



**XII S Y M P O Z J U M**  
na temat:  
**BADANIE PRZYCZYŃ I ZAPOBIEGANIE AWARIOM**  
**KONSTRUKCJI BUDOWLANYCH**  
**SZCZECIN-ŚWINOUJŚCIE, 22-23-24 października 1991 r.**

---

R—11

dr inż. Leszek Chodor  
prof. dr hab. inż. Zbigniew Kowal  
dr inż. Jerzy Sendkowski  
dr inż. Zbigniew Zajac  
Politechnika Świętokrzyska, Kielce

**AWARIA KOMINA STALOWEGO W WARUNKACH**  
**ZMĘCZENIA NISKOCYKLOWEGO**

**1. Wprowadzenie**

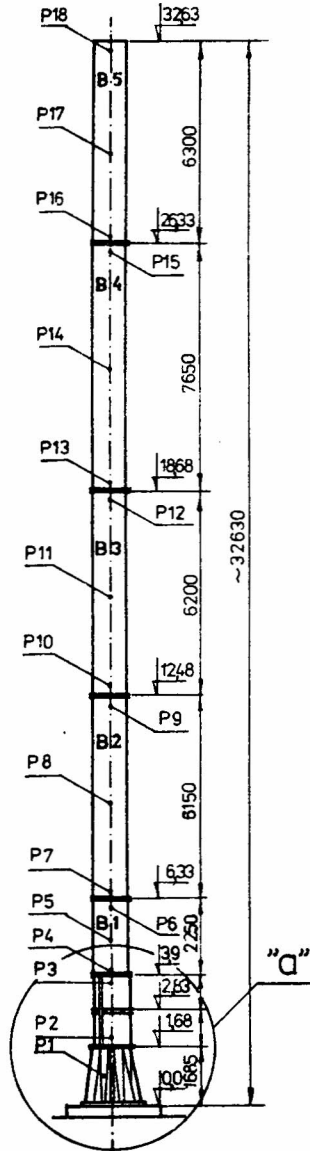
Kominy stalowe są konstrukcjami szczególnie narażonymi na zniszczenie zmęczeniowe, zwłaszcza w przypadkach gdy może zajść wiatrowy rezonans parametryczny w warunkach spiętrzenia naprężeń w karbach konstrukcyjnych, technologicznych lub korozyjnych. Jeśli przy tym spiętrzone naprężenia prowadzą do miejscowych uplastycznień, to może zajść zmęczenie niskocyklowe. Z powodu braku przepisów normujących zasady projektowania konstrukcji w warunkach zmęczenia niskocyklowego, ten typ zniszczenia jest zwykle pomijany przy wymiarowaniu elementów konstrukcji.

W niniejszej pracy opisano przypadek awarii komina stalowego wywołany zmęczeniem niskocyklowym. Komin był narażony na drgania parametryczne, a w jego płaszczu występowały znaczące karby w narożach otworów i karby wywołane korozją wżerową.

Przedstawiona awaria stała się przyczynkiem do sformułowania (lub przypomnienia) zaleceń konstrukcyjnych, prowadzących do bezpieczniejszego projektowania kominów stalowych z warunku zmęczenia niskocyklowego. Przestrzeganie sformułowanych zaleceń jest szczególnie istotne w przypadkach, gdy nie są sprawdzane warunki wytrzymałościowe uwzględniające zmęczenie niskocyklowe.

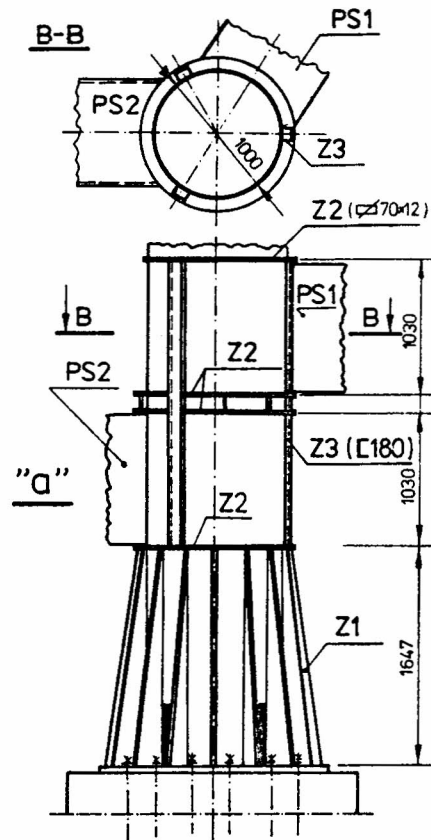
## 2. Opis obiektu

Na rys.1 pokazano widok ogólny kominu przy kotłowni PKP w Opocznie.



Rys.1. Widok ogólny kominu

Wolnostojący komin stalowy o wysokości około 33 m i średnicy 1.00 m złożony jest z pięciu segmentów montażowych połączonych śrubowymi łącznikami kołnierzowymi.



Rys.2. Wzmocnienia płaszczka kominu w okolicy czopuchów

W dolnym segmencie **B1** podstawę komina wzmocniono do wysokości 1.64 m żebrami **Z1**.

Do przewodu kominowego podłączono dwa czopuchy wlotowe **PS1** oraz **PS2**.

W obszarze podłączenia czopuchów, na długości ok. 2.2 m, płaszcz komina wzmocniono trzema pionowymi ceownikami **Z3** (C 180). (rys.2.). Ceowniki zakończono pierścieniem z blachy **Z2**. Natomiast pomiędzy czopuchami zastosowano pierścień złożony z dwóch blach **Z2**.

Nie wykonano wyokrąglenia naroży otworów. Brzegi otworów nie zostały wyrównane po wycięciu palnikiem.

W tabelicy 1 podano zmierzone grubościomierzem ultradźwiękowym grubości blach płaszczu. Punkty pomiarów oznaczono na rys.1 symbolami  $P_L$  ( $i = 1, 2, \dots$ ).

Tabela 1

Grubości blach płaszczu komina

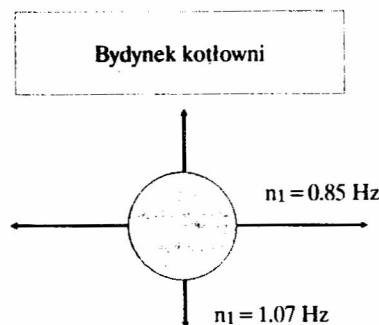
Segment	Punkt pomiaru	Grubość płaszczu w mm						Średni postęp korozji w 1 roku eksploatacji
		Na lewo od drabinki		Naprzeciw drabinki		Na prawo od drabinki		
		listopad 1990	sierpień 1987	listopad 1990	sierpień 1987	listopad 1990	sierpień 1987	
B5	P18	4.2	4.4	4.3	4.5	4.1	4.4	0.072
	P17	4.4	4.5	4.0	4.2	4.8	5.0	0.051
	P16	4.0	4.2	4.1	4.2	4.0	4.1	0.041
B4	P15	4.6	4.7	4.4	4.6	4.5	4.7	0.051
	P14	4.5	4.5	4.6	4.9	4.7	4.7	0.031
	P13	4.5	5.5	5.6	5.7	4.5	5.9	0.256
B3	P12	5.9	6.2	5.8	6.0	6.4	6.5	0.061
	P11	6.6	6.7	5.8	6.5	5.6	6.3	0.154
	P10	5.7	6.2	6.0	7.1	5.6	6.3	0.297
B2	P9	6.7	6.7	7.2	7.2	6.4	7.0	0.062
	P8	6.3	6.3	6.0	6.0	6.7	7.0	0.031
	P7	6.2	6.2	6.4	6.4	5.5	6.4	0.093
B1	P6	5.9	5.9	5.7	5.7	5.8	6.1	0.031
	P5	6.3	6.3	5.8	5.8	5.7	5.9	0.021
	P4	6.4	6.5	6.7	6.7	5.7	6.5	0.093
	P3	5.6	6.8	6.0	6.9	7.6	7.7	0.227
	P2	6.2	6.5	6.5	6.7	6.8	7.0	0.072
	P1	5.8	6.1	6.2	6.5	6.7	7.1	0.103

W tabelicy 1 podano postęp korozji w czasie roku eksploatacji obiektu oszacowany na podstawie pomiarów z sierpnia 1987 r. i listopada 1990 r. Średni postęp korozji na całej wysokości komina wyniósł ok. 0.10 mm/rok. Postęp ten okazał się znacznie zróżnicowany (od 0.021 do 0.297 mm/rok)

w zależności od miejsca na kominie, nawet przy uwzględnieniu trudności w zapewnieniu pełnej odpowiedniości miejsc pomiarów. Przeciętny postęp jest znacznie mniejszy od ubytku przewidywanego przez przepisy 0.32 mm/rok [1].

### 3. Drgania aerodynamiczne kominia

Analizę dynamiczną kominia wykonano biorąc pod uwagę pomierzone pierwsze częstotliwości drgań własnych (rys.3). Częstotliwości drgań mierzono w kierunku równoległym i prostopadłym do



Rys.3. Częstotliwości drgań własnych kominia

ścian budynku kotłowni.

Ze znacznej różnicy tych częstotliwości można wnioskować o istotnych potencjalnych odchyleniach charakterystyk dynamicznych kominów od charakterystyk przewidywanych teoretycznie.

Drugie częstotliwości drgań własnych oszacowano teoretycznie na podstawie skorygowanej długości wspornika o ciągłej, równomiernie rozłożonej masie. Skorygowaną długość ustalono dla obu kierunków drgań z

warunku równości częstotliwości pomierzonej, z pierwszą częstotliwością drgań modelu matematycznego wspornika o sztywności i masie równym wartościom średnim z pomiarów. Z takiego skorygowanego modelu wyznaczono drugie częstotliwości drgań własnych wspornika, które wyniosły odpowiednio  $n_2 = 5.33 \text{ Hz}$  i  $n_2 = 6.69 \text{ Hz}$ .

Prędkości krytyczne wiatru przy których może powstać rezonans parametryczny, szacowane według [2] wyniosły: 4.25 m/s, 5.33 m/s, 26.64 m/s lub 33.43 m/s.

Ponieważ ekstremalna prędkość wiatru w strefie wybudowania kominia wynosi 20 m/s, więc przy dwóch prędkościach wiatru 4.25 m/s i 5.33 m/s może powstać rezonans parametryczny odpowiednio w kierunku równoległym i prostopadłym do budynku kotłowni.

### 4. Analiza wyężenia kominia z uwzględnieniem zmęczenia

W czasie drgań parametrycznych nominalna amplituda naprężeń oszacowana teoretycznie [2] nie przekraczała  $\Delta\sigma = 180 \text{ MPa}$ . Nominalnym nazwano wyężenie szacowane dla płaszcza gładkiego, bez uwzględnienia karbów prowadzących do lokalnego spiętrzenia naprężeń. Cykl tych naprężeń był praktycznie symetryczny nawet po uwzględnieniu osłabienia przekroju otworem pod czopuch i współpracy blachy czopucha.

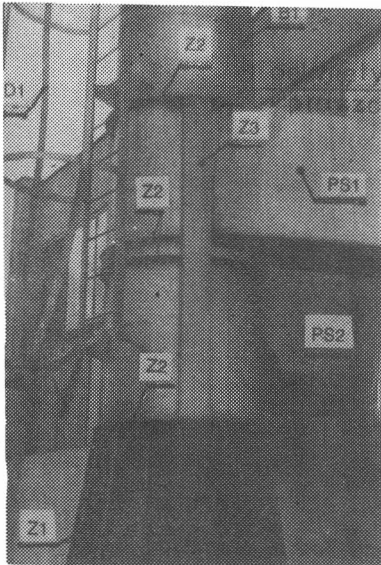
Ponieważ krawędzie otworu wlotowego czopucha nie zostały obrobione, naroża otworu nie zostały wyokrąglone, a wokół otworu występowały korozyjne uszkodzenia wżerowe oraz spawane połączenia płaszczu z blachą czopucha i żebrami wzmacniającymi, więc naprężenia znacznie przekraczały wartości nominalne. Współczynnik spiętrzenia naprężeń przy takim nasileniu karbu trudno jest wyznaczyć teoretycznie. Z optymistycznych szacunków wynika, że nie był on mniejszy od  $n_{\sigma} = 4$ . Wobec tego amplituda naprężeń lokalnych mogła dochodzić do  $\Delta\sigma = 4 \cdot 180 = 720 \text{ MPa}$ .

Niszczącą (graniczną) amplitudę  $\Delta\sigma_R$  sprowadzonych sprężystych naprężeń w warunkach zniszczenia niskocyklowego (czyli dla liczby cykli naprężeń  $N < 10^5$ ) oszacowano z zależności [4]:

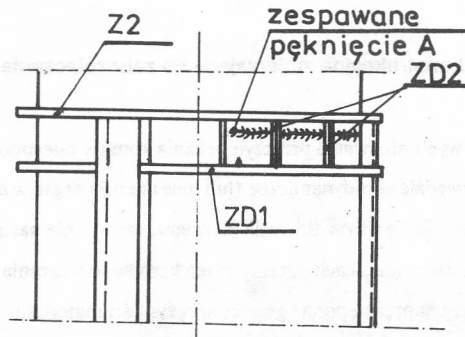
$$\Delta\sigma_R = \frac{E^t \cdot \ln \frac{100}{100 - A^t}}{(4N)^{m_p} + \frac{1+r^*}{1-r^*}} + \frac{R_m^t}{(4N)^{m_e} + \frac{1+r}{1-r}} \quad (1)$$

gdzie:  $E^t, A^t, R_m^t$  - współczynnik sprężystości, przewężenie (w %) i granica wytrzymałości materiału w temperaturze  $t$ ;  $m_p, m_e$  - charakterystyki materiału ( $m_p = 0.5$  dla stali węglowych o wytrzymałości  $R_m^t = 300$  do  $700 \text{ MPa}$ ;  $m_p = 0.5 + 0.0002(R_m^t - 700)$  dla  $R_m^t = 700$  do  $1200 \text{ MPa}$ ; przy braku odpowiednich danych można przyjąć  $m_e = 0.132 \lg R_m^t / R_c^t$ , gdzie  $R_c^t \approx (0.55 - 0.0001 R_m^t) R_m^t$  [4], - wytrzymałość zmęczeniowa przy  $N = 10^6$  cykli w temperaturze  $t$ );  $r^*, r$  -  $r = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$  - współczynnik asymetrii cyklu odpowiednio nominalnych sprężystych i rzeczywistych (sprężysto-plastycznych w karbie) naprężeń.

Dla  $N = 10^4$  cykli i  $t = 20^\circ\text{C}$  (optymistycznie przyjęta liczba cykli i temperatura płaszczu



A



Rys.4. Pęknięcie płaszczu komina

Rys.5. Naprawa płaszczu komina,

komina) i symetrycznych cykli naprężeń  $r = -1$  oraz pozostałych parametrów jak dla stali St3S

( $E^t \approx 200 \text{ GPa}$ ,  $+R_m^t \approx 400 \text{ MPa}$ ,  $A^t \approx 30\%$ ,  $m_P = 0.5$ ,  $R_c^t = (0.55 - 0.0001 \cdot 400)400 \approx 200 \text{ MPa}$ ,

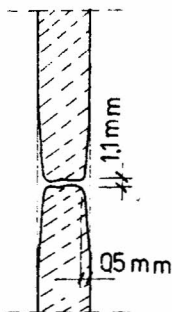
$m_e = 0.132 \lg \frac{200}{400} = 0.04$ ) mamy:

$$\Delta\sigma_R = 357 + 262 = 619 \text{ MPa.}$$

Ponieważ  $\Delta\sigma_R = 619 \text{ MPa} < \Delta\sigma_L = 720 \text{ MPa}$ , więc komin mógł ulec awarii na skutek zmęczenia niskocyklowego.

## 5. Awaria komina

W roku 1990 w trakcie oględzin zauważono pęknięcie poprzeczne komina (rys. 4) na długości około 60 cm. Na rys. 6 naszkicowano przekrój pęknięcia. Przewężenie krawędzi pękniętych blach wskazuje na plastyczny charakter zniszczenia.



Rys.6. Przekrój przez krawędzie pękniętych blach

Pęknięcie płaszczu wystąpiło na jego obwodzie w uezebrowanym segmencie B1. Szczelina rozpoczyna się w narożu otworu wlotowego czopucha, przebiega pod jednym z pionowych cewników wzmocnienia i kończy się przed wspornikiem drabinki.

Na rys.5 przedstawiono sposób naprawy pęknięcia. Naprawa polegała na zespawaniu pęknięcia i zainstalowaniu dodatkowego pierścienia ZD1, tak aby pęknięcie mogło być związane pionowymi płaskownikami ZD2.

## 6. Zabiegi konstrukcyjne zmierzające do zabezpieczenia komina przed zmęczeniem

W celu wyeliminowania przyczyn pęknięcia komina zalecono:

- 1) wprowadzić aerodynamiczne (lub inne) tumiki drgań w celu doprowadzenia do nieuporządkowanego zrywania się wirów Benarda-Karmana, tak aby nie następował rezonans parametryczny,
- 2) stosować w miejscach potencjalnych karbów rozwiązania konstrukcyjne eliminujące możliwość spiętrzania się naprężeń ponad granicę sprężystości materiału.

W omawianym przypadku nieuporządkowane zrywanie się wirów Benarda-Karmana uzyskano przez zainstalowanie aerodynamicznych turbulizatorów na odcinku szczytowym komina. Zainsta-

lowano turbulizatory spiralne, wykonane z płaskowników 100x10 mm i długości 150 mm spawanych na linii śrubowej co 300 mm.

Wokół otworu wlotowego czopucha wykonano obramowanie z kątowników. Brzegi otworu oszlifowano, w taki sposób by w narożach powstało wyokrąglenie.

## 7. Uwagi i wnioski

Odróżnienie pęknięcia płaszcza wskutek niskocyklowego zmęczenia od pęknięcia krucheego polegało na obserwacji miejsca w którym nastąpiła inicjacja pęknięcia. Przełom miał plastyczny charakter.

W przypadkach, gdy komin może wejść w rezonans parametryczny i występują w nim spiętrzenia naprężeń w karbach, może zająć zmęczenie niskocyklowe.

Zmęczeniu niskocyklowemu można zapobiec przez zabiegi konstrukcyjne:

1) doprowadzenie do nieuporządkowanego zrywania się wirów wiatrowych przez zainstalowanie turbulizatorów, bądź poprzez zwiększenie tłumienia drgań przez zainstalowanie tłumików,

2) rozładowywanie karbów konstrukcyjnych i technologicznych przez wykonywanie wyokrąglenia otworów, szlifowanie brzegów otworów i dodatkowe wzmacnianie ich obrzeży, a także unikanie skupiania się spoin i spawania w zalecanej przez technologów kolejności tak, aby uniknąć nadmiernych naprężeń spawalniczych.

Z badań awarii różnych kominów wyciągnięto wniosek generalny, że na etapie projektowania należy przewidywać tłumiki aerodynamiczne na wszystkich wolnostojących kominach bez wykładziny. Wniosek uzasadnia się zmiennością charakterystyk dynamicznych komina w czasie eksploatacji a także zawodnością teoretycznych metod szacowania rezonansowych drgań komina.

## Literatura

- [1] B.S. 4076/66, *Specification for Steel Chimneys*, London 1966 (norma brytyjska)
- [2] PN- 77/B-02011. *Obciążenia budowli w obliczeniach statycznych. Obciążenie wiatrem.*
- [3] Chlewicki K., Chodor L., Kowal Z., Malec M.: Zabezpieczenie cylindrycznego komina stalowego przed rezonansem wiatrowym, *Inżynieria i Budownictwo*, 2/1989
- [4] Kogajew W.P., Mahutov N.A., Gusenkov A.P.: *Rasczety detaliej maszin i konstrukcij na procznost i dolgovecnost*, Maszinstrojenije, Moskva, 1985