XXVI Konferencja Naukowo-Techniczna awarie budowlane 2013

SZYMON SERĘGA, *sserega@pk.edu.pl*
ŁUKASZ HOJDYS, *lhojdys@pk.edu.pl*
PIOTR KRAJEWSKI, *pkrajews@pk.edu.pl*
MARIAN PŁACHECKI, *mplachec@imikb.wil.pk.edu.pl*
Politechnika Krakowska

OCENA BEZPIECZEŃSTWA CHŁODNI KOMINOWEJ Z DUŻYMI IMPERFEKCJAMI

SAFETY ASSESSMENT OF COOLING TOWER WITH LARGE IMPERFECTIONS

Streszczenie W artykule przedstawiono ocenę bezpieczeństwa powłoki hiperboloidalnej chłodni kominowej. Przedmiotowy obiekt jest eksploatowany od połowy lat 70. XX wieku. Żelbetowy płaszcz chłodni charakteryzuje się znacznymi imperfekcjami geometrycznymi (lokalnie do 1.2 m). W pracy omówiono stan techniczny płaszcza chłodni kominowej oraz przedstawiono ocenę bezpieczeństwa obiektu w oparciu o wyniki analizy obliczeniowej uwzględniającej wymagania aktualnych norm i wytycznych.

Abstract The paper presents the safety assessment of hyperboloidal cooling tower shell. The object in question has been used since the middle seventies of XX century. Reinforced concrete shell of cooling tower is characterized by large geometrical imperfections (locally up to 1.2 m). In the paper there are described the technical condition of cooling tower shell as well as safety level assessment on the basis of numerical analysis taking into account the requirements of new building codes and recommendations.

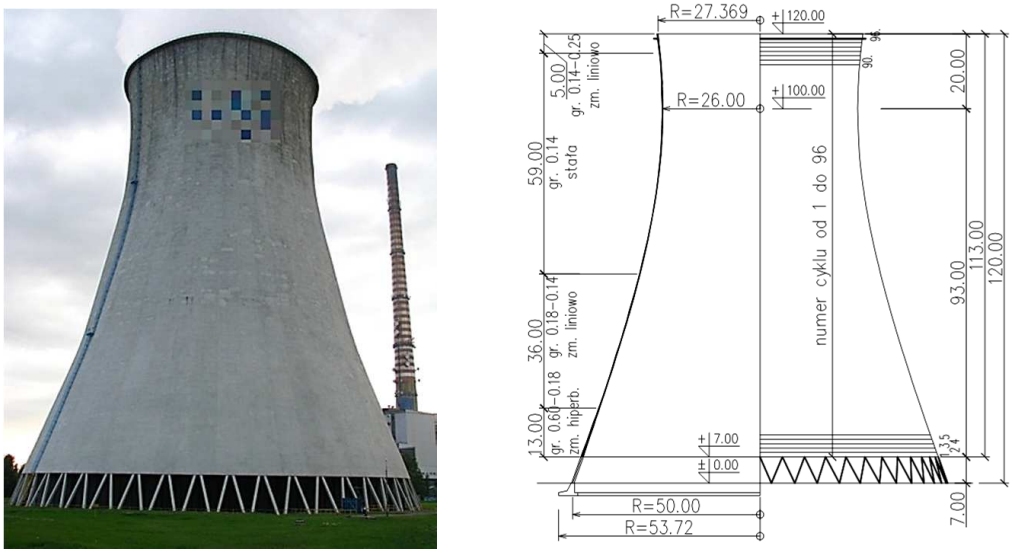
1. Wprowadzenie

Znaczna część obecnie użytkowanych w Polsce w przemyśle i energetyce chłodni kominowych projektowana była w połowie ubiegłego stulecia. Stosowane wówczas zasady projektowania nie uwzględniały specyficznych warunków użytkowania tych obiektów. W konsekwencji w latach 1980÷2000 w większości chłodni kominowych przeprowadzono prace remontowe zarówno pod względem technologicznego ich wyposażenia jak i materiałowo konstrukcyjnym [1], [2]. Obecnie upływają projektowe okresy eksploatacji tych obiektów i powstaje pytanie o możliwość ich dalszego, bezpiecznego użytkowania [3]. Podstawę przedłużenia okresu użytkowania chłodni kominowych powinny stanowić nie tylko badania materiałowe dotyczące stopnia zaawansowania procesów korozyjnych, prognoz trwałości oraz parametrów mechanicznych materiałów konstrukcyjnych, ale przede wszystkim ocena nośności w świetle wymagań sformułowanych w nowych normach i związanych z nimi przepisach techniczno-budowlanych.

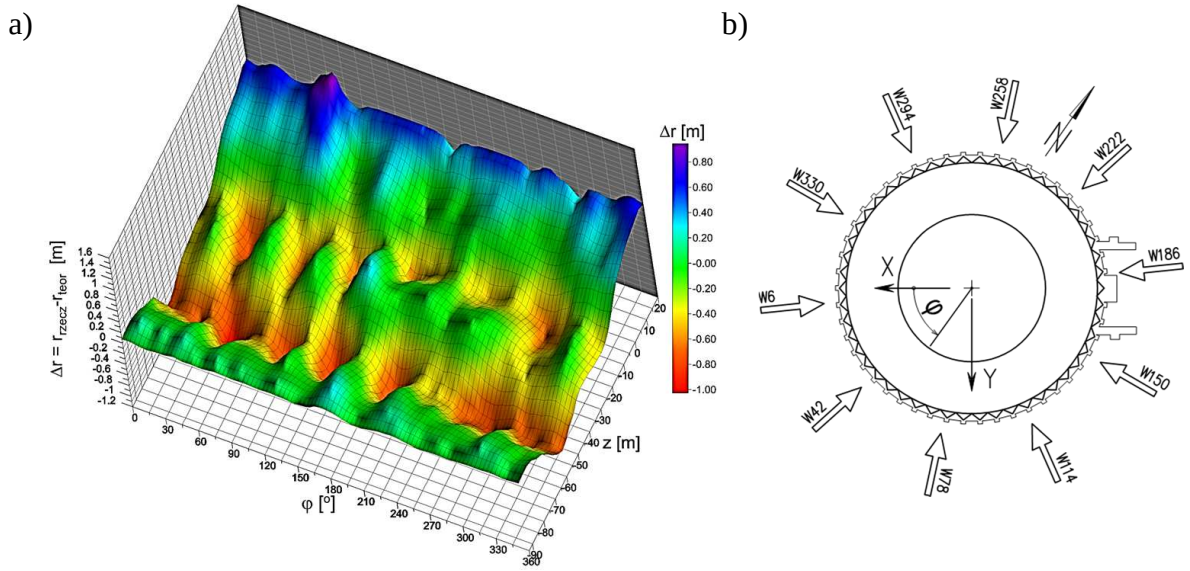
Z jednym z takich obiektów mieli do czynienia autorzy niniejszego artykułu. Zgodnie z życzeniem użytkownika 120. metrowej chłodni kominowej należało ocenić jej stan techniczny oraz przydatność do dalszej, bezpiecznej eksploatacji do roku 2025 w oparciu o wymagania stawiane przez Eurokody [4], [5], [6]. W artykule przedstawiono główne założenia i wnioski z przeprowadzonych badań i analiz.

2. Charakterystyka obiektu

Zasadniczym elementem analizowanej chłodni kominowej jest płaszcz komina wywiewnego w postaci hiperboloidalnej powłoki żelbetowej wspartej za pośrednictwem ukośnych słupów żelbetowych na fundamencie. Całkowita wysokość komina mierzona od powierzchni terenu wynosi 120.0 m. Wysokość okien wlotu powietrza jest równa 7.0 m a średnica chłodni w poziomie terenu wynosi 100.0 m. Grubość płaszcza zmienia się wzdłuż wysokości od 60÷14 cm. Geometrię płaszcza chłodni przedstawiono szczegółowo na rys. 1.



Rys. 1. Widok chłodni kominowej oraz jej geometria



Rys. 2. a) imperfekcje powłoki, b) rozpatrywane kierunki oddziaływania wiatru

W ciągu 35. letniego okresu eksploatacji chłodnia była dwukrotnie remontowana. Pierwszy remont wykonano na początku lat 90. ubiegłego wieku nakładając na zewnętrzną powierzchnię płaszcza 2÷3 cm warstwę torkretu niezbrojonego w celu uzupełnienia braków otuliny. Drugi remont przeprowadzono w 2001 roku po stwierdzeniu lokalnych pionowych pęknięć płaszcza

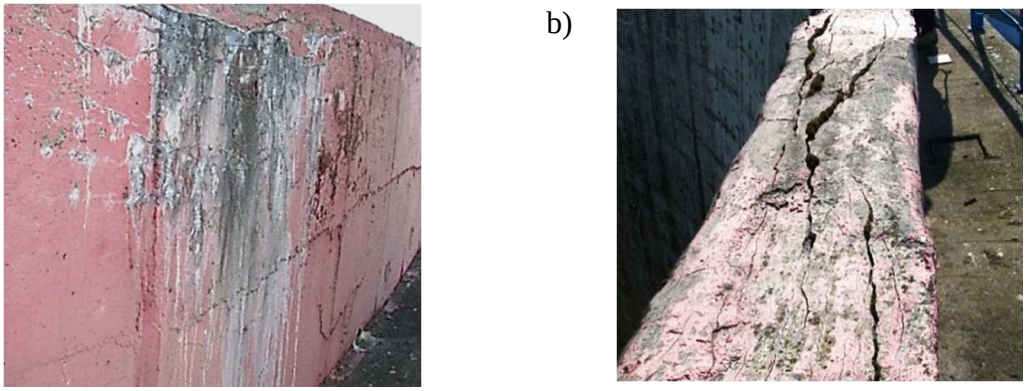
chłodni. Wykonano powłoki ochronne na wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni płaszcza oraz w rejonie zaobserwowanych zarysowań wzmocniono płaszcz taśmami CFRP.

Prezentowany obiekt wyraźnie wyróżnia się od innych tego typu konstrukcji istotnymi odchyłkami od założonej, projektowej hiperboloidy obrotowej. Odchyłki wynoszą od -1.20÷+0.90 m. Rozkład imperfekcji geometrycznych płaszcza wyznaczonych na podstawie pomiarów geodezyjnych z 2011 r przedstawiono na rys. 2 a.

3. Ocena stanu technicznego

Ocenę stanu technicznego przeprowadzono na podstawie przeglądu powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej płaszcza oraz w oparciu o wyniki badań polowych i laboratoryjnych. Zakres i wyniki badań podano w [7]. Na płaszczu stwierdzono uszkodzenia o charakterze lokalnym, stan zewnętrznych i wewnętrznych powłok ochronnych uznano jako dobry. Jedynie w rejonie korony chłodni zewnętrzne powłoki zabezpieczające uległy znacznej destrukcji co miejscami doprowadziło do przyspieszonej korozji betonu (rys. 3) i zaawansowanych uszkodzeń betonu.

a) b)



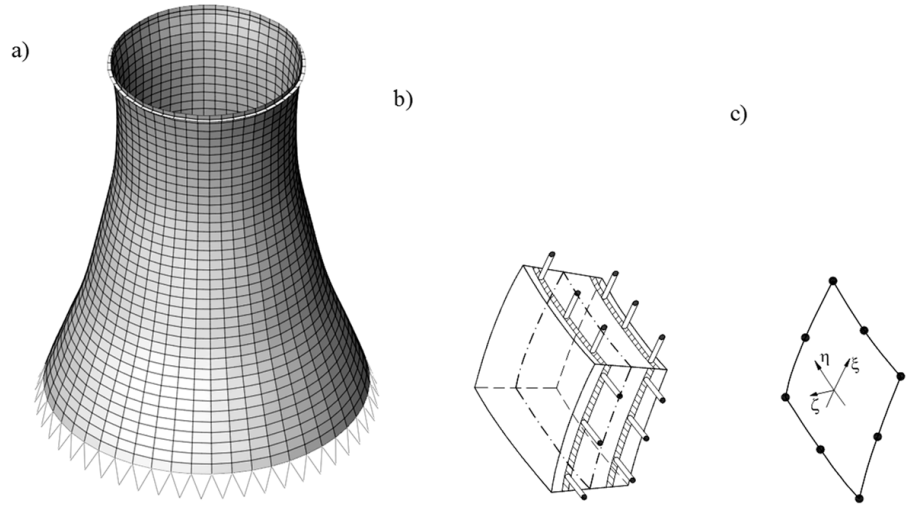
Rys. 3. Pęknięcia i zacieki w powłoce żelbetowej ponad pierścieniem: a) widoczne mokre zacieki węglanu wapnia; b) pęknięcia zlokalizowane w miejscu wcześniejszych napraw na krawędzi

Stwierdzono bardzo dobrą przyczepność betonu narzutowego, lokalnych jego napraw oraz taśm CFRP do podłoża ($f_h \geq 2.0$ MPa), co pozwoliło na uwzględnienie współpracy tych elementów w późniejszych analizach obliczeniowych oraz w ocenie bezpieczeństwa konstrukcji.

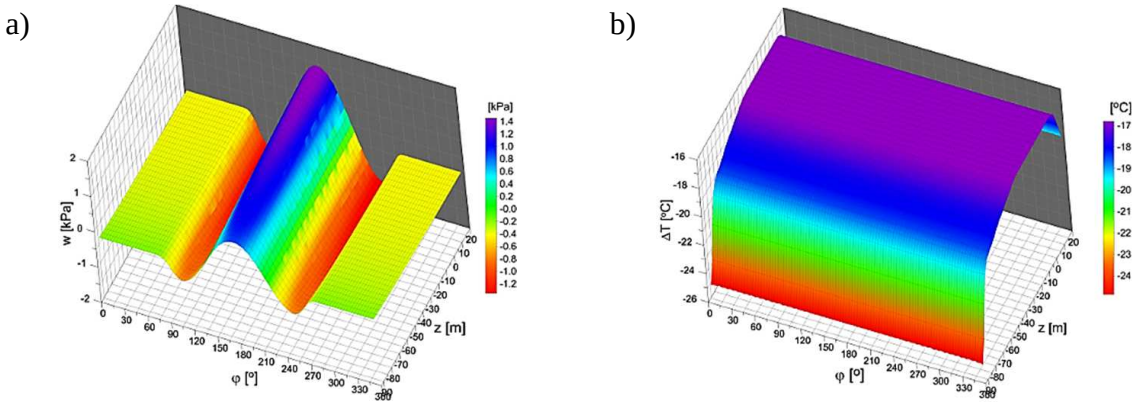
4. Ocena bezpieczeństwa użytkowania

Podstawę oceny dopuszczenia chłodni kominowej do dalszej eksploatacji stanowiła (oprócz opisywanych w [7] badań „in situ" i laboratoryjnych materiałów konstrukcyjnych) analiza statyczno-wytrzymałościowa. Obliczenia zostały wykonane w dwóch stadiach przy założeniu użytkowania obiektu do roku 2025. W stadium I prowadzono obliczenia liniowo-sprężyste płaszcza chłodni kominowej połączone z lokalną analizą nośności i poziomu wytężenia poszczególnych przekrojów południkowych i równoleżnikowych powłoki. W stadium II w obliczeniach uwzględniono rzeczywiste zachowanie materiału powłoki (zarysowanie betonu, sprężysto-plastyczny model fizyczny stali zbrojeniowej) oraz uwzględniono efekty drugiego rzędu.

Geometrię płaszcza chłodni ustalono na podstawie danych z pomiarów geodezyjnych wykonanych w 2011 r. Płaszcz chłodni zdyskretyzowano za pomocą zdegenerowanych, izoparametrycznych, ośmiowęzłowych elementów skończonych spełniających założenia pięcioparametrowej teorii powłok – rys 4a, 4c. Słupy podbudowy zamodelowano wykorzystując przestrzenne elementy belkowe.



Rys. 4. a) model MES powłoki, b) fragment powłoki, c) zastosowany element skończony



Rys. 5. a) oddziaływanie $W = W_e + W_i$, b) oddziaływanie różnicy temperatury w zimie (chłodnia czynna)

Zarówno w stadium I jak i stadium II analizy obliczeniowej konstrukcja komina wywiewnego chłodni została poddana oddziaływaniu następujących obciążeń: ciężar własny G, ciężar torkretu G_{TR}, parcie/ssanie wiatru na powierzchni zewnętrznej W_e i ssanie na powierzchni wewnętrznej W_i oraz oddziaływanie temperatury w zimie T_Z i lecie T_L.

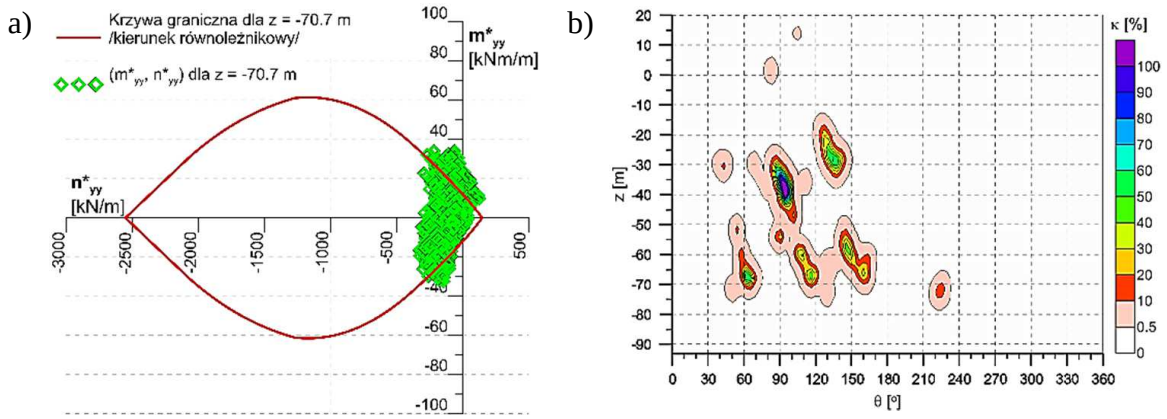
Rozkład ciśnień prędkości wiatru ustalono w oparciu o [5] oraz zalecenia techniczne [8]. Ze względu na istotne odchyłki geometrii płaszcza od idealnej hiperboloidy rozważono 10 kierunków oddziaływania wiatru. Po wstępnej analizie rozkładu imperfekcji płaszcza chłodni jako kierunek podstawowy wybrano wiatr z kąta 150°. Kolejne kierunki oddziaływań wiatru obliczono odejmując wartość 36° od kierunku bazowego – rys. 2b. W ocenie bezpieczeństwa chłodni kominowej, zarówno w stadium I jak i stadium II uwzględniono redukcję ciśnienia prędkości wiatru ze względu na przewidywany okres użytkowania konstrukcji (c_{prob} wg [5]), kierunek wiatru (c_{dir} wg [5]) oraz zwiększenie ciśnienia prędkości wiatru w wyniku zjawiska interferencji z sąsiadującą chłodnią kominową (F_I wg [8]) i zastępczego uwzględnienia wpływu efektów dynamicznego oddziaływania porywów wiatru (φ_{dyn} wg [8]). Obciążenie temperaturą ustalono w oparciu o prace [9] oraz [10]. W obliczeniach uwzględniono jedynie przypadki obciążenia temperaturą dla chłodni czynnej w zimie i nieczynnej w lecie. Przykładowe pola ciśnienia prędkości wiatru oraz temperatury w układzie współrzędnych biegunowych (φ, z) chłodni pokazano na rys. 5. Obciążenia przykładano do poszczególnych elementów skończonych o wartości obliczonej dla współrzędnych walcowych (φ, z) środków ciężkości każdego elementu.

4.1. Stadium I - lokalna analiza nośności

W przypadku Stadium I analizy do obliczenia sił wewnętrznych zastosowano liniowo-sprężysty model betonu przyjmując na podstawie badań [7] średni moduł sprężystości E_{cm} = 30 GPa. Lokalną analizę nośności poszczególnych przekrojów płaszcza chłodni kominowej wykonano zgodnie z [6] w oparciu o metodę odkształceń granicznych przyjmując dla betonu związki naprężenie-odkształcenie w postaci paraboli madryckiej oraz sprężysto – idealnie plastyczny model stali zbrojeniowej, zakładając obliczeniowe wytrzymałości betonu i stali zbrojeniowej.

Rozważono dwie rodziny kombinacji obciążeń (wg [4], [8]): wiodący wiatr $\gamma_G \cdot (G+G_{TR})$ + + $\gamma_Q \cdot \psi_0 \cdot T$ + $\gamma_Q \cdot (c_{prob} \cdot c_{dir}) 2 \cdot F_I \cdot \varphi_{dyn} \cdot W$, wiodąca temperatura $\gamma_G \cdot (G+G_{TR})$ + $\gamma_Q \cdot T$ + + $\gamma_Q \cdot (c_{prob} \cdot c\text{dir}) 2 \cdot F_I \cdot \varphi_{dyn} \cdot \psi_0 \cdot W$ przyjmując częściowe współczynniki bezpieczeństwa dla obciążenia stałego γ_G równe 1.35 lub 1.0, obciążenia wiatrem γ_Q = 1.6, temperaturą γ_Q = 1.0, współczynnik jednoczesności obciążenia zmiennego ψ_0 = 0.6 dla kombinacji z wiodącą temperaturą i ψ_0 = 0 dla kombinacji z wiodącym wiatrem.

Nośność powłoki sprawdzano dla każdego z wydzielonych przekrojów płaszcza chłodni biorąc pod uwagę miarodajne siły przekrojowe wyznaczone niezależnie dla kierunku południkowego i równoleżnikowego [11]. Na rys. 6 a pokazano przykładową krzywą graniczną nośności zbrojenia równoleżnikowego, wyznaczoną dla przekroju płaszcza chłodni znajdującego się na poziomie z = -70.7 m. Na wykresie naniesiono punkty o współrzędnych odpowiadających wartościom miarodajnym sił przekrojowych na tym poziomie, określonych dla rozważanych kombinacji obciążeń. Część punktów znajduje się poza obszarem wyznaczonym przez krzywe graniczne. Oznacza to, że na poziomie z = -70.7 m istnieją przekroje, w których dla pewnych kombinacji obciążeń nie są spełnione warunki nośności zgodnie z [6].



Rys. 6. a) sprawdzenie nośności na poziomie z = -70.7 m; b) mapa przekroczeń nośności określone przy oddziaływaniu wiatru z kierunku 150° (κ – przekroczenie nośności [%])

Przeprowadzone obliczenia wykazały, że w przypadku płaszcza chłodni występują obszary o niedoborze nośności, zarówno w kierunku południkowym jak i równoleżnikowym. Przekroje, w których nośność jest niewystarczająca skupiają się głównie w miejscach, gdzie geometria płaszcza najbardziej odbiega od geometrii projektowanej. Na mapie rys. 6b wskazano obszary płaszcza chłodni o niewystarczającej nośności, dla kombinacji wiodący wiatr z kierunku 150°.

Na podstawie wyników analizy liniowo-sprężystej, z lokalną analizą nośności przekrojów powłoki płaszcza chłodni, nie udało się wykazać, że przedmiotowy obiekt może być użytkowany w sposób bezpieczny. Oprócz lokalnego sprawdzenia warunków nośności obliczenia stadium I miały na celu określenie najbardziej niekorzystnych, ze względu na wytężenie płaszcza, kierunków wiatru oraz kombinacji obciążeń. Wytypowanie ograniczonej liczby przypadków

obciążeń ułatwiło prowadzenie drugiego stadium obliczeń. Jako najbardziej niekorzystne uznano kombinacje obciążeń z wiatrem z kierunków 78°, 150°, 186° i 330° oraz kombinacje, dla których częściowy współczynnik bezpieczeństwa obciążenia stałego γ_G = 1.35.

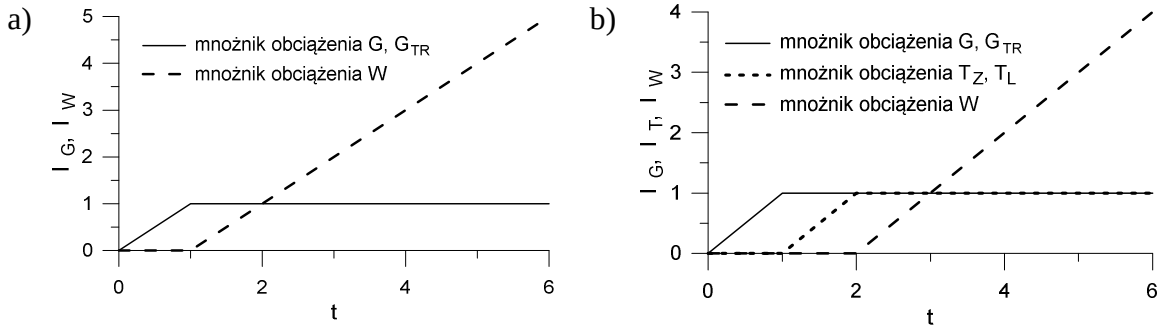
4.2. Stadium II – globalna analiza nośności

W stadium II analizę globalnej nośności płaszcza chłodni kominowej wykonano dla średnich parametrów mechanicznych betonu i charakterystycznej wytrzymałości stali zbrojeniowej. Do opisu utraty sztywności betonu w wyniku zarysowania wykorzystano model wielokierunkowych, nieortogonalnych rys rozmytych o ustalonym kierunku [12]. W obszarze naprężeń ściskających założono liniowo-sprężyste związki fizyczne betonu. W obliczeniach przyjęto następujące parametry materiałowe: E_{cm} = 30 GPa, ν = 0.2, f_{ctm} = 2.2 MPa, wykładniczą krzywą mięknięcia w obszarze podkrytycznym odkształceń według [13], energię pękania G_f = 40 N/m. Dla stali zbrojeniowej przyjęto sprężysto-plastyczny model materiału z liniowym wzmocnieniem zgodnym z [6]. Wzmocnienia z taśm CFRP zamodelowano jako materiał liniowo-sprężysty pękający krucho po osiągnięciu wytrzymałości na rozciąganie.

W stadium II przedstawiony na rys. 4a a model powłoki został uzupełniony o zbrojenie typu „embedded grid reinforcement" [14] – rys. 4b. Przyjęto 4 warstwy zbrojenia posiadające sztywność tylko na kierunku ułożenia prętów. W miejscach tarczowej pracy powłoki i w obszarze pierścienia górnego powłoka została dozbrojona dodatkowo elementami typu „embedded bar" [14] w ilości wynikającej z dokumentacji projektowej. Model chłodni uwzględniał również lokalne wzmocnienia w postaci taśm węglowych.

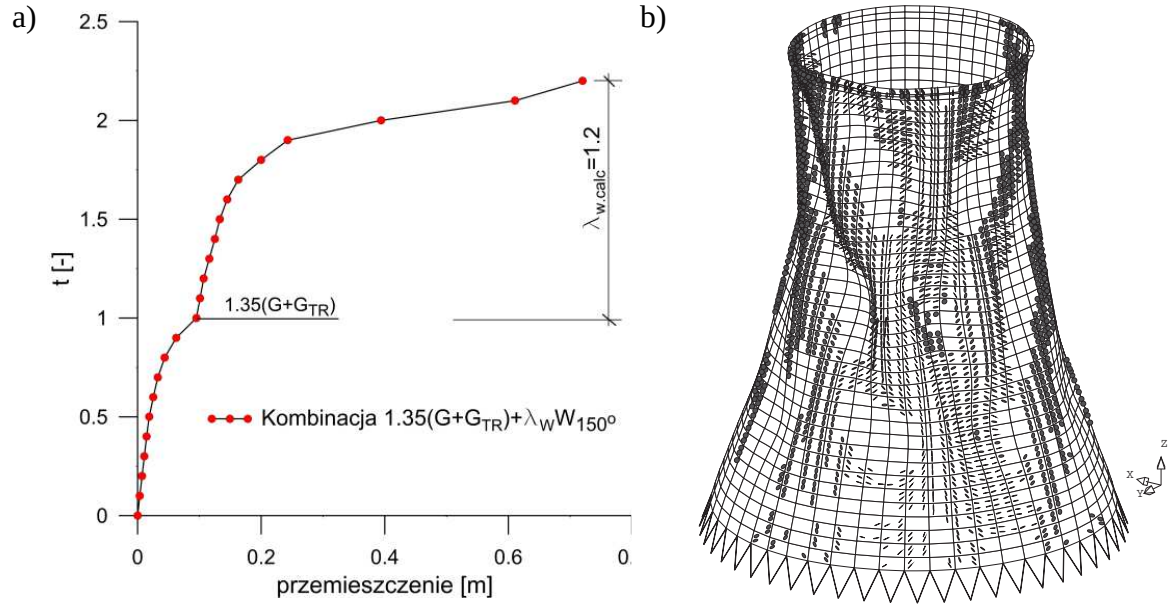
Obliczenia stadium II prowadzono przyrostowo, w każdym przyroście obciążenia aktualizując geometrię konstrukcji płaszcza. W ten sposób uwzględniono efekty II rzędu.

Podobnie jak w przypadku analizy stadium I rozpatrzono dwie rodziny kombinacji: wiodący wiatr $\lambda_G \cdot \gamma_G \cdot (G+G_{TR}) + \lambda_W \cdot W$ oraz wiodąca temperatura $\lambda_G \cdot \gamma_G \cdot (G+G_{TR}) + \lambda_T \cdot \gamma_Q \cdot T + \lambda_W \cdot W$. Korzystając z wniosków analizy stadium I ustalono, że najbardziej niekorzystną wartością współczynnika γ_G jest wartość 1.35. Współczynnik γ_Q dla temperatury przyjęto 1.5. Chłodnia charakteryzuje się odpowiednim stopniem bezpieczeństwa jeżeli maksymalny mnożnik obciążenia wiatrem uzyskany w obliczeniach λ_w spełni warunek $\lambda_W \geq \lambda_{W.\mathrm{lim}} = = \gamma_Q \cdot \gamma_R \cdot (c_{prob} \cdot c_{dir}) 2 \cdot F_I \cdot \varphi_{dyn}$ w przypadku kombinacji z decydującym wiatrem lub $\lambda_W \geq \lambda_{W.lim} = \gamma Q \cdot \gamma R \cdot (c_{prob} \cdot c_{dir})\ 2 \cdot F_I \cdot \varphi_{dyn} \cdot \psi_0$ w przypadku kombinacji z decydującą temperaturą, gdzie γ_R – globalny współczynnik bezpieczeństwa równy 1.3 [8]. Historia mnożników obciążeń w postaci zależności $\lambda_W(t)$, $\lambda_G(t)$, $\lambda_T(t)$ została zaprezentowana na rys. 7. Zniszczenie konstrukcji utożsamiano z osiągnięciem rozbieżności w procedurze iteracyjnej.



Rys. 7. Zależność $\lambda_W(t)$, $\lambda_G(t)$, $\lambda_T(t)$ od czasu pozornego t: a) kombinacja z decydującym wiatrem, b) kombinacja z decydującą temperaturą

Obliczenia stadium II dostarczyły szeregu informacji na temat rzeczywistej pracy konstrukcji komina wywiewnego przedmiotowej chłodni. Otrzymano zależne od poziomu poszczególnych obciążeń: deformacje konstrukcji, siły wewnętrzne w betonie powłoki w poszczególnych warstwach, rozkłady naprężeń w stali zbrojeniowej oraz morfologie zarysowania, a także graniczne mnożniki obciążenia wiatrem. Przykładowo na rys. 8a pokazano przemieszczenie wybranego węzła powłoki chłodni kominowej (charakteryzującego się największą długością wektora przemieszczenia w chwili zniszczenia), na rys. 8b przedstawiono obraz zarysowań powłoki dla maksymalnego mnożnika λ_W.



Rys. 8. Wyniki obliczeń dla kombinacji wiatr decydujący z kierunku 150°: a) historia przemieszczenia wybranego węzła powłoki chłodni; b) obraz zarysowania powłoki w chwili zniszczenia

Najistotniejszym parametrem w ocenie nośności i bezpieczeństwa dalszego użytkowania chłodni kominowej jest maksymalna wartość mnożnika obciążenia wiatrem λ_W. Wyniki obliczeń wskazały, że najbardziej niekorzystnym układem obciążenia jest wiatr wiejący z kierunków 150º i 186º. Porównanie maksymalnych wartości mnożnika osiągniętego w obliczeniach λ_W z mnożnikiem granicznym $\lambda_{W.lim}$ pokazało, że maksymalne wartości λ_W są większe od mnożników wymaganych $\lambda_{W.lim}$ dla każdej z rozpatrywanych kombinacji obciążeń. W przypadku najbardziej niekorzystnym wartości współczynników λ_W i $\lambda_{W.lim}$ wynoszą dla kombinacji wiatr decydujący z kierunku 150° – λ_W = 1.2 i $\lambda_{W.lim}$ = 1.14, a dla kombinacji temperatura decydująca oraz wiatr kierunku 150° – λ_W = 0.8 i $\lambda_{W.lim}$ = 0.69. Oznacza to, że konstrukcja płaszcza chłodni kominowej nie znajduje się w stanie przedawaryjnym i pracuje z wymaganym przez przepisy [4], [8] poziomem bezpieczeństwa.

5. Podsumowanie

W oparciu o przedstawioną analizę numeryczną stadium II, uwzględniającą nieliniowość fizyczną oraz geometryczną cienkiej powłoki żelbetowej wykazano, że analizowana konstrukcja chłodni kominowej charakteryzuje się wymaganym przez obecnie obowiązujące przepisy normowe [4] oraz wymagania techniczne dotyczące chłodni kominowych [8] poziomem bezpieczeństwa. Dodatkowo zilustrowano fakt, że w przypadku analizy nośności istniejących

chłodni kominowych (np. w celu dopuszczenia do dalszej eksploatacji po upływie projektowego okresu użytkowania konstrukcji) klasyczna, lokalna analiza nośności z zastosowaniem sprężystych modeli materiałowych może prowadzić do mylnych wniosków i wskazywać na potrzebę zastosowania kosztownych wzmocnień lub nawet może stanowić podstawę do wyłączenia obiektu z eksploatacji. Prezentowane podejście obliczeniowe stadium II polegające na wyznaczaniu globalnego mnożnika obciążeń z uwzględnieniem zdolności powłokowych konstrukcji żelbetowych do redystrybucji sił wewnętrznych (np. w wyniku zarysowania) pozwala na bardziej rzeczywistą ocenę nośności konstrukcji i w konsekwencji na zracjonalizowanie kosztów utrzymania obiektu. Może również decydować o sensowności dopuszczenia obiektu do dalszej eksploatacji w aspekcie ekonomicznym.

W celu zachowania właściwej trwałości prezentowanej chłodni kominowej zalecono wykonanie napraw wszystkich uszkodzeń stwierdzonych podczas badań „in situ", utrzymanie w dobrym stanie technicznym zabezpieczających powłok zewnętrznych i wewnętrznych oraz prowadzenie stałego monitoringu geodezyjnego geometrii komina wywiewnego chłodni.

Literatura

1. Broniewski T., Jamroży Z., Płachecki M.: Uszkodzenia korozyjne i naprawa żelbetowych hiperboloidalnych chłodni kominowych, Inżynieria i Budownictwo, nr 10/1988, s. 358–363.
2. Chmielewski T., Golczyk M.: On the structural reliability of natural draught cooling towers, Archives of Civil Engineering, vol. XLV, nr 2/1999, s. 181–191.
3. Płachecki M., Seręga S.: Ocena bezpieczeństwa istniejącej chłodni kominowej w świetle nowych wymagań normowych, XII Konferencja Naukowo-Techniczna – Warsztat Pracy Rzeczoznawcy Budowlanego, (Kielce-Cedzyna), s. 209–221, 2012.
4. PN-EN 1990:2004/A1: 2008 Eurokod - Podstawy projektowania konstrukcji.
5. PN-EN 1991-1-4:2008 Eurokod 1 - Oddziaływania na konstrukcje. Cześć 1-4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru.
6. PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2- Projektowanie konstrukcji z betonu. Cześć 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
7. Hojdys Ł., Krajewski P., Seręga S., Płachecki M.: Stan techniczny powłoki żelbetowej hiperboloidalnej chłodni kominowej z dużymi imperfekcjami po 35 latach użytkowania, Przegląd Budowlany, nr 4/2012, s. 71–74.
8. 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.
9. Dulińska J., Flaga A.: Analiza statyczna hiperboloidalnych chłodni kominowych przy obciążeniach termicznych, XXXVII Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Łódź - Krynica, 1991.
10. PN-B-02015:1986 Obciążenia budowli. Obciążenia zmienne środowiskowe. Obciążenie temperaturą.
11. Wood R. H.: The reinforcement of slabs in accordance with a pre-determined field of moment, Concrete, vol. 2, s. 69–76, 1968. Armer, G. S. T. (1968) Correspondence. Concrete, vol. 2, s. 319–320.
12. de Borst R.: Smeared cracking, plasticity, creep and thermal loading - a unified approach, Computer Methods in Applied Mech. and Eng., vol. 62, s. 89–110, 1987.
13. Hordijk D. A.: Local Approach to Fatigue of Concrete. PhD thesis, Delft University of Technology, 1991.
14. Manie J., Kikstra W. P., eds.: DIANA - Finite Element Analysis. User's Manual.