

BADANIA MODELOWE POWŁOKI HIPERBOLOIDALNEJ CHŁODNI KOMINOWEJ
PODDANEJ WYMUSZONYM PRZEMIESZCZENIOM

REINHOLD K A Ł U Ż A (OPOLE)

1. Wstęp

Cienka powłoka o kształcie hiperboloidy jednopowłokowej stanowi między innymi podstawowy element konstrukcyjny chłodni kominowych.

Grubość powłoki hiperboloidalnej chłodni kominowej w stosunku do jej promieni jest niewielka, co sprawia, że ma małą sztywność. Może więc ulegać dość dużym przemieszczeniom pod wpływem obciążenia wiatrem oraz nierównomiernego osiadania fundamentu (może wystąpić zagadnienie nieliniowo geometryczne). W ostatnich latach ukazały się dwie prace [1, 2] poświęcone tej tematyce, w których uwzględniono w sposób przybliżony nieliniowość, w sensie geometrycznym, teorię cienkich powłok. Rozwiązanie problemu dla powłoki hiperboloidalnej chłodni kominowej obciążonej wiatrem uzyskano metodą elementów skończonych.

W pracy [1] stwierdzono, że uwzględnienie geometrycznej nieliniowości przy przyjętym obciążeniu wiatrem nie ma istotnego wpływu na rozkład sił południkowych i równoleżnikowych w powłoce. Wpływa natomiast na wielkości momentów zginających, a różnice wynikające z uwzględnienia nieliniowej, w sensie geometrycznym, teorii powłok są największe w górnych partiach powłoki i w przewężeniu (wynoszą około 40%). Warto dodać, że w pracy [1] otrzymano przemieszczenia prostopadłe do środkowej powierzchni powłoki rzędu jej grubości.

W pracy [2] stwierdzono natomiast, że uwzględnienie nieliniowej, w sensie geometrycznym, teorii powłok wpływa zarówno na rozkład sił, jak i momentów zginających w hiperboloidalnej powłoce, a wynikające stąd różnice między rozwiązaniami uzyskanymi na podstawie teorii liniowej i nieliniowej dla przyjętych obciążeń rozłożonych na powierzchni powłoki (uwzględniono obciążenie rozłożone wzdłuż obwodu powłoki według funkcji $p = p_0(1 + \cos \beta)$, gdzie β — kąt środkowy), są niewielkie (maksymalnie 15%). W pracy tej stwierdzono ponadto, że największe różnice między rozwiązaniami liniowymi a nieliniowymi występują w strefie przypodporowej powłoki.

Brak natomiast rozwiązań uwzględniających nieliniowość, w sensie geometrycznym, teorię cienkich powłok, dotyczących wpływu znacznie większych przemieszczeń dolnego brzegu powłoki (np. rzędu grubości powłoki) na rozkład sił w powłoce chłodni kominowej.

Wprawdzie w pracach [3, 4, 5, 6] podano rozwiązania dotyczące wpływu przemieszczeń dolnego brzegu powłoki na rozkład sił w powłoce chłodni kominowej, jednakże problem rozwiązano według liniowej, w sensie geometrycznym, teorii powłok cienkich.

Teoria ta, jak wiadomo, stosowana jest w zakresie małych przemieszczeń, a granice jej stosowalności mają charakter konwencjonalny. Oznaczając przez $|w|$ moduł przemieszczenia cienkiej powłoki przyjmuje się [7, 8, 9], że dla $|w|/h \leq 0,2$, gdzie h oznacza grubość powłoki, można stosować teorię geometrycznie liniową, a dla $|w|/h \geq 5$ pełną teorię nieliniową. W przypadkach, gdy $|w|/h \cong 1$ w równaniach geometrycznych zachowuje się na ogół wyrazy nieliniowe względem składowej wektora przemieszczenia, normalnej do powierzchni środkowej, a pomija pozostałe wyrazy nieliniowe.

Ustalenie granicy słuszności stosowania liniowej, w sensie geometrycznym, teorii cienkich powłok na drodze analitycznej, względnie bezpośrednich badań prowadzonych na obiektach w naturze jest, jak wiadomo, trudne, a czasem wręcz niemożliwe. Dlatego też autor podjął z tego zakresu badania modelowe, które są tematem niniejszej pracy.

Celem pracy jest przedstawienie wyników z badań przeprowadzonych na powłoce modelu hiperboloidalnej chłodni kominowej, której dolny brzeg poddano wpływom pionowych oraz poziomych przemieszczeń. Pionowe przemieszczenia dolnego brzegu powłoki modelu wymuszano według funkcji $u = \Delta_p \cos 2\beta$, przemieszczenia zaś poziome według funkcji $w = \Delta_h \cos 2\beta$, gdzie Δ_p i Δ_h oznaczają maksymalne przemieszczenia wywołane dla kąta środkowego $\beta = n \cdot 90^\circ$ ($n = 0, 1, 2, 3, 4$). Przy pionowych przemieszczeniach dolnego brzegu powłoki modelu narzucono wzdłuż tego brzegu obwodowe odkształcenia, które określono według funkcji $\varepsilon_m = \varepsilon_p \cos 2\beta$, gdzie ε_m i ε_p oznaczają obwodowe odkształcenia dolnego brzegu modelu i górnego pierścienia układu deformującego, wynikłe z giętej pracy tego pierścienia.

2. Modele powłok hiperboloidalnych chłodni kominowych oraz układ deformujący dolny brzeg powłoki modelu

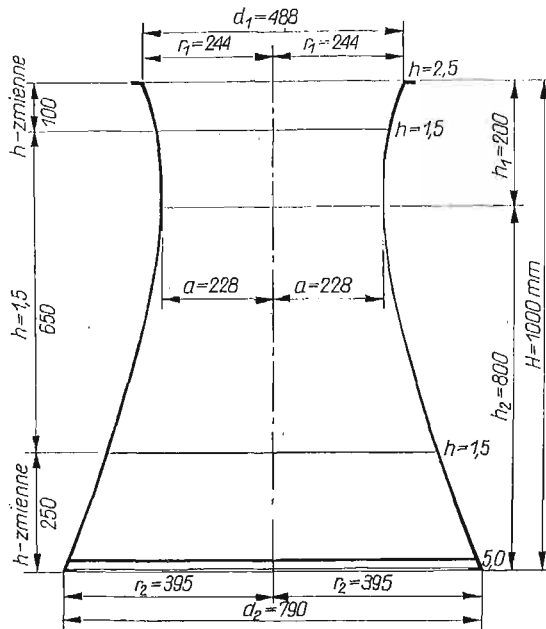
Modele powłok hiperboloidalnych chłodni kominowych wykonano w skali 1:120 z modyfikowanej żywicy epoksydowej, zachowując pełne podobieństwo geometryczne modelu do obiektu. Modele te wykonano według techniki modelowania cienkich powłok podanej w pracy [10], przy wprowadzeniu zmian polegających przede wszystkim na zastosowaniu innego tworzywa modelowego — modyfikowana żywica epoksydowa «epidian 5», innej technice wykonania powłoki o zmiennej grubości oraz innej technice zdejmowania wykonanego modelu powłoki z urządzenia do modelowania osiowo-symetrycznych powłok.

Zastosowane tworzywo modelowe, uzyskane przez dodanie do żywicy epoksydowej «epidian 5» napelnacza (cement portlandzki 350) w ilości 250 ns, plastyfikatora (ftalan dwubutyłu) w ilości 15 ns i utwardzacza («TECZA») w ilości 15 ns (gdzie ns oznacza «na sto części żywicy»), charakteryzuje się następującymi cechami mechaniczno-wytrzymałościowymi: moduł Younga $E = 70\,000$ kG/cm², moduł Kirchhoffa $G = 26\,200$ kG/cm², współczynnik Poissona $\nu = 0,34$, oraz wytrzymałością na zginanie $R_{zg} = 302$ kG/cm².

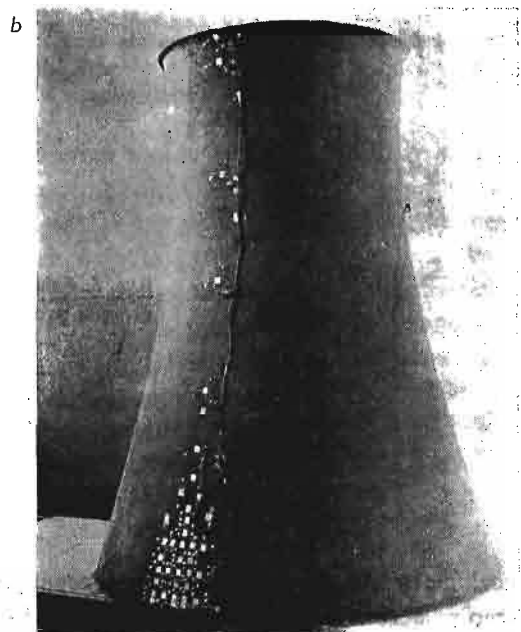
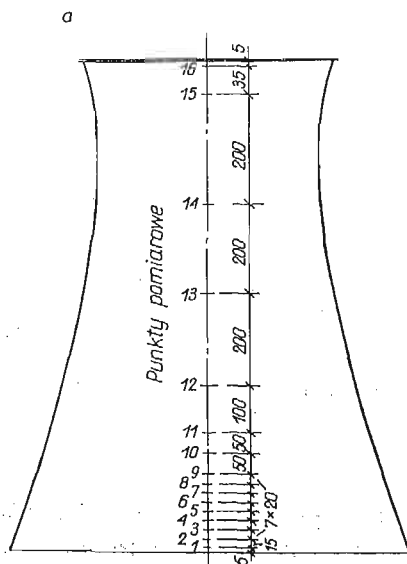
Podstawowe wymiary powłoki modelu hiperboloidalnej chłodni kominowej podano na rys. 1, natomiast model powłoki przygotowanej do badań z naklejonymi tensometrami elektrooporowymi RL-5,5/120 przedstawiono na rys. 2.

Tolerancje wykonania powłoki były następujące: wymiary średnic ± 2 mm, odchylenia środków średnic od osi powłoki max. 0,5 mm, grubość ścianki $\pm 0,2$ mm.

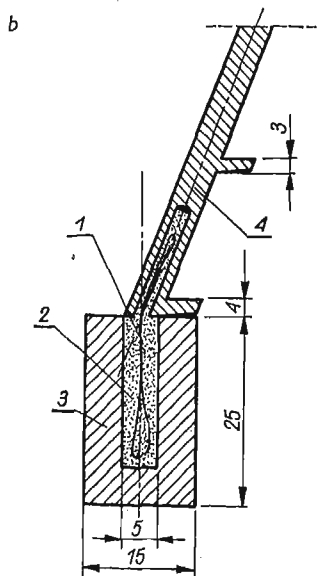
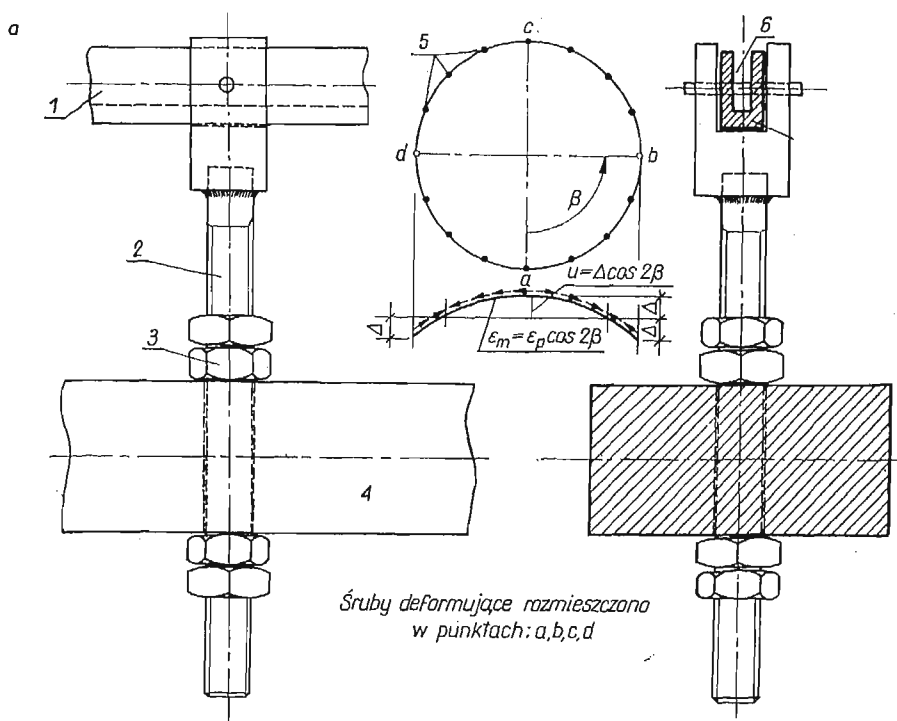
Dla określenia wpływu poziomych oraz pionowych przemieszczeń dolnego brzegu powłoki na rozkład sił w powłoce skonstruowano układ deformujący, którego schemat pokazano na rys. 3 i 4. Rysunek 3 przedstawia deformator zastosowany do wymuszania przemieszczeń pionowych, natomiast rys. 4 — deformator pozwalający wymuszać



Rys. 1. Podstawowe wymiary powłoki o kształcie hiperboloidy jednowłokowej



Rys. 2. Model hiperboloidalnej chłodni kominowej a) schemat rozmieszczenia tensometrów; b) model z naklejonymi tensometrami

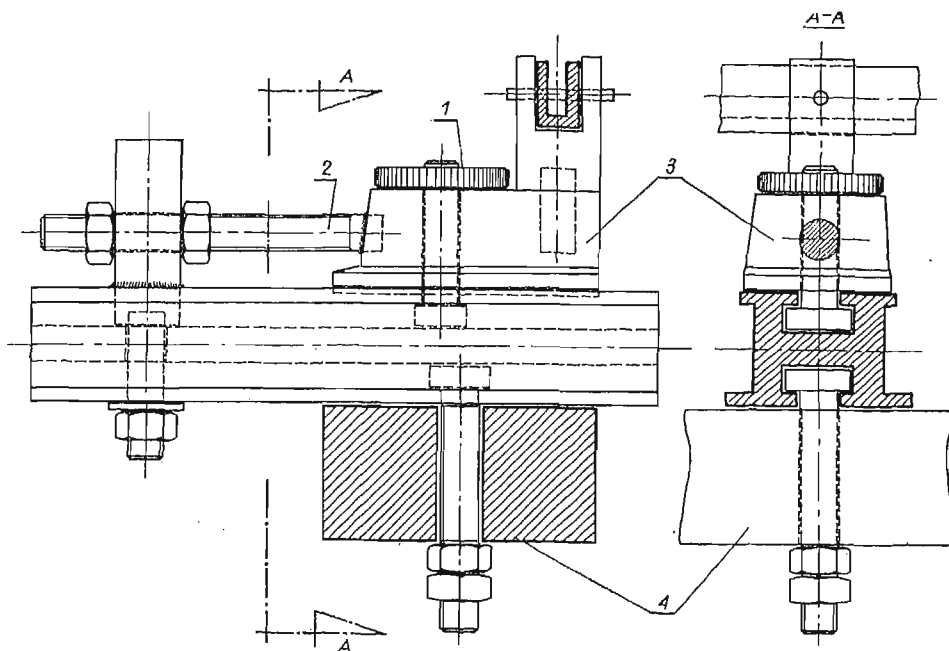


Rys. 3. Schemat deformatora zastosowanego do wymuszania pionowych przemieszczeń dolnego brzegu powłoki modelu; a) deformator: 1 — górny pierścień; 2 — śruby wymuszające przemieszczenia; 3 — nakrętki blokujące; 4 — pierścień dolny; 5 — śruby korygujące wymuszane przemieszczenia; 6 — rowek w górnym pierścieniu do wklejania powłoki; b) szczegół połączenia powłoki z pierścieniem: 1 — spirala stalowa; 2 — żywica epoksydowa; 3 — górny pierścień; 4 — powłoki modelu; 5 — śruby korygujące wymuszane przemieszczenia

poziome przemieszczenia dolnego brzegu powłoki. Górny pierścień układu deformującego połączono z dolnym brzegiem powłoki spiralą wykonaną ze stalowego drutu o średnicy 0,2 mm, którą wklejono w dolny brzeg modelu oraz wykonany wzdłuż obwodu tego pierścienia rowek (rys. 3). Zastosowanie spirali łączącej dolny brzeg modelu z pier-

ścieniem układu deformującego pozwoliło na uzyskanie ciągłego podparcia dolnego brzegu powłoki. Wklejoną spiralę w dolny brzeg modelu powłoki pokazano na rys. 2b.

Żądane przemieszczenia dolnego brzegu modelu powłoki wymuszano mechanicznie poprzez dokręcanie śrub a i c względnie b i d układu deformującego (rys. 3 i 4). Przy pionowych przemieszczeniach dolnego brzegu powłoki, według funkcji $u = \Delta_p \cos 2\beta$



Rys. 4. Schemat deformatora zastosowanego do wymuszenia poziomych przemieszczeń dolnego brzegu powłoki modelu

1—śruba blokująca; 2—śruba deformująca; 3—deformator; 4—pierścień dolny

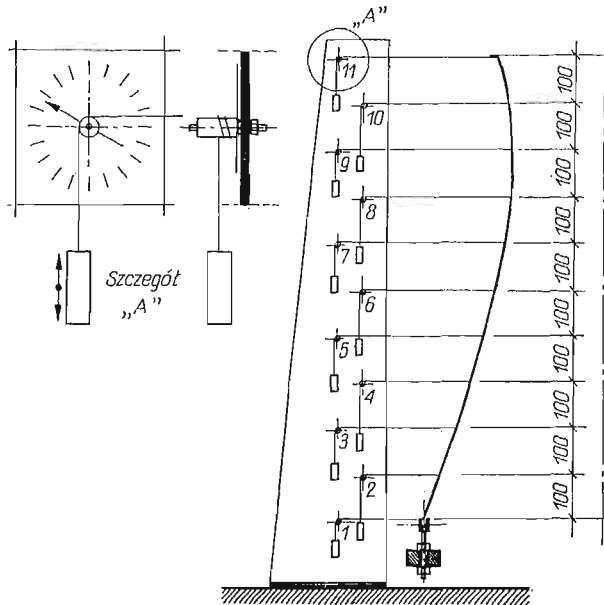
wprowadzono na ten brzeg dodatkowo odkształcenia wynikające z giętej pracy górnego pierścienia układu deformującego, których wartość określono funkcją $\varepsilon_m = \varepsilon_p \cos 2\beta$, gdzie ε_p oznacza maksymalne obwodowe odkształcenie pierścienia deformującego zmierzone w miejscu sklejenia tego pierścienia z dolnym brzegiem powłoki, przy kącie środkowym $\beta = n \cdot 90^\circ$ ($n = 0, 1, 2, 3, 4$). Kontrolny pomiar rzędnych przemieszczeń, wynikających z funkcji $u = \Delta_p \cos 2\beta$ lub $w = \Delta_h \cos 2\beta$, prowadzono czujnikami 0,01 rozmieszczonymi wzdłuż obwodu modelu, korekcję zaś tych rzędnych przeprowadzano dodatkowymi śrubami rozmieszczonymi wzdłuż obwodu dolnego brzegu powłoki. Po obwodzie powłoki modelu rozmieszczonych było 16 śrub, których położenie określono wielokrotnością środkowego kąta $\beta = 1/16 \cdot 360^\circ$ (rys. 3a).

3. Metodyka badań

Spośród metod ilościowych eksperymentalnej analizy naprężeń wybrano, jako podstawową, metodę tensometrii, co w przypadku badania konstrukcji powłokowych poddanych wpływom dużych przemieszczeń jest rzeczą dość istotną, gdyż — jak wiadomo — dużym przemieszczeniom powłoki mogą towarzyszyć małe wartości głównych odkształceń.

Ponadto o wyborze metody tensometrii zdecydowała możliwość przyjęcia dla zastosowanego tworzywa prawa zmiany naprężeń na grubości powłoki według funkcji liniowej. W tym przypadku znajomość naprężeń na powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej powłoki modelu pozwala na ustalenie wszystkich innych naprężeń.

Tensometryczny pomiar naprężeń w prowadzonych badaniach uzupełniono pomiarem przemieszczeń mechanicznymi czujnikami, których konstrukcję przedstawia rys. 5. Pomiar przemieszczeń mechanicznymi czujnikami prowadzono w celu określenia postaci zdeformowanych południków, ulegających największym przemieszczeniom (dla $\beta = n \cdot 90^\circ$, gdzie $n = 0, 1, 2, 3, 4$), wywołanych wpływami poziomych oraz pionowych przemieszczeń dolnego brzegu modelu.

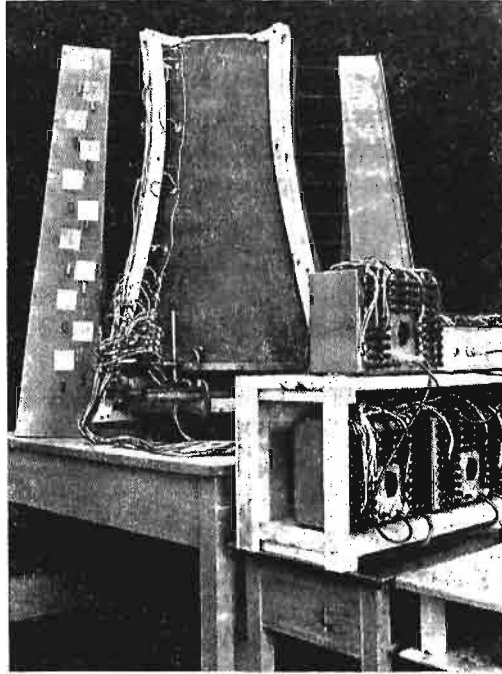


Rys. 5. Schemat rozmieszczenia czujników mechanicznych

Przy wymuszaniu pionowych ($u = \Delta_p \cos 2\beta$) i poziomych ($w = \Delta_h \cos 2\beta$) przemieszczeń dolnego brzegu modelu powłoki przemieszczenie Δ wymuszano, dla $\beta = n \cdot 90^\circ$, mechanicznie śrubami deformatorów (rys. 3 i 4), stopniując je co 0,25 mm w zakresie od 0 do 3,5 mm (przemieszczenia pionowe) oraz co 0,5 mm w granicach od 0 do 7 mm (przemieszczenia poziome). Wywołane tymi przemieszczeniami odkształcenia na wewnętrznej oraz zewnętrznej powierzchni modelu powłoki rejestrowano aparaturą tensometryczną, poziome zaś przemieszczenia w południków ulegających największym przemieszczeniom mierzono czujnikami mechanicznymi. Schemat rozmieszczenia tensometrów elektrooporowych na powłoce modelu przedstawiono na rys. 2a, natomiast czujników mechanicznych na rys. 5. Ostateczny wygląd modelu powłoki hiperboloidalnej chłodni kominowej, po naklejeniu tensometrów elektrooporowych i przyłutowaniu końcówek, pokazano na rys. 6.

Do pomiaru odkształceń zastosowano mostek tensometryczny typu T-2 oraz skrzynki rozdzielcze SR-24.

Pomiary prowadzono w układzie półmostkowym, stosując na 10 czynnych tensometrów 1 tensometr kompensacyjny (włączany w co 10 pomiarze). Tensometry kompensacyjne przyklejono na płytkach «kompensacyjnych» wykonanych z tego samego tworzywa co model.



Rys. 6. Stanowisko badawcze

4. Opracowanie oraz omówienie wyników badań modelu powłoki

Dla dowolnego punktu modelu powłoki, o współrzędnych krzywoliniowych α, β , zewnętrzne oraz wewnętrzne powierzchniowe odkształcenia $\varepsilon_i = \varepsilon(\alpha, \beta, \gamma = \pm 0,5h)$ można przedstawić według zależności [8, 11, 12]:

$$(4.1) \quad \varepsilon_1^y = \varepsilon_1 + \gamma \kappa_1; \quad \varepsilon_2^y = \varepsilon_2 + \gamma \kappa_2; \quad \varepsilon_{12}^y = \varepsilon_{12} + 2\gamma \kappa_{12},$$

gdzie 1, 2 oznaczają kierunki pomiarów odkształceń,

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ i ε_{12} — przyrosty odkształceń jednostkowych powierzchni środkowej powłoki dla punktu o współrzędnych α, β ,

$\kappa_1, \kappa_2, \kappa_{12}$ — zmiany krzywizn w rozpatrywanym punkcie,

$\gamma = \pm 0,5h$ — połowa grubości powłoki w rozpatrywanym punkcie.

Dla zmierzonych w pewnym miejscu na zewnętrznej lub wewnętrznej powierzchni powłoki dwu odkształceń głównych ε_1^y i ε_2^y możemy obliczyć naprężenia prawa Hooke'a występujące w tych kierunkach [8, 11, 12]:

$$(4.2) \quad \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_1^\gamma + \nu \varepsilon_2^\gamma) = \sigma_1^{bl} + \sigma_1^{\pi g}, \\ \sigma_2 &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_2^\gamma + \nu \varepsilon_1^\gamma) = \sigma_2^{bl} + \sigma_2^{\pi g}, \end{aligned}$$

gdzie E oznacza moduł Younga dla materiału modelu, ν — współczynnik Poissona dla materiału modelu, ε_1^γ ; ε_2^γ — odkształcenia główne.

Oznaczając przez σ_2^z i σ_1^z naprężenia główne w dowolnym miejscu na powierzchni zewnętrznej powłoki modelu, a przez σ_1^w i σ_2^w naprężenia w tymże samym miejscu, ale na powierzchni wewnętrznej powłoki modelu, możemy nie znając zmian krzywizn κ_1 i κ_2 wyznaczyć naprężenia błonowe σ_1^{bl} i σ_2^{bl} oraz naprężenia zginające $\sigma_1^{\pi g}$ $\sigma_2^{\pi g}$:

$$(4.3) \quad \begin{aligned} \sigma_1^{bl} &= \frac{1}{2} (\sigma_1^z + \sigma_1^w); & \sigma_1^{\pi g} &= \frac{1}{2} (\sigma_1^z - \sigma_1^w), \\ \sigma_2^{bl} &= \frac{1}{2} (\sigma_2^z + \sigma_2^w); & \sigma_2^{\pi g} &= \frac{1}{2} (\sigma_2^z - \sigma_2^w). \end{aligned}$$

Dla tak określonych wartości naprężeń błonowych i naprężeń zginających, interesujące nas wartości sił $N_{1(\alpha, \beta)}$ i $N_{2(\alpha, \beta)}$ oraz momentów zginających $M_{1(\alpha, \beta)}$ i $M_{2(\alpha, \beta)}$ wyznaczono według wzorów:

$$(4.4) \quad \begin{aligned} N_{1(\alpha, \beta)} &= h_{(\alpha, \beta)} \sigma_1^{bl}; & M_{1(\alpha, \beta)} &= \frac{h_{(\alpha, \beta)}^2}{6} \sigma_1^{\pi g}; \\ N_{2(\alpha, \beta)} &= h_{(\alpha, \beta)} \sigma_2^{bl}; & M_{2(\alpha, \beta)} &= \frac{h_{(\alpha, \beta)}^2}{6} \sigma_2^{\pi g}, \end{aligned}$$

gdzie $h_{(\alpha, \beta)}$ oznacza grubość powłoki w rozpatrywanym przekroju.

Poszukiwany przebieg sił oraz momentów zginających w powłoce modelu, poddanego wpływowi poziomych oraz pionowych przemieszczeń dolnego brzegu, określono dla południków ulegających największym przemieszczeniom. Wstępna graficzna analiza zależności: parametr Δ — przemieszczenie w oraz parametr Δ — odkształcenie, uzyskanych dla przemieszczeń pionowych i poziomych wykazała, że zależności te w badanych granicach są liniowe. Dla potwierdzenia tego przypuszczenia przeprowadzono statystyczną analizę wyników uzyskanych z pomiaru przemieszczeń w oraz odkształceń ε_1^z , ε_1^w , ε_2^z i ε_2^w dla przebadanego modelu. W tym celu dla uzyskanych w poszczególnych punktach pomiarowych zależności parametr Δ — przemieszczenie oraz parametr Δ — odkształcenie, ustalono według metody najmniejszych kwadratów [13, 14, 15, 16] następujące parametry:

— współczynnik regresji parametru Δ względem przemieszczenia w oraz parametru Δ względem odkształceń ε_1^z , ε_2^z , ε_1^w i ε_2^w ,

— współczynnik korelacji liniowej parametru Δ względem przemieszczenia w oraz parametru Δ względem odkształceń ε_1^z , ε_2^z , ε_1^w i ε_2^w .

Poziom istotności korelacji liniowej zmierzonych zależności parametr Δ — przemieszczenie w oraz parametr Δ — odkształcenie ε_1^z ; ε_2^z ; ε_1^w , ε_2^w określono przez porównanie obliczonych dla tych zależności współczynników korelacji liniowej z wartościami podanymi w tablicy korelacji FISCHERA [13].

Opracowanie uzyskanych z pomiarów tensometrycznych odkształceń oraz ich statystyczną analizę przeprowadzono na EMC Odra 1204.

W analizie uwzględniono jedynie te wyniki pomiarów, które nie były obciążone błędem grubym, tzn. wyniki pomiarów spełniające zależność [13, 15, 16]

$$(4.5) \quad k = \frac{|x_i - \bar{x}|}{s} \leq \bar{k}_{\alpha, n},$$

gdzie x_i oznacza wyniki pomiaru odkształceń ε lub poziomych przemieszczeń powierzchni środkowej powłoki w ,

\bar{x} — średnia arytmetyczna wyników pomiarów ε lub w ,

s — średnie odchylenie kwadratowe wyników pomiaru ε lub w ,

$\bar{k}_{\alpha, n}$ — wartość rozkładu parametru $k_{\alpha, n}$ służącego do eliminacji wyników odstających, określona dla ilości pomiarów n i wybranego poziomu istotności α .

Zastosowanie kryterium (4.5) do eliminacji odstających wyników pomiarów w rozpatrywanym przypadku było możliwe jedynie ze względu na uzyskiwane wysokie wartości współczynników korelacji liniowej dla badanych zależności parametr Δ — odkształcenia ε i parametr Δ — przemieszczenia w .

Przedział ufności przy przyjętym poziomie istotności dla zmierzonych wielkości odkształceń oraz przemieszczeń określono według zależności [13, 15, 16]

$$(4.6) \quad \bar{x} - \frac{\bar{st}_{\alpha, (n-1)}}{\sqrt{n-1}} \leq x \leq \bar{x} + \frac{\bar{st}_{\alpha, (n-1)}}{\sqrt{n-1}},$$

gdzie $\bar{t}_{\alpha, (n-1)}$ oznacza wielkość parametru $t_{\alpha, (n-1)}$ rozkładu STUDENTA.

Przedział ufności współczynników regresji b zastępczych prostych, zależności parametr Δ — odkształcenie ε oraz parametr Δ — przemieszczenie w określono z zależności [13, 15, 16]

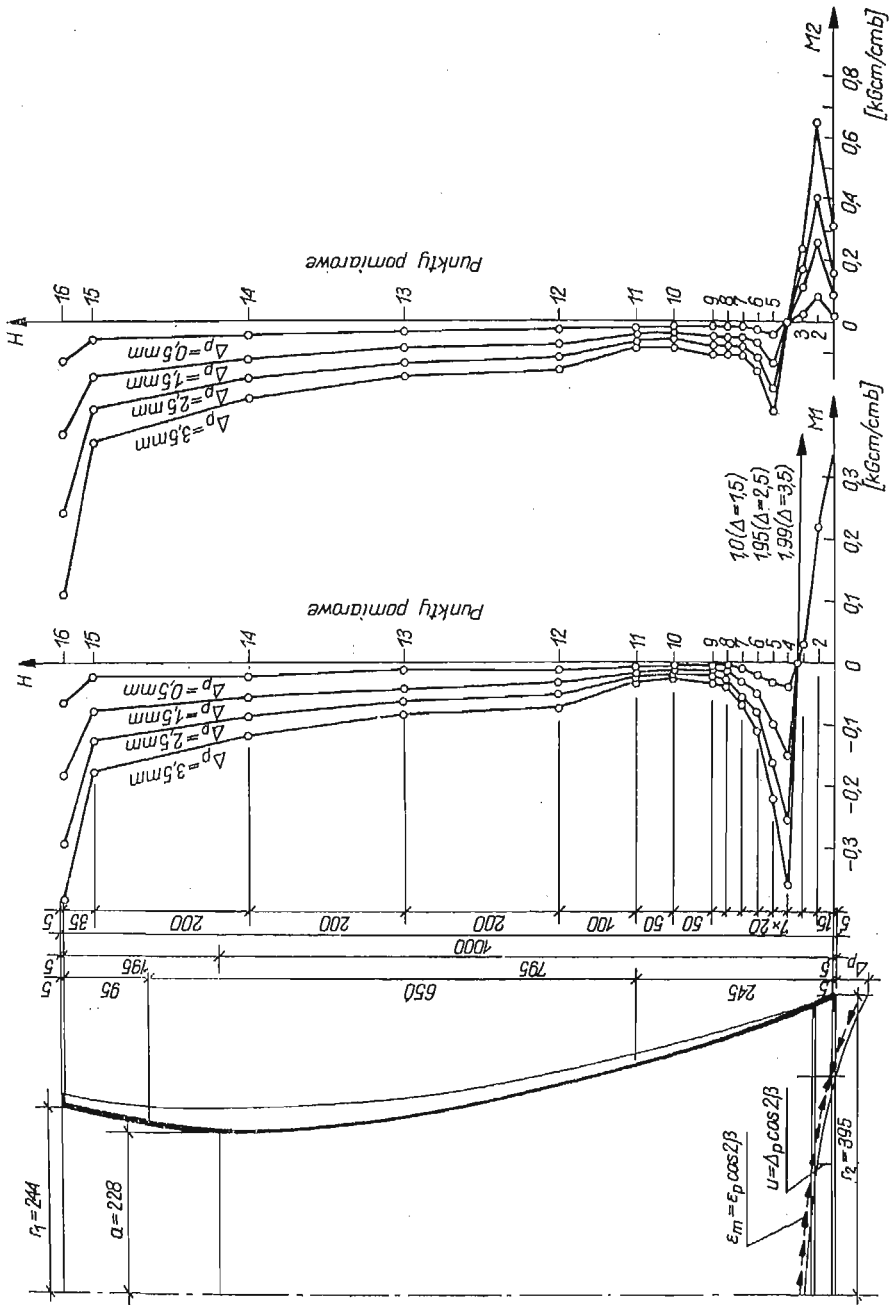
$$(4.7) \quad b \pm \bar{t} s_{(b)},$$

gdzie \bar{t} oznacza bezwzględną wartość rozkładu STUDENTA przy danych stopniach swobody i żądanym prawdopodobieństwie wystąpienia wartości b ,

$s_{(b)}$ — odchylenie standardowe dla współczynników regresji b .

Poszukiwany przebieg sił oraz momentów zginających w powłoce modelu poddanego wpływom pionowych ($u = \Delta_p \cos 2\beta$) oraz poziomych ($w = \Delta_h \cos 2\beta$) przemieszczeń dolnego brzegu określono dla południka a (rys. 3).

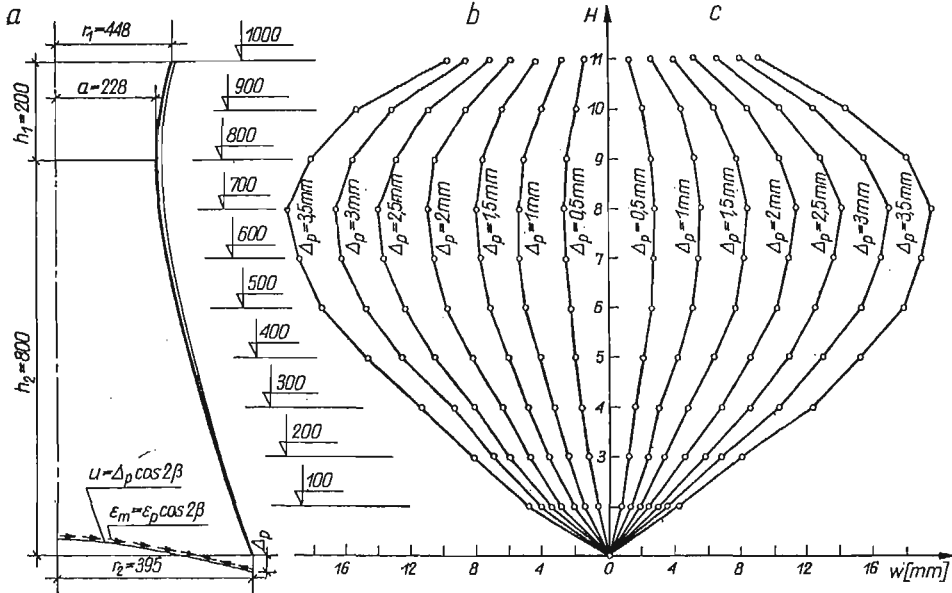
Uzyskane przebiegi sił południkowych oraz równoleżnikowych dla badanego modelu, przy poddaniu jego dolnego brzegu wpływom pionowych przemieszczeń $u = \Delta_p \cos 2\beta$ przy równoczesnych danych dla tego brzegu odkształceniach $\varepsilon_m = \varepsilon_p \cos 2\beta$ przedstawiono na rys. 7. Natomiast uzyskane przebiegi momentów zginających południkowych oraz równoleżnikowych dla $u = \Delta_p \cos 2\beta$ i $\varepsilon_m = \varepsilon_p \cos 2\beta$ podano na rys. 8. Wywołane wpływem pionowych przemieszczeń dolnego brzegu powłoki, poziome przemieszczenia południków c i d dla wartości zmiennego parametru $\Delta_p = 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0$ i $3,5$ mm zobrazowano na rys. 9. Na rys. 10 dla punktów pomiarowych nr 1 do 6 południków c i d (rys. 3.) przedstawiono zależność przemieszczeń w od zmiennego parametru Δ_p , nato-



Rys. 8. Powłoka modelu hiperboloidalnej chłodni kominowej, której dolny brzeg poddano wymuszonym przemieszczeniom $u = \Delta p \cos 2\beta$ i odkształceniom $\varepsilon_m = \varepsilon_p \cos 2\beta$; a) wymiary powłoki; b) i c) wykresy ekstremalnych momentów zginających południkowych M-1 i równoleżnikowych M-2

miast na rys. 11 podano zależności parametr Δ_p — odkształcenie ε_1^z , ε_2^z , ε_1^w i ε_2^w dla punktów pomiarowych nr 5 do 10 południka a .

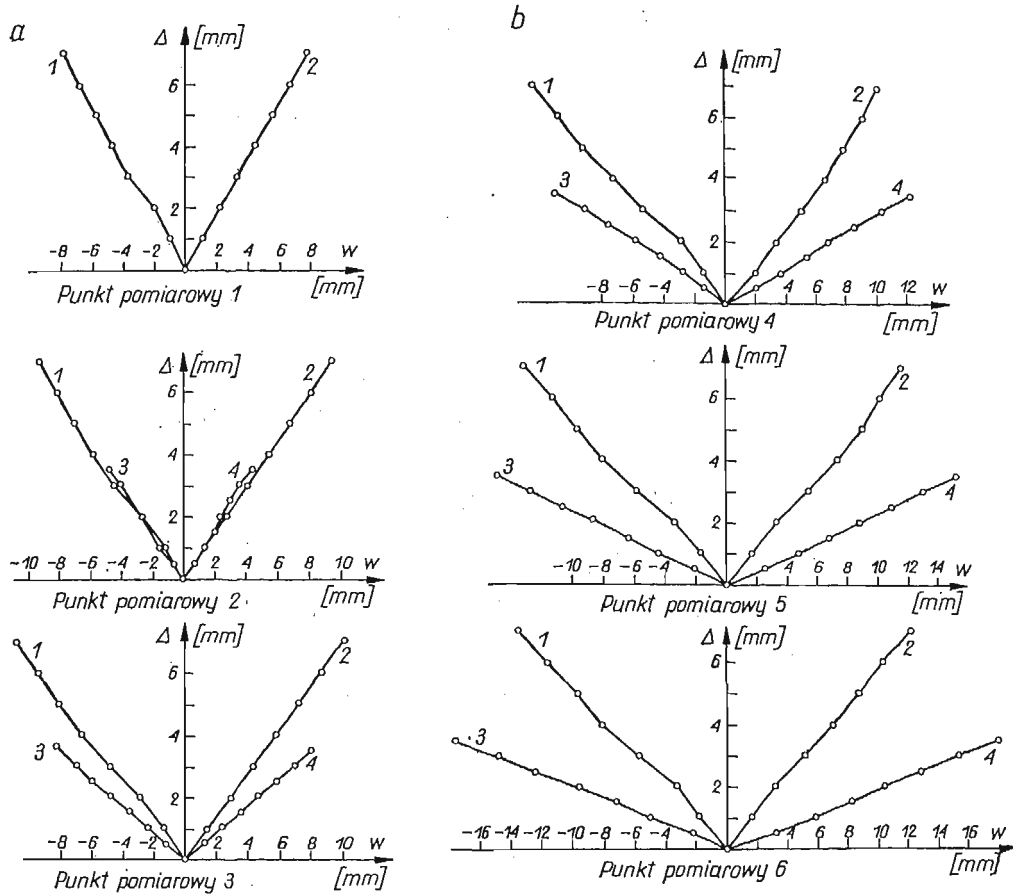
Z uzyskanych wartości momentów zginających, sił południkowych i równoleżnikowych a przede wszystkim odkształceń i przemieszczeń w powłoce modelu hiperboloidalnej chłodni kominowej, której dolny brzeg poddano wpływom wymuszonych pionowych przemieszczeń $u = \Delta_p \cos 2\beta$ oraz odkształceń $\varepsilon_m = \varepsilon_p \cos 2\beta$ wynika, że stosowalność liniowej



Rys. 9. Poziome przemieszczenia dla południków 3 i 4, wywołane wpływem pionowych przemieszczeń dolnego brzegu powłoki; a) wymiary powłoki; b) i c) wykresy ekstremalnych poziomych przemieszczeń w dla południków 4 i 3

w sensie geometrycznej teorii powłok jest słuszna w większym zakresie aniżeli wynika to z konwencjonalnej granicy $0,2h$, gdzie h grubość powłoki. W przeprowadzonej statystycznej analizie zależności: odkształcenie ε_1^z , ε_2^z , ε_1^w i ε_2^w — parametr Δ_p oraz przemieszczenie w_1 — parametr Δ_p otrzymano bardzo wysokie wartości współczynnika korelacji liniowej, który przyjmował wartości bardzo bliskie jedności. Tak wysokie wartości współczynników korelacji liniowej dla tych zależności świadczą o liniowej zależności przemieszczeń w względem parametru Δ_p oraz odkształceń ε_1^z , ε_2^z , ε_1^w i ε_2^w względem przemieszczeń w , jak również parametru Δ_p .

Wartości sił południkowych oraz równoleżnikowych uzyskanych z przebadania modelu, przy poddaniu jego dolnego brzegu wpływom wymuszonych poziomych przemieszczeń $w = \Delta_h \cos 2\beta$, dla południka a przedstawiono na rys. 12, wartości zaś momentów zginających południkowych oraz równoleżnikowych dla tego samego południka, wywołanych wpływami poziomych przemieszczeń dolnego brzegu powłoki modelu, podano na rys. 13. Wartości przemieszczeń w dla poszczególnych punktów pomiarowych południków P_c i d , wywołanych wpływem poziomych przemieszczeń dolnego brzegu $w = \Delta_h \cos 2\beta$, dla $\Delta_h = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ i 7 mm, podano na rys. 14. Na rys. 10 dla punktów

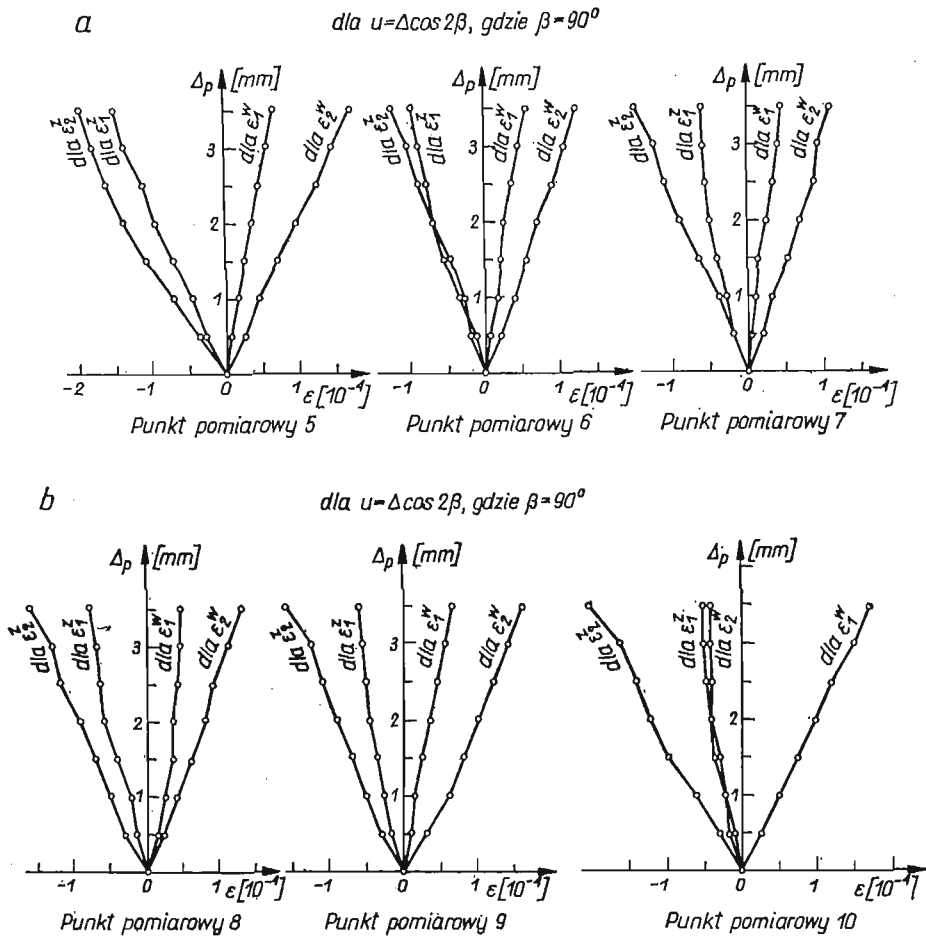


Rys. 10. Wykresy zależności przemieszczeń w od parametru Δ_h i Δ_p dla południków c i d ; a) dla punktów pomiarowych nr 1, 2 i 3; b) dla punktów pomiarowych nr 4, 5 i 6

1, 2, — odpowiednio dla południków d i c przy poddaniu dolnego brzegu powłoki wymuszonym przemieszczeniom $w = \Delta_h \cos 2\beta$; 3, 4 — odpowiednio dla południków d i c przy poddaniu dolnego brzegu powłoki wymuszonym przemieszczeniom $u = \Delta_p \cos 2\beta$ i odkształceniem $\epsilon_m = \epsilon_p \cos 2\beta$.

pomiarowych nr 1 do 6 południka c i d (rys. 3), podano graficzną zależność przemieszczeń w od zmiennego parametru Δ_h funkcji $w = \Delta_h \cos 2\beta$, określającej rzędne przemieszczeń dolnego brzegu powłoki modelu. Graficzny obraz zależności odkształceń $\epsilon_1^z, \epsilon_2^z, \epsilon_1^w$ i ϵ_2^w od parametru Δ_h funkcji $w = \Delta_h \cos 2\beta$ dla punktów pomiarowych nr 8, 10, 11 i 12 południka a przedstawiono na rys. 15.

Z przeprowadzonej analizy przyrostów sił południkowych, równoleżnikowych oraz momentów zginających, dla południka a , wywołanych wpływami poziomych przemieszczeń dolnego brzegu powłoki modelu $w = \Delta_h \cos 2\beta$ wynika, że przyrosty te w odniesieniu do parametru Δ_h wykazują liniową zależność w dość dużym zakresie wymuszanych przemieszczeń w . Przeprowadzona statystyczna analiza zależności odkształceń $\epsilon_1^z, \epsilon_2^z, \epsilon_1^w$ i ϵ_2^w od parametru Δ_h oraz przemieszczeń w od parametru Δ_h , wykazała, że zależności te dla wymuszonych przemieszczeń są liniowe. Wyznaczone dla wszystkich punktów



Rys. 11. Wykresy zależności odkształceń ε_1^z , ε_2^z ; ε_1^w i ε_2^w od parametru Δ_p dla punktów pomiarowych nr 5 do 10 południka a powłoki modelu, której dolny brzeg poddano wpływom wymuszonych przemieszczeń $u = \Delta_p \cos 2\beta$ i odkształceń $\varepsilon_m = \varepsilon_p \cos 2\beta$; a) dla punktów pomiarowych 5, 6, 7; b) dla punktów pomiarowych nr 8, 9 i 10

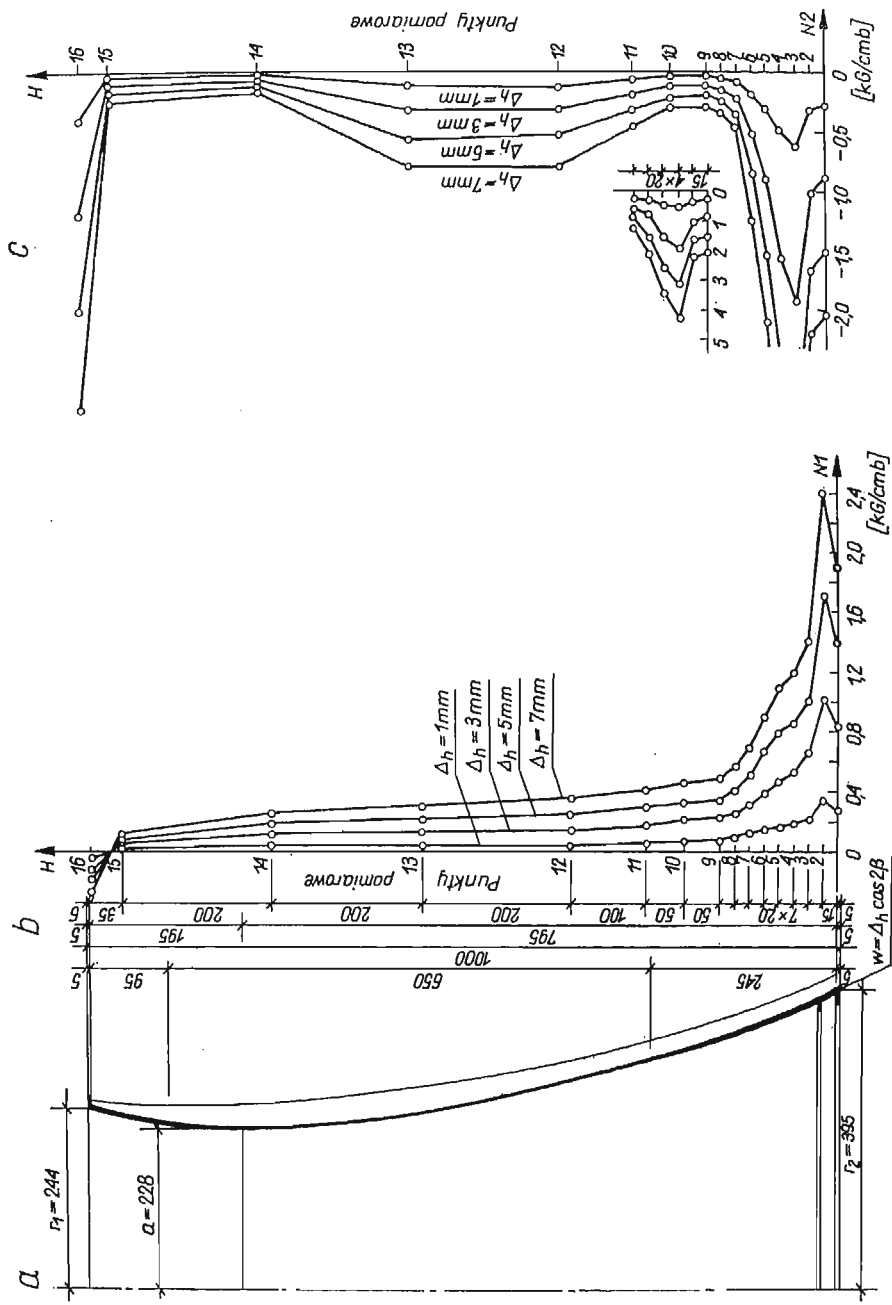
ε_1^z i ε_1^w — odkształcenia powierzchniowe zewnętrzne i wewnętrzne w kierunku południkowym,

ε_2^z i ε_2^w — odkształcenia powierzchniowe zewnętrzne i wewnętrzne w kierunku równoleżnikowym

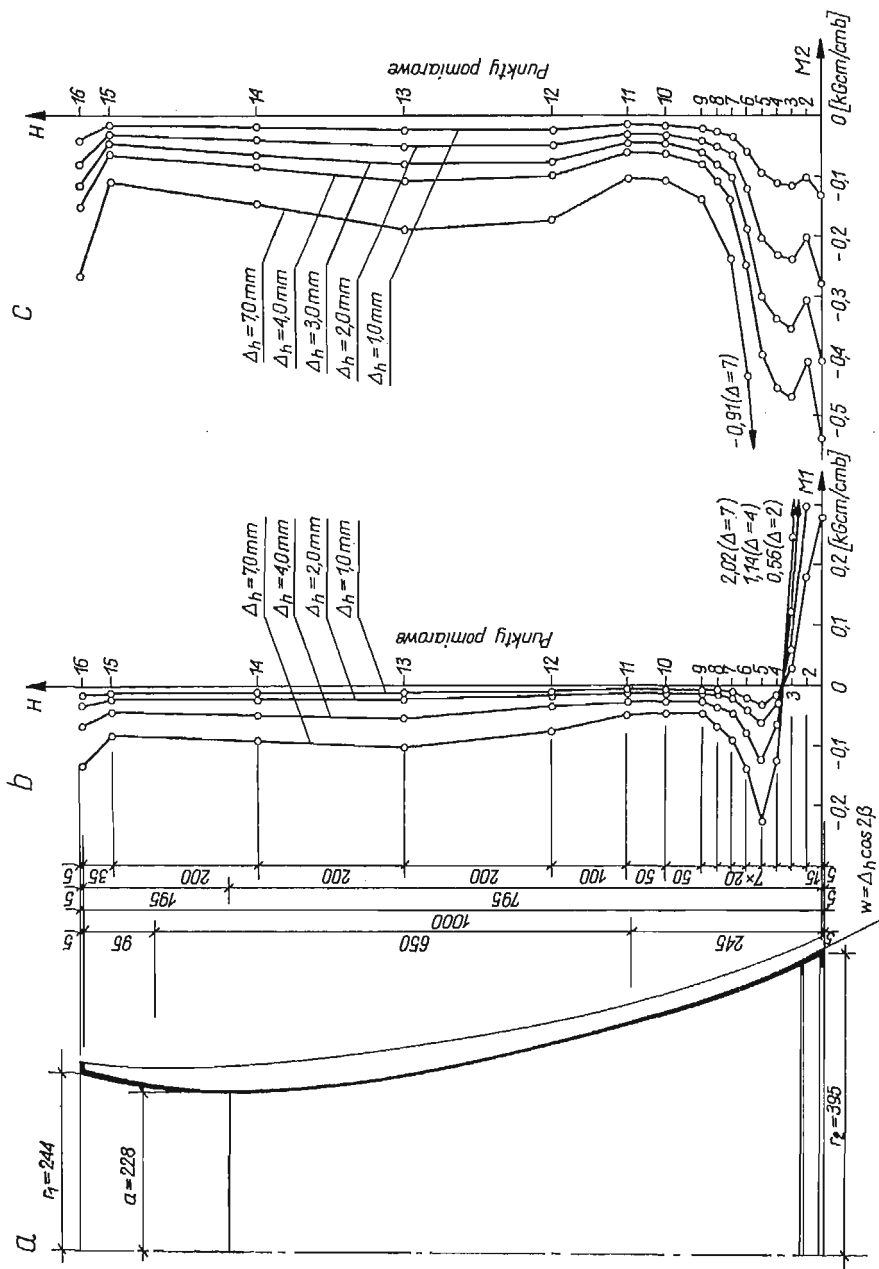
pomiarowych współczynniki korelacji liniowej zależności przemieszczeń w — parametr Δ_h oraz odkształceń ε_1^z , ε_1^w , ε_2^z i ε_2^w — parametr Δ_h przyjmowały wartości bliskie jedności, co świadczy o liniowej zależności przemieszczeń i odkształceń od parametru Δ_h funkcji $w = \Delta_h \cos 2\beta$.

6. Wnioski i zakończenie

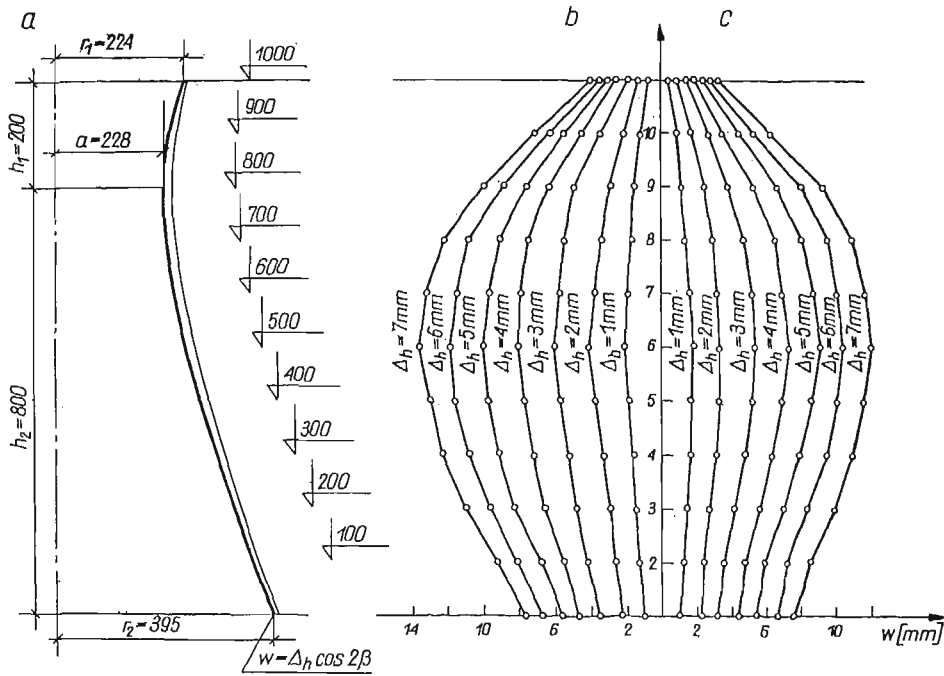
Przeprowadzone badania powłoki modelu hiperboloidalnej chłodni kominowej poddanej wpływom danych pionowych ($u = \Delta_p \cos 2\beta$) oraz poziomych ($w = \Delta_h \cos 2\beta$)



Rys. 12. Powłoka modelu hiperboloidealnej chłodni kominowej, której dolny brzeg poddano wpływom wymuszonych przemieszczeń poziomych $w = \Delta h \cos 2\beta$; a) wymiary powłoki; b) i c) wykresy ekstremalnych sił południkowych N_1 i równoleżnikowych N_2



Rys. 13. Powłoka modelu hiperboloidalnej chłodni kominowej, której dolny brzeg poddano wymuszonym przemieszczeniom poziomym $w = \Delta h \cos 2\beta$; a) wymiary powłoki; b) i c) wykresy ekstremalnych momentów zginających południkowych $M-1$ i równoleżnikowych $M-2$

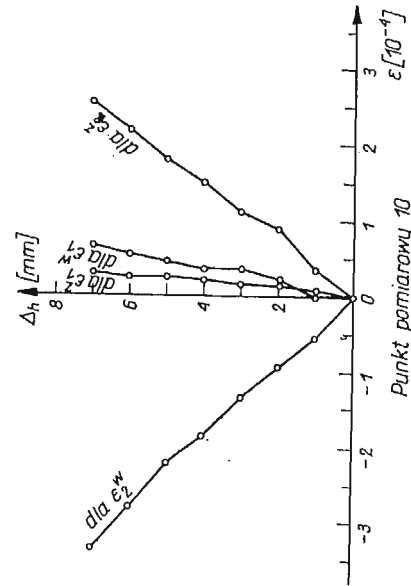
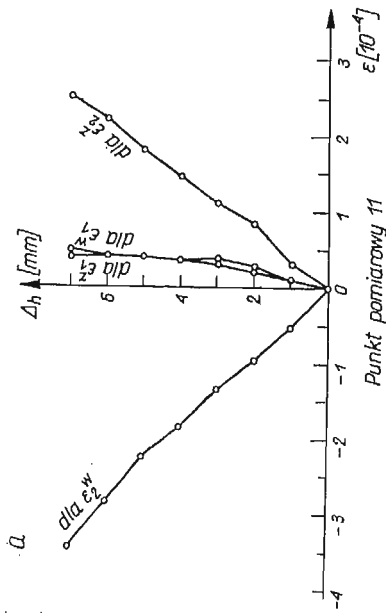
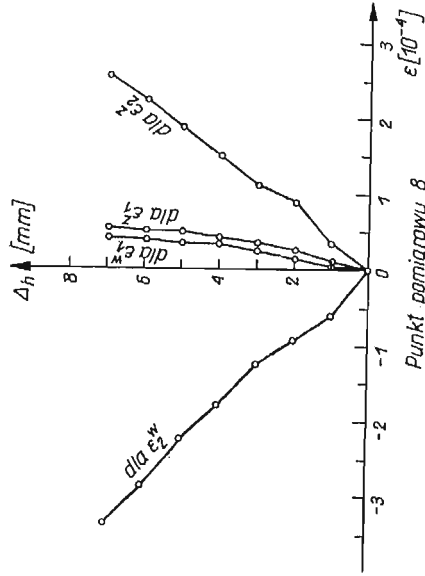
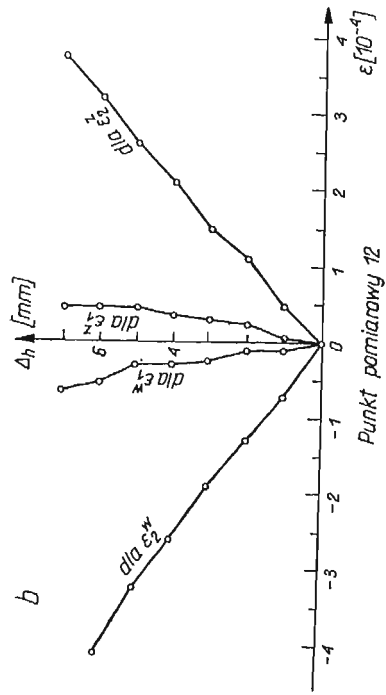


Rys. 14. Poziome przemieszczenia dla południków *c* i *d*, wywołane wpływem poziomych przemieszczeń dolnego brzegu powłoki; a) wymiary powłoki; b) i c) wykresy ekstremalnych poziomych przemieszczeń *w* dla południków *d* i *c*

przemieszczeń jej dolnego brzegu, pozwoliły wykazać, że przy tak danych warunkach brzegowych dolnego brzegu modelu powłoki, przemieszczenia *w* oraz odkształcenia ϵ_1^z , ϵ_1^w , ϵ_2^z i ϵ_2^w dla południków powłoki ulegających największym przemieszczeniom są liniowo zależne od parametru Δ , funkcji $u = \Delta_p \cos 2\beta$ oraz $w = \Delta_h \cos 2\beta$. Doświadczalne stwierdzenie liniowych zależności przemieszczeń oraz odkształceń od wymuszonych przemieszczeń dolnego brzegu powłoki modelu pozwala wysunąć wniosek, że stosowność w rozpatrywanym przypadku liniowej, w sensie geometrycznym, teorii cienkich powłok jest słuszna w większych granicach, aniżeli wynika to z konwencjonalnej granicy stosowności tej teorii $|w| \leq 0,2h$, gdzie *h* grubość powłoki a $|w|$ moduł przemieszczenia powłoki. Potwierdzeniem tych spostrzeżeń są wyznaczone współczynniki korelacji liniowej dla zależności: przemieszczenie *w*, odkształcenia oraz wartości sił i momentów zginających — parametr Δ , funkcji przemieszczeń $u = \Delta_p \cos 2\beta$ i $w = \Delta_h \cos 2\beta$.

Współczynniki korelacji dla tych zależności przyjmowały wartości bliskie jedności, co świadczy o liniowej zależności sił, momentów zginających, przemieszczeń oraz odkształceń względem zmiennego parametru Δ , który w prowadzonych badaniach stopniowano co 0,5 mm w zakresie od 0 do 7 mm (przemieszczenia poziome) oraz co 0,25 mm w granicach od 0 do 3,5 mm (przemieszczenia pionowe).

Warto podkreślić, że w przeprowadzonych badaniach powłoki modelu hiperboloidalnej chłodni kominowej uzyskano dla południków *c* i *d* następujące maksymalne poziome przemieszczenia:



Rys. 15. Wykresy zależności odkształceń ϵ_1^z , ϵ_2^z , ϵ_1^w i ϵ_2^w od parametru Δh dla punktów pomiarowych nr 8, 10, 11 i 12 południka I powłoki modelu, której dolny brzeg poddano wpływom wymuszonych przemieszczeń $w = \Delta \cos 2\beta$; a) dla punktów pomiarowych nr 10 i 11; b) dla punktów pomiarowych nr 8 i 12

ϵ_1^z i ϵ_1^w — odkształcenia powierzchniowe zewnętrzne i wewnętrzne w kierunku południkowym,
 ϵ_2^z i ϵ_2^w — odkształcenia powierzchniowe zewnętrzne i wewnętrzne w kierunku równoleżnikowym

— dla punktu pomiarowego nr 8 $w_8 = 19,84$ mm (dla $\Delta = 3,5$ mm) przy pionowych przemieszczeniach dolnego brzegu powłoki, co stanowi około trzynastokrotne przekroczenie grubości ścianki modelu w tym punkcie, oraz

— dla punktu pomiarowego nr 6 $w_6 = 13,90$ mm (dla $\Delta = 7$ mm) przy poziomych przemieszczeniach dolnego brzegu powłoki, co stanowi około 9-krotne przekroczenie grubości ścianki modelu w tym punkcie.

Literatura cytowana w tekście

1. A. S. L. CHAN, A. FIRMIN, *The analysis of cooling towers by the matrix finite element method part II, Large displacements*, Aeronautical Journal, Vol. 74, December 1970.
2. P. KONDERLA, *Statyka powłoki o kształcie hiperboloidy jednopowłokowej przy uwzględnieniu nieliniowości geometrycznej* (Rozprawa doktorska — Politechnika Wrocławska — Wrocław, 1973).
3. I. NIEWIADOMSKI, *Praca statyczna powłokowych chłodni kominowych z uwzględnieniem stanu zgięciowego*, Zesz. Nauk. Pol. Śl. — Budownictwo 15, 1965.
4. W. WUNDERLICH, *Der Kühlturm als biegesteife Schale, Naturzugkühltürme — Festigkeitsberechnung und Konstruktion*, Vulkan Verlag, Essen 1968.
5. W. WUNDERLICH, *Zur Biegebeanspruchung von Kühlturm Schalen bei Fundamentsetzungen*, Konstr. Ingenieurbau — Berichte, 7, 1970.
6. H. L. PETERS, *Der Vollständige Spannungs — und Verformungszustand grosser Naturzugkühltürme in Schalenbauweise*, Beton — und Stahlbetonbau, 8 (1972) 175—182.
7. Cz. WOŹNIAK, *Nieliniowa teoria powłok*, PWN Warszawa 1966.
8. A. C. ВОЛЬМИР, *Устойчивость деформируемых систем*, „Наука”, М., 1967.
9. Б. Я. КАНТОР, *Нелинейные задачи теории неоднородных пологих оболочек*, „Наукова Думка”, Киев 1971.
10. O. MATEJA, L. ZARZYCKI, *O pewnym sposobie modelowania cienkich powłok*, Inż. i Bud., 12 (1963).
11. Z. BRZOSKA, *Wytrzymałość materiałów*, PWN, Warszawa 1972.
12. A. JAKUBOWICZ, Z. ORŁOŚ, *Wytrzymałość materiałów*, WNT, Warszawa 1973.
13. W. VOLK, *Statystyka stosowana dla inżynierów*, WNT, Warszawa 1965.
14. N. W. SMIRNOW, I. W. DUNIN-BARKOWSKI, *Kurs rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej dla zastosowań technicznych*, PWN, Warszawa 1969.
15. A. STRZAŁKOWSKI, A. ŚLIŻYŃSKI, *Matematyczne metody opracowywania wyników pomiarów*, PWN, Warszawa 1973.
16. L. Z. RUMSZYŃSKI, *Matematyczne opracowywanie wyników eksperymentu*, WNT, Warszawa 1973.

Резюме

МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИПЕРБОЛОИДНОЙ ОБОЛОЧКИ ГРАДИРНИ, ПОДВЕРЖЕННОЙ ВЫНУЖДЕННЫМ ПЕРЕМЕЩЕНИЯМ

В работе представлены результаты модельных исследований влияния перемещений нижней кромки гиперболоидной оболочки градирни на распределение усилий.

Исследования проводились на моделях, выполненных в масштабе 1 : 120 из эпоксидной смолы Эпидиан 5 с наполнителем.

Перемещения нижней кромки оболочки модели вынуждались в вертикальном (параллельно оси сооружения) и горизонтальном направлениях с помощью соответствующих деформирующих приспособлений. Вынужденные перемещения в обоих направлениях имели вид $u = \Delta \cos 2\beta$.

Амплитуда перемещений Δ принималась в широких пределах, простирающихся вне областей, для которых считается справедливой линейная, в геометрическом смысле, теория тонких оболочек.

При исследованиях регистрировались деформации наружных слоев оболочки и перемещения ее срединной поверхности.

На многочисленных графиках представлены зависимости усилий, деформаций и перемещений срединной поверхности оболочки от значений перемещений кромки.

Установлено, что при заданных перемещениях нижней кромки эти зависимости линейны в широком диапазоне.

S u m m a r y

MODEL TESTS OF HYPERBOLOIDAL COOLING TOWER SHELL SUBJECTED TO FORCED DISPLACEMENTS

Influence of vertical displacements of lower edge of hyperboloidal cooling tower on internal forces on base of model tests is presented.

Tests were carried out using models 1:120 made of «Epidian 5» epoxy resin. Displacements of model lower edge were realized in vertical (parallel to shell axis of symmetry) and horizontal direction using special arrangement. Displacements in both directions were realized according to formula: $u = \Delta \cos 2\beta$.

Displacement amplitudes were realized in wider range than those assumed as limits of linear thin-shell theory, from geometrical point of view.

Extreme fibre strains and shell mean surface displacements were recorded.

Diagrams of forces, strains and shell mean surface displacements as functions of lower edge displacement are presented.

It occurs that these parameters are in wide range linearly dependent on the value of forced displacement of lower edge.

ZESPÓŁ BUDOWNICTWA PRZEMYSŁOWEGO I OGÓLNEGO WSI, OPOLE

Praca została złożona w Redakcji dnia 4 lutego 1974 r.
