

NIEKLASYCZNE ZACHOWANIE SIĘ MODELU HIPERBOLOIDALNEJ CHŁODNI
KOMINOWEJ POD OBCIĄŻENIEM OSIOWO SYMETRYCZNYM

JAN OWCZARZY, JANUSZ KOSSOWSKI (GLIWICE)

1. Wstęp

Chłodnie kominowe stanowią konstrukcję złożoną z bardzo cienkiej powłoki, wiotkich słupów podtrzymujących powłokę oraz fundamentu najczęściej pierścieniowego posadowionego na zróżnicowanym ze względu na swe gabaryty podłożu gruntowym. Powłokę chłodni konstruuje się zazwyczaj jako jednopowłokową hiperboloidę obrotową o wysokości, która osiąga już ponad 160 m, minimalnej grubości wynoszącej 16 cm i stosunku jej do najmniejszego promienia rzędu 1/200. Problem pracy statycznej tych powłok będących prostokreślnymi powierzchniami o ujemnej krzywiznie Gaussa nie jest jeszcze całkowicie zbadany a intensywny rozwój ich zastosowań w budownictwie energetycznym nie obył się bez katastrof. Z technicznego punktu widzenia najbardziej racjonalną, zapewniającą równomierną na grubości pracę materiału (żelbetu) jest bezmomentowy stan naprężeń w powłoce. Z drugiej strony istnieją wszelkie przesłanki, że powłoka ze względu na małą grubość ścianki a tym samym dużą jej wiotkość nie jest w stanie przejmować szczególnie na obwodzie naprężeń ściskających i mieć tendencję do deformacji bez wydłużeń i skróceń powierzchni środkowej czyli do występowania stanu czystego zginania.

WŁASOW [1] w swej fundamentalnej pracy dotyczącej powłok dowodzi, że powłoki o ujemnej krzywiznie Gaussa, dla których problem równowagi sprowadza się do rozwiązania różniczkowych równań cząstkowych typu hiperbolicznego w odróżnieniu do powłok o dodatniej krzywiznie nie mogą wyłącznie pracować w stanie bezmomentowym. NOWOŻIŁOW [2] stwierdza, że warunkiem niezbędnym i dostatecznym dla uniknięcia naprężeń czystego zginania w obrotowych powłokach o ujemnej krzywiznie jest pełne utwierdzenie jednego brzegu w obu kierunkach stycznych do powierzchni środkowych ($v = 0, u = 0$). FLÜGGE [3] zwraca uwagę na osobliwe zachowanie się powłok o ujemnej krzywiznie Gaussa i na przykładzie hiperboloidy jednopowłokowej obciążonej na brzegach pokazuje, że nieciągłości na brzegach wywołują nieciągłości naprężeń w powłoce propagujące się wzdłuż pewnych linii powierzchni środkowej. Jednym z warunków stosowalności bezmomentowej teorii cienkich powłok jest wg GOLDENWEJZERA [4] spełnienie tzw. hipotezy Nowodworskiego o możliwych zginaniach. W myśl tej hipotezy w powłoce panuje bezmomentowy stan naprężeń wtenczas, gdy siły przyłożone do powłoki nie wykonują żadnej pracy na przemieszczeniach możliwych zginania czyli inaczej gdy nie występują przemieszczenia czystego zginania lub gdy są one ortogonalne do działających obciążeń. Stosowane różne warianty teorii dwuwymiarowych oparte na skończonej ilości wielkości zdefiniowanych na powierzchni środkowej są z definicji teoriami przybliżonymi i nie mogą dać

pełnej i ścisłej informacji o stanie naprężeń i odkształceń w cienkich trójwymiarowych ciałach jakimi są powłoki [5]. W tej sytuacji dużego znaczenia nabierają metody doświadczalne pozwalające na pokonanie barier wynikających z niedoskonałości metod analitycznych w wiernym odwzorowaniu zachowania się powłok pod różnymi sposobami obciążeń. Badania modelowe konstrukcji są szczególnie przydatne do rozwiązywania wybranych zagadnień skomplikowanych konstrukcji składających się z dźwigarów powierzchniowych w tym i powłok.

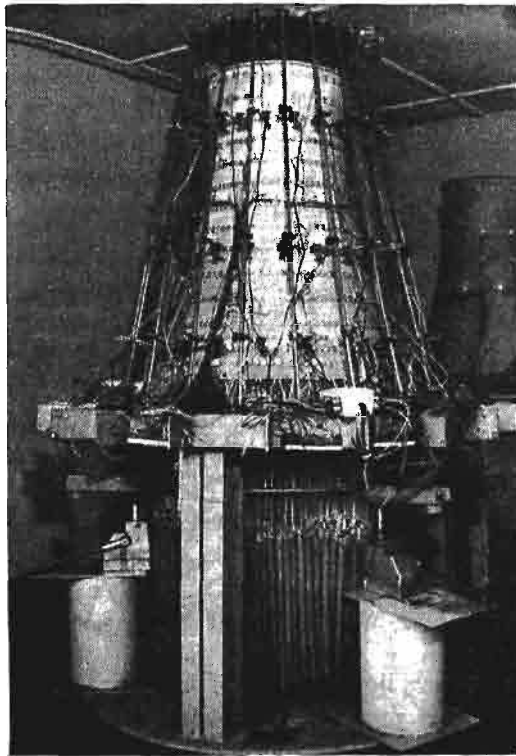
Wielu autorów prowadziło badania eksperymentalne na małych modelach chłodni kominowych obciążonych ciężarem własnym, wiatrem itp., których celem prawie zawsze był problem zachowania się powłok przy utracie stateczności w tym przede wszystkim określenie tzw. obciążeń krytycznych. Obszerne podsumowanie aktualnego stanu badań doświadczalnych, analitycznych i numerycznych wraz z krytyczną dyskusją zawarto w artykułach [6, 7]. Rezultaty tych badań różnią się między sobą jakościowo i ilościowo i wskazują, że problem zachowania się powłok chłodni hiperboloidalnych przed i po utracie stateczności jest nadal otwarty. Wynika to, poza stosowaniem przybliżonych teorii powłok, z braku wiarygodnych informacji o przebiegu zjawiska a w związku z tym o roli pracy błonowej, zgjęciowej w fazie przed i po utracie stateczności konstrukcji. Analizując znane i dostępne opisy badań modelowych [8, 9, 10, 11] można stwierdzić brak właściwej i pełnej obserwacji zachowania się modeli we wszystkich począwszy od zera stadiach obciążeń. Nie rejestrowano w wystarczającej ilości punktów pomiarowych procesu deformowania się modeli i nie określono w sposób nie budzący wątpliwości charakteru rozwijania się przemieszczeń i naprężeń szczególnie po obwodzie powłok. Ponadto badania realizowano dla różnych geometrii modeli, przy różnych warunkach brzegowych, własnościach materiału modelowego oraz różnym sposobie i charakterze obciążenia. Zaobserwowane w tych badaniach dość duże na obwodzie rozrzuty mierzonych wartości przemieszczeń i naprężeń przy osiowo symetrycznym obciążeniu składano tylko na karb niedokładności kształtu i grubości, mimo środkowego działania obciążeń czy też błędów pomiarowych.

Mając powyższe na względzie autorzy przeprowadzili szczegółową analizę czynników wpływających na rezultaty eksperymentu modelowego i skupili się na dokładnym i kompleksowym rozeznaniu charakteru pracy modelu, w którym zachowano najworniejsze ze znanych realizacji podobieństwo geometryczne, warunków brzegowych pod najprostszym osiowo symetrycznym sposobie obciążenia. Opracowano i wdrożono metodykę badań oraz systemy pomiarowe naprężeń i przemieszczeń zapewniające pełny i wiarygodny opis zachowania się modelu pod obciążeniem. W artykule omówiono rezultaty przeprowadzonych badań, które ujawniły osobliwości i stany pracy statycznej hiperboloidalnej powłoki chłodni kominowej, które przy obecnym stanie wiedzy trudno osiągnąć na drodze rozważań analitycznych.

2. Badania modelu pod obciążeniem osiowo symetrycznym

Model użyty do badań wiernie odwzorowywał w skali 1:100 chłodnię kominową typu Jaworzno III, Rybnik II o wysokości 120 m i minimalnej grubości 14 cm. Do wykonania modelu zastosowano kompozycję epoksydowo mineralną plastyfikowaną żywicą po-

liestrową. Posiada ona własności ciała chwilowo liniowo sprężystego. Moduł Yunga wynosił $E_0^{18^\circ\text{C}} = 3640 \text{ MPa}$, zaś współczynnik Poissona był z określonym prawdopodobieństwem niezależny od poziomu naprężeń i temperatury i wynosił $\nu = 0,336$. Powłokę modelu wykonywano przez sukcesywne nanoszenie płynnego tworzywa na wcześniej przygotowaną powierzchnię wewnętrzną powłoki. Tworzywo to było profilowane tak, aby uzyskać powierzchnię zewnętrzną powłoki a następnie po utwardzeniu szlifowane do żądanej grubości modelu powłoki. Pozostałe elementy modelu, tj. pierścień górny, słupy ze stopami, wykonywano osobno doklejało do powłoki, po czym zatopiono je w wymodelowanym, nie stwardniałym jeszcze pierścieniu fundamentowym. Fundament modelu był przyklejony do sztywnego stendu, co odpowiadało posadowieniu na sztywnym podłożu gruntowym.



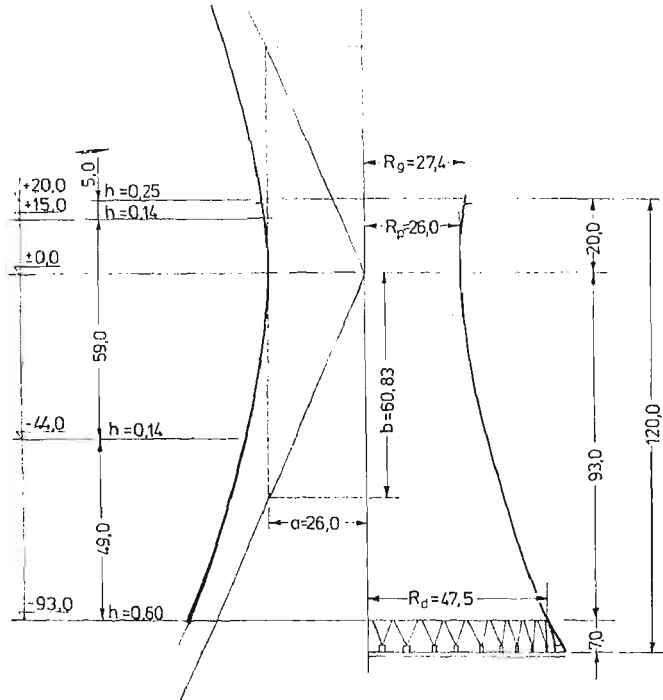
Rys. 1. Widok stanowiska badawczego.

Obciążenie od ciężaru własnego zastąpiono na modelu obciążnikami zaczepionymi za pomocą wiotkich cięgien do powłoki w środkach pól wyznaczonych przez siatkę podziału powłoki. Zastosowano podział na 15 równoleżników oraz od 40 do 120 południków, w wyniku czego uzyskano 1280 pól. Dla przeprowadzenia obciążenia i odciążenia zastosowano ruchomy pomost oparty na trzech podnośnikach hydraulicznych. Poprzez podnoszenie i opuszczanie pomostu kolejno odciążano i obciążano model. Rysunek 1 przedstawia widok stanowiska badawczego, zaś rysunek 2 wymiary modelu. W badaniach zastosowano podobieństwo modelowe, w którym dla przyjętej a priori skali wymiarów

liniowych i materiału modelowego inne skale ścisłego podobieństwa modelowego były jednoznacznie określone i wynosiły:

- skala naprężeń $K\sigma = 1/8,8$
- skala przemieszczeń $K_w = 1/100$.

W badaniach zastosowano w kolejnych etapach dwukrotne, sześciokrotne i ośmiokrotne zwiększenie obciążeń ponad wartości wymagane przez podobieństwo ścisłe. W artykule podano wyniki ilościowe uzyskane dla ośmiokrotnego przeciążenia.



Rys. 2. Wymiary modelu chłodni [cm].

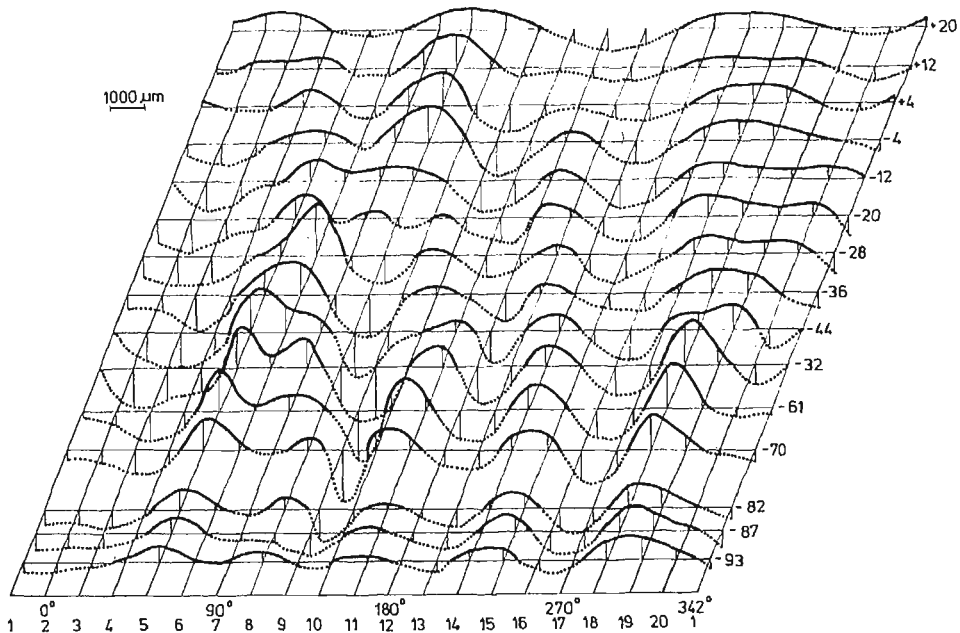
Dla uzyskania jak największej ilości informacji dotyczącej reakcji modelu na obciążenie zastosowano następujące ilości punktów i przekrojów pomiarowych:

- a) pomiar przemieszczeń normalnych powłoki modelu w 20 punktach na obwodzie i na od 6 do 16 poziomach wzdłuż wysokości oraz pomiar przemieszczeń stycznych (u, v) na brzegach powłoki,
- b) pomiar tensometryczny normalnych naprężeń południkowych i równoleżnikowych w 10 punktach na obwodzie i na 6 poziomach, w tym na poziomie -28 pomiar zagęszczono do 20 punktów na obwodzie,
- c) pomiar tensometryczny naprężeń na słupach 10 parach słupów modelu.

Pomiary przemieszczeń oraz tensometryczne pomiary naprężeń przeprowadzono przy użyciu automatycznego systemu przeprowadzania pomiarów i przetwarzania danych „ASMT-CHŁODNIE” wersja „stress” i „displ”, opartego na sprzężeniu „on line” zestawu aparatury tensometrycznej firmy Brüel and Kjaer (mostek typu 1526) z kalkulatorem

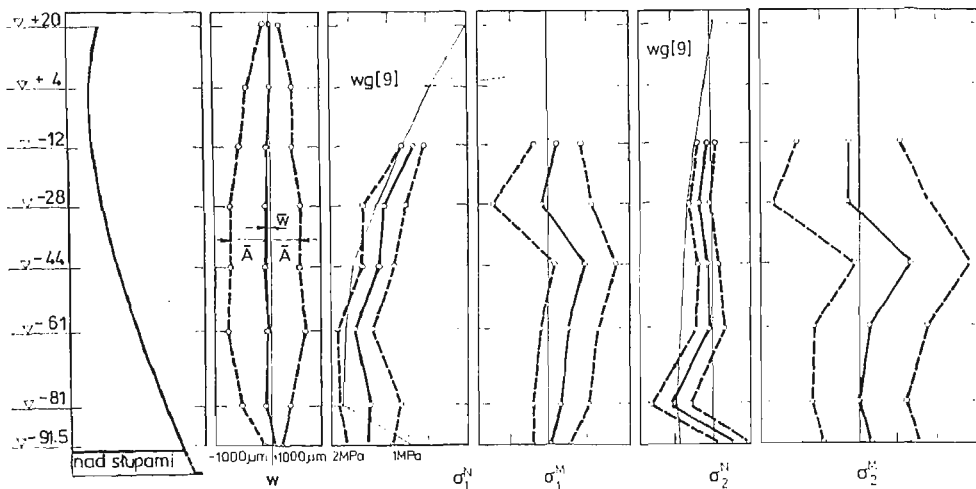
programowym Computorp G-22 typu 425 oraz na odpowiednim oprogramowaniu sterowania pomiarami i przetwarzania danych pomiarowych. W wersji „displ” przystosowano odpowiednio mostek tensometryczny do pomiaru przemieszczeń. W trakcie obciążenia modelu przeprowadzono również pomiar ciągle naprężeń i przemieszczeń za pomocą systemu składającego się z 12 kanałowego mostka dynamicznego TDA-6 Mikrotechna oraz oscylografu pętlicowego typu 2925 japońskiej firmy YEV. Do pomiarów przemieszczeń użyto czujniki indukcyjne produkcji krajowej typu MDKa-E o dokładności w systemie $1 \mu\text{m}$ i zakresie $\pm 1000 \mu\text{m}$. Pomiary odkształceń przeprowadzono używając krajowych tensometrów foliowych typu FK oraz kratowych typu RL. Zastosowano oryginalną metodykę pomiarów tensometrycznych naprężeń opartą na metodzie porównywania mierzonych na modelu odkształceń ze wzorcem oraz zastosowaniu pełnej kompensacji temperaturowej przy użyciu osobnego modelu kompensacyjnego [12, 13]. Wielkości stanu odkształceń i naprężeń określono za pomocą prostokątnych rozet naklejonych na powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej modelu i rozdzielano je na składowe stanu błonowego i zgięciowego przy założeniu liniowego ich rozkładu na grubości.

Wyniki. W wyniku pomiarów otrzymano pełny obraz zdeformowanej icsop modelu. Na rysunku 3 zestawiono pomierzone przemieszczenia normalne powłoki. Po-

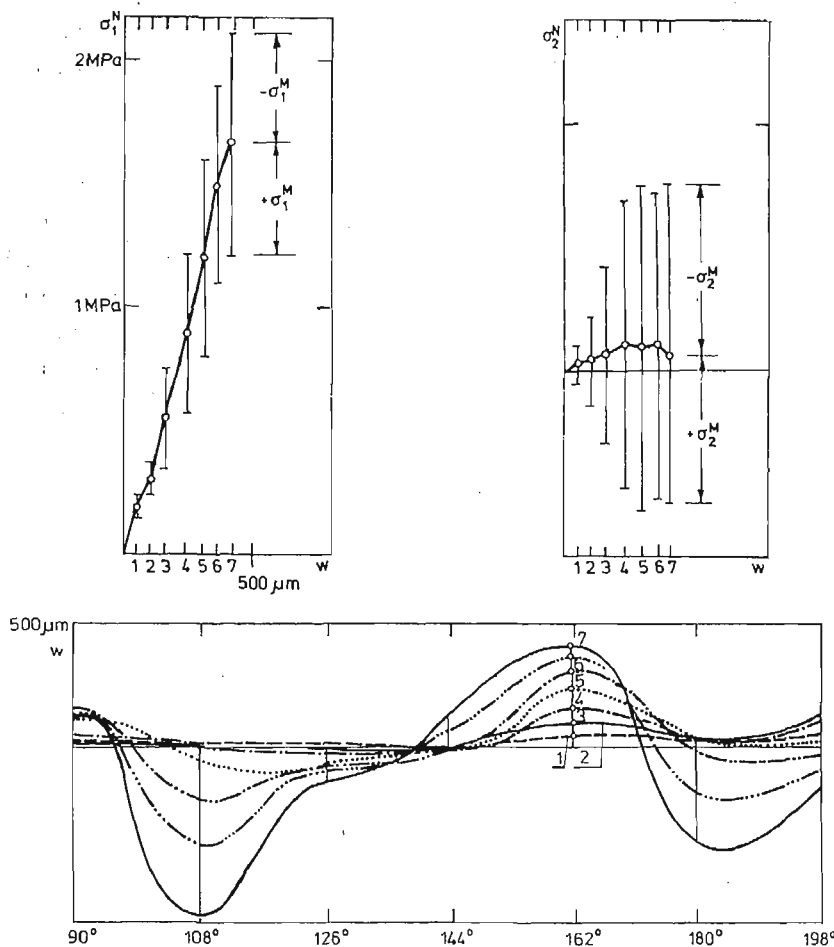


Rys. 3. Wykres przemieszczeń normalnych powłoki modelu.

wierzchnia modelu przybrała pod obciążeniem osiowo symetrycznym symulującym ciężar własny globalną na całej wysokości postać falową. Ilość powstałych na obwodzie fal waha się od 5 na dolnym do 3 na górnym brzegu powłoki. Podobnie jak przemieszczenia normalne tak i styczne do powierzchni środkowej (v , u) pomierzone na brzegach mają charakter falowy. Przebieg przemieszczeń normalnych wzdłuż południków nie wykazuje wyraźnie

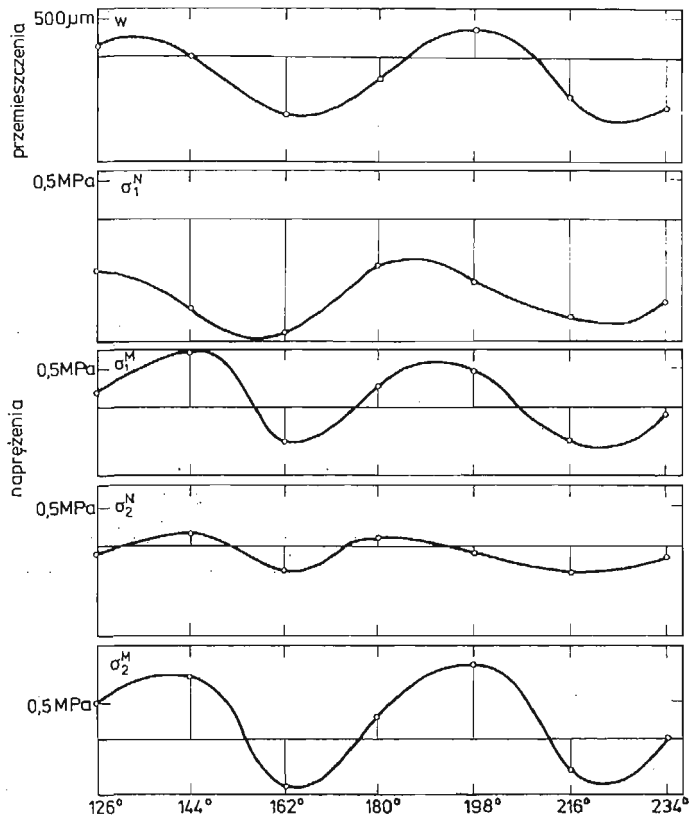


Rys. 4. Wartości średnie oraz uśrednionych amplitud przemieszczeń na obwodzie powłoki.



Rys. 5. Rozwój przemieszczeń i naprężeń w czasie obciążenia modelu na poz. — 44.

określonych prawidłowości, albowiem jest zdeterminowany przede wszystkim przebiegiem falowym po obwodzie powłoki. Można doszukać się pewnej tendencji układania się punktów charakterystycznych fal po prostych tworzących hiperboloidy. Amplitudy fal przemieszczeń normalnych osiągały wartości rzędu grubości powłoki modelu. Redystrybucja równoleżnikowych i południkowych naprężeń błonowych i zgięciowych uzyskana z pomiarów naprężeń na powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej powłoki przybrała także falowy



Rys. 6. Przebieg przemieszczeń i naprężeń na poz. — 28.

charakter. Charakteryzowała się ona dużymi, szczególnie na obwodzie naprężeniami zginającymi, a ponadto wszystkie składowe naprężenia, w tym i błonowych naprężenia południkowych były silnie uzależnione od przebiegu przemieszczeń normalnych na obwodzie (rys. 6). Stwierdzono, że pomiar w 10 punktach na obwodzie nie daje wystarczającego obrazu zmian przebiegu mierzonych naprężeń, dlatego dokonano tylko statystycznej oceny tendencji średniej i amplitud „falowania”. Te wielkości zestawiono i porównano z wartościami otrzymanymi wg teorii zgięciowej [14] na rysunku 4. Zauważyć można, że przebieg uśrednionych wartości południkowych naprężeń błonowych jest dość zgodny z rozwiązaniami stanu bezmomentowego, zaś przebieg oscylujących wokół zera błonowych naprężeń równoleżnikowych przy równoczesnych dużych wartościach naprężeń zginających wskazuje na występowanie globalnego stanu bez wydłużeń powierzchni środkowej powłoki. Równo-

leżnikowe naprężenia błonowe w dolnym obszarze powłoki noszą charakter efektu brzegowego dla tego stanu oraz rozkładu „tarczowego” od podparcia słupami dolnej krawędzi powłoki. Z pomiarów naprężeń na słupach wynika, że pracują one na skutek „falowania” się krawędzi dolnej powłoki w złożonym stanie. Oprócz naprężeń osiowych występują naprężenia dwuosiowego zginania, skręcania i ścinania. Pomierzone w słupach wartości naprężeń normalnych i stycznych są także silnie uzależnione od przebiegu przemieszczeń krawędzi dolnej powłoki.

Dla zbadania charakteru i sposobu kształtowania się postaci falowej powłoki obserwowano na poziomie -44 proces przemieszczania się wybranych punktów na obwodzie wraz z przyrostem naprężeń w tych punktach (rys. 5). Proces falowego deformowania modelu zaczyna się od początku obciążenia, przy czym przyrosty błonowych naprężeń podłużnikowych są prawie w liniowej zależności od przemieszczeń normalnych. Inny charakter mają przyrosty naprężeń równoleżnikowych wskazujące na fakt, że powłoka na obwodzie przemieszcza się bez odpowiedniego przyrostu błonowych naprężeń równoleżnikowych czyli tendencji do odkształceń bez wydłużeń powierzchni środkowej.

Każdorazowo po odciążeniu model wracał do swej pierwotnej postaci i zachowywał zdolność do przejmowania obciążeń. W badaniach nie zaobserwowano zjawiska bifurkacji czy też przeskoku rozpatrywanego w teoriach stateczności konstrukcji.

Falowy po obwodzie przebieg przemieszczeń normalnych stwierdzono we wszystkich etapach badań tj. między innymi przy dwukrotnym i sześciokrotnym przeciążeniu jak również przy brzegowym obciążeniu montażowym [15]. Przeprowadzone kontrolne pomiary na badanym modelu oraz na drugim, „nie skażonym” tensometrami itp. pod pierścieniowym osiowo symetrycznym o małej wartości obciążeniu przyłożonym na poziomie -44 , wykazały całkowitą powtarzalność zjawiska falowego charakteru deformacji powłoki.

3. Analiza czynników wpływających na wyniki badań modelowych

Dla wyjaśnienia przyczyn osobliwego zachowania się hiperboloidalnej powłoki chłodni kominowej pod obciążeniem osiowo symetrycznym przeprowadzono analizę czynników wpływających na wyniki badań oraz przeprowadzono dodatkowe badania modelowe. Podstawą analizy było założenie, że reakcja modelu na obciążenie jest złożonym procesem wieloczynnikowym. Czynniki mające wpływ na wyniki badań dotyczą trzech zasadniczych elementów podobieństwa zjawisk w modelu i obiekcie rzeczywistym, a mianowicie:

- a) stopnia zachowania podobieństwa sztywności konstrukcji
- b) stopnia zachowania podobieństwa warunków brzegowych
- c) stopnia zachowania podobieństwa obciążenia.

Analiza abstrahuje od zasadniczego pytania w jakim stopniu quasi sprężysty model może odwzorować skomplikowane zachowanie się rzeczywistej konstrukcji chłodni w aspekcie niejednorodności struktury betonu, reologii oraz dwufazowej pracy materiału (żelbetu). Opiera się ona na założeniu a priori, że zjawiska fizyczne w ujęciu analitycznym i na modelu przebiegają jednakowo. W wyniku szczegółowej analizy błędów pomiarowych stwierdzono, że nie wpływają one na jakościowy obraz mierzonych wielkości.

ad. a) Jakość badań modelowych jest uzależniona przede wszystkim od stopnia zachowania ścisłego podobieństwa geometrii, warunków brzegowych i cech materiałowych. Nie można więc porównywać wyników uzyskanych dla różnych wymiarów geometrycznych i warunków brzegowych modeli. Jak już wspomniano w badaniach przeprowadzonych przez autorów zachowano ściśle podobieństwo geometryczne wszystkich elementów konstrukcji chłodzi t.j. powłoki, słupów, górnego pierścienia i pierścieniowego fundamentu wraz ze stopami słupów. Grubości poszczególnych części modelu starano się wykonać z dokładnością 0,1 mm, zaś wymiary gabarytowe z dokładnością 1 mm. Wiadomo, że model zawsze obciążony jest określonymi błędami wykonawczymi, dlatego dla modeli użytych w badaniach przeprowadzono pomiary grubości za pomocą grubościomierza ultradźwiękowego UNIPAN typu 546 z głowicą typu 4LDS7G produkcji krajowej. Średnie wartości z 20 pomiarów na obwodzie powłoki wraz z oszacowaniem błędów rozrzutu wokół średniej zamieszczono w tabelicy nr 1. Pomierzone wartości są miarą zarówno grubości jak i jedno-

Tabela nr 1. Wyniki pomiaru grubości modelu

Równoleżniki pomiarowe	Grubość projekt. mm	Średnia wartość mm	Błąd rozrzutu wokół średniej mm
		$\bar{h} = \frac{\sum h}{20}$	$t_{0,95} = S_{(h)} \cdot t_{0,95}$
+20	2,50	2,57	0,040
+12	1,62	1,64	0,014
+ 4	1,40	1,45	0,013
- 4	1,40	1,44	0,007
-12	1,40	1,46	0,019
-20	1,40	1,46	0,014
-28	1,40	1,46	0,018
-36	1,40	1,48	0,013
-44	1,40	1,48	0,013
-52	1,40	1,50	0,010
-61	1,54	1,59	0,013
-70	1,64	1,66	0,017
-76	1,74	1,76	0,010
-80	1,79	1,82	0,011
-84	2,25	2,28	0,011
-88	3,96	3,97	0,016
-93	6,00	6,10	0,026

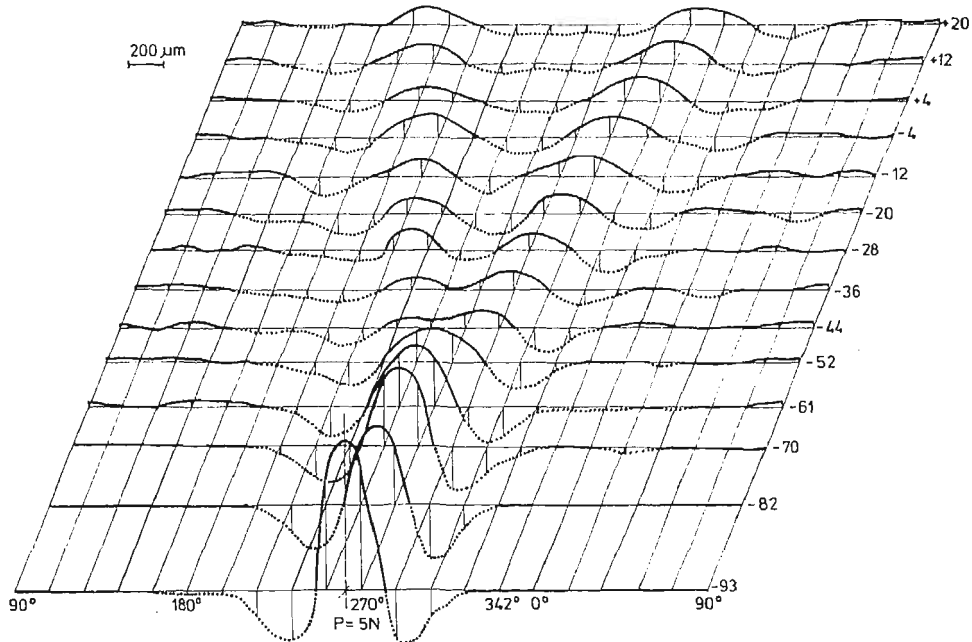
rodności powłoki modelu. Zmiany grubości powłoki modelu nałożone na przebieg przemieszczeń normalnych nie wykazały określonych korelacji. Tak samo skażenia grubości w postaci naklejonych na powłokę tensometrów, kostek lutowniczych, przewodów jak również lokalny defekt w pobliżu południka 148° nie miał zasadniczego wpływu na globalny przebieg falowego odkształcania się modelu. Potwierdzają to dodatkowe badania na nieskażonym w ten sposób modelu kontrolnym. Wpływ tego typu defektów i skażeń mają charakter lokalny, tym niemniej zdaniem autorów mogą one inicjować osobliwy globalny proces deformacji powłoki.

Stosując do badań, których interpretacja oparta jest na zasadzie sprężystych własności betonu i materiału modelowego, tworzywo sztuczne o własnościach zależnych od temperatury i czasu wynikł problem ich poprawności. Bazując na pojęciu o chwilowych sprężystych własnościach materiałów oraz na zasadzie pomiaru opartej na porównywaniu wielkości mierzonych na modelu z wielkościami na wzorcach, opracowano i zastosowano metodykę badań 13, która w poważnym stopniu eliminuje błędy wynikłe z niekorzystnych własności tworzywa jako materiału modelowego.

ad. b) Realizowane w badaniach usztywnienia brzegów powłoki mają duże znaczenie na zachowanie się modelu w takim stopniu jaki ma wpływ tzw. efekt brzegowy na stan deformacji modelu. Przy długich a nie całkowicie skrępowanych brzegach prawie zawsze stwierdzano globalny stan wybozeniowy, zaś przy modelach krótkich i brzegach utwierdzonych występuje najczęściej lokalne w środku wybozenie propagujące się do obszarów zamocowania. Teoretyczne rozważania nt. wpływu warunków brzegowych na charakter pracy statycznej, w tym i możliwość występowania stanu czystego zginania zawarte są w pracach [1, 2, 3, 4]. Analizując stan osiowo-symetryczny w powłoce hiperboloidalnej od obciążenia przyłożonego na brzegach DULAČSKA [16] dowodzi, że cienka powłoka hiperboloidalna może doznawać deformacji bez wydłużeń powierzchni środkowej gdy jeden brzeg powłoki ma możliwość przemieszczeń w kierunku południkowym, a w tych eksperymentach, w których obciążenie realizuje się za pomocą sztywnych płyt zamocowanych na brzegach taki stan nie może wystąpić. Zestawione w pracy [17] wyniki badań modelowych wskazują, że modele utwierdzone na jednym brzegu a na drugim swobodne, wybaczą się przy obciążeniach bliskim stanowi bez wydłużeń powierzchni środkowej powłoki i że zjawisko jest w wysokim stopniu nieliniowe. Dla ustalenia wpływu zmian warunków brzegowych, w tym i rozchodzenie się zaburzeń brzegowych, autorzy przeprowadzili obszernie dodatkowe badania na modelu. Rozpatrywano wpływ usztywnienia górnej krawędzi powłoki pierścieniem, wpływ usztywnienia górnego brzegu sztywną przeponą, wpływ sił skupionych przyłożonych na brzegach, wpływ usunięcia grupy podpór i stwierdzono:

- dla obciążenia symulującego ciężar własny zastosowany pierścieniem górnym stężającym powłokę zmniejsza na górnej krawędzi amplitudy fal przemieszczeń o połowę, przy czym poniżej przewężenia zmiany te są nieznaczne,
- dla pionowego pierścieniowego obciążenia umieszczonego na poziomach -40 , $\pm 0,0$, $+20$ stwierdzono, że usztywnienie górnego brzegu sztywną przeponą nie ma zasadniczego znaczenia na obraz deformacji w środku powłoki (poz. -28),
- badano reakcję modelu na siły skupione normalne przyłożone do powłoki na brzegu górnym, dolnym i w środku powłoki (-40). W tych badaniach stwierdzono, że zaburzenie w postaci sił skupionych przyłożonych do powłoki rozprzestrzenia się na całą wysokość powłoki na obszarze ograniczonym liniami asymptotycznymi powierzchni środkowej (rys. 7). Podobnie zaburzenie w postaci wycięcia jednej, a potem trzech grup słupów przy obciążeniu ciężarem własnym propaguje się daleko w głąb powłoki wzdłuż linii asymptotycznych, zmieniając obraz powierzchni zafalowanej powłoki,
- badano obraz przemieszczeń normalnych przy obciążeniu górnego brzegu kolejno 1, 3, 4, 5, 8, 13, 20 i 40 siłami skupionymi rozmieszczonym każdorazowo symetry-

cznie po obwodzie i stwierdzono rozchodzenie się i nakładanie wywołanych przez nie zaburzeń wzdłuż linii asymptotycznych. Dla powyżej 13 tj. 20, 40 sił na obwodzie obraz odkształconej powłoki poza proporcjonalnym zwiększeniem amplitud fal nie zmienił się, co świadczy, że sposób podparcia (50 par słupów) nie jest bezpośrednią przyczyną falowej postaci deformacji. Większą, a może dominującą rolę odgrywa fakt, że słupy podparcia pozwalają na przemieszczenia dolnej krawędzi powłoki we wszystkich kierunkach (u, v, w).



Rys. 7. Rozchodzenie się zaburzenia od siły normalnej przyłożonej na dolnym brzegu powłoki.

ad. c) Charakter i sposób przyłożenia obciążeń decydują w sposób znaczący o zachowaniu się powłoki. Z drugiej strony jest to czynnik, który najtrudniej da się odwzorować na modelu. Dla przypadku obciążenia ciężarem własnym istnieją niepokonalne trudności w wiernym zamodelowaniu jego masowego charakteru oraz sposobu jego przyrastania wraz z postępowaniem wznoszenia powłoki tak, aby w miarę dokładnie wywołać stan naprężeń i odkształceń realizujący się w obiekcie rzeczywistym. Najczęstszym spotykanym sposobem obciążenia modelu jest jego dyskretyzacja za pomocą obciążników lub badania na maszynach wytrzymałościowych realizujących obciążenie na krawędziach modelu. Urządzenia te w zależności od rozwiązania konstrukcyjnego może być typu sztywnego lub obciążnikowego. Stosowane zazwyczaj sztywne przepony na krawędziach modelu powłoki poza ich usztywnieniem mogą ulegać obrotowi lub też powodować mimośrodowe przekazywanie się obciążeń. Obciążenie powierzchniowe jest wywoływane najczęściej przez medium (powietrze, ciecz) działające wewnątrz lub zewnątrz modelu. Szybkość realizowania obciążenia, ewentualne wpływy dynamiczne mogą także wpływać na wyniki badań. Taki sposób obciążania modelu zmienia w zasadniczo stan naprężeń i odkształceń na wysokości

modelu oraz zmienia jego warunki zamocowania. W przeprowadzonych przez autorów badaniach zastosowano obciążniki zawieszane na modelu wg przyjętej siatki dyskretyzacji masowego charakteru obciążenia ciężarem własnym. Przyjęto bardzo gęsty w miarę możliwości technicznych podział wzdłuż równoleżników. Autorzy przeprowadzili badania w jakim stopniu zagęszczenie obciążników wpływa na przebieg zjawiska deformowania się modelu. Dokonano pomiarów przemieszczeń normalnych powłoki modelu przy zmiennym, na poziomie -40 i brzegu górnym, zagęszczeniu na obwodzie siatki dyskretyzacji osiowo symetrycznego obciążenia pierścieniowego i stwierdzono, że podział obciążenia na 20 i powyżej części na obwodzie nie powoduje dalszych zmian, poza wielkościami amplitud w przebiegu falowego odkształcania się powłoki modelu, tzn. nie zależy on od tak przyjętej siatki podziału. Na podstawie wyników dot. wpływu sił skupionych przykładanych pod różnymi kątami do powłoki stwierdzono szczególne znaczenie sił normalnych do powłoki. Zamiana np. grawitacyjnego charakteru działania ciężaru własnego na siły działające na krawędzie i ciśnienie medium na powierzchnię powłoki modelu może spowodować znaczne zmiany w przebiegu deformacji modelu. Należy spodziewać się dużego wpływu sił normalnych np. od wiatru na wielkości zafalowanej deformacji powłoki. Świadczą o tym także wyniki badań modelowych przeprowadzonych w tunelach aerodynamicznych, w których uzyskiwano z reguły przebieg deformacji zbliżony do stanu bez wydłużeń powierzchni środkowej.

Wyniki analizy. Konfrontując rozważone czynniki ze sposobem przeprowadzonych badań stwierdzić można, że zrealizowano najbardziej wierne ze znanych badań modelowych ściśle podobieństwo geometryczne wszystkich elementów konstrukcji chłodni i warunków brzegowych. Obciążenie w zakresie zastosowanej dyskretyzacji w miarę wierne i bez wpływu na przebieg zjawiska odwzorowuje działanie ciężaru własnego. Ewentualne tolerancje w wymiarach, grubości, obciążenia mogą powodować pewne skażenie stanu wyjściowego modelu, które jednak nie ma decydującego wpływu na mechanizm deformowania się modelu. Autorzy na podstawie obserwacji reakcji modelu na siły skupione sądzą, że główną przyczyną falowego od początku obciążenia stanu przemieszczeń i naprężeń mogą być osobliwości geometrii otwartej powłoki hiperboloidalnej. Problem ten wymaga dalszych badań.

4. Wnioski końcowe

Wyniki badań znacznie różnią się od znanych rozwiązań teoretycznych i rezultatów badań modelowych. Potwierdzają one osobliwości pracy statycznej bardzo cienkich powłok o ujemnej krzywiznie Gaussa jaką jest hiperboloidalna powłoka chłodni kominowej:

- a) Powłoka modelu pod obciążeniem osiowo symetrycznym symulującym ciężar własny od początku procesu obciążania przybierała globalną postać falową. Na równo z naprężeniami stanu błonowego, zgięciowego występują naprężenia stanu bez wydłużeń powierzchni środkowej. Takie zachowanie się modelu stwierdzono we wszystkich przeprowadzonych etapach badań.

- b) W badaniach nie zaobserwowano zjawisk świadczących o wystąpieniu bifurkacji, przeskoku rozumianych w kategoriach jednowymiarowych teorii stateczności. Od początku obciążenia powłoka przybierała w sposób łagodny postać falową.
- c) Zaburzenia przyłożone na brzegach i na wysokości powłoki propagują się daleko w głąb powłoki wzdłuż linii asymptotycznych powierzchni środkowej.
- d) Zaobserwowane na modelu zjawiska sygnalizują złożoność pracy statycznej cienkich powłok prostokreślnych o ujemnej krzywiznie Gaussa. Problem zachowania się tego typu powłok podpartych punktowo nie jest jeszcze całkowicie zbadany. Zdaniem autorów główną przyczyną zaobserwowanego w badaniach falowego od początku obciążenia stanu przemieszczeń i naprężeń mogą być osobliwości geometrii otwartych, wklęsłych powłok o ujemnej krzywiznie. Dlatego istnieje konieczność podjęcia obszernych badań teoretycznych i eksperymentalnych.
- e) Stosując metodę badań modelowych, dla rozwiązywania problemów pracy statycznej konstrukcji powłokowych, poza koniecznością wiernego zachowania podobieństwa sztywności, warunków brzegowych i obciążeń dla zapewnienia właściwej interpretacji rezultatów badań należy postawić szczególne wymagania metodyce badań, a przede wszystkim ilości i jakości opisu stopni swobody całej powierzchni modelu.

Literatura cytowana w tekście

1. W. Z. WŁASOW, *Obszczaja teorija oboloczek*, Gostechizdat, Moskwa 1949 r.
2. V. V. NOWOŻIŁOW, *Teorija tonkich oboloczek*, Sudizdat, Leningrad 1951 r.
3. W. FLÜGGE, *Powłoki, obliczenia statyczne*, Arkady, Warszawa 1972 r.
4. A. Ł. GOLDENWEIZER, *Teorija uprugich tonkich oboloczek*, Nauka, Moskwa 1976 r.
5. W. PIETRASZKIEWICZ, *Nieliniowe teorie cienkich powłok sprężystych*, Konstrukcje powłokowe. Teoria i zastosowania t. I, PWN, Warszawa 1978, str. 25 - 53.
6. P. P. COLE, J. F. ABEL, D. P. BILLINGTON, *Buckling of Cooling-Tower Shells: State-of-the-Art*, Journal of the Structural Division, ASCE, June 1975, pp. 1185 - 1203 and discussion by Chang-Hua-Yeh, Shieh W.Y.J. — January 1976, Mungan J. — Jan. 1976, and closure April 1977.
7. P. P. COLE, J. F. ABEL, D. P. BILLINGTON, *Buckling of Cooling-Tower Shells: Bifurcation Results*, Journal of the Structural Division, ASCE, June 1975 pp. 1205 - 1222, and discussion by Stalbohn H., Mungan I., Gould P. I., Jan. 1976 and closure April 1977.
8. T. I. DER, R. FIDLER, *A model study of the buckling behavior of hyperbolic shells*, Proceedings Institut Civil Engineers Sept. 1968.
9. O. MATEJA, *Stateczność hiperboloidalnych chłodni wieżowych obciążonych ciężarem własnym*. Praca doktorska. Biblioteka Politechniki Śląskiej, Gliwice 1964.
10. J. WIANECKI, *Stateczność obrotowej powłoki hiperboloidalnej obciążonej na brzegach*, Biblioteka IPPT PAN W-wa 1962.
11. W. ZERNA i inni, *Beuluntersuchungen an hyperbolischen Rotationsschalen*, Westdeutscher Verlag, Opladen, 1974.
12. J. OW CZARZY, J. KOSSOWSKI, *Badania modelu hiperboloidalnej powłoki chłodni kominowej pod obciążeniem osiowo symetrycznym*, Inżynieria i Budownictwo nr 11/79.
13. J. OW CZARZY, J. KOSSOWSKI, *Pomiary tensometryczne na modelach z tworzyw sztucznych*, Inżynieria i Budownictwo nr 9/79.
14. CZ. SAPIAN, P. KONDERLA, *Jednolity system analizy numerycznej chłodni kominowej — system Cooltran*, Wrocław 1977, Praca Politechniki Wrocławskiej wykonana na zlecenie PBCh „Chłodnie Kominowe”.
15. J. OW CZARZY, J. KOSSOWSKI, *Praca statyczna hiperboloidalnej powłoki chłodni kominowej w trakcie jej wznoszenia w świetle badań modelowych*, Inżynieria i Budownictwo 1/81.

16. E. DULAČSKA, J. A. NAGY, *On the Buckling of Axially Loaded Hyperbolic Shells of Revolution*, Konferencja IASS, Madryt 24÷28.09.1979 г.
17. J. G. A. CROLL, A. H. CHILVER, *Approximate Estimates of the Stability of Cooling-Towers Under Wind-Loading*, Konferencja IASS Bruksela 24÷25.05.1971 г.

Р е з ю м е

НЕКЛАССИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ МОДЕЛЯ ГИПЕРБОЛИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ
ГРАДИРНИ ПРИ ОСЕСИМЕТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ

Испытания обнаруживают существование особенности статики гиперболической оболочки градирни. Оболочка сначала нагружения принимает общую волнистую форму: Совместно с тангенциальными напряжениями появляются изгибающие напряжения от деформации без удлинения и сдвига срединной поверхности. Отмечено тоже, что возмущения розпрост раняются вигуб оболочки вдоль асимптотических линии срединной поверхности. Поведение модели потверждает слотный характер статики тонких, открытых, вагнутых, линейчатых оболочек с отрицательной кривизной Гаусса.

S u m m a r y

A NONCLASIC BEHAVIOUR MODEL OF HYPERBOLIC SHELL OF COOLING TOWER
UNDER AXISYMMETRIC LOADING

Results of the model study show peculiarities of stress state in hyperbolic shells of cooling tower. The shell has from the initial state a wavy form. Beside the membrane stress also the bending one exists due to the wavy form. It has been observed that the edge loadings propagate into the shell along the asymptote lines of mid surface. The model of the shell shows the complexity of the stress state of thin nonclosed and nonconvex rectilinearly drawn shells with negative Gaussian curvature.

Praca została złożona w Redakcji dnia 15 października 1979 roku.
