



EUGENIUSZ HOTAŁA, *eugeniusz.hotala@pwr.wroc.pl*

ŁUKASZ SKOTNY, *lukasz.skotny@pwr.wroc.pl*

Politechnika Wrocławska

ZAGROŻENIE AWARYJNE UZĘBROWANYCH PŁASZCZY SIŁOSÓW STALOWYCH OPARTYCH NA SŁUPACH

FAILURE RISK OF RIBBED STEEL SILO SHELLS SUPPORTED ON COLUMNS

Streszczenie Przedmiotem analizy są zagadnienia lokalnej stateczności cylindrycznych powłok podpartych dyskretnie z krótkimi żebrami, zwieńczonych pierścieniem obwodowym. Takie powłoki występują powszechnie w stalowych siłosach opartych na słupach. Wykazano, że wbrew powszechnym opiniom zastosowanie pierścienia obwodowego nad krótkimi żebrami nie zabezpiecza płaszczy takich siłosów przed awarią, wywołaną lokalną utratą stateczności nad tymi żebrami lub obok tych żeber. Na podstawie badań doświadczalnych dużej liczby modeli ściskanych powłok oraz licznych analiz numerycznych zaproponowano metodę bezpiecznego szacowania nośności lokalnie uzębrowanych cylindrycznych powłok płaszczy siłosów stalowych, opartych na głowicach słupów.

Abstract The issues of local stability analysis of cylindrical shells supported discretely with short ribs ended with circumferential ring are presented. shells are common in steel silos based on columns. It was shown that in contrary to the general opinion, the use of the circumferential ring over short ribs does not protect such silos against the failure due to local instability over these ribs or next to them. On the basis of experimental studies of the large number of models of compression shells and numerous numerical analysis, a safe method of the assessment of the locally ribbed cylindrical steel silos supported on columns is presented.

1. Wprowadzenie

Liczne przypadki awarii nieuzębrowanych płaszczy siłosów metalowych opartych na podporach dyskretnych, którymi są najczęściej głowice słupów (rys. 1a), opisywane są przez wielu badaczy [1], [2], [3]. Podstawowe przyczyny tych awarii to lokalne utraty stateczności cylindrycznych płaszczy siłosów tuż nad tymi dyskretnymi podporami. Wielu projektantów takich siłosów ma przekonanie, że pierścienie podporowe o odpowiedniej nośności zapewniają równomierne południkowe naprężenia ściskające σ_x na całym obwodzie płaszcza już na jego krawędzi podporowej. Tymczasem sztywność w kierunku południkowym realnych pierścieni podporowych jest kilka rzędów mniejsza od sztywności powłok cylindrycznych płaszczy siłosów w tym kierunku. Fakt ten skutkuje tym, że południkowa reakcja N_l pojedynczej podpory na płaszcz wywołuje takie lokalne spiętrzenie naprężeń σ_x w płaszczu, jakby pierścienia podporowego w ogóle nie było. Samuelson [4] wykrył także pewną osobliwą cechę ściskanych południkowo powłok cylindrycznych podpartych dyskretnie na krawędzi podporowej, polegająca na tym, że lokalne naprężenia południkowe σ_x na krawędzi podporowej płaszcza nie rozchodzą się na cały obwód powłoki, tak jak to by wynikało z zasady Saint-Venanta w odniesieniu do płaskich tarcz (rys. 2b). Taki niekorzystny rozkład południkowych naprężeń błonowych σ_x , nawet w znacznej odległości od krawę-

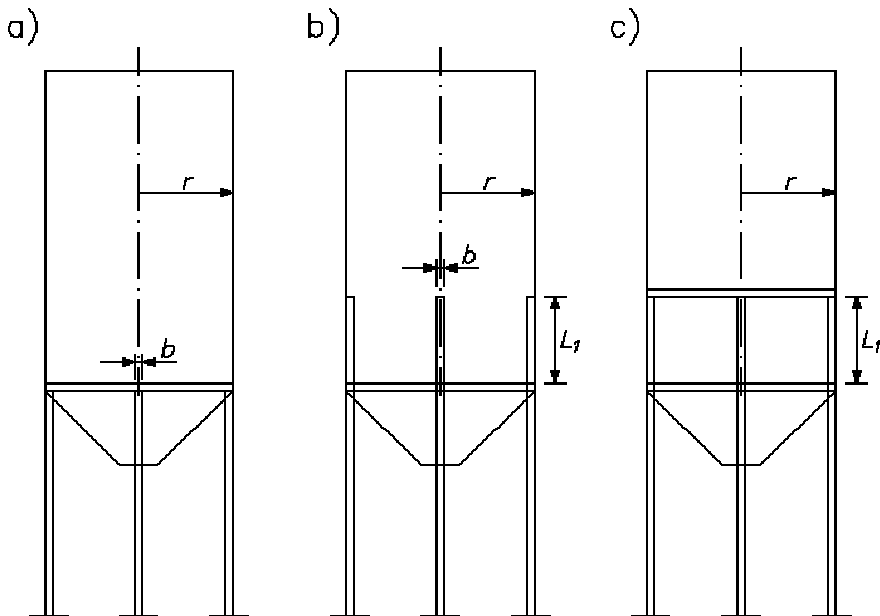
dzi podporowej płaszcza silosu, może być przyczyną niespodziewanej awarii silosu wskutek utraty stateczności tego płaszcza (rys. 2a).

Jest stwierdzone [5], [6], że uźebrowanie stref podporowych płaszczy silosów (rys. 1b) zwiększa ich odporność na lokalną utratę stateczności, choć taka utrata stateczności jest możliwa (rys. 3a, 3b). Panuje także powszechne przekonanie, że zastosowanie żeber płaszcza silosu nad podporami dyskretnymi o długości $L_f \approx r$, zwieńczonych pierścieniem obwodowym (rys. 1c), jest skutecznym środkiem zapobiegającym lokalnej utracie stateczności takiego płaszcza. Tymczasem jest to całkowicie błędne przekonanie, o czym świadczą wyniki dużej serii badań eksperymentalnych i numerycznych, wykonanych przez autorów niniejszej pracy. Silosy z uźebrowanymi południkowo i obwodowo strefami cylindrycznych płaszczy silosów stalowych w rejonie podpór odcinkowych są również narażone na lokalną utratę stateczności nad tymi południkowymi uźebrowaniami.

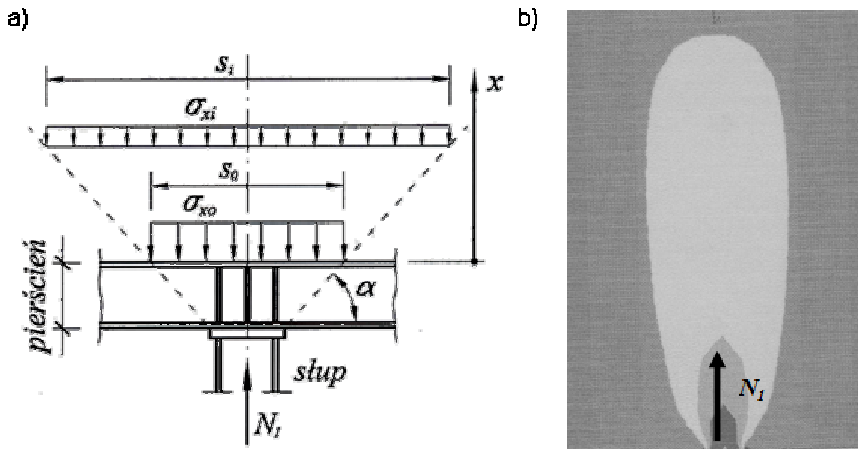
2. Analizy stateczności cylindrycznych płaszczy silosów nad dyskretnymi podporami

Ocena nośności nieuźebrowanych, cylindrycznych płaszczy silosów metalowych nad głowicami słupów podporowych polega przede wszystkim na sprawdzeniu, czy maksymalne południkowe naprężenia ściskające σ_x w tych strefach nie przekroczy obliczeniowej wytrzymałości na wyboczenie $\sigma_{x, Rd}$. W praktyce wyznacza się wartości naprężeń σ_{x0} [7] lub naprężenia σ_{xi} na ustalonym poziomie x [4] według rys. 2a i porównuje się je z normowymi wartościami $\sigma_{x, Rd}$ [8]. W pracy [4] zakłada się kąt rozchodzenia naprężeń $\alpha = 75^\circ$ (rys. 2a).

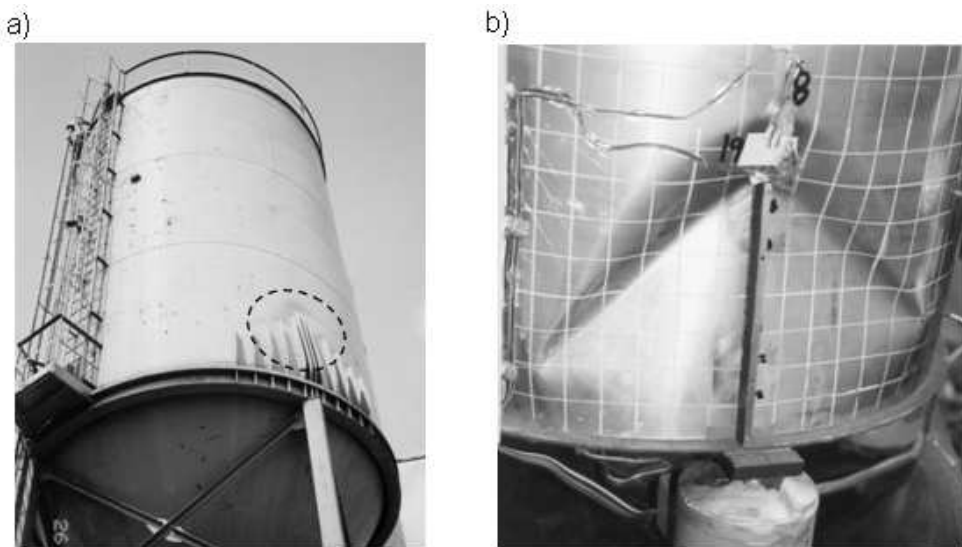
Stosowanie normowych [8] procedur ustalania parametru nierównomiernego rozkładu naprężeń błonowych σ_x wzdłuż obwodu powłoki płaszcza nad podporami dyskretnymi jest skomplikowane i niezwykle uciążliwe, a ponadto wymaga zaawansowanych analiz przy pomocy MES.



Rys. 1. Cylindryczne płaszcze silosów opartych na słupach: nieuźebrowane (a), z żebrami krótkimi (b) oraz z żebrami krótkimi, zwieńczonymi pierścieniem obwodowym (c)



Rys. 2. Schemat rozchodzenia się strumienia naprężeń σ_x w ściskanej powłoce cylindrycznej (a) oraz realny warstwice strumienia tych naprężeń uzyskane numerycznie (b) wg [7]



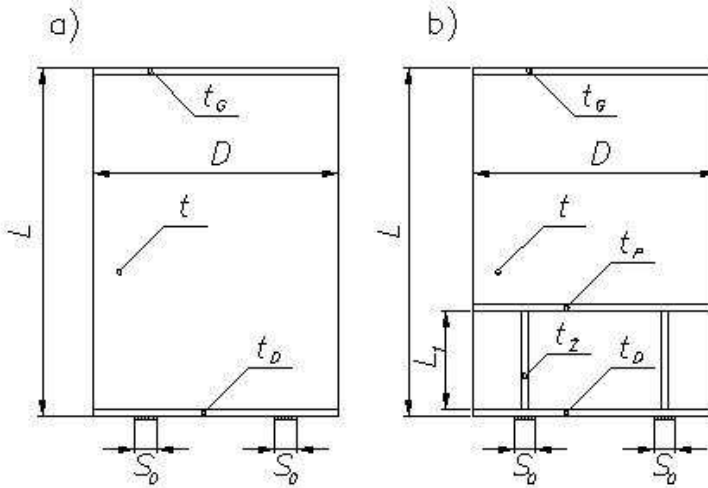
Rys. 3. Utrata stateczności płaszcza silosu nad żebrami (a) oraz badanej [5] uźebrowanej powłoki (b)

3. Badania stateczności uźebrowanych powłok nad podporami odcinkowymi

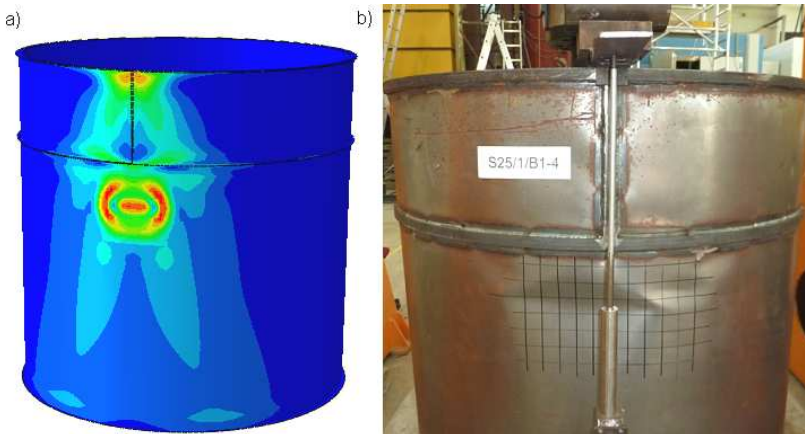
W okresie ostatnich 2 lat wykonano liczne serie własnych badań stateczności ściskanych osiowo modeli powłok cylindrycznych podpartych na podporach odcinkowych. Badano pewną liczbę powłok nieuźebrowanych nad tymi podporami (rys. 4a) oraz przeprowadzono ponad 70 prób dla modeli cylindrycznych powłok stalowych z żebrami krótkimi o różnych długościach L_l (rys. 4b), zwieńczonych pierścieniami obwodowymi. Wyniki badań wskazują jednoznacznie, że mimo zastosowania pierścienia pośredniego wieńczącego żebra krótkie, może wystąpić lokalna utrata stateczności nad tymi żebrami (rys. 5).

Badane eksperymentalnie modele cylindrycznych powłok (rys. 4) miały średnicę $D = 1000$ mm, wysokość $L = 1000$ mm, a grubości powłok t wynosiły 1 mm oraz 2 mm.

Pierścień podporowy wykonany był z pręta kwadratowego o grubości $t_D = 20$ mm, podobnie jak pierścień górny $t_G = 20$ mm. Pierścień pośredni nad żebrami (po zewnętrznej stronie powłoki) wykonany był z płaskownika o szerokości 20 mm i grubości $t_P = 10$ mm. Żebra krótkie o długości L_I nad podporami dyskretnymi wykonane były z płaskownika o szerokości 20 mm i grubości $t_Z = 10$ mm. Stosowano dwie szerokości podpór dyskretnych $s_o = 2$ mm oraz $s_o = 60$ mm. Badano ściskane osiowo powłoki podparte na 3 lub 4 podporach dyskretnych, dostosowując liczbę żeber do liczby tych podpór. Przykładano południkowe obciążenia skupione w miejscach podpór o szerokości s_o (rys. 5b) a druga krawędź badanej powłoki była oparte w sposób ciągły na całym obwodzie. Każdy badany model analizowany był numerycznie metodą elementów skończonych programem ABAQUS, w celu wyznaczenia obciążenia krytycznego ściskanej powłoki idealnej. Badane powłoki miały oczywiście różne imperfekcje geometryczne, które mierzono w każdym modelu. Podstawą wyznaczenia obliczeniowej wytrzymałości na wyobczenie $\sigma_{x, Rd}$ wg [8] jest wartość naprężeń krytycznych dla analogicznej powłoki idealnej oraz odpowiednie krzywe wyobczeniowe powłok realnych..



Rys. 4. Schematy badanych modeli nieuźebrowanych (a) oraz uźebrowanych (b)



Rys. 5. Rozkład naprężeń σ_x w jednym z analizowanych modeli powłoki (a) oraz lokalna utrata stateczności pod żebrzem krótkim w badanym modelu (b)

W trakcie badań eksperymentalnych mierzono jednocześnie siły nad podporami lokalnymi oraz południkowe przemieszczenie w miejscu przyłożenia tych sił. Pozwoliło to na uzyskanie ścieżek równowagi statycznej i określenie reakcji krytycznej $N_{l, cr}$ dla każdej podpory. Wartości reakcji krytycznych $N_{l, cr}$ dla wybranych 12 modeli powłok o szerokości podpór odcinkowych $s_o = 2$ mm (rys. 4b) przedstawiono w tabl. 1.

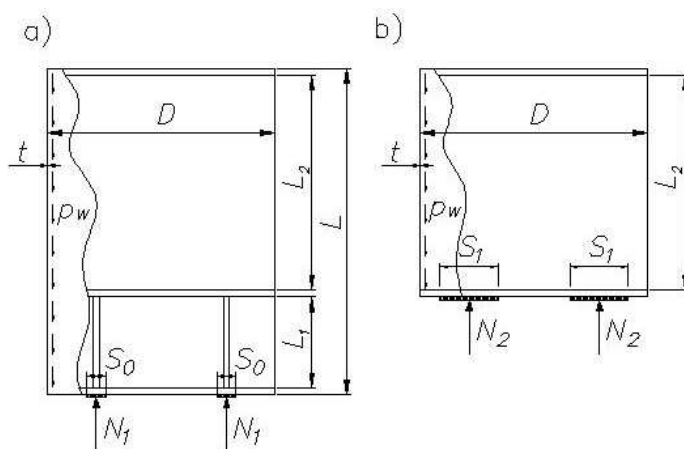
Tablica 1. Wartości reakcji krytycznych $N_{l, cr}$ [kN] dla wybranych modeli badanych powłok

$r/t = 500$			$r/t = 250$		
$L_l = 0,2 r$	$L_l = 0,5 r$	$L_l = 1,0 r$	$L_l = 0,2 r$	$L_l = 0,5 r$	$L_l = 1,0 r$
31.89	34.30	49.10	115.33	132.26	145.54
32.94	30.62	48.94	102.00	115.54	142.88

Widać wyraźnie (tab. 1) korzystny wpływ zwiększenia długości L_l żeber nad podporami dyskretnymi na wartość reakcji krytycznej $N_{l, cr}$ pojedynczych podpór. W przypadku najdłuższych żeber $L_l = 1,0 r$ w powłokach o smukłości $r/t = 500$ zdarzały się przypadki utraty stateczności obok żeber, a nie nad żebrami (rys. 10b). W przypadku krótszych żeber nie stwierdzano utraty stateczności obok żeber podporowych.

4. Propozycja bezpiecznej oceny nośności uźebrowanych płaszczy silosów metalowych

Badania eksperymentalne i numeryczne modeli powłok skłaniają do przedstawienia propozycji prostej i bezpiecznej analizy stateczności płaszczy silosów nad żebrami krótkimi, zwieńczonymi pierścieniem obwodowym. W proponowanej metodzie traktuje się nieuźebrowaną część powłoki jako niezależną powłokę o długości L_2 , średnicy $D = 2 r$ i grubości t (rys. 6a, 6b). Powłoka ta jest podparta na zastępczych podporach odcinkowych o szerokości s_l (rys. b). Cała dolna część uźebrowanej powłoki traktowana jest jako rozbudowany pierścień dolny części nieuźebrowanej.



Rys. 6. Propozycja zastąpienia powłoki z żebrami krótkimi (a) powłoką bez tych żeber (b) w analizie stateczności lokalnej nad podporowymi żebrami krótkimi

Podstawowym zagadnieniem w zaproponowanej metodzie szacunkowej analizy stateczności lokalnej powłok płaszczy silosów nad krótkimi żebrami podporowymi, zwień-

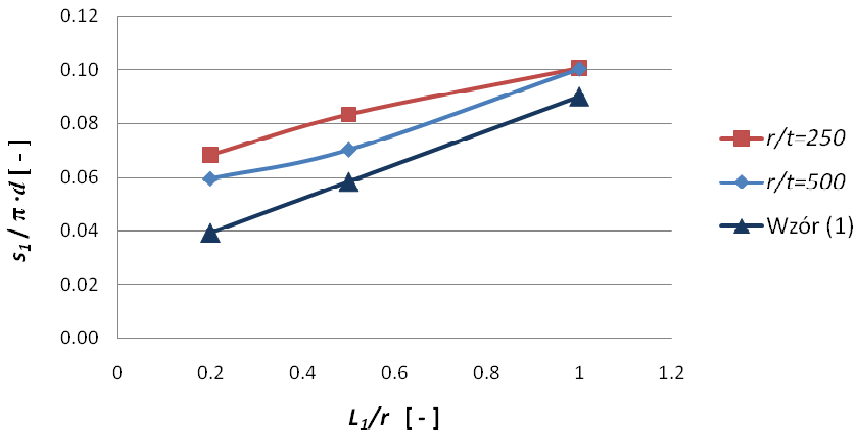
czonymi pierścieniem obwodowych, jest właściwe wyznaczenie zastępczej szerokości s_1 podpory lokalnej (rys. 6b), przy której uzyskuje się identyczną reakcję krytyczną $N_{l, cr}$, zarówno w pełnej uźebrowanej powłoce o szerokości podparcia s_0 (rys. 6a), jak i w powłoce zastępczej o szerokości podparcia s_1 . Korzystając z wyników przeprowadzonych badań doświadczalnych jak i analiz numerycznych podjęto próbę bezpiecznego oszacowania zastępczej szerokości podpory s_1 (rys 6b), proponując następujący wzór:

$$s_1 = 0,4 \cdot L_1 + \frac{r}{6}, \quad (1)$$

gdzie L_1 to wysokość żebra, r jest promieniem powłoki (rys. 1c).

Po wyznaczeniu zastępczej szerokości podpory dyskretnej s_1 stateczność powłoki analizować można według stosunkowo prostych metod, prezentowanych w pracach [4], [7].

W celu weryfikacji poprawności oszacowania zaproponowanego we wzorze (1) wykonano serię numerycznych analiz stateczności powłok idealnych o geometrii badanych eksperymentalnie powłok. Wyznaczano najpierw krytyczną reakcję $N_{l, cr}$ uźebrowanej powłoki o szerokości podpory $s_0 = 2$ mm (rys. 6a), a następnie poszukiwano takiej zastępczej szerokości s_1 dla powłoki nieuźebrowanej (rys. 6b), przy której reakcja krytyczna $N_{l, cr}$ była taka sama jak w pierwotnej powłoce uźebrowanej. Na rys. 7 przedstawiono porównanie wartości s_1 uzyskanych numerycznie dla różnych r/t z wartościami s_1 według wzoru (1).

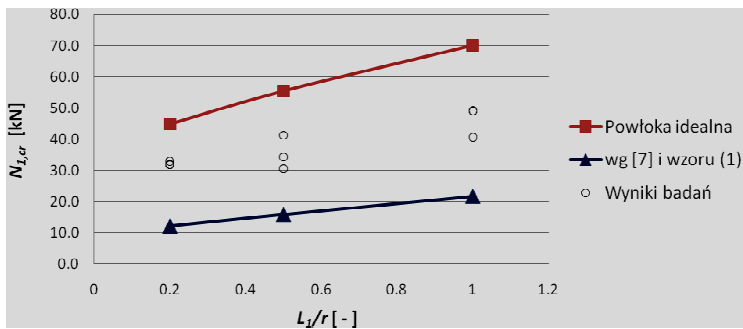


Rys. 7. Zastępcza szerokość podpory dyskretnej s_1 , wyznaczona numerycznie oraz wg wzoru (1)

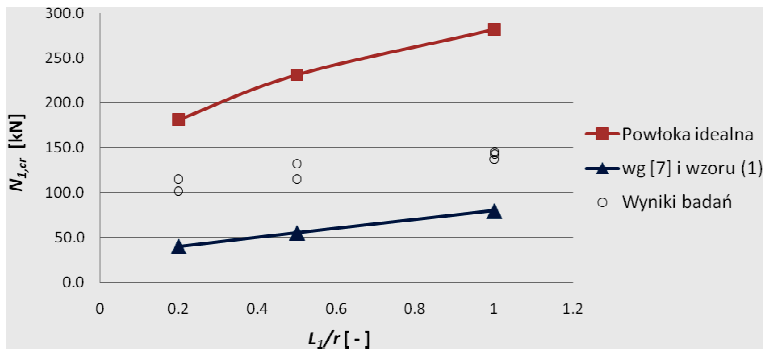
Należy zaznaczyć, że otrzymane wyniki (rys. 7) dotyczą badanych modeli w skali półtechnicznej. Prowadzone są obecnie podobne analizy dla większych średnic powłok i różnych szerokości podpór s_0 . Wyniki tych analiz pozwolą na uściślenie wzoru (1), przy czym jego aktualny zapis daje bardzo bezpieczne oszacowanie zastępczej szerokości podpory dyskretnej s_1 dla realnych płaszczy silosów opartych na słupach. W przeprowadzonych analizach modeli powłok uwzględniano żebra, których przekrój poprzeczny wynosił około 3,5% powierzchni przekroju poprzecznego powłok o $r/t = 500$ oraz około 6% dla modeli o $r/t = 250$.

Na rysunkach nr 8 i 9 przedstawiono wartości reakcji krytycznych $N_{l, cr}$ dla zastępczych powłok wg rys. 6b, wyznaczone numerycznie dla powłok idealnych, obliczonych na podstawie pracy [7] dla zastępczej szerokości podparcia powłoki s_1 (rys. 6b) wg wzoru (1) oraz

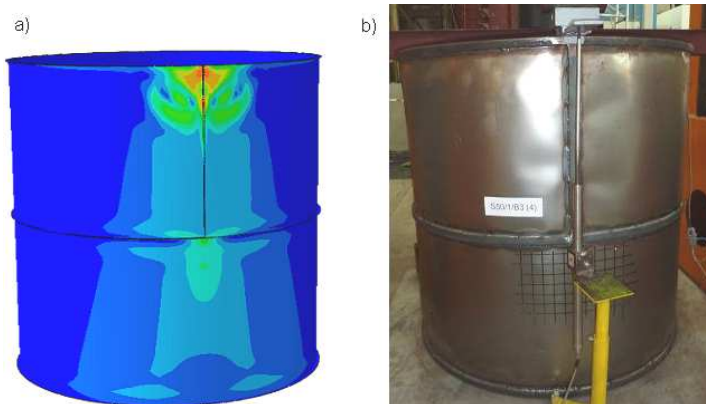
otrzymane z własnych badań eksperymentalnych. Widać, że zaproponowana metoda szacowania nośności powłok uźebrowanych (rys. 6) jest bezpieczna. Widać też, że długość żeber krótkich L_l ma wyraźny wpływ na wartość krytycznej reakcji podpory dyskretniej.



Rys. 8. Porównanie wartości reakcji krytycznych $N_{l, cr}$ uzyskanych numerycznie dla uźebrowanych powłok idealnych $r/t = 500$, obliczonych wg [7] dla szerokości s_l ze wzoru (1) oraz uzyskanych w badaniach doświadczalnych modeli powłok



Rys. 9. Porównanie wartości reakcji krytycznych $N_{l, cr}$ uzyskanych numerycznie dla uźebrowanych powłok idealnych $r/t = 250$, obliczonych wg [7] dla szerokości s_l ze wzoru (1) oraz uzyskanych w badaniach doświadczalnych modeli powłok



Rys. 10. Rozkład naprężeń σ_x w uźebrowanej powłoce (a) oraz utrata stateczności tej powłoki obok żebra podporowego (b)

5. Podsumowanie

Cylindryczne płaszcze stalowych silosów opartych na słupach są narażone na lokalną utratę stateczności, pomimo zastosowania krótkich żeber tych płaszczy, zwieńczonych pierścieniem obwodowym. Nawet stosunkowo długie żebra nie zabezpieczają przez awarią płaszcza silosu opartego na słupach, wywołaną lokalną utratą stateczności nad tymi żebrami. Ten niekorzystny stan zagrożenia awaryjnego wynika ze specyfiki rozkładu błonowych naprężeń południkowych σ_x w płaszczy uźebrowanego silosu nad głowicami słupów (rys. 2b, 5a, 10a). Strumień tych naprężeń nie rozchodzi się na coraz większą szerokość obwodu płaszcza w miarę oddalania się od jego krawędzi podporowej, co wykazał również Samuelson [4] dla płaszczy nieuźebrowanych. Zastosowanie południkowych żeber nad podporami dyskretnymi jeszcze bardziej sprzyja koncentracji naprężeń σ_x w wąskiej strefie na dużej wysokości płaszcza.

Wśród projektantów panuje dość powszechne przekonanie, że zastosowanie uźebrowania nad podporami słupów o geometrii wg rys. 1c pozwala na pominięcie analizy stateczności płaszcza, gdyż zakłada się błędnie, że w tak uźebrowanym płaszczy silosu nie występowało już nadmierne spiętrzenie naprężeń w jego nieuźebrowanej części. Przedstawiona w referacie metoda uproszczonej analizy stateczności uźebrowanych płaszczy silosów pozwoli na zwiększenie ich bezpieczeństwa eksploatacyjnego. Metoda ta wydaje się być dobrą alternatywą dla bardzo skomplikowanych i mało przejrzystych postanowień zapisanych w EC [8], których stosowanie wymaga ponadto tworzenia trójwymiarowego modelu MES do określenia rozkładu naprężeń błonowych σ_x w cylindrycznej powłoce silosu.

Celem przedstawionych wyników analiz numerycznych i badań doświadczalnych było zwrócenie uwagi na pomijany często problem realnego zagrożenia awaryjnego stalowych silosów opartych na słupach, pomimo zastosowania solidnego uźebrowania ich płaszczy w strefach głowic słupów.

Literatura

1. Hotała E.: Remonty i wzmocnianie silosów metalowych. Naprawy i wzmocnienia konstrukcji budowlanych, XXIII Ogólnopolska Konferencja „Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji”, Szczyrk 2008.
2. Pasternak H., Bodarski Z., Hotała E.: Steel Silos – Education by Analysing Failures. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 46.
3. Guggenberger W.: Schadensfall, Schadensanalyse und Schadensbehebung eines Silos auf acht Einzelstützen, Der Stahlbau, Nr 67, 1998.
4. Samuelson L. A., Eggwertz S., Shell Stability Handbook, Elsevier Applied Science, London and New York, 1992.
5. Nowak D.L.: Nośność graniczna silosu metalowego w obszarze oparcia na słupie, Wyd. Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Raport serii PRE 16/2007.
6. Komann S.: Stabilität von diskret gestützten, axialbelasteten, dünnwandigen Kreiszyinderschalen aus Stahl, BTU Cottbus, Schriftenreihe Stahlbau, Heft 4/2005.
7. Hotała E.: Nośność graniczna nieuźebrowanych cylindrycznych płaszczy silosów stalowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2003.
8. PN-EN 1993-4-1:2009 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych, część 4-1: Silosy.