

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP	5
2. PODSTAWOWE ZWIĄZKI METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH W MECHANICE MATERIAŁÓW I KONSTRUKCJI	7
2.1. Wstęp	7
2.2. Modelowanie ciała odkształcalnego w mechanice konstrukcji	7
2.3. Opis ciała odkształcalnego o nieliniowych właściwościach	10
2.4. Metoda iteracyjna Newtona-Raphsona	19
3. ZASADY BUDOWY I ANALIZY MODELI MES	21
3.1. Model geometryczny	22
3.2. Warunki brzegowe	24
3.3. Wybór elementu skończonego	27
3.4. Dyskretyzacja (podział na elementy skończone)	28
3.5. Ocena wyników i wiarygodność modeli i obliczeń MES	31
3.6. Przykład analizy wytrzymałościowej MES	34
4. WPROWADZENIE DO UŻYTKOWANIA SYSTEMU ANSYS	40
4.1. Wprowadzenie	40
4.2. Czym jest ANSYS?	40
4.3. Typowa analiza programem ANSYS MECHANICAL APDL	49
5. ANSYS WORKBENCH	62
5.1. Wprowadzenie	62
5.2. Praca w karcie projektu	66
5.3. Praca w ANSYS WORKBENCH	69
5.4. ANSYS WORKBENCH SYSTEMS	70
5.5. ENGINEERING DATA	74
5.6. DESIGNMODELER	77
5.7. MECHANICAL APPLICATION	96
6. ĆWICZENIA PRAKTYCZNE	121
6.1. Analiza modeli prętowych	123
6.2. Dwuwymiarowe zadanie teorii sprężystości. Badanie współczynników koncentracji naprężeń	139
6.3. Trójwymiarowe zadanie teorii sprężystości. Naprężenia w grubościennym zbiorniku ciśnieniowym	153
6.4. Analiza konstrukcji powłokowej. Cienkościenne zbiorniki ciśnieniowe	167

6.5. Naprężenia cieplne w stanie ustalonym. Rura grubościenna	177
6.6. Naprężenia cieplne w stanie nieustalonym. Hartowanie stalowej kulki	188
6.7. Drgania własne konstrukcji. Postaci i częstości własne trójwymiarowego modelu belki	199
6.8. Drgania nieustalone. Drgania wymuszone modelu ramienia robota	208
6.9. Duże deformacje konstrukcji odkształcalnych. Ugięcia płyt i powłok	216
6.10. Badanie stateczności elementów konstrukcyjnych. Wyboczenie płyt cienkościennych	226
6.11. Praca konstrukcji w zakresie sprężysto-plastycznym. Naprężenia resztkowe. sprężysto-plastyczne zginanie belki. Uplastycznienie wokół otworu w tarczy	236
6.12. Zagadnienia kontaktu ciał odkształcalnych	247
6.13. Badanie współczynników intensywności naprężeń. Stan naprężenia wokół szczeliny w zadaniu dwu- i trójwymiarowym	258
6.14. Modelowanie materiałów ortotropowych i kompozytowych. Analiza naprężeń i odkształceń w warstwie ortotropowej i w laminacie wielowarstwowym	280
6.15. Modelowanie konstrukcji kompozytowych. Analiza naprężeń i deformacji belki ogonowej modelu samolotu	297
6.16. Analiza materiałów lepkosprężystych i lepkoplastycznych	306
6.17. Analiza cykliczna	322
6.18. Konstrukcje powłokowo-prętowe	335
BIBLIOGRAFIA	345

Niniejszy skrypt ma ułatwić Czytelnikowi opanowanie podstaw budowy i wykorzystywania modeli metody elementów skończonych (MES), a w szczególności zapoznanie się z metodami przeprowadzania obliczeń konstrukcji odkształcalnych za pomocą systemu programów ANSYS (ANSYS Inc., USA).

Pakiety profesjonalnych programów metody elementów skończonych składają się z wielu współpracujących ze sobą modułów i tworzą systemy obliczeniowe, pozwalające na analizy różnych problemów opisywanych równaniami różniczkowymi cząstkowymi, dotyczących mechaniki konstrukcji odkształcalnych, przepływu ciepła, mechaniki płynów, pól elektromagnetycznych itd. W mechanice konstrukcji metoda elementów skończonych stosowana jest niemal do wszystkich typów stawianych praktycznie zadań.

Programy obliczeniowe MES zawierają algorytmy ułatwiające budowę modelu geometrycznego i umożliwiające wprowadzenie opisu modelu z najbardziej popularnych systemów CAD. Wyposażane są także w algorytmy automatycznej dyskretyzacji i rozbudowane moduły graficznej prezentacji modelu i wyników obliczeń. W nowoczesnych programach MES dostępnych jest zwykle wiele metod rozwiązywania układów równań liniowych, równań nieliniowych, zagadnień własnych itp. Do najbardziej znanych systemów metody elementów skończonych wykorzystywanych w mechanice konstrukcji należą ANSYS, NASTRAN, ABAQUS, COSMOS, FEMAP, MARC. Dostępnych jest także wiele komercyjnych programów wyspecjalizowanych, na przykład do analizy konstrukcji budowlanych, do obliczeń konstrukcji kompozytowych, rurociągów itd. Moduły obliczeniowe metody elementów skończonych dołączane są również do wielu programów CAD.

Budowa własnych programów metody elementów skończonych wymaga bardzo dobrego przygotowania w zakresie matematyki, metod numerycznych i teorii analizowanych problemów. Warto jednak podkreślić, że również dla efektywnego posługiwania się gotowymi, sprawdzonymi pakietami MES potrzebne jest rozumienie metody i jej podstaw matematycznych, a także dobra znajomość wykorzystywanych programów i badanych zjawisk. Wyniki obliczeń MES w każdym przypadku powinny być weryfikowane przez uproszczone szacunki analityczne

i sprawdzenie jakościowej poprawności wybranych rezultatów cząstkowych (reakcje, ciągłość pola przemieszczeń, zgodność z warunkami brzegowymi itp.).

Niniejsze opracowanie jest zmodyfikowaną i istotnie rozszerzoną wersją publikowanego wcześniej przez Oficynę Wydawniczą PW skryptu [16].

Modele analizowane w tej publikacji budowane były za pomocą wersji (v.15) pakietu programów ANSYS, powszechnie wykorzystywanego zarówno w badaniach naukowych, jak i w praktyce inżynierskiej. Od wielu lat ANSYS jest stosowany w Politechnice Warszawskiej i innych polskich uczelniach. Zamierzeniem autorów było jednak przedstawienie zasad praktycznego wykorzystania MES w obliczeniach inżynierskich i interpretacji wyników, a nie wprowadzanie Czytelnika w szczegóły użytkowania wybranego programu.

Tematy zadań opisywanych w skrypcie odpowiadają potrzebom i profilowi wykształcenia studentów na kierunkach prowadzonych przez Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Omawiane ćwiczenia stanowią w większości praktyczne uzupełnienie wykładu metody elementów skończonych. W każdym ćwiczeniu przypomniane są podstawy opisu teoretycznego analizowanych zagadnień tak, by ułatwić zrozumienie zasad budowy modelu MES, a także interpretację i dyskusję wyników. Niektóre z prezentowanych zadań mogą być wykorzystywane do samodzielnego przygotowania się do analizy bardziej zaawansowanych problemów, rozwiązywanych na przykład w ramach prac przejściowych i dyplomowych.