

dr hab. inż. Maciej Szumigała prof. nadzw.
Instytut Konstrukcji Budowlanych
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
Politechniki Poznańskiej
ul. Piotrowo 5
60-965 Poznań

R E C E N E Z J A

rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Błażejewskiego pt. "**Nośność wyboczeniowa stalowych powłok sferycznych obciążonych ciśnieniem**"

1. Podstawa opracowania

Recenzję rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Błażejewskiego pt. "Nośność wyboczeniowa stalowych powłok sferycznych obciążonych ciśnieniem" wykonanej pod kierunkiem prof. nadzw. dr hab. inż. Jakuba Marcinowskiego, opracowano na zlecenie Dziekana Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Uniwersytetu Zielonogórskiego, dr hab. inż. Jakuba Marcinowskiego, prof. UZ, z dnia 8.07.2016 r.

2. Treść rozprawy

Przedstawiona praca składa się z 5 rozdziałów oraz bibliografii i liczy łącznie 161 stron.

Tytuły poszczególnych rozdziałów:

- Wstęp,
- Liniowo sprężyste analizy bifurkacyjne LBA – określenie sprężystej nośności krytycznej powłoki p_{Rcr} ,
- Fizycznie nieliniowe analizy numeryczne MNA – określenie nośności plastycznej powłoki p_{Rpl} ,
- Geometrycznie i fizycznie nieliniowe analizy numeryczne z imperfekcjami GMNIA,
- Nowa procedura szacowania nośności wyboczeniowej powłok sferycznych w świetle przeprowadzonych badań eksperymentalnych i rekomendacji.

We wprowadzeniu do **rozdziału pierwszego** (*Wstęp*) przedstawiono inspirację dla recenzowanej pracy, którą stanowiły przekrycia zbiorników, zasobników i silosów infrastruktury technologicznej lub inne jej części o takiej właśnie geometrii. Na wstępie autor oświadcza, że mimo istnienia różnych metod analitycznych głównym narzędziem jego badań

były metody numeryczne, przede wszystkim metoda elementów skończonych pozwalająca na różne rodzaje analiz. Zaznacza ponadto, że w większości przypadków o nośności powłok sferycznych decyduje stateczność i to jest zasadniczym przedmiotem jego badań. Dalsza część tego rozdziału poświęcona jest obszernemu przeglądowi literatury dotyczącej opisu i badania stateczności powłok sferycznych.

Doktorant cofa się w czasie z przeglądem wiedzy na temat stateczności (i słusznie) do roku 1902 (praca C. Bacha), kiedy to po raz pierwszy stwierdzono, że powłoka sferyczna może tracić stateczność. Następnie chronologicznie powołuje się na pracę Zoelly'ego (1915r.) i Leibensona (1917r.) twórców klasycznego wzoru na ciśnienie krytyczne. Kolejnym krokiem jest nieliniowe rozwiązanie teoretyczne problemu wyboczenia powłok sferycznych przedstawione przez Fieodosiewa w roku 1947. Dalej przedstawiono i omówiono kolejne odkrycia naukowe w zakresie analizy stateczności powłok sferycznych. Ciekawym porównaniem i podsumowaniem jest wykres zaprezentowany na rys. 2.

Oprócz przeglądu analiz teoretycznych dotyczących problemu stateczności, w drugiej części tego podrozdziału przedstawiono informacje o próbach doświadczalnej weryfikacji rozwiązań teoretycznych. Jak wynika z dokonanego przeglądu wiedzy, pierwsze próby podejmowano już w latach czterdziestych ubiegłego wieku. Wnikliwie przedstawiono kolejne opisane badania empiryczne i próby modyfikacji zależności teoretycznych. Całość została podsumowana wykresem na rysunku 3.

Godnym podkreślenia jest fakt, że przegląd dotychczasowego stanu wiedzy nie został na tym zakończony (a tak niekiedy bywa), a dokonano jeszcze krytycznej prezentacji metod zawartych w obowiązujących normach i zaleceniach projektowych tj. w normie *PN-EN 1993-1-6 „Projektowanie konstrukcji stalowych. Wytrzymałość i stateczność konstrukcji powłokowych”* oraz w rekomendacjach europejskich pt. *„Buckling of Steel Shells - European Design Recommendations, 5th Edition”*.

Przedstawiono cztery normowe procedury opisujące stany graniczny ze względu na:

- LS1 zniszczenie plastyczne,
- LS2 nieprzystosowanie plastyczne,
- LS3 niestateczność,
- LS4 zmęczenie

oraz trzy normowe sposoby wymiarowania powłoki:

- Sposób **pierwszy** polegający na analizie stanu naprężenia i porównaniu naprężeń z granicą plastyczności pomniejszoną o współczynniki wyboczeniowe,
- Sposób **drugi** bazujący na obliczeniach numerycznych MNA i LBA (bez uwzględnienia

imperfekcji). Nośnością powłoki jest maksymalna nośność z obliczeń pomniejszona o mnożnik obliczeniowy nośności wyboczeniowej r_{RD} ,

– Sposób **trzeci** oparty o globalną analizę numeryczną GMNIA uwzględniającą nieliniowości fizyczne, geometryczne i imperfekcje.

Krytycznie oceniono metody normowe jako mało praktyczne, ponieważ wymagają od inżyniera projektanta znajomości zaawansowanych metod numerycznych, a adaptacja znanych rozwiązań analitycznych opracowanych dla powłok walcowych lub stożkowych daje wyniki nieprecyzyjne. Odniesiono się również krytycznie do rekomendacji europejskich z rozdziałem opracowanym przez profesora W. Wunderlicha. Przedstawiono ogólny algorytm postępowania, który wydaje się być prostszy od normowych. Niestety norma europejska nie zaleca tej rekomendacji. Z tego powodu pojawiła się inspiracja do opracowania pracy doktorskiej, która jest niniejszym recenzowana, a której cel i zakres przedstawiono w kolejnym podrozdziale.

Standardowo przyjmuje się, że w pracy doktorskiej oprócz celu i zakresu formułuje się tezę. Tutaj nie znalazłem takiej tezy sformułowanej w wyraźny sposób.

Celem pracy było opracowanie praktycznej procedury do szacowania nośności obliczeniowej zgodnej z aktualną normą *PN-EN 1993-1-6* oraz ujednoczenie zapisów zawartych w *European Design Recommendations 5th Edition* w zakresie stosowanych analiz numerycznych.

W tej części rozprawy określono też zakres prac w obszarze prowadzonych analiz parametrycznych w odniesieniu do geometrii "wycinka sfery" (6 promieni rozwarcia powłoki i 6 grubości, stały promień i jeden warunek brzegowy, 7 rodzajów imperfekcji o 5 amplitudach każda) i rodzaju prowadzonych analiz obliczeniowych (LBA, MNA, GMNIA). Daje to wiele setek rozwiązyanych przypadków zadań.

Ostatni podrozdział pierwszego rozdziału poświęcono analizie MES. W tej części pracy doktorant prezentuje możliwości wykorzystania analiz MES do badania zagadnień nośności i stateczności powłok sferycznych jako alternatywę do drogich badań fizycznych.

Przedstawiono ponadto zastosowane oprogramowanie, geometrię i budowę modelu, rodzaj elementu skończonego, siatkowanie, warunki brzegowe, parametry materiałowe oraz rodzaje stosowanych analiz.

Rozdział 2 poświęcono liniowo sprężystym analizom bifurkacyjnym służącym do określania sprężystej nośności krytycznej powłoki p_{RCr} . Wstępnie opisano geometrię, parametry fizyczne i warunki brzegowe analizowanych wariantów modeli (kolejny raz) oraz podstawy teoretyczne sprężystej analizy bifurkacyjnej. Wyniki obliczeń przedstawiono na

wielu rysunkach w postaci map deformacji dla pierwszej formy wyboczenia oraz w postaci wykresów zależności ciśnienia krytycznego od proporcji R/t. Po zabiegu nałożenia wykresów okazało się, że pokrywają się one, co oznacza, że p_{Rcr} nie zależy od wyniosłości powłoki, tj. kąta rozwarcia ϕ . Fakt ten pozwolił na aproksymację wszystkich wykresów jedną krzywą opisaną prostym wzorem na ciśnienie krytyczne, podobnym do wzoru Zoelly,ego i Leibensona. W ten sposób szacowana nośność krytyczna powłoki p_{Rcr} jest zgodna z rekomendacjami europejskimi.

Rozdział 3 przedstawia fizycznie nieliniowe analizy numeryczne MNA prowadzące do określenia nośności plastycznej powłoki p_{Rpl} . Podobnie jak w poprzednim rozdziale, opisano tu geometrię, parametry fizyczne i warunki brzegowe wariantów obliczeniowych (kolejny raz) oraz przedstawiono kryterium nośności plastycznej ustalone dla przemieszczenia 0,1 m (?) na ścieżce równowagi statycznej. Wyniki przedstawiono w postaci poszczególnych wykresów ścieżek równowagi statycznej dla węzła na szczycie powłoki. Wszystkie wyniki zestawiono w tabeli i zaprezentowano w postaci podobnych wykresów jak w poprzednim rozdziale, tj. zależności ciśnienia plastycznego od proporcji R/t. Tak jak poprzednio wykresy nałożone na siebie pokrywały się, co oznaczało brak wpływu wyniosłości powłoki na rezultaty analiz. Pozwoliło, to jak wyżej, aproksymować wszystkie wyniki zależnością funkcyjną o podobnej prostej postaci jak w rozdziale 2 (z tym, że p_{Rpl} jest zależne od f_y a nie od E).

Rozdział 4 prezentuje geometrycznie i fizycznie nieliniowe analizy numeryczne z imperfekcjami GMNIA. Początek rozdziału koncentruje się na warunku nośności, a przede wszystkim na imperfekcjach. Warunek nośności to maksimum lub "przełamanie" albo pozioma linia na ścieżce równowagi statycznej dla węzła w obrębie imperfekcji o maksymalnym przemieszczeniu (nie wymaga komentarza). Rodzaje imperfekcji, ich wielkość oraz sposoby wprowadzenia do analiz to duże wyzwanie, z którym, moim zdaniem, doktorat poradził sobie znakomicie. Tradycyjnie uwzględnia się imperfekcje w postaci odpowiednio skalibrowanej pierwszej albo drugiej formy wyboczeniowej lub ich kombinacji. Autor uwzględnił dodatkowo imperfekcje wynikające z technologii i jakości wykonania, tj. zakłębienie południkowe, zakłębienie powierzchniowe, małe zakłębienie powierzchniowe, zakłębienie powierzchniowe na szczycie powłoki, zakłębienie równoleżnikowe. Aby otrzymać geometrię modelu dla tych imperfekcji, posłużył się oryginalnym zabiegiem polegającym na wprowadzeniu odpowiedniego obciążenia w miejscu imperfekcji i obliczeniu deformacji przy zastosowaniu LA. Kolejne zadanie pomyślnie rozwiązane to kalibracja imperfekcji. Według rekomendacji europejskich amplituda imperfekcji zależy od promienia

i grubości powłoki oraz parametru jakości wytwarzania. Przy stałym promieniu powłoki otrzymano 18 wartości amplitud imperfekcji. Z góry trudno wskazać najbardziej niekorzystną imperfekcję, stąd konieczność przeprowadzenia, jak podaje autor, około 9000 (str. 154) analiz. Dla wyznaczenia najbardziej niekorzystnej imperfekcji, naniesiono ścieżki równowagi statycznej na jednym wykresie dla tej samej amplitudy. Okazało się, że wybór najniekorzystniejszej imperfekcji nie jest jednoznaczny, bo zależy od amplitudy imperfekcji. Stwierdzono, że największy wpływ na redukcję nośności wywierają imperfekcje w postaci pierwszej i drugiej formy wybozeniowej układu, niezależnie od wyniosłości, ale dla amplitud do $1,0 \cdot t$. Dla większych amplitud dominujące mogą okazać się inne postacie imperfekcji.

Dla oszacowania nośności powłoki sferycznej wg PN-EN 1993-1-6, konieczna jest znajomość parametrów wybozeniowych λ_0 , α , β , η i należy określić zmodyfikowaną krzywą nośności. Modyfikacji dokonano w kolejnym podrozdziale 4.4.4. Zmieniono położenie półki plastycznej oraz opisano zakres sprężysto-plastyczny funkcją drugiego stopnia, dokonując "wygładzenia" na styku z półką i zakresem sprężystym. Zakres sprężysty pozostawiono bez zmian. Pozostałe dwa parametry określono na podstawie wszystkich wyników obliczeń numerycznych. Ten sposób postępowania pozwolił uzależnić parametry α i β nie tylko od geometrii powłoki, ale również od parametru jakości wytwarzania Q , co zilustrowano wykresami na rys. 69 i 70.

W ostatnim podrozdziale 4.5 bardzo czytelnie przedstawiono zmodyfikowany algorytm wymiarowania powłok sferycznych oraz przedstawiono na wykresach przykładowe krzywe nośności wybozeniowej.

W **rozdziale 5** dokonano porównania zaproponowanej zmodyfikowanej procedury szacowania nośności wybozeniowej powłok sferycznych z rekomendacjami europejskimi oraz z badaniami eksperymentalnymi. Najpierw porównano wyrażenia na ciśnienie krytyczne p_{Rcr} (rys.72), następnie na nośność (ciśnienie) plastyczną p_{Rpl} (rys.72) i smukłość względną λ (rys.73) oraz poprawnie zinterpretowano różnice jako wynik stosowania innych typów analiz. Dokonano porównania pozostałych parametrów wybozeniowych λ_0 , α , β , η , χ oraz globalnie krzywych nośności wybozeniowej. Z porównanych krzywych wynika, że nośność obliczona zaproponowaną procedurą jest przeważnie wyższa niż wg rekomendacji.

W celu potwierdzenia tego faktu zamieszczono dwa przykłady obliczeniowe, które wykazały wzrost nośności powłok ustalony wg zaproponowanej zmodyfikowanej metody o 45% i 29% w stosunku EDR5th.

Ostateczną weryfikacją każdego rozwiązania teoretycznego jest porównanie z rezultatami eksperymentu. Doktorant nie przeprowadził własnych badań eksperymentalnych, ale skupił się na analizach teoretycznych, co nie jest zarzutem, biorąc pod uwagę zakres wykonanych prac. W zamian dokonał porównania rezultatów badań eksperymentalnych dostępnych w publikacjach z okresu ostatnich 60 lat z wynikami obliczeń wg zaproponowanej zmodyfikowanej procedury obliczeniowej. Do porównania wytypowano wyniki siedmiu różnych eksperymentów dotyczących badania stateczności powłok sferycznych. Wymiary badanych modeli były różne - od ściśle laboratoryjnych po półtechniczne, a modele zostały wykonane z różnych materiałów. Praktycznie wszystkie rezultaty badań plasowały się na wykresach nośności zazwyczaj powyżej krzywych ustalonych na podstawie zaproponowanego algorytmu.

Ostatni podrozdział pracy "Podsumowanie i wnioski" jest praktycznie dość szczegółowym streszczeniem pracy. Na końcu recenzowanej dysertacji zabrakło standardowego wskazania kierunków dalszych badań.

3. Ocena rozprawy

W opiniowanej rozprawie doktorskiej podjęto udaną próbę opracowania procedury szacowania nośności wyboczeniowej stalowych powłok sferycznych poddanych działaniu ciśnienia zewnętrznego. Zaproponowana procedura jest łatwa do zastosowania projektowego i zgodna z zapisami normy PN-EN 1993-1-6, a swym zakresem obejmuje większość spotykanych w praktyce inżynierskiej powłok sferycznych. Powłoki sferyczne to konstrukcje lub elementy konstrukcji zaawansowanej technologicznie infrastruktury przemysłowej. Występuje w pracy zatem wyraźny aspekt praktyczny co do przedmiotu badań. Cel badań jest również jak najbardziej praktyczny.

Układ i forma pracy świadczy o przemyślanym i ściśle określonym konkretnym celu pracy oraz precyzyjnie zaplanowanym algorytmie postępowania prowadzącym do jego osiągnięcia. W przeglądzie piśmiennictwa wykazano najpierw niedoskonałości rozwiązań analitycznych (powołując się na rezultaty eksperymentów fizycznych) i wskazano na możliwość lub wręcz konieczność stosowania analiz numerycznych mes. Bardzo dokładnie przeanalizowano zalecenia obowiązujących norm i rekomendacji, wykazując precyzyjnie na nieścisłości, różnice oraz brak praktycznych prostych algorytmów projektowych. Następnie przygotowano, sparametryzowany w zakresie grubości i wyniosłości, obliczeniowy model geometryczny powłoki sferycznej. Posługując się narzędziami numerycznymi (system COSMOS/M) i procedurami LBA i MNA, przeprowadzono analizy parametryczne,

pozwalające ustalić proste zależności na obciążenie krytyczne p_{Rcr} i referencyjną nośność plastyczną powłoki p_{Rpl} . Stosując GMNIA tj. geometrycznie i fizycznie nieliniowe analizy numeryczne z uwzględnieniem imperfekcji, obliczono nośności wyboczeniowe powłoki. Analizy tego typu wymagały uwzględnienia imperfekcji. Uwzględniono aż siedem form imperfekcji, a ich amplitudy ustalono dla trzech klas jakości wykonania. Na podkreślenie zasługuje fakt, że oprócz standardowo przyjmowanej geometrii imperfekcji w postaci pierwszej i drugiej formy wyboczeniowej, uwzględniono jeszcze pięć innych wynikających z technologii wykonania. Zastosowano prosty i zręczny sposób tworzenia geometrii imperfekcji technologicznych. Pomyślnie rozwiązano trudny problem znalezienia najniekorzystniejszej imperfekcji.

Oszacowanie końcowej nośności wyboczeniowej powłoki wymagało ustalenia parametrów wyboczeniowych λ_0 , α , β , η . W tym celu twórczo wykorzystano wyniki analiz GMNIA.

Parametry wyboczeniowe pozwoliły utworzyć klasyczną a dalej zmodyfikowaną krzywą nośności powłoki sferycznej. Stworzono inżynierskie podejście (w postaci prostego algorytmu obliczeniowego, służącego oszacowaniu nośności wyboczeniowej powłok sferycznych) do bardzo skomplikowanego zagadnienia. Należy podkreślić, że otrzymywane wyniki dokładnie odzwierciedlają zachowanie się powłok sferycznych z uwzględnieniem geometrii, materiału i jakości wykonania.

W pracy zamieszczono również dwa przykłady obliczeniowe, w których posłużono się praktycznie zaproponowanym algorytmem i dla porównania rekomendacjami EDR 5th Edition.

Mimo braku własnych badań doświadczalnych, autor starał się potwierdzić poprawność zaproponowanego algorytmu, przez porównanie wyników obliczeń z dostępnymi w literaturze rezultatami badań eksperymentalnych. Test wypadł bardzo pomyślnie.

Struktura pracy, jak podkreślono wyżej, jest poprawnie skonstruowana i systematycznie wiedzie czytelnika do efektu końcowego, jakim jest przedstawienie nowej procedury szacowania nośności wyboczeniowej powłok sferycznych. Należy podkreślić, że procedura ta w pełni bazuje na zapisach normy PN-EN 1993-1-6, jest przejrzysta i z powodzeniem znajdzie zastosowanie w praktyce inżynierskiej.

Za oryginalne osiągnięcie autora rozprawy można uznać:

- Wnikliwą, całościową i krytyczną analizę dotychczasowych procedur obliczeniowych powłok sferycznych wg norm i rekomendacji europejskich;

- Przygotowanie sparametryzowanego modelu obliczeniowego mes powłoki sferycznej;
- Ustalenie prostych zależności na obciążenie krytyczne p_{Rcr} i referencyjną nośność plastyczną powłoki p_{Rpl} na podstawie wyników analiz LBA i MNA;
- Przygotowanie geometrii początkowej modelu mes z uwzględnieniem pięciu imperfekcji technologicznych o amplitudach zależnych od klasy jakości wytwarzania;
- Dobór najniekorzystniejszych imperfekcji na podstawie wyników analiz GMNIA;
- Określenie parametrów wyboczeniowych powłoki sferycznej w oparciu o wyniki analiz GMNIA;
- Wyznaczenie klasycznej, a dalej zmodyfikowanej, krzywej nośności powłoki sferycznej;
- Kompleksowe opracowanie spójnej, przejrzystej i nieskomplikowanej procedury obliczeniowej szacowania nośności wyboczeniowej powłok sferycznych do zastosowań inżynierskich. Jest to najważniejsze oryginalne osiągnięcie doktoranta.

4. Uwagi krytyczne

Po lekturze rozprawy w porównaniu z innymi tego rodzaju pracami nasuwają się następujące uwagi:

Zazwyczaj w pracy naukowej zamieszcza się na jej początku oznaczenia stosowane w tekście. W tej pracy tego nie ma, co w kilku przypadkach utrudnia identyfikację oznaczeń. Z drugiej strony ilość oznaczeń stosowanych w pracy nie jest zbyt duża.

Jak już zaznaczono w punkcie 2 niniejszej recenzji, w pracy nie zamieszczono wyraźnie sformułowanej tezy pracy, a w podsumowaniu nie podano, czy teza została udowodniona. Wyraźne wyartykułowanie tezy w pracy doktorskiej jest pewną tradycją ale tylko tradycją. Zamiast tezy mamy konkretny cel pracy, który został z powodzeniem osiągnięty.

W tekście pracy pojawiają się pewne powtórzenia informacyjne dotyczące szczegółowego przedstawiania wszystkich parametrów prowadzonych analiz numerycznych. Powtórzenia występują w podrozdziałach 2.1 i 3.1.

Skoro przedstawiono podstawy teoretyczne analizy wyboczeniowej LBA, to dla "równowagi i symetrii" warto było krótko zaprezentować podstawy teoretyczne dla analiz MNA, a zwłaszcza GMNIA.

Końcowy podrozdział ostatniego rozdziału pracy nosi tytuł "Podsumowanie i wnioski". O ile podsumowaniem jest, to wniosków zawiera niewiele. Jest to raczej bardzo dokładne streszczenie pracy.

Brakuje również standardowych wniosków w postaci wyszczególnienia kierunków dalszego rozwoju naukowego, bo postawione zadanie zostało w pełni i całościowo wykonane.

Dobrze widziane jest, aby praca doktorska zawierała streszczenie, którym mogłaby być w skróconej formie ostatnia część pracy.

W pracy występują drobne literówki, ale jest ich niewiele, jako że tekst jest bardzo starannie przygotowany.

5. Podsumowanie i wniosek końcowy


Przedstawiona rozprawa doktorska jest nowoczesnym podejściem do badań i nauki, ponieważ umożliwia wykorzystanie skomplikowanego eksperymentu numerycznego do stworzenia bardzo praktycznej procedury inżynierskiej. Doktorant podjął się rozwiązania istotnego dla praktyki problemu technicznego szacowania nośności wyoboczeniowej stalowych powłok sferycznych obciążonych ciśnieniem. Powłoki sferyczne są częstym elementem konstrukcyjnym infrastruktury przemysłowej. Obowiązujące normy i rekomendacje europejskiej są nieprecyzyjne i trudne do praktycznego stosowania. Autor podjął się uporządkowania i uzupełnienia proponowanych przez PN-EN 1993-1-6 i rekomendacje EDR 5th Edition algorytmów, stosując w tym celu nowoczesny eksperyment numeryczny. Wykonane obszerne analizy numeryczne zawierają wiele elementów oryginalnych, jak np. siedem form imperfekcji, dobrze uzasadnionych i precyzyjnie opracowanych. Wyniki analiz posłużyły do osiągnięcia konkretnego praktycznego celu.

Należy podkreślić, że finałem tej naukowej pracy, zasadniczo teoretycznej, jest praktyczna procedura obliczeniowa w pełni zgodna z obowiązującą normą PN-EN 1993-1-6. Jest to więc przykład bardzo **pożądanego łączenia teorii z praktyką**.

Całość wykonanych prac świadczy o sumienności, dokładności, solidności, rzetelności i dojrzałości doktoranta jako badacza i naukowca.

Reasumując **bardzo wysoko oceniam** przedstawioną do recenzji pracę doktorską Pana mgr inż. Pawła Błażejewskiego.

Podsumowując stwierdzam, że opiniowana rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę "O tytule i stopniach naukowych" z dnia 14 marca 2003 roku (Dz. Ust. nr 65) i **stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Pawła Błażejewskiego do publicznej obrony pracy doktorskiej**.


dr hab. inż. Maciej Szumigala
profesor nadzwyczajny

