

Ocena bezpieczeństwa konstrukcji istniejących kominów żelbetowych według 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 komina wymiaruje się na stan graniczny użytkowania, przy uwzględnieniu charakterystycznych wartości obciążeń. Podstawowym założeniem wykorzystywanym w tym podejściu jest przyjęcie liniowo-sprężystej postaci związków fizycznych betonu i stali (metoda NL). Wymagany poziom bezpieczeństwa określają wartości naprężeń dopuszczalnych. W odniesieniu do kominów żelbetowych, naprężenia normalne pionowe w stadium eksploatacji, wywołane działaniem na komin wszystkich obciążeń charakterystycznych, powinny spełniać następujące warunki:

$$\begin{aligned}\sigma_c &\leq 0,65 f_{ck} \\ \sigma_s &\leq 0,7 f_{yk}\end{aligned}\quad (1)$$

gdzie:

σ_c, σ_s – naprężenie odpowiednio w betonie i w stali, MPa,
 f_{ck} – wytrzymałość charakterystyczna betonu na ściskanie, MPa,

f_{yk} – charakterystyczna granica plastyczności stali zbrojeniowej, MPa.

Większość trzonów nośnych istniejących kominów żelbetowych została zaprojektowana z betonu klasy B15 – B17,5 zbrojonego stalą A-0 o charakterystycznej granicy plastyczności $f_{yk} = 220$ MPa. Podstawę techniczną projektowania stanowiły normy PN-88/B-03004 (PN-64/B-03004), PN-84/B-03264. Obciążenie wiatrem zestawiano na podstawie normy PN-77/B-02011 oraz normy 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 (współczynnik obciążenia 1,5), wykonano obciążenia trzech kominów żelbetowych, usytuowanych w trzech różnych strefach obciążenia wiatrem:

1. Komin $h = 160$ m (Puławy), strefa wiatrowa 1, teren II kategorii; średnica zewnętrzna górna: $d_z = 5,40$ m; grubość ścianki trzonu: $t = 0,16 \div 0,80$ m;

2. Komin $h = 110$ m (Słupsk), strefa wiatrowa 2, teren II kategorii; średnica zewnętrzna górna: $d_z = 4,40$ m; grubość ścianki trzonu: $t = 0,15 \div 0,47$ m;

3. Komin $h = 120$ m (Dębica), strefa wiatrowa 3, teren II kategorii; średnica zewnętrzna górna: $d_z = 5,00$ m; grubość ścianki trzonu: $t = 0,15 \div 0,50$ m.

Przykładowe wyniki zestawienia obciążenia wiatrem przedstawiono w tabeli 1 (komin $h = 160$ m) oraz tabeli 2 (komin $h = 120$ 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 90% odpowiadających im wartości określonych według normy PN-88/B-03004, zaś wartości momentów zginających od wiatru M_w są o 35–36% wyższe od odpowiednich wartości obliczonych zgodnie z normą PN-88/B-03004. Analogiczne rezultaty uzyskano w przypadku komina $h = 110$ m (Słupsk), usytuowanego w strefie 2. W przypadku komina $h = 120$ m (Dębica, strefa 3) wartości charakterystyczne jednostkowego obciążenia wiatrem p_k , wyznaczone według normy PN-EN 1991-1-4, stanowią około 55% odpowiadających im wartości określonych według normy PN-88/B-03004, zaś wartości momentów zginających od wiatru M_w są o około 17% mniejsze od wartości uzyskanych według normy PN-88/B-03004.

3. Obliczanie przekrojów kominów wg norm PN-EN

Według norm PN-EN 1992-1-1, PN-EN 13084-1 i PN-EN 13084-2 przekroje trzonu komina wymiaruje się w stanach granicznych nośności, wykorzystując metodę współczynników częściowych w odniesieniu do obciążeń i materiałów i przyjmując nieliniowe związki fizyczne betonu i stali. Sposób wymiarowania przekrojów mimośrodowo ściskanych według Eurokodu 2 podano m.in. w pracy [1]. Do analizy naprężeń w przekrojach pierścieniowych rozpatrywanych kominów żelbetowych zastosowano w niniejszym artykule model odkształceniowy przekroju, opracowany w pracy [3]. Jest on sformułowany w oparciu o założenie płaskich przekrojów, pomija wytrzymałość betonu na rozciąganie, z uwagi na zarysowanie przekroju, oraz za-

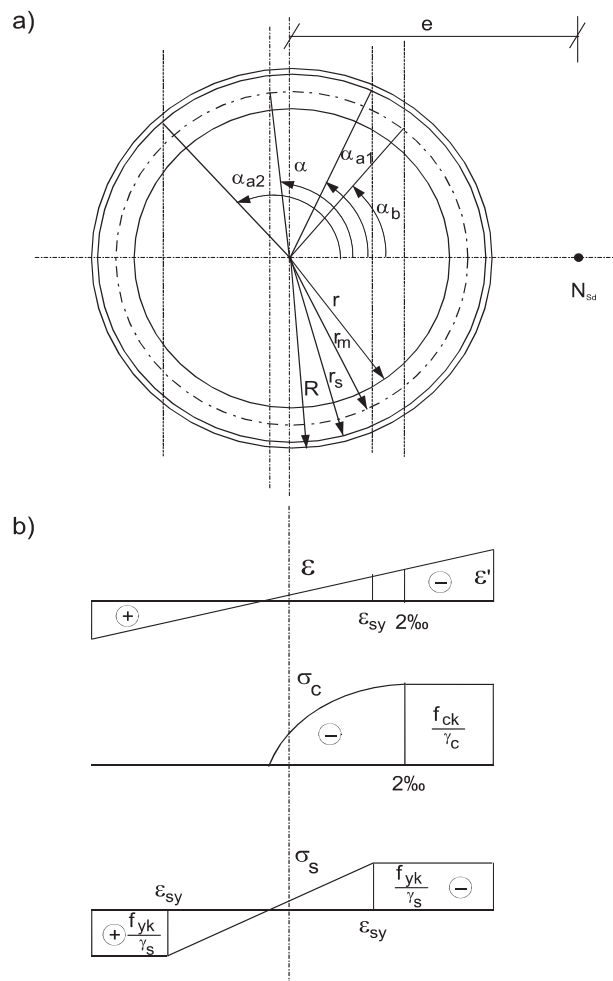
Tabela 1. Porównanie wartości obciążenia wiatrem komina żelbetowego $h=160$ m (strefa wiatrowa 1) według PN-EN 1991-1-4 oraz PN-88/B-03004 / PN-77/B-02011

poziom [m]	obc. charakterystyczne p_k [kN/m ²]		$\frac{p_k(\text{PN-EN})}{p_k(\text{PN})}$ [%]	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	
160	1,064	1.1784	90,3			
140	1,0247	1,1327	90,5	1755,8	1287,0	136,4
120	0,9820	1,0871	90,3	7073,8	5200,7	136,0
110	0,9587	1,0644	90,1	11096,0	8164,5	135,9
100	0,9334	1,0418	89,6	16041,9	11811,1	135,8
80	0,8766	0,9672	90,6	28768,2	21199,9	135,7
60	0,8100	0,8929	90,7	45328,3	33410,0	135,7
50	0,7707	0,8558	90,1	55057,1	40576,5	135,7
40	0,7245	0,8199	88,4	65756,2	48461,8	135,7
30	0,6688	0,7376	90,7	77421,4	57069,4	135,7
20	0,5983	0,6555	91,3	90028,4	66369,7	135,6
14	0,5374	0,5898	91,1	98025,5	72263,2	135,7
0				117273,4	86862,1	135,0

kłada obliczeniowy związek σ - ε betonu w postaci wykresu paraboliczno-prostokątnego i idealnie-szywno plastyczny model stali zbrojeniowej (rys.1). Rozpatrywany jest przekrój poprzeczny pierścieniowy trzonu komina w jednoosiowym stanie odkształcenia (rys. 1). Siłami działającymi w przekroju są: siła osiowa N_{Ed} oraz moment zginający $M_{Ed} = N_{Ed} \cdot e$, wywołane obciążeniem obliczeniowym (e – mimośród siły N_{Ed} , m).

- Na rysunku 1 przyjęto następujące oznaczenia:
- R , r – odpowiednio promień zewnętrzny i wewnętrzny pierścienia, m,
 - $r_m = 0,5 (R+r)$ – promień środkowy pierścienia;
 - $d_m = 2 r_m$ – średnia średnica pierścienia, m,
 - r_s – promień określający położenie środków ciężkości prętów zbrojenia w przekroju, m,
 - $t = R-r$ – grubość pierścienia, m;
 - ε_{sy} – odkształcenie odpowiadające uplastycznieniu stali, ‰,
 - ε_{\square} – odkształcenie skrajnego włókna ściskanej strefy przekroju, ‰,
 - α – kąt określający położenie osi obojętnej przekroju, rad,
 - α_b – kąt określający granicę strefy uplastycznienia betonu, rad,
 - α_{a1} – kąt określający granicę strefy uplastycznienia stali ściskanej, rad,
 - α_{a2} – kąt określający granicę strefy uplastycznienia stali rozciąganej, rad.

Równania równowagi sił podłużnych i momentów zginających w przekroju przyjmują postacie (2), (4), a związki zgodności odkształceń postacie (7) – (9) [3]:



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

Tabela 2. Porównanie wartości obciążenia wiatrem komina żelbetowego $h=120$ 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 ²]		$\frac{p_k(\text{PN-EN})}{p_k(\text{PN})}$ [%]	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	
120	1,1750	2,1257	55,3			
110	1,1466	2,0819	55,1	418,0	503,1	83,1
100	1,1166	2,0381	54,8	1678,5	2026,3	82,8
90	1,0845	1,9656	55,2	3792,9	4586,2	82,7
80	1,0496	1,8931	55,4	6769,3	8187,6	82,7
70	1,0114	1,8207	55,5	10615,1	12833,1	82,7
60	0,9691	1,7483	55,4	15340,4	18534,3	82,8
50	0,9215	1,6760	55,0	20951,9	25301,5	82,8
40	0,8662	1,6059	53,9	27447,4	33141,3	82,8
30	0,7995	1,4450	55,3	34819,0	42051,5	82,8
20	0,7155	1,2842	55,7	43052,8	52000,7	82,8
15	0,6586	1,1771	55,9	47484,2	57348,6	82,8
3,75	0,4287	1,0699	40,0	58139,5	70237,2	82,8
0				61877,5	74792,0	82,7

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1-\mu}{\gamma_c}(\alpha_b - \alpha_1) + \frac{1-\mu}{\gamma_c}\varepsilon'_\alpha \cdot \\
 & \cdot [X_1(\alpha, \alpha_b) + 0,25\varepsilon'_\alpha X_2(\alpha, \alpha_b)] + \\
 & + \mu \frac{f_{yk}}{f_{ck}} \left[-\frac{1}{\gamma_s}(\alpha_{a1} - \alpha_1) + \frac{1}{\varepsilon_{ss}}\varepsilon'_\alpha X_3(\alpha_{a1}, \alpha_{a2}) + \right. \\
 & \left. + \frac{1}{\gamma_s}(\alpha_2 - \alpha_{a2}) \right] + \frac{N_{Ed}}{2r_m t f_{ck}} = 0 \quad (2)
 \end{aligned}$$

gdzie: μ – stopień zbrojenia,
 $\gamma_c = 1,5$, $\gamma_s = 1,15$ – cząstkowe współczynniki bezpieczeństwa betonu i stali,

$$\begin{aligned}
 X_1(\alpha, \alpha_b) &= \sin\alpha - \sin\alpha_b - \cos\alpha(\alpha - \alpha_b) \\
 X_2(\alpha, \alpha_b) &= (0,5 + \cos^2\alpha)(\alpha - \alpha_b) + \\
 & + 0,25 \cdot (\sin 2\alpha - \sin 2\alpha_b) - 2 \cos\alpha(\sin\alpha - \sin\alpha_b) \\
 X_3(\alpha_{a1}, \alpha_{a2}) &= \rho(\sin\alpha_{a2} - \sin\alpha_{a1}) - \cos\alpha(\alpha_{a2} - \alpha_{a1}) \quad (3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \rho_R &= R/r_m, \quad \rho = r_s/r_m, \quad \varepsilon'_\alpha = \frac{\varepsilon'}{\rho_R - \cos\alpha}, \\
 & -0,5 \frac{1-\mu}{\gamma_c}(\sin\alpha_b - \sin\alpha_1) + \\
 & + 0,5 \frac{1-\mu}{\gamma_c}\varepsilon'_\alpha [Y_1(\alpha, \alpha_b) + 0,25\varepsilon'_\alpha Y_2(\alpha, \alpha_b)] + \\
 & + 0,5\mu \frac{f_{yk}}{f_{ck}} \left[-\frac{1}{\gamma_s}\rho(\sin\alpha_{a1} - \sin\alpha_1) + \frac{1}{\varepsilon_{ss}}\varepsilon'_\alpha Y_3(\alpha_{a1}, \alpha_{a2}) - \right. \\
 & \left. - \frac{1}{\gamma_s}\rho(\sin\alpha_2 - \sin\alpha_{a2}) \right] - \frac{M_{Ed}}{4r_m^2 t f_{ck}} = 0 \quad (4)
 \end{aligned}$$

gdzie:

$$\begin{aligned}
 Y_1(\alpha, \alpha_b) &= 0,5(\alpha - \alpha_b) + \\
 & + 0,25(\sin 2\alpha - \sin 2\alpha_b) - \cos\alpha(\sin\alpha - \sin\alpha_b), \\
 Y_2(\alpha, \alpha_b) &= (1 + \cos^2\alpha)(\sin\alpha - \sin\alpha_b) \\
 & - \frac{1}{3}(\sin^3\alpha - \sin^3\alpha_b) - \cos\alpha[\alpha - \alpha_b + 0,5(\sin 2\alpha - \sin 2\alpha_b)], \\
 Y_3(\alpha_{a1}, \alpha_{a2}) &= \rho \{ \rho [0,5(\alpha_{a2} - \alpha_{a1}) + \\
 & + 0,25(\sin 2\alpha_{a2} - \sin 2\alpha_{a1})] - \cos\alpha(\sin\alpha_{a2} - \sin\alpha_{a1}) \} \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$\frac{\cos\alpha_b - \cos\alpha}{\rho_R - \cos\alpha}\varepsilon' + 2 = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\rho \cos\alpha_{a1} - \cos\alpha}{\rho_R - \cos\alpha}\varepsilon' + \varepsilon_{sy} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\rho \cos\alpha_{a2} - \cos\alpha}{\rho_R - \cos\alpha}\varepsilon' - \varepsilon_{sy} = 0 \quad (9)$$

Rozwiązanie zagadnienia sprowadza się do znalezienia rozwiązania układu pięciu równań (2), (4), (7), (8), (9) z niewiadomymi α , ε' , α_b , α_{a1} , α_{a2} , a następnie obliczenia wartości odkształceń i naprężeń na podstawie zależności $\sigma_c - \varepsilon$ i $\sigma_s - \varepsilon$, przedstawionych graficznie na rysunku 1. Do rozwiązania powyższego układu równań zastosowano kombinację trzech metod optymalizacji: BFGS, Hooke-Jeeves i Broydena [2]. Zestawienie wyników obliczeń wybranych przekrojów trzonów kominowych przedstawiono w tabeli 3. Z danych zawartych w tabeli 3 wynika, że podwyższone wartości obciążenia obliczeniowego wiatrem według norm PN-EN

Tabela 3. Zestawienie wyników obliczeń przekrojów trzonów kominów

Obiekt	Komin h=160 m Puławy (strefa 1)		Komin h=110 m Słupsk (strefa 2)		Komin h=120 m Dębica (strefa 3)w		
Poziom [m]	100,0	0,0	70,0	0,0	40,0	0,0	
R [m]	3,65	5,45	2,60	3,35	3,35	4,35	
t [m]	0,22	0,80	0,24	0,47	0,30	0,50	
Klasa betonu; stopień zbr. [%]	B15 0,26	B15 0,4	B17,5 0,25	B17,5 0,4	B17,5 0,4	B17,5 0,4	
$N = N_{Ed}$ [kN]	4927	33835	4318	18842	11524	25395	
Obliczenia wg PN-88/ B-03004	M_w [kNm]	11811	86862	5887	44091	33141	74792
	σ_c [MPa]	-2,53	-2,695	-2,46	-5,87	-6,87	-5,27
	σ_s [MPa]	8,42	0,94	1,60	29,3	76,4	23,2
Obliczenia wg PN-EN	M_w [kNm]	16042	117273	8069	60307	27447	61878
	σ_c [MPa]	-3,23	-3,09	-3,05	-6,84	-4,65	-3,93
	ϵ_c [%o]	-0,457	-0,433	-0,383	-1,057	-0,627	-0,511
	σ_s [MPa]	100,2	23,8	40,8	191,3 = f_{yd}	52,9	12,3
	ϵ_s [%o]	0,477	0,113	0,194	1,222	0,252	0,058
	N_{Rd} [kN]	9031	45149	7480	18013 < N=18842	12071	25531
M_{Rd} [kNm]	29110	228861	16647	55069 < M_w=60307	37513	102187	

skutkują większym wyęzieniem przekrojów trzonów, a w przypadku komina h = 110 m, przekroczeniem stanu granicznego nośności przekroju w poziomie 0,0.

4. Uwagi końcowe

Konsekwencją wprowadzenia nowych zasad ustalania wartości obciążenia wiatrem według normy PN-EN 1991-1-4 i PN-EN 1992-1-1 jest zwiększenie wartości obliczeniowych momentów zginających od wiatru w żelbetowym trzonie komina o około 35–37% w przypadku strefy 1 i 2 oraz zmniejszenie o około 17% w odniesieniu do strefy 3. Skutkuje to zwiększeniem wyęzienia przekrojów trzonów istniejących kominów żelbetowych, zaprojektowanych zgodnie z normą PN-88/B-03004, w przypadku ich usytuowania w 1 i 2 strefie oraz zmniejszeniem wyęzienia w przypadku 3 strefy obciążenia wiatrem. Wzrost wyęzienia wyraża się większymi o kilkadziesiąt procent naprężeniami w betonie i stali zbrojeniowej oraz możliwością wystąpienia efektu uplastycznienia zbrojenia. W jednym z analizowanych przypadków przekroczony był stan graniczny nośności przekroju trzonu.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Podstawy projektowania konstrukcji żelbetowych i sprężonych według Eurokodu 2. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2006
- [2] Lechman M., Stachurski A., Nonlinear section model for analysis of RC circular tower structures weakened by openings, Structural Engineering and Mechanics, Vol. 20, No. 2(2005) 161–172
- [3] Lechman M., *Nośność i wymiarowanie przekrojów pierścieniowych elementów mimośrodowo ściskanych*, Prace Naukowe Instytutu Techniki Budowlanej, Rozprawy, Wydawnictwa Instytutu Techniki Budowlanej, Warszawa 2006

WYKORZYSTANE MATERIAŁY

- [1] PN-88/B-03004 Kominy murowane i żelbetowe. Obliczenia statyczne i projektowanie
- [2] PN-EN/B-03264 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie
- [3] PN-77/B-02011 Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie wiatrem
- [4] PN-EN 1991-1-4:2008, Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru
- [5] PN-EN 1992-1-1: 2008, Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [6] PN-EN 13084-1:2007, Kominy wolno stojące – Część 1: Wymagania ogólne (ang.)
- [7] PN-EN 13084-2:2007, Kominy wolno stojące – Część 2: Kominy betonowe (ang.)

www.przegladbudowlany.pl/archiwum



Archiwum od ręki
archiwalne spisy treści
na stronach www