

WPLYW NIEKTÓRYCH PARAMETRÓW GEOMETRYCZNYCH I MATERIAŁOWYCH NA DEFORMACJĘ POWŁOK STOŻKOWYCH Z KOMPOZYTU EPOKSYDOWO-SZKLANEGO

STANISŁAW OCHELSKI (WARSZAWA) i MIROSLAW ROZIN (WROCLAW)

Przedstawiono wyniki badań powłok stożkowych z różnych kompozytów epoksydowo-szklanych. Celem badań było dokonanie analizy powłok spełniających rolę sprężyny tale-rzowej typu zatraskowego o założonych wymaganiach. Zastosowano metodę analizy wariancji wyników doświadczalnych uzyskanych przy wykorzystaniu programów statycznych randomi-zowanych kwadratami grecko-lacińskimi do oceny wpływu temperatury i czasu stabilizacji kompozytu, zawartości wzmocnienia prostopadłego do powierzchni środkowej powłoki, za-wartości plastyfikatora i kształtu powłoki stożkowej na wartość obciążenia krytycznego.

1. WPROWADZENIE

Stateczność powłoki stożkowej opisywana jest układem nieliniowych równań różniczkowych czwartego rzędu o zmiennych współczynnikach. Rozwiązanie ściśle tych równań nie jest znane w chwili obecnej. Ponadto wiadomo, że zachowanie powłoki pod obciążeniem zależy silnie od nie-prawidłowości geometrycznych i fizycznych, a w przypadku gdy materiałem jest tworzywo sztuczne, należy także uwzględnić własności anizotropowe i lepkosprężyste. Trudności te spowodowały, że w literaturze poświęconej stateczności powłok stożkowych znajdują się rozwiązania fragmentaryczne i mają charakter przyczynkowy. W szczególności literatura obejmuje teorię stanu bezmomentowego powłoki oraz teorię liniową powłok cienkich. Nie-liczne są prace poświęcone małowyniosłym powłokom stożkowym w ujęciu nieliniowym [16, 17 i 18], a w prawie zupełnie brak jest prac poświęconych powłokom z lepkosprężystych materiałów anizotropowych [2 i 14], do których należą kompozyty polimerowe.

Problemem podstawowym oceny zachowania się powłoki znajdującej się pod wpływem obciążenia są znaczne różnice pomiędzy wynikami doświadczalnymi a teoretycznymi, osiągające nawet 600% [14]. Określone własności powłok można osiągnąć przez dobór składników i zastosowanie odpowiedniej technologii wykonania powłok. Ze względu na znaczne i różnorodne wpływy technologii i budowy kompozytu na własności powłoki ważnym jest przyjęcie adekwatnej metody badawczej. Z jednej strony badacz ma technologiczną

możliwość daleko posuniętej idealizacji geometrycznej powłoki, a z drugiej numeryczne metody obliczeniowe pozwalające symulować taki stan powłoki, iż zbliżony jest on do stanu rzeczywistego. Według [5] rozbudowa matematyczna programu numerycznego niekoniecznie prowadzi do poprawy wyników obliczeń. W większości prac [3, 4, 5 i 9] stosowane są teorie klasyczne z dokładnym uwzględnieniem ich podstawowych założeń.

Niniejsza praca ma charakter doświadczalny. Opracowano technologię wykonywania różnych powłok i badano ich stateczność oraz dokonano analizy powłok spełniających założone wymagania.

2. CEL BADAŃ I PODSTAWOWE ZAŁOŻENIA

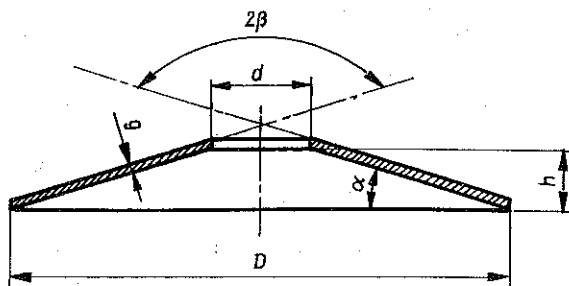
Celem badań jest określenie powłoki z kompozytu epoksydowo-szklanego o kształcie stożka ściętego, która może spełniać rolę sprężyny talerzowej typu zatraskowego, przy czym sprężynie tej stawia się następujące wymagania: 1) przy obciążeniu 220–250 N powinien nastąpić przeskok do nowego położenia równowagi; 2) zachować powyższą zdolność w temperaturach 223–323 K; 3) podstawowe wymiary: maksymalna średnica — 100 mm, wysokość — 7 mm.

Zakłada się, że do opisu zachowania się powłoki pod obciążeniem można stosować teorię Kirchoffa — Love'a, a jej parametry krytyczne określić z zależności ugięcia od obciążenia.

3. PRZEDMIOT BADAŃ

Badaniom stateczności poddano cienkie, małowyniosłe, ścięte powłoki stożkowe, wykonane z kompozytu epoksydowo-szklanego, podparte i obciążone osiowo symetrycznie, przy czym krawędzie powłok mają możliwość swobodnego przesuwu promieniowego.

Kształt powłok przedstawia rys. 1, gdzie przyjęto $h = 7$ mm; $q = 1$; 2; 3 mm, $\alpha = 7^\circ$; 10° ; 13° ; 16° ; 19° ; 22° ; 25° . Kompozyty na powłoki składały się: z tkaniny szklanej ST-21 (warstwy zewnętrzne powłoki), maty



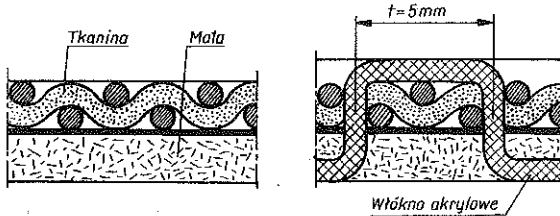
Rys. 1

szklanej o gramaturze 450 g/m^2 (warstwy środkowe powłoki); żywicy, epidianu-53 z utwardzaczem Z-1; z włókien akrylowych (wzmocnienie prostopadłe do powierzchni powłoki-; rys. 2) z ciekłego polisiarczku „polthio-plast C7” (jako plastyfikatora). Wagowy udział wzmocnienia szklanego w kompozycie wynosił od 0,4 do 0,46 w zależności od grubości powłoki, a udziały maty i tkaniny były jednakowe i wynosiły po 50%.

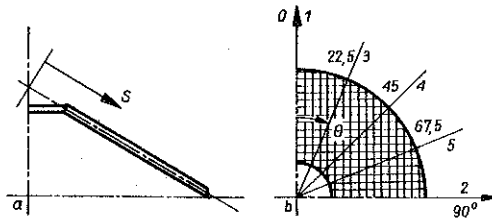
W badaniach teoretycznych płyt i powłok przyjmuje się zwykle założenie, że kierunki główne anizotropii materiału pokrywają się z kierunkami głównymi krzywizn lub przyjętymi liniami współrzędnymi charakterystycznych dla rozpatrywanego ustroju. W przypadku badanych powłok przyjęto współrzędne s i θ przedstawione na rys. 3, które pokrywają się z głównymi kierunkami anizotropii wyłącznie w lokalnych obszarach.

Postuluje się, że ze względu na kształt i wymiary oraz sposób zamocowania i obciążenia badanych powłok — możliwe jest przyjęcie założenia, iż pominięcie anizotropii materiału nie będzie miało istotnego wpływu na obciążenie krytyczne i stan naprężenia w powłoce.

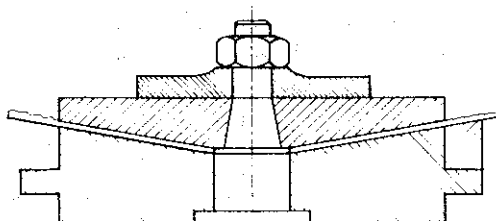
Własności mechaniczne badanych kompozytów określono w statycznych próbach rozciągania. Stałe materiałowe badanych powłok przyjęto jako średnie arytmetyczne E i ν określonych z kierunków 1—5 (rys. 3).



Rys. 2



Rys. 3



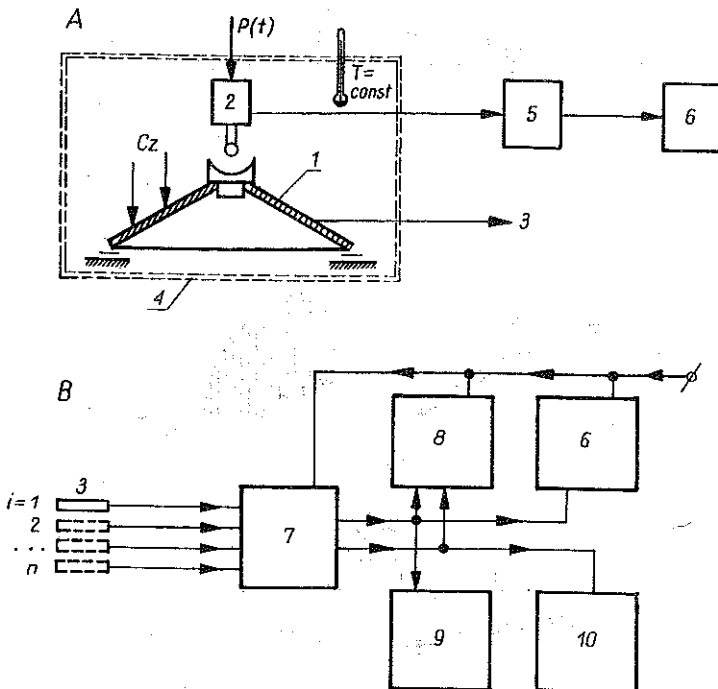
Rys. 4

Stożkowe powłoki z kompozytów otrzymywano w matrycach, które przedstawia rys. 4. Na dolnej części matrycy umieszczono przygotowane uprzednio krążki maty i tkaniny szkalnej, które kolejno przesycały się spoiwem. Po uzyskaniu żądanej liczby warstw zastosowano docisk górnej części matrycy. W przypadku gdy powłoki wzmocniano w kierunku prostopadłym do ich powierzchni środkowej, laminowanie przeprowadzono na specjalnym uchwycie posiadającym nacięcia promieniowe rozmieszczone co 60° , które umożliwiały przeszywanie ułożonych warstw. Następnie uzyskany w ten sposób preimpregnat przenoszono do matrycy. Własności kompozytu wzmocnionego przestrzennie przedstawia praca [11].

4. PROGRAM I METODA BADAŃ

Program doświadczalnych badań powłok obejmował określenie wpływu czynników zabiegowych (wielkości wejściowych zmiennych) na wartości obciążeń badanych powłok, pomiar ugięć w wybranych punktach powłoki oraz pomiar odkształceń w wybranych punktach powłoki.

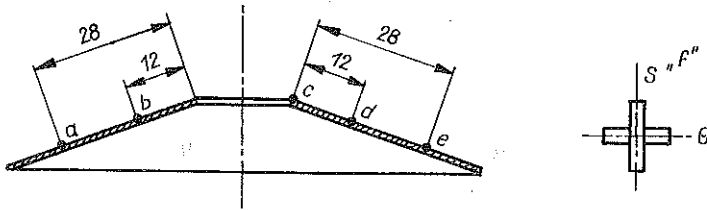
Pomiarów dokonywano na stanowisku, które przedstawia rys. 5, gdzie przyjęto następujące oznaczenia: 1 — badana powłoka, 2 — piezoelektryczny przetwornik siły, 3 — tensometry elektrooporowe, 4 — komora termoizolacyjna, 5 — wzmacniacz ładunku, 6 — rejestrator poziomy, Cz — czujniki



Rys. 5

zegarowe, 7 — mostek tensometryczny, 8 — rejestrator magnetyczny, 9 — miernik cyfrowy oraz 10 — miernik uniwersalny. Badania doświadczalne przeprowadzono w różnych temperaturach z przedziału 223—323 K. Obciążenie powłoki w postaci wymuszenia kinematycznego określone ze stałą prędkością przemieszczenia uchwytu maszyny równą 3,33 mm/s.

Na rys. 6 przedstawiono punkty na powierzchni powłoki, w których dokonywano pomiarów odkształceń (a, b) oraz ugięć (c, d, e); pokazano też położenie tensometrów elektrozynstacyjnych.



Rys. 6

Aby upewnić się, że eksperyment przeprowadzony jest na próbce reprezentatywnej, mającej cechy całego zbioru badanych powłok, z wielu metod statystyki matematycznej wybrano metodę analizy wariancji wyników doświadczalnych uzyskanych przy wykorzystaniu programów statycznych randomizowanych kwadratami grecko-łacińskimi [1, 6, 8, 10, 12 i 13]. Metoda ta pozwala ocenić wpływ przyjętych czynników zabiegowych na cechy wynikowe oraz umożliwia znaczne zmniejszenie liczby prób. Przy czterech czynnikach zabiegowych, z których każdy występuje na czterech poziomach, pełne doświadczenie wymagały przeprowadzenia 4^4 prób, natomiast metoda analizy wariancji pozwala zmniejszyć ich liczbę do 4^2 prób bez zmiany wiarygodności wyników. W niniejszej analizie przyjęto następujące cechy zabiegowe i ustalono ich zakresy zmienności:

1. Temperatura stabilizacji kompozytu oznaczona cyframi arabskimi 1 do 4: 1 — 353 K; 2 — 373 K; 3 — 393 K; 4 — 413 K.

2. Czas stabilizacji kompozytu oznaczony cyframi łacińskimi I do IV: I — 3 godz., II — 2,5 godz., III — 2 godz., IV — 1,5 godz.

3. Zawartość procentowa wzmocnienia prostopadłego do powierzchni środkowej powłoki oznaczona literami A—D: dla grubości powłoki 1 mm: A — 0, B — 0,79, C — 0,99, D — 1,59; dla grubości 2 mm: A — 0, B — 0,5, C — 0,65, D — 0,93; dla grubości 3 mm: A — 0, B — 0,36, C — 0,49, D — 0,73.

4. Zawartość procentowa plastyfikatora w spoiwie podstawowym oznaczona literami a do d: a — 0, b — 15, c — 30, d — 45.

Grupy resztowe reprezentujące wpływ błędów eksperymentów oznaczono literami α , β , γ , δ .

Przyjęte cechy zabiegowe rozmieszczono w kwadracie grecko-łacińskim (tablica 1) w taki sposób, że każdy zespół cech zabiegowych powtarza się tylko jeden raz w każdym wierszu i każdej kolumnie. Wiersze i kolumny

Tablica 1

	I	II	III	IV
1	$\alpha^{A,a}$	$\beta^{B,b}$	$\gamma^{C,c}$	$\delta^{D,d}$
2	$\delta^{B,c}$	$\alpha^{C,d}$	$\beta^{D,a}$	$\gamma^{A,b}$
3	$\beta^{C,d}$	$\gamma^{D,a}$	$\delta^{A,b}$	$\alpha^{B,c}$
4	$\gamma^{D,b}$	$\delta^{A,c}$	$\alpha^{B,d}$	$\beta^{C,a}$

tablicy 1 wskazują 16 różnych tworzyw, a tym samym 16 różnych powłok, przy czym badano powłoki o grubościach 1, 2 i 3 mm.

Jak wiadomo o istotności wpływu poszczególnych cech zabiegowych na cechę wynikową decyduje funkcja testowa F_{obl} , zdefiniowana jako iloraz wariancji i -tego zabiegu i wariancji grup resztowych, porównywana do testu F Snedecora. W zależności od relacji $F_{obl} > F$ Snedecora lub $F_{obl} \leq F$ Snedecora występuje odpowiednio istotność i nieistotność wpływu czynnika zabiegowego na cechę wynikową. Test F_{obl} jest stosunkiem wariancji i -tego zabiegu do wariancji resztowej. Czyli istotne są te cechy, których wariancja jest wyraźnie większa od wariancji grup resztowych. Szczegółowe wyniki obliczeń zawarte są w [15], przy czym oprócz określenia wpływu czynników zabiegowych na wartość obciążenia krytycznego badanych powłok, obliczono także rozrzut tego obciążenia względem temperatur pomiarów.

Otrzymane z badań doświadczalnych ugięcia powłok i obliczone na podstawie pomiarów odkształceń naprężenia występujące w powłokach — porównano z wynikami obliczonymi według programu numerycznego [3 i 4].

5. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań doświadczalnych i ich analizy stwierdzono, że temperatura i czas stabilizacji kompozytu powłoki nie mają istotnego wpływu na wartość obciążenia krytycznego. Nie oznacza to negacji znanego i wyraźnego wpływu tych czynników na własności mechaniczne kompozytu lecz wyraża fakt, iż w przeprowadzonym doświadczeniu pominięto czynniki istotniejsze niż czas i temperatura stabilizacji. Gdyby istniała potrzeba dalszej optymalizacji powłoki należałoby z czynników zabiegowych wykluczyć czas i temperaturę stabilizacji, a wprowadzać inne. Na tym zresztą polega istota metody analizy wariancji.

Ocenę wpływu czynników zabiegowych na obciążenie krytyczne w procentach wariancji, przykładowo dla powłoki stożkowej o kącie $\alpha = 10^\circ$, za-

Tablica 2

Czynnik zabiegowy	Temperatura pomiaru °K	Grubość powłoki w mm		
		1	2	3
		%	%	%
Temperatura stabilizacji	291	4,597	2,211	3,322
	323	3,331	2,584	1,498
	223	29,563	17,118	6,33
Czas stabilizacji	291	0,465	2,164	0,759
	323	2,619	0,281	0,039
	223	1,542	14,541	34,291
Zawartość wzmocnienia prostopadł. do powierz. środkowej powłok	291	19,639	18,94	24,173
	323	18,634	14,214	10,836
	223	25,791	4,169	47,006
Zawartość plastyfikatora	291	67,341	68,153	65,043
	323	65,09	76,165	80,935
	223	18,553	45,168	9,849
Poziom grup resztowych	291	7,958	8,531	6,703
	323	10,325	6,755	6,692
	223	24,55	19,004	2,523

Tablica 3

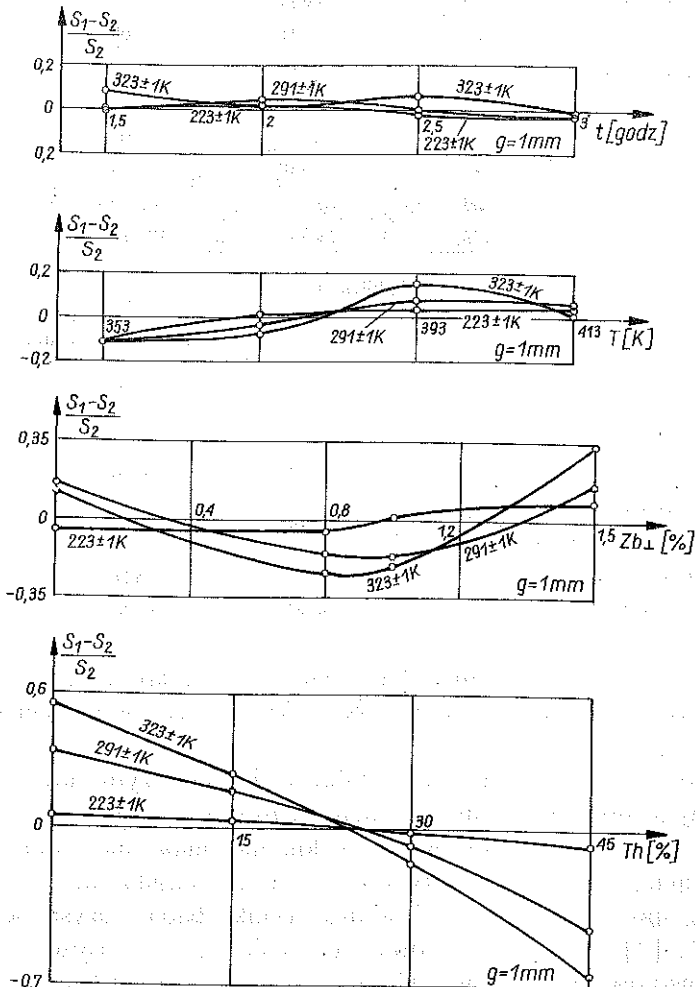
Czynnik zabiegowy	Grubość powłoki w mm		
	1	2	3
	%	%	%
Temperatura stabilizacji	1,597	0,979	2,102
Czas stabilizacji	1,916	1,136	2,184
Zawartość wzmocnienia prostopadłego do powierzchni środkowej powłoki	16,666	13,264	15,166
Zawartość plastyfikatora	70,73	77,821	74,786
Poziom grup resztowych	9,088	6,798	5,843

mieszczono w tablicy 2. Natomiast tablica 3 zawiera ocenę wpływu czynników zabiegowych na rozrzut obciążenia krytycznego względem temperatur pomiaru.

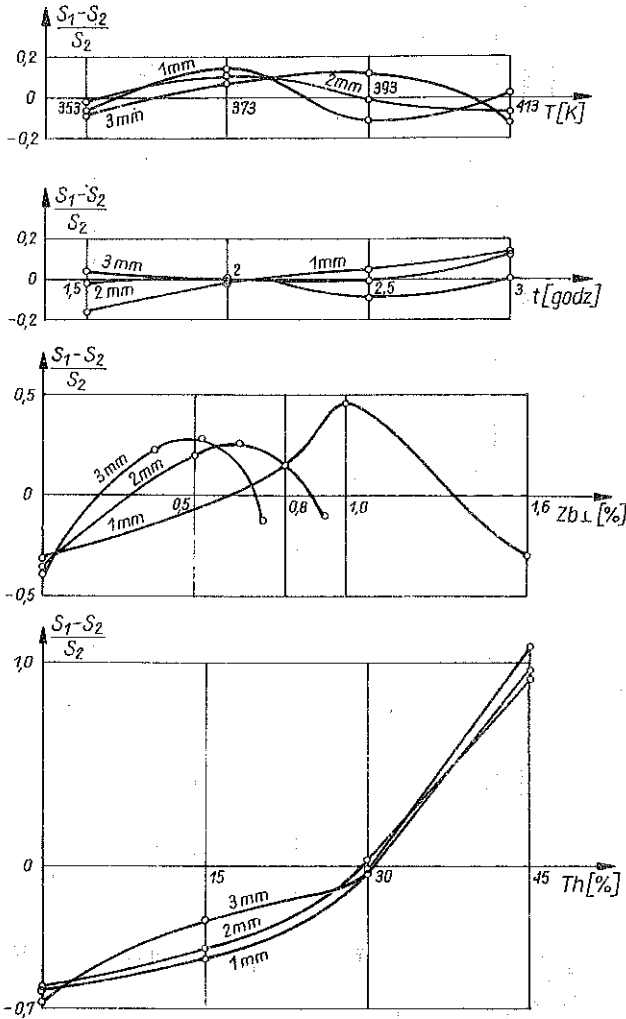
Pomimo iż temperatura i czas stabilizacji kompozytu powłoki w przeprowadzonym doświadczeniu nie mają istotnego wpływu na obciążenie krytyczne, to jednak zaobserwowano lokalne maksyma tych czynników o wartościach oscylujących wokół temperatury stabilizacji 393 K i czasu 2 godziny; spostrzeżenie to potwierdza wyniki badań uzyskane wcześniej przez HYLE [7]. Natomiast istotne znaczenie ma zawartość wzmocnienia prostopadłego do powierzchni środkowej powłoki oraz bardziej istotny wpływ wywiera zawartość plastyfikatora.

Przykładowo na rys. 7 przedstawiono wpływ czasu i temperatury stabilizacji, stężenia plastyfikatora i wzmocnienia prostopadłego na wartość i rozrzut obciążenia krytycznego, natomiast na rys. 8 przedstawiono powyższe zależności jako funkcje grubości powłoki dla temperatury 291 K. Parametr $(S_1 - S_2)/S_2$ określa względny przyrost cechy wynikowej w zależności od wartości cechy zabiegowej, natomiast dla grup resztowych określa względny błąd oceny wpływu wszystkich czynników zabiegowych na cechę wynikową. S_1 oznacza średnią wartość cechy wynikowej dla powłok zawierających cechę zabiegową na tym samym poziomie, natomiast S_2 oznacza średnią wartość cechy wynikowej wszystkich powłok.

Dla potrzeb niniejszej pracy przyjęto, że $(S_1 - S_2)/S_2 \geq 0$ dla obciążenia krytycznego i $(S_1 - S_2)/S_2 \leq 0$ dla jego rozrzutu. Za miarę rozrzutu obciążenia



Rys. 7



Rys. 8

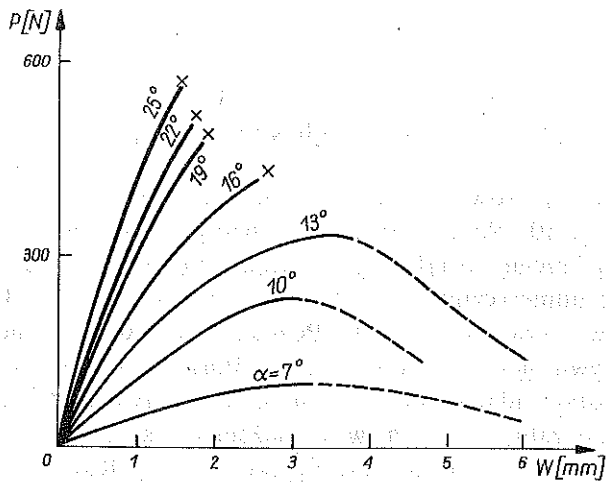
krytycznego dla danej powłoki przyjęto stosunek odchylenia standardowego do średniego obciążenia krytycznego.

Obliczone zależności siły krytycznej od przemieszczenia górnej krawędzi ściętego stożka powłoki 3.II, o grubości 1 mm, dla różnych kątów α przedstawia rys. 9. Dla kątów podstawy stożka równych $\alpha = 7^\circ; 10^\circ; 13^\circ$ następuje przeskok w zakresie naprężeń sprężystych, natomiast dla kątów $\alpha = 16^\circ; 19^\circ; 22^\circ; 25^\circ$ przed utratą stateczności powłoka osiąga granicę plastyczności tworzywa.

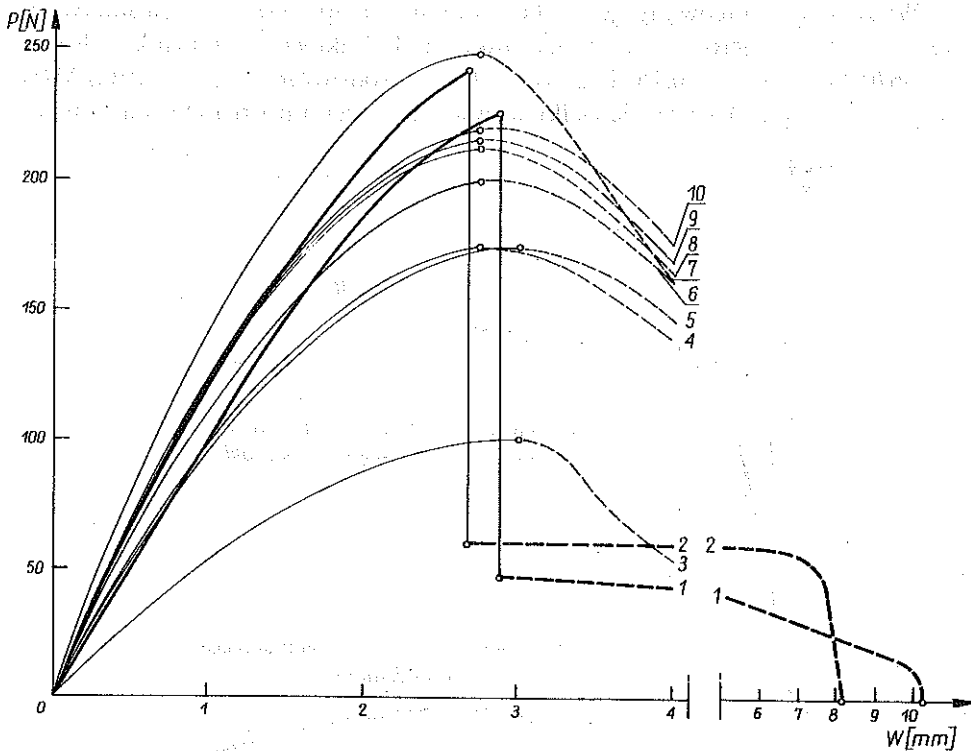
Do dalszych rozważań przyjmiemy powłokę o kącie $\alpha = 10^\circ$ (rys. 1), która powinna spełniać warunek przeskoku przy $P_{kr} = 170-250$ N. Badania wykazały, że tylko cztery spośród 48 przebadanych powłok spełniają wyżej wymienione wymagania, co przedstawiono w tablicy 4. Dalsze doświadczenia

Tablica 4

Numer powłoki	Obciążenie krytyczne w danych temperaturach (N)			Rozrzut obciążenia (%)	Czas stabilizacji (godz.)	Temperatura stabilizacji (K)	Stężenie plastyfikatora (%)	Zawartość wzmocnienia prostopadłego do pow. środkowej powłoki (%)
	górne 291 ± 1 K	dolne 323 ± 1 K	223 ± 1 K					
3, II	$\frac{258}{72}$	$\frac{250}{80}$	$\frac{240}{0}$	1,1	2,5	393	0	1,59
4, IV	$\frac{243}{59}$	$\frac{212,5}{15}$	$\frac{235}{7,5}$	3,6	1,5	413	0	0,99
3, III	$\frac{232}{50}$	$\frac{185}{37,5}$	$\frac{220}{45}$	6,1	2	393	15	0
2, III	$\frac{233}{54}$	$\frac{170}{80}$	$\frac{107,5}{30}$	7,8	2	373	0	1,59



Rys. 9

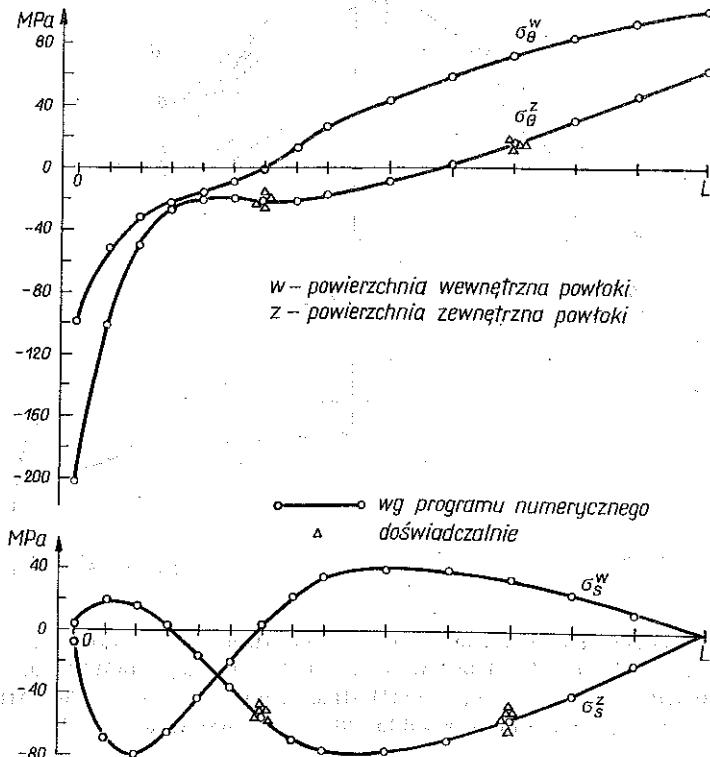


Rys. 10. 1 — doświadczalnie powłoka nr 11; 2 — doświadczalnie powłoka nr 7; 3 — $E = 6867 \text{ MPa}$, $\nu = 0,68$; 4 — $E = 14092 \text{ MPa}$, $\nu = 0,183$; 5 — $E_{sr} = 14443 \text{ MPa}$, $\nu_{sr} = 0,173$; 6 — $E = 15990 \text{ MPa}$, $\nu = 0,22$; 7 — $E_{sr} = 19223 \text{ MPa}$, $\nu_{sr} = 0,245$; 8 — $E = 17658 \text{ MPa}$, $\nu = 0,1$; 9 — $E = 17658 \text{ MPa}$, $\nu = 0,15$; 10 — $E = 17658 \text{ MPa}$, $\nu = 0,2$

przewodzone na powłokach o grubości 1 mm nr (3, II) i (3, III), gdzie cyfry arabskie i rzymskie są współrzędnymi w tablicy 1 określającymi tworzywo.

Porównanie wyników pomiarów obciążenia jako funkcji ugięcia przedstawiono na rys. 10. Na tym rysunku oznaczono przebiegi obciążenia jako funkcję ugięcia brzegu obciążonego powłoki, otrzymane doświadczenia 1 i 2 oraz obliczone numerycznie 3 do 10, przy czym krzywe 7 i 10 odpowiadają krzywom doświadczalnym 2 i 1. Pozostałe wielkości obliczono w celu określenia wpływu modułu Younga i liczby Poissona na obciążenie krytyczne. Równanie 7 odpowiadające powłoce nr 3, II w całym przedziale przewyższa wykres doświadczalny; różnica w obciążeniach krytycznych wynosi 2,5%, natomiast maksymalna różnica nie przekracza 8%. Równanie 10 odpowiadające powłoce nr 3, III różni się maksymalnie o 8%, natomiast obciążenie krytyczne wyznaczone doświadczalnie jest wyższe o 3% od obliczonego numerycznie.

Wykres 4 opracowany jest dla materiału izotropowego, natomiast do wykresu 5 przyjęto stałe z kierunku południkowego powłoki $(E_s)_{sr} = 16670 \text{ MPa}$, $(\nu_s)_{sr} = 0,15$ i z kierunku obwodowego $(E_\theta)_{sr} = 12500 \text{ MPa}$, $(\nu_\theta)_{sr} = 0,2$. Widoczny jest niewielki wpływ własności anizotropowych powłoki

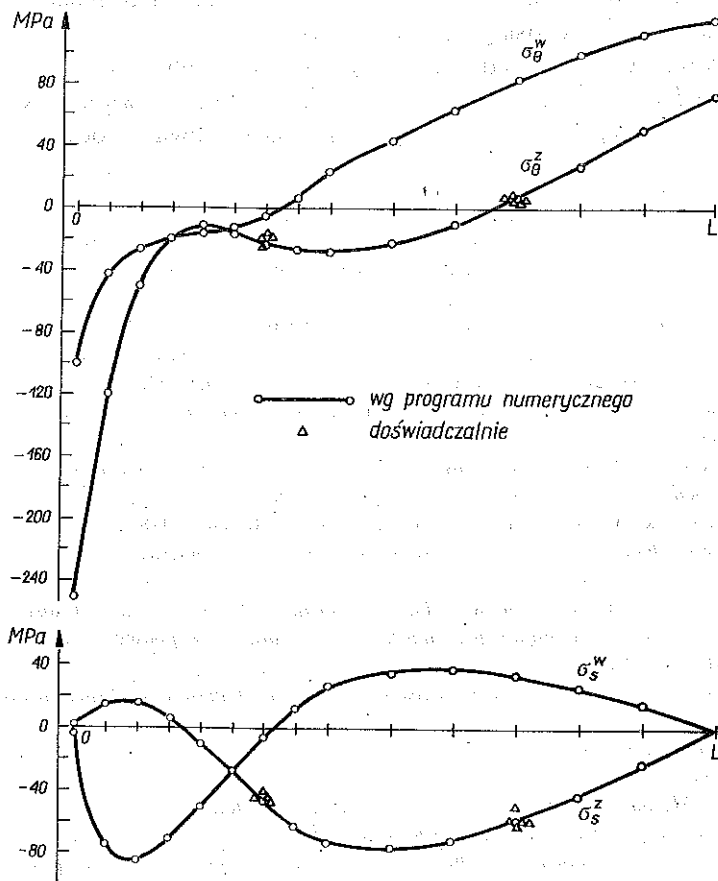


Rys. 11

na charakterystykę obciążenia jako funkcji ugięcia. Wykresy 8, 9 i 10 wykazują wpływ zmian współczynnika Poissona na obciążenie krytyczne.

Zastosowany test statystyczny do zweryfikowania wyników uzyskanych doświadczalnie i obliczonych numerycznie wykazał, że w obu przypadkach kształt tworzącej powłoki bezpośrednio przed utratą stateczności dobrze opisuje równanie prostej. Współczynniki regresji równań rozpatrywanych powłok zawierają się w przedziale 0,97–0,98.

Na podstawie pomiarów odkształceń powłok na zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni określono naprężenia, które także obliczono numerycznie dla tych samych obciążeń. Na rys. 11 i 12 przykładowo przedstawione rozkłady naprężeń południkowych σ_s i obwodowych σ_θ wzdłuż tworzącej stożka L dla powłok nr 3, II i 3, III. Maksymalne różnice pomiędzy wartościami naprężeń określonych doświadczalnie i wg programu numerycznego nie przekraczają 5% w przypadku naprężeń południkowych oraz 10% w przypadku naprężeń obwodowych. Dobra zgodność wyników obliczeń teoretycznych i doświadczalnych pozwala przypuszczać, że rozkład naprężeń powłoki



Rys. 12

obliczony za pomocą programu numerycznego odpowiada rozkładowi naprężeń określonego doświadczalnie. Zaobserwowano też podobny rozkład naprężeń powłok w przypadku zmiany wartości stałych materiałowych.

6. WNIOSKI

1. Temperatura i czas stabilizacji kompozytu na przyjętym poziomie ufności 0,95 nie mają istotnego wpływu na wartość obciążenia krytycznego powłoki.

2. Obciążenie krytyczne o wartości 220–250 N można osiągnąć wprowadzając 15% plastyfikatora do żywicy lub 1,6% wzmocnienia prostopadłego do powierzchni środkowej powłoki.

3. Wyniki badań potwierdziły znaczną zależność obciążenia krytycznego powłoki od kąta stożka. Dla powłoki z kompozytu epoksydowo-szklanego grubość 1 mm przy kącie stożka $\alpha < 14^\circ$ następuje przeskok do nowego położenia równowagi w zakresie naprężeń sprężystych; natomiast dla $\alpha > 14^\circ$ powłoka niszczy się nie osiągając przeskoku.

4. Uzyskane wyniki badań doświadczalnych i obliczonych numerycznie według programu [3 i 4] wskazują, iż do opisu stanu powłoki z kompozytu epoksydowo-szklanego pod obciążeniem można stosować model Kirchhoffa–Lowe'a.

LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. H. AHRENS, *Analiza wariancji*, PWN, Warszawa 1970.
1. С. А. АМЬАРДУМАН, *Общая теория анизотропных оболочек*, Наука, Москва 1974.
3. W. BORKOWSKI, M. KLEIBER, *Statyczna i dynamiczna analiza dużych deformacji cienkich osiowo-symetrycznych powłok sprężysto-plastycznych metodą elementów skończonych*, IPPT PAN, Warszawa 1980.
4. W. BORKOWSKI, M. KLEIBER, *Nieliniowa analiza statyki cienkich powłok osiowo-symetrycznych metodą elementów skończonych*, Rozpr. Inżyn., 2, 1982.
5. Э. И. ГРИГОЛЬБУК, *Устойчивость оболочек*, Наука, Москва 1978.
6. Z. HELLWIG, *Elementy rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej*, PWN, Warszawa 1977.
7. J. HYLA, B. JASTRZĘBSKA, *Wpływ stabilizacji termiczno-czasowej na własności kompozytu żywica E53 — włókno węglowe przeznaczonego do pracy w podwyższonej temperaturze*, Inżyn. Mat., 1, 1981.
8. S. KARUGA, G. PUČKA, *Zasady i zastosowanie metod planowania eksperymentów*, Inżyn. Mat., 2, 1982.
9. M. KLEIBER, *Some results on the numerical analysis of structural instabilities. Part. I*, Rozpr. Inżyn., 3, 1982.
10. T. LAMBER, *Metody i techniki badań*, Inżyn. Mat., 3, 1982.
11. S. OCHELSKI, M. ROZIN, *Porównanie własności z badań reologicznych i statycznych kompozytów polimerowych wzmocnionych dwukierunkowo i przestrzennie*. VIII Sympozjum PTMTS, Wrocław 1981.

12. Z. POŁAŃSKI, *Planowanie doświadczeń w technice*, PWN, Warszawa 1984.
13. G. PUCKA, S. KARUGA, *Planowanie badań wstępnych metodą kwadratów łacińskich*, Inżyn. Mat., 3, 1982.
14. Л. Н. ПОДГОРНЫЙ, В. В. БОРТОВОЙ, В. Д. КОЛОМАК, *Полученост и устойчивост гнбких пологих оболочек вращения*, Наукова Думка, Київ 1982.
15. M. ROZIN, *Analiza stateczności powłok stożkowych z kompozytów epoksydowo-szklanych*, Rozprawa doktorska, WAT, Warszawa 1984.
16. А. С. ВОЛМИР, *Устойчивость деформируемых систем*, Наука, Москва 1967.
17. А. С. ВОЛМИР, *Гибкие пластинки и оболочки*, Госиздат, Москва 1956.
18. S. WIŚNIEWSKI, *Nieliniowe zagadnienia dotyczące ugięć powłoki o postaci stożka ściętego, ściskanej silami równomiernie rozłożonymi na brzegach*, Arch. Bud. Masz., 4, 1959.

РЕЗЮМЕ

ВЛИЯНИЕ НЕКОТОРЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И МАТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ДЕФОРМАЦИЮ КОНИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ИЗ ЭПОКСИДНО-СТЕКЛЯННОГО КОМПОЗИТА

Представлены результаты исследований конических оболочек из разных эпоксидно-стеклянных композитов. Целью исследований являлось проведение анализа оболочек, исполняющих роль дисковой пружины типа защелки с заданными требованиями. Применен метод анализа дисперсии экспериментальных результатов, полученных при использовании статических программ рандомизованных греко-латинскими квадратами, для оценки влияния температуры и времени стабилизации композита, содержания упрочнения перпендикулярного к срединной поверхности оболочки, содержания пластификатора и формы конической оболочки на значение критической нагрузки.

SUMMARY

EFFECT OF CERTAIN GEOMETRIC AND MATERIAL PARAMETERS UPON THE DEFORMATION OF CONICAL SHELLS MADE OF GLASS-EPOXY COMPOSITES

Conical shells made of various glass-epoxy composites are tested; the shells are assumed to play the role of disk springs of prescribed properties. The test results variance is analyzed by means of statical programs randomized by Greek-Latin squares in order to evaluate the effects of temperature and composite stabilization, of the reinforcement normal to the middle surface, of the plasticizer contents and of the shell geometry upon the value of the critical load.

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA

WOJSKOWY INSTYTUT TECHNIKI INŻYNIERYJNEJ

Praca została złożona w Redukcji dnia 27 marca 1985 r.