementów murowych Grupy 2 na zaprawach zwykłych).

4.2. Metody obliczeniowe weryfikacji odporności ogniowej ścian murowych

Odporność ogniową ścian murowych można także określać metodami obliczeniowymi, przyjmując odpowiedni mechanizm zniszczenia w warunkach oddziaływania pożarowego, właściwości materiałowe w funkcji temperatury, smukłość ściany oraz efekty termicznych wydłużeń i deformacji. W normie PN-EN 1996-1-2 [3] podano dwie metody obliczeniowe weryfikacji oporności ogniowej: uproszczoną (w Załączniku C) oraz zaawansowaną (w Załączniku D).

Przy ogólnym opisie metod obliczeniowych stwierdza się, że ich poprawność oceniana jest przez porównanie obliczonej odporności ogniowej z wynikami badań.

Zgodnie z **metodą uproszczoną** obliczania konstrukcji murowych w warunkach pożarowych, nośność wyznacza się, wykorzystując warunki brzegowe w zredukowanym przekroju ściany murowej, dla ustalonych czasów oddziaływania pożaru oraz obciążenia w temperaturze normalnej. Metoda uproszczona znajduje zastosowanie do obliczania ścian murowych w warunkach oddziaływania pożaru standardowego. W przyjętej procedurze obliczeniowej należy wyznaczyć profile temperatury w przekroju, określić przekrój nieefektywny konstrukcyjnie oraz przekrój zredukowany, obliczyć nośność w stanie granicznym dla zredukowanego przekroju, a ostatecznie sprawdzić czy nośność ta jest większa niż wymagana przy odpowiedniej kombinacji oddziaływań. Na rysunku 1 przedstawiono sposób ustalania przekroju zredukowanego przy obliczaniu odporności ogniowej dla ściany murowej (przy działaniu ognia z jednej strony).



Rys. 1. Przekrój ze strefami muru o temperaturze do θ_1, pomiędzy θ_1 a θ_2 oraz powyżej θ_2 (strefa konstrukcyjnie nieefektywna): 1 – brzeg początkowego przekroju, 2 – izoterma dla $\theta = \theta_2$, 3 – izoterma dla $\theta = \theta_1$

Fig. 1. Wall cross–section with zones up to the temperature θ_1, between θ_1 and θ_2 and above θ_2 (structurally non–effective zone): 1 – the edge of the initial cross–section, 2 – isotherm for $\theta = \theta_2$, 3 – isotherm for $\theta = \theta_1$

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Dla sytuacji pożarowej w stanie granicznym nośności spełnić należy następujący warunek:

$$N_{Ed} \leq N_{Rd,fi(\theta)i} \tag{2}$$

Wartość obliczeniowa nośności ściany przy obciążeniu pionowym wynosi:

$$N_{Rd,fi(\theta)i} = \Phi(f_{d\theta 1}A_{\theta 1} + f_{d\theta 2}A_{\theta 2}) \tag{3}$$

gdzie:

- $A_{\theta 1}$ – powierzchnia muru o temperaturze mniejszej lub równej θ_1;
- $A_{\theta 2}$ – powierzchnia muru o temperaturze pomiędzy θ_1 i θ_2;
- θ_1 – maksymalna temperatura, przy której można wykorzystywać wytrzymałość muru w warunkach normalnych (patrz: tabela 3);
- θ_2 – temperatura, powyżej której wytrzymałość muru ulega zmniejszeniu (patrz: tabela 3);
- N_{Ed} – wartość obliczeniowa obciążenia pionowego;
- $f_{d\theta 1}$ – wartość obliczeniowa wytrzymałości na ściskanie muru w temperaturze mniejszej lub równej θ_1;
- $f_{d\theta 2}$ – wartość obliczeniowa wytrzymałości na ściskanie w temperaturze pomiędzy θ_1 i θ_2, którą przyjmuje się jako $cf_{d,fil}$
- c – stała wyznaczana z badań naprężenie–odkształcenie w podwyższonej temperaturze (patrz: tabela 3);
- Φ – współczynnik redukcyjny nośności w środku ściany ustalany na podstawie normy EN 1996-1-1 [10], uwzględniający dodatkowo mimośród $e_{\Delta\theta}$;
- $e_{\Delta\theta}$ – mimośród spowodowany zmianą temperatury w przekroju muru.

W tabeli 3 zestawiono wartości parametrów wymaganych do obliczenia nośności ściany przy obciążeniu pionowym zgodnie z równaniem (3). Warto zwrócić uwagę, że norma [3] nie podaje żadnych konkretnych wartości liczbowych odnośnie do stałej c (określanej odpowiednio dla każdego materiału elementu murowego), operując tylko ogólnymi symbolami i zalecając ustalać te wartości doświadczalnie.

Mimośród $e_{\Delta\theta}$ wywołany obciążeniem ogniowym można określać na podstawie wyników badań lub obliczać z zależności:

$$e_{\Delta\theta} = \frac{1}{8} h_{ef}^{\,2} \frac{\alpha_t(\theta_2 - 20)}{t_{Fr}} \leq h_{ef} / 20 \tag{4}$$

gdzie:

$e_{\Delta\theta} = 0$, gdy ogień oddziałuje ze wszystkich stron;

- h_{ef} – efektywna wysokość ściany;
- α_t – współczynnik rozszerzalności termicznej muru zgodny z EN 1996-1-1 [10], p. 3.7.4;
- 20°C – temperatura przyjmowana na powierzchni nienagrzewanej;
- t_{Fr} – grubość przekroju, w którym temperatura nie przekracza θ_2

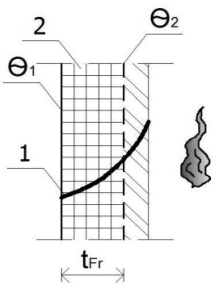
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Tabela 3

Wartości stałej *c* oraz temperatury θ_1 i θ_2 w zależności od materiału muru do analizy odporności ogniowej metodą uproszczoną według [3]

elementy murowe i zaprawa (powierzchnia niezabezpieczona)	Wartość *c*	Temperatura °C	
		θ_2	θ_1
elementy murowe ceramiczne z zaprawą zwykłą	c_{cl}	600	100
elementy murowe silikatowe z zaprawą do cienkich spoin	c_{cs}	500	100
elementy murowe z kruszywowego betonu lekkiego z zaprawą zwykłą	c_{la}	400	100
elementy murowe z betonu zwykłego z zaprawą zwykłą	c_{da}	500	100
elementy murowe z autoklawizowanego betonu komórkowego z zaprawą do cienkich spoin	c_{aac}	700	200

Na rysunku 2 przedstawiono schematycznie rozkład temperatury wzdłuż grubości ściany oraz sposób określania przekroju zredukowanego do obliczania odporności ogniowej z zastosowaniem uproszczonej metody obliczeń.

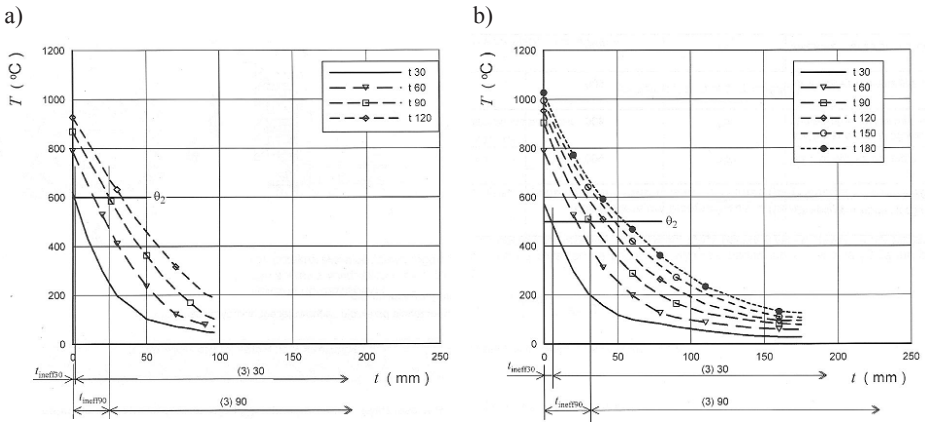


Rys. 2. Przekrój pionowy muru z rozkładem temperatury i zdefinowaniem przekroju zredukowanego do obliczeń odporności ogniowej metodą uproszczoną: 1 – rozkład temperatury, 2 – zredukowana powierzchnia przekroju zachowującego wytrzymałość ($A_{\theta 1} + A_{\theta 2}$)

Fig. 2. Temperature distribution and definition of reduced cross–section for calculating the fire resistance for wall by simplified method: 1 – temperature distribution, 2 – reduced cross–section maintaining the material strength ($A_{\theta 1} + A_{\theta 2}$)

Rozkład temperatury w przekroju muru oraz wartość temperatury, przy której mur przestaje być materiałem konstrukcyjnym w warunkach pożarowych (osiągając poziom temperatury θ_2), należy w ogólności określać na podstawie wyników badań lub wykorzystując bazę danych wyników badań. Do określenia rozkładów temperatury w przekroju ściany (dla różnych materiałów muru) wykorzystać można także odpowiednie wykresy zamieszczone w Załączniku C normy [3]. Na rysunku 3 pokazano przykładowo rozkład temperatury dla murów z ceramicznych i silikatowych elementów murowych dla czasu oddziaływania pożaru standardowego od 30 do 120/180 minut.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 3. Rozkłady temperatury w przekroju dla oddziaływania pożaru standardowego od 30 do 120/180 minut: a) mury z ceramicznych elementów murowych (gęstość objętościowa 1000–2000 kg/m^3), b) mury z silikatowych elementów murowych (gęstość objętościowej 1500–2000 kg/m^3)

Fig. 3. Temperature distribution within the cross–section for standard fire duration from 30 to 120/180 minutes: a) walls from ceramic elements (density 1000–2000 kg/m^3), b) walls from silicate elements (density 1500–2000 kg/m^3)

Podstawę zaawansowanych metod analizy konstrukcji murowych w warunkach pożarowych stanowią ogólne prawa fizyczne, pozwalające na wiarygodne przybliżenie przewidywanego zachowania elementu konstrukcyjnego poddanego działaniu ognia.

Zaawansowane modele obliczeń pozwalają na określenie:

– odpowiedzi termicznej konstrukcji – rozwoju i rozkładu temperatury w obrębie elementów konstrukcji, ustalonych na podstawie zasad i założeń teorii przepływu ciepła, z uwzględnieniem odpowiednich oddziaływań termicznych oraz właściwości fizycznych i termicznych materiałów określonych w funkcji temperatury,
– odpowiedzi mechanicznej – zachowania konstrukcji z uwzględnieniem niekorzystnych wpływów wysokiej temperatury na właściwości mechaniczne materiałów, a także z uwzględnieniem efektów odkształceń i naprężeń termicznych.

Sprawdzeniu podlega wtedy warunek nośności w następującej postaci:

$$E_{\text{fi,d}}(t) \le R_{\text{fi,t,d}} \tag{5}$$

gdzie:

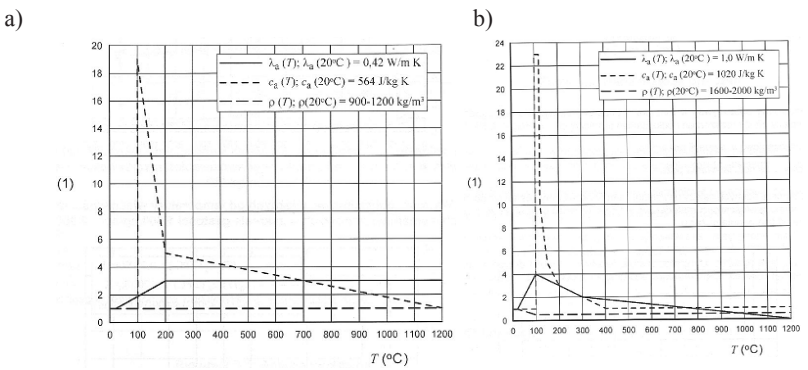
$E_{\text{fi,d}}$ – efekt obliczeniowy oddziaływań w warunkach pożarowych, wyznaczony zgodnie z EN 1991-1-2 [2], uwzględniający efekty rozszerzeń i odkształceń termicznych i czas trwania oddziaływania pożarowego;
$R_{\text{fi,t,d}}$ – nośność obliczeniowa w sytuacji pożarowej;
t – obliczeniowy czas oddziaływania pożaru.

W obliczeniach konstrukcji metodami zaawansowanymi należy uwzględnić: mechanizm utraty nośności pod obciążeniem ogniowym, zależne od temperatury właściwości materiałowe (w tym sztywność) oraz efekty termicznych odkształceń i deformacji (pośrednie oddziaływania pożaru).

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

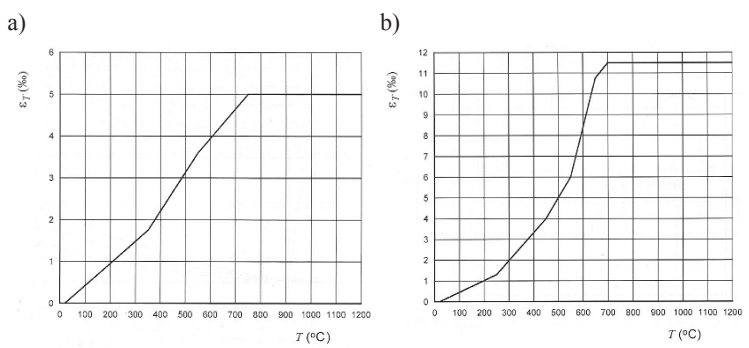
Zależności do ustalania podstawowych właściwości termicznych materiałów murów w temperaturze pożarowej, tj.: ciepła właściwego – $c_a(T)$, przewodnictwa cieplnego – $\lambda_a(T)$, gęstości – $\rho(T)$, podano w Załączniku D normy [3] dla różnych materiałów murów. Na rysunku 4 pokazano przykładowo zależności do przyjmowania właściwości termicznych dla elementów ceramicznych i silikatowych w funkcji temperatury – na osi pionowej podano stosunek wartości odpowiedniego parametru w temperaturze T do wartości w temperaturze 20°C.

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono zależności podane w Załączniku D normy [3] dla ceramicznych i silikatowych elementów murowych, które wykorzystane mogą zostać w analizie odpowiedzi mechanicznej konstrukcji z zastosowaniem zaawansowanej metody obliczeń w warunkach pożaru. Analogiczne zależności zamieszczono w tym załączniku także dla elementów z kruszywowego betonu lekkiego i autoklawizowanego betonu komórkowego.



Rys. 4. Wartości obliczeniowe zależnych od temperatury właściwości elementów murowych: a) ceramicznych (gęstość 900–1200 kg/m³), b) silikatowych (gęstość 1600–2000 kg/m³)

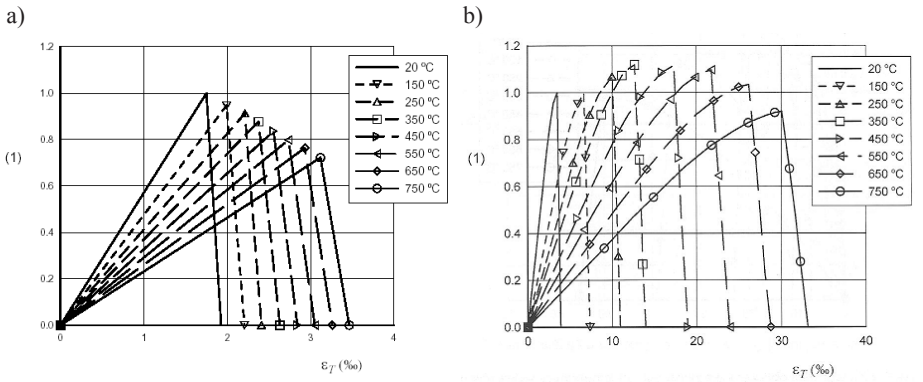
Fig. 4. Design values of temperature–dependent material properties for: ceramic wall elements (density 900–1200 kg/m³), b) silicate wall elements (density 1600–2000 kg/m³)



Rys. 5. Wartości obliczeniowe odkształceń termicznych ε_T: a) ceramicznych elementów murowych (Grupa 1) o wytrzymałości 12–20 N/mm² i gęstości z zakresu 900–1200 kg/m³, b) silikatowych elementów murowych (Grupa 1) o wytrzymałości 12–20 N/mm² i gęstości z zakresu 1600–2000 kg/m³

Fig. 5. Design values of thermal strains ε_T: for ceramic wall elements (group 1) with the strength 12–20 N/mm² and density 900–1200 kg/m³ b) for silicate wall elements (group 1) with the strength 12–20 N/mm² and density 1600–2000 kg/m³

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 6. Wartości obliczeniowe zależnych od temperatury wykresów naprężenie–odkształcenie dla: a) ceramicznych elementów murowych (Grupa 1) o wytrzymałości 12 N/mm^2–20 N/mm^2 i gęstości z zakresu 900 kg/m^3–1200 kg/m^3, b) silikatowych elementów murowych (Grupa 1) o wytrzymałości 12 N/mm^2–20 N/mm^2 i gęstości z zakresu 1600 kg/m^3–2000 kg/m^3
Uwaga: na osi pionowej podano stosunek wytrzymałości w temperaturze *T* do wytrzymałości w temperaturze 20°C

Fig. 6. Design values of temperature–dependent stress–strain relatioships: a) for ceramic wall elements (Group 1) with the strength 12 N/mm^2–20 N/mm^2 and density 900 kg/m^3–1 200 kg/m^3, b) for silicate wall elements (Group 1) with the strength12 N/mm^2–20 N/mm^2 and density 1600 kg/m^3–2000 kg/m^3
Note: vertical ax expresses the ratio of strength in fire temperature *T* to strength in temperature 20°C.

W odniesieniu do wykresów przedstawionych na rys. 6 warto zauważyć, że dla silikatowych elementów murowych wraz ze wzrostem temperatury następuje w pewnym zakresie temperatur przyrost wytrzymałości, czego nie obserwuje się dla materiałów ceramicznych.

4.3. Badania ogniowe

Dla wszystkich typów ścian murowych odporność ogniową według PN-EN 1996-1-2 [3] ustalać można na podstawie badań ogniowych (doświadczalnych), które przeprowadzić należy zgodnie z odpowiednimi normami PN-EN [5], [6]. Określając odporność ogniową na podstawie badań, należy dokonać interpretacji wyników na podstawie wymagań sformułowanych w tych normach. W szczególności należy uwzględnić poprawkę wynikającą z możliwych różnic systemu obciążenia ścian nośnych w stosunku do podanych w normach metod badania – na przykład: zamocowania krawędzi, swobodnych krawędzi lub jednej krawędzi zamocowanej, a drugiej częściowo swobodnej.

Badania doświadczalne konstrukcji murowych w warunkach pożarowych są dodatkowo niezbędne do ustalenia, czy kalibrowania odpowiednich parametrów stosowanych w metodach obliczeniowych – np. stała *c* wyznaczana z badań naprężenie–odkształcenie w podwyższonej temperaturze do analizy odporności ogniowej metodą uproszczoną (patrz: tabela 3).

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

5. Badania doświadczalne ścian murowych w temperaturach pożarowych

Niezależnie od rodzaju materiału elementów murowych i zapraw badania ogniowe ścian przeprowadzać należy według takich samych procedur: w przypadku ścian nośnych według normy PN-EN 1365-1 [5], natomiast dla ścian nienośnych – zgodnie z PN-EN 1364-1 [6].

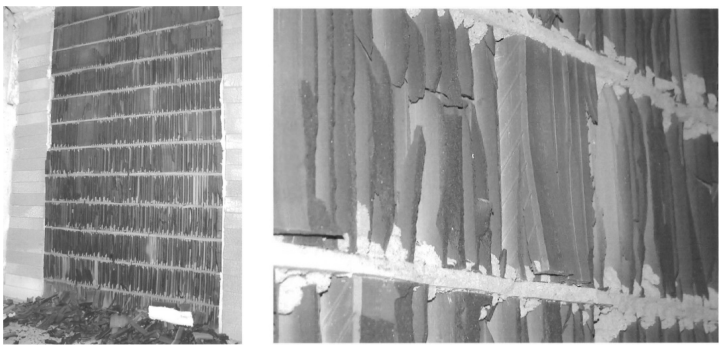
W niniejszym rozdziale przedstawiono wybrane wyniki badań doświadczalnych ścian murowych (nośnych i nienośnych) poddanych oddziaływaniu pożarowemu, zrealizowanych w różnych ośrodkach (Laboratorium Badań Pożarowych ITB w Warszawie – Polska, MPA IBMB TU Braunschweig – Niemcy, FIRES s.r.o. Batizovce – Słowacja) i dla różnych materiałów elementów murowych (silikaty, ceramika, keramzytobeton) [13–16].

We wszystkich analizowanych badaniach stosowano ściany o podobnych wymiarach geometrycznych dostosowanych do wymiarów komór (od 3050×1750 mm do 3250×3000 mm, pierwszy wymiar oznacza wysokość, drugi szerokość ściany), a pomiarom w trakcie testu ogniowego podlegały: temperatura w komorze, temperatura w wybranych punktach na nienagrzewanej powierzchni ścian, poziome i pionowe przemieszczenia na powierzchni nienagrzewanej. Ściany obciążone były w płaszczyźnie pionowej: w przypadku badań w MPA Braunschweig i FIRES osiowo, natomiast w badaniach prowadzonych w ITB – mimośrodowo. W badaniach niemieckich (MPA) ściany były utwierdzone na krawędziach pionowych, natomiast w pozostałych pracowały jako wolnostojące (wzdłuż krawędzi pionowych izolacja z wełny mineralnej). Scenariusz pożarowy realizowany był każdorazowo poprzez krzywą standardową obciążenia pożarowego.

W pierwszej kolejności omówiona zostanie specyfika zachowania ścian wykonanych z różnych elementów murowych w trakcie działania ognia, na przykładach przeprowadzonych testów ogniowych następujących materiałów: pustaków ceramicznych THERMOPOR (badania w ITB), bloczków silikatowych (badania w MPA oraz FIRES) oraz pustaków keramzytobetonowych systemu OPTIROC (badania w FIRES).

W ścianach z pustaków ceramicznych, w fazie początkowej działania ognia, dochodziło do odpryskiwania ścianek pustaków po stronie nagrzewanej oraz parowania ze spoin, przy jednoczesnym braku widocznych rys i pęknięć po stronie nienagrzewanej. W dalszej fazie badania postępowało odpryskiwanie ścianek pustaków po stronie nagrzewanej oraz formowały się pęknięcia pionowe oraz poziome na stronie nienagrzewanej ściany (o rozwartości zwykle nieprzekraczającej 2–3 mm). Tak długo, jak warunki szczelności dla ściany murowanej były spełnione, nie stwierdzono dymu po stronie nienagrzewanej ściany, a przy spełnieniu warunków izolacyjności nie dochodziło do nadmiernych przyrostów temperatury na powierzchni nienagrzewanej ściany. Osiągnięcie stanu granicznego było zwykle efektem dalszego propagowania rys i narastania ich szerokości rozwarcia, a także postępującego ubytku przekroju na powierzchni od strony nagrzewanej ściany. Szczegółowy przebieg poszczególnych zjawisk (punkt czasowy, charakter ilościowy) w trakcie badania zależał od rodzaju pustaka ceramicznego (geometrii, ilości drążeń), konstrukcji spoin oraz grubości badanej ściany. Dla ścian z pustaków ceramicznych stwierdzano po badaniach, że po stronie nagrzewanej na ok. 30–80% powierzchni ściany nastąpiło odpryskiwanie ścianek pustaków, przy czym ubytek grubości pustaków wynosił 20–50 mm. Pomierzone przemieszczenia na powierzchni nienagrzewanej – wygięcie ściany w stronę ognia – dochodziły do 20–30 mm. Typową formę uszkodzeń ściany z pustaków ceramicznych przedstawiono na fot. 1

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Fot. 1. Typowa forma uszkodzenia ściany z pustaków ceramicznych od oddziaływania wysokiej temperatury pożarowej w trakcie badania odporności ogniowej – na podstawie [13]

Photo. 1. Typical damage mode for wall made of ceramic elements due to fire action during fire resistance test – based on [13]

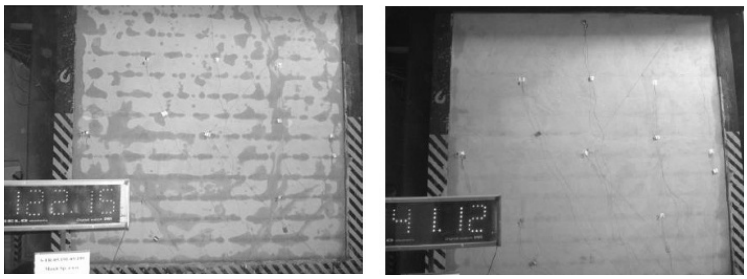
W badaniach ścian z silikatów w wyniku jednostronnego oddziaływania ognia na powierzchnię ściany występowało znaczne zróżnicowanie temperatury w przekroju ściany. Wygięcia ściany rejestrowano w kierunku działania ognia. W środku wysokości ściany przy krawędziach pionowych stwierdzono powstanie znacznych naprężeń ściskających, natomiast w części środkowej naprężeń rozciągających, prowadzących ostatecznie do pionowych i poziomych zarysowań. Zniszczenie ściany o grubości 150 mm poprzedzone było pojawieniem się otwartych rys i spękań w silikatowych elementach murowych i spoinach. Maksymalne pomierzone przemieszczenia na powierzchni nienagrzewanej (wygięcie ściany w stronę ognia) dochodziły, podobnie jak w ścianach z pustaków ceramicznych, do 30 mm. Widok ściany z elementów silikatowych w trakcie badania odporności ogniowej przedstawiono na fot. 2. Pozostałe badane ściany z elementów silikatowych wykazały wysoką odporność ogniową i nie uległy zniszczeniu (testy przerwano wskutek decyzji przedstawiciela zleceniodawcy badania po uzyskaniu satysfakcjonującej odporności ogniowej).

Fot. 2. Ściana z elementów silikatowych o grubości 150 mm w trakcie badań odporności ogniowej (na fotografii po prawej widoczne pionowe rysy w elementach i spoinach) – na podstawie [15]

Photo. 2. Wall from silicate elements with 150 mm thickness during fire resistance test (in the picture on the right vertical cracks in joints and elements are visible) – based on [15]

BPK BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Dla ścian z pustaków keramzytobetonowych z obustronnym tynkiem cementowo-wapiennym w trakcie badań dochodziło do stopniowego pojawiania się rys i ubytków powierzchniowych tynku na stronie poddanej działaniu ognia. Na nienagrzewanej powierzchni ściany również rozwijały się rysy natynkowe. W powstających zarysowaniach oraz spoinach dochodziło do kondensacji wilgoci, co obserwowano w trakcie badań po stronie nienagrzewanej (fot. 3).



Fot. 3. Widok ściany z elementów keramzytobetonowych o grubości 180 mm w trakcie badania odporności ogniowej (na fotografii po lewej stronie widoczne ślady kondensacji wilgoci w spoinach i rysach) – na podstawie [14]

Photo. 3. View of wall from concrete blocks with 180 mm thickness while determining the fire resistance (in the picture on the left there are visible condensation zones along the joints and cracks) – based on [14]

W kolejnych tabelach zestawiono wyniki badań doświadczalnych ścian murowych w postaci odpowiedniego poziomu klasyfikacji odporności ogniowej elementów murowych wykonanych z różnych materiałów: pustaków ceramicznych (tabela 4), elementów silikatowych (tabela 5) oraz pustaków keramzytobetonowych (tabela 6).

Warto podkreślić, że w badaniach ścian nie osiągano zazwyczaj stanu granicznego nośności, a przerwanie testu wynikało z maksymalnego możliwego do uzyskania czasu nagrzewu dla pieców albo z decyzji przedstawiciela zleceniodawcy badania po uzyskaniu satysfakcjonującej odporności ogniowej stwierdzonej w trakcie testu.

Tabela 4

Wyniki badań ścian z elementów ceramicznych – ściany nośne oraz nienośne z pustaków systemu THERMOPOR (badania – ITB Warszawa, 2004–2005)

Klasyfikacja elementów według wykonanych badań ogniowych	
Badania ścian nośnych	
Pustak THP 18,8 – grubość 18,8 cm	REI > 60
Pustak THP 25 – grubość 25 cm	REI > 90
Pustak THP 30 – grubość 30 cm	REI > 120
Pustak THP 38 – grubość 38 cm	REI > 180
Pustak THP 44 – grubość 44 cm	REI > 240
Badania ścian nienośnych	
Pustak THP 8 – grubość 8 cm	EI > 30
Pustak THP 11,5 – grubość 11,5 cm	EI > 60

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Tabela 5

Wyniki badań ścian z bloczków silikatowych – ściany nośne i nienośne (MPA – Brunszwik, Niemcy oraz FIRES – Batizovce, Słowacja)

Klasyfikacja elementów według wykonanych badań ogniowych	
Badania ścian nośnych	
Bloczek silikatowy 150 mm	REI 120–REI 240
Bloczek silikatowy 175 mm	REI > 300
Bloczek silikatowy 214 mm	REI > 300
Bloczek typu SILICAT N 180 mm	REI > 240
Badania ścian nienośnych	
Bloczek typu SILICAT N 120 mm	EI > 120
Objaśnienie: Ściany z bloczków silikatowych 150–214 mm – badane w MPA (Brunszwik, Niemcy), 2008–2009 Ściany z bloczków typu SILICAT N – badane w FIRES (Batizovce, Słowacja), 2006	

Tabela 6

Wyniki badań ścian z bloczków keramzytobetonowych – ściany nośne i nienośne systemu TERMO OPTIROC (badania – FIRES, Batizovce, 2004–2007)

Klasyfikacja elementów według wykonanych badań ogniowych	
Badania ścian nośnych	
Bloczek TERMO OPTIROC 24 cm	REI > 240
Bloczek TERMO OPTIROC 36,5 cm	REI > 240
Bloczek TERMO OPTIROC 18 cm (akustyczny)	REI > 240
Badania ścian nienośnych	
Bloczek TERMO OPTIROC 12 cm	EI > 180

W przypadku ścian z elementów murowych keramzytobetonowych i silikatowych uzyskano w przedstawionych badaniach, dla ścian konstrukcyjnych grubości co najmniej 175 mm (stosowanych w praktyce inżynierskiej w naszym kraju), bardzo wysoką odporność ogniową na poziomie nie niższym niż REI 240, co umożliwia szerokie stosowanie tego typu ścian w obiektach budowlanych o różnym przeznaczeniu. Należy jednak pamiętać, że badania te były prowadzone przy osiowym obciążeniu i „sztywnym" zamocowaniu przynajmniej górnej i dolnej krawędzi ściany. Wstępne badania dla innych schematów obciążenia cytowane w [17] nie potwierdzają aż tak wysokich poziomów odporności ogniowej, ale w dalszym ciągu są to wartości znacząco większe niż podano w tabelach w PN-EN 1996-1-2 [3]. Przegubowy schemat obciążenia górnej krawędzi ściany można w praktyce odnieść przede wszystkim do przypadków ścian na ostatnich kondygnacjach, gdzie występuje stosunkowo niewielki stopień zamocowania górnej krawędzi ściany w poziomie stropu. W tych przypadkach jednak mamy do czynienia z niewielkim poziomem wytężenia ściany, czyli niewielką wartością współczynnika α, którym to wartościom odpowiadają większe odporności ogniowe ścian. W badaniach [17] założono, przy przegubowym podparciu górnej krawędzi ścian, wysokie poziomy obciążenia, i stąd zmniejszenie REI.

Dla ścian z pustaków ceramicznych przerywano badania po uzyskaniu przez ścianę satysfakcjonującego zleceniodawcę poziomu REI – nie osiągano w ich trakcie stanu granicznego

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

z uwagi na nośność ścian. Wnioskować zatem można, że rzeczywista odporność ogniowa jest wyższa. W praktyce ściany z pustaków ceramicznych o grubości 188 mm jako konstrukcyjne stosowane są w budynkach o niewielkiej liczbie kondygnacji (najczęściej do 3 kondygnacji nadziemnych) i małych obciążeniach użytkowych. W pozostałych przypadkach stosowane są ściany o grubości co najmniej 250 mm (często 300 mm) i takie przegrody posiadają satysfakcjonujący poziom REI dla wielu obiektów budowlanych (w tym budynków mieszkalnych o konstrukcji murowej).

6. Wnioski

Dokładna analiza konstrukcji murowych w warunkach pożarowych jest zagadnieniem złożonym – ze względu na wiele czynników, które warunkują ich zachowanie podczas oddziaływania ognia. Do podstawowych czynników wpływających na odporność ogniową ścian murowych zaliczyć należy: rodzaj elementów murowych i zaprawy użytych do wykonania muru, poziom wytężenia w ścianie, smukłość ściany, mimośród obciążenia, gęstość materiału, typ konstrukcji ściany, rodzaj i sposób wykończenia powierzchni. Dodatkowo, w analizie konstrukcji należałoby uwzględnić: odpowiedni, realistyczny scenariusz pożarowy, zmienność cech materiałowych (fizycznych, termicznych, mechanicznych) w funkcji temperatury pożarowej oraz odkształcenia termiczne i deformacje konstrukcji.

W normie PN-EN 1996-1-2 [3] podano kilka sposobów określania odporności ogniowej konstrukcji murowych. Metody te szczegółowo omówiono w rozdziale 4 niniejszej pracy.

Można zakładać, że w projektowaniu najczęściej będą stosowane tabele podające minimalne grubości ścian wymagane dla osiągnięcia odpowiedniego poziomu odporności ogniowej. W tabelach przyjęto szerokie przedziały wartości minimalnych grubości ścian i z tego powodu w wielu przypadkach wystąpi konieczność bardziej szczegółowej analizy (badań) lub przyjęcia według tablic górnych wartości odpowiednich przedziałów.

Warto także zwrócić uwagę, że w normie [3] przy opisie metody uproszczonej projektowania elementów murowych na warunki pożarowe nie podano konkretnych wartości liczbowych odnośnie stałej c (określającej poziom redukcji pełnej wytrzymałości muru w części przekroju zredukowanego, ustalanej osobno dla każdego materiału elementu murowego), operując tylko ogólnymi symbolami i zalecając ustalać te wartości doświadczalnie.

Z poznawczego punktu widzenia podstawową metodą ustalania odporności ogniowej ścian murowych są badania/testy ogniowe. Niezależnie od rodzaju materiału elementów murowych badania ogniowe ścian przeprowadzać należy według takich samych procedur: w przypadku ścian nośnych według normy PN-EN 1365-1 [5], natomiast dla ścian nienośnych – zgodnie z PN-EN 13641 [6]. W punkcie 5 niniejszego artykułu przedstawiono wybrane wyniki badań doświadczalnych ścian murowych (nośnych i nienośnych) poddanych oddziaływaniu pożarowemu, zrealizowanych w różnych ośrodkach badawczych. Wyniki przedstawionych testów wskazują na wysoką odporność ogniową ścian murowych oraz zróżnicowane mechanizmy uszkodzeń ścian poddanych działaniu temperatury pożarowej w zależności od rodzaju zastosowanych materiałów i sposobu realizacji obciążenia.

Dalsze szczegółowe badania doświadczalne i analizy porównawcze wyników badań prowadzonych w różnych ośrodkach naukowo-badawczych są niezbędne przede wszystkim do określenia wartości liczbowych parametrów i zależności cech fizycznych, termicznych oraz mechanicznych materiałów muru w funkcji temperatury pożarowej, przyjmowanych

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

w metodach i modelach obliczeniowych, a także do oceny wpływu interakcji ścian z innymi elementami na ich odporność ogniową. Zagadnienia te są niezwykle istotne w perspektywie obserwowanego w ostatnich latach dynamicznego rozwoju rynku materiałów murowych i technologii realizacji konstrukcji.

Autorzy pragną podziękować następującym firmom za udostępnienie raportów i zgodę na publikację wyników badań ogniowych ścian murowych: LEIER Tarnów S.A.; MAXIT Sp. z o.o.; Związek Pracodawców Ceramiki Budowlanej i Silikatów.

Literatura

[1] Przepisy techniczne w polskim budownictwie na tle wymagań podstawowych określonych Dyrektywą 89/106/EWG dotyczącą wyrobów budowlanych. Seria: „Dokumenty Wspólnoty Europejskiej dotyczące budownictwa" (nr 10), Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2001.
[2] PN-EN 1991-1-2 Oddziaływania na konstrukcje. Część 1–2: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania na konstrukcje w warunkach pożaru.
[3] PN-EN 1996-1-2 Projektowanie konstrukcji murowych. Część 1–2: Reguły ogólne – Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe.
[4] PN-EN 1990 Podstawy projektowania konstrukcji.
[5] PN-EN 1365-1 Badanie odporności ogniowej elementów nośnych. Część 1: Ściany.
[6] PN-EN 1364-1 Badanie odporności ogniowej elementów nienośnych. Część 1: Ściany.
[7] PN-EN1363-2 Odporność ogniowa. Część 2: Wymagania dodatkowe.
[8] PN-EN-13279-1 Tynki gipsowe i na bazie gipsu. Część 1: Definicje i wymagania.
[9] PN-EN-998-1 Wymagania dla zapraw do konstrukcji murowych. Część 1: Zaprawy tynkowe.
[10] PN-EN-1996-1-1 Projektowanie konstrukcji murowych. Część 1–1: Reguły dla konstrukcji murowych zbrojonych i niezbrojonych.
[11] PN-EN-1996-1-3 Projektowanie konstrukcji murowych. Część 1–3: Uproszczone zasady dla konstrukcji murowych.
[12] Kosiorek M., Woźniak G., *Projektowanie elementów żelbetowych i murowych uwagi na odporność ogniową*, Seria: Instrukcje, Wytyczne, Poradniki nr 409/2005, ITB, Warszawa 2005.
[13] Raporty z badań odporności ogniowej elementów ceramicznych wykonanych w laboratorium Badań Ogniowych ITB dla firmy „LEIER" Tarnów S.A. nr: LP-1216.2/04; LP-1216.3/04; LP-1216.4/04; LP-1216.5/04 oraz LP-03606.1/09.
[14] Raporty z badań odporności ogniowej elementów keramzytobetonowych wykonanych w laboratorium FIRES s.r.o. (Batizovce, Słowacja) dla firmy MAXIT Sp. z o.o. (Warszawa) nr: FR-017-06 CPS (E), FR-175-05 CPS (E), CR-153-07-NUPE, CR-154-07-NUPE, CR-155-07-NUPE oraz CR-103-09-AUPE.
[15] Raporty z badań odporności ogniowej elementów silikatowych wykonanych w laboratorium IBMB MPA (Braunschweig, Niemcy) dla ECSPA (European Calcium Sili-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

cate Producers Association, Bruksela) nr: 3196/804/08; 3408/016/08; 3413/021/08; 3244/309/09; 3593/658/09 oraz 3653/718/09.

[16] Raporty z badań odporności ogniowej elementów silikatowych wykonanych w laboratorium FIRES s.r.o. (Batizovce, Słowacja) dla Związku Pracodawców Ceramiki Budowlanej i Silikatów (Warszawa) nr: CR-060-07-AUPE i CR-061-07-AUPE.

[17] M e y e r G., L e i n e w e b e r R. (tłumaczenie: M i s i e w i c z L.), *Badania odporności ogniowej murów z silikatów*, Materiały Budowlane, 7/2009.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ