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

Zielona Góra 3.09.2018 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

Pani mgr inż. Moniki SIEDLECKIEJ

pt.

Nośność bipolarnie sprężonych bliskogałęziowych prętów ściskanych

Recenzja powstała na wniosek prof. dra hab. inż. Marka Iwańskiego, Dziekana Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Świętokrzyskiej. Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Zbigniew Kowal.

1. Charakterystyka ogólna rozprawy

Przedmiotem recenzowanej rozprawy jest analiza nośności prętów dwugałęziowych, których osie wstępnie równoległe, przylgowe, zostały mechanicznie odgięte w taki sposób, by nośność na ściskanie tak zmodyfikowanych prętów uległa znaczącemu zwiększeniu. Badane rozwiązanie zostało opatentowane, a rozprawa doktorska zawiera wieloaspektowe badania szczegółowe dotyczace takich prętów.

Praca liczy łącznie 187 stron, zawiera wykaz oznaczeń, streszczenia w języku polskim i angielskim, bibliografię, na którą złożyło się 123 pozycji źródłowych oraz 3 załączniki. Treść rozprawy została zredagowana w postaci dziewięciu rozdziałów. W rozdziale pierwszym liczącym 12 stron opisano konstrukcję prętów bliskogałęziowych, prętów sprężonych oraz przedstawiono ideę innowacyjnego, sprężonego bipolarnie pręta bliskogałęziowego. W rozdziale drugim liczącym 12 stron omówiono aktualny stan wiedzy z zakresu nośności prętów wielogałęziowych, w tym bliskogałęziowych, prętów sprężonych oraz prętów niepryzmatycznych. W rozdziale trzecim liczącym 3 strony zamieszczono cel rozprawy, podstawowe założenia, definicje i zakres pracy. W rozdziale tym sformułowano też tezy pracy. W rozdziale czwartym liczącym 22 strony przedstawiono rozważania teoretyczne dotyczące nośności na ściskanie pręta bliskogałęziowego sprężonego bipolarnie. Zaproponowano opis geometryczny wytypowanych do analiz prętów. Wyprowadzono wzory do szacowania naprężeń wstępnych, dopuszczalnej grubości elementu dystansowego, minimalnej długości strefy sprężenia oraz charakterystycznej i obliczeniowej nośności na ściskanie. W rozdziale piątym liczącym 22 strony rozwiązano zagadnienie stateczności pręta bliskogałęziowego sprężonego bipolarnie pod ściskającym obciążeniem osiowym przy zastosowaniu metody energetycznej z minimalizacją funkcjonału według Rayleigha-Ritza. W rozdziale szóstym liczącym 8 stron zamieszczono informacje dotyczące modelu i symulacji wykonanych metodą elementów skończonych z zakresu stanu wstępnego naprężenia oraz stateczności pręta bliskogałęziowego sprężonego bipolarnie. W rozdziale siódmym liczącym 4 strony zamieszczono wyniki wstępnych badań modelowych na elementach próbnych ze stopu aluminium. W rozdziale ósmym, najobszerniejszym, li-

czącym 48 stron omówiono przeprowadzone w środowisku programu Mathematica® v. 10.1 analizy symboliczne dotyczące prezentowanych w rozprawie zagadnień. Ponadto dokonano oceny nośności bipolarnie sprężonych prętów bliskogałęziowych na podstawie rezultatów otrzymanych z rozwiązań analitycznych – autorskich wzorów i kalkulacji wykonanych metodą energetyczną, symulacji metodą elementów skończonych oraz wstępnych badań modelowych. W rozdziale dziewiątym liczącym 4 strony podsumowano wyniki otrzymane w toku badań teoretycznych i wstępnych badań modelowych. Przedstawiono wnioski płynące z rozprawy oraz wskazano zagadnienia, którymi Doktorantka zamierza zająć się w przyszłości.

Rozprawa zawiera także dwustronicowe streszczenia w języku polskim i angielskim oraz wykaz bibliograficzny liczący 123 pozycji źródłowych.

Rozprawę kończą załączniki. W Załączniku 1 Doktorantka przedstawiła wyniki obliczeń naprężeń wstępnych wyznaczanych za pomocą wzorów analitycznych oraz zweryfikowanych za pomocą programu Autodesk® Robot™. W Załączniku 2 zamieszczono tabele z wynikami pomiarów w zgięciowej próbie wyznaczania modułu Younga płaskowników aluminiowych. Załącznik 3 zawiera procedurę szacowania siły krytycznej w dwugałęziowym pręcie sprężonym bipolarnie. Zbiór komend został napisany zgodnie ze składnią obowiązującą w środowisku pakietu Mathematica®.

2. Ocena tematu, celu i zakresu rozprawy

Temat podjętej pracy doktorskiej jest ważny nie tylko z praktycznego punktu widzenia (wzrost nośności prętów dwugałęziowych dzięki względnie prostemu zabiegowi technologicznemu, możliwość wzmocnienia istniejących prętów dwugałęziowych), ale także ze względów poznawczych. Pełne rozpoznanie wszystkich aspektów związanych z nośnością bliskogałęziowych prętów stalowych wzmocnionych przez bipolarne sprężenie jest przedsięwzięciem w pełni dysertabilnym.

Przedmiotem rozprawy są analizy nośności osiowo ściskanych, sprężonych bipolarnie prętów bliskogałęziowych. Celem tych analiz było:

- poznanie fizycznej podstawy nośności na ściskanie pod wpływem obciążenia działającego osiowo;
- rozpoznanie wpływu długości strefy sprężenia i grubości elementu dystansowego na nośność i stateczność;
- oszacowanie wpływu geometrii przekroju i smukłości na nośność.

Doktorantka w swych rozważaniach przyjęła następujące założenia:

1. Rozważania ograniczyła do analizy nośności sprężonego bipolarnie pręta bliskogałęziowego w obszarze deformacji czysto sprężystych.
2. Założyła, że pręty są wykonane z materiał jednorodnego, izotropowego, liniowo-sprężystego, podlegającego prawu Hooke'a.
3. Analizy prowadziła dla płaskowników aluminiowych i grubościennych profili stalowych – zarówno gorącowalcowanych, jak i formowanych na zimno.
4. Założyła ponadto, że przekroje prętów są sztywne, ulegają odkształceniom postaciowym, natomiast nie ulegają odkształceniom dystorsyjnym – teoria belki Timoshenko.
5. Przedmiotem szczegółowych rozważań były pręty bliskogałęziowe o przekrojach bisymetrycznych.
6. Założyła, że obciążenie elementu ma charakter statyczny, a pręt będzie obciążony wyłącznie osiową siłą ściskającą. Nie uwzględniła zmian temperatury.
7. Przyjęła symetryczne względem środka rozpiętości warunki brzegowe. Rozpatrywała jeden przypadek podparcia pręta: pręt przegubowo-przegubowy.

W ocenianej rozprawie Doktorantka sformułowała następujące tezy:

1. Celowe wprowadzenie bipolarnego sprężenia od wewnątrz bliźniaczo złożonych prętów ściskanych zwiększa ich nośność na ściskanie, zmienia rozkład naprężeń w konstrukcji i wpływa na wartości własne.

2. Szczególnie efektywne zwiększenie nośności krytycznej można uzyskać w przypadku wstępnego sprężenia prętów bliskogałęziowych o przekroju symetrycznym, poprzez wprowadzenie samozrównoważonych bipolarnych naprężeń.

3. Zwiększenie nośności bliskogałęziowego pręta sprężonego bipolarnie zależy od grubości elementu dystansowego i długości strefy sprężenia.

Dysertacja z przytoczonymi wyżej celem, zakresem, założeniami i tezami spełnia warunki, o których mowa w *Ustawie o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* z dnia 14.03.2003 r. (Dz.U. 2003 Nr 65 poz. 595, z późniejszymi zmianami).

Zgodnie z brzmieniem Art. 13.1 Ustawy „Rozprawa doktorska (...) powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego lub oryginalne dokonanie artystyczne oraz wykazywać ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie naukowej lub artystycznej oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej."

Uzasadnienie spełnienia tych wymagań jest przedmiotem niniejszej recenzji.

3. Uwagi szczegółowe i komentarze

Drobne błędy o charakterze edytorskim, które miały prawo zdarzyć się w tak obszernym opracowaniu zostały wyspecyfikowane w osobnym dokumencie i przesłane Doktorantce. W tym rozdziale zamieszczono uwagi i komentarze z elementami oceny. Zredagowano je w porządku chronologicznym odwołując się do konkretnych fragmentów rozprawy.

W rozdziale 1 doktorantka sugeruje (str. 21, $w_{5\text{-}1}$[1]), że zwiększenie nośności konstrukcji następuje „poprzez wprowadzenie energii bipolarnej". Ważniejsza jest, moim zdaniem, zmiana geometrii powodująca wzrost momentu bezwładności J w strefie środkowej pręta.

Przegląd stanu wiedzy dokonany na str. 27÷32 świadczy o dobrym rozpoznaniu tematu przez Doktorantkę.

Mam wątpliwości co do poprawności wzoru (2.6) na str. 29. Jest to wzór (2.67) ze str. 143 monografii Timoszenki. Po zastosowaniu oznaczeń ze str. 142 otrzymamy

$$P_{cr} = \frac{EA}{2\left(1-\frac{EA}{S_v}\right)}\left(1 \pm \sqrt{1-\frac{4N_e}{EA}\left(1-\frac{EA}{S_v}\right)}\right),$$

podczas gdy u Doktorantki wzór ten przyjmuje postać:

$$P_{cr} = \frac{EA}{2\left(1-\frac{EA}{S_v}\right)}\left(1 \pm \sqrt{1-\frac{4N_e}{S_v}\left(1-\frac{EA}{S_v}\right)}\right)$$

W rozdziale 4 pracy zdefiniowano współczynniki korekcyjne κ_1 i κ_2. Wprowadzono je do wzorów na naprężenia po to, by dokładniej je obliczać. Oba zależą od stosunku $n=b/L$. Zalecenie by stosować κ_1 z powodu prostej postaci wzoru (4.24) jest niezrozumiałe. Decydować powinna dokładność wzoru końcowego, a ten ze współczynnikiem κ_2 jest zapewne dokładniejszy.

[1] w_i oznacza i-ty wiersz liczony od dołu strony, w^i oznacza i-ty wiersz liczony od góry strony

Na stronie 55 po raz pierwszy pojawia się termin nie stosowany w normie: f_y - minimalna granica plastyczności. Terminem tym Doktorantka posługuje się wielokrotnie. Norma symbolem f_y określa granicę plastyczności bez słowa „minimalna" i definiuje tę wielkość jako kwantyl 5%. (por. PN-EN 1990).

Symbol f_y, choć tak istotny, nie pojawił się w zestawieniu oznaczeń.

We wzorach (4.29) i konsekwentnie (4.30) powinny pojawić się wyprowadzone wcześniej współczynniki κ_i. We wzorze (4.34) i kolejnych na tej stronie, także zabrakło współczynnika κ_i.

W obliczeniach prezentowanych na stronie 60 naprężenia są obliczane bez uwzględnienia współczynników κ_i.

Rozdział 5 rozprawy, dotyczący analizy stateczności prętów sprężonych bipolarnie, jest niewątpliwie najistotniejszy w ocenianej rozprawie.

Prezentowane na str. 66 wywody są nieprecyzyjne. Doktorantka używa pojęcia „wartość własna" nie nadając mu konkretnej w tej analizie interpretacji: jest to wartość obciążenia, przy którym pręt ściskany przyjmie konfigurację inną od prostoliniowej, początkowej, tzn. wyboczy się. Termin „obciążenie krytyczne" byłby zdecydowanie trafniejszy.

Wzór (5.9) podany przez Doktorantkę na str. 68 jest prawdziwy jedynie w przypadku pręta przegubowo-przegubowego, co warto podkreślić.

Energia potencjalna związana ze stanem wstępnego napięcia (wzory (5.15) i (5.16)) jest bez znaczenia w dalszych rozważaniach związanych ze statecznością. Widać to wyraźnie na podstawie pełnego wyrażenia na całkowita energię potencjalną ustroju (wz. (5.41)). Człony dotyczące wstępnego sprężenia znikną w fazie analizy stateczności: pochodna tych członów po uogólnionym parametrze a_i będzie równa zeru.

W świetle tego spostrzeżenia budzi wątpliwość teza, że nośność na ściskanie zależy od „samozrównoważonych bipolarnych naprężeń". Siła krytyczna zależy od wartości wygięcia osi obu gałęzi, a nie od stanu naprężeń samozrównoważonych.

Na podkreślenie zasługują dociekania Doktorantki dotyczące sztywności postaciowej S_v prętów bliskogałęziowych sprężonych bipolarnie. Autorska propozycja przedstawiona na stronach 71÷74 rozdziału 5 zasługuje na uznanie. Niestety trudno ocenić, czy propozycja ta przewyższa propozycje innych autorów przywołanych w rozprawie.

Prezentowane w rozdziale 6 numeryczne podejście do problemu stateczności świadczy o dobrym opanowaniu przez Doktorantkę systemu ABAQUS/CAE. Szkoda, że prezentowany tu przykład nie koresponduje z przykładem rozwiązanym na str. 48 (Przykład 4.1).

W rozdziale 7 Doktorantka opisuje zrealizowane przez Nią badania modelowe. Sposób podparcia prętów pokazany na rysunku 7.1 (str. 96) sugeruje, że badano przypadek wyboczenia w przeciwnym kierunku. Czy nie zaszła pomyłka w schemacie badania prętów?

Opis procedury badawczej (str. 97) jest bardzo lakoniczny (1/3 strony). Jak wyznaczano siłę krytyczną w eksperymencie? Z opisu wynika, że nie mierzono przemieszczeń. Jakie kryterium przyjęto dla osiągnięcia siły krytycznej? Czy stosowano metodę Southwella?

Wyznaczenie modułu Younga (rozdział 7.2) w próbie zgięciowej jest względnie prostą procedurą badawczą. Opisano ją bardzo precyzyjnie zamieszczając zdjęcia stanowiska i kartę badań (Załącznik 2). Wyniki pokazane w Tabelach na str. 182 i 183 budzą pewne zastrzeżenia. Nie podano odchyleń standardowych i współczynnika zmienności.

Karty pomiarowe przedstawione w Zał. 2 (str. 180 i kolejne) skłaniają do kilku uwag. Czy wartość E=114416,9 MPa (Tab. Z2.3 str. 181) też była uwzględniona w obliczeniu średniej? Tę wartość należało odrzucić jako zbyt odbiegającą od średniej. Analogicznie w przypadku elementu

próbnego nr 2. Dla bardzo małej siły P otrzymano wartość aż 176964,8 MPa (Tab. Z2.6). Także tę wartość należało pominąć. Wykres $P(f)$ byłby pomocny w takim wyborze. Odcinek prostoliniowy powinien być podstawą określenia modułu Younga E.

Najobszerniejszy rozdział 8 zawiera liczne przykłady rozwiązywane analitycznie i numerycznie. W rozwiązaniach analitycznych Doktorantka posłużyła się procedurami utworzonymi w systemie do obliczeń symbolicznych Mathematica®. Listę utworzonych przez siebie procedur (zestawów komend) prezentuje na str. 99.

W analizach numerycznych, które służyły do porównań wykorzystała programy Robot™ Structural Analysis Professional oraz ABAQUS/CAE.

Doktorantka nie wyjaśnia jak obliczała współczynniki n dla ceowników (Tab. 8.1 str. 101). W przywołanych tablicach Boguckiego i Żyburtowicza wartości tych współczynników nie są podawane.

Przywołany na str. 101 wzór (2.5) jest wzorem Haringxa nie Kowala (por. str. 29).

Tu zabrakło informacji z jakiego wzoru obliczano sztywność S_v potrzebną we wzorze Engessera. Jeśli ze wzoru (2.9) to jak przyjmowano wartość kąta θ? W przypadku pręta bipolarnie sprężonego jest to wielkość zmienna.

Analiza porównawcza przedstawiona w tabeli 8.2 (str. 102) skłania do zadania pytania: dlaczego w przypadku 2×UPE200 różnica jest tak duża? Podobna tendencja wystąpiła w przypadku wyników prezentowanych w Tab. 8.3.

Przywołany na stronach 103 i 104 wzór (5.41) nie opisuje J_{sr}. Jak obliczano tę wielkość?

Wnioski przytoczone na stronie 117 dotyczą naprężeń obliczanych dla stanu wstępnego sprężenia. Zgodność rozwiązania analitycznego z wynikami uzyskanymi MES dla tego prostego przypadku jest warta podkreślenia.

Rozdział 8.2.4 to ważny fragment części aplikacyjnej rozprawy. Dotyczy porównania sił krytycznych otrzymywanych metodą energetyczną z symulacjami MES wykonanymi programem ABAQUS /CAE.

Doktorantka operuje terminem „nośności krytycznej". Poprawniej byłoby określać otrzymane wartości „siłą krytyczną" lub „siłą wyboczeniową". „Nośność krytyczna" to termin o dużo szerszym znaczeniu.

Rys. 8.11 (str. 119) dotyczy przypadku kształtowników UPE120. Porównanie rozwiązań metodami ME i MES dla poszczególnych przypadków elementów dystansowych wskazuje na bardzo duże różnice. Szkoda, że Doktorantka nie dokonała takiego porównania prezentując wyniki ME i MES dla wybranych przypadków t_d na wspólnym wykresie tak jak to zrobiła dla kształtowników C120×50×5 na rys. 8.17 i 8.18.

Wprowadzenie sprężenia z dystansem 4 i 8 mm skutkuje niższą wartością siły krytycznej (por. rys. 8.11a) od przypadku $t_d^z = 0$ (przylgowy, z gęstymi łącznikami). Te wyniki stawiają pod znakiem zapytania poprawność rozwiązania ME.

Rys. 8.13 (str. 121) dotyczy przypadku kształtowników 2×UPE200. Tylko w przypadku tego kształtownika nie uwzględniono długości strefy sprężania L_2=900 mm. Dlaczego?

Porównanie przedstawione na stronie 125 (tab. 8.11) dotyczy pręta przylgowego z dużym rozstawem łączników. Mimo to w kilku przypadkach pojawia się ujemny wzrost dla najniższych wartości rozwarcia (4 mm). Jak to możliwe?

Wzrost siły krytycznej w stosunku do przypadku pręta przylgowego jest znaczny i przekracza nawet 50%.

W zestawieniu pokazanym w tab. 8.12 (str. 126), dotyczącym analizy MES, wszystkie wartości przyrostów siły krytycznej są dodatnie. Maksymalny wzrost siły krytycznej wyniósł 59,2% i jest imponujący. Dlaczego nie uwzględniono przypadku L_2=900 mm?

Tabela 8.13 (str. 127) zawiera istotne dla rozprawy porównanie. Zaskakuje przypadek 2×UPE200. Tylko tu ME daje większe wyniki niż MES. Różnice rzędu kilkunastu procent (max 16,2 %) trochę niepokoją.

Przedstawione na rys. 8.17 i 8.18 (str. 128) porównanie sił krytycznych dotyczy tylko jednego kształtownika, a mianowicie przekroju 2×C120×50×5 i różnych rozstawów t_d. Analizowano wzrost siły krytycznej w stosunku do przypadku $t_d^d = 0$. Ciekawsze byłoby porównanie z przypadkiem $t_d^z = 0$ (pręt przylgowy z gęstymi łącznikami) dla kształtownika UPE120.

Na str. 130 Doktorantka pisze, że różnice między wynikami otrzymanymi ME i MES dla zakresu sprężenia L_2=1200÷2700 mm są rzędu 3,5 do 8%.

Tab. 8.12 na str. 126 pokazuje, że różnice są dużo większe. Dla pominiętego w tabeli przypadku L_2=900 mm sięgają 20% (por. rys. 8.11). Gdzie tkwi przyczyna tak dużych różnic?

Rys. 8.20 (str. 131) pokazuje, że wprowadzenie sprężenia z rozstawem t_d =4 mm skutkowało wzrostem siły krytycznej w stosunku do N_{kr}^d, ale spadkiem w stosunku do N_{kr}^z (przypadek gęstych łączników). Jak to wyjaśnić?

Na str. 132 Doktorantka pisze o wzroście nośności rzędu 5÷15 % dla L_2 z przedziału $0{,}5L$÷$0{,}75L$. Wzrost ten dotyczy N_{kr}^d. Porównanie z N_{kr}^z pokazuje spadek siły krytycznej. Jaka jest tego przyczyna?

Dla przypadku dystansu t_d=8 mm wzrost nośności dotyczy N_{kr}^d i fragmentami N_{kr}^z.

Rys. 8.22 dla t_d =12 mm i t_d =16 mm pozostawiono bez komentarza. Dlaczego nie pokazano wykresu dla przypadku t_d =20 mm?

Na osi pionowej rys. 8.27 (str. 137) jest iloraz siły bieżącej do siły krytycznej, a nie siła krytyczna. Ścieżka równowagi dla 2×C120×50×5, też powinna się zaczynać od punktu (0,6). Skąd to przesunięcie?

Na str. 139 Doktorantka analizuje siły krytyczne dla pręta bliskogałęziowego z kształtowników o przekroju prostokątnym. Pisze o dużej różnicy (17,5%) między siłą krytyczną otrzymaną ze wzoru Kowala i wynikiem otrzymanym MES, ale pozostawia to bez komentarza. Tak duża różnica powinna skłonić Doktorantkę do pogłębionej analizy przyczyn takiego stanu rzeczy.

Szkoda, że nie pokazano formy wyboczenia otrzymanej MES.

Na str. 140 Doktorantka wyjaśnia, że smukłość globalną λ_g szacowano na podstawie uśrednionego momentu J_{sr} bezwładności wg wzoru (4.58). W pracy nie ma takiego wzoru. Jak obliczano J_{sr}? Wzorem (5.37a)(str. 74)?

Analizowany pręt przylgowy ma bardzo dużą smukłość globalną λ_g =522,2 (por. Tab. 8.17 str. 140). Czy świadomie dobrano taki przykład?

Przedstawione na str. 140 porównanie naprężeń wstępnych za pomocą wzorów (4.14) i (4.26) z wartościami otrzymanymi MES z pomocą programu Robot Structural Analysis (RSA) wypada bardzo dobrze. Nie wyjaśniono, który współczynnik κ_i zastosowano we wzorze (4.26).

W p. 8.4.4 (str. 142 i kolejne) wyznaczano MES i ME siły krytyczne pręta bipolarnie sprężonego złożonego z dwóch płaskowników. Wyniki pokazane na wykresach na rys. 8.30a i b wykazują bardzo duże różnice. Przykładowo dla t_d=4 mm i L_2=800 mm, MES daje wynik 155 N (na osi pionowej wykresu błędnie wskazano [kN]) natomiast ME - 67 N (wartości przybliżone odczytane z wykresów). Różnica ponad 100 %! Jak ją wyjaśnić?

Przebieg wykresów pokazanych na rys. 8.30 wskazuje też na jakościową różnicę. Zaskakuje ponadto fakt ewidentnego ekstremum dla t_d=4 bez względu na wymiar strefy sprężenia. Wynikałoby stąd, że nie ma potrzeby rozginania prętów na większe dystanse. Szkoda, że tego nie potwierdzono eksperymentalnie badając pręty o innym t_d.

Formy wyboczenia otrzymane MES (dwie półfale na długości) i pokazane na rys. 8.31 sugerują, że w przypadkach t_d =12 i 16 mm, wartość siły krytycznej powinna wzrosnąć znacząco, a z wykresu na rys. 8.30b wynika, że spada w stosunku do przypadku t_d =4 mm. Jak można to wyjaśnić?

Staranne skomentowanie wyników prezentowanych na rys. 8.30 i 8.32 jest kluczowe dla oceny rozprawy. Przyczyny rozbieżności wyników wskazane na str. 145 i 146 są tylko hipotetyczne.

W prezentowanym na rys. 8.32 (str. 145) porównaniu wyników zaskakuje fakt osiągnięcia najwyższych sił krytycznych w eksperymencie. To wbrew powszechnemu trendowi. Nieuniknione imperfekcje występujące w realnym modelu zawsze prowadzą do niższych sił krytycznych.

Wnioski zamieszczone na str. 146 wskazują, że mimo zrealizowania przez Doktorantkę obszernego programu badań ciągle pozostają do zbadania wybrane problemy jak ten dotyczący zaskakujących wyników dla pręta dwugałęziowego złożonego z płaskowników.

Szkoda, że w tym miejscu albo w podsumowaniu przedstawionym na str. 147÷149 Doktorantka nie eksponuje wartości możliwych wzrostów siły krytycznej osiąganych dzięki wprowadzeniu sprężenia bipolarnego.

4. Ocena pracy

Temat, którym zajęła się Doktorantka jest niewątpliwie istotny zarówno ze względów poznawczych jak i praktycznych. Wzmacnianie przylgowych prętów dwugałęziowych poprzez mechaniczne rozchylenie obu gałęzi jest zabiegiem wartym polecenia i jak pokazała Doktorantka, w określonych przypadkach prowadzi do wzmocnienia w stosunku do przypadku pręta przylgowego z rzadkim rozstawem łączników. Zaskakuje nieco względnie mały wzrost nośności lub wręcz jej spadek w stosunku do przypadku pręta przylgowego z gęstym rozstawem łączników. Sytuacja ta kłócąca się z intuicją inżynierską wymagałaby dodatkowych badań.

Dobrze udokumentowane badania analityczne, numeryczne i doświadczalne pręta dwugałęziowego złożonego z płaskowników aluminiowych stanowią cenne uzupełnienie głównego nurtu pracy. Otrzymane wyniki tych badań także budzą pewne wątpliwości. Wykresy na rys. 8.30 (str. 143) pokazują, że największy wzrost siły krytycznej otrzymuje się dla elementu dystansowego grubości 4 mm. Zwiększanie rozchylenia gałęzi skutkuje spadkiem siły krytycznej i to bez względu na długość strefy sprężenia. Próba wyjaśnienia tego zaskakującego trendu przez Doktorantkę nie daje pełnej odpowiedzi na powstałe wątpliwości. Doktorantka przyznaje (str. 144), że rzecz ta wymaga dalszych analiz.

Trzecia z postawionych w rozprawie tez nie budzi zastrzeżeń. Została w sposób nie budzący wątpliwości dowiedziona. W pierwszej i drugiej tezie Doktorantka eksponuje wpływ sprężenia

i samozrównoważonych bipolarnych naprężeń na wartość siły krytycznej prętów bliskogałęziowych. Uważna analiza wyrażenia (5.39) na całkowitą energię potencjalną pokazuje, że siła krytyczna, którą otrzymuje się różniczkując to wyrażenie po a_i nie zależy od wstępnych naprężeń, gdyż oba człony z siłą sprężającą P_0 muszą zniknąć. O wzroście wartości siły krytycznej decyduje wygięcie obu gałęzi i wzrost momentu bezwładności w części środkowej pręta dwugałęziowego zgodnie ze wzorami (4.3b) i (4.3c), a nie wartości samozrównoważonych naprężeń od sprężenia bipolarnego.

Nie ulega wątpliwości, że recenzowana rozprawa w całej rozciągłości potwierdza rozległą wiedzę Doktorantki w zakresie analitycznych, numerycznych i eksperymentalnych badań wytrzymałości prętów dwugałęziowych na ściskanie. Rozprawa ta świadczy też o przygotowaniu Doktorantki do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w wymienionych obszarach badawczych, a na szczególne podkreślenie zasługuje opanowanie przez Nią cennego narzędzia jakim jest system Mathematica® służący do obliczeń symbolicznych. Na pewno wykorzysta go w przyszłości przygotowując kolejne publikacje naukowe.

5. Wniosek końcowy

Podniesione w recenzji wątpliwości i zastrzeżenia nie umniejszają generalnie pozytywnej oceny recenzowanej rozprawy. Doktorantka wykazała się benedyktyńską pracowitością. Zakres wykonanych obliczeń analitycznych oraz symulacji numerycznych budzi uznanie. Lekki niedosyt pozostawia zakres i sposób realizacji badań eksperymentalnych. Cel sformułowany na wstępie dysertacji został osiągnięty, zaplanowany zakres zrealizowany, a tezy sformułowane na wstępie uzasadnione, choć w sposób nie do końca przekonywujący.

Reasumując stwierdzam, że praca Pani mgr inż. Moniki Siedleckiej, zatytułowana „Nośność bipolarnie sprężonych bliskogałęziowych prętów ściskanych" spełnia warunki, o których mowa w Art. 13 „Ustawy o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki" z dnia 14.03.2003 r. (z późniejszymi zmianami) i wnoszę o dopuszczenie recenzowanej rozprawy do obrony publicznej.