

# Ocena bezpieczeństwa konstrukcji istniejących kominów murowanych w ujęciu norm PN-EN

Prof. nadzw. dr hab. inż. Marek Lechman, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa

## 1. Zasady wymiarowania kominów wg normy PN-88/B-03004

Według normy PN-88/B-03004 przekroje trzonu kominu murowanego wymiaruje się na stan graniczny użytkowania, przy uwzględnieniu charakterystycznych wartości obciążeń. Podstawowym założeniem wykorzystywanym w tym podejściu jest przyjęcie liniowo-sprężystej postaci związków fizycznych muru (metoda NL). Wyma-

gany poziom bezpieczeństwa określają wartości naprężeń dopuszczalnych. W odniesieniu do kominów murowanych naprężenia ściskające  $\sigma_m$  w przekrojach kominu w stadium eksploatacji, wywołane działaniem na komin wszystkich obciążeń charakterystycznych, powinny spełniać warunek:

$$\sigma_m \leq (0,25 + 0,10 \frac{h'}{H_0}) f_k \quad (1)$$

**Tabela 1.** Porównanie wartości obciążenia wiatrem kominu murowanego  $h = 69$  m (strefa wiatrowa 1) według PN-EN 1991-1-4 oraz PN-88/B-03004 / PN-77/B-02011

Poziom [m]	Obc. charakterystyczne $p_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]		$\frac{p_k(\text{PN-EN})}{p_k(\text{PN})}$ [%]	Moment zginający $M_w$ [kNm]		$\frac{M_w(\text{PN-EN})}{M_w(\text{PN})}$ [%]
	wg PN-EN 1991-1-4	wg PN-88/B-03004		wg PN-EN 1991-1-4	wg PN-88/B-03004	
69	0,9854	1,1737	84,0			
59	0,9411	1,1272	83,5	227,7	178,5	127,6
49	0,8923	1,0806	82,6	927,7	734,3	126,3
39	0,8365	1,0298	81,2	2128,8	1694,7	125,6
29	0,7696	0,9257	83,1	3849,7	3078,3	125,1
19	0,6825	0,8182	83,4	6094,7	4882,2	124,8
9	0,5485	0,6934	79,1	8845,0	7088,8	124,8
0				11696,2	9400,8	124,4

**Tabela 2.** Porównanie wartości obciążenia wiatrem kominu murowanego  $h = 24,2$  m (strefa wiatrowa 3) według PN-EN 1991-1-4 i PN-88/B-03004 / PN-77/B-02011

Poziom [m]	Obc. charakterystyczne $p_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]		$\frac{p_k(\text{PN-EN})}{p_k(\text{PN})}$ [%]	Moment zginający $M_w$ [kNm]		$\frac{M_w(\text{PN-EN})}{M_w(\text{PN})}$ [%]
	wg PN-EN 1991-1-4	wg PN-88/B-03004		wg PN-EN 1991-1-4	wg PN-88/B-03004	
24,2	0,7681	1,3721	56,0			
17,5	0,7035	1,2492	56,3	39,0	45,8	85,2
12,5	0,6311	1,1406	55,3	119,8	141,5	84,7
6,5	0,5290	1,0862	48,7	275,6	328,1	84,0
1,5	0,3810	1,0862	35,1	451,5	547,0	82,5
0				511,4	624,9	81,8

gdzie:  $\sigma_m$  – naprężenie ściskające w przekroju kominu,  
 $f_k$  – wytrzymałość charakterystyczna muru na ściskanie,

$H_0$  – wysokość kominu ponad fundamentem,

$h'$  – wysokość kolumny ponad rozważanym przekrojem.

Podstawę techniczną projektowania rozpatrywanych kominów murowanych stanowiły normy PN-88/B-03004 (PN-64/B-03004). Obciążenie wiatrem zestawiano zgodnie z normą PN-77/B-02011 i normą PN-88/B-03004.

## 2. Obciążenie wiatrem

W celu porównania wartości obciążenia wiatrem według normy PN-88/B-03004 oraz normy PN-EN 1991-1-4 wykonano obliczenia trzech kominów murowanych, usytuowanych w trzech różnych strefach obciążenia wiatrem:

1) Komin  $h = 69$  m (Jarosław), strefa wiatrowa 1, teren II kategorii;

średnica zewnętrzna górna:  $d_z = 2,95$  m; grubość ścianki trzonu:  $t = 0,25 \div 0,73$  m;

2) Komin  $h = 70$  m (Lębork), strefa wiatrowa 2, teren II kategorii;

średnica zewnętrzna górna:  $d_z = 2,95$  m; grubość ścianki trzonu:  $t = 0,25 \div 1,10$  m;

3) Komin  $h = 24,2$  m (Gorlice), strefa wiatrowa 3, teren II kategorii;

średnica zewnętrzna górna:  $d_z = 1,45$  m; grubość ścianki trzonu:  $t = 0,25 \div 0,73$  m;

Przykładowe wyniki zestawienia obciążenia wiatrem przedstawiono w tabeli 1 (komin  $h = 69$  m) oraz tabeli 2 (komin  $h = 24,2$  m). Z danych liczbowych zawartych w tabeli 1 wynika, że wartości charakterystyczne jednostkowego obciążenia wiatrem  $p_k$ , wyznaczone według normy PN-EN 1991-1-4, stanowią około 79–84% odpowiadających im wartości określonych według normy PN-88/B-03004, zaś wartości momentów zginających od wiatru  $M_w$  są o 24–28% wyższe od odpowiednich wartości obliczonych zgodnie z normą PN-88/B-03004. W odniesieniu do kominu  $h = 70$  m (Lębork), usytuowanego w strefie 2, wzrost wartości momentów zginających od wiatru wynosi 33–36%. W przypadku kominu  $h = 24,2$  m (Gorlice, strefa 3), wartości charakterystyczne jednostkowego obciążenia wiatrem  $p_k$ , wyznaczone według normy PN-EN 1991-1-4, stanowią 35–56% odpowiadających im wartości określonych według normy PN-88/B-03004, zaś wartości momentów zginających od wiatru  $M_w$  są o około 15–18% mniejsze od wartości uzyskanych według normy PN-88/B-03004.

## 3. Obliczanie przekrojów kominów murowanych wg PN-EN

Według norm PN-EN przekroje trzonu kominu wymiaruje się w stanach granicznych nośności, wykorzystu-

jąc metodę współczynników częściowych w odniesieniu do obciążeń i materiałów i przyjmując nieliniowe związki fizyczne muru według PN-B-03002 [3] i PN-EN-1996-1-1 [6]. Do analizy naprężeń w przekrojach pierścieniowych rozpatrywanych kominów zastosowano w niniejszym artykule model odkształceniowy przekroju, opracowany w pracy [1]. Jest on sformułowany w oparciu o założenie płaskich przekrojów, pomija wytrzymałość muru na rozciąganie, oraz zakłada obliczeniowy związek  $\sigma_m - \varepsilon_m$  muru w postaci wykresu paraboliczno-prostokątnego (rys. 1). Rozpatrywany jest przekrój poprzeczny pierścieniowy trzonu kominu w jednoosiowym stanie odkształcenia (rys. 1). Siłami działającymi w przekroju są siła osiowa  $N_{Ed}$  ( $N$ ) oraz moment zginający  $M_{Ed} = N_{Ed} \cdot e$ , wywołane obciążeniem obliczeniowym ( $e$  – mimośród siły  $N_{Ed}$ ). Na rysunku 1 przyjęto następujące oznaczenia:

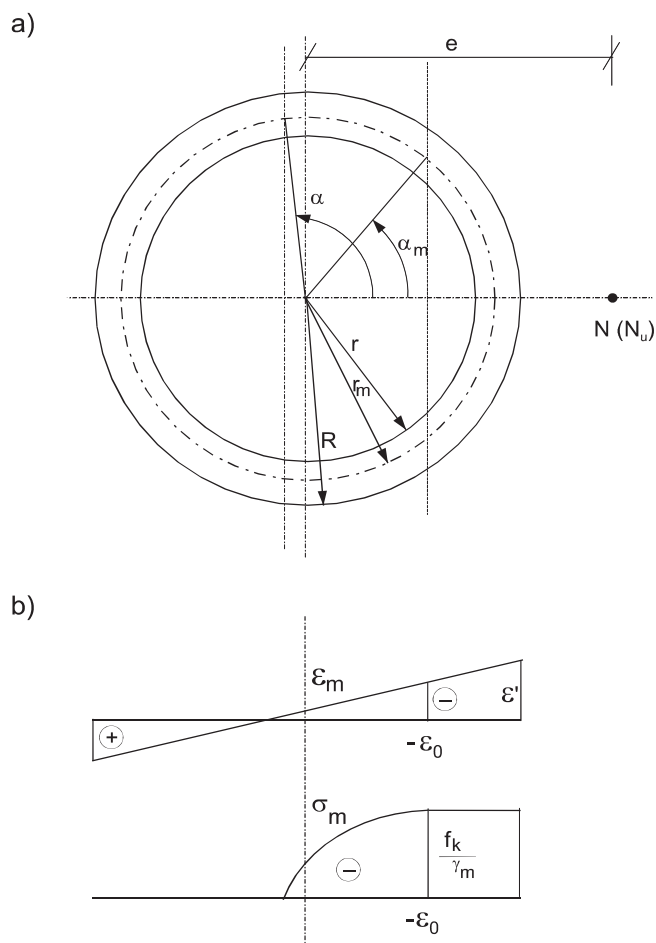
$R$ ,  $r$  – odpowiednio promień zewnętrzny i wewnętrzny pierścienia, m,

$r_m = 0,5 (R+r)$  – promień środkowy pierścienia, m,

$t = R - r$  – grubość pierścienia, m,

$e$  – mimośród siły  $N_{Ed}$ , m,

$N = N_{Ed}$  – siła osiowa, kN,



Rys. 1. a) Przekrój murowy pierścieniowy, b) rozkład odkształceń i naprężeń w przekroju

**Tabela 3.** Zestawienie wyników obliczeń przekrojów trzonów kominów

Objekt	Komin h=69 m Jarosław (strefa 1)		Komin h=70 m Lębork (strefa 2)		Komin h=24,2 m Gorlice (strefa 3)		
	Poziom [m]	39,0	0,0	20,0	0,0	6,5	0,0
R [m]	2,075	2,855	2,475	2,855	1,06	1,50	
t [m]	0,25	0,73	0,73	1,10	0,37	0,73	
f <sub>k</sub> [MPa]	3,0	3,5	3,0	3,0	2,2	2,2	
N = N <sub>Ed</sub> [kN]	<b>1477</b>	<b>6435</b>	<b>4842</b>	<b>10093</b>	<b>485</b>	<b>840</b>	
Obliczenia wg PN-88/B-03004	Mw [kNm]	<b>1695</b>	<b>9401</b>	<b>6883</b>	<b>13658</b>	<b>328</b>	<b>625</b>
	σ <sub>m</sub> [MPa]	-1,104	-1,325	-1,391	-1,533	-0,903	-0,447
Obliczenia wg PN-EN	Mw [kNm]	<b>2129</b>	<b>11696</b>	<b>9185</b>	<b>18166</b>	<b>276</b>	<b>511</b>
	e [m]	1,441	1,818	1,897	1,80	0,569	0,608
	σ <sub>m</sub> [MPa]	-1,321	-1,626	-1,521=f <sub>d</sub>	-1,571	-0,632	-0,38
	ε <sub>c</sub> [‰]	-1,537	-1,211	-2,55	-1,56	-0,679	-0,348
	c [m]	1,536	1,983	<b>1,69 &lt; e</b>	1,878	0,707	0,951
f <sub>d</sub> [MPa]	1,396	1,925	1,521	1,65	1,121	1,21	

f<sub>d</sub> – wytrzymałość obliczeniowa muru na ściskanie; c – promień poszerzonego rdzenia przekroju

α – kąt określający położenie osi obojętnej przekroju, rad,  
 α<sub>m</sub> – kąt określający granicę strefy uplastycznienia muru, rad,  
 ε, ε<sub>m</sub> – odkształcenie wyrażone w promilach, ‰,  
 ε' – odkształcenie skrajnego włókna ściskanej strefy przekroju, ‰,  
 σ<sub>m</sub> – naprężenie w murze, MPa,  
 f<sub>k</sub> – wytrzymałość charakterystyczna muru na ściskanie, MPa,  
 γ<sub>m</sub> – częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla muru  
 -ε<sub>0</sub> – wartość odkształcenia muru przy maksymalnym naprężeniu (= -2‰).

Postać związku fizycznego dotyczącego muru przyjęto według paraboliczno-prostokątnego wykresu σ<sub>m</sub> – ε<sub>m</sub> (rys. 1b) ). W zakresie sprężysto-plastycznym równanie to przyjmuje postać:

$$\sigma_m = \frac{f_k}{\gamma_m} \frac{2}{\varepsilon_0} \left(1 + \frac{\varepsilon}{2\varepsilon_0}\right) \varepsilon, \text{ gdy } -\varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq 0$$

$$\sigma_m = -\frac{f_k}{\gamma_m}, \text{ gdy } -3,5 \leq \varepsilon \leq -\varepsilon_0 \quad (2)$$

Równania równowagi sił podłużnych i momentów zginających w przekroju przyjmują postacie (3), (5) [1]:

$$-\frac{1}{\gamma_m}(\alpha_m - \alpha_1) + \frac{1}{\gamma_m} \varepsilon'_\alpha \frac{2}{\varepsilon_0} [X_1(\alpha, \alpha_m) + \frac{1}{2\varepsilon_0} \varepsilon'_\alpha X_2(\alpha, \alpha_m)] + \frac{N_{Ed}}{2r_m t f_k} = 0 \quad (3)$$

gdzie:

$$X_1(\alpha, \alpha_m) = \sin \alpha - \sin \alpha_m - \cos \alpha (\alpha - \alpha_m),$$

$$X_2(\alpha, \alpha_m) = (0,5 + \cos^2 \alpha) (\alpha - \alpha_m) + 0,25 \cdot (\sin 2\alpha - \sin 2\alpha_m) - 2\cos \alpha (\sin \alpha - \sin \alpha_m), \quad (4)$$

$$\varepsilon'_\alpha = \frac{\varepsilon'}{\rho_R - \cos \alpha}, \quad \rho_R = R/r_m.$$

$$-0,5 \frac{1}{\gamma_m} (\sin \alpha_m - \sin \alpha_1) + 0,5 \frac{1}{\gamma_m} \varepsilon'_\alpha \frac{2}{\varepsilon_0} [Y_1(\alpha, \alpha_m) + \frac{1}{2\varepsilon_0} \varepsilon'_\alpha Y_2(\alpha, \alpha_m)] + \frac{M_{Ed}}{4r_m^2 t f_k} = 0 \quad (5)$$

gdzie:

$$Y_1(\alpha, \alpha_m) = 0,5 (\alpha - \alpha_m) + 0,25 (\sin 2\alpha - \sin 2\alpha_m) - \cos \alpha (\sin \alpha - \sin \alpha_m),$$

$$Y_2(\alpha, \alpha_m) = (1 + \cos^2 \alpha) (\sin \alpha - \sin \alpha_m) - \frac{1}{3} (\sin^3 \alpha - \sin^3 \alpha_m) - \cos \alpha [\alpha - \alpha_m + 0,5(\sin 2\alpha - \sin 2\alpha_m)] \quad (6)$$

Równanie zgodności odkształceń ma postać:

$$\cos \alpha_m - \cos \alpha \varepsilon'_{\alpha+\varepsilon_0} = 0 \quad (7)$$

Naprężenia w przekroju obliczono według PN-EN, stosując kombinację obciążeń:

$$E_d = 1,0 \cdot N + 1,5 \cdot M_w \quad (8)$$

gdzie:  $N$ ,  $M_w$  – wartości charakterystyczne siły podłużnej i momentu zginającego od wiatru.

Rozwiązanie problemu sprowadza się do znalezienia rozwiązania układu trzech równań nieliniowych (3), (5), (7) z niewiadomymi  $\alpha$ ,  $\varepsilon'$ ,  $\alpha_m$ , a następnie obliczenia wartości odkształceń i naprężeń na podstawie zależności  $\sigma_m - \varepsilon$  muru według wzoru (2). Do rozwiązania powyższego układu równań zastosowano kombinację trzech metod optymalizacji: BFGS, Hooke-Jeeves i Broydena [1]. Zestawienie wyników obliczeń wybranych przekrojów trzonów kominiowych przedstawiono w tabeli 3. Z danych zawartych w tabeli 3 wynika, że podwyższone wartości obciążenia obliczeniowego wiatrem według norm PN-EN w przypadku strefy 1 i 2 skutkują większym wyężeniem przekrojów trzonów od kilku do ponad 20%. W przypadku trzonu kominu  $h = 70$  m naprężenia ściskające w przekroju w poziomie 20 m osiągają obliczeniową wytrzymałość muru na ściskanie i nie jest spełniony warunek pozostawania wypadkowej siły w obrębie drugiego rdzenia przekroju.

#### 4. Uwagi końcowe

Konsekwencją wprowadzenia nowych zasad ustalania wartości obciążenia wiatrem według norm PN-EN 1991-1-4 i PN-EN 1992-1-1 jest zwiększenie wartości obliczeniowych momentów zginających od wiatru w murowanym trzonie kominu o około 24–28 % w przy-

padku strefy 1 oraz o 33–36% dla strefy 2. W przypadku strefy 3 wartości momentów zginających od wiatru są mniejsze o około 17%. Skutkiem tego jest zwiększenie wyężenia przekrojów trzonów istniejących kominów murowanych usytuowanych w 1 i 2 strefie, oraz ich zmniejszenie w przypadku 3 strefy obciążenia wiatrem. Wzrost wyężenia wyraża się większymi o kilka do ponad 20% naprężeniami w przekrojach oraz możliwością uplastycznienia muru trzonu. Wskutek zwiększonego obciążenia wiatrem mimośród wypadkowej siły  $e$  może przekroczyć wartość promienia poszerzonego rdzenia przekroju  $c$ , co oznacza, że komin nie spełnia warunku lokalnej stateczności.

#### LITERATURA I WYKORZYSTANE MATERIAŁY

- [1] Lechman M., Nośność i wymiarowanie przekrojów pierścieniowych elementów mimośrodowo ściskanych, Prace Naukowe Instytutu Techniki Budowlanej, Rozprawy, Wydawnictwa Instytutu Techniki Budowlanej, Warszawa 2006
- [2] PN-88/B-03004 Kominny murowane i żelbetowe. Obliczenia statyczne i projektowanie
- [3] PN-B-03002:1999 Konstrukcje murowe niezbrojone. Projektowanie i obliczanie
- [4] PN-77/B-02011 Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie wiatrem
- [5] PN-EN 1991-1-4:2008, Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru
- [6] PN-EN-1996-1-1:2010 Eurokod 6: Projektowanie konstrukcji murowych – Część 1-1: Reguły ogólne. Reguły dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych



**ZABEZPIECZENIA CHEMOODPORNE**  
**MODERNIZACJE OBIEKTÓW PRZEMYSŁOWYCH**  
**INSTALACJE PRZEMYSŁOWE**

**GBT**  
**POLSKA**

GBT Polska sp. z o.o. • PL -97-400 Bełchatów • ul. Staszica 18/25 • tel. +48 44 633 90 85 • fax. +48 44 616 92 63  
 e-mail: office@gbt-polska.pl • www.gbt-polska.pl