Dr hab. inż. Alfred Zmitrowicz
Instytut Maszyn Przepływowych PAN
ul. J. Fiszera 14, 80-231 Gdańsk
e-mail: azmit@imp.gda.pl
tel. 58-5225-134

Gdańsk 14.11.2018 r.

RECENZJA

Pracy doktorskiej mgr inż. Olgi Kawa
pt. „Kontakt między belkami o przekroju kołowym
z uwzględnieniem deformacji przekroju"

Charakterystyka pracy

Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest analiza teoretyczna i obliczeniowa zagadnienia kontaktowego między sprężystymi belkami o przekroju kołowym przy uwzględnieniu dużych przemieszczeń belek w przestrzeni trójwymiarowej. Używane w rozprawie stwierdzenie „deformacja sprężysta przekroju belki w miejscu styku" można zilustrować innymi słowami następująco „deformacja na powierzchni zewnętrznej belki w miejscu styku w postaci sprężystego (tj. odwracalnego) wgniecenia". W technice znane są przypadki gdy takim deformacjom na powierzchniach zewnętrznych stykających się obiektów towarzyszą siły docisku o dużych wartościach.

Belki o przekroju kołowym są powszechnie stosowane w budowie maszyn do modelowania wytrzymałości i dynamiki wałów maszyn wirnikowych np. turbin parowych i gazowych. W budownictwie belki o przekroju kołowym są modelami lin, cięgien, linii energetycznych, zbrojenia w kompozytach oraz masztów, słupów i wież. W linach i cięgnach występuje kontakt między elementami składowymi (włóknami). Warto zwrócić uwagę, że szkodliwym zjawiskiem w linach jest tzw. fretting, czyli uszkodzenia powierzchni stykających i trących się włókien w formie zużycia ściernego, ma to miejsce przy względnych ruchów oscylacyjnych o małych amplitudach przemieszczeń.

Belki są konstrukcjami jednowymiarowymi modelowanymi fragmentami linii prostych lub linii krzywych (są to osie belek). Również skończone elementy belkowe są obiektami jednowymiarowymi z węzłami znajdującymi się na osiach belek. Obliczenia wytrzymałościowe przeprowadza się w węzłach elementów belkowych, w tych punktach wyznacza się przemieszczenia i siły wewnętrzne. Natomiast belki stykają się ze sobą powierzchniami zewnętrznymi, z tego powodu wszystkie zmienne kinematyczne i fizyczne w strefie kontaktu belek (tj. na powierzchniach zewnętrznych belek) muszą być zdefiniowane za pomocą przemieszczeń węzłów skończonych elementów belkowych na osi belki. Analiza zagadnienia kontaktowego belek wymaga opracowania procedur transformacji wielkości wyznaczonych w węzłach elementu belkowego do wielkości na powierzchniach zewnętrznych belek. Potrzebne są również procedury transformacji sił kontaktowych i przemieszczeń w punktach na powierzchni zewnętrznej belki do punktów na osi belki. Trzeba wprowadzić własne definicje sił docisku i sił tarcia na powierzchni zewnętrznej belki, trzeba zdefiniować poślizg na tej powierzchni. Definicje sił kontaktowych i poślizgu muszą wynikać z przemieszczeń węzłów skończonego elementu belkowego. Podobne trudności napotykamy gdy analizujemy zagadnienia kontaktowe płyt i powłok, są to konstrukcje dwuwymiarowe modelowane fragmentami płaszczyzny lub powierzchni (są to powierzchnie środkowe płyt i powłok).

We współczesnej technice musimy wyznaczać miejsca styku w konstrukcjach dla deformujących się i dla poruszających się obiektów. W wielu przypadkach, nie można przewidzieć *a priori* ani obszaru styku ani sił kontaktowych (tj. sił docisku i sił tarcia). Wielkości te należy traktować jako niewiadome. Jeśli w analizie uwzględnia się możliwość rozpadu obiektu na mniejsze elementy lub duże deformacje wiotkich konstrukcji prowadzące do kontaktu części tej samej konstrukcji z nią samą, to zadanie znacznie komplikuje się. Szukanie miejsc styku jest zwykle najbardziej czasochłonnym fragmentem rozwiązywania zagadnienia kontaktowego. Najpierw stykające się ciała są dyskretyzowane z pomocą metody elementów skończonych. Następnie stosuje się metody przeszukiwania globalnego. Po znalezieniu możliwej strefy kontaktu podejmuje się poszukiwania właściwych punktów kontaktu (metody przeszukiwania lokalnego). W niektórych procedurach, oba stykające się obiekty dzieli się na układ główny (ang. „master") i układ podrzędny (ang. „slave").

Recenzowana rozprawa doktorska składa się z dwóch zasadniczych części. Część pierwsza zawiera podstawy teoretyczne oraz obliczenia numeryczne zagadnień kontaktowych belek przy dużych przemieszczeniach sprężystych. Obliczenia wykonano za pomocą własnych programów komputerowych. W części drugiej porównano wyniki własnych analiz z obliczeniami za pomocą komercyjnego programu komputerowego przy założeniu, że belki są obiektami trójwymiarowymi (bryłami). Do obliczeń wykorzystany został program metody elementów skończonych Abaqus. Praca napisana jest na 111 stronach, składa się z pięciu rozdziałów i spisu literatury liczącego 58 pozycji.

Wstęp zawiera krytyczną analizę dotychczasowego stanu wiedzy zilustrowaną licznymi i aktualnymi cytowaniami literatury przedmiotu. Przedstawiono również główne koncepcje numerycznej mechaniki kontaktu. Tradycyjnie na opis więzów kontaktowych składają się: definicja luzu (szczeliny) w rozprawie nazwana funkcją penetracji, warunki kontaktu jednostronnego, warunki styku i poślizgu. We wstępie zaprezentowano cele i założenia rozprawy.

W rozdziale drugim przeprowadzono analizę kontaktu między belkami z uwzględnieniem deformacji w obszarze styku. Rozpatrzono tzw. styk jednopunktowy belek i uwzględniono zmianę promienia kołowego przekroju belki spowodowaną deformacją sprężystą na powierzchni zewnętrznej belki w miejscu kontaktu. Innymi słowami, uwzględniono skrócenie promienia belki wynikające z kontaktu. W tym celu wprowadzono zmodyfikowaną funkcję penetracji (tj. funkcję odległości między belkami lub inaczej wielkość szczeliny między belkami) i dodano składnik uwzględniający zmianę długości promienia kołowego przekroju belki. Siła docisku między belkami jest równa reakcji na sprężystą zmianę promienia kołowego przekroju belki.

Do określenia dodatkowego składnika funkcji penetracji wykorzystano wzory Hertza. Zgodnie z modelem Hertza, w przypadku stykających się ze sobą dwóch sprężystych walców (belek o przekroju kołowym), powierzchnia styku ma kształt elipsy a rozkład sił docisku ma kształt pół-elipsoidy, największe siły docisku są w środku obszaru kontaktu, a na brzegu obszaru styku przyjmują wartość zerową. Warto przypomnieć, że w przypadku kontaktu dwóch kul sprężystych obszar styku jest okręgiem.

W numerycznej mechanice kontaktu stosowane są różne metody w celu obliczenia normalnych i stycznych sił kontaktowych oraz spełnienia więzów styku, najczęściej są to: metoda mnożników Lagrange'a, metoda funkcji kary, metody programowania matematycznego i inne. Każda z metod ma swoje korzystne i niekorzystne własności. W rozprawie doktorskiej zastosowano metodę funkcji kary.

Z pomocą zasady minimum energii potencjalnej wyprowadzono wariacyjne sformułowanie zagadnienia kontaktowego belek. Następnie podano przyrostowe definicje przemieszczeń. Posłużyły one do określenia wariacyjnego sformułowania zadania kontaktowego w postaci przyrostowej. Korzystając z zasady wariacyjnej wyprowadzono równanie równowagi w postaci macierzowej dogodnej do obliczeń numerycznych. Funkcjonał energii potencjalnej dla dwóch stykających się belek zawiera dodatkowy składnik wynikający z obecności siły docisku w miejscu

styku. Po uwzględnieniu dyskretyzacji zmiennych kinematycznych oraz linearyzacji funkcjonału wariacyjnego, ten dodatkowy składnik zapisano z pomocą tzw. wektora rezidów i stycznej macierzy sztywności elementu kontaktowego.

Jeszcze raz należy podkreślić, że w zagadnieniach kontaktowych belek zasadnicza trudność polega na poprawnym wyznaczeniu miejsc styku. Miejsca styku belek podlegających przemieszczeniom w przestrzeni trójwymiarowej nie są znane z góry.

Analizowano również zagadnienie kontaktowe belek z uwzględnieniem siły tarcia w styku belek. W opisie siły tarcia wykorzystano analogię do modelu materiału sztywno-plastycznego oraz metodę funkcji kary. W tym przypadku funkcjonał energii potencjalnej uzupełniono o nowy składnik uwzględniający obecność siły tarcia w styku belek.

W rozdziale trzecim przeprowadzono analizę kontaktu między belkami z uwzględnieniem deformacji w obszarze styku w ten sposób, że współczynnik kary dla siły docisku zastąpiono wielkością wynikającą z wzorów Hertza. Innymi słowami, wprowadzono prawo kontaktu Hertza zamiast współczynnika kary tj. zmodyfikowano funkcję kary. Wtedy dodatkowy składnik funkcjonału energii potencjalnej wynikający z obecności siły docisku musi być na nowo sformułowany. Po uwzględnieniu dyskretyzacji i linearyzacji wariacji funkcjonału otrzymano nowe wektory rezidów oraz nowe styczne macierze sztywności skończonego elementu kontaktowego.

W rozdziale czwartym przeprowadzono obliczenia sprawdzające prawidłowość zbudowanych modeli belkowych za pomocą komercyjnego programu komputerowego Abaqus przy założeniu, że belki są bryłami. Bryły podzielono na elementy skończone i dokonano wyboru odpowiedniego elementu bryłowego. Porównano ze sobą obliczone oboma metodami: wielkości przemieszczeń kontaktowych i wielkości sił docisku w strefie styku. Uzyskano dobrą zgodność wyników obliczeń.

W rozdziale piątym sformułowano wnioski końcowe i kierunki dalszych badań.

Prezentowana analiza zagadnień kontaktowych belek sprężystych z uwzględnieniem dużych przemieszczeń i z uwzględnieniem deformacji w strefie styku jest rozszerzeniem badań promotora rozprawy dr hab. inż. Przemysława Litewki.

Ocena pracy

Analiza zjawisk kontaktowych jest ważna dlatego, że jej wyniki mogą być wykorzystane do projektowania elementów konstrukcji, maszyn, narzędzi i procesów technologicznych pracujących w warunkach kontaktu i tarcia. Projektant może wykorzystać pozytywne własności zjawisk kontaktowych: przekazywanie obciążeń, rozpraszanie energii, tłumienie drgań, może również ograniczyć negatywne zjawiska: nadmierne zużycie, szkodliwe drgania, hałas.

Rozwój metod numerycznych polegający na opracowywaniu nowych elementów skończonych jest potrzebny po to aby lepiej modelować zjawiska fizyczne. Przedstawiony w rozprawie model kontaktu między belkami i nowy skończony element belkowy mogą być używane do analizy takich obiektów w których jeden z wymiarów jest znacznie większy od pozostałych.

Tradycyjnie, zjawiska tarcia i zużycia są badane przede wszystkim doświadczalnie. Symulacje komputerowe zagadnień kontaktowych mogą pomóc w planowaniu złożonych badań doświadczalnych wytrzymałościowych i tribologicznych.

Zasadnicza wartość recenzowanej pracy doktorskiej tkwi w uzupełnieniu mechaniki belek sprężystych o zagadnienia kontaktowe między belkami. Na wyróżnienie zasługuje również zbudowanie przez Doktorantkę własnych programów komputerowych.

Podczas lektury pracy zwraca uwagę dociekliwość i rzetelność prowadzonych badań. Rozdziały od drugiego do piątego świadczą o opanowaniu przez Doktorantkę mechaniki komputerowej. Przedstawiona analiza teoretyczna i obliczeniowa jest zwięzła, rzeczowa i powiązana z kolejnymi rozdziałami rozprawy. Przedstawione w pracy wyniki obliczeń nie budzą zastrzeżeń.

Za cenne należy uznać następujące osiągnięcia Doktorantki:

- Opracowanie nowego kontaktowego elementu skończonego dla stykających się belek uwzględniającego sprężystą deformację na zewnętrznej powierzchni belek w strefie kontaktu,
- Przeprowadzenie obliczeń różnych przykładów kontaktu między belkami z użyciem nowych kontaktowych elementów skończonych i własnego programu komputerowego,
- Porównanie wyników obliczeń otrzymanych przy użyciu belkowych elementów skończonych i nowych elementów kontaktowych z rezultatami obliczeń z wykorzystaniem bryłowych elementów skończonych i komercyjnego programu komputerowego. Wykazały one efektywność opracowanych modeli.

Pytania i uwagi

1. Dlaczego na Rys. 2.3 dwa kąty α między stycznymi do powierzchni zewnętrznych belek i odległością między belkami są sobie równe. Czy wynika to z przesłanek fizycznych czy matematycznych?
2. Dlaczego współczynnik Poissona w przykładzie obliczeniowym na str. 29 ma wartość 0.2, w przykładach na str. 67 i str. 75 ma wartość 0.35, w przykładzie na str. 87 ma wartość 0.4, natomiast w pozostałych przykładach ma wartość 0.3? Czy jest to celowo wprowadzona zmiana własności sprężystych materiału belek?
3. Na Rys. 2.12, Rys. 2.14, Rys. 2.16, Rys. 2.18, Rys. 3.2, Rys. 3.4, Rys. 3.6 chwile procesu deformacji oznaczone jako T=0.25, T=0.5, T=0.75, T=1.0 prawdopodobnie odpowiadają one pewnym liczbom przyrostów zadanego (wymuszonego) przemieszczenia na końcach stykających się belek. Jakim liczbom przyrostów zadanego przemieszczenia odpowiadają wybrane chwile procesu deformacji?
4. Dlaczego we wzorach (2.62) i (2.65) zamiast symbolu modułu wektora zastosowano symbol matematyczny oznaczający normę w tym wypadku wektora?
5. Str. 47, dlaczego wartość założonego współczynnika kary dla siły docisku różni się bardzo mocno w porównaniu z wartością tego współczynnika dla siły tarcia?
6. Skoro w Rozdziale 3 można było zastąpić współczynnik kary dla siły docisku wielkością wynikającą z wzorów Hertza, to czy można współczynnik kary dla siły tarcia zastąpić wielkością wynikającą z prawa tarcia Coulomba?
7. Rys. 4.7, występujący w opisie na rysunku wyraz angielski „gap" można zastąpić wyrazem polskim „szczelina" lub „luz". To samo dotyczy wzoru (4.1) w którym też użyto wyraz „gap".
8. Tabela 4.3, Tab. 4.4, Tab. 4.5, Tab. 4.6, Tab. 4.9, Tab. 4.10, Tab. 4.11, występujące w tabelach określenie angielskie „beam-to-beam" można zastąpić opisem polskim „kontakt belki z belką".

Wniosek

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest starannie przygotowana i dobrze napisana. Doktorantka rozwiązała oryginalny problem naukowy którym była analiza numeryczna zagadnień kontaktowych belek przy dużych przemieszczeniach sprężystych. Połączenie w jednej pracy analizy teoretycznej i przykładów obliczeniowych świadczy o nabyciu przez Doktorantkę wszechstronnych umiejętności do prowadzenia badań naukowych. Jest rzeczą oczywistą, że drobne uwagi i pytania recenzenta nie umniejszają wartości merytorycznej pracy, a jedynie odnoszą się do ewentualnego uzupełnienia zakresu badań w przyszłości.

Recenzowana praca doktorska mgr inż. Olgi Kawa spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim przez „Ustawę o Stopniach i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie

Sztuki" i może być przedmiotem publicznej obrony oraz podstawą nadania stopnia naukowego doktora.

Zdaniem Recenzenta recenzowana praca doktorska zasługuje na wyróżnienie, gdyż Doktorantka niezwykle starannie rozwiązała trudny problem z zakresu mechaniki komputerowej. W literaturze przedmiotu zagadnienie kontaktowe belek, płyt i powłok są rzadko analizowane co wynika z olbrzymiego stopnia trudności. Na wyróżnienie zasługuje również to, że jedną z dwóch podstawowych metod obliczeniowych numerycznej mechaniki kontaktu tj. metodę funkcji kary Doktorantka twórczo zastosowała i rozwinęła.

dr hab. inż. Alfred Zmitrowicz