

Robert Roszak, Piotr Posadzy
Politechnika Poznańska,
Instytut Silników Spalinowych i Transportu,
Piotrowo 3, 61-965 Poznań,
email: roszak@stanton.ice.put.poznan.pl,
posadzy@stanton.ice.put.pozan.pl

NIELINIOWOŚĆ MATERIAŁOWA W SYMULACJI ZJAWISK AEROELASTYCZNYCH

Streszczenie - Celem pracy jest przedstawienie algorytmu przeprowadzania numerycznych obliczeń aeroelastycznych pod kątem zastosowania materiału nieliniowego do konstrukcji ciała poddanego oddziaływaniu płynu. Aeroelastyka jako dział mechaniki zajmuje się badaniem oddziaływania strumienia płynu na opływane przez nie odkształcalne ciało. Przykładem występowania takiego zjawiska jest oddziaływanie wiatru na obiekty poddawane jego działaniu. Praca prezentuje połączenie kodu do obliczeń przepływowych i strukturalnych w jeden integralny kod do obliczeń aeroelastycznych z uwzględnieniem nieliniowości materiałowej struktury ciała. Praca pokazuje wpływ zastosowania nieliniowości materiałowej na przebieg symulacji zjawisk aeroelastycznych jak i oddziaływania płynu i struktury.

1 Wstęp

W artykule poruszono zagadnienia związane z analizą aeroelastyczną jak i analizą oddziaływania płynu i struktury elementów zaprojektowanych z materiałów, których własności lub zachowanie przy znaczących deformacjach ma charakter nieliniowy. Dzięki zastosowaniu symulacji komputerowych możliwe jest znaczące ograniczenie zakresu badań niszczących.

W nowoczesnych technikach projektowania samolotów coraz mniejszą rolę odgrywają budowa prototypów jak i wykorzystanie tunelów aerodynamicznych do analizy poprawności rozwiązań. Współczesne techniki umożliwiają prowadzenie symulacji komputerowych w pełni odwzorowujących badania rzeczywiste także z uwzględnieniem materiałów, których zachowanie ma charakter nieliniowy. Głównym obszarem badań w projektowaniu samolotów jest oddziaływanie płynu opływającego obiekt na odkształcenie jego struktury. W pracy

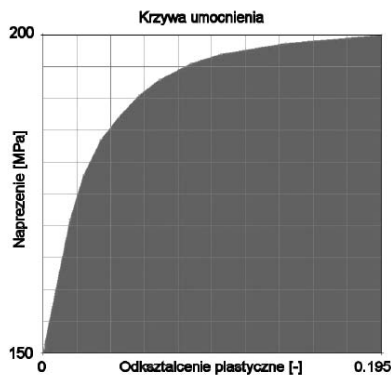
przedstawiono także możliwość zastosowania algorytmu obliczeniowego do analizy oddziaływania płynu i struktury w przepływie zamkniętym.

2 Nieliniowość materiałowa

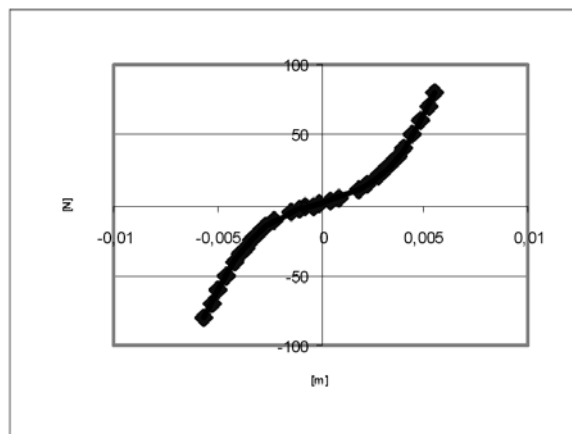
Za materiał nieliniowy przyjmują się materiał, którego własności lub zachowanie przy znaczących deformacjach ma charakter nieliniowy. Oznacza to, że charakterystyka obciążenia nie spełnia prawa Hooke'a (1)

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

Czyli odkształcenie nie jest proporcjonalne do przyłożonego obciążenia (rys. 1).



Rys. 1. Przykładowa krzywa umocnienia dla siluminu.



Rys. 2. Nieliniowa charakterystyka obciążenia sprężyny.

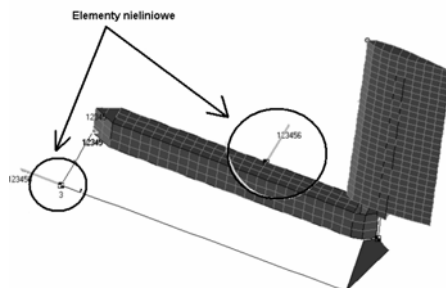
Przykładowym materiałem o nieliniowej charakterystyce obciążenia jest silumin [4]. Jest to materiał testowany od dłuższego czasu jako rozwiązanie korzystne dla konstrukcji wymagających pochłonięcia dużych ilości energii. Kolejnym przykładem elementów konstrukcyjnych wykorzystywanych w badaniach aeroelastycznych zaprezentowanych w artykule są sprężyny, których charakterystyka obciążenia przedstawiona została na rysunku 2.

Zupełnie innymi przykładami nieliniowego zachowania się struktury przy znaczących deformacjach są tkanki biologiczne, zwracając szczególnie uwagę na naczynia krwionośne, na które oddziałuje płyn (krew).

Nieliniowe podejście do rozwiązywania problemów pozwala na tworzenie zbliżonych do rzeczywistości dokładnych danych materiałowych uwzględniających nieliniowy zakres odkształceń struktury. Tego typu symulacje nie są możliwe z wykorzystaniem podejścia liniowego.

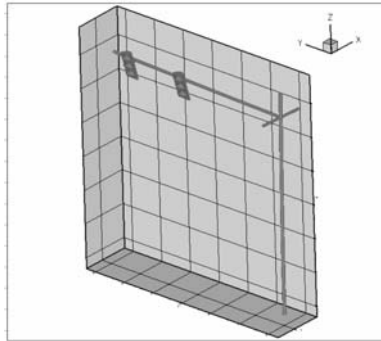
3 Modele obliczeniowe

W artykule zaprezentowano dwa podejścia do nieliniowości materiałowej. Pierwsze podejście to typowa analiza aeroelastyczna na przykładach: opływu skrzydła zawierającego w układzie mocowania (rys. 3) sprężyny o nieliniowej charakterystyce obciążenia (rys. 2), oraz opływu przykładowej ulicznej sygnalizacji świetlnej poddanej znaczącym deformacjom (rys. 4), w której typowe liniowe elementy (linki usztywniające) zmodyfikowano o elementy nieliniowe.

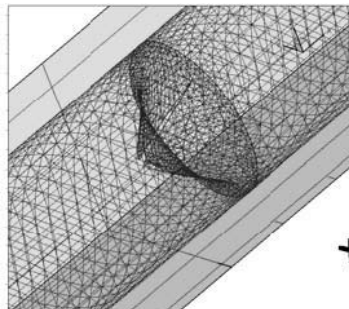


Rys. 3. Układ mocowania skrzydła w tunelu aerodynamicznym – widok układu sprężyn.

Drugie podejście to analiza oddziaływania płynu i struktury na przykładzie modelu wycinka naczynia krwionośnego wraz z tzw. zastawką (rys. 5).



Rys. 4. Model przykładowej ulicznej sygnalizacji świetlnej.



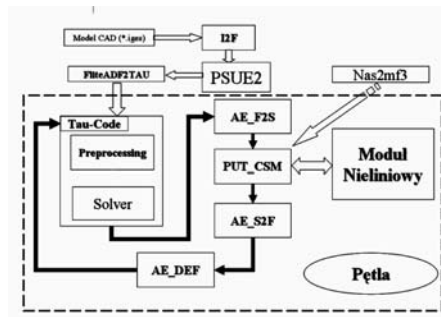
Rys. 5. Model wycinka naczynia krwionośnego.

Model wejściowy CAD (*Computer Aided Design*), będący obiektem badanym w zaprezentowanej procedurze obliczeń aeroelastycznych można zamodelować w jednym ze standardowych systemów CAD 3D (SolidWorks, Catia, Inventor, itp.) a następnie zapisać w formacie IGES. Jest to jeden z podstawowych formatów zapisu geometrii trójwymiarowej. Geometria w tym formacie reprezentowana jest przez krzywe i powierzchnie.

4 Algorytm obliczeń

W celu przeprowadzenia pełnej symulacji komputerowej (obliczeń aeroelastycznych), tzn. z jednoczesnym uwzględnieniem odkształceń siatki płynu i siatki struktury, gdyż nie ma komercyjnego oprogramowania zbudowano własne narzędzie obliczeniowe. Narzędzie składa się z programów opracowywanych w ośrodkach współpracujących z Politechniką Poznańską w ramach V Programu Ramowego.

Na schemacie przedstawionym na rys. 6. wykorzystano następujące oprogramowania:



Rys. 6. Schemat procedury obliczeń aeroelastycznych z wykorzystaniem modułu do obliczeń nieliniowych.

PSUE 2 – narzędzie opracowane na Uniwersytecie Walijskim w Swansea, służące do generacji trójwymiarowych niestrukturalnych siatek przepływowych;

TAU-Code – kod przepływowy opracowany w DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt), dostępny na rynku; wykorzystano dwa moduły; zadaniem pierwszego jest przygotowanie zadania do obliczeń (pre-processing): sprawdzenie siatki, podział na podobszary – w przypadku obliczeń równoległych, zadanie warunków brzegowych itp. drugi moduł służy do rozwiązania układu równań (Eulera lub Naviera-Stokesa w przypadku uwzględnienia lepkości);

AE-DEFVOL – jest to moduł służący do modyfikacji siatki przepływowej na podstawie odkształceń struktury; celem tej modyfikacji jest taka zmiana siatki, aby jej węzły leżały na powierzchni opływającego ciała; uzyskuje się to przez rozwiązanie zagadnienia interpolacji na siatce rozciągniętej na odkształcającym się ciele;

PUT_CSM – kod do obliczeń elastycznych opracowany w Zakładzie Metod Projektowania Maszyn; umożliwia on wykonanie obliczeń statycznych, dynamicznych oraz analizy modalnej;

AE_F2S – moduł interpolujący rozwiązania z siatki przepływowej elementów skończonych (rozkład ciśnień) na siatkę strukturalną (siły)

AE_S2F – moduł interpolujący rozwiązania z siatki strukturalnej elementów skończonych (przemieszczenia) na siatkę przepływową.

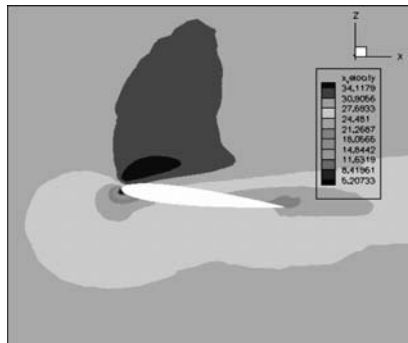
MODUŁ NIELINIOWY – moduł kodu do obliczeń strukturalnych uwzględniający materiał, którego własności lub zachowanie przy znaczących deformacjach ma charakter nieliniowy

I2F – *Iges to Flite* – moduł importujący model CAD w formacie IGES do systemu generującego siatkę elementów skończonych do analizy przepływowej.

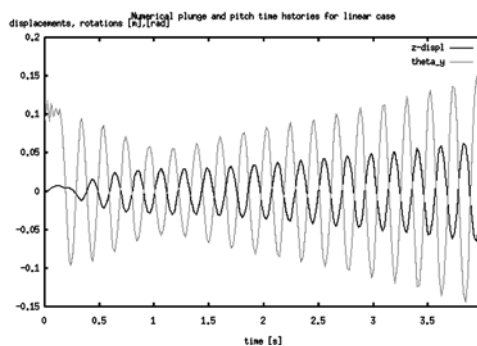
5 Wyniki analizy

Zadania ilustrujące sprzężenie przepływowo-strukturalne polegało na wyznaczeniu ugięcia pod wpływem strumienia płynu działającego na strukturę. Analiza miała także na celu zilustrowanie wpływu zastosowania elementów o nieliniowej charakterystyce obciążenia na odkształcenia struktury.

Pierwszym przypadkiem, który został poddany analizie aeroelastycznej był model skrzydła oparty na profilu NACA. Stanowisko badawcze do badania opływu profilu zawierało w swojej konstrukcji dwie nieliniowe sprężyny, których charakterystykę obciążenia przedstawiono na rysunku 2. Przeprowadzono pełną analizę dynamiczną w celu uzyskania odpowiedzi układu w czasie. Na rysunku 7 pokazano chwilowy rozkład prędkości dla profilu w kierunku napływu (kierunek X).



Rys. 7. Rozkład prędkości w kierunku X.



Rys. 8. Przebieg czasowy zachowania się układu skrzydła (ciemniejszy kolor oznacza przemieszczenie węzła kontrolnego; kolorem jaśniejszym oznaczono obrót).

W pierwszym etapie wykonano symulacje przyjmując wszystkie elementy jako liniowe. Oznacza to, że charakterystyka obciążenia elementu (w tym przypadku sprężyny) ma charakter liniowy. Jako materiał przyjęto stal o parametrach:

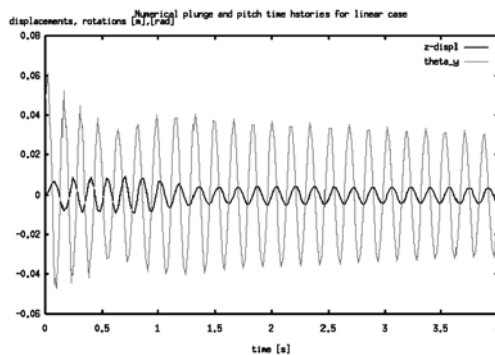
Moduł Younga $E = 2,1 \cdot 10^6$ [MPa], Liczba Poissona $\nu = 0,33$, Gęstość $\rho = 7800$ [kg/m³].

Warunki przepływu były następujące:

- kąt natarcia $0,2^\circ$,
- Prędkość $V_x = 23$ [m/s]
- ciśnienie atmosferyczne $P = 0,1$ [MPa],

Wyniki analizy aeroelastycznej dla etapu pierwszego pokazano na rysunku 8.

Analiza przebiegu układu z zastosowaniem liniowo odkształcalnych elementów pozwala na stwierdzenie, że układ jest rozbieżny – uzyskano zjawisko flutter.



Rys. 9. Przebieg czasowy zachowania się układu skrzydła przy wykorzystaniu modułu nieliniowego.

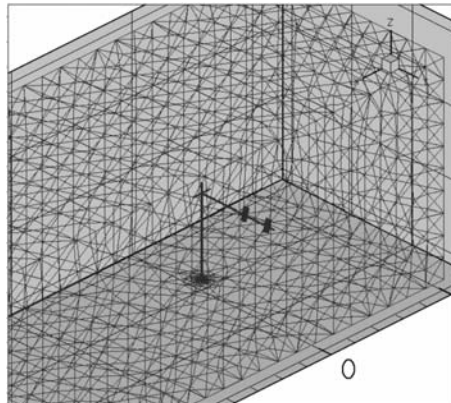
W drugim etapie wykonano symulacje przyjmując rzeczywisty model sprężyny, której charakterystyka obciążenia ma charakter nieliniowy.

W analizie wykorzystano moduł uwzględniający takie zachowanie się sprężyny.

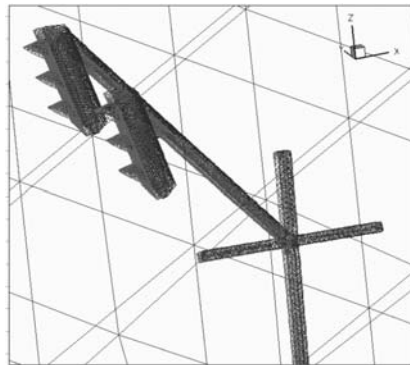
Wyniki analizy aeroelastycznej dla etapu drugiego pokazano na rysunku 9.

Analiza przebiegu układu z zastosowaniem elementów o charakterystyce nieliniowej pozwala na stwierdzenie, iż układ się ustabilizował.

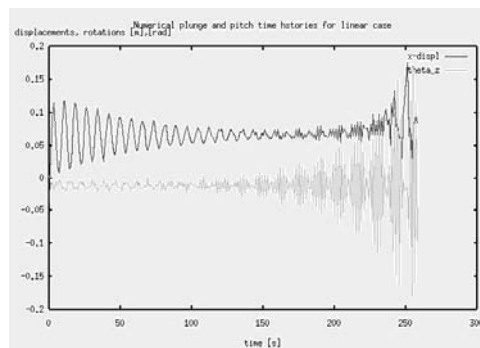
Następnie przeprowadzono kolejne symulacje aeroelastyczne przykładowej ulicznej sygnalizacji świetlnej poddanej znaczącym deformacjom, w której typowe liniowe elementy (linki usztywniające) zmodyfikowano o elementy nieliniowe.



Rys. 10. Siatka elementów skończonych sygnalizacji świetlnej do analizy przepływowej.

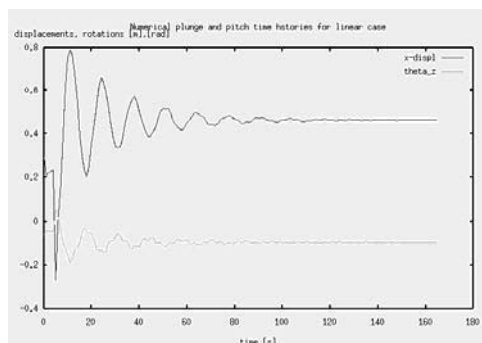


Rys. 11. Model przykładowej ulicznej sygnalizacji świetlnej – widok siatki elementów skończonych po stronie kodu przepływowego.

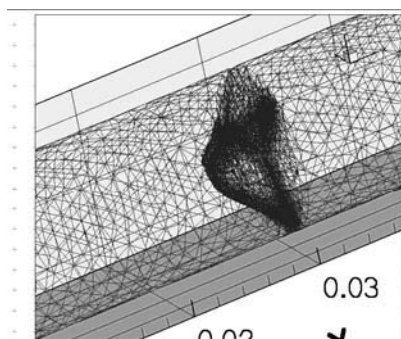


Rys. 12. Przebieg czasowy zachowania się sygnalizacji w przypadku podejścia liniowego.

Na rysunku 10 pokazano siatkę elementów skończonych do analizy przepływowej opływu przykładowej sygnalizacji świetlnej, testy wykonano analogicznie jak w przypadku profilu NACA. Pierwszym etapem była analiza (rys 11) z przyjęciem modyfikowanych elementów (linek mocujących) jako liniowo odkształcalnych. Natomiast drugim etapem analogicznie jak w przypadku pierwszego układu było przeprowadzenie analizy po przyjęciu elementów modyfikowanych jak nieliniowo odkształcalne.



Rys. 13. Przebieg czasowy zachowania się sygnalizacji w przypadku podejścia nieliniowego.



Rys. 14. Odkształcenie zastawki w odcinku naczynia pod wpływem przepływu płynu – widok po stronie przepływowej.

Wyniki dla etapu pierwszego pokazuje rysunek 12, natomiast dla etapu drugiego wyniki w postaci przebiegu czasowego zachowania się sygnalizacji pokazano na rysunku.13.

Jako ostatni etap wykonano testy w celu sprawdzenia przydatności algorytmu do analizy oddziaływania płynu i struktury (rys. 14) na przykładzie tkanek biologicznych (naczyń krwionośnych).

Przeprowadzono wstępne testy przepływu płynu w wycinku naczynia, w którym dodatkowo umieszczono tzw. zastawkę.

6 Podsumowanie

W artykule poruszono zagadnienia związane z analizą aeroelastyczną jak i analizą oddziaływania płynu i struktury elementów zaprojektowanych z materiałów, których własności lub zachowanie przy znaczących deformacjach ma charakter nieliniowy.

Po przeprowadzonych wstępnych pełnych dynamicznych zmiennych w czasie analiz aeroelastycznych udowodniono, że nieliniowe podejście do rozwiązywania problemów pozwala na tworzenie zbliżonych do rzeczywistości dokładnych danych materiałowych uwzględniających nieliniowy zakres odkształceń struktury. Tego typu symulacje nie są możliwe z wykorzystaniem podejścia liniowego. Pokazano także, że zastosowanie materiałów, których charakterystyka obciążenia ma charakter nieliniowy w przypadku znacznych deformacji ma duży wpływ na odpowiedź układu.

Literatura

- [1] Gerhold T., Friedrich O., Evans J., Galle M., "Calculation of complex threedimen - sional configurations employing the DLR-TAU-Code", AIAA-paper 97-0167, 1997.
- [2] Morzyński M., Nowak M., Multifunctional structural tool for aeroelastic analysis, w: Colloquium Dynamics of Machines 2003, Czech Committee of the European Mechanics Society and Institute of Thermomechanics ASCR, Prague, February 11 – 12 , 2003.
- [3] G.Brożek, T. Uhl, I.Łuczak 'Zastosowanie Nieliniowej Analizy Metodą Elementów Skończonych w Projektowaniu Części Maszyn" VIII Konferencja Naukowo-techniczna Kraków 2004

MATERIAL NONLINEARITY IN SIMULATION OF AEROELASTIC ISSUES

Summary - The aim of the work is to present presents joint of fluid and structure codes into one aeroelastic code with respect to material nonlinearities of the structure. An example of aeroelastic phenomena is influence of wind on structures. Aerodynamic forces from stream of air lead to deformations of the structure and the deformations change aerodynamic forces. Presented paper shows also influence of material nonlinearity on aeroelastic simulations.