

## Recenzja

**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Łukasza Kutrowskiego**

pt. *"Stateczność i drgania własne kolumn poddanych obciążeniu ściskającemu oraz działaniu lokalnego źródła ciepła"*

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Sebastian Uzny, prof. PCz, promotor pomocniczy  
dr inż. Tomasz Skrzypczak.

Ocenę opracowano na zlecenie kierownika dyscypliny naukowej „Inżynieria mechaniczna”,  
Wydziału Mechanicznego i Informatyki Politechniki Częstochowskiej.

### 1. CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY, CEL I ZAKRES PRACY

W przedstawionej do oceny rozprawie doktorskiej pt. *"Stateczność i drgania własne kolumn poddanych obciążeniu ściskającemu oraz działaniu lokalnego źródła ciepła"* przeprowadzono analizę poprzecznych drgań własnych oraz stateczności smukłych układów podporowych – kolumn ściskanych osiowo dodatkowo poddanych działaniu lokalnego źródła ciepła.

Korzystając z zasady Hamiltona wyprowadzony został model matematyczny nieliniowej kolumny z uwzględnieniem obciążenia cieplnego. Następnie, wyznaczone zostały rozwiązania analityczne za pomocą metody małego parametru. Model układu wykorzystany został do dogłębnych analiz wpływu parametrów struktury, obciążeń zewnętrznych obciążenia cieplnego, wielkości i położenia źródła ciepła, czasu nagrzewania oraz innych wybranych parametrów na stateczność kolumny i jej częstotliwości drgań własnych. Zadanie polegało na wyznaczeniu obciążenia bifurkacyjnego struktury nieliniowej w funkcji parametrów oraz zakresów obciążeń mechanicznych i cieplnych.

Podjęty temat badawczy uważam za ciekawy i ważny z naukowego i praktycznego punktu widzenia. Uzyskane wyniki mają wpływ na projektowanie smukłych układów podporowych w celu optymalnego doboru parametrów struktury w przypadku, gdy dodatkowo pojawia się lokalne źródło ciepła, które może istotnie zmienić wartość obciążeń krytycznych. Analizowane w pracy problemy stateczności nieliniowych struktur smukłych wymagały od Doktoranta dogłębnego zrozumienia podstaw termo-sprężystości oraz ich opisu matematycznego z uwzględnieniem efektów nieliniowych.

Rozprawa doktorska składa się z dziewięciu rozdziałów, bibliografii, załącznika, wykazu ważniejszych oznaczeń, streszczeń w języku polskim i angielskim oraz oświadczenia o samodzielnym napisaniu pracy.

We wprowadzeniu Doktorant przedstawia tematykę pracy, podkreślając znaczenie utraty stateczności w przypadku struktur smukłych. Następnie przedstawia cel i zakres pracy oraz formułuje tezę badawczą. Kolejny rozdział zawiera wstęp teoretyczny do podjętego problemu termo-sprężystości i stateczności konstrukcji w którym Autor odwołuje się do aktualnego stanu wiedzy. Przegląd literatury wykonany został dosyć pobieżnie, bez dogłębnego odniesienia się do dotychczasowego stanu wiedzy, krytycznej oceny publikowanych wyników oraz wskazania wkładu własnego w podjętej tematyce. Nie zacytowano istotnych prac z zakresu termo-sprężystości np. monografii takich jak: W. Nowacki, *Thermoelasticity*, ed. 2, rev. & enlarged Edition, Pergamon Press and Polish Scientific Publishers, Oxford and Warszawa, 1986., E. A. Thornton, *Thermal Structures for Aerospace Applications*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, 1996.

Nowością pracy jest analiza wpływu miejscowego źródła ciepła na stateczność i drgania własne nieliniowej kolumny obciążonej siłą osiową, i temu zagadnieniu poświęcono czwarty rozdział pracy, w którym przedstawiono model kolumny oraz sformułowano zagadnienie brzegowo-początkowe przepływu ciepła w kolumnie. Opierając się na literaturze przyjęto zmianę modułu Younga w funkcji temperatury. Na tej podstawie wykonano obliczenia numeryczne z wykorzystaniem autorskiego programu opartego na metodzie elementów skończonych, zakładając obciążenie cieplne adekwatne do wystąpienia pożaru. Symulacje numeryczne pozwoliły na uzyskanie tymczasowych rozkładów temperatury w kolumnie o wybranych parametrach.

W rozdziale piątym przedstawiony został model fizyczny układu w dwóch wariantach: kolumny podporowej i siłownika hydraulicznego obciążonych mechanicznie i cieplnie. Założono obustronnie przegubowe zamocowania z uwzględnieniem rotacyjnych sztywności utwierdzenia. Na podstawie przyjętego modelu fizycznego sformułowano zależności na energię kinetyczną i potencjalną z uwzględnieniem nieliniowości von Karmana, wpływu temperatury, sprężystego podparcia, masy umieszczonej na końcu kolumny oraz obciążenia siłą osiową. Na podstawie zasady Hamiltona wyprowadzono równania dynamiki kolumny w kierunku poprzecznym i wzdłużnym oraz stowarzyszone warunki brzegowe. Równania

różniczkowe, które sprowadzono do postaci bezwymiarowej, rozwiązano metodą małego parametru z dokładnością do trzeciego rzędu zaburzeń.

Szczegółowe obliczenia numeryczne stateczności i drgań własnych kolumny nieliniowej obciążonej cieplnie wykonano w najbardziej obszernym rozdziale szóstym. Na wstępie ustalono minimalną liczbę segmentów kolumny która zapewnia zbieżność wyników numerycznych. Uważam ten podrozdział za bardzo ważny, decydujący o jakości pozostałych wyników. Ustalając minimalną liczbę elementów wykonano szczegółowe obliczenia numeryczne stateczności kolumny oraz drgań własnych z uwzględnieniem i bez obciążenia cieplnego pokazując wpływ parametrów kolumny oraz wielkości obciążeń: mechanicznego i cieplnego na jej stateczność i dynamikę. Wyniki przedstawiono w postaci serii wykresów m.in. zmiany parametru obciążenia bifurkacyjnego, w funkcji umiejscowienia, wysokości i czasu ekspozycji źródła ciepła, grubości kolumny, itp. przedstawiając wpływ ww. parametrów na zmianę dynamiki kolumny.

W kolejnym siódmym rozdziale zamieszczono wyniki badań eksperymentalnych. Przedstawiono schemat stanowiska badawczego oraz system pomiarowy. Realizację obciążenia cieplnego przeprowadzono z wykorzystaniem komory grzewczej. Wyniki badań eksperymentalnych porównano z wynikami symulacji numerycznych dla dwóch poziomów temperatury nagrzewania. Uzyskane wyniki doświadczalne wykazały dobrą zgodność z modelem choć pojawiły się też różnice, które Doktorant krytycznie omówił i wyjaśnił ich przyczynę.

W rozdziale ósmym zawarto wnioski końcowe w zakresie budowy modelu matematycznego oraz uzyskanych wyników i ich znaczenia praktycznego. Całość badań podsumowano w rozdziale dziewiątym. W wykazie literatury zawarto 154 publikacje.

## **2. OCENA METODYKI BADAŃ ORAZ UZYSKANYCH WYNIKÓW**

Przedstawiona praca stanowi oryginalne opracowanie Doktoranta w zakresie badań modelowych, analitycznych i numerycznych oraz doświadczalnych smukłych kolumn obciążonych siłą osiową oraz cieplnie poprzez wprowadzenie lokalnego źródła ciepła. Zakres pracy obejmuje zagadnienia mechaniki analitycznej, teorii termo-sprężystości, stateczności i drgań nieliniowych. Równania różniczkowe ruchu oraz stowarzyszone naturalne warunki brzegowe wyprowadzono za pomocą zasady Hamiltona. Następnie, równania rozwiązano metodami analitycznymi i numerycznymi oraz przeprowadzono dogłębną analizę wpływu

parametrów struktury oraz źródła ciepła na jej wytrzymałość, stateczność oraz drgania własne.

Wyznaczenie rozwiązań analitycznych i numerycznych dla wszystkich analizowanych przypadków omówionych w rozprawie doktorskiej wymagało od Doktoranta dużego nakładu pracy oraz wykazania się odpowiednim przygotowaniem merytorycznym. Badania doświadczalne potwierdzające poprawność modeli oraz wyników symulacji numerycznych istotnie dopełniają zawartość pracy doktorskiej i podnoszą jej jakość.

Do najważniejszych osiągnięć Doktoranta zaliczam wyprowadzenie modeli matematycznych pozwalających na zbadanie wpływu parametrów konstrukcyjnych oraz obciążenia cieplnego, w tym jego umiejscowienia oraz czasu ekspozycji na stateczność i drgania własne nieliniowej kolumny obciążonej osiowo. Wyniki przedstawiono w logiczny sposób wykazując wpływ poszczególnych parametrów. Wykonane powyżej badania i uzyskane wyniki są oryginalnym wkładem Autora w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna. Uzyskane wyniki mogą być wykorzystane w praktyce, w projektowaniu smukłych struktur podporowych dodatkowo obciążonych cieplnie.

### **3. PYTANIA I UWAGI KRYTYCZNE**

Zaproponowane modele są poprawne a uzyskane wyniki w większości przypadków są spójne i logiczne. Niemniej jednak niektóre elementy pracy nie są zaprezentowane wyczerpująco, a niektóre wyniki i ich interpretacja wymagają dyskusji i wyjaśnień.

W teorii termo-sprężystości stosowane są różne modele opisujące dynamikę dwóch różnych zjawisk: deformacji mechanicznych, które zwykle są szybkozmiennym oraz przepływu ciepła, które jest procesem wolnozmiennym. W ogólnym opisie oba te zjawiska są ze sobą sprzężone i wpływają na siebie. Często jednak przyjmuje się, że przepływ ciepła ma wpływ na deformacje a sam proces przewodzenia ciepła nie jest zależny od deformacji. Proszę o wyjaśnienie jakie podejście zastosowano w pracy i jakie założenia przyjęto w kontekście tworzenia modelu np. komentując równanie (5.4).

Na str.44 w rozdziale „Dobór podstawowych parametrów rozpatrywanych kolumn” przyjęto stałą długość kolumn równą 1 m. Dlaczego nie zastosowano współrzędnych bezwymiarowych, które wprowadzono w kolejnych rozdziałach? Przyjęcie odpowiednio unormowanych współrzędnych bezwymiarowych pozwala na porównywanie struktur o

różnych parametrach sprowadzonych do jednej skali, np. długość belki może zostać unormowana do 1.

Proszę o wyjaśnienie jak uzyskano równanie (5.35) w kontekście naturalnych warunków brzegowych.

Str.37 linia 4 od dołu – Co to jest „współczynnik zakrzywienia belki” ?

Str.37 linia 1 od dołu – „badania nad rezonansem pierwotnym”. Co to jest rezonans pierwotny ?

Tłumienie wewnętrzne i zewnętrzne zostało pominięte w modelach matematycznych ponieważ badano drgania własne nietłumione. W badaniach doświadczalnych tłumienie występuje w sposób naturalny. Jaki jest spodziewany wpływ tłumienia na uzyskane wyniki doświadczalne oraz porównanie ich z modelem matematycznym w którym tłumienie pominięto ?

Niezrozumiałe jest wprowadzenie małego parametru jako stosunku amplitudy drgań do długości belki. Jest to nietypowe podejście, nieco mylące i utrudniające interpretację wyników, gdyż mały parametr jest bezwymiarową amplitudą drgań. Proszę o dokładne wyjaśnienie dlaczego zastosowano takie podejście. Niejasny jest też tekst nad Rys.6.36 na str.105 dotyczący doboru małego parametru w odniesieniu do „statycznej wytrzymałości konstrukcji”. Zwykle mały parametr wprowadzany jest formalnie i wówczas jego zadaniem jest zgrupowanie wielkości małych w odpowiednich rzędach zaburzeń.

Bardzo proszę o wyjaśnienie wykresów 6.36 na str. 105 w kontekście przyjętego małego parametru.

Warto byłoby uzupełnić zależność (4.16) na moduł Younga w funkcji temperatury o wykres pokazujący jego przebieg w poszczególnych przedziałach.

Wpływ źródła ciepła na nośność kolumny omówiono na str. 159 we wniosku 4 i 5. Podano jaki jest wpływ źródła komentując uzyskane wyniki, ale nie podjęto próby wyjaśnienia dlaczego taki efekt zaobserwowano. Proszę o dogłębsze wyjaśnienie przyczyny zaobserwowanych efektów przedstawionych we wnioskach 4 i 5.

Tekst pracy napisany jest zamiennie w formie osobowej lub bezosobowej co powoduje, że nie jest on przyjazny czytelnikowi. Również wyniki obliczeń numerycznych omówione w rozdziale szóstym mogłyby być przedstawione w bardziej zwarty sposób z

doborem wykresów tak aby pokazać najważniejsze efekty. Przy tak dużej liczbie wykresów i monotonnym opisie analiza wyników jest uciążliwa.

Podpisy pod rysunkami nie zawsze są precyzyjne np. Rys.6.35, 6.36 „Przebieg krzywych charakterystycznych” wcześniej brakuje wyjaśnienia pojęcia krzywej charakterystycznej. Rys.6.47 „Przebieg krzywych mały parametr amplitudy ...” i inne.

#### **4. OCENA ROZPRAWY I WNIOSEK KOŃCOWY**

Recenzowana praca zawiera oryginalne wyniki badań naukowych uzyskanych przez Doktoranta. Zastosowane metody analityczne, numeryczne i doświadczalne pozwoliły na opracowanie nieliniowego modelu kolumny obciążonej osiowo i dodatkowo obciążonej cieplnie. Szczegółowe analizy numeryczne pozwoliły na wykazanie wpływu źródła ciepła na nośność badanych kolumn, a przeprowadzone badania doświadczalne potwierdziły poprawność przeprowadzonej analizy.

Biorąc pod uwagę całość pracy tj. jej wartość poznawczą oraz wkład własny Autora stwierdzam, że pomimo uwag krytycznych, rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Kutrowskiego pt. *"Stateczność i drgania własne kolumn poddanych obciążeniu ściskającemu oraz działaniu lokalnego źródła ciepła"* spełnia wymagania stawiane w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym w odniesieniu do prac doktorskich. Wniosuję zatem o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Jerzy Warmiński

