

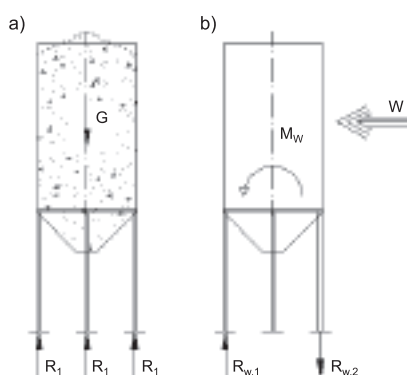
dr hab. inż. Eugeniusz Hotała, prof. PWi\*  
dr inż. Łukasz Skotny\*

# Badania ściskanych podłużnie powłok walcowych z podporami odcinkowymi

*Investigations of longitudinally compressed cylindrical shells with discrete supports*

Eksperymentalne badania stateczności prowadzone są z reguły w warunkach osiowego obciążenia ściskanych powłok walcowych, niezależnie od tego, czy są one podparte na całym obwodzie, czy też na kilku podporach dyskretnych (odcinkowych). W przypadku walcowej powłoki płaszcza silosu opartego na głowicach słupów analizowana jest jedna z sytuacji obliczeniowych, w której reakcje podporowe  $R_1$  są na wszystkich głowicach słupów prawie jednakowe (rysunek 1a). Przy niewielkiej wartości obciążenia pionowego  $G$ , w przypadku dużej wartości obciążenia poziomego  $W$  i niewielkiej liczby podpór ( $n = 3, 4$ ), istnieje możliwość wystąpienia reakcji podporowej  $R_{w,1}$ , ściskającej walcowy płaszcz tylko nad jedną podporą. Jest to więc sytuacja nieco inna niż w typowo prowadzonych badaniach eksperymentalnych, w których wszystkie podpory odcinkowe obciążone są jednakowo.

W artykule przedstawiono wyniki obszernych badań doświadczalnych stateczności ściskanych podłużnie walcowych powłok stalowych, podpartych na kilku dyskretnych podporach, przy czym podłużne obciążenie ściskające przykładane było tylko na pojedynczej podporze odcinkowej (dyskretnej). Jednym z celów badań było wykazanie, że nośność ściskanej powłoki walcowej, związana z jej lokalną utratą stateczności w strefie podpór odcinkowych, nie zależy od tego, czy pozostałe podpory (poza analizowaną) są obciążone, czy też nie. Potwierdzenie tej tezy ma znaczenie nie tylko poznawcze, ale i praktyczne, szczególnie z uwagi na racjonalne planowanie badań eksperymentalnych stateczności lokalnej walcowych powłok stalowych.



Rys. 1. Wybrane sytuacje obliczeniowe w silosach stalowych: a) podobne wartości reakcji podporowych  $R_1$  przy wypełnionej komorze; b) tylko na jednej podporze odcinkowej występuje reakcja ściskająca  $R_{w,1}$

Samuelson i Eggwertz [1] jako pierwsi wykazali, że ściskające naprężenia południkowe w powłokach walcowych, pochodzące od reakcji podpór odcinkowych, nie rozchodzą się po obwodzie tych powłok zgodnie z zasadą Saint Venanta, powszechnie stosowaną w przypadku płaskich dźwigarów powierzchniowych. Inni autorzy [2], [3] wykazali również, że w praktyce strumienie południkowych naprężeń ściskających w powłoce od obciążeń na podporach dyskretnych zlokalizowane są w bardzo wąskim paśmie nad tymi podporami i nie rozprzestrzeniają się istotnie w kierunku obwodowym. Nie dochodzi więc do równomierności tych naprężeń na obwodzie powłoki, nawet w dużej odległości od podpór odcinkowych. Z uwagi na koncentrację południkowych naprężeń ściskających w powłoce walcowej w pobliżu osi każdej podpory odcinkowej utrata stateczności powłoki ma charakter lokalny, a deformacje wyobczeniowe ograniczone są do obszaru powłoki w pobliżu tych podpór. W przypadku, gdy liczba podpór jest niewielka ( $n = 3, 4$ ), strefy przypodporo-

wych deformacji nie zbliżają się zbyt blisko do siebie. Można zatem sądzić, że reakcja krytyczna pojedynczej podpory odcinkowej  $R_{LIM}$ , przy której wystąpi niestateczność lokalna powłoki, jest niezależna od oddziaływań na pozostałe podpory. Przedstawione wyniki badań eksperymentalnych potwierdzają ten pogląd.

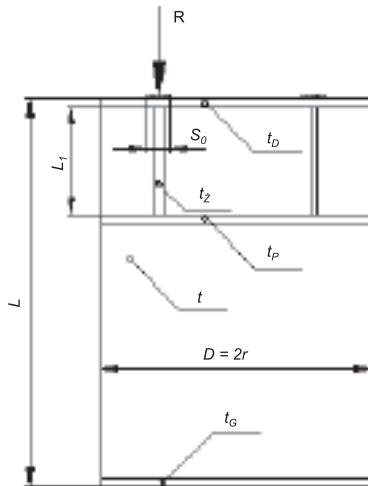
## Opis badań

Badania osiowo ściskanych powłok walcowych, opartych na podporach odcinkowych prowadził m.in. Komman [3] i Nowak [4]. Powłoki obciążane były równomiernie na górnej krawędzi, a podpory odcinkowe zlokalizowane na krawędzi dolnej. Jednoczesna utrata stateczności nad wszystkimi trzema lub czterema podporami odcinkowymi jest w realnych powłokach niemożliwa. Wyoboczenie powłoki występuje z reguły nad jedną z podpór odcinkowych i kontynuowanie badań (wzrost obciążenia osiowego) jest w zasadzie mało przydatne. Tak więc jeden model powłoki pozwala uzyskać tylko jedną wartość krytycznego obciążenia południkowego  $R_{LIM}$  pojedynczej podpory odcinkowej.

W prezentowanych badaniach eksperymentalnych krawędź z podporami odcinkowymi umieszczona była od góry, a równomiernie podparta krawędź od dołu na płaskiej, sztywnej płycie (rysunek 2, fotografia). Podłużne siły ściskające w badanej powłoce, odpowiadające reakcjom podpór odcinkowych, przykładano za pomocą siłowników hydraulicznych na górnej krawędzi (rysunek 2, fotografia), kolejno nad każdą z trzech lub czterech podpór odcinkowych o małej szerokości  $s_0$ . Dzięki temu zabiegowi można było wykorzystać pojedynczy model 3- lub 4-krotnie. Obciążenie na każdej z pojedynczych podpór realizowane było przez precyzyjnie kontrolowane prze-

\* Politechnika Wroclawska

mieszczenie tłoka siłownika. Badano modele powłok bez żeber krótkich oraz modele powłok z żebrami krótkimi w osiach podpór odcinkowych, zwieńczonych pierścieniem obwodowym (rysunek 2). W obu rodzajach modeli uzyskano potwierdzenie podstawowej tezy badawczej, przy czym w pracy zaprezentowano jedynie wyniki dla powłok z żebrami krótkimi.



Rys. 2. Geometria badanych modeli powłok walcowych

Modele badanych powłok stalowych miały następujące charakterystyki geometryczne:  $L = 1000$  mm;  $r = 500$  mm,  $s_0 = 2$  lub  $60$  mm;  $L_1/r = 0,24$ ;  $0,54$  lub  $1,04$ ;  $t = 1$  lub  $2$  mm. Grubość płaskownika, z którego wykonano pierścienie i żebra, wynosiła  $t_G = t_D = t_Z = 20$  mm.

Podczas badań nie doprowadzono do zbyt rozległych deformacji wybojczywych w stanie pokrytycznym w rejonie pojedynczych podpór (fotografia), dlatego też nie dochodziło do deformacji badanych powłok w strefach pozostałych podpór odcinkowych, które miały być dopiero obciążane w następnej kolejności. Badane modele powłok odpowiadają dolnym fragmen-

tom rzeczywistych powłok silosów o walcowych płaszczyznach. Jak pokazały badania, utrata stateczności ma charakter lokalny w rejonie podpór odcinkowych, stąd nie ma potrzeby stosowania w tego typu badaniach powłok długich o stosunku  $L/r > 2$ .

Przed rozpoczęciem badań eksperymentalnych wykonano wiele analiz numerycznych modeli badanych powłok [5], których wyniki wykazały, że dla sprężystych powłok idealnych wpływ lokalnej utraty stateczności w sąsiednich strefach podpór odcinkowych na siłę krytyczną  $R_{LIM}$  na pojedynczej podporze jest znikomy (różnica w wynikach nie przekraczają 1,7%), gdy liczba podpór  $n = 3$  lub  $4$ . Badania doświadczalne były jednak potrzebne, aby sprawdzić tę tezę w przypadku realnych powłok z błędami kształtu.

### Wyniki badań

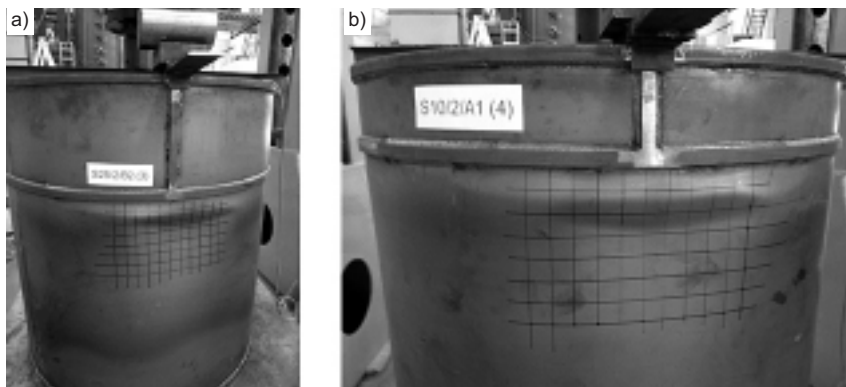
Przeprowadzono trzy podstawowe serie badań doświadczalnych, w których modele powłok miały smukłość  $r/t = 250$  lub  $500$  i różniły się wysokością  $L_1$  żebra w osi podpory odcinkowej (rysunek 2). Stosowano dwie szerokości podpór odcinkowych  $s_0 = 2$  oraz  $s_0 = 60$  mm. Szczegółowy opis badań zawarto w pracy [5]. W trakcie badań wyznaczano dla każdego modelu podporową reakcję krytyczną  $R_{LIM}$  kolejno nad wszystkimi podporami. Nie zaobserwowano istotnych różnic w uzyskanych wynikach, niezależnie od tego, czy badana podpora w danym modelu była obciążana jako pierwsza, czy też w następnej kolejności. W tabeli 1 i 2 przedstawiono sumaryczne zestawienie wyników przeprowadzonych badań. Należy zwrócić uwagę na to, że w obrębie jednego modelu stosowano w badaniach dwie różne szerokości podparcia  $s_0$ , co miało wpływ na wartość  $R_{LIM}$ . Należy zatem porównywać wyniki poszczegól-

Tabela 1. Wyniki badań doświadczalnych dla modeli o  $r/t = 500$  wg [5]

$L_1/r$	$s_0/2\pi r$	Numer podpory	$R_{LIM}$	$R_{LIM}/R_{LIM,sr}$
[-]	[-]	[-]	[kN]	[-]
0,24	0,0191	1/4	31,10	0,93
		1/3	36,57	1,09
		3/3	33,14	0,99
	0,0006	4/4	33,46	1,00
		2/3	31,89	0,99
		2/4	32,94	1,02
0,54	0,0191	3/3	36,76	1,20
		1/4	27,38	0,89
		3/4	28,06	0,92
	0,0006	4/4	30,26	0,99
		1/3	34,30	0,97
		2/3	30,62	0,87
1,04	0,0191	2/4	41,26	1,17
		1/3	48,92	1,22
		2/3	34,28	0,86
	0,0006	1/4	41,30	1,03
		2/4	35,84	0,89
		3/3	49,10	1,06
0,0006	3/4	48,94	1,06	
	4/4	40,64	0,88	

Tabela 2. Wyniki badań doświadczalnych dla modeli o  $r/t = 250$  wg [5]

$L_1/r$	$s_0/2\pi r$	Numer podpory	$R_{LIM}$	$R_{LIM}/R_{LIM,sr}$
[-]	[-]	[-]	[kN]	[-]
0,24	0,0191	1/3	130,90	1,09
		2/3	120,83	1,01
		3/3	121,45	1,02
	0,0006	1/4	114,92	0,96
		2/4	109,86	0,92
		3/4	115,33	1,06
0,54	0,0191	4/4	102,00	0,94
		1/3	152,86	1,16
		3/3	139,50	1,06
	0,0006	1/4	136,78	1,04
		2/4	107,96	0,82
		4/4	120,72	0,92
1,04	0,0191	2/3	132,26	1,07
		3/4	115,54	0,93
		1/3	133,60	0,89
	0,0006	3/3	147,22	0,98
		1/4	148,34	0,99
		2/4	173,34	1,16
0,0006	2/3	145,54	0,97	
	3/4	142,88	1,02	
4/4	136,98	0,98		



Widok modeli ( $r/t = 250$ ) na stanowisku badawczym po utracie stateczności [5]: a) model z trzema badanymi podporami odcinkowymi, b) model z czterema badanymi podporami odcinkowymi