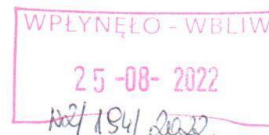


Dr hab. inż. Jakub Marcinowski, prof. UZ
Uniwersytet Zielonogórski
Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska
Instytut Budownictwa
ul. prof. Z. Szafrana 1
65-516 Zielona Góra
tel. 603 480 691
Adres prywatny:
ul. Wazów 78b/9
65-191 Zielona Góra

Zielona Góra 23.08.2022 r.



Recenzja rozprawy doktorskiej

Pana mgr. inż. Damiana Kozikowskiego

pt.

Badanie stateczności ściskanych osiowo walcowych powłok stalowych z uwzględnieniem kształtu i liczby imperfekcji geometrycznych

Recenzja powstała na zlecenie Prof. dr hab. inż. Wojciecha Puły, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa i Transport z Politechniki Wrocławskiej z dnia 20.06.2022 r. (doręczona 29.06.2022 r.). Promotorem pracy jest dr hab. inż. Eugeniusz Hotała, prof. PW.

Podstawa prawna:

Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r., Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478, 619, 1630, 2141, 2232), zwana dalej Ustawą.

Ustawa z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669, z 2019 r. poz. 39, 534, z 2020 r. poz. 695, 875, 1086, z 2021 r. poz. 1630, 2232).

1. Charakterystyka ogólna rozprawy

Przedmiotem recenzowanej pracy są analizy numeryczne dotyczące wpływu imperfekcji geometrycznych na nośność wyboczeniową powłok walcowych poddanych osiowemu ściskaniu. Rozważania zawarte w rozprawie nawiązują do zaleceń normowych normy PN EN 1993-1-6 wskazującej w jaki sposób należy uwzględnić imperfekcje geometryczne w oszacowaniu nośności wyboczeniowej rozpatrywanej klasy powłok.

Podjęcie pogłębionych badań naukowych wspomnianego zakresu ma duże znaczenie praktyczne i należy ocenić je z uznaniem. Na konieczność kontynuacji badań nad wpływem imperfekcji na nośność wyboczeniową powłok wskazywał prof. Michael Rotter wielokrotnie w swych publikacjach, a opiniowana rozprawa stanowi częściową odpowiedź na to zapotrzebowanie. Podział na klasy jakości wykonania, graniczne wartości amplitud imperfekcji, a także sposób ich pomiaru z narzuconymi w normie przymiarami to tylko przykładowe problemy, które od początku wprowadzenia normy PN EN 1993-1-6 w 2007 roku budziły uzasadnione wątpliwości jej użytkowników oraz naukowców zajmujących się statecznością powłok.

Motywacją do podjęcia badań przedstawionych w rozprawie były własne prace Autora, z których wynikało, że stosowane współcześnie metody uwzględniania odchyłek wykonawczych (imperfekcji) w analizie ich nośności wyboczeniowej w wielu przypadkach są zbyt konserwatywne.

Autor sformułował następujące cele badawcze:

1. Ocena wpływu kształtu i intensywności występujących w walcowych powłokach stalowych imperfekcji geometrycznych w postaci obwodowych wgłębień na stykach blach,

- wywołanych procesem spawania, na nośność graniczną przy równomiernym ściskaniu południkowym.
2. Wykazanie istotnych braków w stosowanych procedurach literaturowych i normowych w zakresie właściwego klasyfikowania jakości wykonania i oceny nośności stalowych powłok walcowych z uwzględnieniem obwodowych wgnieceń spawalniczych oraz przedstawienie własnych rekomendacji w tym zakresie.
 3. Próba oceny wpływu liczby występujących imperfekcji na nośność ściskanej osiowo powłoki walcowej.

Tezy sformułowane przez Autora na str. 82 pracy brzmią następująco:

Teza 1. W ściskanych południkowo stalowych powłokach walcowych amplituda największej pojedynczej imperfekcji w postaci wgłębień obwodowych nie zawsze jest miarodajnym parametrem decydującym o jej nośności granicznej.

Teza 2. Kształt i powierzchnia imperfekcji geometrycznych w postaci wgłębień obwodowych mogą mieć istotny wpływ na nośność graniczną ściskanej stalowej powłoki walcowej, a nie tylko sama wartość amplitudy wgłębień.

Teza 3. Istnieje potrzeba opracowania nowych zasad oceny jakości wykonania walcowych powłok stalowych ściskanych południkowo i sposobu uwzględniania kształtu i liczby imperfekcji geometrycznych w analizach nośności tych powłok. Proponowane regulacje normowe w tym zakresie są niewystarczające.

Dysertacja z tak sformułowanymi celami, zakresem i tezami spełnia warunki, o których mowa w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*.

Zgodnie z brzmieniem **Art. 187** tego aktu prawnego:

„1. Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej.

2. Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne.”

Potwierdzenie spełnienia tych wymagań jest przedmiotem niniejszej recenzji.

Praca składa się z sześciu rozdziałów i liczy 223 strony. Po spisie treści Doktorant zamieścił wykaz ważniejszych oznaczeń, spis rysunków i tabel. W rozdziale pierwszym Doktorant zamieścił wprowadzenie do tematyki rozprawy, przedstawił motywację, przedmiot, cele i zakres pracy.

Rozdział drugi zawiera rozważania na temat aktualnego stanu wiedzy z zakresu tematu pracy. Doktorant eksponuje problemy warte szczegółowych, dalszych badań. Powołuje się na badania, które stały się przesłanką do badań stanowiących przedmiot rozprawy. Praca Rottera i Tenga z 1989 r. dotycząca imperfekcji wywołanych spawaniem stała się inspiracją do pogłębionych badań Doktoranta. Wzorując się na kształcie zaproponowanym przez Rottera i Tenga, Doktorant zaproponował ogólną postać miejscowego zakłębnięcia powierzchni walcowej powłoki. Parametry zawarte w zaproponowanych wzorach analitycznych umożliwiają uwzględnienie miejscowego zakłębnięcia w dowolnym miejscu powłoki, kształcie zbliżonym do tego proponowanego przez Rottera i Tenga i dowolnej amplitudzie.

W jednostronicowym rozdziale trzecim Doktorant formułuje cele badawcze i tezy rozprawy doktorskiej.

W najobszerniejszym (94 na 223 strony całej pracy) rozdziale czwartym Autor przedstawił efekty swoich badań nad wpływem imperfekcji miejscowych na nośność wyboczeniową powłoki walcowej ściskanej osiowo.

W rozdziale piątym Doktorant zaprezentował wyniki analiz numerycznych dotyczących wpływu liczby losowo rozmieszczonych imperfekcji lokalnych na nośność wyboczeniową powłok walcowych.

W ostatnim, sześciostronicowym rozdziale szóstym Autor dokonuje podsumowania zrealizowanych przez siebie badań, formułuje wnioski, zamieszcza uwagi końcowe i wskazuje kierunki dalszych badań.

Bibliografia zamieszczona po ostatnim rozdziale liczy 155 pozycji źródłowych i cztery cytowane normy.

W Załączniku A.1 Autor zaprezentował autorski skrypt służący do modyfikacji siatki elementów skończonych zgodnie z wprowadzoną formą imperfekcji. Skrypt ten został napisany w języku Visual Basic for Applications (VBA). Współdziała on z innym skryptem napisanym w środowisku MatLab i zaprezentowanym w Załączniku A.2. W załączniku tym Autor zamieścił także skrypt służący do określania parametru jakości wykonania na podstawie „pomiarów” wykonywanych na przyjętych do obliczeń imperfekcjach lokalnych. Ten skrypt został także napisany w języku środowiska MatLab.

Pracę kończą strony ze streszczeniem w języku polskim i angielskim.

Statystyka tekstu: całkowita liczba stron – 223, liczba tabel – 23, liczba rysunków – 70, liczba wzorów – 87 (a właściwie 88, gdyż numer (4.17) został użyty dwa razy na str. 111), liczba cytowanych pozycji literaturowych – 155 oraz 3 normy.

2. Uwagi szczegółowe i komentarze

Błędy o charakterze edytorskim zostały wyspecyfikowane i przesłane Doktorantowi w postaci odrębnego, ośmiostronicowego pliku. W tej części recenzji zamieszczam uwagi i komentarze w części o charakterze polemicznym. Wymieniam je w porządku chronologicznym odwołując się do konkretnych rozdziałów i stron rozprawy.

Wysoko oceniam 58 stronicowy rozdział 2, w którym Autor dokonał przeglądu stanu wiedzy z zakresu stateczności ściskanej wzdłużnie powłoki walcowej analizując w tym celu aż 126 pozycji źródłowych i 4 normy. Wśród cytowanych pozycji źródłowych znalazła się tylko jedna współautorska pozycja Doktoranta. W wykazie cytowanych prac dominują publikacje angielsko- i niemieckojęzyczne. Tylko dwie spośród cytowanych prac zostały napisane w języku polskim, w tym jedna wspomniana praca Doktoranta.

Informacje zawarte w tym rozdziale świadczą o bardzo dobrym rozpoznaniu problemu zjawiska redukcji nośności wyboyczeniowej powłok walcowych w stosunku do prognoz wynikających z teoretycznych rozwiązań klasycznych. Doktorant trafnie eksponuje główne przyczyny tej redukcji i wskazuje kierunki wymagające dalszych badań z wykorzystaniem współczesnych narzędzi.

Krytycznie odnosi się do zaleceń normy PN-EN 1993-1-6 ([N1] w wykazie cytowanych pozycji źródłowych), która wprowadza trzy klasy jakości wykonania definiowane w sposób budzący zastrzeżenia Doktoranta.

Doktorant zwraca uwagę na niespójności występujące, Jego zdaniem, w zapisach normy [N1]. W modyfikowanej obecnie wersji tej normy pojawia się korekta zapisów dotyczących klas dokładności i przymiarów, które służą do ich określenia. Praktyka inżynierska pokaże czy te zmiany będą w pełni satysfakcjonujące.

Spośród wielu wskazanych przez Doktoranta dalszych kierunków badań, wybiera te które stanowią zakres Jego rozprawy. Cele i tezy pracy doktorskiej formułuje w r. 3. Przedmiotem analiz numerycznych zaplanowanych przez Doktoranta jest wpływ kształtu i amplitudy imperfekcji w postaci zagłębienia zdefiniowanego wzorem (4.6), na nośność wyboyczeniową powłoki. Poza tą formą imperfekcji analizuje także imperfekcje wzorowane na formach własnych wynikających z analiz LBA oraz formach deformacji stwierdzonych w analizach GNA.

Analizuje także wpływ liczby losowo rozmieszczonych imperfekcji na nośność wyboyczeniową powłoki.

Z rozważań wyklucza inne czynniki wpływające na obniżenie nośności wyboczeniowe powłoki takie jak: naprężenia residualne, mimośrodowość niezamierzona w stykach blach, zaburzenia krzywizny w skrajnych fragmentach arkuszy blach czy zaburzenia niejednorodności materiałowej w obrębie spoin.

Warto podkreślić użyteczny charakter zaplanowanych badań. Prace Doktoranta mają na celu precyzyjne oszacowanie nośności wyboczeniowej stalowych powłok walcowych w fazie projektowania oraz na etapie oceny nośności istniejących powłok jako zbiorników lub części złożonych konstrukcji powłokowych.

Za narzędzie prowadzonych badań wybiera program Femap Nastran bazujący na metodzie elementów skończonych, a badania prowadzi wyłącznie numerycznie.

Obiektem analiz szczegółowych jest jedna powłoka o przyjętych z góry parametrach geometrycznych i materiałowych: $R=1500$ mm, $L=6$ m (długość określana też zamiennie wielkością H), $t=3$ mm, $R/t=500$, $f_y=235$ MPa, $E=210$ GPa, co podkreśla wielokrotnie świadomość ograniczonej końcowych wniosków.

Zrealizowane badania opisuje w najobszerniejszym rozdziale 4 swojej rozprawy.

Efektom ważnym przestudiowania pracy Rottera i Tenga jest propozycja kształtu pojedynczego zagłębienia sformułowana wzorem (4.6). Jest to dwuwymiarowa funkcja kształtu imperfekcji zlokalizowanej w dowolnym miejscu powłoki i opisanej parametrami γ , κ_θ i κ_φ , przy czym te dwa ostatnie parametry definiujące wymiary zagłębienia w kierunku osiowym i obwodowym są wyrażone przez długość λ_0 półfali wyboczeniowej opisanej wzorem (2.6).

Nie podzielam stanowiska Doktoranta, że każde zagłębienie należy mierzyć zarówno przymiarem l_{gx} jak i przymiarem l_{gw} . Ten drugi przymiar jest przewidziany wyłącznie dla zagłębienia wywołanego spawaniem (por. zapis p. 8.4.4(2) normy [N1]). Stosowanie relatywnie krótkiego przymiaru l_{gw} do dużych zagłębienia skutkuje pomiarem amplitudy znacznie odbiegającym od pomiaru względem powierzchni środkowej powłoki. Dobrze to ilustruje przykład ze str. 92. Wniosek, że na podstawie pomiaru przymiarem l_{gw} otrzymujemy klasę C jest nieuprawniony.

Z zapisów normy [N1] wynika, że przymiaru l_{gx} należy używać w kierunku osiowym i obwodowym także w przypadku spoin, natomiast przymiaru l_{gw} należy użyć dodatkowo poprzecznie do spoin obwodowych czy południkowych. Doktorant nadinterpretuje zalecenia normowe traktując wszystkie rozpatrywane przez siebie zagłębienia jako imperfekcje wywołane spawaniem. Używa do ich pomiaru przymiaru l_{gw} i w tym należy upatrywać przyczyny bardziej restrykcyjnej oceny jakości wykonania stwierdzonej w przykładzie 2 na str. 92.

Sposób pomiaru odchyłek geometrycznych podaje też niecytowana przez doktoranta norma PN-EN 1090-2:2008 Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych. Część 2: Wymagania techniczne dotyczące konstrukcji stalowych. W załączniku D1.9 tej normy wyjaśniono precyzyjnie w jaki sposób posługiwać się przymiarem L w przypadku spoin.

Szkoda, że Autor nie przedstawia w pracy informacji o możliwym zasięgu zagłębienia wywołanego spawaniem. Zagłębienie analizowane na str. 92 ma wymiary 0,6 m w kierunku osiowym i 0,9 m w kierunku obwodowym. Czy spawanie blach o grubości 3 mm może wywołać deformacje tej wielkości? Wątpliwe, bez względu na zastosowany sposób spawania.

Zgodnie z zapisem normy [N1] l_{gw} przyjmuje wartość $25t$, ale nie większej niż 500 mm i zalecenie to wynika z zakresu realnego zagłębienia wywołanego spawaniem.

W pp. 4.2 i 4.3 rozprawy Doktorant przedstawia ogólny kształt imperfekcji reprezentatywnej. Inspiracją była propozycja Rottera i Tenga z pracy [73]. Wprowadzenie parametru γ o wartościach 0, 0,5 i 1,0 pozwoliło uwzględnić różne stopnie wyokrąglenia zagłębienia, a dodatkowe parametry κ_ω i κ_φ definiują długości zagłębienia w kierunku osiowym i obwodowym. Doktorant zmienia je w zakresie $0,001\lambda_0, 0,5\lambda_0, 1,0\lambda_0, 2,0\lambda_0, 4,0\lambda_0$. Parametry x_0 z zakresu $[0, L]$ i θ_0 z zakresu $[0, 2\pi]$ definiują położenie geometrycznego środka zagłębienia.

Zestawienie 225 rozważanych przypadków kształtów imperfekcji dla trzech różnych amplitud $w_0/t = [0,1, 0,5, 1]$ zawiera tabela 4-2.

W p. 4.4 pracy Autor opisuje narzędzie (program Femap Nastran), z którego korzysta w dalszej części pracy. Do modelowania powłoki dobiera element, który może być wykorzystany w analizach

przewidzianych normą [N1]. Na str. 105 wspomina o analizach MNIA, ale takich akurat nie przewidziano w normie. Możliwe analizy przewidziane w normie [N1] zostały wyspecyfikowane w p. 2.2 normy. Są to analizy: LA, LBA, GNA, MNA, GMNA, GNIA i GMNIA.

W p. 4.4.2 Autor opisuje testy zbieżności rozwiązania problemu LBA dla różnych gęstości siatek. Opis procedury numerycznej zamieszczony na str. 106 i 107 dotyczy problemu drgań swobodnych, a nie LBA (linear buckling analysis), choć w obu przypadkach matematycznie jest to problem własny. W analizie LBA końcowe równanie macierzowe przyjmuje postać:

$$[[K] + \lambda[K_\sigma]]\{\delta\} = \{0\}$$

gdzie: λ – wartości własne, $\{\delta\}$ – wektor form własnych, $[K]$ – macierz sztywności, $[K_\sigma]$ – macierz początkowych naprężeń.

W p. 4.5 Autor omawia analizę GMNIA. Równanie (4.16) jest zapisane z błędem. Powinno mieć postać:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + b_i = 0,$$

Związek (4.17) (powinien mieć numer (4.18)) jest liniowym związkiem geometrycznym, a nie „relacją zgodności przemieszczeń” jak go nazywa Autor. Jego odpowiednik nieliniowy dla przypadku 3D ma postać:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (q_{i,j} + q_{j,i} + q_{k,i}q_{k,j}).$$

gdzie q_i to składowe stanu przemieszczenia.

Wyjaśnienie algorytmu odtwarzania nieliniowych ścieżek równowagi (str. 113-127) budzi pewien niedosyt. Natura zjawisk nieliniowych w mechanice wymusza postępowanie przyrostowo-iteracyjne. Wędrówka po ścieżce równowagi może się odbywać z wykorzystaniem sterowania obciążeniem (algorytm rozbieżny w pobliżu ekstremum obciążeniowego), przemieszczeniem (algorytm rozbieżny w pobliżu punktów zwrotnych na ścieżce) lub parametrem łuku (metoda Riksa, Riksa-Wempnera, Crisfielda). Metody iteracyjne to metody newtonowskie (Newton-Raphson) lub pseudo-newtonowskie z modyfikacją początkowej macierzy stycznej lub bez jej modyfikacji w trakcie iteracji.

Sterowanie parametrem ścieżki (łuku) jest najbardziej ogólne choć nie uniwersalne. W konkretnych zadaniach często zachodzi konieczność zmiany sposobu sterowania by uzyskać przebieg ścieżki równowagi w pożądanym zakresie.

Pierwsze analizy numeryczne zaprezentowane przez Doktoranta na str. 127 pozostawiają pewien niedosyt. Analiza LBA to jeden szczególny punkt na ścieżce liniowej, nie może więc pojawić się półka pozioma pokazana na rys. 4-15. Wątpliwości budzi jakby urwana analiza GNA. Krzywa GNA niczym nie przypomina klasycznej ścieżki równowagi pokazanej na rys. 2-1. Wbrew zapewnieniom Autora na ścieżce równowagi nie widać punktu bifurkacji, tj. rozdwojenia ścieżki podstawowej. Wyboczenie w punkcie bifurkacji nie jest określane terminem snap-through. Ten termin jest zarezerwowany dla zjawiska gwałtownego przeskoku w punkcie granicznym (ang. limit point).

Analiza GMNIA wymagałaby informacji o formie i amplitudzie imperfekcji. Dlaczego już od samego początku powłoka wykazuje tak małą sztywność?

W niecytowanej pracy Schabowicza i Zawiaślaka (ACE, 2012 r.), kolegów Doktoranta z Jego macierzystego Wydziału, analogiczny przykład został zaprezentowany dużo efektowniej. Wykorzystano w nim program Abaqus.

W p. 4.6 rozprawy Autor zaprezentował analizy parametryczne polegające na badaniu nośności wyboczeniowej w funkcji parametrów opisujących pojedynczą imperfekcję położoną w połowie wysokości powłoki. Badany jest wpływ imperfekcji o amplitudach $w_0 = 0,1t, 0,5t, 1,0t$ i parametrach kształtu $\gamma = 0, 0,5, 1,0$, przy ustalonych parametrach $\kappa_\omega = \kappa_\varphi = \lambda_0$ występujących we wzorze (4.6).

Na rys. 4-17 nie dostrzegam wyników dla modelu idealnego wymienionego w legendzie.

Z rys. 4-18 wynika, że parametr kształtu imperfekcji γ nie wpływa aż tak istotnie na nośność wyboczeniową powłoki zaburzonej pojedynczą imperfekcją w połowie jej wysokości, natomiast wpływ amplitudy imperfekcji w_0 na nośność jest znaczący.

Rys. 4-18 powinien być „obcięty” na poziomie 0,92, gdyż poziom $\sigma_{cl} = 254,1$ MPa jest nieosiągalny wobec przyjętej granicy plastyczności $f_y = 235$ MPa.

Wniosek zapisany w ostatnim zdaniu na str. 132 jest zapewne pomyłką. Z wykresów 4-17 i 4-18 wynika, że $\gamma = 1,0$ skutkuje największą redukcją nośności.

W dalszej części rozdziału 4.6 Autor bada wpływ wymiarów imperfekcji κ_ω i κ_φ zmieniając je w zakresie $\{0,001, 0,5, 1, 2, 4\}$. W opisie zabrakło informacji dla jakiej wartości γ były prowadzone te analizy. Test korelacji pozwolił wykluczyć κ_ω z rozważań i ograniczyć analizę parametryczną do parametrów w_0 i κ_φ .

Wysoko oceniam test korelacji, wybór parametrów istotnych i zaproponowaną nieliniową funkcję regresji. Trudno mi zaakceptować etap postępowania, w którym „odrzucono wartości odstające”. Analiza GMNIA to nie pomiar, który może być obarczony wpływem czynników losowych, a wynik jest zawsze wartością deterministyczną. Tymi wartościami „ostającymi” są prawdopodobnie wyniki otrzymywane dla przypadku κ_ω i $\kappa_\varphi = 0,001$. To forma lokalnego zagłębienia o kształcie mało relacyjnym.

Propozycję wzoru aproksymacyjnego (4.52) oceniam pozytywnie choć zakres jego zastosowania jest ograniczony do rozważanej powłoki o $R/t = 500$ i przyjętego z góry parametru kształtu imperfekcji γ (nie podano jakiej wartości było γ , nie podano też wartości κ_ω wykorzystanej w punktach obliczeniowych).

Dyskusja przedstawiona w p. 4.6.3 budzi moje zastrzeżenia. Wątpliwości będące efektem pomiarów zaprezentowanych na str. 141 pewnie by zniknęły gdyby mierzyć w kierunku osiowym. Nie podano co prawda wartości κ_ω , ale długość imperfekcji w kierunku osiowym byłaby zdecydowanie mniejsza i pomiar dotyczyłby de facto amplitudy odmierzanej od powierzchni środkowej powłoki.

Dyskusja wyników zamieszczonych na rys. 4-23 nie prowadzi do wiążących ustaleń wobec wątpliwości co do poprawnego określania klasy jakości wykonania na podstawie przymiarów „wpadających” do wnętrza imperfekcji.

Zaproponowany w p. 4.6.5 wzór (4.55) jest efektem zastosowania autorskiej propozycji pomiaru zagłębienia imperfekcji lokalnej. Zdaniem Autora pomiaru amplitudy w_0 należy dokonać przymiarowaniem osiowym o długości równej lub większej od długości zagłębienia w kierunku osiowym, a następnie domierzyć długość zagłębienia w kierunku obwodowym $l_{g,max}$. Efektem tych modyfikacji jest propozycja wzoru (4.55), w którym zamiast parametru κ_φ zastosowanego we wzorze (4.52) pojawia się $l_{g,max}$.

Przydatność zaproponowanego wzoru Autor ilustruje przykładem nr 4 na str. 152. Ze wzoru (4.55) otrzymuje nośność wyboczeniową na poziomie 96,34 MPa. Procedura zalecana normą [N1] daje wynik 55,35 MPa, a analiza GMNIA dla tej samej imperfekcji prowadzi do wyniku 121,91 MPa.

Niepokoić musi duża różnica między wynikiem uzyskanym wzorem (4.55), a rezultatem analizy GMNIA mimo iż analiza numeryczna była wykonana z wykorzystaniem identycznej imperfekcji.

W p. 4.7 Autor wprowadza do rozważań także imperfekcje w postaci form własnych wynikających z analitycznego rozwiązania problemu stateczności początkowej. Przyjmuje przy tym warianty geometrii „szachownicowej” wynikające z dwóch skrajnych okręgów Koitera pokazanych na rys. 4-29 (na rysunku tym niepoprawnie opisano osie, por. rys. 2-3).

W opisie wzorów (4.57) i (4.58) wkradł się błąd. Parametry m i n oznaczają liczby półfal nie fal.

Autor rozważył łącznie 242 przypadki analitycznych form własnych z amplitudą $w_0 = 1,5t$. Najmniejszą wartość nośności wyboczeniowej otrzymano dla formy osiowo symetrycznej: $m = 53, n = 0$.

Szkoda, że rozpatrzono tylko jedną formę osiowosymetryczną. Przypuszczam, że formy (50, 0), (51, 0), (52, 0), (54, 0), (55, 0), (56, 0) dałyby też wyniki na poziomie 0,2.

W eksperymentach często spotykana jest forma rombowa (diamentowa). Czy wśród licznych form otrzymanych w analizie LBA Autor nie otrzymał takiej formy? Warto było ją uwzględnić w poszukiwaniu najniekorzystniejszej formy imperfekcji.

W p. 4.8 rozprawy Doktorant prezentuje analizy GMNIA wykonane z wykorzystaniem imperfekcji w postaci form deformacji otrzymanych w analizie GNA. Dwie formy otrzymane w różnych fazach analizy GNA nie prowadzą do tak drastycznej redukcji nośności jak formy własne z rozwiązania analitycznego ($\sigma_{GMNIA}/\sigma_{Cl} \approx 0,4$ dla $w_0=1,0t$).

W kolejnym punkcie rozdziału 4 Autor rozpatrzył obwodową imperfekcję typu Weld Type A opisaną wzorem (4.3) dla przypadku $\zeta = 1,0$. Umieścił tę imperfekcję w połowie wysokości powłoki i rozważył jej amplitudy $w_0 = \{0,1t, 0,5t, 1,0t\}$. Krzywa wpływu imperfekcji wykazała najniższą wartość ok. 0,3 dla $w_0=1,0t$. Szkoda, że Autor nie rozważył takich imperfekcji na granicy każdej cergi np. co 1,5 m lub 1,0 m na wysokości. Przypuszczalnie byłyby to najniekorzystniejsza forma imperfekcji i dodatkowo bardzo realna.

Rozdział 4 kończy dyskusja zaprezentowana w p. 4.10. Cennym podsumowaniem przedstawionych analiz jest rys. 4.37. Imperfekcja w postaci osiowosymetrycznej formy własnej prowadzi do zdecydowanie największe redukcji nośności. Ważnym spostrzeżeniem jest znaczący wpływ długości obwodowej pojedynczego zagłębienia. Przypadkiem granicznym jest imperfekcja obwodowa zgodna z Weld Type A. Wyniki dla takich imperfekcji rozmieszczonych na poziomie każdej spoiny obwodowej stanowiłyby cenne uzupełnienie rys. 4-37.

Podobnie jak inne wykresy wpływu prezentowane w rozprawie, wykresy pokazane na rys. 4-37 należałoby ograniczyć do wartości $\sigma_{GMNIA}/\sigma_{Cl} = 0,92$ odpowiadającej wyczerpaniu nośności plastycznej.

Przedmiotem rozważań zamieszczonych w rozdziale 5 rozprawy jest wpływ liczby imperfekcji na nośność wyobczeniową powłoki. Rozważano losowo rozmieszczone imperfekcje tego samego kształtu i o tej samej amplitudzie. Analizy parametryczne obejmowały przypadki zagłębień o $\gamma = \{0, 1, 0\}$ i amplitudach $w_0 = \{0,1t, 0,5t, 1,0t\}$ w liczbie $n = \{1, 10, 20, 40\}$. Wszystkie zagłębienia były opisane funkcją (4.6), przy czym parametry odpowiadające za rozmiary imperfekcji w planie były stałe i wynosiły $\kappa_\omega = \kappa_\varphi = \lambda_0$.

Autor dokonał obróbki statystycznej otrzymanych wyników, efektem której był model regresji nieliniowej zależny od amplitudy i liczby imperfekcji opisany wzorem (5.3). Z rys. 5-3 wynika, że maksymalna liczba imperfekcji ($n = 40$) o maksymalnej amplitudzie nie prowadzi do wyników niższych od 0,35. Wzór (5.3) daje dla tego przypadku wartość $\sigma_{GMNIA}/\sigma_{Cl} = 0,37$. Oznacza to redukcję mniejszą od redukcji otrzymanej dla osiowosymetrycznej formy własnej (ok. 0,25) czy dla pojedynczej imperfekcji obwodowej o amplitudzie $w_0 = 1,0t$ (ok. 0,3).

W p. 5.3 rozdziału 5 Autor rozpatrzył przypadek zróżnicowania amplitud losowo rozmieszczonych imperfekcji w liczbie 10, 20 lub 40. Amplitudy różnicowano w taki sposób by stosując przymiar l_{gw} uzyskać graniczną wartość dla jednej z trzech klas jakości wykonania. Tak otrzymane amplitudy pokazano w tabeli 5-5, a wyniki analiz GMNIA dla różnych przypadków na rys. 5-4. Na rys. 5-5 zestawiono wyniki $\sigma_{GMNIA}/\sigma_{Cl}$ dla wszystkich 90 rozpatrywanych przypadków porównując je z rozwiązaniami normowymi dla trzech klas jakości wykonania. Dostrzegalna jest tendencja spadku nośności w zależności od klasy jakości wykonania. Na rys. 5-4 można odczytać najmniejszą wartość nośności na poziomie 0,42 otrzymaną dla klasy C i przypadków 20 lub 40 imperfekcji lokalnych. Jest to wartość znacząco wyższa od wartości otrzymanych dla imperfekcji osiowosymetrycznej (forma z LBA) czy dla pojedynczej imperfekcji obwodowej o kształcie Weld Type A.

Jeden z wyników z rys. 5-6 budzi wątpliwość. To niebieskie kółko obrazujące wynik dla przypadku $n = 20$ w dolnej sekwencji rozwiązań dla klasy B. Pozostałe niebieskie kółka lokują się dużo wyżej, między rozwiązaniami dla klasy C i klasy A. Jaka jest tego przyczyna?

Przykład nr 5 (str. 194) pokazuje rozbieżności między procedurą normową i analizą GMNIA potwierdzonych już we wcześniejszych fragmentach rozprawy. Wzór na regresję nieliniową ((5.3), a nie jak omyłkowo podano na str. 196 (5.2)) daje wartość nośności 111, 3 MPa, podczas gdy analiza

GMNIA tego przypadku prowadzi do wyniku 121,46 MPa. Wzór (5.3) otrzymany w efekcie obróbki statystycznej wyników otrzymanych drogą analiz GMNIA wydaje się być bardzo zachowawczy.

Procedura normowa, konserwatywna w swym założeniu, daje wynik 24,23 MPa i jest to wartość ponad 5 razy mniejsza od wartości otrzymanej w analizie GMNIA dla tego szczególnego przypadku imperfekcji geometrycznych.

Rozdział 5 kończy dyskusja dotycząca wpływu liczby losowo rozmieszczonych imperfekcji na nośność wyboczeniową powłoki walcowej. Przeprowadzone analizy potwierdziły niewielki wpływ liczby miejscowych imperfekcji (zagłębień), a jednocześnie znaczący wpływ amplitudy tych zagłębień na nośność wyboczeniową powłoki walcowej.

Wyniki uzyskane drogą analiz GMNIA są wyższe od wyników prognozowanych za pomocą wyprowadzonego wzoru na nieliniową regresję i dużo wyższe od wyników procedury normowej nazywanej w normie [N1] metodą naprężeniową. Należy jednak zwrócić uwagę, że w analizach GMNIA nie uwzględniono wszystkich czynników mogących mieć wpływ na nośność wyboczeniową.

Warto wspomnieć, że metoda naprężeniowa proponowana w normie [N1] (por. p. 8.5 normy [N1]) jest w swej naturze zachowawcza. Poza tym sposobem oceny nośności wyboczeniowej powłok norma ta dopuszcza jeszcze dwie inne metody postępowania: metodę polegającą na analizach MNA i LBA oraz wykorzystaną przez Doktoranta metodę bazującą na analizach GMNIA.

Kończący rozprawę rozdział 6 zawiera podsumowanie i wnioski z wykonanych analiz. Doktorant potwierdza realizację celów badawczych sformułowanych w rozdziale 3, a także prawdziwość też w brzmieniu podanym na str. 82.

Teza 3 wskazująca na konieczność opracowania nowych zasad oceny jakości wykonania walcowych powłok walcowych wychodzi naprzeciw trwającemu (właściwie już zakończonym) pracom nad modyfikacjami normy [N1]. Wśród wielu zmian znalazły się także zmiany dotyczące sposobów określania klasy jakości wykonania na podstawie pomiarów z wykorzystaniem przymiarów.

W p. 6.3 rozprawy Autor wskazuje kierunki dalszych badań, a wśród nich konieczność uwzględnienia imperfekcji obwodowych. W p. 6.3.5 pisze, że ten przypadek nie był rozpatrywany w pracy, zapominając, że w p. 4.9 przypadek imperfekcji obwodowej był rozpatrywany. Przykładami imperfekcji obwodowych są też formy rozpatrywane w p. 4.8 pracy.

3. Uwagi ogólne

1. Ważnym choć spodziewanym wnioskiem z przeprowadzonych analiz numerycznych jest potwierdzenie istotnego wpływu amplitudy pojedynczej imperfekcji na nośność wyboczeniową powłoki walcowej ściskanej w kierunku osiowym. Parametr kształtu γ występujący w zaproponowanej funkcji opisującej pojedyncze zagłębienie wpływa na nośność wyboczeniową powłoki, choć nie jest to wpływ tak istotny (por. rys. 4-18).
2. Ciekawym spostrzeżeniem Doktoranta jest redukcyjny wpływ wymiaru zagłębienia w kierunku obwodowym i brak zależności nośności wyboczeniowej od wymiaru zagłębienia w kierunku osiowym powłoki. Wnioski te dotyczą rozpatrywanego kształtu zagłębienia i tylko konkretnej powłoki stanowiącej obiekt szczegółowych analiz numerycznych.
3. Wpływ imperfekcji korespondującej z formami wyboczenia otrzymywanymi w analizach LBA był znany w literaturze. Doktorant przeanalizował aż 242 formy o różnej liczbie półfal m w kierunku południkowym i n w kierunku obwodowym. Zdecydowanie największą redukcję nośności otrzymał dla formy osiowosymetrycznej ($n=0$). Niewiele wyższą wartość nośności otrzymał dla pojedynczej imperfekcji obwodowej zlokalizowanej na poziomie $H/2$. Szkoda, że nie kontynuował poszukiwań w tym kierunku przyjmując takie imperfekcje na poziomie styków każdej cangi.

4. Formy imperfekcji uzyskane przez Doktoranta z kształtów deformacji stwierdzonych na ścieżce równowagi w analizie GNA nie prowadzą do znacznej redukcji nośności co może zaskakiwać. Ten kierunek poszukiwań najniekorzystniejszych form imperfekcji niewątpliwie zasługuje na kontynuację.
5. Analizy nośności powłok obarczonych wieloma losowo rozmieszczonymi imperfekcjami o tym samym kształcie i tej samej amplitudzie dostarczyły ważnych wniosków: istotna zależność od amplitudy (redukcja nośności wraz ze wzrostem amplitudy) i relatywnie mniejszy wpływ liczby imperfekcji na nośność. Badania wpływu zróżnicowanych amplitud poszczególnych imperfekcji i związane z tym różne klasy jakości wykonania przy różnej liczbie losowo rozmieszczonych imperfekcji o tych samych rozmiarach w planie, dostarczyły kolejnych wniosków: nośność spadała wraz ze wzrostem amplitudy i wzrostem liczby imperfekcji.
6. Analizy wykonane przez Doktoranta udzielają odpowiedzi na wiele pytań, ale skutkują też pojawieniem się kolejnych i rodzą dodatkowe wątpliwości. Rozważano wpływ położenia lokalnej imperfekcji na poziomie $1/2H$. Czy inna lokalizacja pojedynczej imperfekcji może skutkować większą redukcją nośności? A jaki byłby wpływ zagłębień skierowanych w przeciwną stronę? Imperfekcja zlokalizowana w pobliżu krawędzi podparcia mogłaby doprowadzić do uruchomienia mechanizmu typu „elephant foot”, często obserwowanego w realnych powłokach walcowych.
7. Na wysoką ocenę zasługują statystyczne obróbki wyników przeprowadzone po każdej z analiz parametrycznych przedstawionych w rozprawie. Ich celem było wyselekcjonowanie parametrów istotnie wpływających na nośność wyboyceniową. Końcowe wzory na regresję nieliniową dają niezłe oszacowanie nośności choć zakres ich wykorzystania jest ograniczony do konkretnej powłoki rozważanej w analizach numerycznych.
8. Norma [N1] przewiduje także procedurę opisaną w p. 8.6, czyli projektowaniu opartym na analizach MNA i LBA. Doktorant w swej rozprawie o tej metodzie nie wspomina i nie zamieszcza żadnego przykładu ilustrującego jej efektywność.
9. Tylko częściowo podzielam wątpliwości Doktoranta wynikające z wykorzystania normowych przymiarów służących do określania klasy jakości wykonania powłok. Przymiar l_{gw} powinien być wykorzystany wyłącznie do pomiaru w kierunku poprzecznym do osi spoiny. Doktorant używa go do pomiaru rozpatrywanych zagłębień traktując je jako zagłębienia wywołane spawaniem i wykonuje pomiary w obu kierunkach. Efekt „wpadania” przymiaru do wnętrza rozległego zagłębienia skutkuje rozbieżnościami w określaniu klasy jakości wykonania.
10. Doktorant rozpatrywane przez siebie imperfekcje w postaci zagłębień określa mianem spoiny, rozpatrując także zagłębienia o relatywnie dużych rozmiarach. Nie wyjaśnił w pracy jaki realnie jest wpływ procesu spawania na kształt imperfekcji w pobliżu spoiny. Czy to zakres $25t$ jak przymiar sugerowany w normie [N1] czy więcej? Wykluczył z rozważań wpływ naprężeń residualnych choć w realnych konstrukcjach nie realizuje się procesu odpuszczania termicznego.
11. Autor słusznie podkreśla ograniczoność wniosków sformułowanych w rozprawie ze względu na fakt rozpatrywania tylko jednego przypadku stalowej powłoki walcowej ($L=H=6$ m, $R=1,5$ m, $R/t=500$), jednego przypadku warunków brzegowych i jednego gatunku stali. Poszerzenie zakresu o inne geometrie, inne smukłości, inne warunki brzegowe i inne gatunki stali, wiązało by się z koniecznością powołania wieloosobowego zespołu badawczego złożonego z osób wykazujących się tak rozległą wiedzą i taką pracowitością jaką się wykazał Doktorant.

12. Zabrakło wniosku końcowego, ważnego z praktycznego punktu widzenia: jaka jest faktyczna nośność wyboczeniowa rozpatrywanej powłoki przy założeniu, że jest to faza projektowania przy z góry założonej klasie jakości wykonania? Jaki poziom naprężeń południkowych można dopuścić w powłoce analizowanej w pracy tak szczegółowo?

4. Ocena pracy i wniosek końcowy

Temat, którym zajął się Doktorant jest niewątpliwie istotny zarówno ze względów poznawczych jak i praktycznych. Precyzyjne ustalenie wpływu imperfekcji geometrycznych na nośność wyboczeniową powłok jest wyzwaniem, z którym się mierzą zespoły naukowców z wielu krajów od wczesnych lat dwudziestego wieku. Kolejne wersje zaleceń projektowych opracowywane przez grupę roboczą TWG8.4 ECCS „Buckling of steel shells. European design recommendations” (wersja nr 5 ukazała się w 2008 i 2013 r. – niestety pozycja ta nie była cytowana) i kolejne wersje norm EN 1993-1-6, EN 1993-4-1 i EN 1993-4-2, które powstawały w następstwie publikowania tych zaleceń, zmierzają w kierunku coraz bardziej precyzyjnego, a jednocześnie bezpiecznego szacowania nośności wyboczeniowej powłok stalowych. Badania podjęte przez Doktoranta i zaprezentowane w opinionej rozprawie stanowią cenny przyczynek do badań wpływu imperfekcji geometrycznych na nośność wyboczeniową stalowych powłok walcowych. Wkład Doktoranta w rozwój badań nad statecznością powłok i tym samym na rozwój dyscypliny inżynieria lądowa i transport oceniam pozytywnie i popieram Jego starania o uzyskanie stopnia naukowego doktora w tej dyscyplinie.

Wnioski z przeprowadzonych badań mimo swej ograniczoności są bardzo interesujące. Przykładowym wnioskiem jest brak wpływu wymiaru pojedynczego zagłębienia w kierunku południkowym i bardzo duży wpływ wymiaru tego zagłębienia w kierunku obwodowym na nośność wyboczeniową powłoki. Wpływ amplitudy zagłębienia na nośność wyboczeniową powłoki był spodziewany i Doktorant go potwierdził. Wykazał także w sposób nie budzący wątpliwości, że osiowosymetryczne imperfekcje obwodowe zdecydowanie najmocniej redukują nośność wyboczeniową powłoki.

Ciekawy wniosek został sformułowany przez Doktoranta po wykonaniu analiz GMNIA dla przypadku wielu lokalnych imperfekcji. Wystąpienie pojedynczej imperfekcji oznaczającej niską klasę jakości (C lub przypadek poza klasyfikacją) nie musi oznaczać wyraźnego spadku nośności w stosunku do tej samej liczby imperfekcji, ale w klasach B lub nawet A.

W tezie nr 3 Doktorant wskazuje na konieczność modyfikacji istniejących zapisów normowych dotyczących podziału na klasy jakości wykonania dokonywanego na podstawie pomiarów amplitud zagłębień wykonywanych z wykorzystaniem przymiarów zdefiniowanych w normie [N1]. Propozycja wykorzystania autorskiej metody wyboru przymiaru i pomiarów imperfekcji jest warta rozważenia, lecz wymaga dalszych badań potwierdzających jej efektywność.

Recenzowana rozprawa w całej rozciągłości potwierdza rozległą wiedzę Doktoranta w zakresie numerycznego modelowania nieliniowych zachowań powłok ze szczególnym uwzględnieniem zjawisk związanych ze statecznością i Jego przygotowanie do samodzielnej aktywności naukowej.

Wskazane w recenzji usterki i niedociągnięcia, w części o charakterze polemicznym, nie podważają generalnie pozytywnej oceny recenzowanej rozprawy. Doktorant wykonał bardzo wiele analiz numerycznych, które pozwoliły mu sformułować końcowe wnioski, potwierdzić realizację założonych celów pracy i uzasadnić postawione tezy w sposób przekonujący.

Reasumując stwierdzam, że praca Pana mgr. inż. Damiana Kozikowskiego, zatytułowana „Badanie stateczności ściskanych osiowo walcowych powłok stalowych z uwzględnieniem kształtu i liczby imperfekcji geometrycznych” spełnia warunki, o których mowa w Art. 187 Ustawy „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” z dnia 20 lipca 2018 r. (z późniejszymi zmianami) i wnoszę o dopuszczenie recenzowanej rozprawy do obrony publicznej.

