

Stan techniczny powłoki żelbetowej hiperboloidalnej chłodni kominowej z dużymi imperfekcjami po 35 latach użytkowania

Dr inż. Łukasz Hojdyś, dr inż. Piotr Krajewski, dr inż. Szymon Seręga,
Politechnika Krakowska, dr inż. Marian Płachecki, Państwowa Wyższa Szkoła
Techniczno-Ekonomiczna w Jarosławiu

1. Wprowadzenie

W drugiej połowie ubiegłego stulecia wykonano w Polsce wiele hiperboloidalnych chłodni kominowych na terenie zakładów przemysłu energetycznego, metalurgicznego i chemicznego. Stosowane wówczas zasady projektowania chłodni nie uwzględniały specyficznych warunków użytkowania tych obiektów, skutkiem czego już po kilkunastu latach eksploatacji dostrzegano zaawansowane uszkodzenia i zanieżenie trwałości konstrukcji (m.in. [1], [2]). W latach 1980–2000 prowadzono na szeroką skalę prace remontowe chłodni kominowych zarówno pod względem technologicznego ich wyposażenia, jak i materiałowo-konstrukcyjnym [3]. Obecnie upływają projektowe okresy eksplo-

atacji tych obiektów i powstaje pytanie o możliwość dalszego ich bezpiecznego użytkowania.

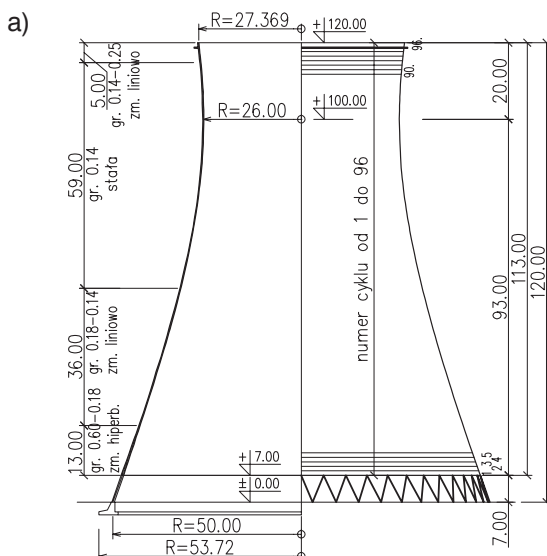
Z taką sytuacją mieli do czynienia w roku 2011 autorzy niniejszego artykułu. Użytkownik chłodni kominowej, wybudowanej w połowie lat 70. ubiegłego wieku, zlecił opracowanie ekspertyzy dotyczącej oceny stanu technicznego oraz możliwości eksploatacji obiektu do roku 2025. W artykule przedstawiono główne spostrzeżenia, wnioski i zalecenia dotyczące komina wywiewnego chłodni. Te wnioski i zalecenia mogą być wykorzystane przy ocenie bezpieczeństwa innych obiektów tego typu.

2. Opis obiektu

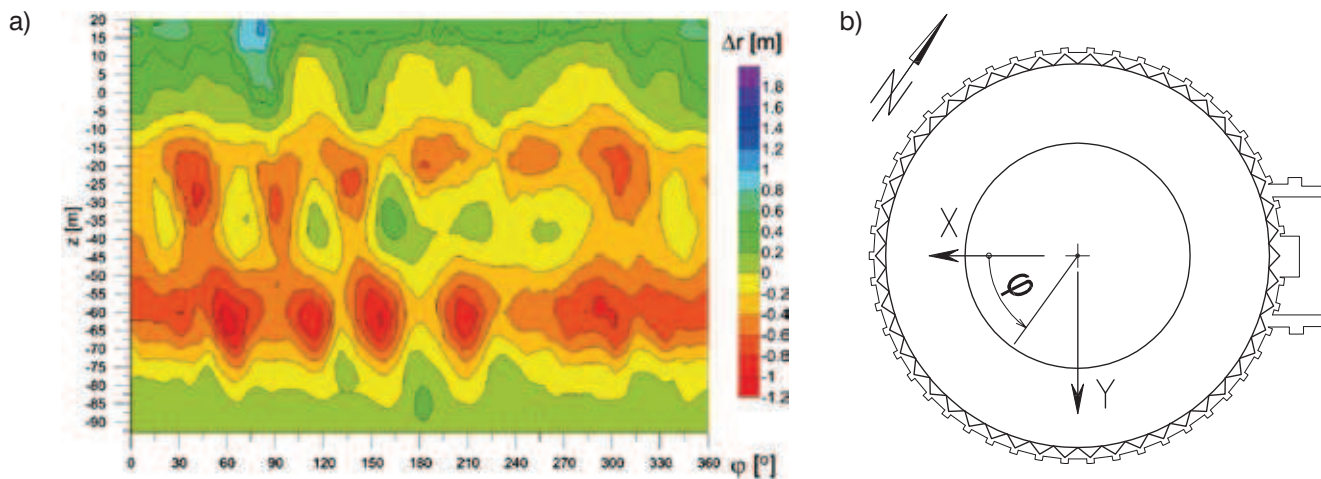
Płaszcz przedmiotowej chłodni wykonano jako powłokę żelbetową

o kształcie hiperboloidalnym wspartą za pośrednictwem ukośnych słupów podbudowy na ławowym fundamencie pierścieniowym. Wysokość okien wlotowych wynosi 7,00 m, a całkowita wysokość komina – mierząc od poziomu terenu – jest równa 120,0 m. Grubość płaszcza zmienia się wzdłuż wysokości od 60 cm do 14 cm. Szkic przedstawiający podstawowe wymiary chłodni oraz jej aktualny widok pokazano na rysunku 1.

Na początku lat 90. ubiegłego wieku, po około 15 latach użytkowania, wykonano pierwszy remont żelbetowego płaszcza chłodni kominowej. W wyniku oddziaływania agresywnego chemicznie środowiska, jak również niewystarczającej otuliny zbrojenia, naprawy wymagała zewnętrzna powierzchnia powłoki.



Rys. 1.
a) geometria chłodni wg dokumentacji projektowej [4], b) widok chłodni



Rys. 2. Imperfekcje powłoki otrzymane na podstawie pomiarów geodezyjnych z roku 2011

W trakcie remontu na zewnętrzną powierzchnię płaszcz chłodni nałożono warstwę torkretu niezbrojonego o grubości 2–3 cm. Drugi remont przeprowadzono w 2001 roku, po odkryciu lokalnych pionowych pęknięć płaszcz chłodni. Wykonano wówczas miejscowe wzmocnienia w kierunku równoleżnikowym polegające na „zszyciu” rys taśmami CFRP. Dodatkowo powierzchnię wewnętrzną i zewnętrzną zabezpieczono powłokami ochronnymi.

Geometria płaszcz chłodni odbiega w sposób istotny od przyjętych założeń projektowych [4], imperfekcje geometryczne płaszcz można było zaobserwować „gołym okiem”. Ocenę odchyłek od projektowej geometrii przeprowadzono na podstawie aktualnych pomiarów geodezyjnych metodą skanowania powierzchni chłodni tachimetrem laserowym, wykonanych przez specjalistyczną firmę geodezyjną. W pomierzonych punktach wyliczono odchyłki od idealnej, przewidzianej w dokumentacji projektowej [4] geometrii (Δr), jako różnicę zmierzonego (rzeczywistego) promienia powłoki i promienia teoretycznego (projektowanego). Wyniki przedstawiono na rysunku 2a w odniesieniu do układu współrzędnych pokazanego na rysunku 2b.

Analizując mapę imperfekcji geometrycznych (rys. 2a) można wyróżnić poziome pasma (w przybliżeniu pomiędzy poziomami -75 m i -45 m

oraz pomiędzy poziomami -25 m i -10 m), w których przeważają wartości ujemne imperfekcji, co interpretowane jest jako wklęsnięcia. W pasmach o przebiegu równoleżnikowym zlokalizowanych pomiędzy obszarami „zapadniętymi”, wyróżniają się obszary ze znacznymi imperfekcjami dodatnimi lub obszary z niewielkimi imperfekcjami ujemnymi widoczne na rysunku 2a jako obszary wybrzuszone w stosunku do idealnej hiperboloidy obrotowej. Lokalnie, przy współrzędnych kątowych około 70° , 130° , 170° , 230° , 345° widoczne są obszary z niewielkimi imperfekcjami, jakby żebra, o przebiegu zbliżonym do południkowego. Maksymalne wartości odchyłek od idealnej geometrii płaszcz osiągały około $-1,20$ m i $+0,90$ m.

3. Stan techniczny płaszcz

W celu określenia bieżącego stanu technicznego żelbetowego płaszcz chłodni kominowej, przeprowadzono przegląd powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej płaszcz wraz z pobraniem próbek do badań laboratoryjnych w postaci odwiertów rdzeniowych. Badania laboratoryjne miały na celu oznaczenie wytrzymałości betonu na ściskanie, modułu sprężystości betonu, przyczepności warstwy torkretu i napraw do podłoża, granicy plastyczności stali zbrojeniowej oraz określenie stopnia skolorowania betonu.

Na płaszczu żelbetowym chłodni widoczne były uszkodzenia o charakterze lokalnym. Od strony wewnętrznej stwierdzono złuszczenia powłoki ochronnej oraz rysy pionowe i ukośne. Zlokalizowano również 3 grupy (obszary po około 120 m²) wzmocnień z taśm węglowych umieszczonych na wysokości od 20. do 56. cyklu betonowania (rys. 3a). Nie odnotowano odspojień taśm wzmocnienia CFRP od podłoża betonowego. Od strony zewnętrznej stwierdzono miejscowe odspojenia warstwy torkretu, rysy na torkrecie i naprawach (rys. 3b), pęknięcia i odspojenia betonu występujące na górnej krawędzi u wylotu chłodni (rys. 4). Zarysowania torkretu i napraw miały głównie charakter skurczowy, nie stwierdzono zarysowań świadczących o przeciążeniu konstrukcji chłodni.

Stan zewnętrznych i wewnętrznych powłok ochronnych uznano jako dobry. Jedynie w rejonie korony chłodni zewnętrzne powłoki zabezpieczające uległy znacznej destrukcji. W pobranych odwiertach przechodzących przez zbrojenie nie stwierdzono jego korozji.

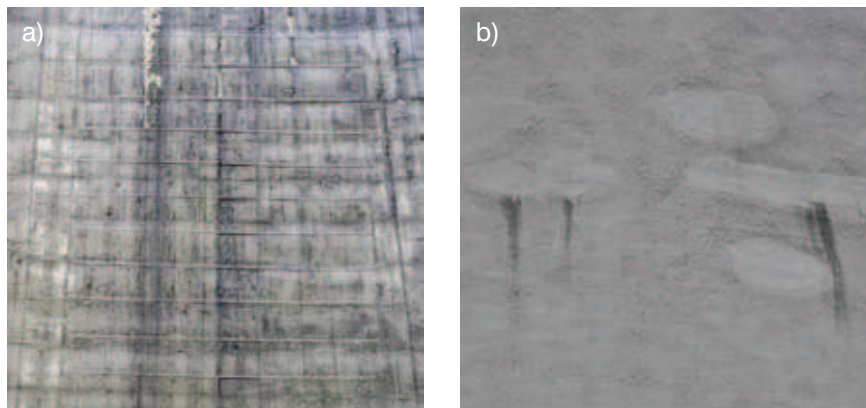
teryzował się odczynem pH powyżej 11,2, zawartością jonów siarczanowych SO_4^{2-} nie większą niż 2,5% i zawartością jonów chlorkowych Cl – nie przekraczającą 0,1%. Wyniki analiz chemicznych pozwoliły stwierdzić, że beton zachowuje właściwości ochrony antykorozyjnej dla stali zbrojeniowej oraz nie występuje zagrożenie korozją siarczanową betonu.

Podstawowe zbrojenie powłoki stanowiły siatki zbrojeniowe z prętów ze stali St0 układane przy obu powierzchniach. Przeprowadzono badania kontrolne próbek stali pobranych z konstrukcji, określając granicę plastyczności wbudowanego zbrojenia. W statycznej próbie rozciągania uzyskano wartości granicy plastyczności nie mniejsze niż 326 MPa, a więc większe od zaleconych w oryginalnej dokumentacji. Otrzymane wartości charakteryzowały się znaczną niejednorodnością.

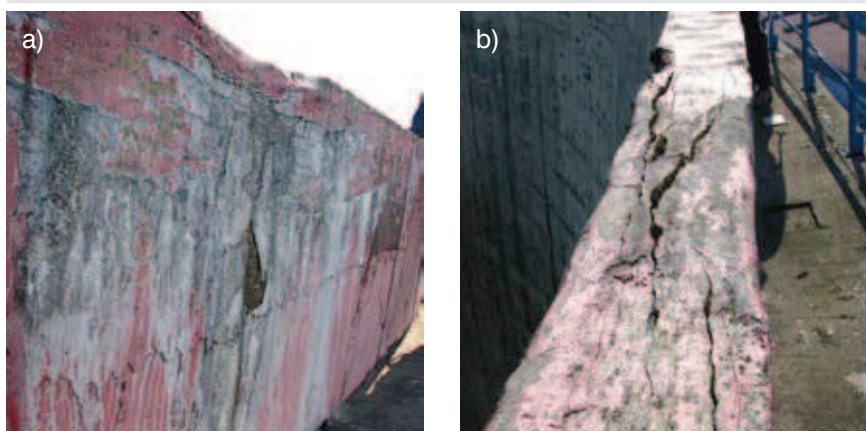
Dodatkowo przeprowadzono badania przyczepności betonu narzutowego, napraw i wzmocnień do podłoża betonowego w próbie jednoosiowego rozciągania. We wszystkich oznaczeniach przyczepności nastąpiło zniszczenie kohezyjne wewnątrz materiału podłoża. Średnia przyczepność wyniosła 2,6 MPa (wartość minimalna 2,0 MPa). Na podstawie przeprowadzonych badań przyjęto, że beton narzutowy znajdujący się na zewnętrznej powierzchni płaszcza chłodni współpracuje z podłożem. Stwierdzono również dobre przyleganie lokalnych napraw torkretu. Wyniki uzyskane z badań przyczepności taśm CFRP do podłoża pozwoliły na uwzględnienie tego wzmocnienia w późniejszych analizach obliczeniowych oraz w ocenie bezpieczeństwa konstrukcji.

4. Ocena bezpieczeństwa użytkowania obiektu

W celu określenia poziomu bezpieczeństwa użytkowania chłodni kominowej, przeprowadzono analizę statyczno-wytrzymałościową konstrukcji płaszcza chłodni o geometrii zgodnej z wynikami aktualnych



Rys. 3. a) lokalne wzmocnienia powierzchni wewnętrznej; b) zarysowania na brzegach napraw torkretu – część z wyciekami na powierzchni zewnętrznej

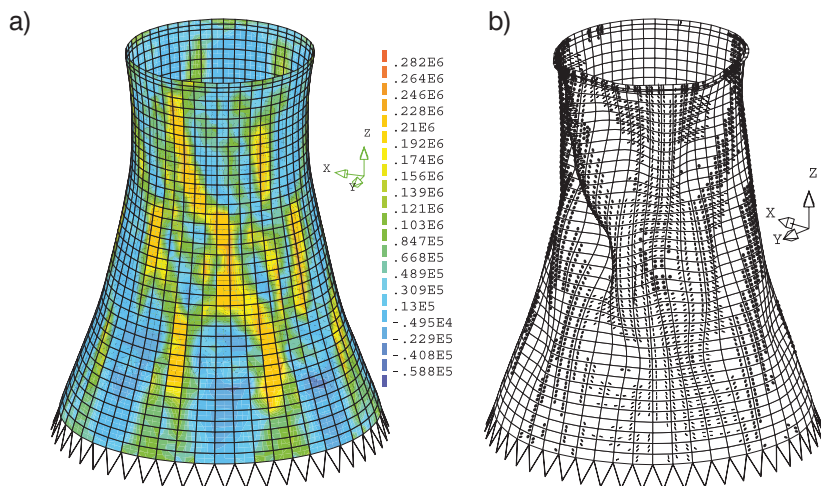


Rys. 4. Pęknięcia i zacieki w powłoce żelbetowej ponad pierścieniem: a) widoczne mokre zacieki węglanu wapnia; b) pęknięcia zlokalizowane w miejscu wcześniejszych napraw na krawędzi

pomiarów geodezyjnych. Obliczenia zostały wykonane w dwóch stadiach: zakładając izotropową i sprężystą pracę powłoki – Stadium I oraz uwzględniając efekty utraty sztywności powłoki wskutek zarysowania, sprężysto-plastycznego zachowania stali zbrojeniowej, jak również wpływu efektów drugiego rzędu – Stadium II. Zarówno w Stadium I jak i w Stadium II analizy, konstrukcja komin wywiewnego chłodni została poddana oddziaływaniu następujących obciążeń: ciężar własny, ciężar torkretu, parcie/ssanie wiatru na powierzchni zewnętrznej i ssanie na powierzchni wewnętrznej oraz oddziaływanie temperatury. Ze względu na istotne odchyłki geometrii płaszcza od idealnej hiperboloidy, rozważono 10 kierunków oddziaływania wiatru (co 36°).

Na podstawie wyników obliczeń Stadium I przeprowadzono analizę nośności i poziomu wyężenia po-

szczególnych przekrojów południowych i równoleżnikowych powłoki w oparciu o normę [6]. Obliczenia wykazały, że w przypadku płaszcza chłodni, lokalnie występują niedobory nośności. Przekroje, w których nośność jest niewystarczająca skupiają się głównie w miejscach, gdzie geometria płaszcza najbardziej odbiega od geometrii projektowanej. Stopień wyężenia płaszcza w dużej mierze zależy od przyjętego kierunku oddziaływania wiatru na konstrukcję. Na tym etapie nie udało się wykazać, że analizowany obiekt może być bezpiecznie użytkowany w myśl przepisów normowych [6], [7], głównie w wyniku niedoboru nośności zbrojenia równoleżnikowego. Nie prowadzono analiz stateczności powłoki, gdyż znaczne, odbiegające od dopuszczalnych, imperfekcje płaszcza wykluczały zastosowanie uproszczonych zależności [8], [9]. Obliczenia Stadium I pozwoliły



Rys. 5. Przykładowe wyniki obliczeń stadium II: a) mapa naprężeń w zbrojeniu zewnętrznym równoleżnikowym [kN/m²]; b) obraz deformacji i zarysowania powłoki w chwili zniszczenia

na wytypowanie najbardziej niekorzystnych kombinacji obciążeń.

W celu wykazania możliwości dalszego bezpiecznego użytkowania chłodni, przeprowadzono dodatkowe analizy (Stadium II), w których uwzględniono rzeczywiste zachowanie materiału powłoki – zarysowania betonu oraz sprężysto-plastyczny model fizyczny stali zbrojeniowej [10]. Na tym etapie analizowano globalną nośność chłodni rezygnując z zasady zeszywnienia. Taka analiza pozwala uwzględnić zdolność żelbetowych konstrukcji powłokowych do redystrybucji sił wewnętrznych (w tym przypadku pomiędzy kierunkiem równoleżnikowym i południkowym), jak również w sposób realistyczny ocenić efekty oddziaływania temperatury na powłokę o zredukowanej sztywności [11], [12]. Obliczenia te dostarczyły szeregu informacji na temat rzeczywistej pracy konstrukcji płaszcza chłodni (np. rys. 5). Wykazano, że konstrukcja płaszcza chłodni kominowej pracuje na wymaganym przez przepisy [6], [7] poziomie bezpieczeństwa, nie znajduje się więc w stanie przedawaryjnym. Pomimo znacznych imperfekcji geometrycznych oraz występujących lokalnie zarysowań widocznych na wewnętrznej powierzchni, stan techniczny płaszcza żelbetowego uznano za zadowalający. Zalecono

wykonanie bieżących napraw oraz odtworzenie lokalnie uszkodzonych powłok ochronnych. Należy zauważyć, że wskutek imperfekcji i związanego z tym zwiększonego wyężenia, powłoka chłodni jest wrażliwa na powstawanie nowych uszkodzeń. Wynika z tego konieczność stałego monitoringu jej stanu technicznego.

W oparciu o obecnie obowiązujące normy i zalecenia: Eurokod 0 [7], Eurokod 1–1-4 [13], Eurokod 2 [6], wymagania techniczne VGB 2005 [9] stwierdzono, że konstrukcja może być użytkowana przez dalszy, przewidywany okres eksploatacji. Obliczeniowo wykazano, że dzięki przezbrojeniu powłoki na kierunku południkowym oraz dużej zdolności do redystrybucji sił wewnętrznych chłodnia jest w stanie przenieść obciążenia z wymaganym w zaleceniach technicznych VGB 2005 [9] i normie Eurokod 0 [7] poziomem bezpieczeństwa.

Większość użytkowanych obecnie w Polsce chłodni kominowych projektowana była w latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych ubiegłego stulecia w oparciu o ówczesnie obowiązujące normy i zalecenia. W przypadku konieczności wykazania, że obiekty te charakteryzują się poziomem bezpieczeństwa zgodnym z przepisami współczesnymi [6], [7], analiza metodami tradycyj-

nymi (z zastosowaniem sprężystych modeli materiałowych bez rezygnacji z zasady zeszywnienia) jest niewystarczająca oraz może prowadzić do mylnych wniosków. Szczególnie istotne jest to w sytuacji, gdy płaszc chłodni posiada znaczne imperfekcje decydujące o większym niż zakładano pierwotnie wyężeniu powłoki. Wszelkie analizy powinny być poprzedzone rozpoznaniem rzeczywistych cech mechaniczno-wytrzymałościowych zastosowanych materiałów.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Broniewski T., Jamróży Z., Płachecki M., Uszkodzenia korozyjne i naprawa żelbetowych hiperboloidalnych chłodni kominowych, Inżynieria i Budownictwo, vol. 10, s. 358–363, 1988
- [2] Broniewski T., Płachecki M., Ziobroń W., Kryteria trwałości żelbetowych chłodni kominowych, Inżynieria i Budownictwo, vol. 1, s. 3–7, 1991
- [3] Chmielewski T., Golczyk M., On the structural reliability of natural draught cooling towers, Archives of Civil Engineering, vol. XLV, no. 2, s. 181–191, 1999
- [4] Ryszewski C., Projekt techniczny chłodni hiperboloidalnej o obciążeniu hydraulicznym 61000 m³/h (...) Przedsiębiorstwo Budowy Chłodni CHŁODNIE KOMINOWE Pracownia Projektowa, Gliwice, 1975
- [5] PN-EN 12504-1:2009 Badania betonu w konstrukcjach – Część 1: Odwierty rdzeniowe – wycinanie, ocena i badanie wytrzymałości na ściskanie, 2009
- [6] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2- Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1–1: Reguły ogólne i reguły dla budynków, 2008
- [7] PN-EN 1990:2004/A1:2008 Eurokod – Podstawy projektowania konstrukcji, 2004
- [8] Recommendations For The Design Of Hyperbolic Or Other Similarly Shaped Cooling Towers. IASS Working Group No 3, Brussels 1977
- [9] Structural Design of Cooling Towers. Technical Guideline for the Structural Design, Computation and Execution of Cooling Towers. VGB-R 610Ue. VGB Power Tech e.V, 2005
- [10] DIANA – Finite Element Analysis. User's Manual
- [11] Waszczyński Z., Pabisek E., Pamin J., Radwańska M., Nonlinear analysis of a RC cooling tower with geometrical imperfections and a technological cut-out, Engineering Structures, vol. 22, s. 480–489, 2000
- [12] Kasprzak T., Konderla P., Myślecki K., Fizycznie nieliniowa analiza żelbetowej powłoki chłodni kominowej, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, vol. 58, s. 135–139, 2010
- [13] PN-EN 1991-1-4:2008 Eurokod 1 – Oddziaływania na konstrukcje. Część 1–4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru, 2008