

SPIS TREŚCI

Przedmowa	10
Ważniejsze skróty i oznaczenia	12

CZĘŚĆ I
OBLICZENIA STATYCZNE

Rozdział 1. Analiza liniowa osiowosymetrycznych struktur metodą prze- mieszczeń elementów skończonych	17
1.1. Model dyskretyzacji jednowymiarowej dla obciążeń osiowo- symetrycznych	17
1.1.1. Równania równowagi MES	18
1.1.2. Sformułowanie problemu, zależności fizyczne i geo- metryczne	20
1.1.3. Funkcje kształtu, macierz sztywności elementu	22
1.1.4. Macierz naprężeń początkowych elementu	24
1.1.5. Obciążenia elementu i wektory sił węzłowych	25
1.1.5.1. Obciążenia od sił odśrodkowych	25
1.1.5.2. Obciążenie od ciśnienia zewnętrznego	26
1.1.5.3. Obciążenie od odkształceń termicznych	26
1.1.5.4. Obciążenie brzegowe	27
1.1.6. Połączenie śrubowe	27
1.1.7. Połączenie wtlaczane	28
1.1.8. Transformacja współrzędnych, końcowy układ równań	30
1.1.9. Przykłady analizy numerycznej	31
1.1.9.1. Tarcza wirująca o stałej grubości bez- i z otworem	31
1.1.9.2. Tarcza bez otworu o zmiennej grubości termicznie niejednorodna	34
1.1.9.3. Wirnik sprężarki odśrodkowej	34

1.2. Model dyskretyzacji jednowymiarowej dla obciążeń niesymetrycznych	36
1.2.1. Geometria i układ sił wewnętrznych elementu	36
1.2.2. Obciążenia niesymetryczne	37
1.2.3. Przemieszczenia	38
1.2.4. Odształcenia i naprężenia	39
1.2.5. Macierz sztywności	42
1.2.6. Macierz sztywności dodatkowej	43
1.2.7. Siły węzłowe	46
1.2.8. Element typu belkowego	46
1.2.9. Końcowy układ równań m -tej harmonicznej obciążenia	49
1.3. Model dyskretyzacji jedno- i dwuwymiarowej dla obciążeń osiowosymetrycznych	49
1.3.1. Sformułowanie problemu	50
1.3.2. Charakterystyki elementu pierścieniowego	51
1.3.2.1. Funkcje kształtu (przemieszczeń)	51
1.3.2.2. Odształcenia	52
1.3.2.3. Naprężenia	53
1.3.2.4. Macierz sztywności	54
1.3.3. Obciążenia elementu i wektory sił węzłowych	54
1.3.3.1. Obciążenie od sił odśrodkowych	54
1.3.3.2. Obciążenie od ciśnienia zewnętrznego	55
1.3.3.3. Obciążenie od odkształceń termicznych	56
1.3.3.4. Obciążenie brzegowe	56
1.3.4. Model połączenia elementu powłokowego i pierścieniowego ..	56
1.3.5. Końcowy układ równań	58
1.3.6. Przykłady analizy numerycznej	59
Rozdział 2. Analiza liniowa osiowosymetrycznych struktur metodą hybrydową elementów skończonych	61
2.1. Ogólne problemy wariacyjne	61
2.1.1. Podstawowe równania metody hybrydowej	62
2.1.2. Rozszerzone sformułowanie metody hybrydowej	66
2.1.3. Równania modelu dyskretnego	66
2.2. Zastosowanie MHES do jednowymiarowych modeli dyskretnych ...	70
2.2.1. Funkcje kształtu elementu	70
2.2.2. Siły objętościowe i powierzchniowe	71
2.2.3. Funkcja rozkładu sił wewnętrznych	72
2.2.4. Macierz sztywności elementu	75
2.2.5. Równoważne siły węzłowe	77
2.2.6. Końcowy układ równań	77
2.2.7. Przykłady analizy numerycznej	78

2.2.7.1. Przykłady obliczeń metodą hybrydową	78
2.2.7.2. Porównanie wyników uzyskanych obiema metodami	81
2.3. Zastosowanie MHES do dwuwymiarowych modeli dyskretnych	84
2.3.1. Charakterystyki elementu - model podstawowy	84
2.3.1.1. Funkcje kształtu	84
2.3.1.2. Macierz sztywności	85
2.3.1.3. Siły węzłowe	86
2.3.2. Funkcje naprężeń elementu	89
2.3.2.1. Interpolacja funkcjami Love'a	90
2.3.2.2. Interpolacja wielomianowa	93
2.3.2.3. Całki szczególne równań niejednorodnych	94
2.3.3. Charakterystyki elementu - model rozszerzony	95
2.3.3.1. Dodatkowe funkcje kształtu	95
2.3.3.2. Końcowy układ równań	97
2.3.4. Przykłady analizy numerycznej	99
2.3.4.1. Analiza zaburzeń	99
2.3.4.2. Przykłady zadań testowych	101
2.3.4.3. Płyta kołowa podparta przegubowo-przesuwnie na brzegu zewnątrznym i obciążona stałym wydatkiem q	101
2.3.4.4. Tarcza wirująca bez otworu	106
2.3.4.5. Tarcza wirująca z otworem	108
2.3.4.6. Tarcza z otworem obciążona termicznie	109
2.3.4.7. Analiza naprężeń w tarczy turbiny	111
Rozdział 3. Analiza nieliniowa osiowosymetrycznych struktur metodą przemieszczeń elementów skończonych	116
3.1. Równania przyrostowe metody elementów skończonych konstrukcji sprężysto-plastycznych dla zagadnień termicznych	116
3.1.1. Zależności kinematyczne	116
3.1.2. Naprężenia	118
3.1.3. Wariacyjne sformułowanie równań modelu ciągłego	120
3.1.4. Równania modelu dyskretnego	122
3.1.4.1. Wpływ aktualnej konfiguracji ciała na wartości sił masowych ...	128
3.1.4.2. Matematyczny model pełzania	130
3.2. Model dyskretyzacji dwuwymiarowej dla obciążeń osiowo- symetrycznych	132
3.2.1. Jawsna postać macierzy sprężysto-plastycznych elementu	133
3.2.1.1. Funkcje przemieszczeń	133
3.2.1.2. Odształcenia	134
3.2.1.3. Naprężenia	137
3.2.1.4. Macierz sztywności sprężysto-plastycznej	138

3.2.1.5. Macierz początkowych naprężeń	140
3.2.2. Jawna postać wektora równoważnych sił węzłowych elementu ..	143
3.2.2.1. Siły węzłowe od obciążeń objętościowych	143
3.2.2.1.1. Przypadek obciążenia konserwatywnego	144
3.2.2.1.2. Przypadek obciążenia niekonserwatywnego	144
3.2.2.2. Siły węzłowe od obciążeń powierzchniowych	145
3.2.2.3. Siły węzłowe od odkształceń termicznych	145
3.2.2.4. Siły węzłowe od naprężeń początkowych	147
3.2.2.5. Siły węzłowe od odkształceń pełzania	149
3.2.3. Końcowy układ równań	150
3.3. Przykłady analizy numerycznej	151
3.3.1. Analiza numeryczna zagadnień plastyczności	151
3.3.1.1. Tarcza wirująca z otworem	152
3.3.1.2. Tarcza wirująca bez otworu	158
3.3.1.3. Analiza naprężeń w tarczy turbiny	160
3.3.2. Analiza numeryczna zagadnień pełzania	163
3.3.2.1. Tarcza kołowa z otworem	163
3.3.2.2. Tarcza turbiny	164
3.3.3. Analiza numeryczna zagadnień geometrycznie nieliniowych ...	165
3.3.3.1. Niekonserwatywne siły masowe	165
3.3.3.2. Tarcza kołowsymetryczna obciążona stałym wydatkiem	165

CZĘŚĆ II

OBLICZENIA DYNAMICZNE

Rozdział 4. Drgania pakietu łopatek wirnikowych	169
4.1. Wstęp	169
4.2. Równania równowagi dynamicznej skręconej łopatki	169
4.2.1. Różniczkowe warunki równowagi	169
4.2.2. Przemieszczenia i odkształcenia	171
4.2.3. Twierdzenie o pracy obciążeń na przemieszczeniach wirtualnych	172
4.3. Zależności kinematyczne	175
4.4. Równania uogólnionych sił przekrojowych	179
4.5. Macierz sztywności elementu	184
4.6. Macierz naprężeń początkowych elementu	185
4.6.1. Równoważne siły węzłowe	186
4.7. Macierze mas (bezwładności) elementu	188
4.8. Równania równowagi dynamicznej ułopatkowanego wirnika	189

4.9. Przykład obliczeniowy	190
Rozdział 5. Krytyczne prędkości obrotowe zespołów wirnikowych	194
5.1. Model dyskretyzacji jednowymiarowej	194
5.1.1. Równania ruchu modelu podwójnego wirnika lotniczego silnika turbinowego	195
5.1.2. Wyniki obliczeń numerycznych	199
5.2. Model dyskretyzacji dwuwymiarowej	204
5.2.1. Funkcje przemieszczeń elementu	205
5.2.2. Macierz sztywności, mas i naprężeń początkowych elementu	206
5.2.3. Model sprzężenia elementu pierścieniowego i belkowego (łopatki)	210
5.2.4. Globalny układ równań	212
5.2.5. Numeryczna analiza drgań	212
5.2.5.1. Wyniki obliczeń drgań własnych	214
5.2.5.2. Wyniki obliczeń drgań wymuszonych	219
5.2.6. Uwagi końcowe	221
Rozdział 6. Nieliniowe regularne i chaotyczne drgania wirującego wału ..	222
6.1. Uwagi wstępne	222
6.2. Równania ruchu wirującego wału	222
6.2.1. Równania ruchu wirującego wału w postaci bezwy- miarowej	226
6.3. Rozwiązanie równań ruchu metodą Galerkina	228
6.4. Analiza numeryczna	233
6.4.1. Charakterystyka systemu obliczeniowego	233
6.4.2. Numeryczne rozwiązywanie nieliniowych równań ruchu	234
6.4.3. Omówienie wyników obliczeń	234
BIBLIOGRAFIA	242