

Sebastian KOŁODZIEJ¹
Jakub MARCINOWSKI²

BADANIA DOŚWIADCZALNE STATECZNOŚCI MAŁO WYNIOSŁYCH, STALOWYCH POWŁOK SFERYCZNYCH OBCIĄŻONYCH CIŚNIENIEM

Cienkie powłoki stalowe w postaci wycinka sfery obciążone ciśnieniem zewnętrznym wykazują tendencje do utraty stateczności w fazie poprzedzającej wy-czerpanie nośności plastycznej. Zjawisko wyboczenia powłok sferycznych było przedmiotem badań wielu autorów, a wyniki dotychczasowych badań teoretycznych i doświadczalnych zostały wykorzystane w zaleceniach projektowych wydanych w 2008 roku przez ECCS [9]. W pracy przedstawiono badania eksperymentalne wykonane na specjalnie w tym celu zaprojektowanym stanowisku badawczym. Próbkę do badań zostały wykonane techniką wyoblania z blach przeznaczonych do głębokiego tłoczenia. Zinventaryzowano geometrię początkową każdej z powłok za pomocą skanowania 3D i wykonano badania materiałowe stali użytej do wykonania powłok. Ciśnienie wymuszano za pomocą kompresora powietrza, a pomiary przemieszczeń były wykonywane przy zastosowaniu optycznego systemu pomiarowego Pontos-Aramis. Rejestrowano formy deformacji całej powłoki w trakcie stopniowego wzrostu ciśnienia także po utracie stateczności. Wszystkie dane pomiarowe rejestrowano automatycznie za pomocą dwóch komputerów. Wynikiem każdego z eksperymentów była nieliniowa ścieżka równowagi w postaci zależności ciśnienia od wybranego parametru przemieszczeniowego. W artykule zaprezentowano porównanie otrzymanych wartości ciśnień krytycznych z wynikami symulacji numerycznych wykonanych systemem COSMOS/M dla geometrii nominalnej oraz porównanie z wartościami nośności wyboczeniowych wynikających z zapisów EDR5th ECCS [9] oraz z propozycji przedstawionej w pracy [3].

Słowa kluczowe: eksperyment, wyboczenie, powłoka stalowa, wycinek sfery, obciążenie ciśnieniem

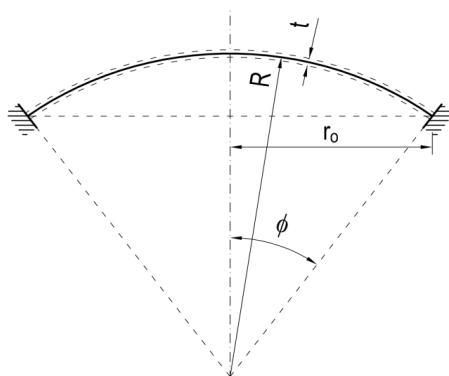
¹ Sebastian Kołodziej, CadPro Biuro Projektów i Ekspertyz Budownictwa, ul. Zacisze 17, 65-775 Zielona Góra, tel. +48 68 453 35 96, e-mail: sebastian.kolodziej@cadpro.pl

² Autor do korespondencji / corresponding author: Jakub Marcinowski, Instytut Budownictwa, Uniwersytet Zielonogórski, ul. Prof. Z. Szafrana 1, 65-516 Zielona Góra, tel. +48 68 328 25 27, e-mail: j.marcinowski@ib.uz.zgora.pl

1. Wprowadzenie

Powłoki stalowe w kształcie wycinka sfery (por. rys. 1.) spotykane są w praktyce inżynierskiej jako dachy zbiorników i silosów. Powłoki tego kształtu stosowane są jako zakończenia walcowych zbiorników ciśnieniowych, a także występują w instalacjach przemysłowych w przemyśle chemicznym i rafineryjnym. Spotkać je też można w podwodnych i nawodnych jednostkach pływających oraz jako części samolotów i obiektów kosmicznych. Przypadek obciążenia ciśnieniem zewnętrznym jest dość często spotykany w praktyce i na ogół ma wpływ decydujący na poprawne projektowanie takich powłok. Maksymalną nośność powłoki sferycznej obciążonej ciśnieniem determinuje sprężysta lub sprężysto-plastyczna nośność wyboczeniowa. Można ją oszacować na podstawie istniejących zaleceń projektowych EDR opublikowanych przez ECCS (por. [9]). Zapisy tych zaleceń są bardzo zachowawcze i powłoki projektowane na ich podstawie nie spełniałyby warunków projektu ekonomicznego. Projektant może wykorzystać ogólne zalecenia EN 1993-1-6 i podjąć próbę oszacowania nośności wyboczeniowej powłoki sferycznej na podstawie analizy GMNIA, jednakże pod warunkiem, że będzie w stanie ustalić kształt i wartość typowych imperfekcji spodziewanych w danym procesie produkcyjnym.

Badania doświadczalne stateczności powłok sferycznych obciążonych ciśnieniem były realizowane przez zespoły badaczy w wielu krajach. Najstarsze,



Rys. 1. Przekrój próbki powłoki sferycznej

Fig. 1. Cross section of the examined spherical cap

dobre udokumentowane badania zostały opublikowane przez Kaplana i Funga w raporcie NACA w 1954 roku (por. [6]). Kolejne, również często cytowane wyniki badań stateczności powłok sferycznych były publikowane w latach sześćdziesiątych dwudziestego wieku (por. prace [1], [5], [7], [8], [10]). Na przełomie XX i XXI wieku ekspery-

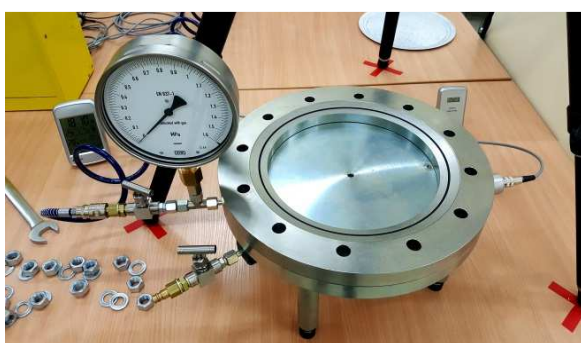
mentalne badania stateczności powłok sferycznych realizował Błachut, a ich wyniki publikował w wielu pracach i prezentował na konferencjach (por. [2]).

Badania prezentowane w tej pracy zostały zrealizowane na specjalnie zaprojektowanym i wykonanym stanowisku badawczym. Do przygotowania stanowiska badawczego oraz wykonania powłok do badań pomocnym okazały się współczesne obrabiarki klasy CNC. Pozwalają one wykonać elementy komory ciśnieniowej oraz same powłoki sferyczne z dużą dokładnością. Najnowocze-

śniejsze techniki pomiarowe pozwalają precyzyjnie zinwentaryzować faktyczną geometrię oraz rejestrować przemieszczenia we wszystkich fazach deformacji powłoki poddanej działaniu ciśnienia. Oba te czynniki stwarzają możliwość realizacji badań eksperymentalnych na poziomie nie osiągalnym przez badaczy realizujących podobne badania w latach minionych. Pozostająca w dyspozycji autorów aparatura pomiarowa oraz możliwości techniczne wykonania powłok przez profesjonalną firmę skłoniły autorów do podjęcia badań nad nośnością wybocheniową stalowych powłok sferycznych w postaci wycinka sfery sztywno zamocowanego na obwodzie i poddanych działaniu ciśnienia zewnętrznego.

Głównym celem realizowanych badań jest weryfikacja doświadczalna istniejących propozycji szacowania nośności wybocheniowej i ewentualne wnioski dotyczące ich korekty. Badania doświadczalne powłok sferycznych o ściśle ustalonej geometrii i znanych parametrach materiałowych stwarzają też okazję do numerycznej symulacji przeprowadzonych eksperymentów z możliwością precyzyjnego dostrojenia modelu obliczeniowego. Doświadczenia zdobyte przy okazji numerycznego modelowania przebiegów eksperymentów będą mogły być wykorzystane w modelowaniu zjawiska utraty stateczności stalowych powłok sferycznych spotykanych w praktyce inżynierskiej.

Realizacja badań eksperymentalnych bardzo wielu powłok o różnej smukłości względnej stworzyła też możliwość obserwacji form deformacji towarzyszących utracie stateczności nieobserwowanych wcześniej przez innych badaczy. Potwierdza to prawdziwość opinii wyrażonej w pracy [4]: „przebieg wyboczenia powłoki sferycznej jest najbardziej tajemniczy”.



Rys. 2. Aparat badawczy. Płyta denna i dolny pierścień

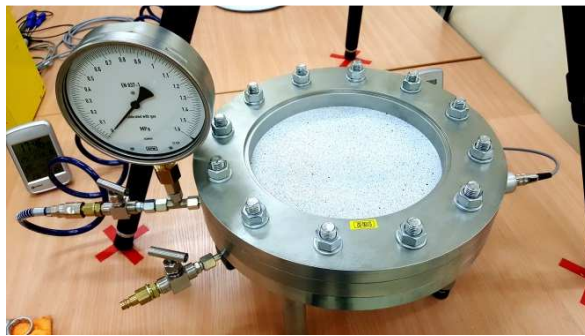
Fig. 2. The test stand. Base plate and lower ring

2. Opis stanowiska badawczego

Program badań obejmował przebadanie stalowych powłok sferycznych o promieniu $r_0 = 250$ mm oraz promieniu powierzchni wewnętrznej $R_w = 500$ mm. Próbkki zostały wykonane z blachy stalowej (stal gatunku DC-04) o grubościach nominalnych wynoszących $t = 0,50; 0,80; 1,00; 1,50$ mm i nazwane odpowiednio S050.xx; S080.xx; S100.xx; S150.xx (xx oznacza kolejny numer próbki danej serii). Badane elementy wykonano metodą wyoblania (ang. spinning metal forming). W celu eliminacji naprężeń rezydualnych, powstałych

w procesie plastycznego formowania próbek, wykonane elementy zostały poddane wyżarzaniu odprężającemu w temperaturze 400 °C, a następnie próbki poddano procesowi skanowania laserowego 3D w celu identyfikacji rzeczywistej geometrii.

Główną część stanowiska badawczego stanowiła komora ciśnieniowa pokazana na rys. 2-5. Specyfikację poszczególnych części komory ciśnieniowej po-

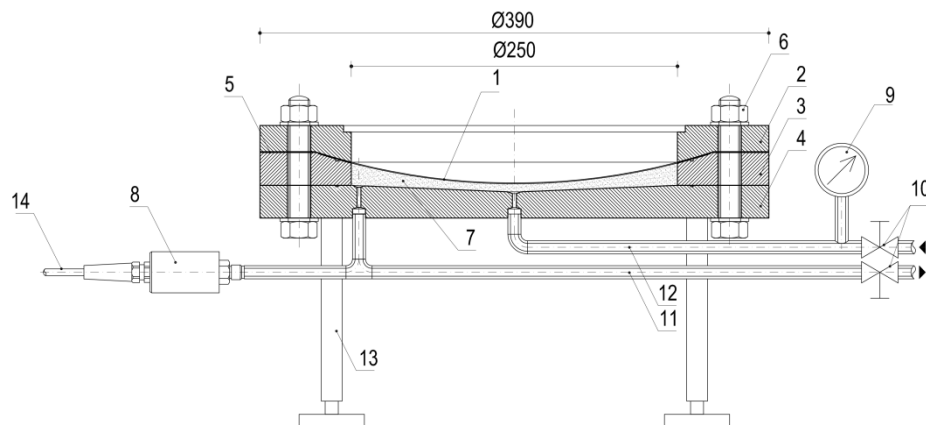


Rys. 3. Aparat badawczy z zamontowaną próbką

Fig. 3. The test stand with the installed specimen

kazano na rys. 4. Badane próbki (1) były mocowane w dwóch pierścieniach, dolnym (3) oraz górnym (2), które połączone wraz z kołową płytą denną (4), za pomocą 12 śrub M16 klasy 10.9 (6), tworzyły zamkniętą komorę (7), do której wprowadzano sprężone powietrze. Do płyty dennej zamocowano 4 podpory (13) z możliwością regulacji wysokości. Po-

między pierścieniem górnym (2) a dolnym (3) montowano pierścień dystansowy (5) z blachy o grubości odpowiadającej grubości badanej próbki. W celu wyeliminowania możliwości przesuwu poziomego badanej próbki (1) względem pierścieni mocujących (2) i (3), zastosowano klejenie klejem epoksydowym, o deklarowanej wytrzymałości na ścinanie, wynoszącej 19 MPa. Klejono powierzchnie wspólne (16) (por. rys. 5.) pierścieni i badanych próbek. W tak skonstruowanej komorze ciśnieniowej zrealizowane warunki brzegowe zapewniają



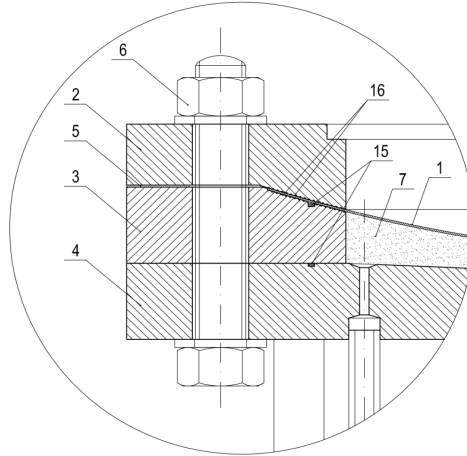
Rys. 4. Przekrój przez aparat badawczy

Fig. 4. The cross section of the test stand

pełne utwierdzenie na krawędzi badanych próbek i tylko taki schemat podparcia powłok przewidziano w prezentowanych badaniach. Sprężone powietrze doprowadzano kanałem (12) poprzez zawór iglicowy 1/8" (10). Szczelność komory (7) zapewniały zastosowane uszczelki typu o-ring, umieszczone w wyfrezowanych rowkach (15) w płycie dennej (4) i pierścieniu dolnym (3) (por. rys. 5.). Upust ciśnienia realizowany był poprzez kanał (11) zakończony iglicowym zaworem spusowym 1/8" (10). Pomiar ciśnienia realizowany był przez tensometryczny przetwornik ciśnienia CL1A (8) (por. rys. 4.) o klasie dokładności 0,2, z którego sygnał wychodzący przewodem (14) rejestrowany był poprzez system ESAM Traveller Static z próbkowaniem 40 Hz. Dodatkowo, bezpośrednio przy aparacie badawczym zainstalowano kontrolny manometr zegarowy (9) o zakresie pomiarowym do 1,6 MPa.

Pomiar deformacji realizowany był bezkontaktowym optycznym systemem pomiaru deformacji 3D ARAMIS firmy GOM. Przemieszczenia rejestrowane były z próbkowaniem 4 Hz. Poprawność wyników otrzymywanych z systemu ARAMIS zweryfikowano indukcyjnym czujnikiem przemieszczenia, uprzednio skalibrowanym przy pomocy śruby mikrometrycznej.

Na rys. 6. przedstawiono widok ogólny stanowiska badawczego z opisanym wyżej aparatem badawczym oraz aparaturą pomiarową.



Rys. 5. Szczegół aparatu badawczego

Fig. 5. Detail of the pressure chamber



Rys. 6 .System pomiaru przemieszczeń ARAMIS

Fig. 6. Displacements measurement system ARAMIS

3. Realizacja badań eksperymentalnych. Wyniki

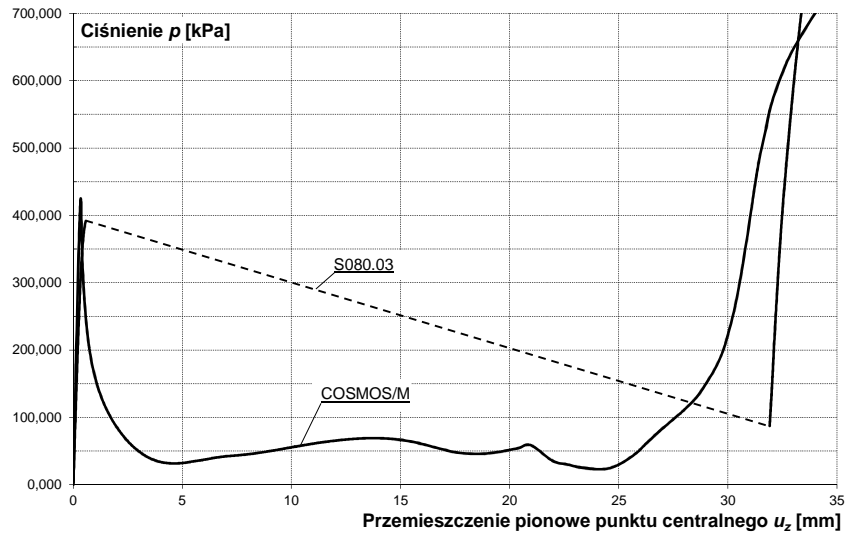
Badania realizowano na stanowisku pokazanym na rys. 7. Po zamontowaniu próbki pomiarowej (powłoki) w pierścieniach oporowych na warstwach kleju, skręcano całość 12 śrubami. Dopiero po 24 godzinach stanowisko było gotowe do badań gdyż tyle czasu trwało całkowite twardnienie kleju. Po przygotowaniu aparatury pomiarowej otwierano zawory dopływowy oraz odpływowy zapewniając w ten sposób powolny przepływ swobodny powietrza przez komorę (7). Po jednoczesnym zainicjowaniu systemu rejestracji przemieszczeń oraz systemu rejestracji ciśnienia, zamykano zawór odpływowy inicjując w ten sposób eksperyment. Stopniowy wzrost ciśnienia doprowadzał do gwałtownego wybożenia powłoki, któremu towarzyszył silny efekt dźwiękowy. Ciśnienie gwałtownie spadało z powodu nagłego wzrostu objętości w komorze (7). Kontynuowano przebieg eksperymentu do fazy pełnego wypełnienia powłoki doprowadzając ciśnienie do wartości przekraczającej wartość wywołującą wybożenie.



Rys. 7. Widok ogólny stanowiska pomiarowego

Fig. 7. The general view of the testing rig

Na rys. 8. przedstawiono przebieg ścieżki równowagi wyznaczonej w eksperymencie na próbce S080.03. Pokazano na nim także symulację numeryczną wykonaną systemem COSMOS/M dla powłoki o nominalnej geometrii i dla parametrów materiałowych zgodnych z certyfikatem przedstawionym przez dostawcę blach. W eksperymencie nie osiągnięto wartości ciśnienia granicznego otrzymanej w analizie numerycznej. Przyczyną tych rozbieżności są imperfekcje geometryczne, których w analizie numerycznej nie uwzględniono oraz najpraw-



Rys. 8. Ścieżka równowagi powłoki S080.03 otrzymana eksperymentalnie oraz wynik analizy wykonanej programem COSMOS/M

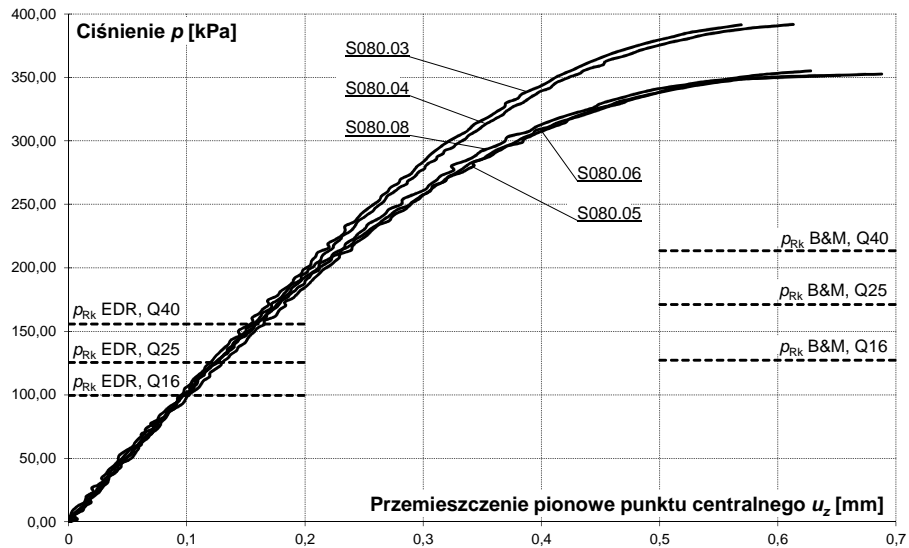
Fig. 8. Experimental equilibrium path for the shell S080.03 and the path obtained numerically by means of COSMOS/M system

dopodobniej rozbieżności w parametrach materiałowych nominalnych i faktycznych. Będą one zbadane w przyszłości i kolejne symulacje numeryczne będą wykonane z uwzględnieniem faktycznej geometrii i rzeczywistych parametrów materiałowych blachy wyżarzanej.

Na rys. 9. pokazano przebieg ścieżek równowagi w zakresie poprzedzającym moment utraty stateczności dla pięciu zbadanych próbek serii S080. Na rys. 10. pokazano wyniki dla pięciu próbek serii S100. Zgodność otrzymanych wyników w ramach każdej z serii można uznać za zadowalającą, pamiętając o fakcie odstępstw od założonej geometrii w przypadku każdej z badanych powłok.

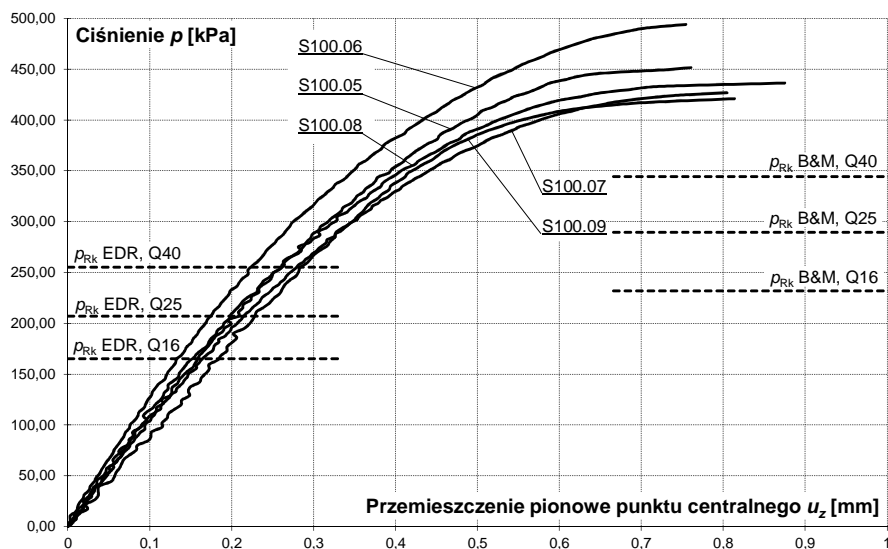
Na rysunkach 9-10 pokazano także poziomy ciśnien granicznych wynikające z zapisów EDR5th (por. [9]) oraz z propozycji zawartych w pracy [3].

Otrzymane w eksperymencie wartości ciśnien krytycznych znacznie przekraczają graniczne wartości proponowane w pracach [9] (p_{Rk} EDR) i [3] (p_{Rk} B&M), dla każdej z trzech klas jakości wykonania (Q40; Q25; Q16). Tendencja ta dotyczy także powłok o innych grubościach poddanych badaniom w tej serii eksperymentów.



Rys. 9. Ścieżki równowagi powłok serii S080 w zakresie poprzedzającym wyboczenie

Fig. 9. Equilibrium paths for shells of S080 series in the prebuckling range



Rys. 10. Ścieżki równowagi powłok serii S100 w zakresie poprzedzającym wyboczenie

Fig. 10. Equilibrium paths for shells of S100 series in the prebuckling range

4. Podsumowanie i wnioski

Prezentowane w pracy wyniki badań stateczności stalowych powłok mało wyniosłych potwierdziły w sposób nie budzący wątpliwości bardzo konserwatywny charakter zapisów zaleceń projektowych wydanych przez ECCS (por. [9]) a także propozycji zawartej w [3]. Wprawdzie precyzja z jaką zostały wykonane badane powłoki z dużym nadmiarem spełnia tolerancje zdefiniowane dla powłok o najwyższym parametrze jakości wykonania (tj. $Q = 40$, por. [9]), jednakże stwierdzony w badaniach niemal 120÷150% zapas nośności wyboczeniowej powinien skłonić autorów tych zapisów do ich modyfikacji.

Optyczny system rejestracji przemieszczeń Pontos-Aramis okazał się bardzo efektywny w przeprowadzanych badaniach. Jego główną zaletą był brak ingerencji materialnej w powierzchnię badanego obiektu oraz możliwość rejestracji pełnego pola przemieszczeń z częstotliwością czterech obrazów na sekundę, co pozwoliło precyzyjnie śledzić przebieg deformacji w miarę wzrostu ciśnienia.

Zrealizowane badania wzbogacą dość skromną bazę wyników badań eksperymentalnych stateczności powłok sferycznych obciążonych ciśnieniem i będą mogły posłużyć do modyfikacji istniejących zaleceń projektowania powłok sferycznych ze względu na kryterium stateczności.

Symulacje numeryczne wykonane przy założeniu braku imperfekcji geometrycznych oraz dla parametrów materiałowych wynikających z certyfikatów, potwierdzają zbyt dużą sztywność powłok w fazie przedwyboczeniowej w stosunku do sztywności rejestrowanych w eksperymentach. Koniecznym jest uwzględnienie faktycznej geometrii początkowej zarejestrowanej dla każdej z powłok w skanowaniu 3D. Symulacje numeryczne z uwzględnieniem faktycznej geometrii oraz faktycznych parametrów materiałowych będą wykonane wkrótce i zostaną zaprezentowane w kolejnej publikacji.

Literatura

- [1] Adam H.P., King P.A.: Experimental Investigation of the Stability of Monocoque Domes Subjected to External Pressure. *Experimental Mechanics*, 5, 1965, pp. 313-320.
- [2] Blachut J.: Shallow spherical caps under external pressure. XXI International Congress of Theoretical and Applied Mechanics. Warsaw, Poland, August 15-21, 2004.
- [3] Błazejewski P., Marcinowski J.: Buckling capacity curves for pressurized spherical shells. In: Recent Progress in Steel and Composite Structures: proceedings of the XIII International Conference on Metal Structures - ICMS 2016. Zielona Góra, Poland, 2016. London: Taylor & Francis Group, 2016, s. 401-406.
- [4] Deml M., Wunderlich W.: Direct evaluation of the "worst" imperfection shape in shell buckling, *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.* 149, 1997, pp. 201-222.
- [5] Homewood R.H., Brine A.C., Johnson A.E.Jr.: Experimental Investigations for the Buckling Instability of Monocoque Shells. *Proc. Soc. Experimental Stress Analysis* 18, 1961, pp. 88-96.

- [6] Kaplan, A. & Fung, Y. C.: A nonlinear theory of bending and buckling of thin elastic shallow spherical shells. U. S. N. A. C. A. Technical Note 3112, 1954.
- [7] Krenzke M.A., Kiernan T.J.: Elastic Stability of Near-Perfect Shallow Spherical Shells. AIAA Journ. 1, 1963, pp. 2855-2857.
- [8] Krenzke M.A., Kiernan T.J.: Tests of Stiffened and Unstiffened Machined Spherical Shells Under External Hydrostatic Pressure. Structural Mechanics Laboratory Research and Development Report, August 1963, Report 1741.
- [9] Rotter J. M., Schmidt H.: Buckling of Steel Shells. European Design Recommendations 5th Edition. Published by ECCS, 2008.
- [10] Seaman L.: The Nature of Buckling in Thin Spherical Shells. Watertown Arsenal Laboratories, Monograph Series No 46, 1962.

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF BUCKLING OF STEEL, PRESSURISED SPHERICAL SHELLS

S u m m a r y

Thin steel shells in a form of spherical segment loaded by external pressure show a tendency to sudden buckling for a lower pressure than their plastic resistance. The buckling phenomenon of spherical shells was subject of investigations of many authors and hitherto results of theoretical and experimental research were used in European Design Recommendations published in 2008 by ECCS [9]. Experimental investigations performed on the deliberately designed and fabricated stand were presented in this paper. Specimens were manufactured by a metal spinning technique from steel sheets used usually to a deep drawing and stamping of metal objects. The actual shape of every specimen was determined by 3D scanning technique. Material investigations of steel sheets were performed as well. The pressure was exerted by the air compressor and displacement measurements were accomplished by optical measurement system Pontos-Aramis. Forms of deformations of the whole specimen were registered precisely at every step of pressure exertion till the final postbuckling stage. All measured data were registered automatically by means of two computers. The result of every experiment was presented in the form of equilibrium path as the relationship of the pressure p as a function of the chosen displacement parameter. The comparison of critical pressures obtained in experiments with results received in preliminary numerical simulations done by COSMOS/M was presented in the paper. Experimental results were compared also with buckling resistances proposed in [9] and [3].

Keywords: experiment, buckling, steel shell, spherical segment, external pressure

Przesłano do redakcji: 20.05.2017 r.

Przyjęto do druku: 01.09.2017 r