

Ocena wyężenia chłodni kominowej wskutek nierównomiernych osiadań jej fundamentów

Prof. dr hab. inż. Piotr Noakowski, Exponent Industrial Structures/FAA, Düsseldorf

1. Charakterystyka konstrukcji

Paraboliczna chłodnia kominowa znajduje się w pobliżu skarpy spadającej ku rzece. Według oryginalnej dokumentacji technicznej konstrukcja odznacza się następującymi właściwościami:

- dane ogólne: realizacja w roku 1983, wysokość 124 m, obszar kopalniany, operacja ciągła,
- powłoka: beton B25, stal S420, głowica 160 mm, stopa 750 mm, zbrojenie obwodowe 2 x 0,15%, otulina 30 mm,
- podpory: 36 podwójnych słupów w formie litery V, średnica 700 mm,

– posadowienie: 36 pojedynczych stóp fundamentowych.

W wyniku szkód górniczych stopy fundamentowe osiadły nierównomiernie w kierunku rzeki, co spowodowało pochylenie jej osi pionowej i zniekształcenie samej powłoki. Wzbudzone w ten sposób siły wymuszone doprowadziły do jej zarysowania i wyężenia zbrojenia. Zadaniem autora było ustalenie stopnia tego wyężenia.

2. Badania konstrukcji

Awaria konstrukcji objawiła się w postaci następujących anomalii:

- osiadanie podpór: od 270 mm

do 450 mm wzdłuż osi zniekształcenia,

– owalizacja stopy: wydłużenie średnicy o 340 mm wzdłuż osi zniekształcenia,

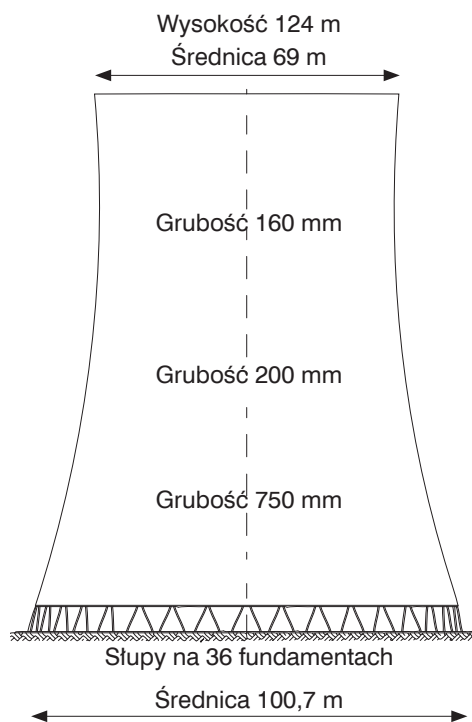
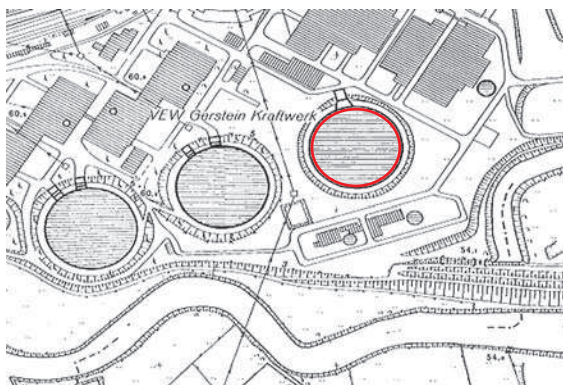
– owalizacja głowicy: wydłużenie średnicy o 240 mm prostopadle do osi zniekształcenia,

– odchylenie osi pionowej: 180 mm,

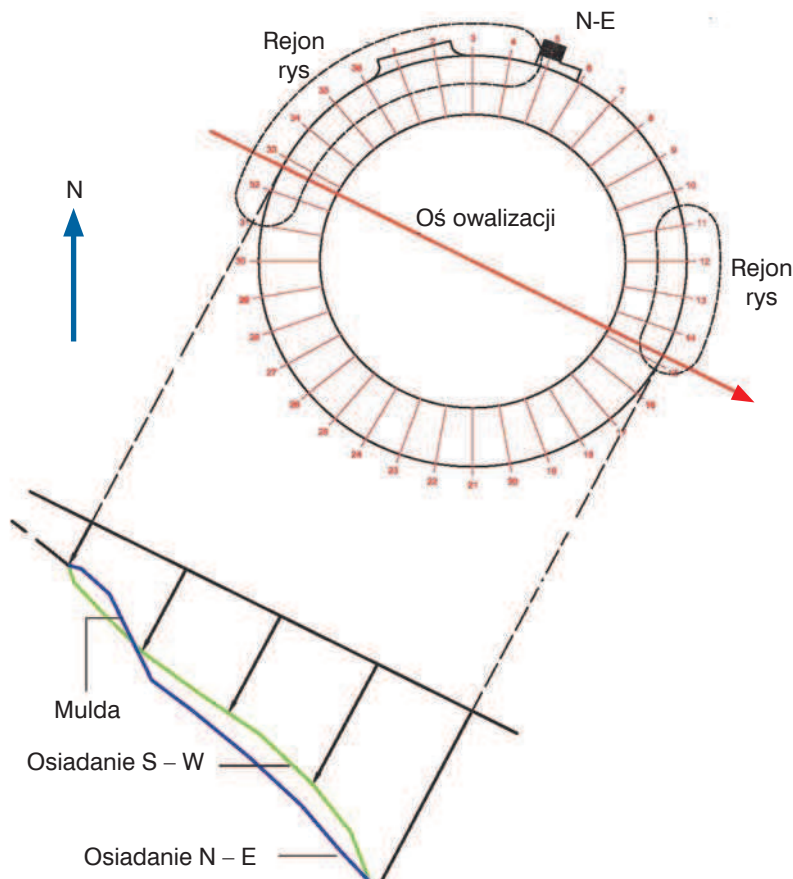
– rysy u dołu powłoki:
rejon SO → 12 rys o szerokości od 0,15 mm do 0,40 mm;

rejon NW → 11 rys o szerokości od 0,15 mm do 0,35 mm,

– rysy u góry powłoki:
rejon SW → 13 rys przeważnie uzdrowionych przez samouszczelnienie,



Rys. 1. Lokalizacja i konstrukcja chłodni



Rys. 2. Nierównomierne osiadanie

rejon NO → 20 rys przeważnie uzdrowionych przez samouszczelnienie.

Nierównomierność osiadania stóp fundamentowych doprowadziła do pochylenia i owalizacji powłoki. Te ostatnie są przeciwbieżne: podczas gdy stopa podąża za osią zniekształcenia ku rzece, głowica jest owalizowana w poprzecznym kierunku. Jednocześnie siły wymuszone przez owalizację doprowadziły do zarysowania powłoki w rejonach o zmniejszonej krzywiznie.

Wstępne badania właściwości powłoki przyniosły następujące wyniki:

- wytrzymałość betonu $f_c = 45 \text{ MN/m}^2$, 5% rozrzutu (9 odwiertów i 400 pomiarów młotkiem),
 - otulina zbrojenia: $c = 33 \text{ mm}$ (wartość średnia z 300 pomiarów),
 - karbonatyzacja: $t = 4,5 \text{ mm}$ (wartość średnia z 50 pomiarów),
 - wytrzymałość stali: $f_y \approx 500 \text{ MN/m}^2$.
- Właściwości betonu i zbrojenia powłoki chłodni są więc bez zarzutu.

3. Analiza sił wymuszonych

W wyniku nierównomiernego osiadania poszczególnych stóp,

w powłoce chłodni zostały wzbudzone momenty wymuszone. Proces ten można objaśnić w następujący sposób:

- A. Stan normalny: pionowe posadowienie konstrukcji na płaskim terenie,
- B. Pochylenie: styczne dopasowanie się konstrukcji do terenu i powstanie wirtualnych szczelin pomiędzy powłoką a gruntem na krańcach pochylenia,
- C. Owalizacja:

- zamknięcie wirtualnych szczelin przez ciężar własny powłoki,
- zwichrzenie powłoki przez zamknięcie wirtualnych szczelin przez ciężar własny,
- wzbudzenie momentów wymuszonych wskutek przestrzennej formy dolnego brzegu powłoki,
- rozciąganie na zewnątrz w rejonach przyrostu i wewnątrz w rejonach ubytku krzywizny (rys. 4).

W wyniku różnicy temperatur w powłoce zostają również wzbudzone momenty wymuszone, które prowadzą do rozciągania po jej zewnętrznej stronie. Te obydwa typy momentów wymuszonych nakładają się w rezultacie następująco:

- rejon przyrostu krzywizny wskutek owalizacji ⇒ sumowanie się momentów z owalizacji i temperatury,
- rejon ubytku krzywizny wskutek owalizacji ⇒ znoszenie się momentów z owalizacji i temperatury.

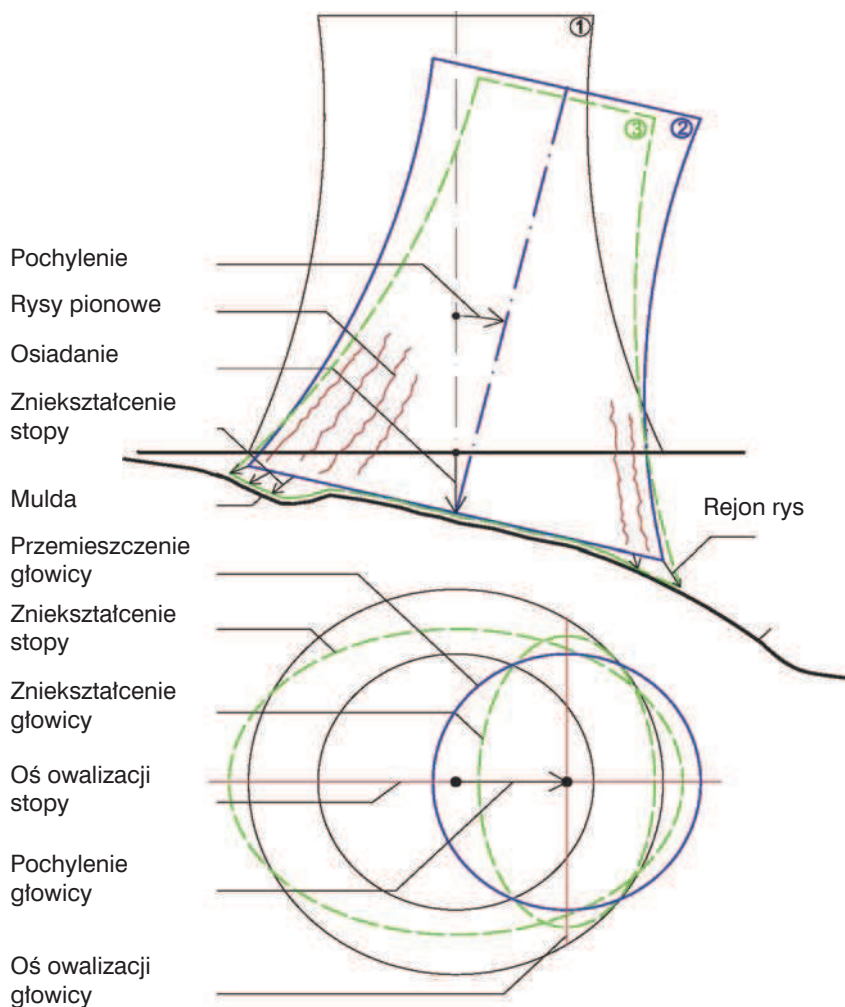
Powyższe spostrzeżenia i prawidłowości wyjaśniają dlaczego pionowe zarysowanie powłoki nastąpiło wyłącznie w rejonach osi owalizacji, czyli w miejscach przyrostu krzywizny powłoki.

4. Analiza stanu wyężenia

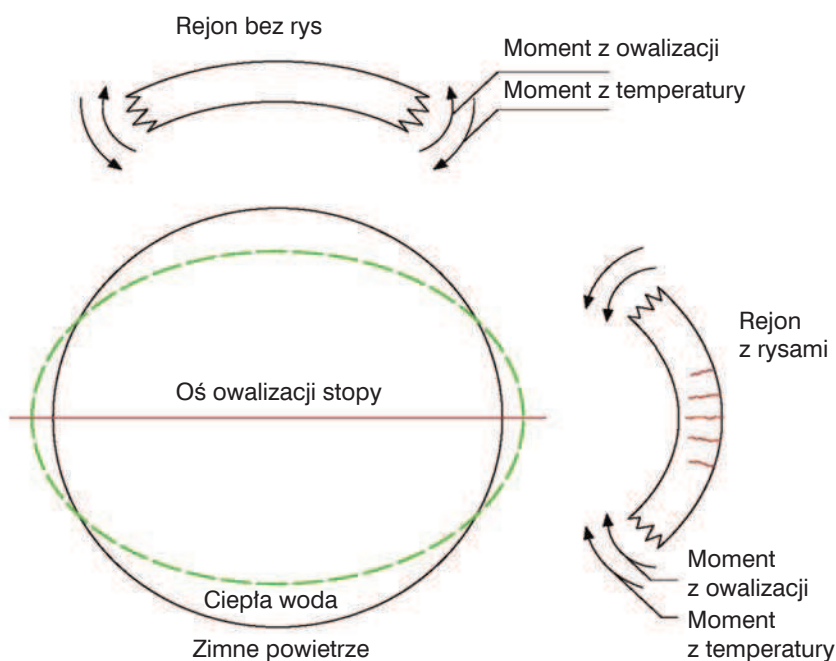
Wartość naprężeń w stali σ_s po zarysowaniu określono na podstawie znanych naprężeń w betonie tuż przed jego zarysowaniem, które są równe wytrzymałości betonu na rozciąganie f_{ct} . Natomiast z wartości naprężeń w stali σ_s natomiast wynika szerokość rozwarcia rysy w_m . Te dwa aspekty zachowania się konstrukcji zależą od takich czynników, jak:



Rys. 3. Rysa zewnętrzna, strefa ściskana



Rys. 4. Pochylenie i zniekształcenie konstrukcji



Rys. 5. Superpozycja sił wymuszonych, rejony powstania rys

- wytrzymałość betonu na ściskanie: f_c ,
- wytrzymałość betonu na rozciąganie: f_{ct} ,
- wysokość przekroju: $h = 200 \text{ mm}$,
- średnica pręta zbrojeniowego: $d_s = 8 \text{ mm}$,
- stopień zbrojenia: $\rho = 0,15\%$.

Analiza zachowania się powłoki pod względem σ_s i w_m została przeprowadzona przy założeniu następujących wartości granicznych betonu w odniesieniu do nieznanego okresu powstawania rys:

- wytrzymałość na ściskanie $\rightarrow f_c = \text{od } 25 \text{ MN/m}^2 \text{ do } 35 \text{ MN/m}^2$,
- wytrzymałość na rozciąganie $\rightarrow f_{ct}$ – minimum i maksimum (rys. 6).

Przy tych założeniach zostały obliczone następujące zbiory zależności: 3 funkcje $\sigma_s(f_c)$ i $w_m(f_c)$, każda dla $\min f_{ct}$, $\text{mitt} f_{ct}$ i $\max f_{ct}$. Z zależności tych wyłaniają się pola, które pozwalają oszacować wyężenie konstrukcji (rys. 7):

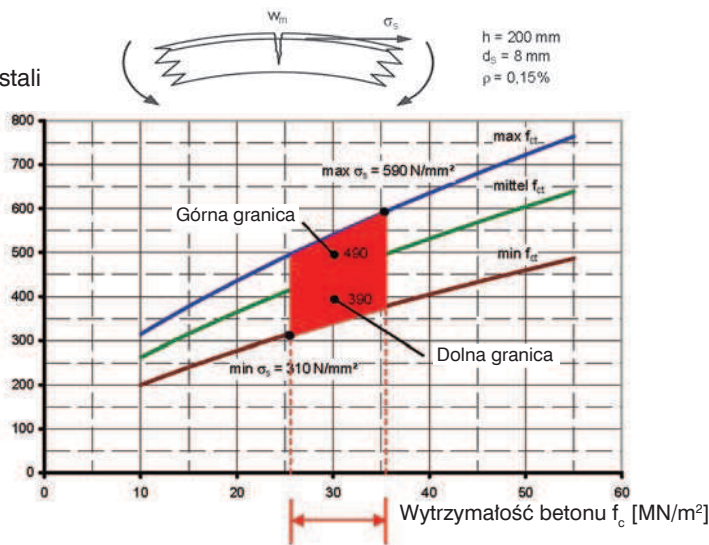
- rozwarcie rys w zakresie: $0,22 \text{ mm} < w_m < 0,33 \text{ mm}$,
- naprężenie w stali w zakresie: $390 \text{ MN/m}^2 < \sigma_s < 490 \text{ MN/m}^2$.

Wyniki obliczeń szerokości rys pokrywają się dobrze z wynikami pomiarów na powierzchni powłoki, wahającymi się pomiędzy $0,15 \text{ mm}$ do $0,40 \text{ mm}$. Biorąc to pod uwagę, można nazwać wyznaczone obliczeniowo naprężenia w stali jako godne zaufania. Ze względu na niewielką liczbę rys można przyjąć, że powstały one w miejscach o niskiej wytrzymałości betonu na rozciąganie. W związku z tym należy uznać dolne wartości obliczonych naprężeń σ_s jako właściwe oszacowanie wyężenia konstrukcji powłoki chłodni.

5. Wnioski końcowe

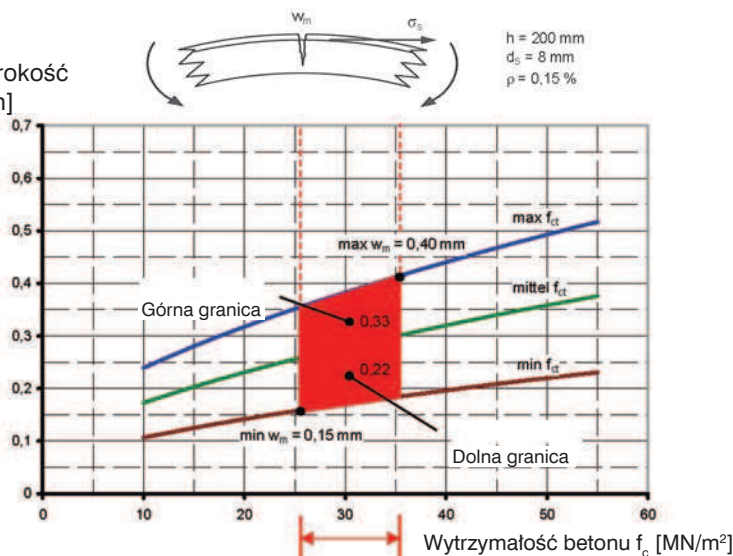
Nierównomierne osiadanie fundamentów słupów doprowadziło do dodatkowego wyężenia powłoki chłodni kominowej, reprezentowanego przez wartość naprężeń w stali zbrojeniowej. Wyężenie to nie doprowadziło do przekroczenia granicy plastyczności stali. Kompleksowa ocena nośności

Naprężenie w stali σ_s [MN/m²]



Rys. 6. Analiza naprężeń w stali σ_s po zarysowaniu

Średnia szerokość rysy w_m [mm]



Rys. 7. Analiza średniej szerokości rysy w_m

konstrukcji wymaga jej nieliniowej analizy przy uwzględnieniu skutków osiadań i oddziaływania wiatru. Analiza taka musi ująć spadek sił wymuszonych przy wzroście liczby rys w wyniku parcia wiatru. Specjalnością autora jest projektowanie i ocena stanu technicznego budowli przemysłowych poddanych wysokim obciążeniom użytkowemu, wiatrem i temperaturą. W omawianym przypadku należało ocenić stan wyężenia zniekształconej i zarysowanej chłodni kominowej wskutek nierównomiernego osiadania fundamentu. Ocena ta polegała na wyznaczeniu naprężeń w stali zbrojeniowej na podstawie

wartości pomierzonych szerokości rys. W przeprowadzonych analizach wykorzystano własne metody nieliniowej statyki konstrukcji żelbetowych [10], [13], [22]. Metody te stały się też częścią przepisów [1], [2], [3], [4] i znalazły zastosowanie w pracach badawczych i przy rozwiązywaniu trudnych problemów praktycznych, opisanych m.in. w literaturze [5 do 9, 11, 12, 14 do 21, 23, 24].

BIBLIOGRAFIA

[1] CICIND: Model Code for Concrete Chimneys. Part A: The Shell
 [2] DIN 1056: Schornsteine in Massivbauart. NABau im DIN e.V., in Vorbereitung
 [3] DIN EN 13084: Freistehende Schornsteine,

Teil 2: Betonschornsteine. NABau im DIN e.V., 2002

[4] DVGW: Planung und Bau von Wasserbehältern. DVGW, Technische Regeln, Arbeitsblatt W311
 [5] Lohmayer G., Weiße Wannen, einfach und sicher. Düsseldorf 1995
 [6] Nieser H., Engel V., Industrieschornsteine in Massivbauart. Kommentar DIN 1056
 [7] Noakowski P., Gerstle K., Tower Structures Subjected to Temperature and Wind. Structural Journal of the American Concrete Institute (1990)
 [8] Noakowski P., Baumann T., Topp T., Aigner F., Vorgespannte Stahlbeton-Flüssiggas-Behälter. Bauinformatik (1991), H. 6
 [9] Noakowski P., Bartels O., Wzmocnienie zarysowanych chłodni kominowych, Projektowanie zbiorników na ciecz. 3. Konferencja: Żelbetowe Konstrukcje Cienkościenne, Karpacz 1993
 [10] Noakowski P., Moncarz P., Stiffness oriented design of reinforced concrete structures. Księga jubileuszowa Prof. Tadeusza Godyckiego/Ćwirko, Politechnika Gdańska, 1998
 [11] Noakowski P., Breddermann M., Harling A., Pohl B., Cracks in Masts of centrifugal concrete. 4rd International Conference AMCM. Kraków, 2002
 [12] Noakowski P., Breddermann M., Harling, Wzmocnianie konstrukcji wieżowych. XXI Konferencja awarie budowlane, Miedzyzdroje, 2003
 [13] Noakowski P., Schäfer H. G., Steifigkeitsorientierte Statik im Stahlbetonbau. Ernst & Sohn (2003)
 [14] Noakowski P., Ekonomiczne wymiarowanie obudowy tunelowej, XLIX Konferencja Naukowa KILW PAN i KN PZITB, Krynica, 2004
 [15] Noakowski P., Awaria zbiornika w wyniku nierozpoznanych sił podłużnych. XXII Konferencja awarie budowlane, Miedzyzdroje, 2005
 [16] Noakowski P., Imposed forces in storage tanks for hot liquid. 5th Int. Conf. AMCM, 2005
 [17] Noakowski P., Breddermann M., Harling A., Schnetgöke J., Rissbildung in turmartigen Tragwerken, Schleuderbetonmast vs. Stahlbetonschornstein, Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005), H. 7, S. 538-548
 [18] Noakowski P., Breddermann M., Harling A., Rost M., Potratz S., Leszinski H., Strengthening of tower-like structures, typical cases and their repair, CICIND Book 2006
 [19] Noakowski P., Breddermann M., Harling A., Rost M., Turmartige Industriebauwerke Betonkalender 2006, Ernst und Sohn
 [20] Noakowski, P.: Realistic Design Methods for Chimneys The Chimney History, The International Chimney Association, CICIND 2008
 [21] Noakowski P., Harling A., Breddermann M., Rost M., Verstärkung von turmartigen Tragwerken, Sonderheft der Bautechnik (2010), Ernst und Sohn
 [22] Noakowski P., Wymiarowanie wobec sił wymuszonych wskutek skurczu i temperatury 25 Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk 2010
 [23] Pfefferkorn W., Steinhilber H., Ausgedehnte fugenlose Stahlbetonbauten. Beton-Verlag (1990)
 [24] Schnell J., Kautsch R., Noakowski P., Breddermann M., Verhalten von Hochbaudecken bei Zugkräften aus Zwang. Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005), H. 5, S. 406-415