MARIAN PŁACHECKI, *emplacheccy@neostrada.pl*
Państwowa Wyższa Szkoła Techniczno-Ekonomiczna w Jarosławiu
KRZYSZTOF KOZIŃSKI, *kkozinsk@pk.edu.pl*
Politechnika Krakowska

ANALIZA NOŚNOŚCI I NAPRAWY SŁUPÓW PODBUDOWY HIPERBOLOIDALNYCH CHŁODNI KOMINOWYCH PO PIĘĆDZIESIĘCIU LATACH EKSPLOATACJI

ANALYSIS OF CAPACITY AND REPAIR METHOD FOR COLUMNS SUBSTRUCTURE OF COOLING TOWER AFTER FIFTY YEARS OF OBJECT EXPLOITATION

Streszczenie W referacie poddano analizie typowe uszkodzenia słupów chłodni kominowych, eksploatowanych w niekorzystnych warunkach przez okres kilkudziesięciu lat. Przedstawiono wyniki analizy statyczno-wytrzymałościowej słupów, uwzględniając różne możliwe sytuacje awaryjne ich stanu technicznego. Określono stopień wykorzystania nośności słupów podbudowy przy założeniu, iż w wyniku występujących uszkodzeń zostanie wyłączony z pracy jeden, dwa lub trzy sąsiednie, najbardziej obciążone słupy. Sformułowano praktyczne zalecenia dotyczące doraźnego zabezpieczenia konstrukcji wsporczej chłodni przy wykonywaniu napraw uszkodzonych słupów.

Abstract In the paper there are subjected to analysis typical damages for columns of cooling tower substructure after fifty years of exploitation in unfavorable conditions. Results of static and strength analysis for columns are presented with taking into account the different possible emergency situations of their technical state. There is determined the level of columns load-bearing capacity utilization under the assumption that as a result of occurred damages one, two or three adjacent and high loaded columns are excluded from work. Practical recommendations as to the temporary protection of columns while carrying out the repair works of damaged columns are also formulated.

1. Wstęp

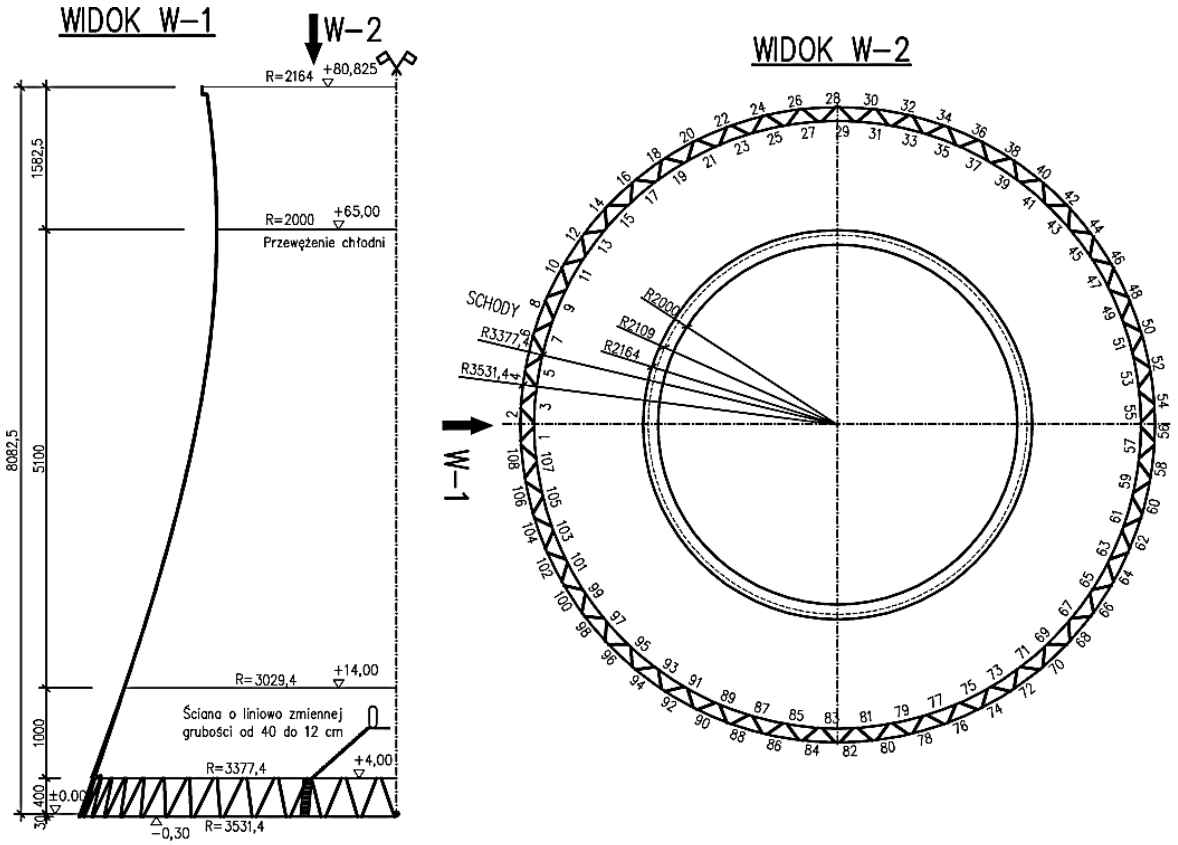
Konstrukcję wsporczą powłoki żelbetowych hiperboloidalnych chłodni kominowych stanowią słupy monolityczne lub prefabrykowane. Stosowane są słupy o przekroju poprzecznym prostokątnym, kołowym lub wieloboku foremnego. W chłodniach kominowych, wykonanych na przełomie lat pięćdziesiątych i sześćdziesiątych ubiegłego wieku, już po kilkunastu latach użytkowania występowały uszkodzenia w powłoce i słupach podbudowy, spowodowane głównie niedostosowaniem konstrukcji do trudnych warunków eksploatacyjnych. W tamtym czasie stosowano betony niskich marek, odpowiadające dzisiejszym klasom C12/15 do C16/20, a przyjęte otuliny zbrojenia były zdecydowanie za małe, aby zabezpieczyć zbrojenie przed korozją. Dodatkowym czynnikiem przyśpieszającym procesy korozyjne w słupach podbudowy chłodni jest ciągłe ich zawilgacanie i osuszanie, a w okresie zimowym zamarzanie i odmrażanie betonu na grubości otuliny. Z oddziaływaniami fizycznymi występowało synergiczne oddziaływanie chemiczne, związane z agresywnością środowiska powietrznego i wodnego. Konsekwencją takich oddziaływań była konieczność wykonania prac remontowych i wzmocnień uszkodzonych słupów [1]. Przedstawione w referacie uszkodzenia słupów

podbudowy chłodni dotyczą kilku obiektów badanych przez autorów referatu, a prezentowana analiza statyczno-wytrzymałościowa odnosi się do jednej z nich. Słupy w tych chłodniach były już poddane wcześniejszym naprawom, a opisane uszkodzenia odnoszą się do stanu po około 45÷50 latach eksploatacji.

2. Opis konstrukcji analizowanej chłodni kominowej

Badaną chłodnię kominową zaprojektowano w kształcie hiperboloidy obrotowej. Powłoka ma wysokość 76 m i opiera się na 108 słupach skośnych, rozmieszczonych równomiernie na całym obwodzie hiperboloidy. Grubość powłoki od poziomu jej oparcia na słupach do wysokości 10 m jest liniowo zmienna od 40÷12 cm. Od 10÷76 m przyjęto stałą grubość powłoki równą 12 cm. Słupy wykonano w kształcie ośmiokąta foremnego, opisanego na obwodzie o średnicy 35 cm. W górnej części łączą się one monolitycznie z powłoką, a u dołu z pierścieniową ścianą zbiornika wody schłodzonej. Wysokość okien wlotowych powietrza (odległość od poziomu korony zbiornika do poziomu oparcia hiperboloidy na słupach ukośnych) wynosi 4 m. Dojście z poziomu terenu na poziom wodorozdziału zapewniają zewnętrzne schody dwubiegowe.

Całkowita wysokość komina chłodni od poziomu terenu do poziomu górnego pierścienia wynosi 80,825 m. Na rys. 1 przedstawiono podstawowe wymiary badanej chłodni.



Rys. 1. Geometria badanej chłodni kominowej

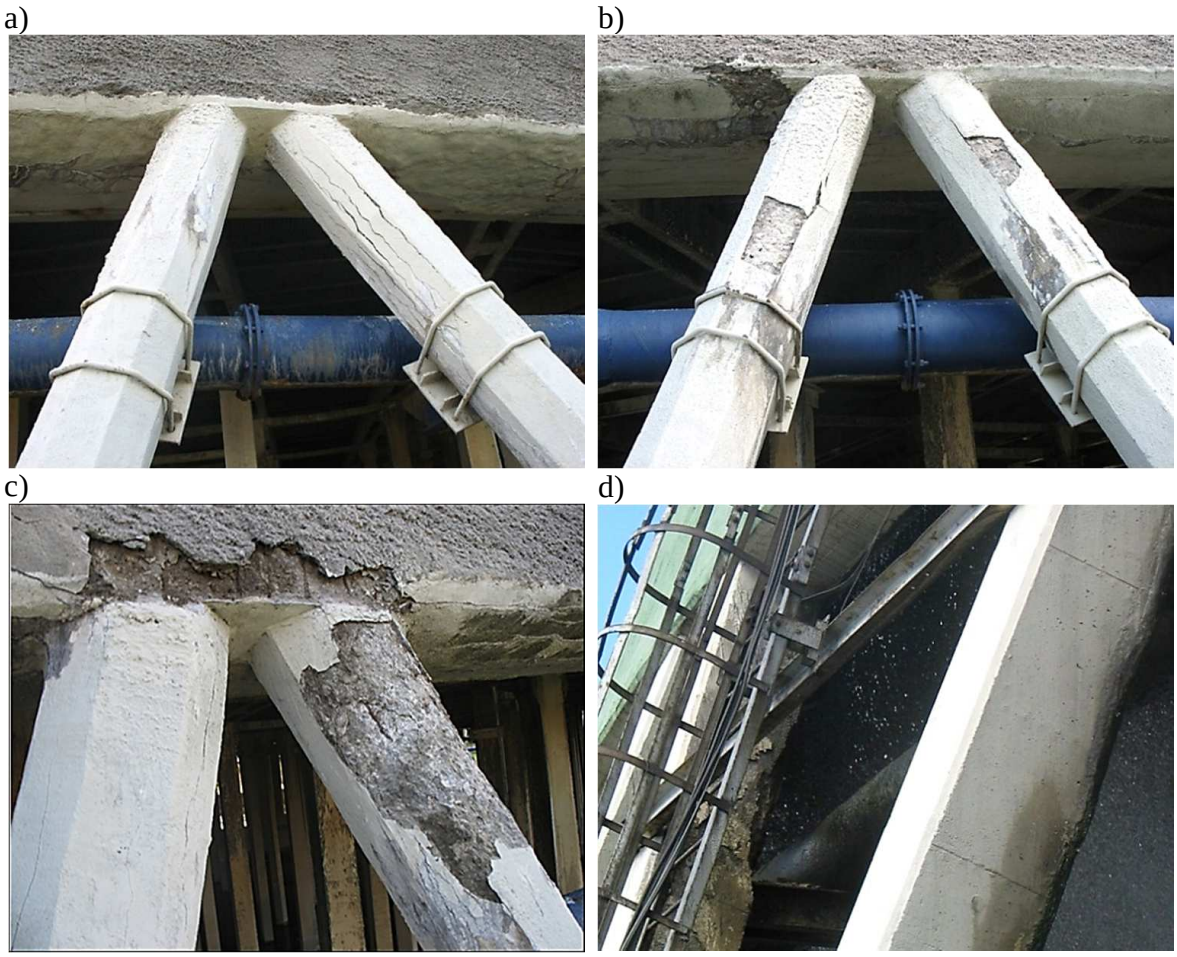
3. Wyniki badań własnych stanu technicznego słupów podbudowy

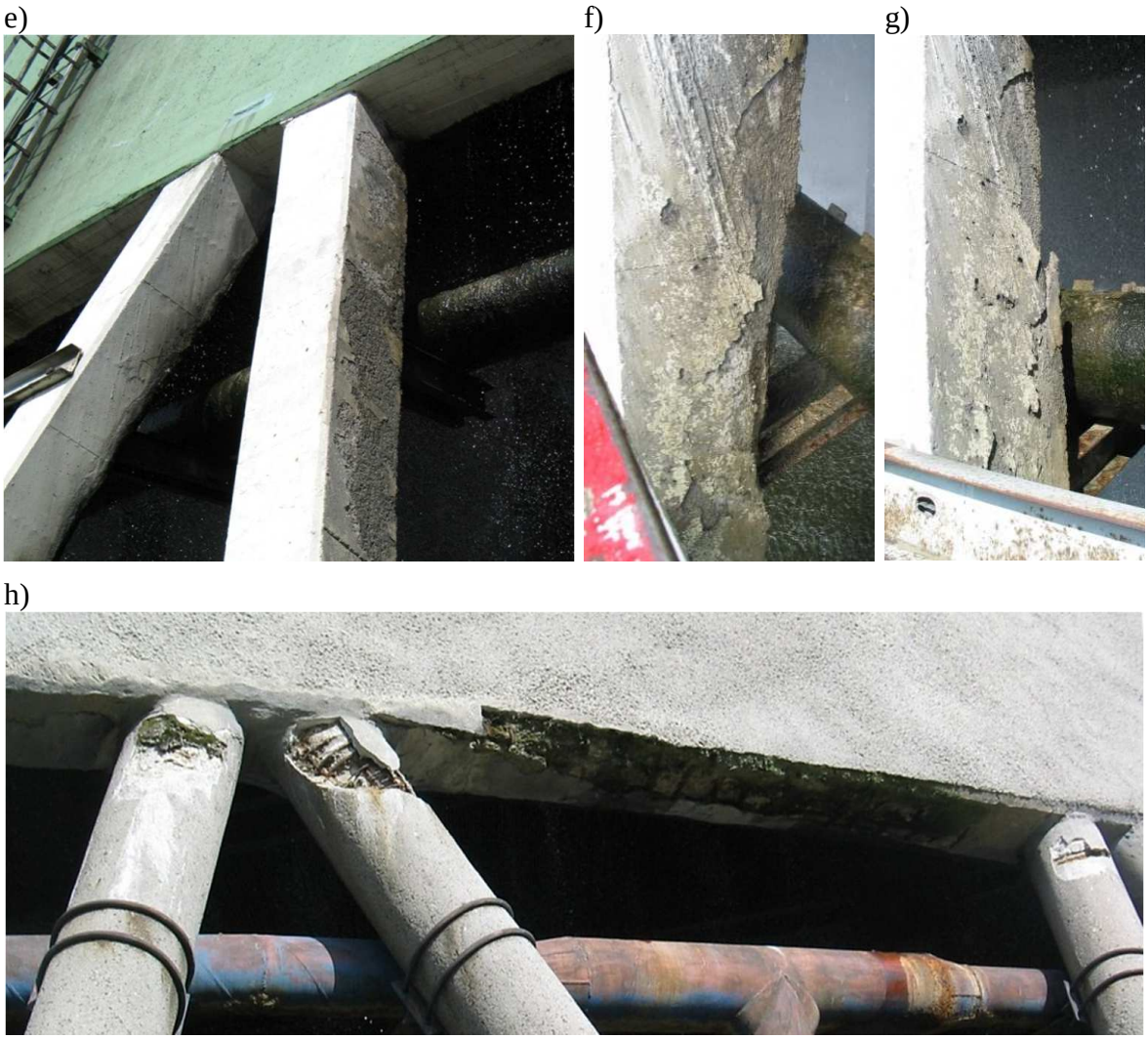
W wyniku użytkowania chłodni przez okres ponad 50 lat w słupach podbudowy powstały uszkodzenia typu korozyjnego, o zróżnicowanym stopniu zaawansowania. Wszystkie słupy uprzednio były już poddane naprawie. Stwierdzono w większości słupów:

– intensywne i początkowe spękania w ich górnej i dolnej części (w większość uszkodzonych słupów spękania występowały w górnej części),
– ubytki betonu, stanowiącego otulinę zbrojenia podłużnego i poprzecznego, które w konsekwencji powodowały korozję zbrojenia,
– wgłębną destrukcję betonu, związaną z migracją wody, powodującą ługowanie związków wapnia,
– uszkodzenia betonu w wyniku powtarzających się cykli zamarzania wody zgromadzonej w spękanym, uszkodzonym betonie, co w konsekwencji powodowało jego dalsze mechaniczne uszkodzenia.

W słupach o przekroju prostokątnym występowały zaawansowane wgłębne uszkodzenia betonu i korozja zbrojenia w narożach od strony zbiornika chłodni.

Zaobserwowane uszkodzenie słupów przedstawiono na rys. 2.





Rys. 2. Typowe uszkodzenia słupów podbudowy występujące w badanych chłodniach kominowych

4. Analiza statyczno-wytrzymałościowa słupów podbudowy

4.1. Opis modelu obliczeniowego

Do analizy statycznej słupów podbudowy hiperboloidalnej chłodni zastosowano program RFEM [6] oparty na MES. Do modelu obliczeniowego wprowadzono: pierścieniową ścianę fundamentową grubości 40 cm, na niej oparto 108 równomiernie rozmieszczonych słupów skośnych o średnicy 35 cm, a na słupach oparto hiperboloidalną powłokę chłodni. Powłokę od poziomu oparcia na słupach do wysokości 10 m zamodelowano o skokowo zmiennej grubości – powyżej 10 m wysokości powłoka miała stałą grubość równą 16 cm. Grubość powłoki ustalono na podstawie dostępnej dokumentacji technicznej i dodatkowo powiększono o warstwę wcześniej wykonanego torkretu grubości 4 cm.

W modelu obliczeniowym założono klasę betonu C16/20 dla słupów i ściany fundamentowej oraz C12/15 dla powłoki i obwodowego pierścienia górnego. Dodatkowo, w celu oszacowania wpływów termicznych na siły wewnętrzne w słupach podbudowy, do modelu obliczeniowego wprowadzono zmniejszoną sztywność powłoki – uwzględniającą jej zarysowanie.

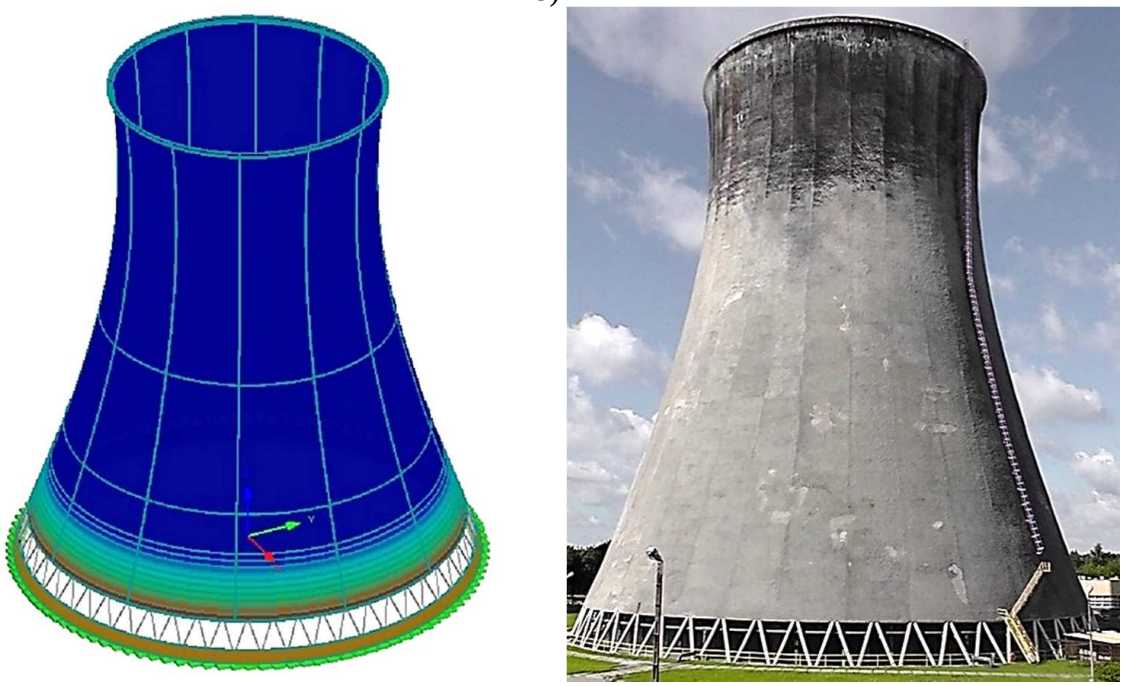
Przy wyznaczeniu sił wewnętrznych w słupach uwzględniono następujące rodzaje obciążeń:

– ciężar własny;

– parcie i ssanie wiatru;

– obciążenia termiczne powodujące równomierne zmiany temperatur (ogrzanie i oziębienie) powłoki oraz różnice ich wartości na powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej (gradienty) dla lata i zimy.

a) b)



Rys. 3. Widok ogólny: a) modelu obliczeniowego, b) badanej chłodni

Obciążenie wiatrem i jego rozkład na powierzchni chłodni wyznaczono zgodnie z normą [3], przyjmując charakterystyczne ciśnienie prędkości wiatru q_k = 250 Pa (strefa I) i zmienny, na wysokości chłodni, współczynnik ekspozycji od C_e = 1÷1.7. Wartości współczynnika aerodynamicznego ustalono jak dla budowli walcowej. Chłodnię podzielono wzdłuż południków na 12 wycinków (co 30 stopni). Do modelu obliczeniowego wprowadzono obciążenie wiatrem o wartości średniej równoleżnikowej i liniowo zmiennej wartości południkowej.

Obciążenia termiczne wyznaczono w oparciu o normę [4] oraz informacje uzyskane z pomiaru temperatury wody w poziomie wodorozdziału oraz w zbiorniku wody schłodzonej. Założono temperaturę powietrza zewnętrznego odpowiednio dla pory letniej i zimowej t_e = 27° i t_e = -24°, a temperaturę powietrza wewnętrznego t_i = 18° i t_i = 8°. Przyjęto temperaturę scalenia konstrukcji t_o = 10°, a dobową amplitudę temperatury powietrza zewnętrznego a = 8°. Analizując wpływ obciążeń termicznych na siły wewnętrzne w słupach przyjęto w uproszczeniu stałe wartości obciążeń termicznych na wysokości chłodni.

4.2. Wyniki obliczeń

Uwzględniając powyżej opisane obciążenia, przeprowadzono analizę statyczno-wytrzymałościową słupów podbudowy w następujących sytuacjach:

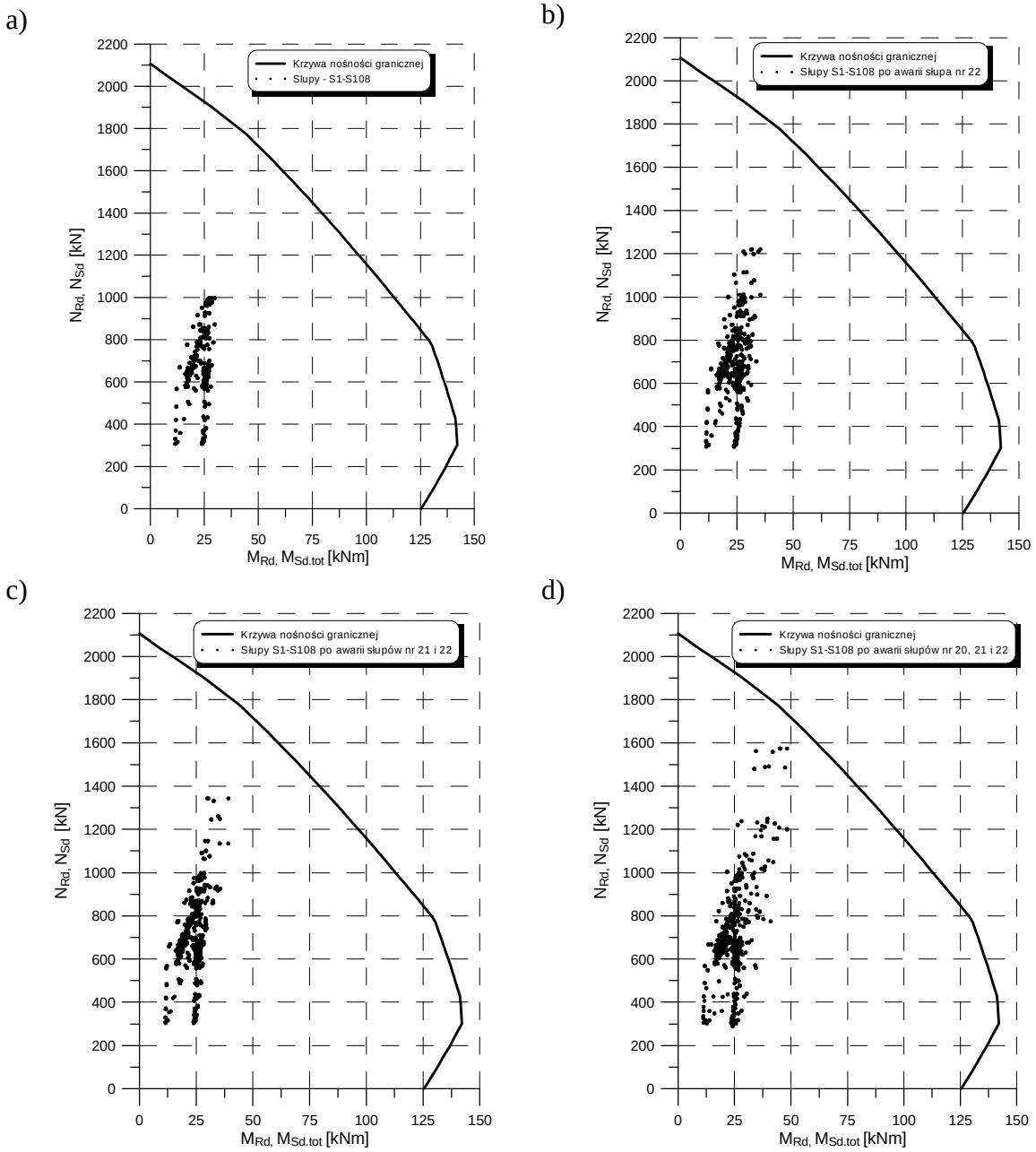
– wszystkie słupy biorą udział w przenoszeniu obciążeń;
– w wyniku uszkodzenia wyłączony został jeden ze słupów - najbardziej wytężony;
– w wyniku uszkodzeń wyłączone zostały dwa sąsiednie, najbardziej wytężone słupy,
– w wyniku uszkodzeń wyłączone zostały trzy sąsiednie, najbardziej wytężone słupy.

Zaobserwowany i przedstawiony na rys. 2h stan techniczny trzech sąsiednich słupów podbudowy wskazuje, że ich udział w przenoszeniu obciążeń jest znikomy. Widoczne w górnym

węźle wgłębne uszkodzenia korozyjne betonu sięgają do połowy przekroju poprzecznego słupa, a odsłonięte zbrojenie poprzeczne i podłużne jest niemal w całości skorodowane.

Na rys. 4 przedstawiono krzywą graniczną nośności M_{Rd}-N_{Rd} słupów podbudowy, wyznaczoną przy następujących założeniach:

– słup o przekroju kołowym i średnicy 350 mm,
– klasa betonu C16/20,
– zbrojenie podłużne składające się z 8 prętów ϕ28 równomierne rozłożonych, wykonanych ze stali A-I,
– otulina zbrojenia 30 mm.



Rys. 4. Porównanie krzywej nośności granicznej M_{Rd}-N_{Rd} słupów podbudowy z wartościami całkowitych sił wewnętrznych uzyskanych dla wszystkich słupów podbudowy: a) wszystkie słupy przenoszą obciążenia, b) awaria słupa nr 22, c) awaria słupa nr 21 i 22, d) awaria słupa nr 20, 21 i 22

Dla wszystkich słupów podbudowy wyznaczono maksymalne siły ściskające i odpowiadające im momenty zginające oraz maksymalne momenty zginające i odpowiadające im siły ściskające. Wartości statycznych momentów zginających w przekrojach: dolnym, środkowym i górnym powiększono o momenty zginające, uwzględniające mimośrody przypadkowe o wartości D/30 (D-średnica słupa), a w przekroju środkowym dodatkowo uwzględniono efekty drugiego rzędu metodą zawartą w normie [5].

Wartości maksymalnych sił ściskających oraz odpowiadające im momenty całkowite oraz wartości maksymalnych momentów i odpowiadających im sił ściskających, w trzech przekrojach na wysokości słupa, porównano z krzywą nośności granicznej – uwzględniając powyżej opisane cztery sytuacje obliczeniowe (rys. 4).

W obliczeniach przedstawionych na rys. 4 numerację słupów przyjęto zgodnie z rys. 1, a kierunek działania wiatru zgodny z widokiem W-1 (rys. 1).

4.3. Wnioski z przeprowadzonej analizy statyczno-wytrzymałościowej

Z analizy statyczno-wytrzymałościowej słupów podbudowy rozpatrywanej hiperboloidalnej chłodni kominowej wynika, że w słupach tych występują duże zapasy nośności (rys. 4a, 4b, 4c). Ich wytężenie jest bliskie nośności granicznej dopiero w sytuacji, gdy w wyniku uszkodzeń z pracy wyłączone zostaną trzy sąsiednie, najbardziej wytężone słupy (rys. 4d). Duże zapasy nośności wynikają z faktu, iż przyjęte w dokumentacji projektowej obciążenie wiatrem chłodni (wyznaczone w oparciu o pracę [2]) jest znacznie większe od obciążenia wiatrem ustalonego na podstawie normy [5].

5. Podsumowanie

W słupach podbudowy badanych chłodni kominowych występowały uszkodzenia typu korozyjnego, związane z długotrwałą eksploatacją w wilgotnym środowisku, przy ciągłym oddziaływaniu nawilżania i osuszania, a w okresie zimowym zamarzania wierzchnich warstw betonu. Podobne uszkodzenia zdiagnozowali Autorzy referatu [1] w dwu badanych chłodniach kominowych.

W zaobserwowanym stanie zaawansowania uszkodzeń korozyjnych nie stwierdzono zewnętrznych objawów przeciążenia słupów podbudowy. Jednak w analizie statyczno-wytrzymałościowej ich nośności wykazano, że dla najbardziej niekorzystnej sytuacji obliczeniowej (przy założeniu wyłączenia z pracy trzech sąsiednich, najbardziej obciążonych słupów), wytężenie słupów może być bliskie nośności granicznej (rys. 4d). Istniejący stan stwarzał zagrożenie dalszego rozwoju uszkodzeń korozyjnych, co wiązało się ze stopniowym obniżaniem trwałości słupów i stopnia bezpieczeństwa użytkowania chłodni.

Zastosowano standardową procedurę naprawczą, obejmującą: zabezpieczenie odsłoniętego zbrojenia (po dokładnym jego oczyszczeniu), uzupełnienie ubytków zbrojenia, uzupełnienie wgłębnych ubytków betonu i odtworzenie otuliny zbrojenia.

W słupach, w których ubytki korozyjne zbrojenia w ich przekroju poprzecznym przekraczały około 10% łącznej powierzchni zbrojenia podłużnego, a zbrojenie poprzeczne było niemal w całości skorodowane, dodatkowo zastosowano wzmocnienie matami z włókien węglowych.

W trakcie przeprowadzanej naprawy, po usunięciu zewnętrznych, uszkodzonych warstw betonu stwierdzono, że w części słupów korozja betonu obejmuje cały ich przekrój poprzeczny. W tych elementach zdecydowano się na zupełne skucie betonu, pozostawiając tylko szkielet zbrojeniowy i odtworzenie betonu na całej jego wysokości.

Rys. 5. Zrekonstruowane słupy podbudowy chłodni kominowej

W kontekście uzyskanych wyników analizy wytężenia słupów – w przypadku uszkodzenia trzech kolejnych słupów jak na rys. 2h – zalecono przy ich naprawie doraźne podparcie powłoki chłodni słupami stalowymi.

Przedstawione wyniki analizy wytężenia słupów podbudowy chłodni wskazują na konieczność jej przeprowadzenia przy planowaniu robót naprawczych w uszkodzonych słupach. Analiza statyczna słupów powinna być poprzedzona badaniami materiałowymi (ocena jakości betonu i stanu zbrojenia) w konstrukcji chłodni. W trakcie naprawy może zaistnieć konieczność lokalnego odtworzenia słupa na powierzchni całego przekroju poprzecznego, co z reguły ma miejsce przy wgłębnych uszkodzeniach korozyjnych betonu i zbrojenia. W takich przypadkach, przy występowaniu zaawansowanych uszkodzeń w kilku sąsiednich słupach, należy przewidzieć lokalne, doraźne podparcie powłoki chodni.

Literatura

1. Ajdukiewicz A., Hulimka J., Własczczuk M., Chylińska A.,: Awaria i rekonstrukcja dolnych części konstrukcji nośnej żelbetowych chłodni kominowych, XXI Konferencja Naukowo-Techniczna, Awarie Budowlane, strona 631–638, 20-23 Maj 2003.
2. *Ledwoń J., Golczyk M.:* Chłodnie kominowe i wentylatorowe, Arkady, Warszawa 1967.
3. *PN-77*/B-02011: Obciążenia w obliczeniach statycznych. *Obciążenie wiatrem*.
4. PN-86/B-02015: Obciążenia budowli. Obciążenia zmienne środowiskowe. *Obciążenie temperaturą*.
5. *PN*-B-*03264-2002:* Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.
6. RFEM – The structural analysis and design software – www.dlubal.com.