

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Moniki SIEDLECKIEJ

pod tytułem:

***„Nośność bipolarnie sprężonych bliskogłęziowych prętów ściskanych”***

promotor: prof. zw. dr hab. inż. Zbigniew Kowal, dr h.c.

promotor pomocniczy: dr inż. Leszek Chodor

**1. Podstawa opracowania recenzji**

Podstawę opracowania stanowi uchwała Rady Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Świętokrzyskiej z dnia 4 lipca 2018 r, przekazana w formie pisma Dziekana Wydziału Budownictwa i Architektury, prof. dr hab. inż. Marka Iwańskiego, nr BD-149/18 z dnia 20.07.2018 roku.

**2. Tematyka i cel rozprawy**

Pręty bliskogłęziowe są to pręty złożone z dwóch lub więcej kształtowników, które albo bezpośrednio do siebie przylegają, albo są rozsunięte na odległość wynikającą z grubości przekładek dystansowych lub przewiązek. Pręty te były swego czasu powszechnie stosowane w budownictwie konstrukcji stalowych o czym Autorka wspomina w swojej pracy. Należy jednak zwrócić uwagę na ich istotną wadę jaką była niska odporność na korozję elektrochemiczną. Na powierzchniach kształtowników zarówno bezpośrednio przylegających do siebie jak i oddalonych na grubość przekładki, w sprzyjających warunkach ciepłno-wilgotnościowych bardzo szybko pojawiała się rdza. Ponadto nieduża odległość pomiędzy elementami pręta złożonego uniemożliwiała przeprowadzenie renowacji skorodowanej powłoki malarskich. Nawet w literaturze przedmiotu pojawiło się zalecenie, aby tego typu prętów nie stosować w nowo

projektowanych konstrukcjach. Jednakże rozwój technik ochrony antykorozyjnej, a w szczególności powszechne wręcz stosowanie cynkowania na gorąco spowodowało, iż problem ten przestał być na dzień dzisiejszy znaczącym. Co więcej, szereg współczesnych firm budujących z kształtowników giętych na zimno powszechnie stosuje w swoich systemowych konstrukcjach właśnie przedmiotowe pręty bliskogałęziowe łączone na śruby, zarówno przyłgowo jak i z przekładkami lub przewiązkami. Kształtowniki stanowiące elementy składowe prętów złożonych są cynkowane przed złożeniem ich w jeden element. Nadal jednak pozostał nierozwiązany problem weryfikacji wymogu normowego odnoszącego się do rozstawu łączników na długości pręta złożonego bliskogałęziowo. Wciąż obowiązuje normowy warunek rozstawu łączników  $L \leq 15i_{min}$ , pozwalający na traktowanie pręta złożonego jako elementu jednolitego. Warunek ten był sformułowany jeszcze w czasach konstrukcji nitowanych i od tego czasu nie został zweryfikowany. Tak więc podjęcie tematu mającego na celu kształtowanie prętów złożonych z zastosowaniem mniejszej liczby łączników na długości pręta jest jak najbardziej wskazane i potrzebne z praktycznego punktu widzenia. Na uwagę zasługuje również fakt wykorzystania, w proponowanym przez Autorkę rozwiązaniu, nieuniknionych wygięć prętów, których dopuszczalne wartości, czyli tolerancje wymiarowe, są określone przez normy wykonania i odbioru konstrukcji stalowych. Sformułowane w pkt. 3.1. cele pracy doktorskiej dotyczą rozpoznania wpływu sprężania bipolarnego, czyli sprężania przez przeciwstawne przemieszczenie bliźniaczych elementów składowych pręta złożonego, na jego nośność.

Następujące trzy tezy rozprawy doktorskiej (str.41):

- 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 samorzównoważonych bipolarnych naprężeń.*
- 3. Zwiększenie nośności bliskogałęziowego pręta sprężonego bipolarnie zależy od grubości elementu dystansowego i długości strefy sprężenia.*

zostały sformułowane poprawnie, chociaż wyrażenie w tezie nr 1 „...wprowadzenie ....sprężenia od wewnątrz...” wymagałoby wyjaśnienia przez autorkę rozprawy. Element dystansowy jest umieszczony pomiędzy prętami (czyli wewnątrz), ale w pracy brakuje informacji nt. sposobu wprowadzania sprężenia.

### 3. Analiza treści i ocena rozprawy

Przedmiotowa rozprawa doktorska ma charakter doświadczalno-analityczny. Dotyczy możliwości praktycznego wykorzystania sprężania poprzez przeciwstawne (bipolarne) przemieszczenie bliźniaczych elementów pręta złożonego. W pracy można wyróżnić trzy zasadnicze części. W części pierwszej, mającej charakter kompilacyjny (rozdziały 1÷3) o łącznej objętości około 20% całości pracy, autorka zwięźle i przejrzysto przedstawiła:

- definicje i informacje na temat prętów bliskogałęziowych oraz metod sprężania prętów, w tym sprężania bipolarnego (rozdział 1),
- podstawy teoretyczne dotyczące zagadnień nośności i stateczności ściskanych prętów wielogałęziowych, w tym prętów bliskogałęziowych i prętów niepryzmatycznych (rozdziały 2.1÷2.3),
- stan wiedzy na temat metod sprężania oraz wzmacniania przez sprężenie konstrukcji metalowych (rozdziały 2.4 i 2.5).

Do drugiej części pracy, dotyczącej autorskich badań i analiz należą rozdziały 4÷8, stanowiące około 78% objętości całej pracy. Ta część rozprawy charakteryzuje się aspektami poznawczo-naukowymi i zawiera szereg elementów oryginalnych, stanowiących własny dorobek naukowy Autorki. Należą do nich:

- opracowanie innowacyjnego rozwiązania konstrukcyjnego pręta sprężonego bipolarnie, polegające na zastosowaniu elementu dystansowego wywołującego sprężenie poprzez przeciwstawne przemieszczenie bliźniaczych elementów składowych pręta złożonego,
- wyprowadzenie wzorów do szacowania naprężeń wstępnych, dopuszczalnej grubości elementu dystansowego, minimalnej długości strefy sprężenia oraz charakterystycznej i obliczeniowej nośności na ściskanie,
- wyprowadzenie zależności opisującej w strefie sprężenia sztywność postaciową pręta bliskogałęziowego sprężonego bipolarnie, z uwzględnieniem amplifikacji przemieszczeń oraz wskaźnika imperfekcji wstępnie wygiętego pręta,

- weryfikacja opracowanych zależności metodą numeryczną (poprzez opracowanie odpowiedniego modelu w programach Autodesk® Robot™ Structural Analysis Professional 2010 oraz Abaqus), metodą energetyczną oraz eksperymentalną,
- opracowanie algorytmów do obliczeń symbolicznych oraz wzorów aproksymacyjnych do szacowania naprężeń wstępnych wprowadzanych w procesie bipolarnego sprężania pręta bliskogałęziowego, współczynników redukcyjnych do korekty naprężeń wstępnych, granicznej długości strefy sprężania oraz nośności krytycznej pręta bliskogałęziowego sprężonego bipolarnie,
- przeprowadzenie analiz parametrycznych przykładowego pręta złożonego przyłgowo z sześciu rodzajów przekrojów kształowników oraz prezentacja wyników obliczeń w formie wykresów i / lub tabelarycznie.

Ponadto na uwagę zasługuje zaproponowana klasyfikacja sprężonych bipolarnie prętów bliskogałęziowych oraz opracowane przykłady obliczeniowe pozwalające na jednoznaczną interpretację wyprowadzonych zależności.

Trzecią część rozprawy stanowi ostatni rozdział 9, zawierający zestawienie istotnych wniosków wynikających z przeprowadzonych przez Autorkę analiz.

Tekst rozprawy (135 stron) uzupełniają spis literatury (123 pozycje) oraz trzy załączniki o łącznej objętości 27 stron, zawierające tabelaryczne zestawienia wyników obliczeń naprężeń wstępnych  $\sigma_0$  dla wszystkich analizowanych rodzajów przekrojów poprzecznych, wyniki pomiarów modułu Younga płaskowników aluminiowych oraz algorytm szacowania nośności krytycznej sprężonego bipolarnie pręta bliskogałęziowego opracowany w środowisku Mathematica®.

Wyniki przeprowadzonych badań teoretycznych i analiz stanowią istotny wkład w rozszerzenie wiedzy na temat wpływu sprężenia bipolarnego na nośność bliskogałęziowych prętów złożonych.

Autorka rozprawy wykazała się umiejętnością jasnego formułowania i analizowania problemu badawczego, jak również znajomością literatury z zakresu stateczności ściskanych prętów złożonych.

Uważam że przyjęte cele pracy zostały osiągnięte, a postawione tezy potwierdzone wynikami przeprowadzonych analiz.

#### 4. Uwagi krytyczne

Analizując przedmiotową rozprawę doktorską nasunęły mi się uwagi krytyczne i dyskusyjne o charakterze merytorycznym i redakcyjnym, wymagające skomentowania przez Autorkę w czasie publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

##### A. Uwagi merytoryczne

1. W przeprowadzonych w rozdziale 8 analizach parametrycznych Autorka rozprawy porównuje wyniki autorskich oszacowań wartości naprężeń wstępnych z wynikami uzyskanymi metodą elementów skończonych przy wykorzystaniu programu Autodesk® Robot™ Structural Analysis Professional 2010. Sam model jest bardzo uproszczony (ogranicza się do jednej gałęzi pręta złożonego) co oczywiście nie oznacza, że jest niepoprawny. Autorka opracowała również w programie Abaqus bardziej zaawansowane modele numeryczne stalowych i aluminiowych prętów złożonych. W modelach tych wykorzystuje dwa rodzaje elementów kontaktu oraz specjalne elementy pozwalające modelować warunki podparcia. Modele opracowane w programie Abaqus były wykorzystane do wyznaczenia nośności krytycznej prętów złożonych oraz, zgodnie z informacją podaną na str. 94, piąty wiersz od góry, że w programie Abaqus „przeprowadzono analizy statyczne, których celem było uzyskania wyników naprężeń wstępnych oraz przemieszczeń...”. Wobec powyższego nasuwa się pytanie dlaczego w analizach parametrycznych opisanych w rozdziale 8 wykorzystywane są wyniki z uproszczonego modelu opracowanego w programie ARSA zamiast wyników uzyskanych w programie Abaqus.
2. Niestety informacje na temat budowy modelu numerycznego w obydwu wyżej wymienionych programach są bardzo ograniczone. Nie wiadomo w jaki sposób w programie Abaqus modelowane było sprężenie.
3. W pkt.4.4.3. podano zależności na wartości współczynników  $\kappa_1$  i  $\kappa_2$  służących do korekty naprężeń normalnych, jednak brakuje informacji czy Autorka sama wyprowadziła wzory na powyższe współczynniki, czy też zostały one przyjęte na podstawie literatury, a jeśli, to jakiej.
4. Do wyprowadzenia wzoru (4.30) potrzebna jest również zależność (4.11) a nie tylko wymienione w tekście (4.10) i (4.28).

5. Jak należy rozumieć sformułowanie: "...utrzymać wierność wyniku do oszacowania wzorem (4.35)..." na stronie 57?
6. Przedstawiony w rozdziale 7 opis badań eksperymentalnych jest zbyt lakoniczny. Brakuje informacji w jaki sposób sprzężane były pręty oraz w jaki sposób modelowano obciążenie.

## B. Uwagi redakcyjne

Praca jest dobrze napisana i zilustrowana, rysunki i wykresy są bardzo staranne i czytelne. Poniżej wymieniono drobne usterki gramatyczne i edytorskie:

- str.19, 3-ci wiersz od dołu: literówka w słowie *jedynymi*,
- pkt. 1.2.: dwa rysunki mają ten sam numer 1.13, a odwołania w tekście do nieistniejącego rys. 1.13.c) sugerują, że jest to jeden, błędnie rozdzielony rysunek,
- str.33, 1-wszy wiersz od góry: powinno być odwołanie do normy [120], a nie do [12],
- str.47, 5-ty wiersz od góry: powinno być odwołanie do wzoru (4.6) a nie do (4.5),
- str.47, 2-gi wiersz od dołu: powinno być odwołanie do wzoru (4.10) a nie do (4.9),
- str.53, w wynikach obliczeń przykładu 4 brakuje znaku  $\pm$ ,
- str.60, w przykładzie 4.7 nie zaznaczono w jakim miejscu pręta znajduje się najbardziej wyężony przekrój poprzeczny,
- str.61, 1-wszy wiersz od dołu: zamiast odwołania do wzoru (4.40) powinno być (4.37),
- str.73, brak opisu oznaczenia  $J_d$  ( w spisie oznaczeń na początku pracy też go nie ma),
- str.87, 1-wszy wiersz od góry: błędna końcówka słowa *podstawowe*,
- rozdział 7: błędna numeracja rysunków,
- str.101, 3-ci wiersz od dołu: błędne odwołanie do wzoru (2.5), podobnie na str. 139 (1-wszy wiersz od góry)
- str.107, 1-wszy wiersz od góry: błędne odwołanie do wzoru (4.32), podobnie na str. 109,
- str.107, poprawny skrót nazwy programu Autodesk® Robot™ Structural Analysis Professional to ARSA a nie RSA,

- str.111, 114 i 117, w tytule podpunktu słowo „*równoramienne*” jest błędne, może powinno być „*gięte na zimno*” ??

## 5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska ma charakter analityczny i aplikacyjny. Autorka podjęła się rozwiązania aktualnego zagadnienia naukowego, dotyczącego uzupełnienia wiedzy w zakresie wyznaczania nośności krytycznej prętów złożonych bipolarnie oraz zakresu stosowania tej innowacyjnej metody do zwiększania nośności prętów złożonych.

Z zadania tego Autorka wywiązała się dobrze, gdyż jej praca zakończona jest bardzo istotnymi z punktu widzenia praktyki inżynierskiej wnioskami.

Z treści rozprawy wynika, że Autorka:

- właściwie sprecyzowała cel i przyjęte tezy rozprawy oraz konsekwentnie ten cel zrealizowała,
- dobrze zna od strony analitycznej ogół aktualnych zagadnień objętych zakresem rozprawy w dyscyplinie naukowej budownictwo,
- zawarła w rozprawie szereg elementów oryginalnych wzbogacając aktualny stan wiedzy o analizowanych zagadnieniach,
- wykazuje dobry stopień przygotowania naukowego, umiejętność poprawnego i samodzielnego prowadzenia badań naukowych i ich interpretacji.

Przedstawione fakty świadczą o tym, że rozprawa doktorska mgr inż. Moniki Siedleckiej pt.: „*Nośność bipolarnie sprężonych bliskogłęziowych prętów ściskanych*” spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z Ustawą z dnia 14 marca 2003 roku „*O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki*”.

Stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Moniki Siedleckiej do publicznej obrony wykonanej rozprawy doktorskiej przed Radą Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Świętokrzyskiej.

dr hab. inż. Elżbieta Urbańska-Galewska, prof. PG

Gdańsk, 22 września 2018 r.