

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Sebastiana Kołodzieja
p.t. *“Eksperymentalna ocena nośności wyoboczeniowej stalowych powłok sferycznych
obciążonych ciśnieniem zewnętrznym”*

Przedstawiona do recenzji rozprawa liczy 279 stron podzielonych na 6 rozdziałów:

(1) Wstęp – 55 stron, (2) Badania doświadczalne stalowych powłok sferycznych – 149 stron, (3) Symulacje numeryczne – 32 strony, (4) Porównanie wyników badań eksperymentalnych oraz wyników symulacji numerycznych z wartościami otrzymanymi wg procedury EDR oraz wg procedury B&M – 4 strony, (5) Podsumowanie rozprawy – 7 stron, oraz (6) Plan dalszych badań – 1 strona.

Praca zawiera 93 pozycje literatury, 12 stron spisu tablic, fotografii, rysunków oraz symboli. Trzystronicowe streszczenie w języku angielskim zamyka Dysertację. Doktorant jest współautorem dwóch publikacji (uwzględnionych w spisie literatury).

Praca podejmuje niezwykle ważną tematykę stateczności powłok sferycznych z uwagi na ich szeroki zakres zastosowań praktycznych oraz bezpieczeństwo ich użytkowania. Zagadnieniu temu, na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat, poświęcono dużo badań teoretycznych i eksperymentalnych. Cały ten wysiłek nie doprowadził jednak do pełnego zrozumienia mechanizmów prowadzących do utraty stateczności, marginesu bezpieczeństwa, jednoznacznych podstaw teoretycznych oraz praktycznego podejścia do projektowania. Stąd też badania eksperymentalne stały się, i w większości nadal pozostają, wykładnią postępowań praktycznych doprowadzając do sformułowania norm krajowych. W Europie przyczyniły się one ostatnio do wprowadzenia zunifikowanych norm nazwanych ‘Eurocode’. Przez kilka ostatnich dekad funkcjonuje też międzynarodowa grupa ekspertów zajmująca się różnymi aspektami wyoboczenia powłok metalowych. Efektem jej prac były i są publikowane od czasu do czasu Rekomendacje. W ostatnim dziesięcioleciu nastąpiła tu pewna konsolidacja tych wysiłków, a jednym z efektów jest ujednoczenie języka w zbieżności z normą ‘Eurokod’. Na tym tle recenzowana praca doskonale wpisuje się w potrzebę uzyskania dodatkowych, wiarygodnych i dobrze udokumentowanych, danych doświadczalnych. Wybór tematyki należy uznać za wysoce zasadny, a złożoność występujących w niej zagadnień pozwala klarownie zilustrować kompetencje Doktoranta.

Praca rozpoczyna się wielowątkowym wstępem. Przegląd literatury stanowi jego pierwszą część. Zawiera on zestaw pozycji adekwatnie obrazujący obecny stan wiedzy w badanym zakresie. Mimo to można dopatrzeć się w nim kilku nieścisłości i braków. I tak, dwie pozycje Rotter/Schmidt (2008, 2013) są cytowane niewłaściwie. Rotter & Schmidt są (jedynie), Edytorami tych publikacji, pozostając przy tym autorami kilku innych rozdziałów nie dotyczących powłok sferycznych. Nie podano tu także wydawcy ani stron obu tych wydań książkowych. Warto zaznaczyć, że początki prac nad w/w Rekomendacjami sięgają roku 1980 i nie wszystkie osoby które przyczyniły się do ich powstania zostały w tym tekście



źródłowym odnotowane. Niezrozumiale jest też pominięcie w Dysertacji obszernego i ogólnie dostępnego źródła poświęconego wyoboczeniu powłok, *per se*, pod adresem www.shellbuckling.com (autorstwa W.D. Bushnell & D. Bushnell - 'snr chief scientist' w firmie Lockheed). Informacje dotyczące stateczności powłok sferycznych obciążonych zewnętrznym ciśnieniem można znaleźć też w innych normach. Wymienił należałoby tutaj PD500 (ex BS500), ASME section VIII, NASA, czy też nieistniejącą normę DIN18800. Tego też brakuje w spisie literatury.

Po przedstawieniu celu i zakresu pracy Doktorant dokonuje przeglądu dostępnych badań eksperymentalnych dotyczących powłok sferycznych, dokonując ich krytycznej oceny. Ta część pracy nie budzi zastrzeżeń. W ostatniej części Wstępu Doktorant dokonuje przeglądu obowiązujących, na gruncie europejskim, norm i zaleceń dotyczących projektowania powłok sferycznych. Ilustruje je szczegółowymi obliczeniami dla kilku konfiguracji powłok. Odnosi je przy tym do dwóch metod. Nazywa je kolejno EDR oraz B&M (w domyśle chodzi chyba o 'European Design Recommendations' w pierwszym przypadku oraz o inicjały autorów w drugim przypadku). Wskazuje przy tym na większy konserwatyzm podejścia EDR. Z ciekawości pozwoliłem sobie przyglądać się bliżej Przykładowi nr 1 ze strony 55. Utrata stateczności (dla powłoki bez imperfekcji), następuje tu poprzez asymetryczną bifurkację z 9-ma falami obwodowymi przy wartości ciśnienia, p . Interesujący jest margines bezpieczeństwa które w/w podejścia proponują, a mianowicie: $p/p_{EDR} = 3.95$ oraz $p/p_{B\&M} = 3.04$.

Część następną Dysertacji poświęcona jest szeroko rozumianym eksperymentom. Główny wysiłek położono na zaprojektowanie stanowiska badawczego, jego wykonanie, przeprowadzenie serii eksperymentów i interpretacji otrzymanych wyników. W sumie testom poddano 20 powłok w grupach po pięć. Każda z grup posiadała nominalną grubość ścianki: 0.50 mm, 0.80 mm, 1.0 mm oraz 1.5 mm. Promień krzywizny dobrano tak, że stosunek promienia, R , do grubości ścianki, t , zawierał się w przedziale $300 < R/t < 1000$. Badane powłoki były wycinkiem powłoki sferycznej. Średnica u podstawy wynosiła 300 mm i nominalnie była taka sama dla wszystkich 20-tu powłok. Połówkowy kąt rozwarcia dla wszystkich modeli wynosił 14.5° . Zmieniając grubość powłok uzyskano różne wartości tzw. parametru wyniosłości, λ . Uzyskane wartości parametru λ (w zwykłej notacji), zawierały się w przedziale $8 < \lambda < 14$ (w przybliżeniu). Tu zauważmy, że dla tej klasy powłok parametr λ zawiera się w przedziale $3.5 < \lambda < 20$.

Powłoki wykonane zostały metodą 'spinning' z blachy stalowej. Ich wykonanie zlecono firmie z Poznania. Z płatów blachy stalowej wycięto także szereg płaskich próbek, które razem z powłokami poddano procesowi wyżarzania. Same próbki posłużyły później do wyznaczenia stałych materiałowych.

Po przeprowadzeniu pomiaru geometrii powłok, osadzano je w stanowisku badawczym, obciążano monotonnym ciśnieniem po stronie wypukłej, używając sprężonego powietrza. Czas trwania pojedynczego eksperymentu wynosił około 100 sekund, podczas którego automatycznie rejestrowano ugięcie ścianki powłoki po stronie wklęsłej, oraz wartości zwiększającego się w sposób ciągły ciśnienia.

W etapie następnym przeprowadzono obróbkę uzyskanych wyników doświadczalnych oraz wykonano obliczenia metodą elementów skończonych (ale tylko dla kilku wybranych przypadków). Porównano też wyniki doświadczalne z wartościami uzyskanymi z normy *Eurokod* oraz z wartościami postulowanymi przez B&M.

Uwagi szczegółowe

W recenzowanej pracy, generalnie brakuje szczegółowych rysunków technicznych w oparciu o które zbudowano stanowisko do badań, zlecono wykonanie powłok oraz próbek do określenia własności materiałowych. Nie wiadomo jak duże były arkusze blach z których wykonano powłoki, z jakich miejsc je wycinano, jaka była grubość blachy, jaki był

nominalny skład chemiczny, oraz kto był ich producentem. To samo dotyczy próbek przeznaczonych do określenia własności materiałowych. Nic nie wiadomo czy materiał wycięty z blachy uległ zwichrzeniu, czy po wyżarzeniu próbki były płaskie? Dalej – co się działo się z powłokami? Z tekstu wynika, że nie dokonano żadnych pomiarów zaraz po wykonaniu powłok, a tylko po wyżarzeniu (co i tak nie jest klarowne w świetle opisu na stronie 72). Sam profil wyżarzania (temperatura versus czas) też nie jest podany. Nic nie wiadomo kiedy, i jak przycinano brzeg powłok po skończonym procesie formowania? Czy brzeg ten był okręgiem przed i po wyżarzeniu?

Praca zawiera dobrej jakości wykresy: wyniosłości, rozkładu grubości ścianki, oraz rozkładu odchyłek od kształtu idealnego dla każdej badanej powłoki. Analiza tych danych pozwala stwierdzić, że wszystkie powłoki spełniały kryterium ‘powłok idealnych geometrycznie, klasa A’. Mimo to w prawie wszystkich modelach odnotowano zlokalizowane wklęsnięcia w okolicy brzegu (umocowania). Lokalna amplituda tych wklęsnięć odniesiona do grubości ścianki waha się od około 1.4 do 0.2 (choć zgodnie z normą, w Tabeli 2.4.5 jest to rząd od 0.21 do 0.50). Autor nie odnosi się do zjawiska lokalnych wklęsnięć.

Jeśli idzie o własności materiałowe, to nie podano dokładnie skąd wycinano płaskie próbki. Rozciąganiu poddano 26 próbek. Opis procesu rociągania budzi pewne zastrzeżenia. Nie podano szybkości rozciągania ani zakresu w którym używano tensometr. Na Rysunkach 2.129/2.130 widać, że proces rozciągania kończył się zerwaniem próbek. Rodzi się pytanie co się stało wtedy z tensometrem? Jeśli zaś przytoczone wykresy rozciągania pochodzą wprost z maszyny Instron-8084, to tu rodzi się kolejne pytanie: czy ‘zdjęto charakterystykę’ samej maszyny? Moduł Younga wyznaczono posługując się innym zestawem próbek oraz inną maszyną. Nie wyznaczano współczynnika Poisson’a. Nie używano naklejaných tensometrów ‘foliowych’. Zestawione w Tabelach wartości stałych materiałowych świadczą o dobrej jakości użytych blach stalowych.

Jeśli idzie o eksperyment to opisane procedury są klarowne. Sposób przeprowadzenia testów nie budzi zastrzeżeń. Forma przedstawiająca wyniki doświadczalne jest czytelna i co należy podkreślić, z dobrą jakością grafiki. Zakres porównań z Rekomendacjami/normą jest poprawny i zadawalający. Na pokreślenie zasługuje dobra powtarzalność wyników otrzymanych w eksperymencie.

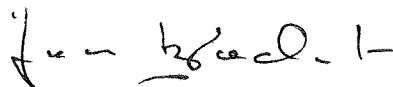
Pewien niepokój budzą warunki brzegowe (utwierdzenie) powłok i zupełny brak komentarza w tej materii. Powtarzając: czy brzeg mocowanych powłok był rzeczywiście idealnym okręgiem? Czy tenże brzeg gładko wpisywał się w krzywiznę mocujących pierścieni? Czy dokręcane śruby nie wymuszały naprężeń brzegowych?

Jeśli idzie o obliczenia numeryczne to ta część pracy jest opisana w sposób niezwykle zwięzły. To podnosi szereg uzasadnionych pytań. Obliczenia przeprowadzono tylko dla czterech przypadków – po jednym z każdej klas grubości ścianki. Dlaczego tylko cztery przypadki? Dokładny pomiar grubości ścianki miał służyć wygenerowaniu rzeczywistego modelu MES. Okazuje się, że z tych 4-ch przypadków, tylko w jednym rozważano zmienną grubość ścianki. A i w tym przypadku brak informacji jak ta grubość była reprezentowana w modelu MES (powierzchnia środkowa, wewnętrzna powierzchnia, zewnętrzna powierzchnia).

Przedstawione wyniki analiz potwierdzają postawione w Dysertacji tezy. Zaś plan dalszych badań należy uznać za właściwy, obiecujący i realistyczny.

Choć dysertacja wydaje się służyć ‘*chwilowej ocenie norm i zaleceń*’ to pomimo powyższych uwag/zastrzeżeń, otrzymane wyniki doświadczalne mają zapewniony transcendentálny byt w bazie danych dotyczących statycznej utraty stateczności metalowych powłok sferycznych. Fakt ten warto podkreślić ponieważ nie wiadomo jak Rekomendacje/normy będą ewoluować w dłuższym horyzoncie czasowym.

Reasumując, analiza szerokiego zakresu i jakości pracy doktorskiej pozwala stwierdzić, że mgr inż. Sebastian Kołodziej wykazał się dużą wiedzą i umiejętnościami wymaganymi do uzyskania stopnia doktora nauk technicznych. Przedstawiona Dysertacja spełnia obowiązujące warunki ustawowe (Ustawa o stopniach naukowych i tytule naukowym), i w związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie w/w Doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego na Wydziale Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Uniwersytetu Zielonogórskiego.



Prof. dr hab. J. Błachut

FIMechE – Fellow, Institution of Mechanical Engineers, London

CEng – Chartered Engineer, Engineering Council, London