

Program utrzymania z uwzględnieniem trwałości hiperboidalnych chłodni kominowych po 30 latach eksploatacji

Prof. nadzw. dr hab. inż. Marek Lechman, mgr inż. Wojciech Chruściel,
mgr inż. Aleksander Lamenta, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa

1. Badania i ocena konstrukcji chłodni

1.1. Opis konstrukcji i warunków eksploatacji chłodni

Obie rozpatrywane chłodnie kominowe, o tym samym kształcie geometrycznym, zostały wybudowane w latach 1977–1982 w technologii monolitycznej. Cienkościenne powłoka każdej chłodni o zmiennej grubości była betonowana w deskowaniach przestawnych o wysokości 1 m. Słupowa podbudowa powłoki chłodni osadzona jest w fundamencie żelbetowym. Wysokość chłodni od powierzchni terenu wynosi 132,0 m, wysokość samej powłoki: 124,0 m. Średni-

ca powierzchni środkowej powłoki na poziomie oparcia na głowicach słupów (+ 8,00 m) wynosi 100,00 m, zaś w poziomie korony (+ 132,0 m) – 57,88 m. W latach 1992–1994 wykonano prace remontowe chłodni. Żelbetowy płaszcz każdej chłodni zabezpieczono od strony wewnętrznej powłoką poliuretanową o nazwie Poliurekol-32, a od strony zewnętrznej powłoką ochronną Sikagard Betoncolor. Każda z omawianych chłodni obsługuje układ kondensacyjny dla dwóch bloków energetycznych o mocy 2 x 370 MW. Podstawowe parametry eksploatacyjne chłodni określają: obciążenie hydrauliczne znamionowe 2 x 40 000 = 80 000 m³/h, strefa chłodzenia przy

znamionowym obciążeniu: około 12,0°C oraz temperatura wody ochłodzonej: 24,5°C. Powłoka chłodni jest poddana od strony zewnętrznej oddziaływaniu atmosfery gazowej środowiska przemysłowego, środowiska ciekłego (opady atmosferyczne nasycone agresywnymi substancjami), przemianom mrozu i odwilży, a także mgły powstającej w wyniku kondensacji pary wodnej wyrzucanej przez komin chłodni i zstępującej w dół w wyniku inwersji. Od strony powierzchni wewnętrznej czynnikami oddziałującymi na chłodnię są: silny strumień dyfuzyjny pary wodnej, agresywne oddziaływanie cieczy chłodzącej oraz wymywanie przez kondensat składników betonu.



Fot. 1. Fragment powierzchni zewnętrznej (A)



Fot. 2. Słupy podbudowy chłodni A

1.2. Zakres badań konstrukcji chłodni

Diagnostyka chłodni kominowych była tematem wielu opracowań, np. [1, 2]. Zakres badań diagnostycznych konstrukcji rozpatrywanych chłodni obejmował:

- oględziny płaszcza zewnętrznego i wewnętrznego chłodni wraz ze sporządzeniem szczegółowych map uszkodzeń,
- badania nieniszczące wytrzymałości betonu płaszczy chłodni i słupów podbudowy,
- oznaczenie stopnia karbonatyzacji betonu powłoki chłodni in situ,
- badania „pull-off” płaszcza wewnętrznego i zewnętrznego in situ,
- wykonanie badań laboratoryjnych: wytrzymałości betonu na ściskanie,

Tabela 1. Zestawienie wyników badań powłoki i słupów chłodni A

Badanie	Wyniki	Wymagania
Oględziny i inwentaryzacja uszkodzeń powłoki oraz słupów podbudowy chłodni	Odpryski, ubytki i złuszczenia betonu płaszczka od strony zewnętrznej; lokalnie odsłonięte pręty zbrojenia poziomego; siatka zarysowań; ślady wycieków; zbyt mała gr. otuliny zbrojenia; uszkodzenia powłoki ochronnej Poliurekol-32 od strony wewnętrznej oraz zawilgocenie betonu w strefie 65–122 m; zużycie powłoki ochronnej słupów.	Brak uszkodzeń
Badanie wytrzymałości betonu powłoki i słupów chłodni	Badanie odwiertów (płaszcz) – B25 (C20/25), metodą sklerometryczną – B20(C16/20); dla słupów: B25 (C20/25)	B25 (C20/25)
Oznaczenie nasiąkliwości betonu	3,36–5,14%	≤ 5%
Odczyn wyciągu wodnego z betonu	11,6–12,6 jedn. pH	≥ 11,7 jedn. pH
Zawartość jonów chlorkowych	Powłoka: 0,03–0,04%	< 0,4%
Zawartość jonów siarczanowych	Powłoka: 1,89–2,98%; stupa: 2,96%;	< 3%
Badania elektrochemiczne	Stan pasywny stali zbrojeniowej	Stan pasywny
Określenie głębokości karbonatacji	poz. 131,5–10,0 m: 0–10–10–15 mm	Brak wymagań
Badanie pull-off powłoki żelbetowej	Powierzchnia wewnętrzna, poziom 90–100 m: 0,2–0,4 MPa	≥1,0 MPa

właściwości fizykochemicznych betonowej otuliny zbrojenia – nasiąkliwości, odczynu pH, zawartości jonów siarczanowych i chlorkowych (15 próbek płaszczka, 2 – słupów),

- pomiary kontrolne geometrii żelbetowego płaszczka chłodni metodami geodezyjnymi.

1.3. Ocena wyników badań

Badania chłodni A przeprowadzono w 2010 r. (fot. 1, 2). Syntetyczne zestawienie ich wyników przedstawiono w tabeli 1. Po około 30 latach eksploatacji beton powłoki chłodni ma, poza miejscami lokalnych ubytków i złuszczeń, dostateczne właściwości ochronne w stosunku do zbrojenia, zaś stan stali w otulinie betonowej ocenia się jako pasywny. Na podstawie analizy wyników pomiarów geodezyjnych można stwierdzić, iż rzędne powłoki chłodni wykazują odchyłki w kierunku radialnym w stosunku do kształtu projektowanego od kilku mm do ponad 18 cm. Odchyłki te mają głównie charakter imperfekcji geometrycznych, przy pewnym udziale przemieszczeń powłoki chłodni wywołanych działaniem wiatru i insolacją. Aktualnie nie stanowią one zagrożenia bezpieczeństwa konstrukcji chłodni. Z pomiarów geodezyjnych, dokonanych w latach 2001–2009, wynika, iż przyrosty osiadań są równomierne i nie przekraczają 1 mm, co świadczy o zakończeniu procesu osiadania chłodni.

Badania chłodni B wykonano w 2011 roku (fot. 3, 4). Podsumowanie ich rezultatów zawarto w tabeli 2. Wyniki przeprowadzonych badań chemicznych próbek pobranych z powłoki chłodni B wskazują na zubożenie betonu (10,5–11,5 jedn. pH) oraz na podwyższone zawartości jonów siarczanowych, świadczące o zachodzącym procesie korozji betonu. Beton nie stanowi dostatecznej ochrony stali zbrojeniowej, co sprawia, że wzrosło zagrożenie korozyjne stali zbrojeniowej płaszczka chłodni. Przekroczone wartości dopuszczalne zawartości jonów siarczanowych (powyżej 3% w całym płaszczku, a strefie korony powyżej 7–8%) świadczą o zagrożeniu korozją siarczanową betonu płaszczka. W przypadku chłodni B rzędne kształtu powłoki wykazują odchyłki w kierunku radialnym w stosunku do kształtu projektowanego od kilku mm do 13 cm, co nie stwarza w aktualnym stanie zagrożenia bezpieczeństwa konstrukcji chłodni. Z analizy pomiarów geodezyjnych wynika, iż przyrosty osiadań chłodni są równomierne i nie przekraczają 1 mm, co świadczy o tym, że proces osiadania chłodni praktycznie się zakończył.

1.4. Ocena bezpieczeństwa konstrukcji

Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe konstrukcji obu analizowanych chłodni wykonano za pomocą

programu Autodesk Robot Structural Analysis 2010, zgodnie z normami PN-B-03264: 2002, PN-EN 1991-1-1: 2004, PN-77/B-02011, PN-EN 1991-1-5, Eurokod 1. Przyjęto model numeryczny chłodni według zasad MES. W obliczeniach uwzględniono kombinacje wszystkich podstawowych obciążeń oddziałujących na konstrukcję chłodni: ciężaru własnego, obciążenia wiatrem oraz obciążenia temperaturą. Dane materiałowe dla betonu i stali zbrojeniowej przyjęto zgodnie z projektem i dokonanymi w ekspertyzie ocenami (klasa betonu płaszczka B20, słupów – B25). Obciążenie wiatrem zestawiono według ówczesnie obowiązującej normy PN-77/B-02011, z uwzględnieniem współczynnika interferencji aerodynamicznej 1,15 i współczynnika obciążenia 1,3 ($1,15 \times 1,3 \approx 1,5$). Z charakteru wykresów sił wewnętrznych wynika, że dominującym schematem pracy przekrojów powłoki żelbetowej chłodni jest ściskanie. Silne rozciąganie występuje teoretycznie jedynie lokalnie przy swobodnej krawędzi powłoki na skutek różnicy temperatur. Obciążenia tego nie uwzględniono przy wymiarowaniu zbrojenia obwodowego płaszczka chłodni, wskutek czego rozpatrywana strefa korony uległa zarysowaniu, a tym samym utraciła „zdolność” do przenoszenia sił równoleżnikowych. Ostatnia naprawa korony chłodni A miała miejsce w roku 2010. Przeprowadzo-



Fot. 3. Fragment powierzchni zewnętrznej (B)



Fot. 4. Fragment powierzchni wewnętrznej (B)

Tabela 2. Zestawienie wyników badań powłoki i słupów chłodni B

Badanie	Wyniki	Wymagania
Oględziny i inwentaryzacja uszkodzeń powłoki oraz słupów podbudowy chłodni	Odpryski, ubytki i złuszczenia betonu płaszczu od strony zewnętrznej; lokalnie odsłonięte pręty zbrojenia poziomego; siatka zarysowań; ślady wycieków; zbyt mała grubość otuliny zbrojenia; zniszczenie powłoki ochronnej Poliurekol-32 od strony wewnętrznej w górnej części płaszczu; zużycie powłoki ochronnej części słupów; zarysowania.	Brak uszkodzeń
Badanie wytrzymałości betonu powłoki i słupów chłodni	Badanie odwiertów (płaszcz) – B25 (C20/25), metodą sklerometryczną – B20(C16/20); dla słupów: B25 (C20/25)	B25 (C20/25)
Oznaczenie nasiąkliwości betonu	5,21–8,50%	≤ 5%
Odczyn wyciągu wodnego z betonu	10,5–12,2 jedn. pH	≥ 11,7 jedn. pH
Zawartość jonów chlorkowych	0,04–0,05 %	< 0,4%
Zawartość jonów siarczanowych	Powłoka: 3,26–8,04%; słup: 6,65%	< 3%
Badania elektrochemiczne	Stan pasywny stali zbrojeniowej	Stan pasywny
Określenie głębokości karbonatyzacji	poz. 131,5–10,0 m: 0–10–20–25 mm	Brak wymagań
Badanie pull-off powłoki żelbetowej	Powierzchnia zewnętrzna.: 1,32–2,80 MPa; Powierzchnia wewnętrzna :0,1–2,04 MPa	≥1,0 MPa

ne w latach 2010 i 2011 oględziny w ramach opisanych wyżej badań nie potwierdziły występowania rys pionowych w strefie korony żadnej chłodni. Przeprowadzone obliczenia oraz wykonane badania chemiczne i elektrochemiczne wykazały, że w aktualnym stanie nie występuje bezpośrednie zagrożenie bezpieczeństwa konstrukcji i użytkowania obu rozpatrywanych chłodni. Przemieszczenia powłoki chłodni wywołane obciążeniami spełniają warunki stanu granicznego użyteczności. Zbrojenie powłoki żelbetowej zostało zwymiarowane z zapasem od jednego do kilkudziesięciu pro-

cent w stosunku do wymaganego (poza wskazanym wyżej miejscem). W przypadku słupów zapas ten wynosi 40–50%.

3. Program utrzymania chłodni z uwzględnieniem trwałości

Na podstawie uzyskanych wyników badań obie analizowane chłodnie zakwalifikowano do remontu, ze względu na dużą liczbę uszkodzeń żelbetowych płaszczu oraz znaczny stopień zużycia ich powłok ochronnych, zwłaszcza w odniesieniu do chłodni B. Nie stwierdzono konieczności wzmocnienia konstruk-

cyjnego elementów nośnych chłodni. Biorąc pod uwagę potrzebę zapewnienia bezpiecznej eksploatacji obu chłodni przez okres kolejnych 20 lat założono, że rozwiązanie materiałowo-technologiczne zastosowane do napraw i ochrony powinno cechować się trwałością i niezawodnością ze względu na oddziaływania środowiskowe i użytkowe, jakim poddana jest chłodnia [1]. Spełnienie tych wymagań zależy przede wszystkim od odpowiednio dobranych materiałów jako prawidłowo funkcjonujących elementów układu, który powstaje w wyniku przeprowadzenia naprawy i ochrony.

Do wykonania napraw zalecono zastosowanie mieszanek kompatybilnych z właściwościami naprawianego podłoża betonowego (niski moduł sprężystości), spełniających wymagania aktualnych norm [3]. W przypadku braku zagrożenia korozją siarczanową, do wypełniania ubytków betonu płaszcz chłodni zalecono zastosowanie:

- betonu lub betonu natryskowego klasy min. C25/30 wg PN-EN 206-1,
- zaprawy cementowej modyfikowanej polimerami PCC lub zaprawy natryskowej SPCC klasy min. R3 według normy PN-EN 1504-3 i według [1].

W przypadku zagrożenia korozją siarczanową (np. korona chłodni B) zaproponowano:

- beton HS na bazie cementu o wysokiej odporności na siarczany bądź beton natryskowy HS klasy min. C35/45 według PN-EN 206-1,
- siarczanoodporną zaprawę cementową modyfikowaną polimerami PCC HS lub natryskową zaprawę SPCC HS.

Do antykorozyjnego zabezpieczenia zbrojenia dopuszczono zarówno powłoki mineralne, jak i na bazie żywic epoksydowych, zgodnie z PN-EN 1504-7. Dla zapraw PCC (HS) przewidziano warstwę szepną w postaci przygotowanej fabrycznie mieszanki zgodnie z PN-EN 1504-3. Pierwszym etapem napraw jest przygotowanie podłoża, obejmujące takie rutynowe czynności, jak: odkucia, rozkucia, groszkowanie, czyszczenie betonu i zbrojenia metodą hydrodynamiczną (hydromonitoring) lub przez hydropiaskowanie itp. Wytrzymałość na odrywanie prawidłowo przygotowanego podłoża (oznaczona metodą pull-off) powinna być nie mniejsza niż 1,0 MPa w każdym kontrolowanym miejscu. W przypadku powierzchni wewnętrznej rozpatrywanych chłodni, warunek ten nie był spełniony, w związku z czym wystąpiła konieczność usunięcia osłabionej warstwy powierzchniowej betonu grubości 1–8 mm aż do „nośnego” podłoża. Przed nałożeniem powłok ochron-

nych wymagane jest szpachlowanie (egalizacja) powierzchni przy użyciu drobnoziarnistej zaprawy typu PCC (płaszcz zewnętrzny) lub ECC (płaszcz wewnętrzny). Jako podstawowe kryterium doboru powłok ochronnych płaszczy chłodni przyjęto trwałość użytkową. Kierując się tym wymaganiem, zalecono wykonanie na zewnętrznej powierzchni płaszcza chłodni powłoki akrylowej (gruntowanie (hydrofobizacja) + 2 warstwy powłoki ochronnej), zaś na wewnętrznej powierzchni – powłoki z materiału chemoodporne go tiksotropowego na bazie żywicy epoksydowej (gruntowanie + 2 warstwy powłoki ochronnej). Utrzymanie chłodni w zadowalającym stanie technicznym wymaga przeprowadzania przeglądów technicznych ich konstrukcji nie rzadziej niż co 5 lat, z uwzględnieniem oceny stanu powłok ochronnych zabezpieczających wewnętrzne i zewnętrzne powierzchnie chłodni, a także wykonywania bieżących napraw i konserwacji elementów nośnych, prowadzenia pomiarów geodezyjnych osiadań itp. Istotnym czynnikiem mającym wpływ na trwałość i bezpieczeństwo użytkowania chłodni ma sposób ich eksploatacji, zwłaszcza w okresie zimy (niezaniżanie mocy cieplnej, unikanie nagłych wyłączeń itp.). Zaniżanie mocy cieplnej może doprowadzić do przemarznięcia płaszcza żelbetowego chłodni i obmarzania urządzeń wewnętrznych, skutkiem czego może być konieczność odstawienia obiektu na dłuższy czas celem wykonania kosztownych napraw. Dla zapewnienia bezpieczeństwa użytkowania chłodni przy współpracy tylko z jednym blokiem energetycznym, zalecane jest instalowanie systemów monitoringu temperatur w strefie przypłaszczonej oraz właściwa obsługa chłodni.

4. Podsumowanie

Chłodnie kominowe są obiektami budowlanymi o szczególnym znaczeniu dla funkcjonowania zakładów przemysłowych i elektrowni,

dlatego też ich właściwe utrzymanie pozostaje sprawą priorytetową. Ma temu służyć m.in. nakreślony w artykule przykładowy program utrzymania eksploatowanych chłodni z uwzględnieniem trwałości. Remont chłodni jest zadaniem trudnym, kosztownym i technicznie odpowiedzialnym, w związku z czym powinien być powierzony wykonawcy wyspecjalizowanemu w tego rodzaju pracach, gwarantującemu wysokiej poziom wykonawstwa. Spełnienie tych wymagań zależy w dużej mierze od ścisłej współpracy z dostawcą materiałów i technologii, a także od stałego nadzoru technicznego. Z drugiej strony, zaniebdania związane z odwlekaniami wymaganych remontów w tym zakresie mogą prowadzić do obniżenia poziomu bezpieczeństwa konstrukcji chłodni.

BIBLIOGRAFIA I WYKORZYSTANE MATERIAŁY

- [1] Richtlinie. Maßnahmen an Kühltürmen und Schornsteinen aus Stahlbeton zum Schutz gegen Betriebs- und Umgebungseinwirkungen, VGB PowerTech, VGB-R 612 Dritte Asugabe 2010
- [2] M. Kamiński, Wybrane problemy diagnostyki i oceny stanu technicznego chłodni kominowych, Przegląd Budowlany 5/2010, s. 51–54
- [3] PN-EN 1504 Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności: Część 2: Systemy ochrony powierzchniowej betonu, Część 3: Naprawy konstrukcyjne i niekonstrukcyjne, Część 7: Ochrona zbrojenia przed korozją
- [4] PN-B-03264: 2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie
- [5] PN-EN 1992-1-1: 2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [6] PN-EN 1991-1-1: 2008, Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje Część 1-1: Oddziaływania ogólne – Ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach.
- [7] PN-EN 1991-1-5 Eurokod 1 – Oddziaływania na konstrukcje – Część 1-5: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania termiczne
- [8] PN-77/B-02011 Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie wiatrem
- [9] PN-EN 206-1: 2004, Beton – Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność