

dr hab. inż. Piotr Iwicki, prof. PG
Katedra Konstrukcji Metalowych
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk
tel. 58 347 10 47
e-mail: piwicki@pg.edu.pl

Gdańsk, 18.09.2018

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgra inż. Sebastiana Kołodzieja

pt. „Eksperymentalna ocena nośności wyboczeniowej stalowych powłok
sferycznych obciążonych ciśnieniem zewnętrznym”.

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania jest pismo Dziekana Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Uniwersytetu Zielonogórskiego dra hab. inż. Andrzeja Greinerta, prof. UZ, z dnia 28.05.2018 i dołączona do niego rozprawa doktorska mgra inż. Sebastiana Kołodzieja pt. „Eksperymentalna ocena nośności wyboczeniowej stalowych powłok sferycznych obciążonych ciśnieniem zewnętrznym”, wykonana pod kierunkiem dra hab. inż. Jakuba Marcinowskiego, prof. UZ.

2. Ogólna charakterystyka pracy

Recenzowana rozprawa dotyczy badań doświadczalnych stateczności stalowych powłok sferycznych obciążonych ciśnieniem zewnętrznym. Badania przeprowadzono za pomocą nowoczesnej aparatury, wykorzystując osiągnięcia współczesnej techniki w zakresie wykonania modeli, stanowiska badawczego oraz aparatury pomiarowej (system ARAMIS). Wykonane przez Autora analizy numeryczne wykazały, że komputerowe symulacje procesu wyboczenia modeli powłok z pomierzonymi charakterystykami materiału i imperfekcjami geometrycznymi w sposób satysfakcjonujący odzwierciedlają zachowanie się rzeczywistej konstrukcji. Przeprowadzone badania zostały porównane z procedurą wymiarowania powłok sferycznych opublikowaną w pracach ROTTER i SCHMIDT (2008)¹ oraz ROTTER i SCHMIDT (2013)² (procedura EDR) oraz procedurą przedstawioną w pracy BŁAŻEJEWSKI i MARCINOWSKI (2016)³ (procedura B&M). Obie procedury mające charakter wytycznych projektowych zostały poddane ocenie pod względem bezpieczeństwa oraz ekonomii projektowania powłok sferycznych. Autor wykazał, że procedury pozwalają na bezpieczne projektowanie konstrukcji, a procedura B&M pozwalała na bardziej ekonomiczne zużycie materiału.

Rozprawa została napisana w języku polskim, liczy 279 stron formatu A4 i składa się z sześciu numerowanych rozdziałów poprzedzonych wykazem ważniejszych symboli. Pracę

¹ ROTTER J.M., SCHMIDT H. (2008), Buckling of Steel Shells. European Design Recommendations, 5th Edition, published by ECCS.

² ROTTER J. M., SCHMIDT H., (2013), Buckling of Steel Shells. European Design Rec-ommendations, 5th Edition, Revised Second Impression. Published by ECCS.

³ BŁAŻEJEWSKI P., MARCINOWSKI J. (2016), Buckling capacity curves for pressur-ized spherical shells, in “Recent Progress in Steel and Composite Structures”, ed. By M. A. Gizejowski, A. Kozłowski, J. Marcinowski, J. Ziółko, Proceedings of the XIIIth In-ternational Conference on Metal Structures (ICMS2016), Zielona Góra, Poland, 15-17 June 2016.

uzupełnia bibliografia, wykazy tabel i fotografii, spis rysunków oraz streszczenia w języku polskim i w języku angielskim. Praca zawiera 62 wzory, 295 rysunków, 10 fotografii, 19 tabel oraz 93 pozycje literatury. Wzory, rysunki, fotografie i tabele są numerowane w ramach rozdziałów.

3. Tematyka i zakres rozprawy

We wstępie (**rozdział 1**) o objętości 55 stron przedstawiono wprowadzenie do tematyki badawczej, w którym opisano przykłady stosowania powłok stalowych w kształcie wycinka sfery i przegląd literatury zawierający historyczny rozwój metod analizy stateczności powłok sferycznych. Szczegółowo i obszernie omówiono wcześniejsze badania doświadczalne poświęcone analizowanej tematyce. Opisano stanowiska doświadczalne oraz wyniki badań. Rozdział zawiera wyniki analiz teoretycznych oraz przegląd norm i wytycznych projektowania powłok sferycznych w postaci wycinka sfery obciążonych jednorodnym ciśnieniem zewnętrznym. Szczegółowo przedstawiono dwie procedury wymiarowania powłok sferycznych: EDR i B&M. Procedury te zilustrowane zostały na czterech przykładach numerycznych.

Na tle stanu badań problemu Autor opisał cel i zakres pracy oraz motywację podjęcia badań, którym była chęć przeprowadzenia i udokumentowania pomiarów doświadczalnych wyboczenia stalowych powłok w postaci wycinka sfery w sposób maksymalnie dokładny, na jaki pozwalają osiągnięcia współczesnej techniki w zakresie wykonania modeli, stanowiska badawczego oraz opomiarowania.

Teza pracy została opisana w czterech punktach. Dwa pierwsze dotyczą oceny bezpieczeństwa i efektywności projektowania małowyniosłych powłok sferycznych wg procedur EDR i B&M. W punkcie trzecim stwierdzono, że mechanizmy wyczerpania nośności tych powłok zawsze korespondują z pierwszą formą wyboczenia, otrzymywaną w wyniku analizy LBA. Czwarty punkt tezy pracy dotyczy możliwości symulacji procesu wyboczenia powłok za pomocą analiz numerycznych przy użyciu metody elementów skończonych z wykorzystaniem pomiarów geometrii uwzględniającej imperfekcje i rzeczywiste parametry materiału powłoki.

Rozdział 2 zatytułowany „Badania doświadczalne stalowych powłok sferycznych” stanowi najobszerniejszą część pracy zawierającą 149 stron z opisem stanowiska badawczego, aparatury pomiarowej i zastosowanych metod wykonywania pomiarów. Głównym elementem stanowiska pomiarowego jest komora ciśnieniowa wykonana na podstawie autorskiego projektu. Do badań zastosowano najwyższej klasy aparaturę w postaci bezkontaktowego optycznego systemu pomiaru przemieszczeń i odkształceń oraz tensometrycznego przetwornika ciśnienia z komputerową aparaturą rejestrującą. Modele powłok wykonano z blachy stalowej metodą formowania obrotowego (wyoblania) na zimno „Spinning metal forming”. Kształt powłok i imperfekcje geometryczne wyznaczono za pomocą precyzyjnego skanowania 3D dokonując pomiarów przemieszczeń systemem ARAMIS. Stworzone modele numeryczne były następnie wykorzystane do analiz statycznych i stateczności za pomocą metody elementów skończonych (MES). W rozdziale 2 opisano zakres badań, dokładną analizę geometrii każdej powłoki, charakter imperfekcji geometrycznych, jak również rozkład grubości materiału. W tym rozdziale znalazły się również analizy jakości wykonania próbek w odniesieniu do zapisów w obowiązujących normach projektowych. Szczegółowo zaprezentowano wyniki dwudziestu eksperymentów, określających nośność powłok sferycznych w zależności od parametrów geometrycznych opisanych stosunkiem promienia powłoki do grubości blachy (R/t). Przedstawiono wartości obciążenia krytycznego towarzyszącego wyboczeniu, deformacje przy poszczególnych poziomach obciążenia, zarówno w fazie przedwycieczeniowej, jak i po osiągnięciu obciążenia

krytycznego i wyboczeniu dla każdego z badanych modeli. Na podstawie pomiarów zostały odtworzone ścieżki równowagi statycznej pomiędzy obciążeniem i przemieszczeniem.

Wyniki eksperymentów zostały porównane z wartościami nośności określonymi wg. procedur EDR oraz B&M. Badania te pozwoliły na ocenę, wytycznych projektowych w zakresie prognozowania zachowanie się rzeczywistej konstrukcji powłokowej.

W **rozdziale 3**, o objętości 32 stron, zatytułowanym „Symulacje numeryczne” przeprowadzono analizy stateczności początkowej (LBA) oraz pełne analizy numeryczne z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i materiałowej (GMNIA) na modelach odzwierciedlających rzeczywistą geometrię i rzeczywiste parametry materiałowe. Wszystkie symulacje numeryczne przeprowadzono w systemie COSMOS/M. Wyniki analiz numerycznych zawierają mnożniki i postaci wyboczenia (LBA), ścieżki równowagi, zależności obciążenia od przemieszczenia, deformacje oraz stan naprężeń powłok dla różnych poziomów obciążenia. Wyniki te stanowią numeryczne symulacje procesu wyboczenia powłok i zostały porównane z rezultatami doświadczeń co było walidacją przyjętych modeli obliczeniowych w zakresie geometrii, warunków brzegowych i charakterystyk materiału.

W **rozdziale 4** zatytułowanym „Porównanie wyników badań eksperymentalnych oraz wyników symulacji numerycznych z wartościami otrzymanymi wg procedury EDR oraz wg procedury B&M.” na 4 stronach zestawiono w formie tabeli i diagramów wyniki badań doświadczalnych, obliczeń numerycznych i obliczeń nośności wyboczeniowej wg metod EDR oraz B&M.

W **rozdziale 5** umieszczono „Podsumowanie pracy doktorskiej” o objętości 7 stron zawierające zestawienie nośności wyboczeniowych badanych próbek, wyniki analiz nośności wg metod EDR i B&M, opis deformacji powyboczeniowych wyznaczonych w badaniach doświadczalnych oraz analizę różnic obliczeń numerycznych i badań doświadczalnych. Przedstawiono argumenty potwierdzające poprawność postawionych tez pracy doktorskiej.

Rozdział 6 pt.: „Plan dalszych badań” na 1 stronie zawarto opis planowanych badań stateczności powłok sferycznych o zróżnicowanych geometriach (R/t) przy sztucznie wprowadzonych imperfekcjach zbliżonych do pierwszej postaci wyboczenia. Założono, że badane powłoki będą zakwalifikowane do różnych klas jakości wykonania.

Wykaz cytowanej literatury, obejmuje 93 pozycje uszeregowane w kolejności alfabetycznej, w tym 2 normy i 1 program komputerowy. W pracy znajduje się również wykaz tabel fotografii i rysunków.

Na końcu rozprawy umieszczono krótkie (3 stronicowe) streszczenia w językach angielskim oraz polskim.

4. Ocena rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy ważnego problemu inżynierskiego, jakim jest nośność wyboczeniowa stalowych powłok sferycznych obciążonych ciśnieniem zewnętrznym. W pracy wykonano analizy numeryczne MES wyboczenia, przeprowadzono obliczenia wg procedur wymiarowania oraz badania doświadczalne, które są największym osiągnięciem Autora. Połączenie wyżej wymienionych obszarów badawczych powoduje, że praca jest kompletna. Uznanie budzi duża dokładność wyników numerycznych w porównaniu do nośności powłok uzyskanej w badaniach doświadczalnych. Maksymalne różnice wynoszą tylko 7%. Niestety, z uwagi na dynamiczny przebieg doświadczeń, nie udało się zarejestrować pełnego procesu wyboczenia powłok. Pewnym mankamentem jest wąski zakres oceny istniejących procedur projektowych dla powłok sferycznych. Autor koncentruje się na porównaniu procedur z badaniami doświadczalnymi pod względem zapasu bezpieczeństwa, a co za tym idzie ekonomiczności w projektowaniu. Wykazano, że procedura B&M pozwala na bardziej ekonomiczne projektowanie. Stwierdzono rozbieżność nośności powłok wg procedur projektowych i badań doświadczalnych w zależności od parametru geometrycznego

λ. Stosunek nośności powłok wyznaczony w doświadczeniach do nośności wg procedury B&M wynosi od 1.08 do 1.90, a w przypadku procedury EDR od 1.42 do 2.58 w zależności od parametrów powłoki. Zastanawia fakt, że największe różnice procentowe występowały tylko dla serii modeli S080. W pracy brakuje próby wyjaśnienia tych rozbieżności. Czy po przeprowadzonych badaniach Autor zaproponowałby zmiany procedur projektowych w celu ich jeszcze lepszego dopasowania do wyników doświadczalnych? Takie modyfikacje mogłyby dotyczyć nie tylko samych wzorów do obliczania nośności powłok sferycznych, ale również zasad przyjmowania klasyfikacji wykonania powłok w zakresie odchyłek geometrii.

Na duże uznanie zasługuje fakt, że modele powłok zostały wykonane z dużą starannością i precyzją. Do głównych osiągnięć badań przedstawionych w rozprawie zaliczyć możemy niewątpliwie wdrożenie nowoczesnych metod skanowania 3D do pomiaru kształtu konstrukcji i istniejących imperfekcji. W ocenie rozprawy doktorskiej mgra inż. Sebastiana Kołodzieja docenić należy zastosowanie nowych metod pomiaru również do symulacji procesu wyboczenia. Zrezygnowano z kontaktowej metody pomiaru przemieszczenia wybranego punktu badanej próbki czujnikiem indukcyjnym na rzecz bezkontaktowej metody pomiaru przemieszczeń całej badanej powierzchni za pomocą systemu ARAMIS. Należy podkreślić innowacyjność takiego rozwiązania, gdyż zastosowanie czujników może stanowić ingerencję w model badawczy, a tym samym wpływać na dokładność wyników, szczególnie przy badaniu cienkich blach i próbek o niewielkich wymiarach. Wszystkie wykonane próbki spełniają wymogi klasy doskonałej. Czy wnioski byłyby takie same, gdyby klasa wykonania nie byłaby doskonała? Brakuje badań dla próbek wykonanych mniej starannie. Takie problemy nie były w pracy analizowane, ale mogą być przedmiotem dalszych badań. Bez zbadania modeli o różnej dokładności wykonania wnioski dotyczące samych procedur projektowania są niepełne.

Niezmiernie istotne jest również praktyczne znaczenie rozważanych w rozprawie problemów. Już na wstępie pracy Autor podaje, że badane powłoki stalowe w kształcie wycinka sfery spotykane są w praktyce inżynierskiej jako dachy zbiorników i silosów. W pracy analizowane są modele powłok w skali laboratoryjnej wykonywane z blachy stalowej metodą formowania obrotowego na zimno. Dachy zbiorników lub silosów mogą mieć inne imperfekcje, na przykład imperfekcje pospawalnicze. Wyniki badań modeli o niewielkich wymiarach są więc obarczone efektem skali. Jak odnieść rezultaty badań modeli opisanych w pracy do konstrukcji rzeczywistych dachów silosów lub zbiorników? Zgodnie z przyjętym zakresem pracy doktorskiej obliczenia numeryczne przeprowadzono dla modeli, które uzyskano za pomocą skanowania 3D. W praktyce projektowej nie wiadomo z góry, jakie będą imperfekcje, a więc należy założyć pewien poziom niedokładności wykonania i kształt imperfekcji. Uzupełnieniem postawionej tezy byłyby analizy powłok z imperfekcjami zgodnymi z kształtem pierwszej postaci wyboczenia lub w kształcie wgłębień wg normy PN-EN 1993-1-6. Autor zakłada, że analizy powłok ze sztucznie wprowadzonymi imperfekcjami będą przedmiotem dalszych badań.

Proces wyboczenia stalowych powłok sferycznych obciążonych ciśnieniem zewnętrznym to zjawisko dynamiczne. W badaniach numerycznych MES Autor bada zjawisko wyboczenia za pomocą geometrycznie i materiałowo nieliniowej analizy statycznej. W obliczeniach zastosowano zarówno strategie sterowania obciążeniem, jak i przemieszczeniem przy zastosowaniu metody Newtona-Raphsona. Sterowanie obciążeniem było skuteczne do momentu uzyskania obciążenia krytycznego, a zastosowanie strategii sterowania przemieszczeniem pozwoliło uzyskać całą ścieżkę równowagi. W podsumowaniu rozprawy (str. 250) Autor pisze o trudnościach związanych z wyznaczeniem pełnej ścieżki równowagi za pomocą numerycznej analizy GMNIA z uwagi na występowanie punktów zwrotnych, które wymuszały zmianę parametrów sterowania analizą. Brakuje jednak szczegółów dotyczących sposobu rozwiązania tego problemu. Nie podano również parametrów analiz

nieliniowych. Wyniki analiz można było porównywać z innymi metodami, np. metodą Riksa, lub obliczeniami dynamicznymi, które mogą być stosowane do symulacji procesu wyboczenia (Iwicki, Tejchman, Chróścielewski 2014)⁴?

Zarówno obliczenia numeryczne, jak i badania doświadczalne potwierdzają słuszność stawianej tezy, że możliwe jest badanie problemu stateczności powłok za pomocą programów MES pod warunkiem dokładnej znajomości geometrii konstrukcji i istniejących imperfekcji, a także pod warunkiem zbadania rzeczywistych charakterystyk materiału.

Bardziej szczegółowo, swoje zastrzeżenia Recenzent przedstawia w poniższym wykazie uwag krytycznych, pytań i wątpliwości.

Uwagi szczegółowe o pracy

1. Niekonsekwentnie stosowano czcionki w opisie zmiennych. W większości zmiennych były to czcionki o kroju italic, ale na stronie 43 zmienne D_i , H , t i R zapisano czcionką prostą.
2. Nieco mylące jest stosowanie słowa „Autor”. Czasami używane jest to w kontekście opisu różnych publikacji, na przykład: „Autor zdecydował się przeprowadzić badania na próbkach wykonanych z plastiku ...”. Dopiero z kontekstu wynika, że opis dotyczy innej publikacji. Można było opisać cytowane publikacje w innej formie, nie wprowadzając wątpliwości czy chodzi o Autora rozprawy doktorskiej.
3. W opisie wzoru (1.26) podano, że k_i jest wykładnikiem potęgi, a we wzorze k_i zapisano jako składnik mnożenia.
4. W punkcie 2.2, str. 69 czytamy, że „powoli odkręcano zawór doprowadzający” i dalej „do momentu ustawienia pożądanego przepływu powietrza” lub „po właściwym wyregulowaniu prędkości przepływu powietrza”. Wymienione sformułowania są mało precyzyjne. Brakuje informacji o prędkości wzrostu ciśnienia w czasie. Taka informacja umożliwiłaby przeprowadzenie obliczeń dynamicznych problemu. Czy zaobserwowano wpływ prędkości wzrostu ciśnienia na nośność powłoki?
5. Na czym polegała precyzyjna synchronizacja danych „ciśnienie–przemieszczenie”, która następowała na etapie obróbki wyników (str. 70)?
6. W procesie kształtowania próbek na zimno w elementach mogły powstać naprężenia rezydualne. W celu ich eliminacji wykonane elementy zostały poddane wyżarzaniu odprężającemu w temperaturze 400°C. Czy przetestowano również próbki bez poddawania ich procesowi wyżarzania? Taka próba pozwoliłaby na oszacowanie wpływu naprężeń rezydualnych.
7. Czy podane imperfekcje badano tylko po zamocowaniu próbek do stanowiska pomiarowego, czy też przed i po zamocowaniu próbek? Takie, podwójne pomiary pozwalałyby na ocenę przyczyn występowania imperfekcji. Mogą one być również spowodowane dokręcaniem śrub kołnierza mocującego, czyli wynikać zarówno z niedokładności montażu, jak i niedokładności wykonania próbek.
8. Jaka była grubość powłoki malarskiej i czy mogła mieć wpływ na pomiar imperfekcji geometrycznych?

⁴ IWICKI P., TEJCHMAN J., CHRÓŚCIELEWSKI J. (2014), Dynamic FE simulations of buckling process in thin-walled cylindrical metal silos, *Thin-Walled Structures*, 84, 344–359.

9. Na rysunkach przedstawiających plan warstwicy próbek (np. rys. 2.12, 2.17, 2.22) kolory opisane w legendzie pojawiają się również na miejscach obręczy, które są bardziej odległe od płaszczyzny odniesienia. Jak można wyjaśnić to zjawisko?
10. W rysunkach aksometrycznych z przekrojami pierścieni stanowiska badawczego (np. 2.17, 2.19, 2.22, 2.24, 2.27, 2.29...) występują na powierzchni przekroju śruby. Czy to błąd wynikający z obróbki obrazu?
11. Próbkę stali badano dla dwóch kierunków walcowania blachy (pkt. 2.5). Jak odnieść wyniki tych badań do powłoki sferycznej?
12. Na wykresach przedstawiających ścieżki równowagi ciśnienie p – przemieszczenie uz zamieszczono obliczenia wg procedur EDR i B&M dla różnych klas wykonania próbek. Zgodnie z PN-EN 1993-1-6 długość przymiaru zależy od naprężeń w powłoce (pkt. 8.4.4). Czy przyjęcie innej długości przymiaru (wzór 8.7 normy) znacząco wpłynęłoby na klasę dokładności wykonania?
13. W pracy brakuje analizy wpływu podziału powłoki na elementy skończone na wartości obciążenia krytycznego, granicznego a także na postaci wyboczenia i deformacje w stanie granicznym. Czy wymienione wielkości zbadano dla innych podziałów powłoki sferycznej na elementy skończone?
14. Obciążenie krytyczne towarzyszące pierwszej formie wyboczenia porównano z ciśnieniem krytycznym wg wzoru (1.3). Autor pisze, że „Wartości te powinny być tożsame dla geometrii idealnej, natomiast analizy przeprowadzono na geometriach z imperfekcjami”. Szkoda, że nie obliczono również obciążeń krytycznych dla konstrukcji idealnej, gdyż porównanie ich ze wzorem (1.3) byłoby dodatkową weryfikacją modelu.

5. Wniosek końcowy

Recenzowana praca wpisuje się w aktualny nurt badawczy. Niezależnie od zamieszczonych uwag krytycznych lub dyskusyjnych należy stwierdzić, że rozprawa doktorska mgr inż. Sebastiana Kołodzieja zawiera istotne wartości poznawcze, w zakresie badań doświadczalnych nośności wyboczeniowej stalowych powłok sferycznych obciążonych ciśnieniem zewnętrznym. Stwierdzam, że opiniowana rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 roku „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz. U. z 2017, poz. 1789 ze zm.) i stawiam wniosek o dopuszczenie Pana mgr inż. Sebastiana Kołodzieja do jej publicznej obrony.



dr hab. inż. Piotr Iwicki, prof. PG