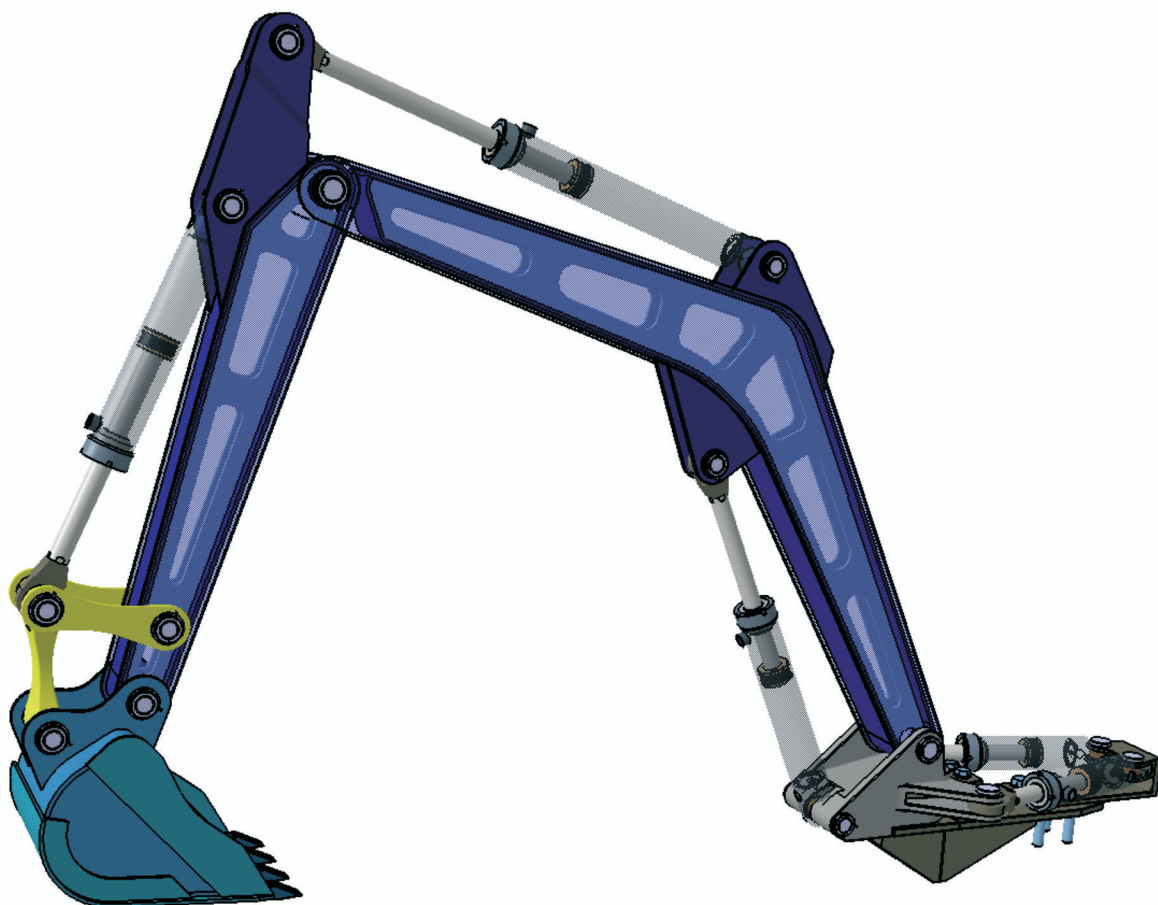




**Katedra Wytrzymałości Materiałów
i Metod Komputerowych Mechaniki**
Wydział Mechaniczny Technologiczny Politechnika Śląska

Studencka Konferencja Naukowa

METODY KOMPUTEROWE 2010



Gliwice 2010

**Katedra Wytrzymałości Materiałów
i Metod Komputerowych Mechaniki
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Politechnika Śląska**

**Studencka Konferencja Naukowa
„METODY KOMPUTEROWE – 2010”**

Gliwice, maj 2010 r.

Katedra Wytrzymałości Materiałów i Metod Komputerowych Mechaniki

Wydział Mechaniczny Technologiczny
Politechnika Śląska
44-100 Gliwice, ul. Konarskiego 18A
tel. 032 237 1204, fax 032 237 1282

Komitety Naukowy:

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Burczyński
Prof. dr hab. inż. Ewa Majchrzak
Dr hab. inż. Piotr Fedeliński, Prof. Pol. Śląskiej
Dr hab. inż. Antoni John, Prof. Pol. Śląskiej

Komitety Organizacyjny:

Dr hab. inż. Piotr Fedeliński, Prof. Pol. Śląskiej
Dr inż. Radosław Górski
Dr inż. Adam Długosz
Dr inż. Grzegorz Działkiewicz
Dr inż. Jacek Ptaszny
Mateusz Warcholiński
Piotr Gocyla
Paweł Gocyla

Komitety Redakcyjny:

Dr inż. Radosław Górski
Dr inż. Mirosław Dziewoński
Mgr inż. Piotr Wysota

ISBN 978-83-930523-0-1

Artykuły opublikowano na podstawie oryginałów dostarczonych przez Autorów.

Druk i oprawę wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej.
Nakład 120 egz. Druk ukończono w maju 2010 r.

Wstęp

Zeszyt naukowy zawiera 22 artykuły prezentowane na czwartej Studenckiej Konferencji Naukowej „Metody Komputerowe – 2010”, odbywającej się 27 maja 2010 roku w Centrum Edukacyjno-Kongresowym Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Konferencję zorganizowali studenci oraz pracownicy Katedry Wytrzymałości Materiałów i Metod Komputerowych Mechaniki Politechniki Śląskiej. Artykuły, przygotowane pod opieką naukową pracowników Katedry, przedstawiają wyniki prac zarówno studentów działających w ramach Studenckiego Koła Naukowego „Metod Komputerowych”, jak i dyplomantów. Publikacje dotyczą zastosowania metod komputerowych w różnych dziedzinach techniki, takich jak:

- podstawy metod komputerowych w mechanice układów odkształcalnych,
- metody komputerowe w wytrzymałości materiałów i termomechanice,
- wspomaganie komputerowe prac inżynierskich,
- modelowanie komputerowe i analiza stanu układów biologicznych,
- zastosowanie metod sztucznej inteligencji,
- zagadnienia analizy wrażliwości, optymalizacji i identyfikacji,
- informatyka.

Dziękuję studentom za przygotowanie artykułów i prezentacji na konferencję, Komitetowi Naukowemu za troskę o poziom naukowy prac, Komitetowi Redakcyjnemu za przygotowanie zeszytu naukowego do druku i wersji elektronicznej materiałów konferencyjnych, a Komitetowi Organizacyjnemu za przygotowanie obrad konferencji. Duża liczba zgłoszonych prac świadczy o znacznej aktywności naukowej studentów i potrzebie organizacji tego rodzaju konferencji. Życzę studentom owocnych dyskusji w czasie konferencji. Mam nadzieję, że udział w konferencji będzie inspiracją do dalszych badań naukowych i prezentacji wyników prac na konferencjach i w publikacjach naukowych.

Opiekun Naukowy Studenckiego Koła Naukowego
„Metod Komputerowych”

Dr hab. inż. Piotr Fedeliński, Prof. Pol. Śląskiej

Gliwice, maj 2010 r.

Studenckie Koło Naukowe „Metod Komputerowych”

Katedra Wytrzymałości Materiałów i Metod Komputerowych Mechaniki (KWMiMKM)

Zarząd Koła w roku akademickim 2009/2010:

Przewodniczący: Mateusz Warcholiński, Automatyka i Robotyka, AB3, 5 rok

Wice-przewodniczący: Piotr Gocyła, Automatyka i Robotyka, AB3, 5 rok

Sekretarz: Paweł Gocyła, Mechanika i Budowa Maszyn, MB4, 5 rok

Opiekun Naukowy: dr hab. inż. Piotr Fedeliński, Prof. Pol. Śląskiej

Opiekun ds. Organizacji: dr inż. Radosław Górski

Studenckie Koło Naukowe „Metod Komputerowych” zostało zarejestrowane w dniu 6.12.2001 r. Głównym celem Koła jest poszerzenie wiedzy studentów na temat metod komputerowych i ich zastosowań w technice.

Zakres merytoryczny działania Koła:

- poznanie nowych metod komputerowych i technik informatycznych, ze szczególnym uwzględnieniem zastosowań w dziedzinie mechaniki,
- zapoznanie się ze sprzętem i programami komputerowymi oraz ich obsługą,
- pogłębienie wiedzy z zakresu mechaniki układów odkształcalnych, termomechaniki, biomechaniki, analizy wrażliwości i optymalizacji, modelowania układów i procesów, metod sztucznej inteligencji.

Formy działalności Koła:

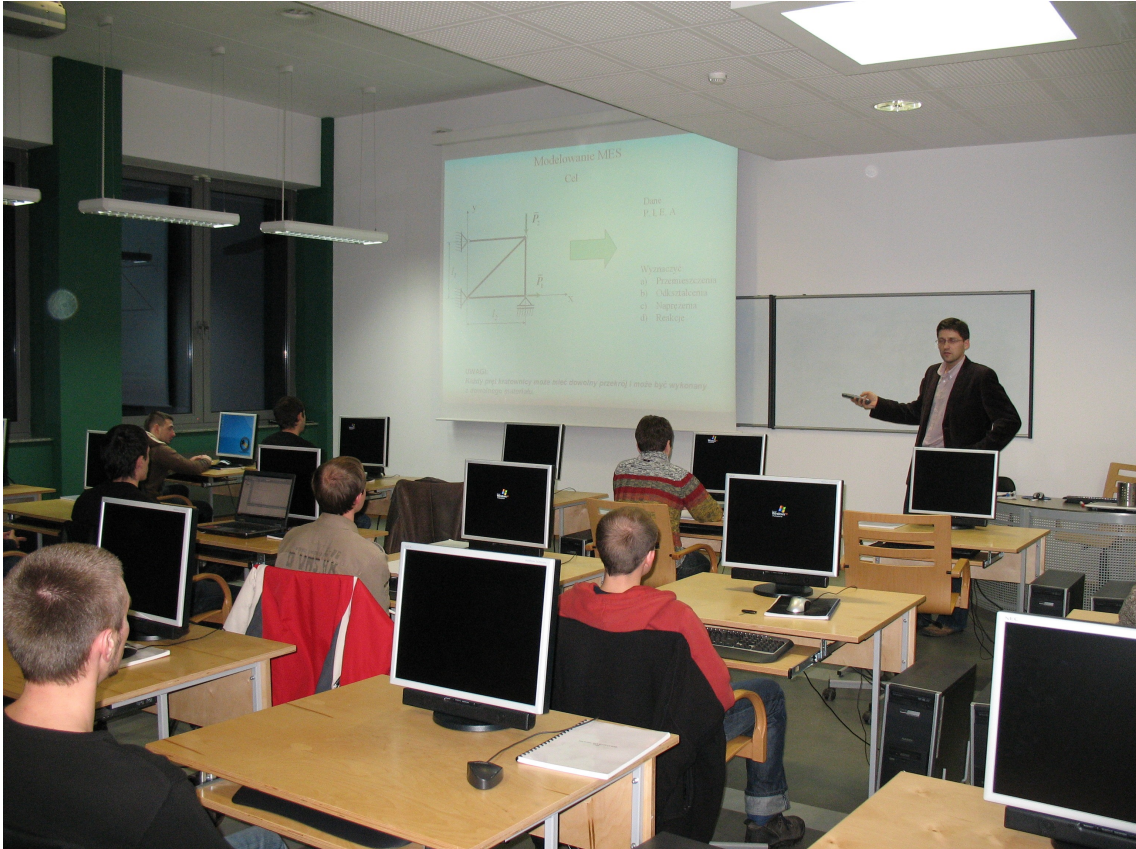
- udostępnianie członkom Koła sprzętu oraz programów komputerowych znajdujących się w Laboratorium Metod Komputerowych KWMiMKM,
- samokształcenie i prowadzenie badań własnych przez członków Koła,
- prezentacje przez członków Koła prac własnych, prac przejściowych i prac dyplomowych na zebraniach naukowych Koła i konferencjach,
- opieka naukowa pracowników KWMiMKM nad pracami własnymi członków Koła,
- referaty pracowników naukowych KWMiMKM oraz zaproszonych gości na zebraniach naukowych Koła,
- organizowanie kursów obsługi programów wspomagających prace inżynierskie oraz kursów programowania,
- uczestniczenie w wystawach i prezentacjach sprzętu i programów komputerowych,
- zapoznanie się z pracą biur projektowo-konstrukcyjnych, instytutów, szkół wyższych stosujących metody mechaniki komputerowej, przez organizowanie wycieczek,
- współpraca naukowa z innymi studenckimi kołami naukowymi.



Studencka Konferencja Naukowa "Metody Komputerowe - 2009" – Gliwice, 29.05.2009 r.
Otwarcie konferencji przez Prodziekana dra hab. inż. Piotra Fedelińskiego, prof. Pol. Śl.



Studencka Konferencja Naukowa "Metody Komputerowe - 2009" – Gliwice, 29.05.2009 r.
Wręczenie dyplomów ukończenia kursu „Podstawy obsługi programu metody elementów skończonych ANSYS 11”, zorganizowanego przez Studenckie Koło Naukowe Metod Komputerowych.



Zebrańie Studenckiego Koła Naukowego Metod Komputerowych – Gliwice, 18.11.2009 r.
Kurs programowania metody elementów skończonych w języku C++.
Prowadzący: dr inż. Radosław Górski.



Mecz towarzyski siatkówki zorganizowany przez Członków Studenckiego Koła Naukowego Metod Komputerowych oraz Pracowników Katedry Wytrzymałości Materiałów i Metod Komputerowych Mechaniki – Gliwice, 10.02.2010 r.

Spis treści

Spis treści	
Czyż Tomasz (referat zaproszony) Modelowanie zjawiska detonacji w programie ANSYS AUTODYN	1
Bednarz Paweł Analiza własności zastępczych nanokompozytów metodą elementów skończonych i brzegowych	7
Firczyk Marek Analiza konstrukcji wsporczych z użyciem oprogramowania MES Autodesk Algor Simulation	11
Gocyla Paweł Wybrane zagadnienia identyfikacji w układach termicznych za pomocą algorytmów ewolucyjnych oraz metody elementów skończonych	15
Gocyla Piotr Zastosowanie metody superpozycji modalnej do badania przemieszczeń modeli MES drgających belek.....	19
Hauffe Marcin Analiza skrętnych drgań własnych wału korbowego	23
Hauffe Marcin, Malecki Łukasz, Zarychta Marcin Projekt i analiza numeryczna wzmocnienia płyty	27
Karbownik Piotr Analiza wrażliwości pola temperatury w nagrzewanej/chłodzonej tkance biologicznej	31
Makowski Przemysław Symulacja konstrukcji z wykorzystaniem elementów MPC	35
Meinert Tymoteusz, Murawski Marcin Opracowanie aplikacji służącej do wizualizacji wyników otrzymanych w systemie MSC/Patran	39
Miłkowski Wojciech Analiza przepływu ciepła w skali nano – model dwutemperaturowy	43
Młynarczyk Przemysław Modelowanie numeryczne elementów z kryształów fonicznych	47
Niemiec Mirosław Proces projektowania osprzętu roboczego koparki jednonaczyniowej	51
Opielka Jan Optymalizacja własności kompozytów przy użyciu algorytmu ewolucyjnego	55
Ożga Daniel Metamodel odpowiedzi wybranych modeli elementów turbiny przemysłowej z wykorzystaniem metody elementów skończonych	59

Psarska Monika	
Modelowanie oddziaływań lasera na tkanki biologiczne – zadanie osiowosymetryczne.....	63
Rydzek Krzysztof	
Obliczenia z użyciem języka OpenCL	67
Szwed Witold	
Modelowanie pól temperatury z uwzględnieniem zmiennych parametrów termofizycznych	71
Warcholiński Mateusz	
Modelowanie metodą elementów skończonych wpływu skurczu spawalniczego na ostateczną postać konstrukcji	75
Wilk Bartosz	
Obliczenia MES z wykorzystaniem oprogramowania Autodesk Robot Structural Analysis 2010.....	79
Zelent Mirosław	
Metoda komputerowa wyznaczania rdzenia przekroju pręta.....	83
Ziętek Rafał	
Optymalizacja układów powierzchniowych z zastosowaniem algorytmów rojowych i metody elementów skończonych	87

MODELOWANIE ZJAWISKA DETONACJI W PROGRAMIE ANSYS AUTODYN

dr inż. TOMASZ CZYŻ

MESCO

Tarnowskie Góry

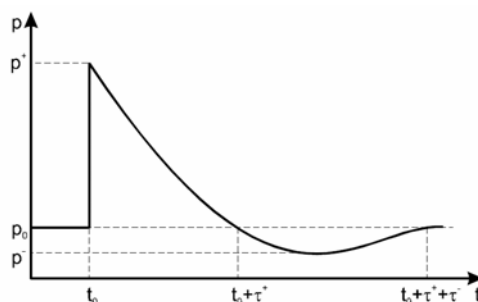


Streszczenie. W artykule przedstawiono sposoby modelowania zjawiska wybuchu w programie ANSYS AUTODYN. W pierwszej części opisano najczęściej stosowane metody służące do analizy propagacji fali uderzeniowej. Następnie przedstawiono dostępne solwery używane w programie do tego typu analiz oraz modele materiałów wybuchowych. Ostatnia część została poświęcona technikom mapowania wyników, czyli metodzie efektywnego podejścia do rozwiązywania problemów detonacji w środowisku miejskim.

1. Wprowadzenie

Wybuch jest zjawiskiem trudnym do modelowania ze względu na złożoność występujących w nim procesów. Procesy te mają bardzo dynamiczny charakter i wiążą się z wydzielaniem bardzo dużych ilości energii. Energia ta powstaje w wyniku egzotermicznych reakcji chemicznych, które zachodzą w materiale wybuchowym. Szybkość reakcji jest na tyle duża, że powoduje powstanie w materiale naddźwiękowej fali uderzeniowej, która następnie propaguje w medium otaczającym materiał wybuchowy.

Kształt typowego impulsu fali uderzeniowej jest przedstawiony na rys. 1. Wzrost ciśnienia na froncie impulsu występuje prawie natychmiastowo, a następnie za frontem zmiana ciśnienia ma charakter eksponencjalny [1]. Ciśnienie za frontem spada i w pewnym miejscu występuje obszar podciśnienia.



Rys. 1. Impuls ciśnienia fali uderzeniowej

Impuls fali propaguje z prędkością rzędu 7-9 km/s dla najczęściej stosowanych materiałów wybuchowych, takich jak trotyl czy heksogen.

Najciekawsze z punktu widzenia praktyki inżynierskiej jest oszacowanie obciążenia konstrukcji pod wpływem wybuchu oraz zniszczeń, jakie w niej wystąpią. Metody, które pozwalają nam na to oszacowanie możemy podzielić ogólnie na empiryczne i numeryczne. Metody empiryczne polegają na badaniu korelacji między eksperymentem, a pewnymi zależnościami analitycznymi. Najpopularniejsza z metod empirycznych CONWEP została stworzona przez Kingerego i Bulmasha w 1992 roku [2]. Równania analityczne opracowane przez autorów pozwalają określić parametry wybuchu kulistego lub półkolistego, takie jak ciśnienie fali nacierającej i odbitej oraz obciążenie dowolnie oddalonej przeszkody od

ładunku wybuchowego o masie od 1 do 400000 kg. Metoda ta dobrze sprawdza się do wyznaczania ciśnień w przestrzeni bez przeszkód lub analizy pojedynczego odbicia.

W przypadku wybuchu w środowisku miejskim, gdzie fale mogą się wielokrotnie odbijać, wzmacniać lub osłabiać, ta metoda nie jest już wystarczająca. Do tego celu możemy użyć metod numerycznych, które dostarczą nam dokładniejszych wyników jednocześnie będąc opłacalnymi obliczeniowo. Metody te bazują na równaniach matematycznych opisujących fizykę zjawiska wybuchu, razem z prawem zachowania masy, pędu i energii oraz równaniach konstytutywnych modelu materiałowego. Programy służące do tego typu obliczeń wykorzystują metodę objętości skończonych wraz z metodą elementów skończonych i jawnym schematem całkowania w dziedzinie czasu. Jednym z nich jest program ANSYS AUTODYN.

2. Charakterystyka programu ANSYS AUTODYN

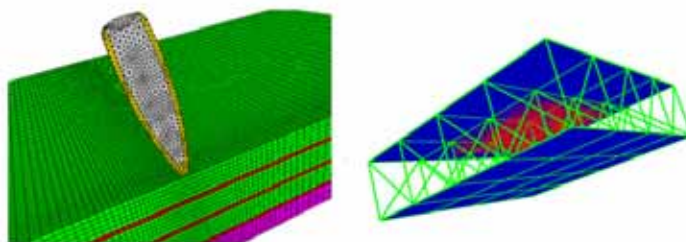
ANSYS AUTODYN służy do rozwiązywania zagadnień dynamicznych i wysoce nieliniowych, w których biorą udział ciecze, gazy i ciała stałe. Co ważne, możliwa jest pełna interakcja pomiędzy tymi ciałami. ANSYS AUTODYN do obliczeń używa podejścia „wielosolwerowego”. Oznacza ono, że każdy obiekt, ciało stałe, ciecz, gaz występujące w danej analizie jest analizowane przez osobny solwer ściśle przeznaczony do danej struktury. Solwery można podzielić na następujące kategorie [3]:

- Lagrange
- Euler
- ALE (Arbitrary Lagrange Euler)
- Mesh free

Wybór odpowiedniego solwera dla określonego analizowanego obiektu stanowi kluczową rolę w otrzymaniu dokładnych wyników i zapewnieniu efektywności rozwiązania. Poniżej przedstawiono krótką charakterystykę solwerów programu ANSYS AUTODYN.

2.1. Solwer Lagrange

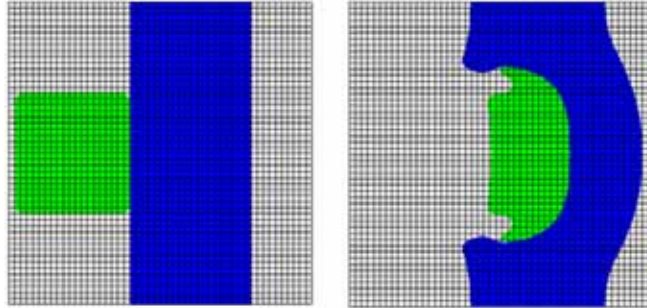
W tym solwerze materiał jest powiązany z siatką elementów skończonych i odkształca się wraz z nią. Solwer Lagrange jest najbardziej efektywny i daje najlepsze wyniki w analizie ciał stałych. Używa trzech rodzajów elementów: bryłowych, powłokowych i belkowych (Rys. 2). Jest szybszy niż solwer Euler, jednakże, gdy występują znaczne deformacje elementów może generować mniej dokładne wyniki, dłużej wykonywać obliczenia lub zakończyć obliczenia przed czasem. Znacznym odkształceniom elementów może zapobiec numeryczny mechanizm erozji, który wykasowuje dany element, gdy odkształcenie w nim będzie większe niż określona wartość. Co ważne, mechanizm ten zachowuje inercję wykasowanych elementów.



Rys. 2. Siatki elementów skończonych w solwerze Lagrange

2.2. Solwer Euler

Solwer Euler używa siatki objętości skończonych, która nie zmienia swojego położenia w przestrzeni. Materiał przemieszcza się z jednej komórki do drugiej podczas przepływu bądź odkształcenia (Rys. 3).



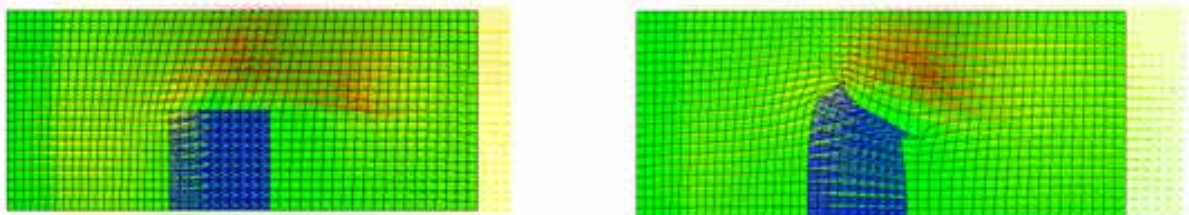
Rys. 3. Symulacja uderzenia w solwerze Euler

W tym podejściu nie ma problemów z dużymi deformacjami siatki, ale za to musimy także dyskretyzować obszar, w którym przemieszczają się obiekty analizy, co zwiększa złożoność obliczeniową modelu. AUTODYN zawiera dwa solwery typu Euler.

- a) Solwer Multi-material, pozwalający na symulację wielu rodzajów materiałów w obrębie jednej siatki objętości skończonych,
- b) Solwer Euler-blast, w którym możemy zamodelować tylko jeden materiał, który jest modelem gazu idealnego. Solwer ten wydajnie i dokładnie analizuje problemy propagacji fali powstałej w wyniku detonacji.

2.3. Solwer ALE

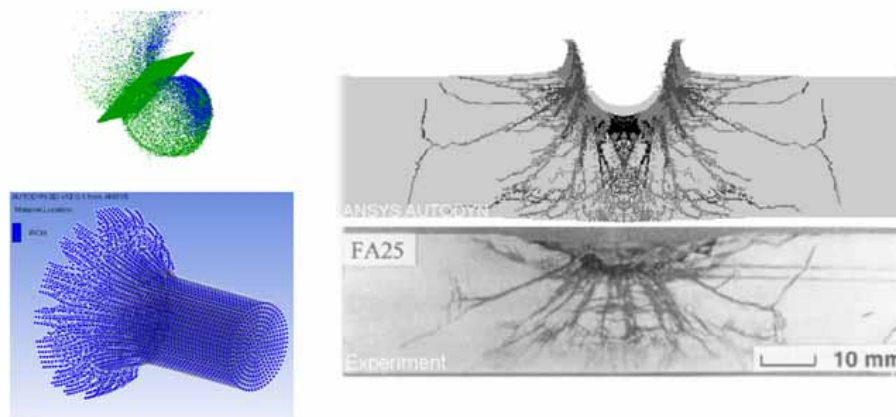
Łączy zalety dwóch poprzednich solwerów, czyli materiał przemieszcza się z jednego elementu do drugiego, ale także możliwa jest zmiana położenia węzłów elementów skończonych. To podejście jednak, również nadaje się do problemów, w których obiekty nie ulegają znacznym deformacjom (Rys. 4).



Rys. 4. Siatka ALE z małymi i znacznymi deformacjami

2.4. Solwer Mesh free (bezsiatkowy)

Solwer bezsiatkowy w programie ANSYS AUTODYN używa metody SPH (Smooth Particle Hydrodynamics). Metoda SPH jest metodą typu Lagrange i znakomicie nadaje się do modelowania pęknięć i fragmentacji materiałów kruchych typu ceramika lub beton. Dyskretyzacja w tej metodzie polega na umieszczeniu w danym obszarze gęsto upakowanych cząsteczek (Rys. 5).



Rys. 5. Uderzenia analizowane metodą SPH

Cząsteczki SPH przemieszczają się wraz z odkształcaniem się materiału.. Jedynym ograniczeniem jest analiza rozciągania materiałów ciągłych, kiedy cząsteczki mogą się oddalić od siebie na tak duże odległości, że nie będą mogły dokładnie spełnić założeń ośrodka ciągłego i powstanie pęknięcie numeryczne.

3. Modele materiałów wybuchowych w programie ANSYS AUTODYN

Ogólny model materiału wymaga podania zależności między naprężeniem, a deformacją i energią wewnętrzną lub temperaturą. W większości przypadków te zależności mogą zostać rozbite na dwie części. Część opisującą zależność pomiędzy ciśnieniem hydrostatycznym, gęstością i temperaturą bądź energią, nazywaną równaniem stanu oraz część opisującą uplastycznienie materiału nazwaną modelem wytrzymałości.

W szczególności materiał może być opisany tylko równaniem stanu. Ten przypadek to płyny, które nie przenoszą naprężeń stycznych.

AUTODYN oferuje wiele różnych równań stanu i modeli wytrzymałości pozwalających analizować odpowiedź dynamiczną materiałów ciągłych, kruchych, hipersprężystych, porowatych, płynów oraz w szczególności materiałów energetycznych, czyli materiałów wybuchowych.

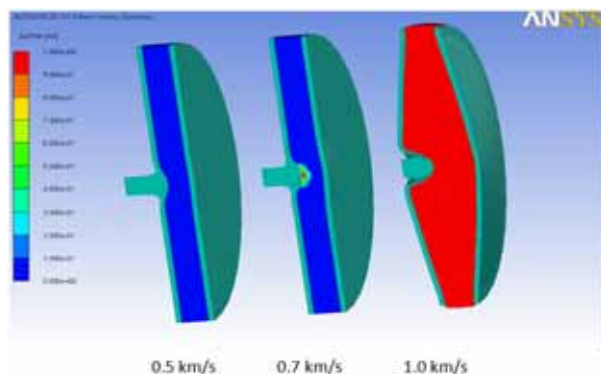
Najpopularniejszym równaniem stanu opisującym materiał wybuchowy jest równanie stanu Jonesa – Wilkinsa – Lee (JWL).

$$P = A \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_1} \right) e^{-\frac{R_1}{\eta}} + B \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_2} \right) e^{-\frac{R_2}{\eta}} + \omega \rho e \quad (1)$$

gdzie: P – ciśnienie, A, B, R1, R2, ω są empirycznie wyznaczanymi stałymi, ρ - gęstość, ρ_0 - gęstość początkowa, $\eta = \rho / \rho_0$, e - energia wewnętrzna właściwa.

Przedstawione równanie opisuje rozprężanie produktów reakcji chemicznej zachodzącej w materiale wybuchowym po przejściu fali uderzeniowej. W bibliotece materiałów programu ANSYS AUTODYN można znaleźć całkowicie zdefiniowane modele materiałowe wraz z parametrami dla większości typowych materiałów wybuchowych używanych wspólnie.

Powyższy model zakłada, że materiał wybuchowy jest w pełni zainicjowany, czyli, że w materiale wystąpi detonacja rozpoczynająca się od miejsca przez nas wskazanego. Równanie stanu Lee-Tarvera pozwala na uwzględnienie i rozpoczęcie detonacji pod wpływem czynników zewnętrznych, czyli na przykład nagłego uderzenia (Rys. 6).

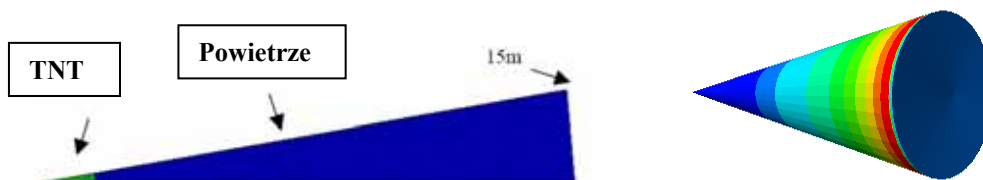


Rys. 6. Inicjacja wybuchu przy różnych prędkościach uderzenia

Rysunek 6 przedstawia uderzenie w zbiornik z materiałem wybuchowym z różnymi prędkościami. Widać, że dopiero prędkość 1 km/s pozwala na pełne zainicjowanie propagacji fali uderzeniowej.

4. Modelowanie wybuchu techniką mapowania

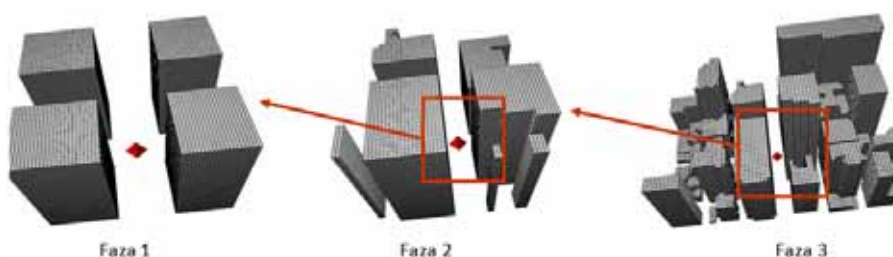
Wierne i dokładne zamodelowanie impulsu ciśnienia w początkowej fazie inicjacji i propagacji fali wybuchu wymaga gęstej siatki modelu. W przypadku przyjęcia takiej gęstości dla całego modelu 3D składającego się przykładowo z całego budynku, otrzymany model będzie nieopłacalny pod względem obliczeniowym. Zazwyczaj jednak w wielu analizach detonacji w środowisku miejskim, wybuch początkowo propaguje kuliście, aby po pewnej chwili dopiero zderzyć się z analizowanym obiektem. Ten początkowy etap wybuchu może być modelowany w jednym wymiarze przyjmując symetrię kulistą (Rys. 7).



Rys. 7. Początkowy model 1D wybuchu wraz z wynikami

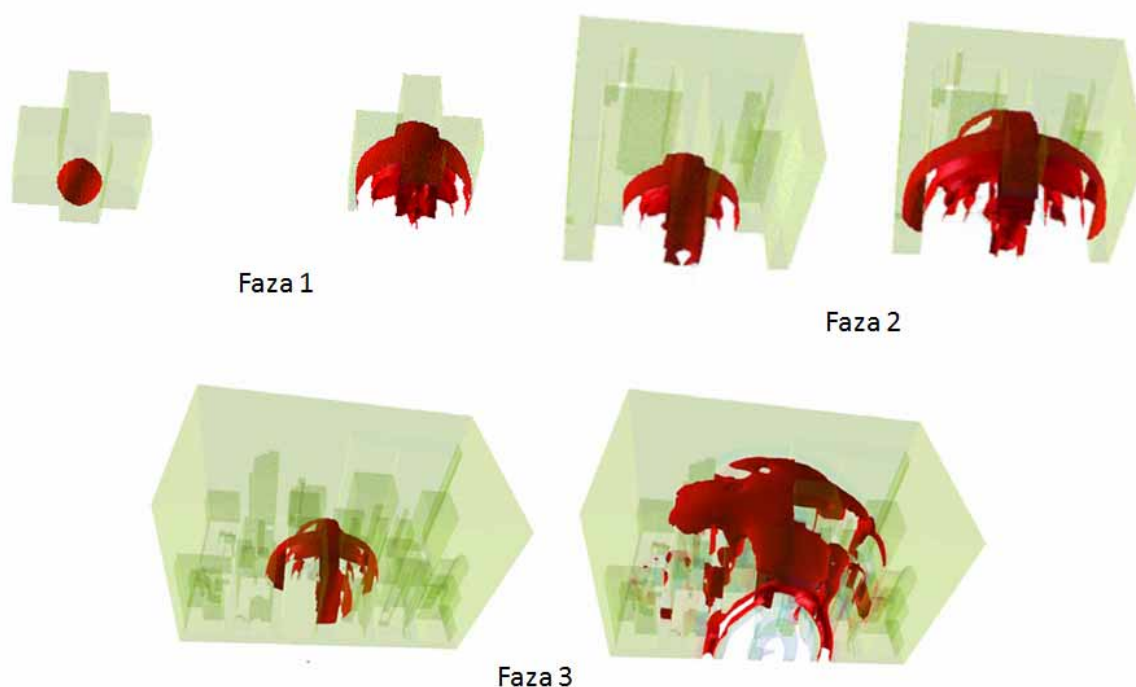
W momencie, gdy następuje odbicie, przepływ już nie jest symetryczny i dalszą część analizy trzeba przeprowadzić na siatce 2D lub 3D [5]. Wyniki z analizy 1D czyli stan ośrodka zostają przekazane techniką mapowania jako warunki początkowe do kolejnych analiz.

Siatka w kolejnych analizach może być już rzadsza, gdyż dynamika propagacji jest mniejsza (Rys. 8). Czerwonym punktem zaznaczono punkt inicjalizacji detonacji. Po osiągnięciu przez falę uderzeniową granic modelu, następuje kolejne mapowanie wyników do nowej analizy z większym modelem.



Rys. 8. Siatki o różnej gęstości dla poszczególnych faz propagacji

Na rysunku 9 przedstawiono stan początkowy i końcowy propagacji fali uderzeniowej w poszczególnych fazach symulacji.



Rys. 9. Wyniki dla poszczególnych faz symulacji

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono sposoby modelowania zjawiska wybuchu w programie ANSYS AUTODYN, który pozwala na dokładne wyznaczenie ciśnień, które wywołuje propagującą falą uderzeniową w medium. Opisano dostępne solwery i modele materiałowe używane do symulacji materiałów wybuchowych. W ostatniej części zaprezentowano technikę kilkufazowej symulacji propagacji z mapowaniem wyników pomiędzy kolejnymi analizami.

Każda kolejna analiza fazy propagacji trwała nie dłużej niż 3 minuty na komputerze klasy Pentium 4, 2.2GHz, co dowodzi wydajności i opłacalności obliczeniowej zaprezentowanej techniki. Dane dotyczące rozmieszczenia budynków można zaimportować do programu AUTODYN korzystając z systemów GIS (geographic information system).

Literatura

1. Kuczaj A., Modelowanie rozlotu produktów detonacji walcowego ładunku materiału wybuchowego, Praca dyplomowa, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa (1999).
2. Remennikov A., A review of methods for predicting bomb blast effects on buildings, *Journal of Battlefield Technology*, Vol. 6, no. 3, (2003).
3. Cowler M.S., Quan X.C., Fairlie G.E., Katayama M., Itoh M., Autodyn applications for homeland security, w materiałach "International Symposium on Structures under Impulsive Loading", Nagoya, Japan (2005).
4. AUTODYN User Manual Version 12.1, ANSYS, (2009).
5. Cowler M.S., Quan X.C., Fairlie G.E., A computational approach to assessing blast damage in urban centers using AUTODYN, *Proceedings of ASME PVP: Structures Under Extreme Loadings symposium*, San Diego, California, (2004).

ANALIZA WŁASNOŚCI ZASTĘPCZYCH NANOKOMPOZYTÓW METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH I BRZEGOWYCH

PAWEŁ BEDNARZ

Automatyka i Robotyka, AB3, 5rok

Opiekunowie naukowci: dr hab. inż. Piotr Fedeliński, Prof. Pol. Śląskiej,
dr inż. Radosław Górski



Streszczenie. Tematem artykułu jest modelowanie i analiza własności zastępczych nanokompozytów metodą elementów skończonych (MES) i brzegowych (MEB). W artykule przedstawiono wstęp teoretyczny dotyczący nanokompozytów, informację o skrypcie do modelowania i analizy nanokompozytu oraz wyniki numeryczne i teoretyczne badań.

1. Wstęp teoretyczny

Termin nanotechnologia został po raz pierwszy użyty przez Norio Taniguchi [1] w 1974 roku, jako określenie obróbki z dokładnością mniejszą od $1 \mu m$. Obecnie przyjmuje się, że nanotechnologia dotyczy obiektów, których co najmniej jeden wymiar musi być w skali nanometrycznej, tj. $10^{-9} m$, i nie może przekraczać $500 nm$, a zwykle wynosi znacznie mniej niż $100 nm$ (przeważnie około $1 nm$).

Nanokompozyty to materiały składające się z osnowy i umieszczonego w niej składnika o znacznie lepszych własnościach mechanicznych i wymiarach rzędu nano. Właściwości nanokompozytów zależą w istotny sposób od stopnia rozdrobnienia nanocząstek oraz ich rozkładu w osnowie. Ze względu na rodzaj osnowy (matrycy) można je podzielić na trzy rodzaje: metaliczne, ceramiczne oraz polimerowe [2]. Nanokompozyty są materiałami wielofunkcyjnymi i mają szerokie zastosowania w wielu dziedzinach życia (np. artykuły spożywcze – opakowania na żywność i napoje) oraz gałęziach przemysłu (np. w przemyśle motoryzacyjnym – zbiorniki na paliwo, lakiery odporne na zarysowania).

W niniejszym artykule zostaną w skrócie omówione i analizowane jedynie nanokompozyty polimerowe wzmacniane nanoglinkami. Otrzymywane są one w wyniku zdyspergowania w matrycy polimerowej niewielkiej ilości modyfikatorów, rozdrobnionych do wymiarów kilku nanometrów. W pracy rozważany jest przypadek, gdy cząstki są całkowicie i losowo rozproszone w matrycy (ang. exfoliated). Cząstki mają postać płatków, przy czym każda cząstka ma grubość ok. $1 nm$. Poprawia to znacznie wiele właściwości polimeru [2], zwłaszcza jego sztywność.

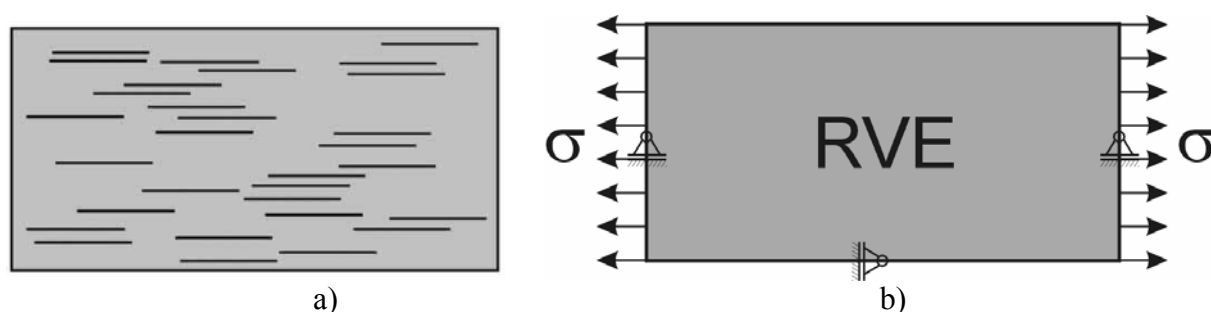
2. Skrypt wykorzystywany w programie Ansys

Modelowanie rozważanych w pracy materiałów, nadawanie własności materiałowych, warunków brzegowych, rodzaju elementów skończonych, siatki MES oraz obliczenia wykonywane są w programie Ansys Inc ver.11. W tym celu stworzono skrypty, zawierające wszystkie niezbędne komendy w języku APDL Ansysa (ang. Ansys Parametric Design Language), służące do wykonania powyższych czynności. Na potrzeby przeprowadzenia badań różnych modeli numerycznych nanokompozytów w postaci reprezentatywnych elementów objętości (ang. Representative Volume Element – RVE), skrypty zostały przygotowane w języku programowania C++.

Każdy ze skryptów został podzielony na cztery główne moduły: *Dane do skryptu*, *Preprocesor*, *Processor* oraz *Postprocesor*. Pierwszy z nich zawiera niezbędne dane, takie jak wymiary matrycy oraz wzmocnień, liczbę wzmocnień, dane materiałowe, itp. Drugi moduł zawiera wszystkie instrukcje niezbędne do zamodelowania układu wraz z nadaniem własności materiałowych elementom skończonym, warunków brzegowych oraz siatki elementów skończonych. W trzecim i czwartym module zawarto instrukcje dotyczące odpowiednio analizy i odczytania wyników obliczeń.

3. Wyniki badań modelu nanokompozytu

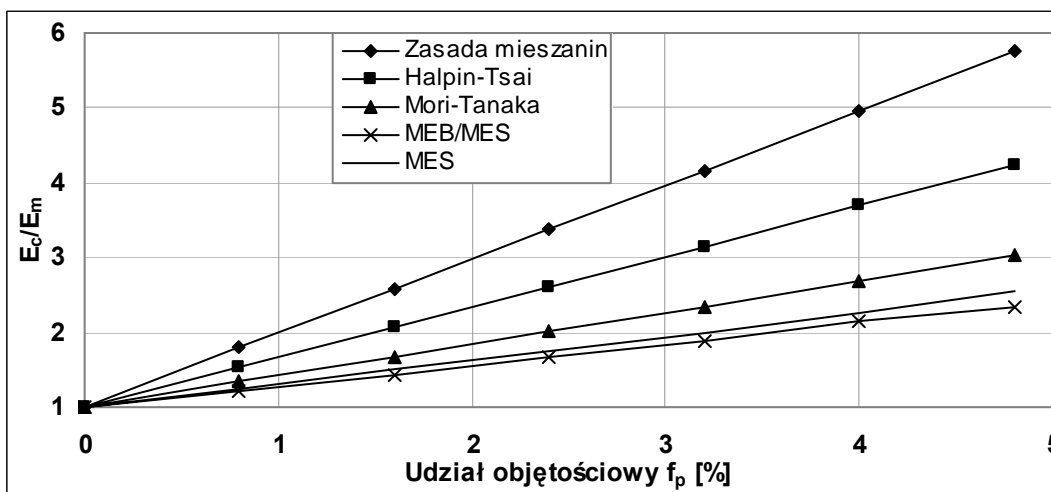
Model nanokompozytu poddany został wielu badaniom w zależności od zmian różnych parametrów, jednak w niniejszym artykule zostaną przedstawione jedynie wyniki dwóch badań. Przedstawiono wpływ udziału objętościowego wzmocnienia na zastępczy wzdluzny moduł Younga oraz wpływ zmiany typu elementu skończonego wzmocnienia (tarcza lub belka) na zastępczy moduł Younga i przemieszczenia. Przykładową strukturę nanokompozytu z wieloma wzmocnieniami w postaci nanoglinek przedstawiono na rys. 1a.



Rys. 1. Model RVE nanokompozytu [3]: a) struktura, b) warunki brzegowe

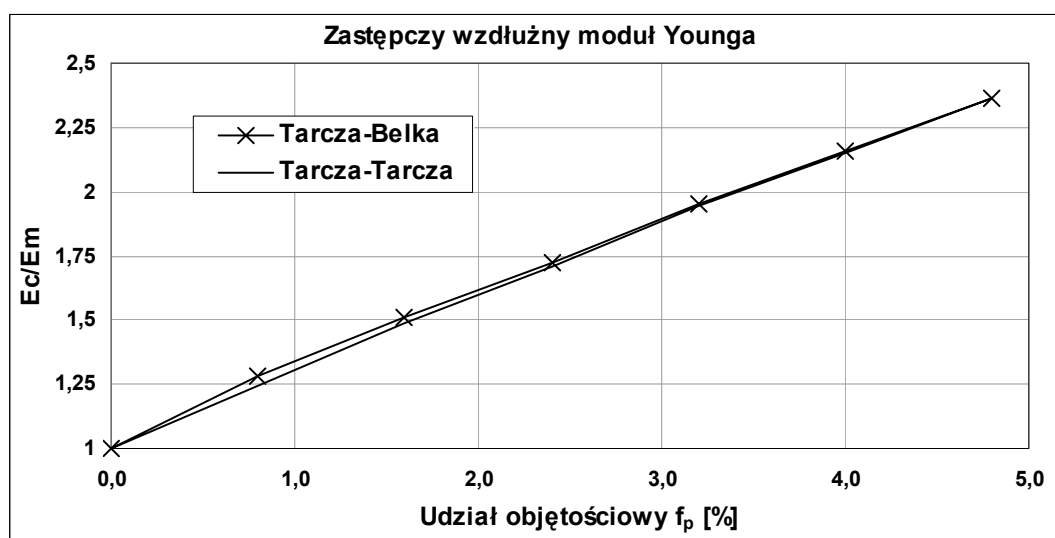
Badaną strukturę nanokompozytu stanowi dwuwymiarowy model RVE z losowo rozmieszczonymi wzmocnieniami w matrycy o rozmiarze $500 \times 250 \text{ nm}$. Długość i wysokość każdego wzmocnienia o przekroju prostokątnym wynosi odpowiednio 100 nm i 1 nm . Moduł Younga wzmocnień E_p jest 100 razy większy niż moduł Younga matrycy polimerowej E_m . Współczynnik Poissona matrycy i wzmocnień wynosi odpowiednio 0.35 i 0. Materiał matrycy znajduje się w płaskim stanie naprężenia. Liczba wzmocnień w modelu RVE jest zmienna i wynosi od 10 do 60, stąd udział objętościowy f_p zmienia się w granicach 1~5 %. Założono również, że wzmocnienia nie mogą się przecinać ani stykać lub wychodzić poza zewnętrzne krawędzie RVE. Warunki brzegowe modelu przedstawiono na rys. 1b (dwie podpory ruchome odbierają przemieszczenie pionowe na prawej i lewej krawędzi RVE, jedna podpora ruchoma poziome na dolnej krawędzi). Podpory usytuowane są w węzłach modelu. Model jest poddany rozciąganiu w kierunku poziomym ciśnieniem o jednostkowej wartości. Analizę przeprowadzono MES, stosując czterowęzłowe tarczowe elementy skończone PLANE42 (dla osnowy i wzmocnienia) lub elementy belkowe BEAM3 (dla wzmocnienia). Wyniki analizy porównano z rozwiązaniami analitycznymi lub otrzymanymi połączoną MEB/MES [3].

W pierwszej kolejności przedstawiono wpływ udziału objętościowego f_p wzmocnień na znormalizowany zastępczy wzdluzny moduł Younga kompozytu E_c/E_m . Rys. 2 przedstawia wykresy uzyskane różnymi metodami, tj.: metodą mieszanin, metodą Halpina-Tsai'a i Mori-Tanaki oraz MES i połączoną MEB/MES. Wyniki numeryczne otrzymano poprzez uśrednienie rozwiązań dla 10 losowo wygenerowanych modeli RVE (modele belkowo-tarczowe) przy ustalonym udziale objętościowym f_p . Można zauważyć dobrą zgodność rozwiązań numerycznych, które są nieco zaniżone w stosunku do rozwiązań analitycznych.



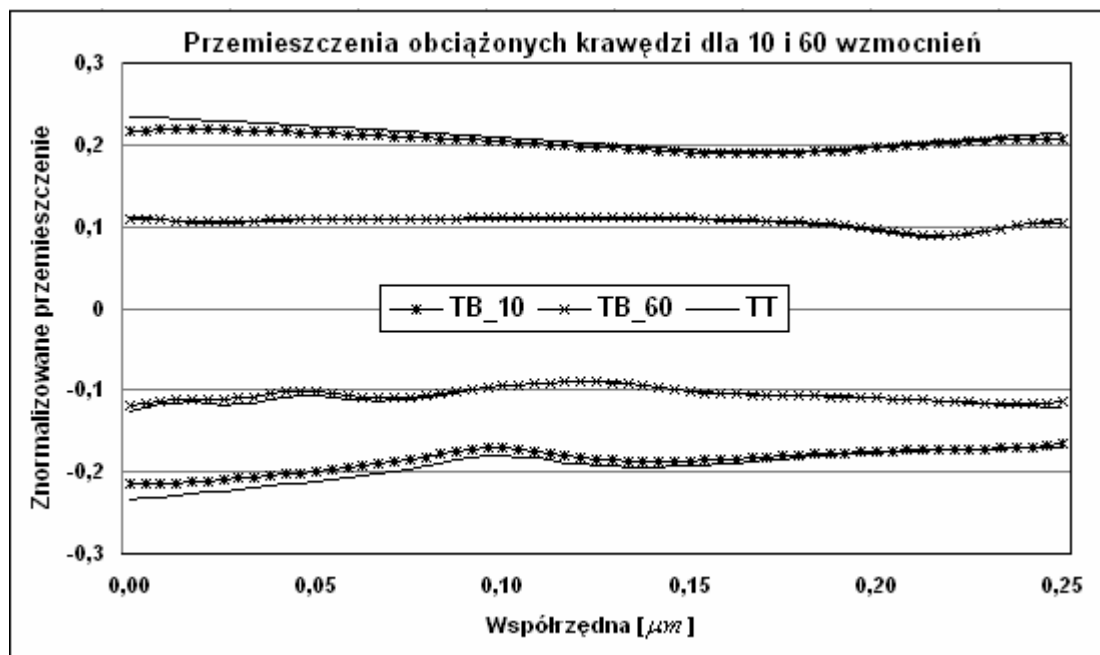
Rys. 2. Wpływ udziału objętościowego wzmocnienia na zastępczy wzdłużny moduł Younga

Następnie zbadano wpływ typu elementu wzmocnienia, przy czym zastosowano elementy belkowe (model tarcza-belka, TB) oraz elementy tarczowe (model tarcza-tarcza, TT). Typ elementu matrycy (tarcza) pozostawał ten sam w obydwu modelach. Przy danym udziale objętościowym wykonano analizę tylko jednego RVE, z tym, że położenie wzmocnień było jednakowe w obydwu rozpatrywanych modelach. Rysunek 3 przedstawia wpływ udziału objętościowego wzmocnienia na zastępczy wzdłużny moduł Younga dla rozważanych modeli. Można zauważyć niewielki wpływ rodzaju elementu skończonego na rozwiązanie.



Rys. 3. Wpływ udziału objętościowego wzmocnienia na zastępczy wzdłużny moduł Younga dla różnego typu elementu skończonego wzmocnienia

Na rys. 4 przedstawiono przemieszczenia obciążonych krawędzi modelu RVE dla różnego typu elementów skończonych wzmocnienia oraz różnej liczby wzmocnień w osnowie. Rozpatrywano przemieszczenia wzdłuż obciążonych krawędzi bocznych dla 10-ciu i 60-ciu wzmocnień. Przemieszczenia prawej i lewej krawędzi są odpowiednio dodatnie i ujemne. Wykresy otrzymano na podstawie odczytu przemieszczeń w węzłach modeli MES. Można zauważyć niewielki wpływ rodzaju elementu skończonego wzmocnienia na przemieszczenia krawędzi dla różnej liczby wzmocnień.



Rys. 4. Przemieszczenia krawędzi bocznych modelu dla 10 i 60 wzmocnień i różnego typu elementu skończonego wzmocnienia

4. Wnioski

W pracy badano wpływ udziału objętościowego oraz typu elementu skończonego wzmocnienia (belkowy lub tarczowy) na zastępczy wzdłużny moduł Younga nanokompozytu wzmocnianego nanoglankami oraz na przemieszczenia krawędzi modelu RVE tego materiału. Podsumowując wyniki analizy dla różnych modeli RVE zauważyć można, że otrzymano podobne rozwiązania w przypadku modeli belkowo-tarczowych, analizowanych połączoną MEB/MES oraz wyłącznie MES. Wskazuje to na zasadność stosowania tej pierwszej metody w modelowaniu tego rodzaju materiałów, ze względu na proste przygotowanie siatki węzłów i elementów. Rozwiązania numeryczne porównano z analitycznymi, otrzymując nieco zaniżone wartości zastępczego modułu Younga w stosunku do modelu Mori-Tanaki, który jest najodpowiedniejszy z zastosowanych modeli analitycznych do tego rodzaju materiałów.

Wyniki analizy przemieszczeń krawędzi modelu RVE oraz zastępczego wzdłużnego modułu Younga, w przypadku modelowania wzmocnienia za pomocą belkowych lub tarczowych elementów skończonych (model wyłącznie MES), są bardzo do siebie zbliżone.

Jednym z planowanych badań, jakie zostaną jeszcze przeprowadzone i dotyczące tej tematyki, jest wpływ liczby elementów skończonych na zastępczy wzdłużny moduł Younga. Drugim planowanym badaniem jest zastosowanie w modelu RVE ośmiowęzłowych elementów skończonych dla osnowy i porównanie wyników dla modelu z elementami czterowęzłowymi, z zachowaniem tego samego ułożenia wzmocnień w obydwu modelach.

Literatura

1. Kacperski M., Nanokompozyty polimerowe, *Kompozyty (Composites)* 3(2003)7.
2. Jurkowski B., Nanotechnologia i nanomateriały, Prezentacja pdf.
3. Górski R., Fedeliński P., Evaluation of effective properties of nanocomposites by the coupled BEM/FEM, *Computational Modelling and Advanced Simulations*, Bratislava, Slovak Republic (2009).

ANALIZA KONSTRUKCJI WSPORCZYCH Z UŻYCIEM OPROGRAMOWANIA MES AUTODESK ALGOR SIMULATION

MAREK FIRCYK

Mechanika i Budowa Maszyn, MB4, 5 rok

Opiekunowie naukowci: prof. dr hab. inż. Tadeusz Burczyński,
dr. inż. Wacław Kuś

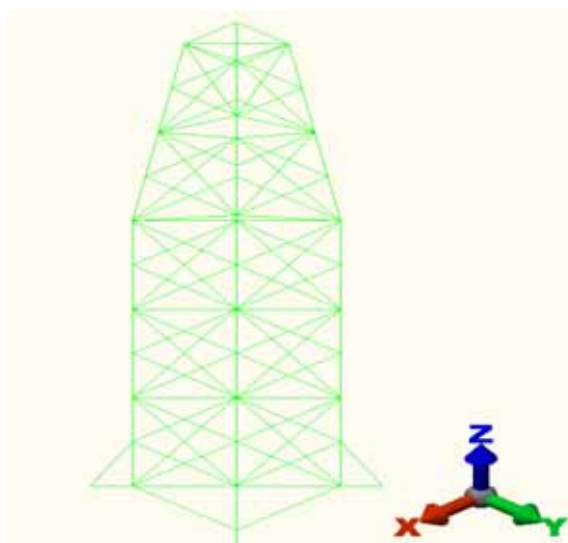


Streszczenie. Artykuł poświęcony jest analizie kratownicy za pomocą programu Autodesk Algor Simulation Professional 2010. Porównano wyniki używając elementów różnego typu.

1. Wprowadzenie

W artykule przedstawiono analizę konstrukcji stalowej [4,5] z użyciem metody elementów skończonych [6]. Do obliczeń użyto programu Autodesk Algor Simulation [1].

Analizowano kratownicę, pokazaną na rys. 1. Kratownica wykonana jest z rur stalowych o średnicy 35 mm i grubości ścianki 2,6 mm. Model kratownicy jest przytwierdzony do podłoża na końcach dolnych prętów oraz obciążony siłą ciężkości. W analizie uwzględniono oddziaływanie wiatru. Obliczenia wykonano w oparciu o normy PN-EN 1991-1-4 [3] oraz PN-77/B-02011 [2].



Rys. 1. Geometria kratownicy

2. Program Autodesk Algor Simulation Professional 2010

Program Autodesk Algor Simulation w wersji 2010 [1] to program komercyjny, który wykorzystuje metodę elementów skończonych do obliczeń wytrzymałościowych. Firma Autodesk udziela na program darmową licencję dla studentów po uprzedniej rejestracji na stronie <http://students.autodesk.com>. Program Autodesk Algor Simulation Professional 2010 jest programem służącym do analizy statycznych i dynamicznych modeli inżynierskich, można również wykorzystać go do bardziej złożonych analiz, jak przepływ cieczy, dynamika cieczy, nieliniowe statyczne i dynamiczne analizy, ruch ciała sztywnego oraz wiele innych.

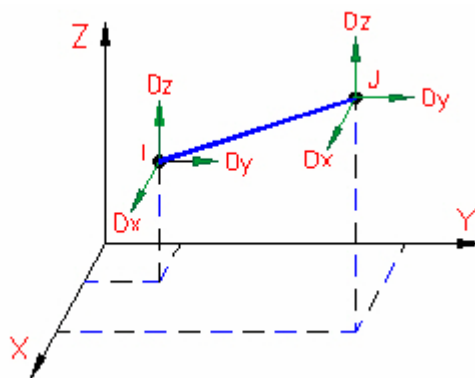
3. Elementy skończone typu kratownica i belka

Analizę konstrukcji przeprowadzono dla elementów typu: kratownica (truss) i belka (beam).

Element typu truss charakteryzuje się tym, iż pręty są tylko ściskane lub rozciągane. Nie występują momenty zginające i siły powodujące ścinanie. Na końcach elementu typu kratownica węzły posiadają 3 stopnie swobody w trójwymiarowej przestrzeni, jak pokazano na rys. 2.

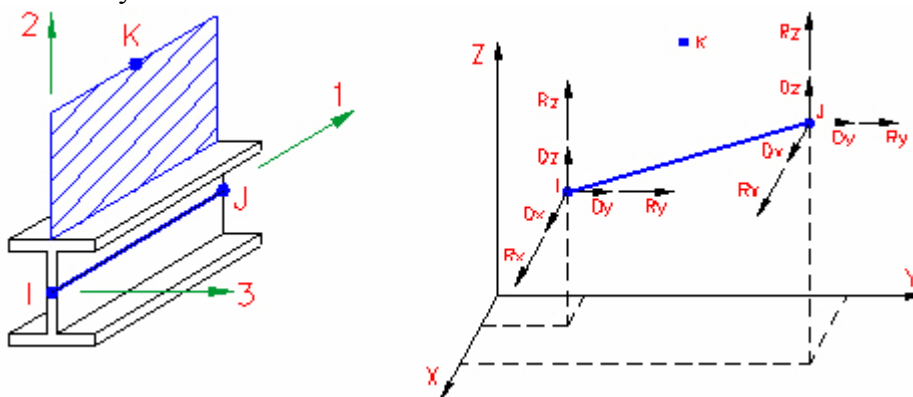
Tabela 1. Tabela przedstawiające liczbę stopni swobody węzłów danego typu elementu

Typ elementu	przemieszczenie			obrót		
	X	Y	Z	X	Y	Z
kratownica	tak	tak	tak			
belka	tak	tak	tak	tak	tak	tak
powłoka (membrana)	tak	tak	tak			
plyta	tak	tak	tak	tak	tak	
czworościan, sześciocian	tak	tak	tak			



Rys. 2. Element typu kratownica [1]

Belką nazywamy pręt, w którym oprócz ściskania i rozciągania może wystąpić zginanie momentem zginającym. Każdy element typu belka ma w węzłach 6 stopni swobody: trzy przemieszczenia i trzy obroty. Element typu belka ze wszystkimi stopniami swobody przedstawiono na rys. 3.

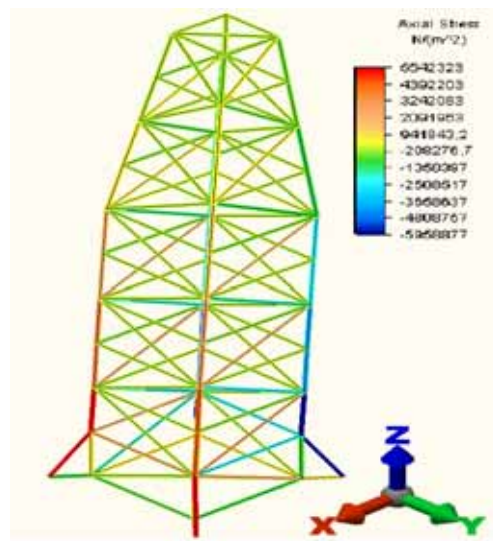


Rys. 3. Element typu belka [1]

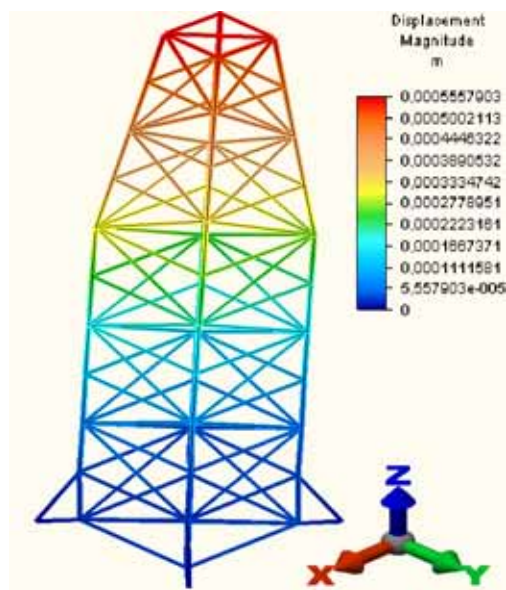
4. Analiza przykładowej kratownicy

Przyjęto, że kratownicę wykonano ze stalowych rur bez szwu o średnicy 35 mm i grubości ścianki 2,6 mm. Dla stali przyjęto moduł Younga równy $E=210 \text{ GPa}$, współczynnik Poissona $\nu=0,3$ i gęstość $\rho=7800 \text{ kg/m}^3$.

Kratownicę utwierdzono do podłoża na dolnych wzmocnieniach, odebrano wszystkie stopnie swobody w punktach najbardziej oddalonych od osi z kratownicy. Do kratownicy przyłożono siłę pionową na górnej powierzchni o wartości 200 N. Zadano całkowite obciążenie wiatrem, które wynosi 1477 N. Obciążenie od wiatru nałożono na konstrukcję w kierunku osi x. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono wyniki obliczeń analizy dla elementu typu kratownica (truss). Przeprowadzono również analizę konstrukcji z użyciem elementów belkowych. W tabeli 2 przedstawiono wyniki dla obu typów elementów.



Rys. 4. Naprężenia normalne



Rys. 5. Przemieszczenia w osi x

Tabela 2. Wyniki obliczeń dla dwóch typów elementów

Typ elementu	Maksymalne przemieszczenie (oś x)	Maksymalne przemieszczenie (oś z)	Naprężenia normalne
Kratownica (truss)	0,553 mm	0,064 mm	5,54 MPa
Belka (beam)	0,532 mm	0,063 mm	5,51 MPa

5. Wnioski

W elemencie typu kratownica nie występuje zginanie prętów, lecz występują naprężenia osiowe (rozciąganie i ściskanie), tym samym w obliczeniach nie uwzględnia się innych naprężeń powstających w elementach konstrukcji. W elemencie typu belka pręty są zginane pod wpływem działania wiatru. Można zauważyć, że największe naprężenia jakie powstają w modelu kratownicy są na prętach pionowych w dolnej części kratownicy. Obciążenie siłą wiatru obliczoną według normy ma znaczący wpływ na obciążenie modelu kratownicy. W obu przypadkach dla dobranego materiału stali nie zostały przekroczone naprężenia dopuszczalne dla zastosowanego materiału.

Literatura

1. Autodesk Algor Simulation, pliki pomocy programu, (2009).
2. Norma PN-77/B-02011.
3. Norma PN-EN 1991-1-4: 2008.
4. Łubiński M., Żółtowski W., Konstrukcje metalowe, część II, Arkady (2008).
5. Praca zbiorowa, Poradnik mechanika, REA, (2009).
6. Łodygowski T., Kąkol W., Metoda elementów skończonych w wybranych zagadnieniach mechaniki konstrukcji inżynierskich, Politechnika Poznańska (2003).

WYBRANE ZAGADNIENIA IDENTYFIKACJI W UKŁADACH TERMICZNYCH ZA POMOCĄ ALGORYTMÓW EWOLUCYJNYCH ORAZ METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

PAWEŁ GOCYŁA

Mechanika i Budowa Maszyn, MB4, 5 rok

Opiekunowie naukowci: prof. dr hab. inż. Ewa Majchrzak,
dr. inż. Adam Długosz



Streszczenie. W artykule opisano zagadnienia związane z identyfikacją warunków brzegowych w tarczy dwuwymiarowej za pomocą algorytmu genetycznego GAToolbox [1] przy użyciu metody elementów skończonych. W tym celu skorzystano z programu MSC.Marc/Mentat [2] oraz języka skryptowego Python. Przedstawiono przykładowe zadanie ilustrujące sposób działania algorytmu.

1. Wprowadzenie

Często w układach termicznych bardzo trudne lub wręcz niemożliwe jest bezinwazyjne zbadanie panujących wewnątrz warunków. Z pomocą przychodzą nam algorytmy genetyczne, które w połączeniu z programami wykorzystującymi metodę elementów skończonych, są bardzo dobrym narzędziem do identyfikacji oraz optymalizacji np. kształtu obiektu, warunków brzegowych itp.

2. Metoda elementów skończonych dla ustalonego przewodzenia ciepła

Równanie metody elementów skończonych dla ustalonego przepływu ciepła można wyprowadzić z tzw. metody odchylek ważonych dla równania Poissona. Po zastosowaniu twierdzenia Greena (opisującego zależność między całką krzywoliniową skierowaną po krzywej zamkniętej Γ a całką podwójną po obszarze płaskim Ω ograniczonym tą krzywą), równanie MES ma postać [3]:

$$\begin{aligned} \iint_{\Omega} \lambda \left[\frac{\partial T(x,y)}{\partial x} \frac{\partial w(x,y)}{\partial x} + \frac{\partial T(x,y)}{\partial y} \frac{\partial w(x,y)}{\partial y} \right] dx dy \\ = \int_{\Gamma} \lambda \frac{\partial T(x,y)}{\partial n} w(x,y) d\Gamma + \iint_{\Omega} Q(x,y) w(x,y) dx dy \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie: λ jest współczynnikiem przewodzenia ciepła, $Q(x,y)$ – wydajnością wewnętrznych źródeł ciepła, T oznacza temperaturę, (x,y) – współrzędne przestrzenne, $\frac{\partial T}{\partial n}$ to pochodna w kierunku normalnym w punkcie brzegowym (x,y) , $w(x,y)$ jest funkcją wagi.

Na brzegu rozpatrywanego obszaru należy uwzględnić zadane warunki brzegowe Dirichleta, Neumanna lub Robina.

W celu rozwiązania równania (1) należy dokonać dyskretyzacji wnętrza Ω oraz brzegu Γ . Obszar Ω dzieli się na elementy skończone (najczęściej trójkąty) i węzły umieszcza się ich wierzchołkach. Całki po obszarze Ω w równaniu (1) zastępuje się sumą całek po elementach

wewnętrznych (Ω_e), natomiast całki po brzegu Γ – sumą całek po fragmentach brzegu (Γ_e). Otrzymuje się następujące równanie

$$\sum_{(e)} \iint_{\Omega_e} \lambda \left[\frac{\partial T(x,y)}{\partial x} \frac{\partial w(x,y)}{\partial x} + \frac{\partial T(x,y)}{\partial y} \frac{\partial w(x,y)}{\partial y} \right] dx dy \quad (2)$$

$$= \sum_{(e)} \int_{\Gamma_e} \lambda \frac{\partial T(x,y)}{\partial n} w(x,y) d\Gamma + \sum_{(e)} \iint_{\Omega} Q(x,y) w(x,y) dx dy$$

Pierwszą całkę w powyższym równaniu możemy zapisać jako:

$$\iint_{\Omega_e} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial y} \right] dx dy = [\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3] \mathbf{K}^{(e)} [T_1 \ T_2 \ T_3]^T \quad (3)$$

gdzie: $\mathbf{K}^{(e)} = \lambda^{(e)} (\mathbf{X} + \mathbf{Y}) / (4\Delta)$ jest macierzą przewodności cieplnej elementu, Δ polem trójkąta (elementu skończonego), $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ to współczynniki, T_1, T_2, T_3 są nieznanymi wartościami temperatury w wierzchołkach trójkąta.

Całkę związaną z funkcją źródła z równania (1) przedstawimy w następujący sposób:

$$\iint_{\Omega_e} Q(x,y) w(x,y) dx dy = [\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3] \mathbf{Z}^{(e)} \quad (4)$$

gdzie $\mathbf{Z}^{(e)} = Q^{(e)} / 3$ jest macierzą na elemencie (e) związaną z funkcją źródła.

Całkę po brzegu występującą w równaniu (2) możemy wyrazić poprzez funkcje kształtu:

$$\int_{\Gamma_e} \lambda \frac{\partial T(x,y)}{\partial n} w(x,y) d\Gamma = \lambda^{(e')} [\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3] \int_{\Gamma_e} \frac{\partial T}{\partial n} [N_1 \ N_2 \ N_3]^T d\Gamma \quad (5)$$

gdzie N_1, N_2, N_3 to funkcje kształtu. W tej całce należy uwzględnić warunki brzegowe.

Po obliczeniu odpowiednich całek, należy utworzyć układ rozwiązujący, w którym niewiadomymi są temperatury we wszystkich węzłach obszaru. Układ ten równań można zapisać w następującej postaci:

$$\mathbf{A} * \mathbf{T} = \mathbf{C} \quad (6)$$

gdzie: \mathbf{T} to macierz nieznanych temperatur, \mathbf{A} jest sumą macierzy przewodności cieplnych dla poszczególnych elementów, \mathbf{C} jest wektorem zawierającym informacje związane z funkcjami źródła dla poszczególnych elementów oraz z warunkami brzegowymi.

3. Algorytmy genetyczne

Algorytmy genetyczne wykonują wielokierunkowe przeszukiwanie poprzez modyfikację populacji potencjalnych rozwiązań. Prowadzi to do zbierania informacji genetycznej i jej wymiany między tymi kierunkami. Populacja podlega symulowanej ewolucji, przez co w każdym następnym pokoleniu „dobre” rozwiązania reprodukują się a „złe” wymierają. Aby

rozróżnić rozwiązania, używamy funkcji celu (oceny), która odgrywa rolę środowiska [4]. Działanie klasycznego algorytmu genetycznego jest oparte na następujących krokach [5]:

- inicjacja (wybór początkowej populacji chromosomów),
- ocena przystosowania chromosomów w populacji,
- selekcja chromosomów,
- zastosowanie operatorów genetycznych (krzyżowanie i mutacja),
- utworzenie nowej populacji.

4. Przykład zastosowania algorytmu genetycznego w połączeniu z MES

Rozpatrywano ustalony, bezźródłowy ($Q=0$) przepływ ciepła w tarczy wykonanej z miedzi, dla której współczynnik przewodzenia ciepła wynosi $\lambda=401$ W/(mK). Wymiary obiektu pokazano na rysunku 1a, natomiast sposób przyłożenia warunków brzegowych ilustruje rysunek 1b.

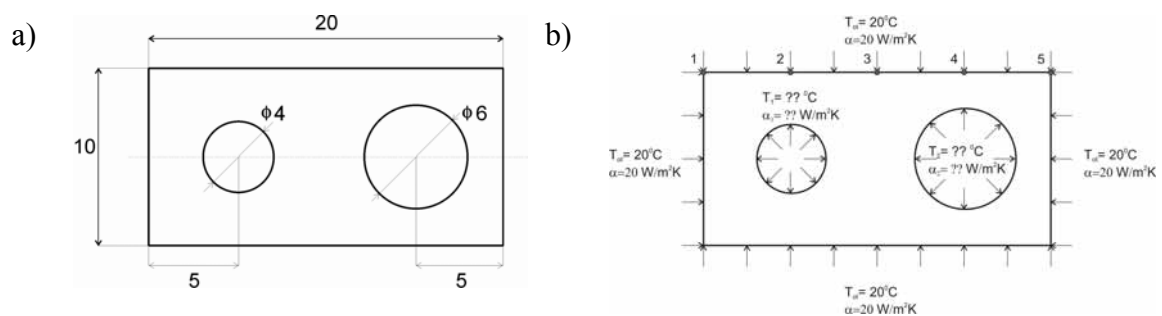
Celem identyfikacji było wyznaczenie współczynników wymiany ciepła α_1, α_2 oraz temperatur otoczenia T_1, T_2 występujących w warunku brzegowym Robina zadanym na powierzchniach otworów (rys. 1b). Znana była temperatura otoczenia oraz współczynnik wymiany ciepła na zewnętrznej powierzchni tarczy oraz temperatury zmierzone w miejscach pomiarowych.

Funkcja celu ma postać:

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^5 |\hat{T}_i - T_i| \quad (7)$$

gdzie: $\mathbf{X}=(\alpha_1, T_1, \alpha_2, T_2)$, \hat{T}_i to znana temperatura zmierzona w i -tym punkcie pomiarowym, T_i to obliczona temperatura w tych punktach. Położenie punktów pomiarowych (1-5) ilustruje rys. 1b. Ponieważ model jest symetryczny, punkty pomiarowe znajdowały się tylko z jednej strony układu. W zadaniu dążono do minimalizacji funkcji (7).

Do rozwiązania zadania bezpośredniego dla zadanych identyfikowanych wartości parametrów wykorzystano metodę elementów skończonych. Badany model podzielono na elementy skończone typu TRIA3 (element trójkątny z liniową funkcją kształtu).



Rys. 1. Badany model:

a) kształt i wymiary obszaru, b) sposób zadania warunków brzegowych

W wyniku wcześniejszego testowania opracowanego algorytmu na funkcji Schaffera F6 [4], przyjęto następujące parametry algorytmu genetycznego:

- liczba osobników w populacji: 20,
- liczba populacji: 40,

- krzyżowanie: jednorodne o prawdopodobieństwie 0,7,
- mutacja: selektywna o prawdopodobieństwie 0,15.

Sposób działania algorytmu jest następujący. Algorytm genetyczny, po wygenerowaniu osobnika, przekazuje jego geny (odpowiednio: T_1 , α_1 , T_2 , α_2) do programu MSC.MARC. Dane te są termicznymi warunkami brzegowymi III rodzaju i stanowią potencjalne rozwiązanie. Następnie dokonywana jest analiza dla tych wartości, po której następuje porównanie temperatur w punktach pomiarowych. Jeżeli różnica pomiędzy temperaturą zmierzoną (\bar{T}_i) a temperaturą będącą wynikiem analizy (T_i) dla wszystkich punktów pomiarowych jest bliska zeru, to znaczy, że algorytm zidentyfikował warunki panujące wewnątrz tarczy. Jeżeli wartość funkcji celu jest większa od zera, znaczy to, że parametry nie zostały poprawnie zidentyfikowane i wówczas wywoływane są odpowiednie operacje genetyczne (mutacja, krzyżowanie), po czym generowana jest nowa populacja, dla której ponownie dokonywana jest analiza MES.

W tabeli 1 zawarto wyniki identyfikacji.

Tabela 1. Wyniki działania algorytmu genetycznego

L.p.	Warunki brzegowe (geny)				Wyniki					Wartość funkcji celu
	T_1	α_1	T_2	α_2	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	$f(X)$
	70	30	40	40	25,2*	32,5*	30*	28*	23,2*	0
1.	70,06	26,44	52,12	12,65	25,00	32,19	30,33	28,39	23,23	1,25
2.	67,33	36,41	36,77	96,14	25,28	32,62	29,72	27,91	23,27	0,63
3.	61,28	58,08	37,44	68,71	25,26	32,53	29,69	27,84	23,21	0,57

* - wartości temperatur w miejscach pomiarowych (T_i) określone dla danych warunków brzegowych

5. Wnioski

Algorytmy genetyczne nie gwarantują, że uzyskane wyniki są optymalne. Jednak przez losowy wybór osobników można minimalizować prawdopodobieństwo błędu. Dla kolejnych wywołań programu uzyskano porównywalne wyniki temperatur, jednak różnice pomiędzy wartościami poszczególnych genów były znaczne (różnica nawet 140% dla α_2). Stąd wniosek, że dla rozpatrywanego zadania nie istnieje jednoznaczne rozwiązanie. Zwiększenie liczby punktów pomiarowych również nie wpłynęło na poprawę wyników identyfikacji.

Literatura

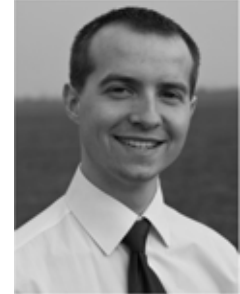
1. Single and Multiobjective Genetic Algorithm Toolbox in C++, IlliGAL Report No. 2007016, Kumara Sastry.
2. Marc® Python 2007 r1, Tutorial and Reference Manual.
3. Majchrzak E., Mochnicki B., Metody numeryczne: Podstawy teoretyczne, aspekty praktyczne i algorytmy, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej (2004).
4. Michalewicz Z., Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa (1996).
5. Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L., Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa (1999).

ZASTOSOWANIE METODY SUPERPOZYCJI MODALNEJ DO BADANIA PRZEMIESZCZEŃ MODELI MES DRGAJĄCYCH BELEK

PIOTR GOCYŁA

Automatyka i Robotyka, AB3, 5 rok

Opiekunowie naukowci: dr hab. inż. Piotr Fedeliński, Prof. Pol. Śląskiej,
dr inż. Grzegorz Dziatkiewicz



Streszczenie. Metody numeryczne bezpośredniego całkowania równań ruchu MES wymagają dokonania dużej liczby działań algebraicznych w każdym kroku obliczeń. Jeżeli istnieje konieczność badania układu w znacznie dłuższym czasie, bardziej wydajnym podejściem do analizy drgań jest metoda superpozycji modalnej. W niniejszej pracy metoda superpozycji modalnej została zastosowana w analizie przemieszczeń modeli MES drgających belek, wykorzystując do tego celu autorski program komputerowy. W artykule porównano czasy obliczeń dla modeli pełnych i zredukowanych oraz dokonano oceny otrzymanych wyników.

1. Wprowadzenie

Równania ruchu Metody Elementów Skończonych (MES) bez uwzględnienia tłumienia można przedstawić następująco [2]:

$$M\ddot{u} + Ku = F \quad (1)$$

gdzie:

M – globalna macierz bezwładności układu,

K – globalna macierz sztywności układu,

\ddot{u} – wektor przyspieszeń węzłowych,

u – wektor przemieszczeń węzłowych,

F – wektor sił węzłowych.

Równanie (1) można również zapisać w postaci równań w tzw. przestrzeni stanu [1]:

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \ddot{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \dot{u} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}F \end{bmatrix} \Leftrightarrow \dot{v} = Av + f \quad (2)$$

gdzie:

\dot{v} – wektor pochodnych stanu,

v – wektor stanu zawierający przemieszczenia i prędkości węzłowe,

A – tzw. macierz systemowa układu,

f – wektor wymuszeń.

Równania (2) są równaniami stanu reprezentującymi model matematyczny badanego układu dynamicznego. Równania (2) są rzędu pierwszego, więc w celu ich rozwiązania można stosować znane metody numeryczne [1]. W niniejszym artykule rozpatrywano modele belek dyskretyzowane za pomocą dwuwęzłowych elementów skończonych typu Hermite'a, o dwóch stopniach swobody w każdym węźle. Przyjęto konsyistentną macierz bezwładności, która bardzo dobrze opisuje rozkład mas w poszczególnych elementach w przeciwieństwie do macierzy diagonalnej i granulowanej [2].

2. Metoda superpozycji modalnej

Metoda ta jest jednym ze sposobów redukcji rzędu modeli MES. Polega ona na zastąpieniu badanego modelu, przedstawionego za pomocą równań stanu, modelem transformowanym. W artykule rozpatrzono transformację [2]:

$$u = Px \quad (3)$$

gdzie:

- u – wektor przemieszczeń węzłowych,
- P – macierz transformacji,
- x – wektor współrzędnych uogólnionych.

Wstawiając zależność (3) do (1) oraz mnożąc lewostronnie otrzymane równanie przez P^T , otrzymuje się:

$$\tilde{M}x + \tilde{K}x = \tilde{F} \quad (4)$$

gdzie:

$$\tilde{M} = P^T M P, \quad \tilde{K} = P^T K P, \quad \tilde{F} = P^T F. \quad (5)$$

Macierz P dobiera się tak, aby transformacje (5) zapewniły zmniejszenie szerokości pasm macierzy bezwładności i sztywności [2]. Istnieje kilka możliwości doboru macierzy P mających taką własność. Najczęściej do tego celu wykorzystuje się rozwiązania problemu własnego dla drgań swobodnych bez tłumienia:

$$M\ddot{u} + Ku = 0. \quad (6)$$

Dla powyższego równania rozwiązanie harmoniczne ma postać:

$$u = \Phi \sin \omega t, \quad (7)$$

gdzie:

- Φ – wektor amplitud drgań własnych węzłów układu,
- ω – częstość drgań własnych.

Wstawiając równanie (7) do (6) można sformułować uogólniony problem własny:

$$K\Phi = \omega^2 M\Phi, \quad (8)$$

Rozwiązaniem tego problemu są pary $(\omega_1^2, \Phi_1, \omega_2^2, \Phi_2, \dots, \omega_N^2, \Phi_N)$, przy czym przyjęto $0 \leq \omega_1^2 \leq \omega_2^2 \leq \dots \leq \omega_N^2$. Wektor $\Phi_\alpha = \{\phi_{1\alpha} \dots \phi_{N\alpha}\}$ nazywany jest α -postacią drgań własnych, natomiast ω_α odpowiadającą jej częstością drgań [2].

Macierz transformacji P można wyznaczyć rozwiązując zagadnienie własne odpowiednio przekształconego uogólnionego problemu własnego (8):

$$A\Phi = \lambda\Phi, \quad (9)$$

gdzie:

$$A = M^{-1}K, \quad \lambda = \omega^2 \quad (10)$$

Każdej wartości własnej otrzymanej z rozwiązania zagadnienia własnego równania (9) odpowiada pewien wektor własny [2]. Z wektorów własnych tworzy się macierz P , przy czym liczba kolumn macierzy P równa liczbie postaci, wpływa na dokładność metody, co zostanie zbadane w niniejszej pracy. Wtedy $P = [\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_m]$, gdzie m oznacza rząd modelu zredukowanego.

Równania stanu dla modelu zredukowanego można zapisać jako:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\tilde{M}^{-1} \cdot \tilde{K} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \tilde{M}^{-1} \cdot \tilde{F} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \dot{x} = \tilde{A} \cdot x + \tilde{f} \quad (11)$$

W celu oceny jakości modeli zredukowanych obliczono błąd średniokwadratowy przebiegów przemieszczeń względem modelu pełnego. Błąd średniokwadratowy MSE jest wartością oczekiwaną kwadratu błędu:

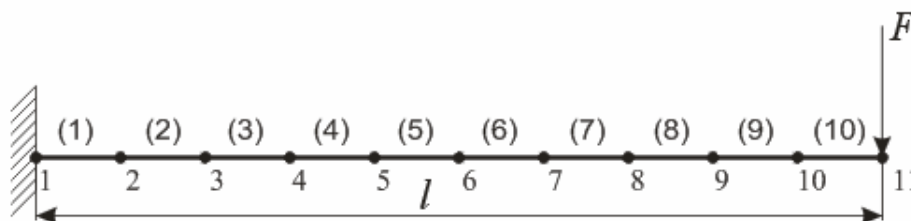
$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - X_i^{zred})^2 \quad (12)$$

gdzie:

- n – rozmiar wektora,
- X_i – przemieszczenie i -te dla modelu pełnego,
- X_i^{zred} – przemieszczenie i -te dla modelu zredukowanego.

3. Przykład numeryczny zastosowania metody superpozycji modalnej

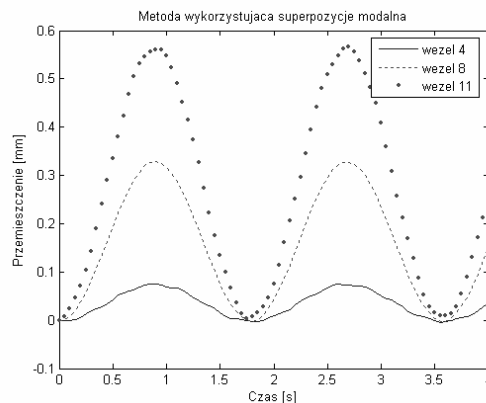
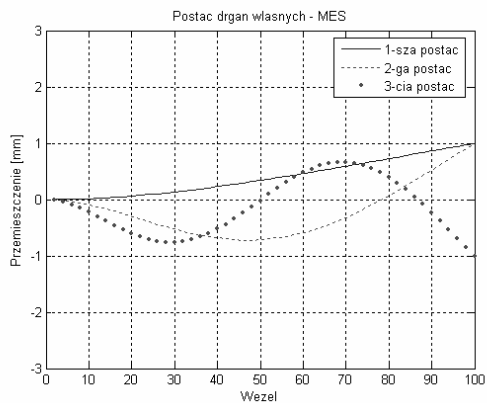
W ramach artykułu rozpatrzono belkę wspornikową wykonaną ze stali, dla której przyjęto wartość modułu Younga równą 210 [GPa] oraz gęstość 7860 [kg/m³]. Długość analizowanej belki wynosiła 1 [m], natomiast przekrój poprzeczny 0,025 x 0,025 [m]. Wartość siły była równa 100 [N].



Rys. 1. Belka wspornikowa – dyskretyzacja za pomocą 10-ciu elementów skończonych

Dla belki, podpartej i obciążonej jak pokazano na rys. 1. obliczono przemieszczenia pionowe w miejscu przyłożenia siły. W celu lepszego zobrazowania różnic pomiędzy modelem pełnym a zredukowanym wykorzystano modele MES o różnej dyskretyzacji. Przyjęto zmienność siły typu funkcja Heaviside'a. Czas obserwacji wyniósł 4 [s], natomiast krok całkowania – 0,05 [s]. Całkowania numerycznego równań (2) oraz (11) dokonano za pomocą metody Rungego-Kutty czwartego rzędu.

Wyniki porównania obliczeń dla modeli pełnych i zredukowanych zamieszczono w tabeli 1. Natomiast na rys. 2. przedstawiono pierwsze trzy postaci drgań własnych belki wspornikowej, jako wynik rozwiązania zagadnienia własnego oraz przemieszczenia trzech wybranych węzłów belki.



Rys. 2. Pierwsze trzy postaci drgań własnych belki wspornikowej oraz przemieszczenia dla trzech wybranych węzłów belki

Tabela 1. Porównanie wyników otrzymanych dla modelu pełnego i zredukowanego

Liczba elementów	Czas obliczeń dla modelu pełnego [s]	Liczba postaci	Czas obliczeń dla modelu zredukowanego [s]	Błąd MSE [%]
5	97,4	1	0,2	$1,02 \cdot 10^{-6}$
		2	1,2	$1,17 \cdot 10^{-8}$
		3	3,5	$3,35 \cdot 10^{-9}$
10	425,9	1	0,2	$1,85 \cdot 10^{-6}$
		2	1,2	$2,53 \cdot 10^{-8}$
		3	3,4	$7,96 \cdot 10^{-8}$
20	2014,8	1	0,2	$2,85 \cdot 10^{-6}$
		2	1,2	$5,60 \cdot 10^{-8}$
		3	3,7	$3,90 \cdot 10^{-9}$

4. Wnioski

Wyznaczając przebieg przemieszczenia ostatniego węzła belki w czasie porównano modele w przestrzeni stanu: model pełny oraz model zredukowany za pomocą metody superpozycji modalnej. Model zredukowany stosuje się wtedy, gdy liczba wykonywanych działań algebraicznych jest zbyt duża, aby efektywnie wykonywać wielokrotne analizy lub gdy istnieje konieczność badania układu w znacznie dłuższym czasie.

Na podstawie obliczonego błędu średniokwadratowego (MSE) rozwiązania modelu zredukowanego względem pełnego można wywnioskować, że za pomocą obu metod uzyskano niemalże identyczne wyniki. Jednak czas obliczeń był nieporównywalnie krótszy w przypadku modelu zredukowanego. Nawet dla modelu zredukowanego za pomocą jednej postaci drgań uzyskano zbliżone przebiegi wykresów przemieszczeń, co świadczy o wysokiej skuteczności tej metody redukcji rzędu modelu, w analizowanym przypadku. Analogicznie wnioski otrzymano w przypadku badania przemieszczeń innych węzłów belki.

Literatura

1. Awrejcewicz J., Drgania deterministyczne układów dyskretnych, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa (1996).
2. Kacprzyk Z., Rakowski G., Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa (1993).

ANALIZA SKRĘTNYCH DRGAŃ WŁASNYCH WAŁU KORBOWEGO

MARCIN HAUFFE

Automatyka i Robotyka, AB3, 4 rok

Opiekun naukowy: dr inż. Grzegorz Dziatkiewicz



Streszczenie. Przedmiotem artykułu jest zastosowanie i implementacja metody elementów skończonych do analizy skrętnych drgań własnych wału korbowego silnika spalinowego. Analizie poddano wpływ wartości masowych momentów bezwładności kół zamachowych, typu macierzy bezwładności, jak i gęstości dyskretyzacji na wartości częstotliwości oraz postaci drgań własnych układu. Obliczenia przeprowadzono autorskim programem dla dużego silnika diesla napędzającego generator prądu oraz pracującego z prędkością obrotową 500 obr/min.

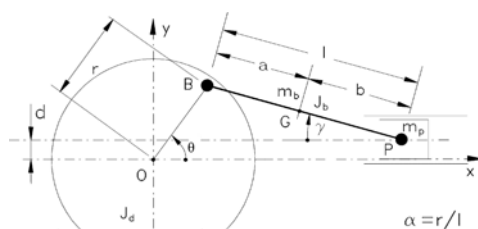
1. Wprowadzenie

Podczas pracy silnika spalinowego, występują naprężenia spowodowane skręcaniem wału korbowego. Miejsca występowania maksymalnych naprężeń zmieniają się wraz ze zmianą prędkości obrotowej wału, co decydująco wpływa na jego konstrukcję. Obliczenia częstości drgań własnych są kluczowe dla analizy występowania zjawiska rezonansu podczas pracy silnika. Drgania rezonansowe mają bardzo dużą amplitudę, co może doprowadzić do zniszczenia układu. Aby zapobiec wystąpieniu zjawiska rezonansu podczas rozruchu i pracy silnika konieczne jest przesunięcie częstości drgań własnych powyżej jego prędkości roboczej. Jeśli natomiast nie da się tego osiągnąć, należy sprowadzić je do takiego poziomu, aby były oddalone wystarczająco daleko od prędkości roboczej oraz by przejście przez strefę rezonansu było jak najszybsze [3].

2. Uproszczony model układu korbowego

W niniejszej pracy cały układ korbowy został sprowadzony do takiej postaci, aby jego analiza MES była jak najprostsza, co wiązało się z budową modelu jednowymiarowego. Algorytm MES polega na podziale analizowanego pręta na pewną liczbę elementów skończonych, która determinuje dokładność wyników. Każdy z elementów skończonych charakteryzuje się współczynnikiem sztywności oraz masowym momentem bezwładności. Współczynniki te agreguje się do macierzy sztywności oraz bezwładności, opisujących globalnie analizowany układ. Macierz sztywności przyjmuje standardową postać dla pojedynczego elementu skończonego, natomiast macierz bezwładności może przyjmować postać macierzy granulowanej bądź konsystentnej [1]. Główna różnica pomiędzy nimi polega na tym, iż macierz granulowana powstaje przez skupienie masy elementu skończonego na końcach elementu (w węzłach), przy ciągłym rozkładzie masy w macierzy konsystentnej [1]. Stąd pojawia się różnica również w budowie macierzy. Globalna granulowana macierz bezwładności przybiera postać diagonalną, podczas gdy macierz konsystentna trójdiagonalna, tak jak macierz sztywności. Wiadomo również, że użycie macierzy konsystentnej zamiast granulowanej skutkuje zazwyczaj poprawą dokładności wyników [1]. Sam proces budowy zastępczego modelu do analizy numerycznej drgań własnych układu korbowego składa się z kilku operacji, których prawidłowe wykonanie jest niezbędne dla kolejnych kroków obliczeń.

Pierwszym etapem jest obliczenie mas m_1 i m_2 , skupionych odpowiednio w punktach B (wykorbieniu wału) i P (sworzniu łączącym korbówód z tłokiem) – zgodnie z rysunkiem 1 – oraz masowego momentu bezwładności J_0 korbowodu.



Rys. 1. Szkic układu korbowego [2]

Aby poprawnie stworzyć model korbowodu, masy m_1 i m_2 po zsumowaniu muszą być równe rzeczywistej masie korbowodu, a moment bezwładności i środek masy identyczne jak w analizowanym przypadku. Zastępczy masowy moment bezwładności całego układu korbowego związanego z jednym tłokiem (J_z) może zostać wyrażony wzorem (1) [2]:

$$J_z = J_w + m_1 \cdot r^2 + a_0 \cdot (m_2 + m_T) \cdot r^2 + J_0 \cdot c_0 \quad (1)$$

gdzie współczynniki a_0 i c_0 są rozwinięciami funkcji kąta obrotu wału korbowego w szeregi Taylora, J_w jest masowym momentem bezwładności wykorbienia, a m_T to masa tłoka.

Następnie oblicza się zastępczą długość elementu wału (l_z). Do tego celu służą między innymi dwa rodzaje równań: Taylora i Cartera [2]. Równanie Cartera używane jest do obliczeń dla szybkich silników spalinowych, równanie Taylora natomiast dla dużych silników diesla i to właśnie ono zostało wykorzystane w tej pracy. Znając długość elementu oblicza się jego sztywność na skręcanie. Do tego celu stosuje się wzór:

$$k = \frac{G \cdot J_z}{l_z} \quad (2)$$

gdzie J_z – zastępczy masowy moment bezwładności, a G – moduł Kirchoffa materiału wału.

Tak obliczone wartości pozwalają na budowę modelu MES. W ramach niniejszej pracy, w odróżnieniu od [2], gdzie dokonano obliczeń metodą sztywnych elementów skończonych, wykorzystano metodę elementów skończonych. Jej użycie jest korzystniejsze ze względu na dokładność otrzymywanych wyników, dzięki uwzględnieniu masy oraz sztywności każdego elementu układu. Model do analizy MES przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Zastępczy model MES wału silnika spalinowego

3. Przykład analizy układu korbowego

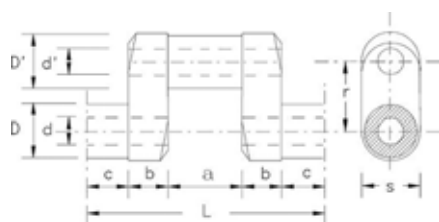
Przykładowych obliczeń częstości oraz postaci skrętnych drgań własnych dokonano dla spalinowego silnika diesla napędzającego generator prądu elektrycznego charakteryzującego się następującymi parametrami:

- średnica cylindra: $\varnothing = 300\text{mm}$
- pole tłoka: $A = 706,8\text{cm}^2$
- prędkość robocza: $\Omega = 500 \text{ obr/min}$
- skok tłoka: $2r = 450\text{mm}$
- kolejność zapłonu: 1-5-3-6-2-4
- masa tłoka: $m_T = 70.5\text{kg}$

- długość korbowodu: $l = 950\text{mm}$
- masa korbowodu: $m_b = 100.6\text{ kg}$
- odległość a : $a = 270\text{mm}$ (rys. 1)
- masowy moment bezwładności korbowodu: $J_k = 16.383\text{ kgm}^2$

Wymiary geometryczne wału korbowego (oznaczenia zgodne z rysunkiem 3):

- $a = 136\text{mm}$
- $b = 92\text{ mm}$
- $c = 73\text{ mm}$
- $D = 240\text{ mm}$
- $d = 80\text{ mm}$
- $D' = 230\text{ mm}$
- $d' = 80\text{ mm}$
- $s = 400\text{ mm}$
- masowy moment bezwładności wykorbienia: $J_w = 14.880\text{ kgm}^2$
- masowy moment bezwładności koła zamachowego (silnika): $J_7 = 98\text{ kgm}^2$
- sztywność na skręcanie koła zamachowego (silnika): $k_7 = 66 \times 10^6\text{ Nm/rad}$
- masowy moment bezwładności koła zamachowego (generatora): $J_8 = 49\text{ kgm}^2$
- sztywność na skręcanie koła zamachowego (generatora): $k_8 = 15 \times 10^6\text{ Nm/rad}$

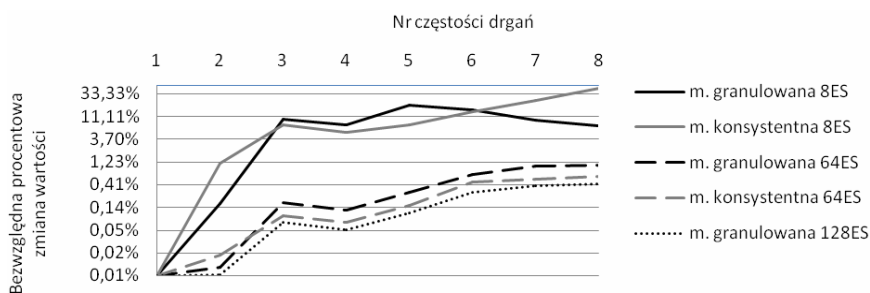


Rys. 3. Symboliczne wymiary wykorbienia wału korbowego [2]

Wykonując obliczenia zastępczego masowego momentu bezwładności, długości elementu wału oraz sztywności na skręcanie otrzymano następujące wartości:

- zastępcza długość elementu wału (l_z) równa 515.6 mm ,
- współczynniki sztywności:
[21.67 22.31 22.31 22.31 22.31 22.31 99.31 49.67] Nm/rad
- masowe momenty bezwładności:
[51.68 51.68 51.68 51.68 51.68 51.68 66.00 15.00] $\times 10^6\text{ kgm}^2$.

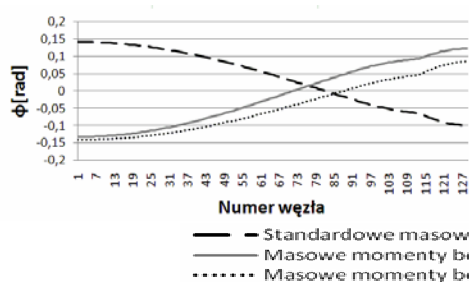
Dane te zastosowano do analizy numerycznej, a wyniki przedstawiono w formie wykresów.



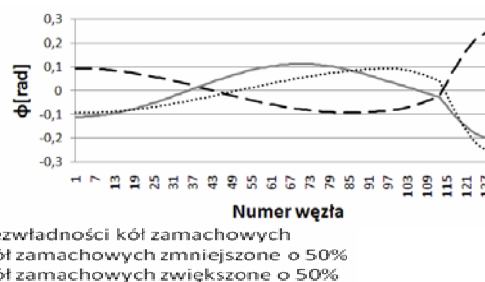
Rys. 4. Wpływ gęstości dyskretyzacji i typu macierzy bezwładności na zmianę wartości częstości drgań własnych

Wiadomo, że im większa gęstość dyskretyzacji, tym otrzymane wyniki są dokładniejsze. Co więcej wykorzystanie konsystentnej macierzy bezwładności poprawia dokładność obliczeń. Dlatego też do wygenerowania wykresów za punkt odniesienia przyjęto wyniki uzyskane dla najgęstszej z użytych dyskretyzacji (128ES) oraz macierzy konsystentnej. Analizując rys. 4 można stwierdzić, że obliczone przez program wartości częstości drgań własnych dla 8 postaci dla 8ES różniły się nawet o 35% względem najdokładniejszych. Ponadto obliczenia wykonane dla konsystentnej macierzy bezwładności pozwalają na uzyskanie wyników zawyżonych, natomiast macierzy granulowanej niższych porównując do

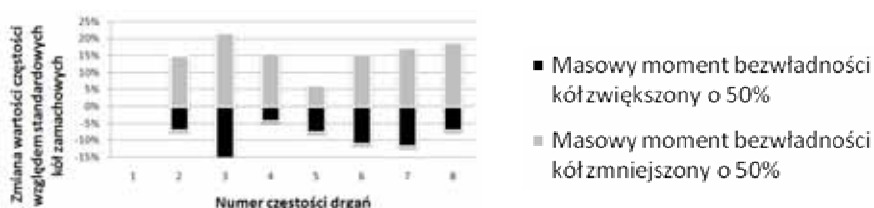
punktu odniesienia. Korzystna może okazać się zatem dwukrotna analiza z wykorzystaniem dwóch różnych typów macierzy bezwładności, gdyż powinna wykazać przedział, w którym będzie znajdować się wartość rzeczywista częstości drgań własnych.



Rys. 5. Druga postać drgań własnych w zależności od wymiarów kół zamachowych



Rys. 6. Trzecia postać drgań własnych w zależności od wymiarów kół zamachowych



Rys. 7. Zmiana wartości częstości drgań własnych ze względu na zmianę masowego momentu bezwładności kół zamachowych

Jednym ze sposobów przesunięcia częstości drgań własnych jest zmiana wymiarów kół zamachowych. Rys. 7 przedstawia zmiany częstości drgań własnych, a rys. 5 i 6 wybrane postaci w zależności od masowego momentu bezwładności kół zamachowych. Zmniejszenie tego parametru o 50% powoduje podniesienie częstości drgań własnych, podczas gdy zwiększenie obniża te wartości. Należy pamiętać, że tak znacząca zmiana nie jest możliwa w praktyce, a tutaj została przyjęta, aby przedstawić ogólny charakter zmian. Wyraźnie ulegają zmianie również miejsca występowania strzałek (amplituda drgań jest maksymalna) oraz węzłów drgań (amplituda drgań równa zero), co bierze się pod uwagę podczas projektowania węzłów łożyskowych wału korbowego. Prędkość robocza układu wynosiła 500obr/min co odpowiada częstotliwości 8.3Hz, natomiast obliczona przez program druga częstość 75Hz. Pod uwagę należy wziąć częstość drugą, bo pierwsza częstość dotyczy układu ciała sztywnego. Nie istnieje zatem ryzyko wystąpienia rezonansu. Ponadto na podstawie kąta skreślenia wału odczytanego z wykresów postaci drgań można obliczyć naprężenia w układzie i zweryfikować jego wytrzymałość.

Analiza MES daje ogromne możliwości badania zjawisk występujących w tego typu układach. Dzięki niej można dobrać odpowiednie parametry kół zamachowych, a także oszacować w którym miejscu wału korbowego wystąpią największe naprężenia. Można również pokazać wpływ uszkodzenia któregoś z elementów układu na jego działanie.

Literatura

1. Czmochoński J., Rusiński E., Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław (2000).
2. Genta G., Vibration Dynamics and Control, Springer, Turyn (2009).
3. Gryboś R., Drgania Maszyn, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice (2009).

PROJEKT I ANALIZA NUMERYCZNA WZMOCNIENIA PŁYTY

**MARCIN HAUFFE, ŁUKASZ MAŁECKI,
MARCIN ZARYCHTA**

Automatyka i Robotyka, AB3, 4 rok

Opiekunowie naukowci:

dr inż. Grzegorz Dziatkiewicz,

dr inż. Radosław Górski



Streszczenie. Problem dotyczył konstrukcji płyty prasy hydraulicznej. Założenia konstrukcyjne, dotyczące naprężeń maksymalnych oraz przemieszczeń, nie zostały spełnione. Celem projektu było wzmocnienie płyty, tak, aby rozwiązanie spełniało postawione założenia. Możliwe było wykorzystanie 300 mm przestrzeni pod płytą. Górna powierzchnia płyty oraz obszar pod nią w miejscu mocowania dodatkowych elementów miały pozostać nienaruszone. Zaproponowano rozwiązania spełniające założenia, z których w wyniku optymalizacji wybrano najkorzystniejsze.

1. Wprowadzenie

Dla płyty prasy hydraulicznej bez dodanych wzmocnień naprężenia i przemieszczenia przekraczały odpowiednio ponad 3,5 i 29 razy wartości dopuszczalne równe 150 MPa oraz 0,3 mm (tabela 1.). Płyta została poddana obciążeniu 300 kN na powierzchni kołowej o średnicy 200 mm wokół otworu środkowego. Charakter obciążenia był dynamiczny, jednakże ze względu na sposób pracy maszyny można przyjąć je jako obciążenie statyczne. Płyta mocowana jest na czterech filarach przechodzących przez otwory w jej narożnikach poprzez obustronne skręcenie nakrętkami.

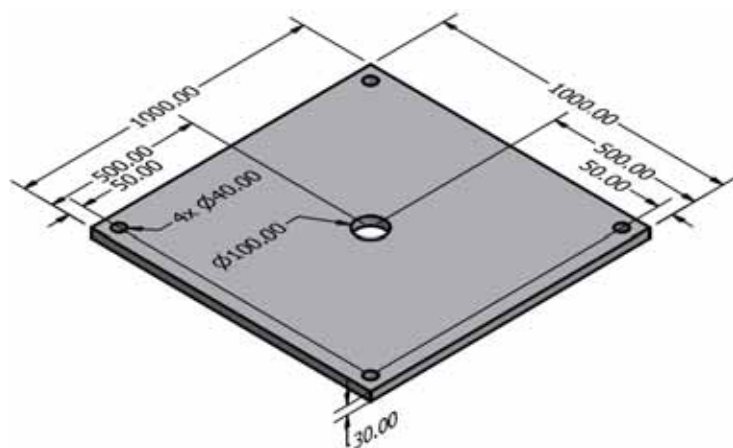


Tabela 1. Masa płyty oraz naprężenia i przemieszczenia po analizie niewzmocnionego modelu

Masa	242 kg
Naprężenia maksymalne	539,3 MPa
Przemieszczenia maksymalne	8,8 mm

Rys. 1. Model analizowanej płyty wraz z wymiarami

Wymagane było, aby po wzmocnieniu płyta mocowana była w ten sam sposób. W celu zmniejszenia przemieszczeń oraz naprężeń zostały dodane elementy wzmacniające w postaci stalowych żeber. W zależności od wariantu rozwiązania, użyto wzmocnień o różnej geometrii i gabarytach.

2. Rodzaj analizy

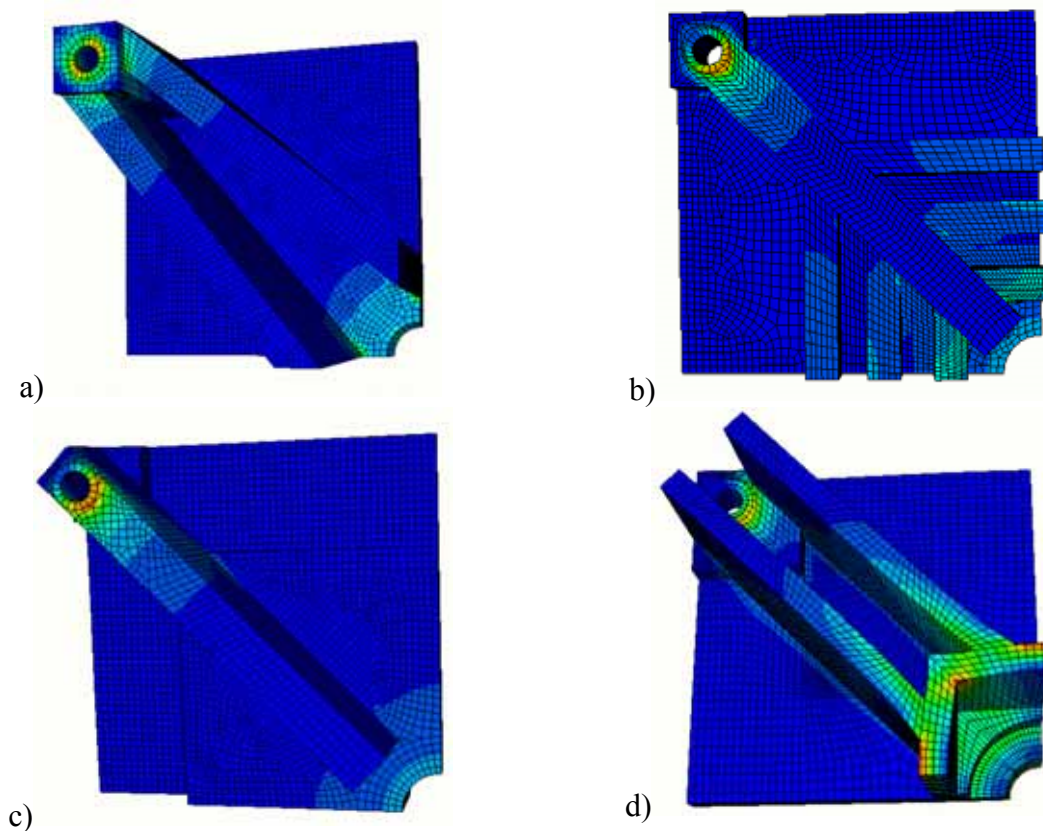
Do weryfikacji wytrzymałościowej płyty wykorzystano metodę elementów skończonych (MES). Rozwiązanie optymalne zostało poddane analizie numerycznej dla różnych typów elementów skończonych (ES) takich jak: hex, tet oraz wedge, których geometrię przedstawia rys. 2. Dla porównania dokładności obliczeń zastosowano trzy rozmiary elementów skończonych: 10, 13 oraz 17 (przybliżony rozmiar ogólny). Analiza numeryczna mogła zostać przeprowadzona dla $\frac{1}{4}$ modelu dzięki występującym płaszczyznom symetrii. Pozwoliło to na znaczne skrócenie czasu obliczeń.



Rys. 2. Geometria różnego rodzaju elementów skończonych [2]

3. Porównanie zaproponowanych rozwiązań konstrukcyjnych

Przedstawiono cztery propozycje wzmocnienia płyty. Każdy z wariantów spełniał założenia konstrukcyjne i opierał się na zastosowaniu uźebrowania. Poszczególne rozwiązania różnią się od siebie przede wszystkim sposobem wykonania, rozmiarami elementów wzmacniających, a co za tym idzie również masą. Poszczególne koncepcje obrazują rysunki 3a–d.



Rys. 3. Rozkłady naprężeń redukowanych dla poszczególnych wariantów:
a) wariant 1, b) wariant 2, c) wariant 3, d) wariant 4

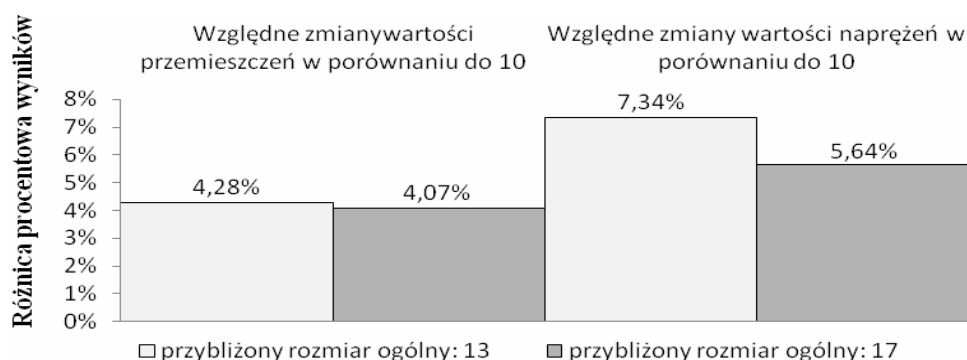
Wariant 1 uwzględniał przyspawanie w każdym z narożników stalowego pręta o znacznym przekroju, a także wyprowadzenie z niego promieniowo podwójnego uźebrowania w kierunku otworu centralnego. Pozwoliło to na zmniejszenie naprężeń wokół miejsca utwierdzenia, jednakże nośność znacznej części żeber nie była wykorzystana. Rozwiązanie przedstawione w postaci wariantu 2 zakładało przyspawanie od spodu istniejącej płyty specjalnego, wcześniej oddzielnie przygotowanego, elementu. Dzięki temu uzyskano najmniejsze przemieszczenie. Liczba spoin użytych do połączenia, tak jak ich długość, była najmniejsza spośród zaproponowanych wariantów. Masa tej koncepcji okazała się jednak największa. Rozwiązanie 3 było rozwiązaniem najprostszym technologicznie, jednakże wstępujące spiętrzenie naprężeń w miejscu utwierdzenia powodowało niebezpieczne zbliżenie się do granicy naprężeń dopuszczalnych. Ostatni z wariantów zapewnił największą redukcję naprężeń. Co prawda przemieszczenia były bliskie granicznym jednakże założenia zostały spełnione. Podwójne promieniowe wzmocnienie żebrami oraz zastosowanie wzmocnienia narożnika pozwoliło na najlepsze odciążenie miejsca utwierdzenia. Zastosowano tu również wzmocnienie okolicy otworu centralnego płyty, co dodatkowo wpłynęło na redukcję naprężeń. Na rysunkach 3a–d można zobaczyć rozkłady naprężeń redukowanych na podstawie hipotezy Hubera-von Misesa obliczone przy pomocy oprogramowania MES dla poszczególnych wariantów rozwiązań. Wartości naprężeń maksymalnych i przemieszczeń przedstawia tabela 2.

Tabela 2. Zestawienie wyników dla poszczególnych wariantów rozwiązań

Porównywane kryterium	Wariant 1	Wariant 2	Wariant 3	Wariant 4
Naprężenia maksymalne	138,7 MPa	130,0 MPa	149,6 MPa	72,45 MPa
Przemieszczenie maksymalne	0,24 mm	0,21 mm	0,22 mm	0,29 mm
Masa płyty wraz ze wzmocnieniem	703 kg	801 kg	573 kg	548 kg
Długość spoin w elemencie	~9600 mm	~3600 mm	~9500 mm	~10000 mm
Liczba spoin	64	4	52	52

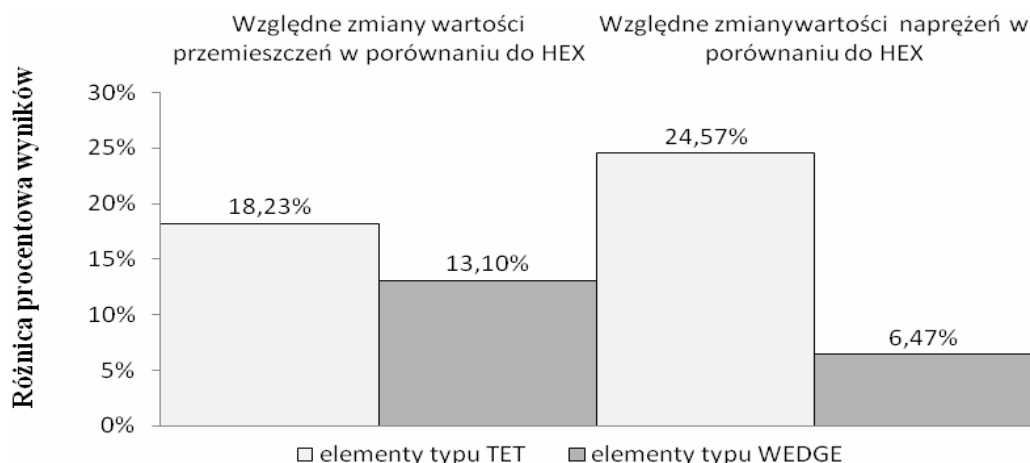
Dla wszystkich uzyskanych rozwiązań przeprowadzono wariantową optymalizację wielokryterialną, gdzie przyjęto kryteria minimalizacji naprężeń, odkształceń, masy, liczby spoin, długości spoin, a także stopnia skomplikowania wykonania. Najlepszym spośród przedstawionych koncepcji okazał się wariant 4, dla którego przeprowadzono szczegółowe obliczenia.

Rys. 4 przedstawia wykres, porównujący wpływ rozmiaru elementu skończonego na wartości naprężeń i przemieszczeń. Wiadomo, że im większa gęstość dyskretyzacji, tym otrzymane wyniki są dokładniejsze. Z racji tego jako punkt odniesienia do porównania użyto najmniejszego rozmiaru elementu skończonego (przybliżony rozmiar ogólny: 10).



Rys. 4. Wpływ rozmiaru elementu skończonego na naprężenia i przemieszczenia analizowanego modelu

Podobnie opracowano wykres wpływu typu elementu skończonego na przemieszczenia i naprężenia. Wyniki przedstawiono na rys. 5. Literatura podaje, że najkorzystniejsze pod względem dokładności otrzymywanych wyników jest wykorzystanie ES typu hex [1]. Dlatego właśnie wykorzystano ten typ ES, który został potraktowany jako punkt odniesienia. Obliczenie błędu względnego pozwoliło na przedstawienie różnicy w otrzymanych wynikach naprężeń i przemieszczeń dla odpowiednich typów ES.



Rys. 5. Wpływ typu elementu skończonego na naprężenia i przemieszczenia analizowanego modelu

4. Analiza wyników oraz wnioski

Przeprowadzona analiza numeryczna potwierdziła, że gęstość dyskretyzacji istotnie wpływa na dokładność obliczeń. Lokalne zagęszczenie siatki w obszarach występowania spiętrzeń naprężeń prowadzi do dokładniejszej analizy numerycznej, a także pozwala na zmniejszenie jej stopnia skomplikowania. Wykorzystane elementy skończone typu hex wymagają specjalnego przygotowania modelu. Polega on na podziale na bryły o mniej skomplikowanej geometrii. Spełniający założenia konstrukcyjne wariant 2 został odrzucony ze względu na duży koszt produkcji jednostkowej. Podczas procesu projektowania należy wziąć pod uwagę nie tylko spełnienie założeń konstrukcyjnych, ale również takie aspekty jak koszt oraz prostotę wykonania. Optymalizacja geometrii żeber pozwoliła na ekonomiczne wykorzystanie ilości użytego materiału dla wzmocnienia oraz na zmniejszenie naprężeń i przemieszczeń występujących w układzie. Umieszczenie dwóch żeber symetrycznie i równoległe do płaszczyzny przechodzącej przez osie otworów zadecydowanie odciążało konstrukcję płyty.

Literatura

1. Bąk R., Burczyński T., Wytrzymałość materiałów z elementami ujęcia komputerowego, WNT, Warszawa (2009).
2. Dolezel I., Segeth K., Solin P., Numerical quadrature for higher-order finite element methods, VSB - Technical University of Ostrava, Ostrava (2005).

ANALIZA WRAŻLIWOŚCI POLA TEMPERATURY W NAGRZEWANEJ/CHŁODZONEJ TKANCE BIOLOGICZNEJ

PIOTR KARBOWNIK

Edukacja Techniczno-Informatyczna, EC3, 5 rok
Opiekunowie naukowci: prof. dr hab. inż. Ewa Majchrzak,
dr inż. Mirosław Dziewoński



Streszczenie. W artykule przedstawiono numeryczną analizę przepływu ciepła w tkance biologicznej oraz analizę wrażliwości służącą zbadaniu wpływu parametrów wejściowych na parametry wyjściowe. Wyniki analiz uzyskano za pomocą metody różnic skończonych, którą zaimplementowano w języku C++.

1. Wprowadzenie

Badanie procesów fizycznych w tkankach biologicznych wymaga szczególnego podejścia ze względu na skomplikowaną budowę w stosunku do ogólnie stosowanych materiałów konstrukcyjnych oraz dodatkowe czynniki, które nie sposób wykluczyć z obliczeń np. przepływ krwi czy przemiany metaboliczne zachodzące w organizmie. Istotny wpływ na przemiany fizyczne zachodzące w tkance biologicznej mają również parametry charakteryzujące daną tkankę. Nie można jednak przyjąć uniwersalnych wartości poszczególnych parametrów, dlatego też powstaje dodatkowa potrzeba analizy wrażliwości stosowanych modeli matematycznych.

W przypadku badania procesu przepływu ciepła w tkankach – określanego inaczej jako biocieplo – stosowane są dwa typy modeli matematycznych: modele ciągłe – bazujące głównie na równaniu Pennesa oraz modele naczyniowe służące do badania zmian temperatury w obrębie rzeczywistej sieci naczyń krwionośnych w tkankach.

2. Model matematyczny

W pracy zastosowano jako model matematyczny przepływu ciepła w nagrzewanych (chłodzonych) tkankach równanie Pennesa, które uwzględnia obecność naczyń krwionośnych oraz procesy metaboliczne zachodzące w tkankach. Równanie to powstało w oparciu o prawo Fouriera i w układzie współrzędnych walcowych $\{r, z\}$ można zapisać je w następujący sposób:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + k(T_B - T) + Q_{met} \quad (1)$$

gdzie c [J/kgK] jest ciepłem właściwym tkanki, ρ [kg/m³] oznacza gęstość, λ [W/mK] to współczynnik przewodzenia ciepła, $T=T(r, z, t)$ [°C] oznacza temperaturę, $k = G_B c_B \rho_B$ to współczynnik perfuzji, (G_B [1/s] - prędkość perfuzji krwi, c_B [J/kgK] - ciepło właściwe krwi, ρ_B [kg/m³] - gęstość krwi), T_B [°C] oznacza temperaturę krwi. Wartość składnika metabolicznego Q_{met} [W/m³] przyjmuje się jako stałą, zależną od stanu, w jakim znajduje się organizm, na przykład dla spoczynku $Q_{met} = 245$ [W/m³].

Model matematyczny może być wykorzystany do obliczeń, jeśli zostanie uzupełniony tzw. warunkami jednoznaczności, które ściśle określają dane wejściowe. Dla stanów nieustalonych, a do takich należy zadanie zawarte w pracy, wymagane są warunki: geometryczne, fizyczne, brzegowe i początkowe.

W pracy rozpatrywano próbkę w kształcie walca o promieniu R i wysokości Z (rys. 1). W przypadku warunków fizycznych należy ustalić wartości poszczególnych parametrów wejściowych związanych z rodzajem tkanki tj. ciepło właściwe, współczynnik przewodzenia, gęstość itd. Kończącym etapem budowania modelu matematycznego jest ustalenie warunków brzegowych i początkowych. W zadaniu wprowadzamy dwa warunki brzegowe na powierzchniach Γ_0 i Γ_∞ (rys. 1) oraz warunek początkowy dla chwili $t = 0$.

Warunek brzegowy na powierzchni Γ_0 jest funkcją liniową opisaną wzorem:

$$(r, z) \in \Gamma_0: T(r, 0, t) = T_{max} + \frac{T_p - T_{max}}{r} R \quad (2)$$

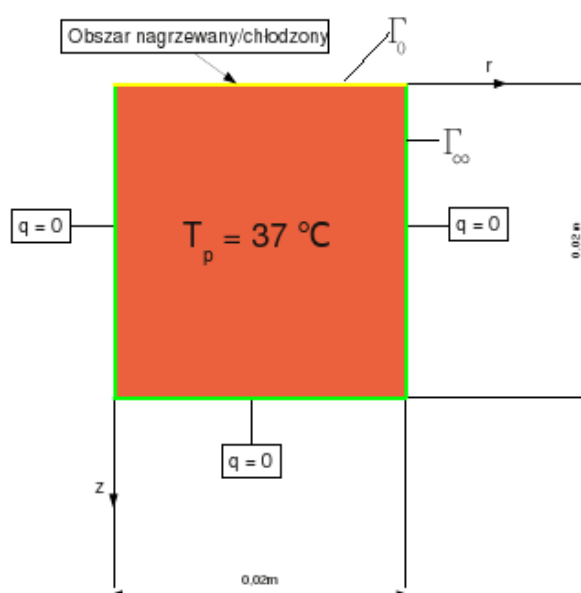
gdzie T_p to temperatura początkowa, T_{max} to temperatura maksymalna, a r to odległość od osi walca. Warunek brzegowy może być zadawany dla całkowitego czasu analizy lub od chwili $t = 0$ do dowolnego momentu czasu, nie większego od całkowitego czasu analizy. W drugim przypadku warunek brzegowy może być zadawany w sposób ciągły lub w sposób impulsowy z zadanym czasem przerwy i działania.

Warunek brzegowy na powierzchni Γ_∞ to tzw. warunek II rodzaju, inaczej zwany warunkiem Neumanna, który można zapisać następująco:

$$(r, z) \in \Gamma_\infty: -\lambda \vec{n} \nabla T(r, z, t) = q_b(r, z, t) \quad (3)$$

gdzie \vec{n} to wektor normalny do powierzchni, a $q_b(r, z, t)$ to brzegowy strumień ciepła. Dla omawianego modelu przyjęto $q_b(r, z, t) = 0$, a w takim wypadku jest to tzw. warunek adiabatyczny.

Jako warunek początkowy przyjęto założenie, że w całym analizowanym obszarze temperatura w chwili $t = 0$ jest równa $T_p = 37^\circ\text{C}$.



Rys. 1. Rozkład warunków brzegowo-początkowych dla analizowanej próbki

3. Analiza wrażliwości

Analiza wrażliwości służy między innymi do badania wpływu zmiany parametrów wejściowych modelu matematycznego na wielkości wynikowe. Analizę można przeprowadzić metodą bezpośrednią lub metodą układu sprzężonego [2]. Dla omawianego zagadnienia została zastosowana metoda bezpośrednia.

Zagadnieniem podstawowym jest w tym przypadku równanie (1) uzupełnione warunkami brzegowo-początkowymi, a pozostałe zagadnienia powstają wskutek zróżniczkowania tych równań kolejno względem wszystkich parametrów występujących w modelu. Parametry te można oznaczyć jako: $p_1 = k$, $p_2 = c\rho$, $p_3 = T_B$, $p_4 = Q_{met}$, $p_5 = \lambda$, czyli p_n , $n = 1, 2, 3, 4, 5$, a funkcje wrażliwości $W_n = \partial T / \partial p_n$.

Różniczkując równanie (1) względem parametru p_n otrzymamy:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c\rho}{\partial p_n} \frac{\partial T}{\partial t} + c\rho \frac{\partial W_n}{\partial t} = \frac{\partial \lambda}{\partial p_n} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \lambda \left(\frac{1}{r} \frac{\partial W_n}{\partial r} + \frac{\partial^2 W_n}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 W_n}{\partial z^2} \right) + \\ + T_B \frac{\partial k}{\partial p_n} + k \frac{\partial T_B}{\partial p_n} - T \frac{\partial k}{\partial p_n} - kW_n + \frac{\partial Q_{met}}{\partial p_n} \end{aligned} \quad (4)$$

Różniczkując równania (2) oraz (3) względem parametru p_n otrzymamy pochodne warunków brzegowych na powierzchniach Γ_0 i Γ_∞ , które zapisujemy następująco:

$$(r, z) \in \Gamma_0: \frac{\partial T(r, 0, t)}{\partial p_n} = W_n(r, 0, t) = 0 \quad (5)$$

$$(r, z) \in \Gamma_\infty: -\frac{\partial \lambda \bar{n} \nabla T(r, z, t)}{\partial p_n} = -\frac{\partial \lambda}{\partial p_n} \bar{n} \nabla T(r, z, t) - \lambda \bar{n} \nabla W_n(r, z, t) = 0 \quad (6)$$

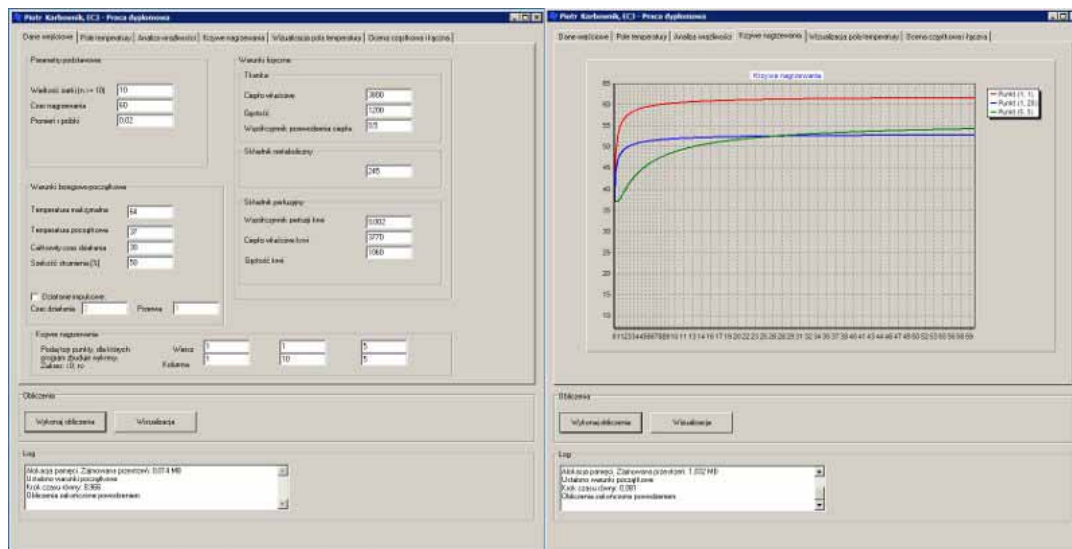
Warunek początkowy zapisujemy jako:

$$t = 0: \frac{\partial T(r, z, 0)}{\partial p_n} = W_n(r, z, 0) = 0 \quad (7)$$

Do rozwiązania wszystkich zagadnień zastosowano metodę różnic skończonych ze schematem jawnym [1].

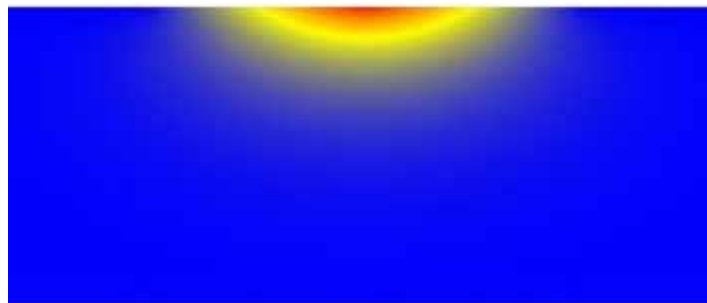
4. Opis programu

Program został podzielony na kilka modułów. Użytkownik ma możliwość wprowadzania wartości wszystkich parametrów wejściowych w tym gęstości siatki różnicowej, wymiarów próbki oraz współrzędnych punktów w siatce, dla których program wykreśli krzywe nagrzewania (rys. 2). Wyniki analizy wrażliwości dostępne są w formie tabel, a pole temperatury można dodatkowo oceniać na podstawie barwnej mapy kolorów. Zaimplementowano również moduł pozwalający wykorzystać wyniki analizy wrażliwości do oceny cząstkowej i łącznej.



Rys. 2. Główny moduł programu oraz moduł rysujący krzywe nagrzewania

Na rysunku 3 pokazano przykładowy efekt wizualizacji pola temperatury. Czas analizy wynosił $t = 60s$, temperatura początkowa $T_p = 37^\circ C$, temperatura maksymalna $T_{max} = 64^\circ C$. Warunek brzegowy na powierzchni Γ_0 był zadawany na połowie powierzchni, przez 30s, w sposób ciągły. Przyjęto parametry odpowiadające skórze właściwej.



Rys. 3. Przykładowy rozkład temperatury w tkance

5. Wnioski

Wyniki analizy wrażliwości potwierdzają fakt, iż ludzkie tkanki mają charakter izolacyjny i utrudniają wnikanie ciepła w głąb organizmu. Najbardziej wpływowym parametrem w równaniu Pennesa jest współczynnik przewodzenia ciepła, którego niewielkie modyfikacje mogą powodować wyraźne zmiany wartości temperatury w nagrzewanej tkance.

Literatura

1. Majchrzak E., Mochnacki B., Metody numeryczne. Podstawy teoretyczne, aspekty praktyczne i algorytmy. Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice (2004).
2. Kleiber M., Parameter sensitivity in nonlinear mechanics, J.Wiley & Sons, Ltd., London (1997).

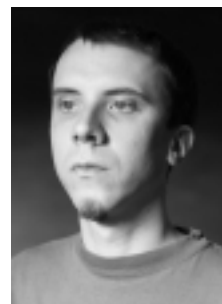
SYMULACJA KONSTRUKCJI Z WYKORZYSTANIEM ELEMENTÓW MPC

PRZEMYSŁAW MAKOWSKI

Mechanika i Budowa Maszyn, MB4, 5 rok

Opiekunowie naukowcy: dr hab. inż. Antoni John, Prof. Pol. Śląskiej,

dr inż. Grzegorz Kokot



Streszczenie. W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania elementów Multi-Point Constraint (MPC) w dziedzinie modelowania i symulacji konstrukcji mechanicznych metodą elementów skończonych (MES). Obliczenia przeprowadzono programem MSC.Patran/Nastran, posiadającym szereg zaimplementowanych elementów MPC generujących automatycznie zestaw równań MPC zależnych od wprowadzonych węzłów wraz z ich stopniami swobody.

1. Wprowadzenie

MPC (Multi-Point Constraint) jest to zależność liniowa, która definiuje reakcję jednego lub większej liczby stopni swobody węzła zależnego, jako odpowiedź stopni swobody węzła niezależnego. Ogólna formuła równania MPC przedstawia się następująco [1]:

$$\beta_1 Q_1 + \beta_2 Q_2 = \beta_0 \quad (1)$$

gdzie:

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$ - znane stałe

Q_1, Q_2 - przemieszczenia węzłów (zależnego oraz niezależnego)

Wprowadzenie warunku brzegowego, jakim jest równanie MPC, zostanie zrealizowane z wykorzystaniem metody funkcji kary.

Rozważmy zmodyfikowane wyrażenie całkowitej energii potencjalnej:

$$\Pi_M = \frac{1}{2} \mathbf{Q}^T \mathbf{K} \mathbf{Q} + \frac{1}{2} C (\beta_1 Q_1 + \beta_2 Q_2 - \beta_0)^2 - \mathbf{Q}^T \mathbf{F} \quad (2)$$

gdzie C jest dużą liczbą, reprezentującą sztywność sprężyny stosowanej w celu wprowadzenia warunków brzegowych w metodzie funkcji kary.

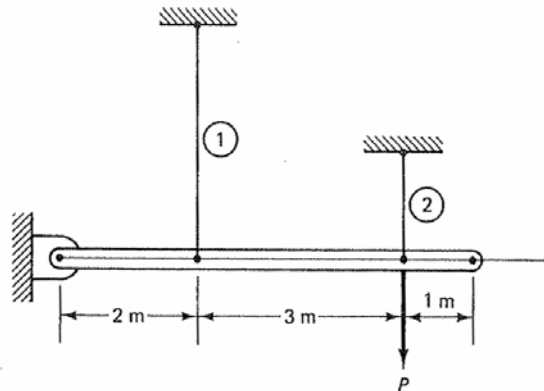
Wyznaczamy minimum całkowitej energii potencjalnej odpowiadające równowadze układu. Obliczenie $d\Pi_M / dQ_i = 0$ dla $i = 1, 2$ daje zmodyfikowane macierze sztywności oraz obciążeń.

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} K_{11} + C\beta_1^2 & K_{12} + C\beta_1\beta_2 \\ K_{21} + C\beta_1\beta_2 & K_{22} + C\beta_2^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} F_1 + C\beta_0\beta_1 \\ F_2 + C\beta_0\beta_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

2. Przykład numeryczny – model sztywnej belki zawieszonej na dwóch prętach

Sztywna belka o pomijalnej masie, utwierdzona w sposób umożliwiający obrót wokół jednej osi jest zawieszona na dwóch prętach – stalowym oraz aluminiowym. Obciążenie o wartości $P = 50 \text{ kN}$ jest przyłożone w sposób przedstawiony na rysunku 1. Celem obliczeń jest wyznaczenie naprężeń występujących w prętach. Naprężenia powstające w belce nie są obliczane, istotny jest jedynie wymóg zachowania jej sztywności oraz prostoliniowości.



Parametry pręta stalowego (1):

$$A_1 = 1600 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$E_1 = 210000 \text{ [MPa]}$$

$$l_1 = 5 \text{ [m]}$$

Parametry pręta aluminiowego (2):

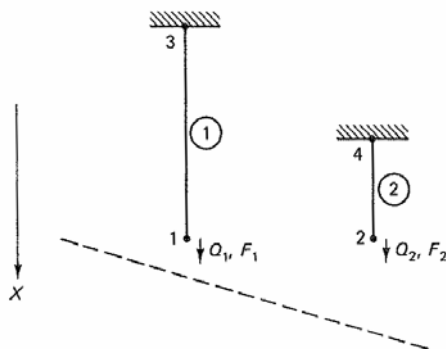
$$A_2 = 1200 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$E_2 = 69000 \text{ [MPa]}$$

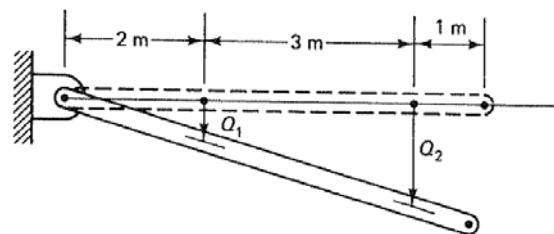
$$l_2 = 3.5 \text{ [m]}$$

Rys. 1. Geometria modelu [1]

Konstrukcję zamodelowano za pomocą dwóch elementów skończonych – po jednym dla pręta stalowego oraz aluminiowego.



Rys. 2. Model MES konstrukcji [1]



Rys. 3. Przemieszczenia belki [1]

Przemieszczenia węzłów 3 oraz 4 wynikające z ich utwierdzenia wynoszą $Q_3 = Q_4 = 0$. Ponieważ belka musi zachować swą prostoliniowość, przemieszczenia Q_1 oraz Q_2 są wzajemnie zależne. Z rysunku 3 oraz na podstawie własności trójkąta prostokątnego otrzymujemy

$$Q_1 = 0.4 Q_2 \quad (5)$$

po przekształceniu

$$Q_1 - 0.4 Q_2 = 0 \quad (6)$$

Równanie 6 jest równaniem MPC zapewniającym wymaganą prostoliniowość belki. Węzeł 1 jest węzłem zależnym, którego przemieszczenie jest funkcją liniową przemieszczenia niezależnego węzła 2.

Wyznaczono macierze sztywności elementów skończonych oraz dokonano ich agregacji w celu uzyskania globalnej macierzy sztywności układu:

$$K = \begin{bmatrix} 67200 & 0 & -67200 & 0 \\ 0 & 23657.14 & 0 & -23657.14 \\ -67200 & 0 & 67200 & 0 \\ 0 & -23657.14 & 0 & 23657.14 \end{bmatrix}$$

Porównując równania 1 i 4 otrzymujemy, że $\beta_0 = 0$, $\beta_1 = 1$, $\beta_2 = -0.4$. Z przekształcenia 3 wynika, że wartości $-0.4C$ oraz $0.16C$ są dodawane odpowiednio w miejsca (1,1), (1,2) i (2,1) oraz (2,2) macierzy K . $\beta_0 = 0$, tak więc nie są wymagane żadne modyfikacje macierzy F . Ponieważ $Q_3 = Q_4 = 0$, liczba C jest dodawana w miejsca (3,3) i (4,4) macierzy K . Wartość C dobrano na poziomie 67200×10^4 .

Po wprowadzeniu modyfikacji równanie macierzowe MES przedstawia się następująco:

$$\begin{bmatrix} 672067200 & -268800000 & -67200 & 0 \\ -268800000 & 107543657.14 & 0 & -23657.14 \\ -67200 & 0 & 672067200 & 0 \\ 0 & -23657.14 & 0 & 672023657.14 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 50000 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Przemieszczenia węzłów otrzymane po rozwiązaniu układu równań wynoszą:

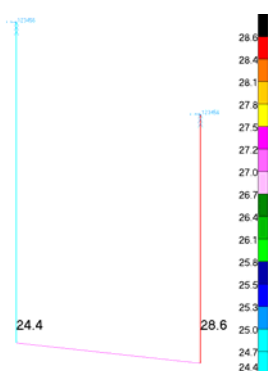
$$Q = [0.581 \quad 1.453 \quad 5.812 \times 10^{-5} \quad 5.116 \times 10^{-5}]^T \text{ mm}$$

Na podstawie przemieszczeń oraz geometrii i własności materiałowych prętów, wyznaczono szukane naprężenia:

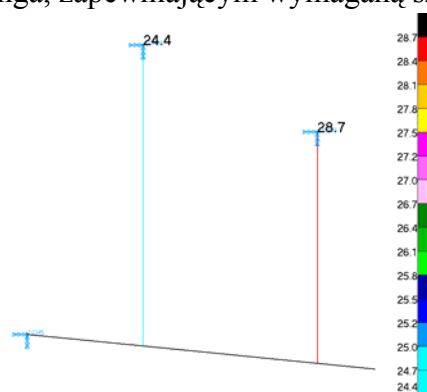
$$\sigma_1 = 210000 \times \frac{1}{5000} [-1 \quad 1] \begin{bmatrix} 5.812 \times 10^{-5} \\ 0.581 \end{bmatrix} = 24.4 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_2 = 69000 \times \frac{1}{3500} [-1 \quad 1] \begin{bmatrix} 5.116 \times 10^{-5} \\ 1.453 \end{bmatrix} = 28.644 \text{ [MPa]}$$

W celu weryfikacji otrzymanych wyników, konstrukcję zamodelowano w oprogramowaniu MSC.Patran/Nastarn na dwa sposoby – z wykorzystaniem elementu MPC, oraz wprowadzając belkę o wysokim module Younga, zapewniającym wymaganą sztywność.



Rys. 4. Model z wprowadzonym el. MPC

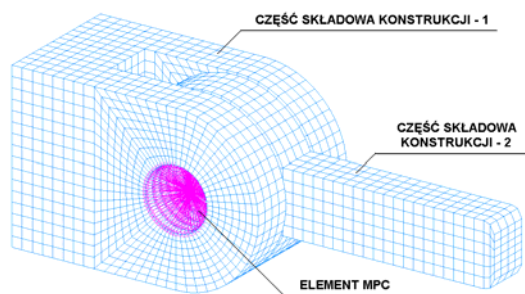


Rys. 5. Model z wprowadzoną belką

Otrzymane naprężenia są zbieżne z wynikami poprzednich obliczeń. Należy zauważyć, że metoda zamodelowania układu z wprowadzeniem belki jest mniej efektywna ze względu na zwiększenie liczby stopni swobody modelu. Obliczane są również wartości przemieszczeń i naprężeń belki, których wyznaczenie w rozpatrywanym przykładzie nie jest wymagane ze względu na potraktowanie jej jako ciała doskonale sztywnego.

3. Symulacja działania połączenia mechanicznego

Połączenie mechaniczne umożliwiające wzajemny obrót dwóch ciał względem wspólnej osi obrotu zamodelowano z wykorzystaniem dwóch elementów RBE2 oraz elementu RBE3. Jako element pośredniczący, zastępujący sworzeń wprowadzono belkę zamodelowaną elementami BAR2. Elementy MPC symulują kontakt między elementami składowymi konstrukcji a belką, zapewniając przenoszenie obciążeń oraz umożliwiając wzajemny obrót na podstawie wprowadzonych zależnych oraz niezależnych stopni swobody.



Specyfikacja zastosowanych elementów MPC

RBE2:

- węzeł niezależny (UX,UY,UZ,RX,RY,RZ)
- węzły zależne (UX,UY,UZ)

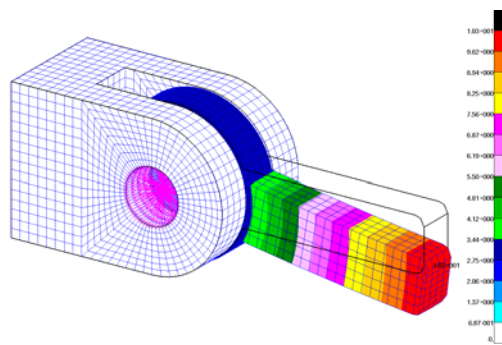
RBE3

- węzły niezależne (UX,UY,UZ)
- węzeł zależny (UX,UY,UZ,RX)

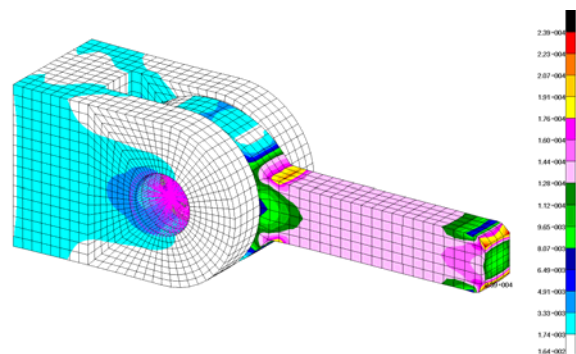
Rys. 6. Model MES z elementami MPC

Element RBE3 realizuje połączenie między powierzchnią otworu elementu konstrukcji 2, a belką pośredniczącą, natomiast elementy RBE2 odpowiadają za przeniesienie przemieszczeń oraz obciążeń z belki na powierzchnie otworów elementu konstrukcji 1.

Element konstrukcji 1 został utwierdzony. Do końca ramienia elementu 2 przyłożono przemieszczeniowy warunek brzegowy w dwóch wariantach – wariant pierwszy weryfikuje zdolność realizacji obrotu przez mechanizm (Rys. 7), w wariacie drugim konstrukcję poddano rozciąganiu w celu weryfikacji zdolności przenoszenia obciążeń (Rys. 8).



Rys. 7. Obrót mechanizmu – przemieszczenia



Rys. 8. Naprężenia wywołane rozciąganiem

4. Wnioski

Elementy MPC są użytecznym narzędziem umożliwiającym modelowanie metodą elementów skończonych sztywnych struktur a także elementów konstrukcyjnych takich jak suwaki, zawiasy bądź dźwignie. Dzięki dużym możliwościom definiowania zależności między węzłami modelu możliwe jest symulowanie wielu złożonych zachowań konstrukcji.

Literatura

1. Chandrupatla T., Belegundu A., Introduction to Finite Elements in Engineering, (1991).
2. MSC.Nastran Linear Static Analysis Users Guide, MSC.Software Corporation, (2001).

OPRACOWANIE APLIKACJI SŁUŻĄCEJ DO WIZUALIZACJI WYNIKÓW OTRZYMANÝCH W SYSTEMIE MSC/PATRAN

TYMOTEUSZ MEINERT, MARCIN MURAWSKI

Edukacja Techniczno-Informatyczna, EC3, 5 rok

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Antoni John, Prof. Pol.Śl.



Streszczenie. W artykule przedstawiono sposób implementacji samodzielnego środowiska grafiki 3D służącego do wizualizacji wyników opracowanych w środowisku MSC/PATRAN/NASTRAN. Aplikacja dokonuje prezentacji modelu MES danego obiektu wraz z wynikami obliczeń. Program jest całkowicie niezależnym środowiskiem, do działania potrzebuje jedynie plików wyjściowych z pakietu MSC/PATRAN/NASTRAN.

1. Wprowadzenie

Implementacja środowiska grafiki 3D opiera się w głównej mierze na odpowiednim dobraniu: języka programowania, środowiska programistycznego, odpowiednich wzorców projektowych oraz bibliotek. W tym przypadku osiã programu stała się biblioteka OpenGL [3] (ang. *Open Graphics Library*), która jest odpowiedzialna za grafikę 3D w aplikacji.

2. Grafika 3D

Grafika 3D (ang. *Three-Dimensional Graphics*) jest jedną z gałęzi grafiki komputerowej zajmującej się wizualizacją obiektów trójwymiarowych. Istnieje kilka sposobów reprezentacji geometrii obiektów trójwymiarowych: voxele, opis matematyczny (np. powierzchnie Béziera) oraz jak w przypadku naszej aplikacji siatki wielokątów. MES jest niczym innym jak właśnie siatką wielokątów. Aby móc przedstawić przykładowo trójkąt w grafice 3D potrzebujemy 3 współrzędnych (x,y,z) tworzących płaszczyznę oraz wektor normalny tej płaszczyzny.

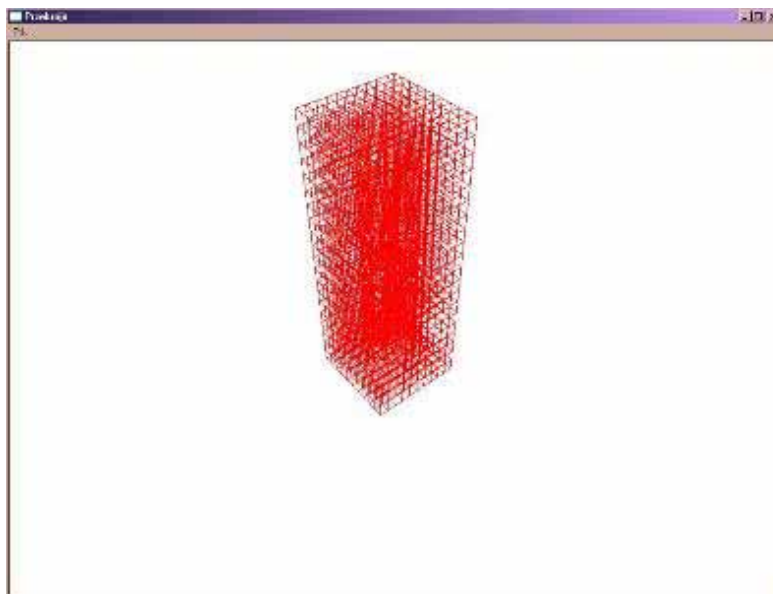
3. Program „Przekroje”

Program „Przekroje” został oparty na architektonicznym wzorcu projektowym MVC (ang. *Model-View-Controller*). Jednym z jego głównych założeń miało być również nie zmienianie struktury plików wejściowych z środowiska MSC/PATRAN/NASTRAN. „Przekroje” korzystają z pliku o rozszerzeniu *.out który zawiera dane takie jak: geometrie, rozmieszczenie sił, dane materiałowe obiektu oraz z pliku o rozszerzeniu *.f06 zawierającego wyniki symulacji, przykładowo: przemieszczeń, naprężeń. Pliki te nie będą w jakikolwiek sposób modyfikowane co powoduje pewne problemy ale zarazem zapewnia możliwość powrotu pierwotnego modelu do środowiska MSC.

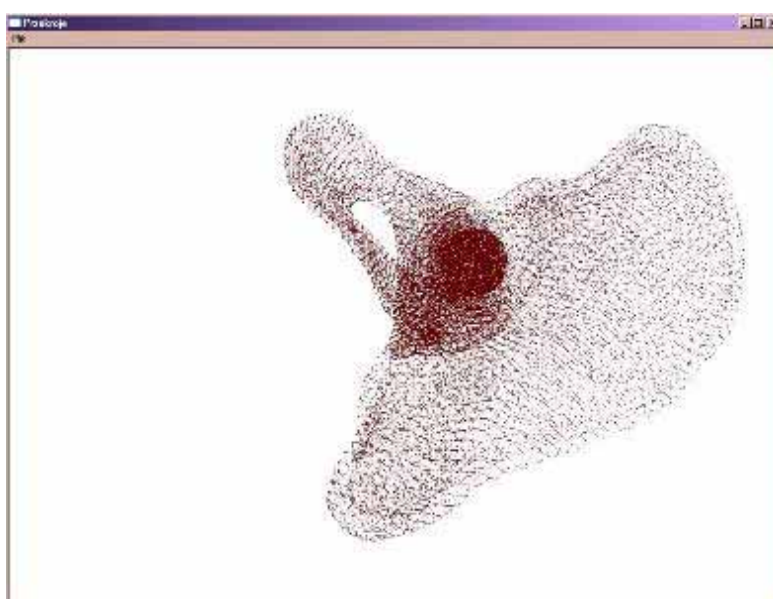
Obecnie program jest w trakcie ciągłego rozwoju oferuje on tylko możliwość podglądu geometrii danego obiektu w trzech widokach: pełnym, liniowym oraz punktowym. Możliwe jest również obracanie oraz przybliżanie lub oddalanie danej geometrii.

Program wymaga jednak dużej rozbudowy ponieważ ma być on samodzielnym środowiskiem umożliwiającym podgląd plików stworzonych w środowisku MSC. Można tu wymienić kilka istotnych obszarów w które należy rozbudować:

- rozbudować interfejs programu o następujące elementy
 - rozbudować menu oraz toolbar
 - możliwości eksportu obrazu do pliku graficznego(*np. *.jpg*)
 - możliwość drukowania
 - możliwość dokonywania przekroju w dowolnej płaszczyźnie
- stworzyć moduł wczytujący dane dotyczące własności mechanicznych
- rozbudować funkcję pokazywania obrazu o takie elementy jak
 - możliwości zmiany kolorów obiektu jak i płaszczyzny roboczej
 - rysowanie siatek
 - stworzenie kompasu (x,y,z)
 - stworzyć widoki w konkretnych płaszczyznach
- dokonać optymalizacji kodu programu



Rys. 1. Prosty model - widok liniowy

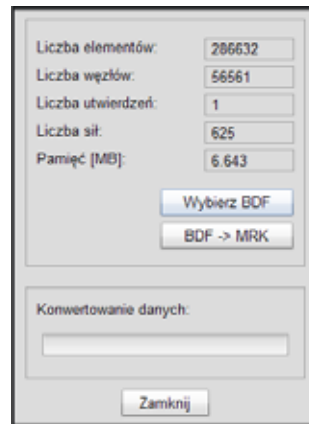


Rys. 2. Kość miednicza - widok punktowy

4. Program „Wizualizacja i analiza modeli 3D”

Podstawowym założeniem aplikacji jest wizualizacja modeli oraz wyników obliczeń. Program korzysta z interfejsu programowania zwanego WinAPI [2] (*Windows Application Programming Interface*) oraz z popularnego języka programowania C++ [1]. Oba języki programowania umożliwiają zaprojektowania aplikacji w taki sposób by była prosta, szybka oraz umożliwiała wczytywanie danych, przetwarzanie danych modelu oraz wyświetlanie modelu za pomocą biblioteki OpenGL.

Aplikacja wczytuje plik z danymi o rozszerzeniu *.mrk, który został stworzony na podstawie pliku *.bdf wyeksportowanego z programu MSC/PATRAN/NASTRAN.



Rys. 3. Moduł umożliwiający konwersję danych z pliku *bdf* do pliku *mrk*

Na rysunku 4a przedstawiono fragment pliku *bdf*, natomiast rysunek 4b przedstawia fragment zmodyfikowanego pliku *mrk*. Jak widać dane dotyczące geometrii modelu w pliku *bdf* umieszczono w wierszach zawierających słowo *CTETRA* oraz *GRID*. Natomiast w formacie *mrk* nadpisano odpowiednie komórki wiersza *CTETRA* odpowiednimi wartościami z wiersza *GRID*. Modyfikacja ta pozwoliła na szybsze wczytywanie danych, ponieważ format *bdf* wymaga porównania numerów węzłów z wierszy *CTETRA* z numerami wierszy *GRID*.

a)	1	CTETRA	1	2	100001	100002	2127	2126
	2							
	3	GRID	100001		-16.283644.903	4.65466		
	4	GRID	100002		-16.008146.8977	5.82947		
	5	GRID	2127		-14.444647.1766	3.36019		
	6	GRID	2126		-16.333847.2057	3.55314		
b)	1	CTETRA	1	2126	-16.3338	47.2057	3.55314	
	2	CTETRA	1	2127	-14.4446	47.1766	3.36019	
	3	CTETRA	1	100001	-16.2836	44.903	4.65466	
	4	CTETRA	1	100002	-16.0081	46.8977	5.82947	

Rys. 4. Fragment danych z pliku: a) *bdf* i b) *mrk*

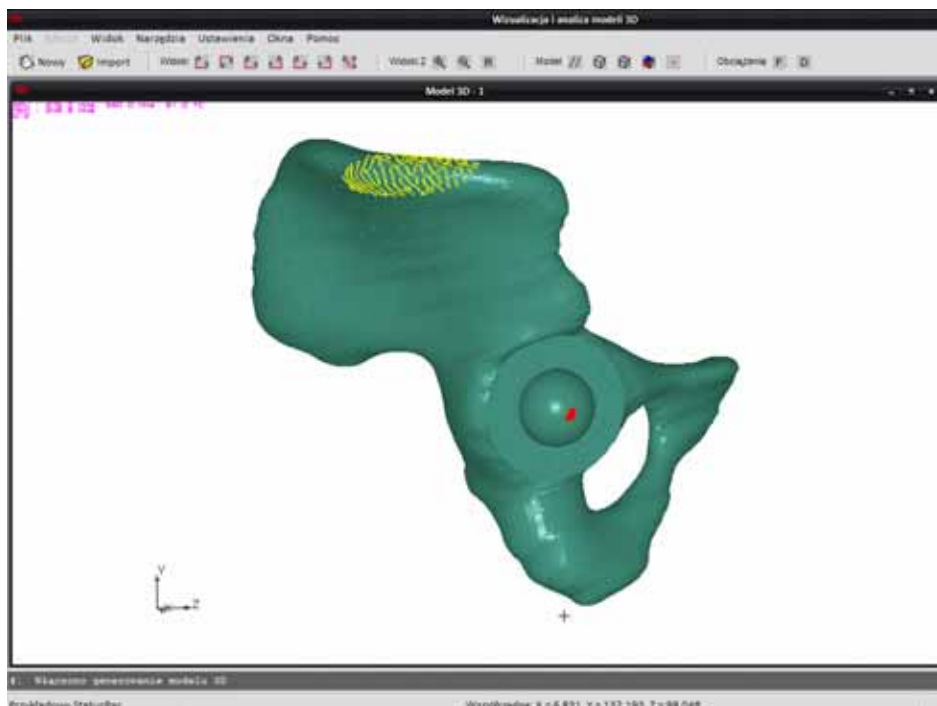
Wyniki obliczeń zawiera plik o rozszerzeniu *.f06, w którym zawarto przede wszystkim informacje o przemieszczeniach czy też naprężeniach. Plik ten będzie wczytywany bezpośrednio do aplikacji lub jeśli będzie to konieczne zostanie poddany odpowiednim modyfikacjom.

Główne zadania wykonywane przez opisywaną aplikację:

- Moduł umożliwiający konwersję pliku BDF do MRK
- Wczytywanie danych modelu z pliku
- Obsługa urządzeń peryferyjnych – mysz, klawiatura
- Możliwość poruszania się w środowisku 3D
- Wyświetlanie modelu

Oprócz powyższych zadań należy zrobić:

- Wczytywanie pliku z wynikami obliczeń
- Możliwość pokazywania modelu w przekrojach
- Poprawienie wydajności środowiska OpenGL



Rys. 5. Model miednicy z zaznaczonymi obciążeniami.

5. Podsumowanie

Głównym celem wyżej opisanych aplikacji jest wizualizacja wyników opracowanych w środowisku MSC/PATRAN/NASTRAN. Mają pełnić one rolę łatwych w obsłudze programów, nie wymagających znajomości systemu MSC/PATRAN/NASTRAN.

Literatura

1. Grębosz J., Symfonia C++, Kraków (1999).
2. Petzold C., Programowanie Windows., Wydawnictwo [RM](#), (1999).
3. Richard S. Wright Jr., Benjamin Lipchak, OpenGL. Księga eksperta. Wydanie III, Wydawnictwo Helion, (2004).
4. <http://www.winprog.org/tutorial/> – stan na dzień 27 kwietnia 2010.
5. <http://nehe.gamedev.net/> – stan na dzień 27 kwietnia 2010.
6. <http://www.relisoft.com/win32/index.htm> – stan na dzień 27 kwietnia 2010.
7. <http://januszg.hg.pl/opengl/> – stan na dzień 27 kwietnia 2010.

ANALIZA PRZEPLYWU CIEPŁA W SKALI NANO – MODEL DWUTEMPERATUROWY

WOJCIECH MIŁKOWSKI

Automatyka i Robotyka, AB3, 5 rok

Opiekunowie naukowci: prof. dr hab. inż. Ewa Majchrzak,
dr inż. Marek Paruch



Streszczenie. Artykuł dotyczy modelowania przepływu ciepła w nano-skali. Przedstawiono funkcję źródła ciepła odpowiadającą impulsowi światła laserowego i dwutemperaturowy model przepływu ciepła. Zaprezentowano program komputerowy rozwiązujący zagadnienie za pomocą metody różnic skończonych dla schematu jawnego. Pokazano wyniki przykładowych obliczeń i sformułowano wnioski.

1. Wprowadzenie

Właściwości materiałów w bardzo małych skalach zasadniczo różnią się od ich właściwości w skali makro. Ważnym aspektem przy badaniach nanostruktur jest przepływ ciepła. Efekty cieplne mogą być zasadniczym problemem przy projektowaniu urządzeń w skali nano, a pełne zrozumienie tych procesów pozwoli na tworzenie mniejszych i bardziej wydajnych układów. Przy grubości warstwy rzędu średniej ścieżki swobodnej i w czasie rzędu czasu relaksacji, należy uwzględnić nośniki energii oraz skończony czas jej propagacji. W tej pracy skupiono się na przepływie ciepła w skali nano w cienkiej warstwie metalowej poddanej działaniu lasera.

2. Model matematyczny

W pracy zastosowano hiperboliczny model dwutemperaturowy. Przyjęto następujące założenia: elektrony oraz fonony posiadają oddzielne temperatury, mechanizmami rozpraszania jest rozpraszanie elektron-fonon oraz fonon-fonon. Model opisywany jest za pomocą następujących równań [1,2]:

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = -\nabla q_e - G(T_e - T_l) + Q \quad C_l \frac{\partial T_l}{\partial t} = -\nabla q_l + G(T_e - T_l) \quad (1)$$

$$q_e + \tau_e \frac{\partial q_e}{\partial t} = -\lambda_e \nabla T_e \quad q_l + \tau_l \frac{\partial q_l}{\partial t} = -\lambda_l \nabla T_l \quad (2)$$

gdzie C to objętościowe ciepło właściwe, T to temperatura, G to współczynnik sprzężenia elektron-fonon, Q reprezentuje absorpcję energii podczas działania wiązki laserowej na materiał, τ to czas relaksacji, λ to współczynnik przewodności ciepła, q to strumień ciepła. Indeksy dolne określają, czy parametr dotyczy elektronów czy sieci krystalicznej.

Ponieważ czas, przez jaki laser nagrzewa warstewkę jest bardzo krótki, przyjmuje się, że straty ciepła na przedniej oraz tylnej powierzchni są zanedbywalnie małe, więc:

$$q_e(0, t) = q_l(0, t) = q_e(L, t) = q_l(L, t) = 0 \quad (3)$$

Jako warunek początkowy (warunek Cauchy'ego) przyjmuje się:

$$T_e(x,0) = T_l(x,0) = T_p \quad (4)$$

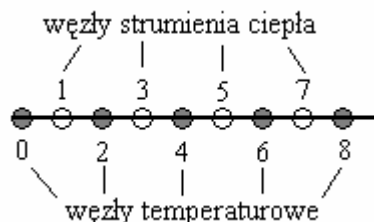
Funkcja źródła ciepła odpowiadająca impulsowi światła laserowego wyraża się wzorem:

$$Q(x,t) = \sqrt{\frac{\beta}{\pi}} \frac{1-R}{t_p \delta} I_0 \exp\left[-\frac{x}{\delta} - \beta \frac{(t-2t_p)^2}{t_p^2}\right] \quad (5)$$

gdzie $\beta = 4 \ln 2$, R to współczynnik odbicia oświetlanej powierzchni, t_p to stała czasowa impulsu lasera, δ to głębokość wnikania światła, I_0 to natężenie lasera.

3. Zastosowanie MRS do rozwiązania problemu

Wprowadzono siatkę, w której naprzemiennie występują węzły „temperaturowe” oraz węzły strumienia ciepła (rys. 1).



Rys. 1. Dyskretyzacja w zastosowanej metodzie dwutemperaturowej

W celu przejścia z kroku czasu t^{f-1} do t^f należy obliczyć wartości strumieni ciepła stosując wzory (6), a następnie za pomocą zależności (7), (8) wyznaczyć szukane temperatury elektronów i sieci krystalicznej [1]

$$q_{ej}^f = \frac{\tau_e - \Delta t}{\tau_e} q_{ej}^{f-1} - \frac{\lambda_{ej}^{f-1} \Delta t}{2h \tau_e} (T_{ej+1}^{f-1} - T_{ej-1}^{f-1}) \quad q_{lj}^f = \frac{\tau_l - \Delta t}{\tau_l} q_{lj}^{f-1} - \frac{\lambda_{lj}^{f-1} \Delta t}{2h \tau_l} (T_{lj+1}^{f-1} - T_{lj-1}^{f-1}) \quad (6)$$

$$T_{ei}^f = \left(1 - A_{ei}^{f-1} - B_{ei}^{f-1} - \frac{G \Delta t}{C_{ei}^{f-1}}\right) T_{ei}^{f-1} + A_{ei}^{f-1} T_{ei-2}^{f-1} + B_{ei}^{f-1} T_{ei+2}^{f-1} + \frac{G \Delta t}{C_{ei}^{f-1}} T_{li}^{f-1} + \frac{\Delta t (\tau_e - \Delta t)}{2h \tau_e C_{ei}^{f-1}} (q_{ei-1}^{f-1} - q_{ei+1}^{f-1}) + \frac{Q_i^{f-1} \Delta t}{C_{ei}^{f-1}} \quad (7)$$

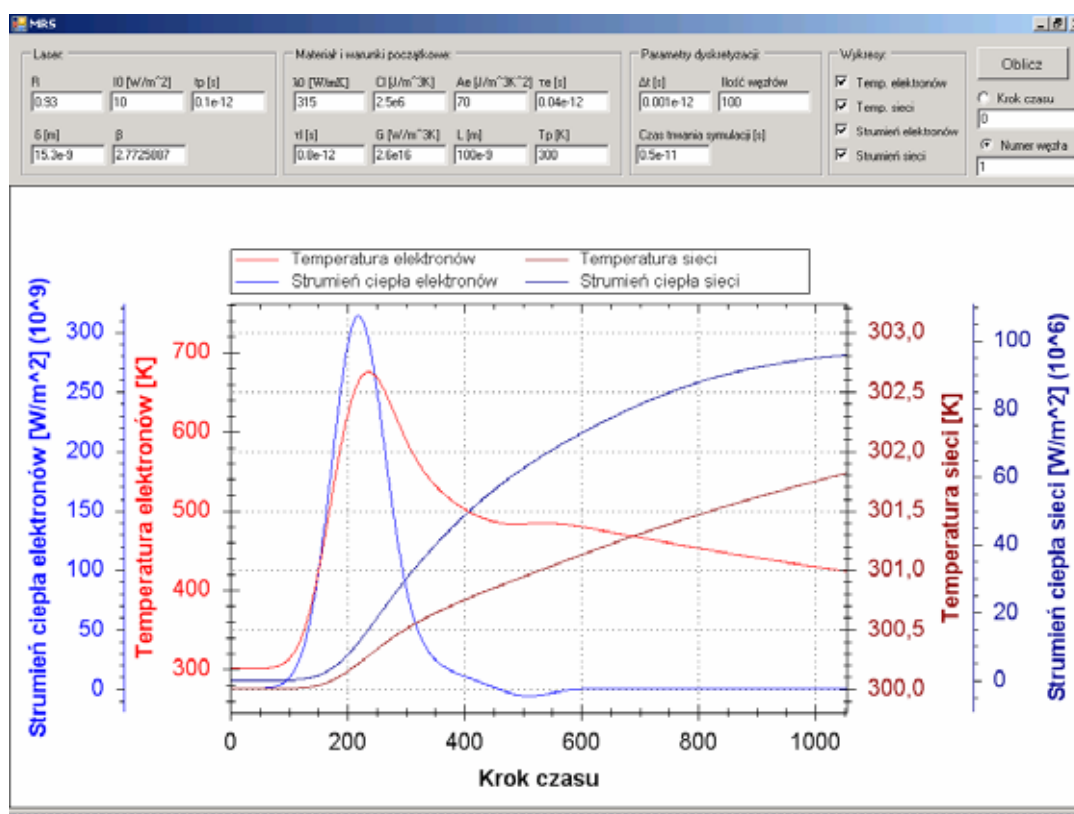
$$T_{li}^f = \left(1 - A_{li}^{f-1} - B_{li}^{f-1} - \frac{G \Delta t}{C_{li}^{f-1}}\right) T_{li}^{f-1} + A_{li}^{f-1} T_{li-2}^{f-1} + B_{li}^{f-1} T_{li+2}^{f-1} + \frac{G \Delta t}{C_{li}^{f-1}} T_{ei}^{f-1} + \frac{\Delta t (\tau_l - \Delta t)}{2h \tau_l C_{li}^{f-1}} (q_{li-1}^{f-1} - q_{li+1}^{f-1}) \quad (8)$$

$$\text{gdzie } A_{li}^{f-1} = \frac{(\Delta t)^2 \lambda_{li-1}^{f-1}}{4h^2 \tau_l C_{li}^{f-1}} \quad A_{ei}^{f-1} = \frac{(\Delta t)^2 \lambda_{ei-1}^{f-1}}{4h^2 \tau_e C_{ei}^{f-1}} \quad B_{li}^{f-1} = \frac{(\Delta t)^2 \lambda_{li+1}^{f-1}}{4h^2 \tau_l C_{li}^{f-1}} \quad B_{ei}^{f-1} = \frac{(\Delta t)^2 \lambda_{ei+1}^{f-1}}{4h^2 \tau_e C_{ei}^{f-1}} \quad (9)$$

W powyższych równaniach Δt to krok czasu, $i = 0,2,4 \dots N$, $j = 1,3,5 \dots N-1$, $f = 0,1,2 \dots F$.

4. Opis programu

Aplikacja została napisana w obiektowym języku programowania C++. Interfejs programu jest prosty i przejrzysty (rys. 2). Dzieli się na trzy główne części: wprowadzanie i edycja danych wejściowych, wybór rodzaju wykresu oraz wykres wyników.



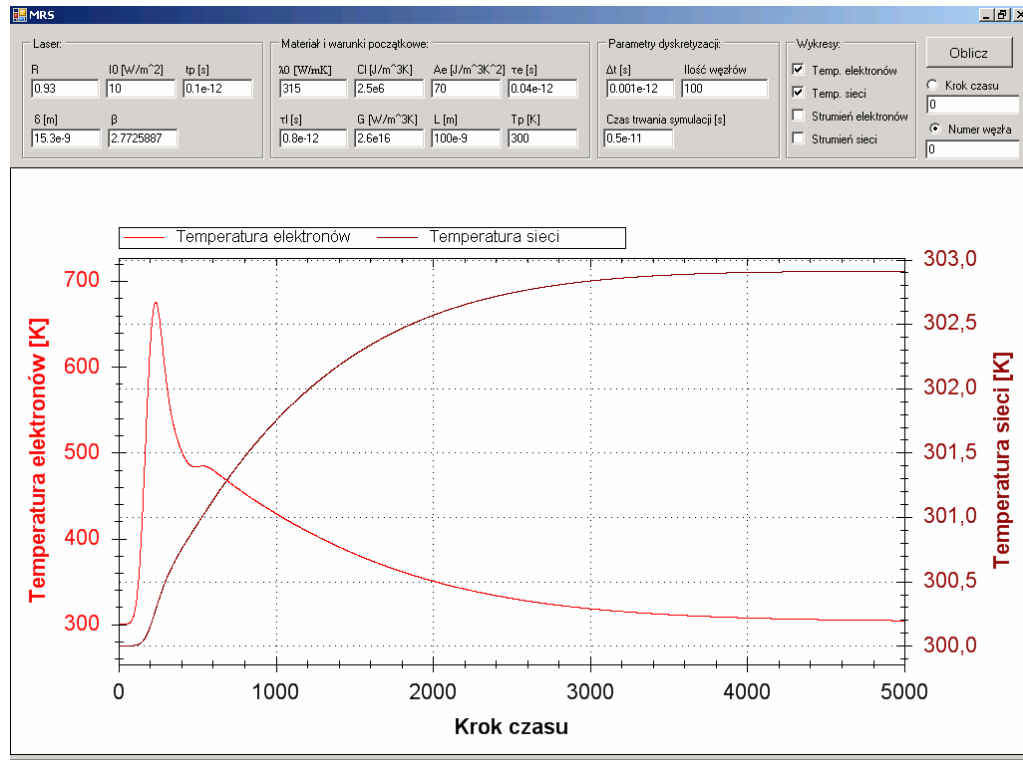
Rys. 2. Wygląd okna programu

Należy zadbać o spełnienie warunków stabilności, „manipulując” krokiem siatki lub krokiem czasu. Po wprowadzeniu wszystkich danych należy nacisnąć przycisk „Oblicz”. W miarę postępu obliczeń wypełniany będzie pasek znajdujący się na samym dole okna. Całkowite wypełnienie się paska postępu oznacza, że obliczenia zostały wykonane i można obejrzeć graficzną interpretację wyników w postaci wykresów.

Na jednej powierzchni program może wyrysować wszystkie z dostępnych wykresów, czyli:

- temperaturę gazu elektronowego,
- temperaturę sieci krystalicznej,
- strumień ciepła gazu elektronowego,
- strumień ciepła sieci krystalicznej.

Wykresy mogą zostać przedstawione na dwa sposoby. Pierwszy z nich, to wykres w dziedzinie odległości, gdzie na osi poziomej występują kolejne węzły. Dodatkowo należy podać krok czasu, dla którego wykres nas interesuje. Drugi z możliwych wykresów posiada dziedzinę czasu i na osi poziomej występują kolejne kroki czasu. Należy w tym przypadku podać, dla którego węzła ma zostać sporządzony wykres. Przykładowe wyniki obliczeń pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Nagrzewanie warstewki ze złota na powierzchni przedniej

5. Wnioski

Model bardzo dobrze odzwierciedla rzeczywisty przepływ ciepła w skali nano. Zastosowana metoda upraszcza obszar do jednowymiarowej płyty, co jest dopuszczalne, gdy jeden z wymiarów jest o wiele mniejszy od pozostałych. Ponieważ laser przekazuje energię tylko elektronom, ich temperatura chwilowo jest znacznie wyższa niż temperatura sieci krystalicznej. Przy bardzo krótkim impulsie lasera i wzroście temperatury sieci o kilka stopni Kelwina, temperatura elektronów może podnieść się nawet o kilkaset stopni. Następnie w ciągu kilku pikosekund układ uzyskuje równowagę termodynamiczną.

Literatura

1. Chen J.K., Beraun J.E., Numerical study of ultrashort laser pulse interactions with metal films, Numerical Heat Transfer, Part A, 40, s. 1-20 (2001).
2. Majchrzak E., Poteralska J., Numerical modelling of short-pulse laser interactions with thin metal films using two-temperatures model, 18th International Conference on Computer Method in Mechanics, CMM-2009, Short papers, s. 295-296.
3. Al-Nimr M.A., Heat transfer mechanisms during short duration laser heating of thin metal films, International Journal of Thermophysics, Vol. 18, No 5, s. 1257-1268 (1997).

MODELOWANIE NUMERYCZNE ELEMENTÓW Z KRYSTAŁÓW FOTONICZNYCH

PRZEMYSŁAW MŁYNARCZYK

Automatyka i Robotyka, ZAB, absolwent

Opiekun naukowy: dr inż. Grzegorz Dziatkiewicz



Streszczenie. Artykuł opisuje praktyczne zastosowanie programów do modelowania propagacji fal elektromagnetycznych w kryształach fotonicznych. W artykule wyjaśnione są również fizyczne prawa rządzące tym zjawiskiem oraz opisane zostają struktury fotoniczne wraz z ich zastosowaniami.

1. Wstęp

Modelowanie numeryczne we współczesnej nauce i technologii jest narzędziem wykorzystywanym powszechnie. Bez modelowania niemożliwe byłoby symulowanie różnych procesów fizycznych. Informacje zdobyte podczas modelowania numerycznego są bardzo przydatne w procesie projektowo-konstrukcyjnym i pozwalają na większą elastyczność przy projektowaniu złożonych urządzeń. W niniejszej publikacji przedstawiono analizę propagacji fal elektromagnetycznych poprzez struktury zwane kryształami fotonicznymi oraz modelowanie numeryczne tego zjawiska w strukturach jednowymiarowych tych kryształów.

2. Fale elektromagnetyczne

Fala elektromagnetyczna (promieniowanie elektromagnetyczne) to rozchodzące się w przestrzeni zaburzenie pola elektromagnetycznego. Zaburzenie to ma charakter fali poprzecznej, w której przenikają się wzajemnie zmienne pola: elektryczne i magnetyczne. Składowe natężenia pola elektrycznego i magnetycznego są wzajemnie do siebie prostopadłe, a zarazem są one prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali. Oba te pola wzajemnie się indukują [4]. Aby można było rozpatrywać propagację fali EM w kryształach fotonicznych, należy stosować opis wynikający z równań Maxwella [4], zebranych w tabeli 1.:

Tabela 1. Równania Maxwella

<i>Postać różniczkowa</i>	<i>Postać całkowa</i>	<i>Nazwa</i>
$\text{rot}H = \frac{\partial D}{\partial t} + J$	$\oint_L B \cdot dl = \mu_0(\epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt} + J)$	Prawo Ampere'a- Maxwella
$\text{rot}E = -\frac{\partial B}{\partial t}$	$\oint_L E \cdot dl = -\frac{d\phi_B}{dt}$	Prawo Faradaya
$\text{div}D = \rho$	$\epsilon_0 \oint_S E \cdot dS = \int \rho \cdot dV$	Prawo Gaussa dla elektryczności
$\text{div}B = 0$	$\int_S B \cdot dS = 0$	Prawo Gaussa dla magnetyzmu

Przekształcając odpowiednio prawo Ampere’a-Maxwella i prawo Faradaya oraz zakładając rozwiązanie równania falowego w postaci fali harmonicznego o wektorze falowym „ k ” oraz częstotliwości „ ω ”, otrzymuje się równanie Helmholtza dla dielektryka o postaci:

$$\frac{\partial^2 E(x)}{\partial x^2} + [n(x)]^2 k^2 E(x) = 0 \quad (1)$$

gdzie:

x - współrzędna położenia,

$n(x)$ - współczynnik załamania dielektryka, zależny od współrzędnej położenia,

E - wektor natężenia pola elektrycznego [N/C], [V/m],

W niniejszej publikacji wykorzystane zostało następujące rozwiązanie tego równania, dla którego $k_0 = nk$:

$$E_{pr} = E_p e^{ik_0 \cdot r} + E_o e^{-ik_0 \cdot r}, \quad (2)$$

gdzie:

E_{pr} – amplituda pola elektrycznego fali propagującej,

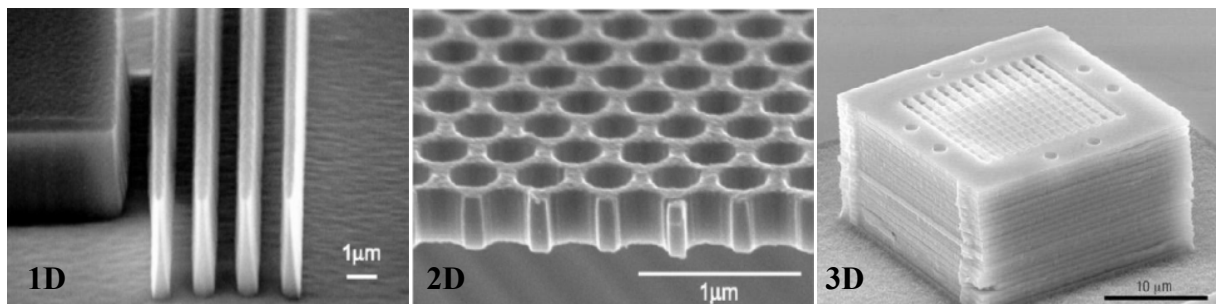
E_p – amplituda pola elektrycznego fali padającej,

E_o – amplituda pola elektrycznego fali odbitej,

r – współrzędna położenia

3. Kryształy fotoniczne

Kryształ fotoniczny to krystaliczna struktura przestrzenna o okresowo zmiennym współczynniku załamania, w której występuje tzw. fotoniczna przerwa wzbroniona. Jest zbudowany z periodycznie ułożonych warstw różnych materiałów dielektrycznych, co umożliwia specjalny przebieg fali elektromagnetycznej. Najczęściej tworzy się kryształy fotoniczne tak, żeby różnice pomiędzy współczynnikami załamania poszczególnych materiałów były jak największe. Periodyczność struktury materiału sprawia, że zachowanie światła przypomina zachowanie się elektronu w energetycznej strukturze pasmowej krystalicznych ciał stałych, natomiast długość fali lub jej częstotliwość, determinuje optyczną odpowiedź struktury kryształu. Właściwości kryształów fotonicznych zależą od rozmiarów, liczby warstw, geometrii oraz własności materiałów tworzących kryształy [1]. Wyróżnia się trzy podstawowe struktury kryształów fotonicznych: mogą one być jedno-, dwu-, lub trójwymiarowe, jak pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Struktury kryształów fotonicznych [3]

Kryształy fotoniczne znajdują zastosowanie głównie w nowoczesnych technologiach optycznych dotyczących emisji lub przesyłu fali EM. Główne zadania urządzeń, w skład których wchodzi struktury fotoniczne, to szeroko pojęte sterowanie promieniowaniem elektromagnetycznym. Zastosowanie znajdują w takich urządzeniach jak filtry optyczne, optyczne demultipleksery, światłowody fotoniczne, „niebieskie lasery” czy też metamateriały fotoniczne.

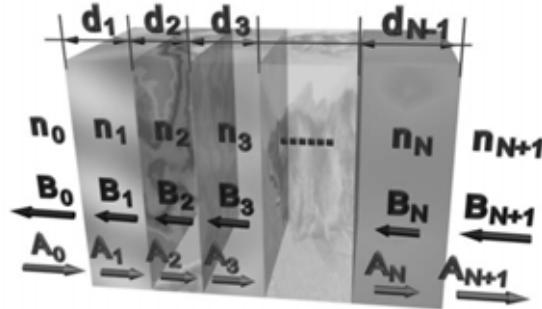
4. Modelowanie numeryczne propagacji fali elektromagnetycznej w jednowymiarowym kryształach fonicznych

Dla jednowymiarowej struktury fonicznej składającej się z N- warstw, przedstawionej na rysunku 2., rozwiązanie równania Helmholtza dla m-tej warstwy przybiera postać [2]:

$$E_m(x) = A_m e^{in_m k x_m} + B_m e^{-in_m k x_m} \quad (3)$$

gdzie:

n_m - współczynnik załamania warstwy m-tej,
 x_m - współrzędna położenia.



Rys. 2. Foniczna struktura jednowymiarowa zbudowana z N-warstw [2]

Dla przedstawionej struktury otrzymuje się układ $2N+2$ równań z $2N+4$ niewiadomymi, którymi są zespolone amplitudy fal: padających i odbitych od poszczególnych powierzchni międzywarstwowych. Jest to zespolony układ równań algebraicznych liniowych, ze względu na A_i i B_i :

$$\begin{aligned} A_0 e^{in_0 k x_0} + B_0 e^{-in_0 k x_0} &= A_1 e^{in_1 k x_0} + B_1 e^{-in_1 k x_0} \\ in_0 k A_0 e^{in_0 k x_0} - in_0 k B_0 e^{-in_0 k x_0} &= in_1 k A_1 e^{in_1 k x_0} - in_1 k B_1 e^{-in_1 k x_0} \\ A_1 e^{in_1 k x_1} + B_1 e^{-in_1 k x_1} &= A_2 e^{in_2 k x_1} + B_2 e^{-in_2 k x_1} \\ in_1 k A_1 e^{in_1 k x_1} - in_1 k B_1 e^{-in_1 k x_1} &= in_2 k A_2 e^{in_2 k x_1} - in_2 k B_2 e^{-in_2 k x_1} \\ &\dots \\ A_N e^{in_N k x_N} + B_N e^{-in_N k x_N} &= A_{N+1} e^{in_{N+1} k x_N} + B_{N+1} e^{-in_{N+1} k x_N} \\ in_N k A_N e^{in_N k x_N} - in_N k B_N e^{-in_N k x_N} &= in_{N+1} k A_{N+1} e^{in_{N+1} k x_N} - in_{N+1} k B_{N+1} e^{-in_{N+1} k x_N} \end{aligned} \quad (4)$$

Aby powyższy układ równań można było rozwiązać, należy założyć znajomość wartości dla dwóch wielkości:

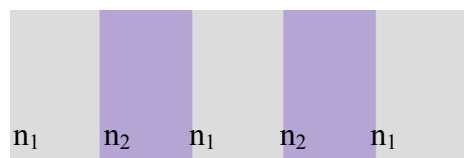
- $A_0=1$ – co oznacza umowną daną amplitudę fali padającej na kryształ,
- $B_{N+1}=0$ – co oznacza, że nie ma odbicia fali na styku ostatniej warstwy z otaczającym medium, tylko następuje jej propagacja.

Kwadrat modułu stosunku B_0/A_0 określa współczynnik odbicia struktury fonicznej:

$$R = \left(\left| \frac{B_0}{A_0} \right| \right)^2 \quad (5)$$

Opracowany program komputerowy, oblicza widmo współczynnika odbicia R , wg wzoru (5), dla zdefiniowanej przez użytkownika struktury warstwowej jednowymiarowego kryształu

fotonicznego. Program, został napisany w środowisku Matlab, dzięki czemu możliwa jest skuteczna modyfikacja programu, tak aby możliwe były obliczenia innych parametrów niż współczynnik odbicia (np. rozkład natężenia pola elektrycznego w kryształ). Częściowe rozwiązanie, powstałego na skutek modelowania, układu równań liniowych (4) uzyskuje się przez zastosowanie metody Cramera. Metoda Cramera jest tu najwygodniejszą metodą rozwiązywania układu równań, ponieważ aby obliczyć współczynnik odbicia, należy znać

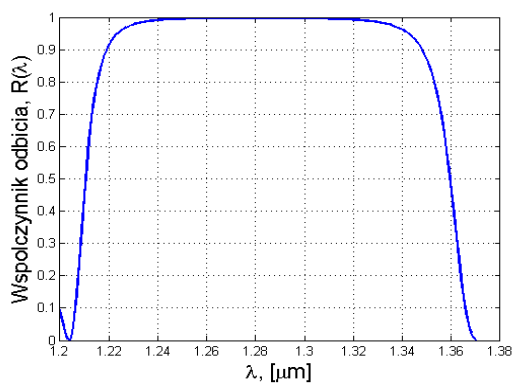


Rys. 3. Pięciowarstwową strukturą fotoniczną

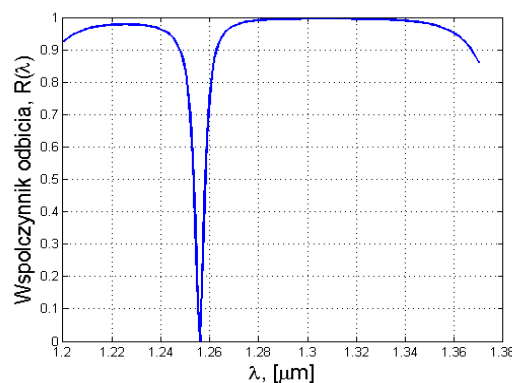
wartość tylko jednej niewiadomej B_0 . Zasada działania programu jest następująca: podaje się zakres długości fali(λ), dla którego program wykona obliczenia, grubości poszczególnych warstw(d) oraz ich współczynniki załamania(n). Program oblicza współczynnik odbicia(R) dla każdej długości fali z zakresu. Następnie można uzyskać wykres widma częstotliwościowego współczynnika odbicia. Dla struktur fotonicznych ważnym jest aby selekcjonowały

one odpowiednie długości fali z pewnego zakresu, efekt taki uzyskuje się dzięki wprowadzaniu tzw. defektu Bragga do struktury.

Pięciowarstwową strukturą przedstawioną na rys. 3. składa się z naprzemian ułożonych warstw o grubościach $d=1\mu\text{m}$ i współczynnikach załamania $n_1=3.5$ i $n_2=1$. Wykres widma współczynnika odbicia dla tej struktury przedstawia rys. 4. Rys. 5. przedstawia natomiast wykres widma współczynnika odbicia dla tej samej struktury z wprowadzonym defektem środkowej warstwy kryształu. Warstwa ta została poszerzona o $0.256\mu\text{m}$ w wyniku czego uzyskano filtr optyczny dla długości fali wynoszącej $1.256\mu\text{m}$. Korzystając z opracowanych programów można szybko i skutecznie projektować jednowymiarowe struktury fotoniczne znajdujące zastosowanie w różnych urządzeniach optyki i fotoniki.



Rys. 4. Wykres $R(\lambda)$ dla struktury bez defektu



Rys. 5. Wykres $R(\lambda)$ dla struktury z defektem

Literatura

1. Inonue K., Ohtaka K., Photonic Crystals. Physics, fabrication and applications Berlin, Springer-Verlag (2004).
2. Yasumoto K., Electromagnetic Theory and Applications for Photonic Crystals, CRC Press, Boca Raton (2005).
3. http://www.jsps.go.jp/j-bilat/fos_ja/data/jishi_06/abst08.pdf.
4. Haznadar Z., Stih Z., Electromagnetic fields, waves and numerical methods, IOS Press (2000).

PROCES PROJEKTOWANIA OSPRZĘTU ROBOCZEGO KOPARKI JEDNONACZYNIOWEJ

MIROSŁAW NIEMIEC

Mechanika i Budowa Maszyn, MB4, 5 rok

Opiekunowie naukowci: prof. dr hab. inż. Tadeusz Burczyński,
dr inż. Arkadiusz Poteralski



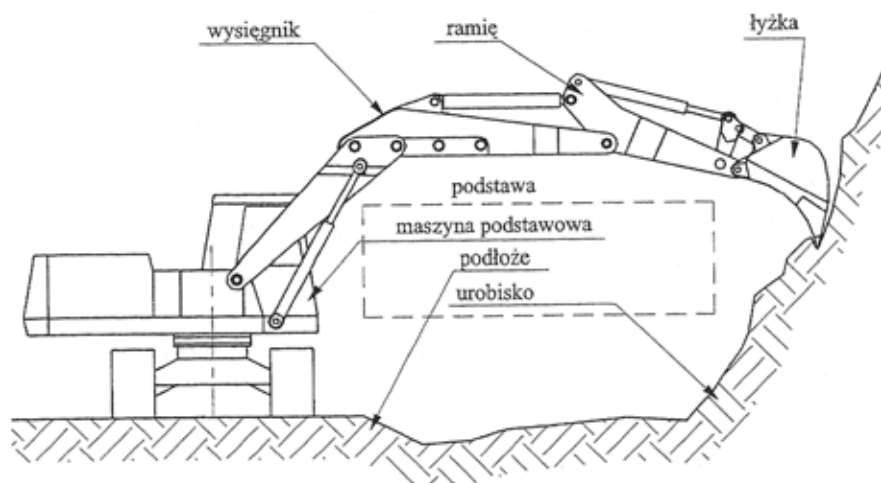
Streszczenie. W niniejszym artykule przedstawiono poszczególne etapy procesu projektowania osprzętu roboczego koparki jednonaczyniowej z użyciem oprogramowania CAD. Ponadto przedstawiono wstępną analizę wytrzymałościową wysięgnika, przeprowadzoną w pakiecie programów MSC.Software.

1. Wprowadzenie

Koparki są maszynami przeznaczonymi głównie do robót ziemnych, to znaczy do odspajania porcji gruntu i przemieszczania urobku na odkład, bądź na środki transportu. Nie jest to jednak ich jedyną funkcją, gdyż znajdują szerokie zastosowanie przy pracach budowlanych, rozbiórkowych oraz przeładunkowych. Tak obszerny wachlarz zastosowań jest możliwy dzięki stosunkowo łatwej wymianie osprzętu koparki. Przy tak szerokim spektrum zastosowań można dopatrzeć się sporych problemów stojących przed konstruktorem, który musi wziąć pod uwagę różnorodność obciążeń, jakim poddany zostanie wysięgnik oraz ramię koparki.

2. Mechanizmy napędowe osprzętu koparki

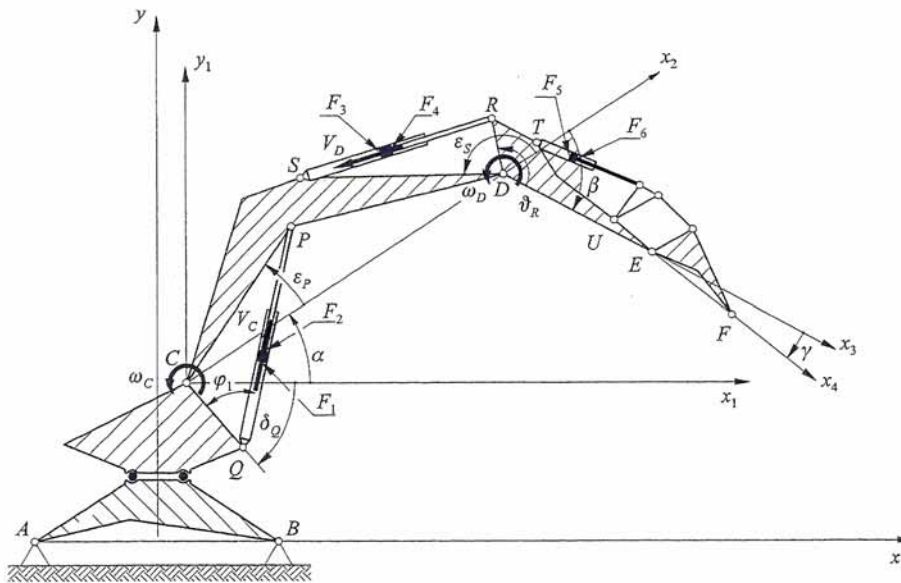
Z punktu widzenia mechaniki, koparka jest rozpatrywana jako łańcuch kinematyczny składający się z zespołu mechanizmów. W artykule tym skupiono się na mechanizmie napędowym osprzętu, który obok mechanizmu obrotu nadwozia i mechanizmu jazdy jest głównym członem schematu kinematycznego całej koparki.



Rys. 1. Ogólna struktura kinematyczna koparki [1]

W typowym osprzęcie roboczym można wyróżnić trzy mechanizmy napędowe: wysięgnika, ramienia i łyżki. Są to mechanizmy płaskie o jednym stopniu swobody, w związku z czym do ich napędu wymagany jest tylko jeden człon napędzający. Role takiego elementu najczęściej spełnia siłownik hydrauliczny. Istotą działania takiego mechanizmu jest zamiana ruchu postępowego w ruch obrotowy elementu napędzanego.

Rysunek 2 przedstawia schemat kinematyczny mechanizmów napędowych osprzętu koparki. Zawiera on punkty charakterystyczne tych członów wraz z miarami kątów określającymi ich wzajemne położenie oraz wektory prędkości liniowych i kątowych.



Rys. 2. Schemat kinematyczny mechanizmów osprzętu koparki [1]

Odcinki między punktami charakterystycznymi układu kinematycznego (rysunek 2) są oznaczone literą l z indeksem wskazującym nazwy punktów ograniczających ten odcinek. Na przykład l_{CD} oznacza odcinek między punktami C i D.

Kąty α , β , γ , określające wzajemne położenia układów współrzędnych oraz kąty określające położenia odcinków między punktami charakterystycznymi układu są traktowane jako kąty skierowane. Ich zwrot dodatni jest określony zgodnie z regułami obowiązującymi w prawoskrętnych układach współrzędnych [1].

Równania (1) i (2) opisują mechanizm napędowy wysięgnika, a ich wyprowadzenia oraz szczegółowy opis znajdują się w [1],

$$\alpha = \arccos \frac{l_{CQ}^2 + l_{CP}^2 - l_{PQ}^2}{2l_{CQ}l_{CP}} + \delta_Q - \varepsilon_P \quad (1)$$

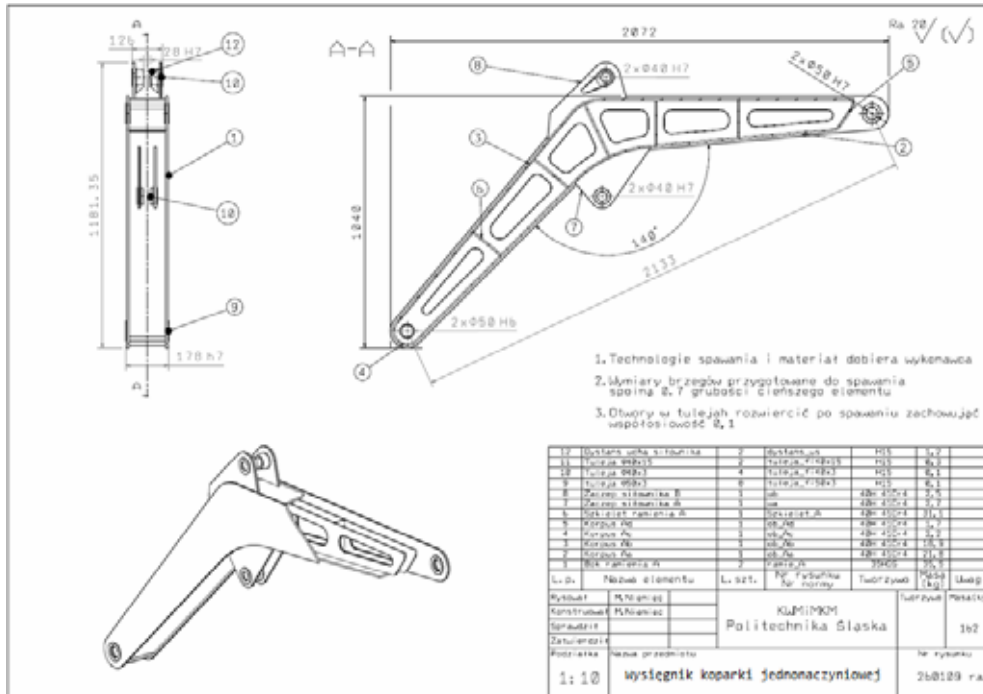
$$\omega_C = \frac{V_C}{K_2(\alpha)l_{PQ\min}} \quad (2)$$

gdzie:

V_C – prędkość tłoka w cylindrze mechanizmu napędowego wysięgnika,
 $K_2(\alpha)$ – bezwymiarowy współczynnik charakteryzujący zmienną odległość wektora V_C od przegubu C,
 $l_{PQ\min}$ – najmniejsza długość cylindra mechanizmu napędowego wysięgnika.

3. Konstrukcja

Po zapoznaniu się z Polską Normą PN-ISO 7135 : 1996 [5] oraz biorąc pod uwagę różnorodność obciążeń jakim poddany zostanie wysięgnik koparki, zaprojektowano model numeryczny, który przedstawia rysunek 3.

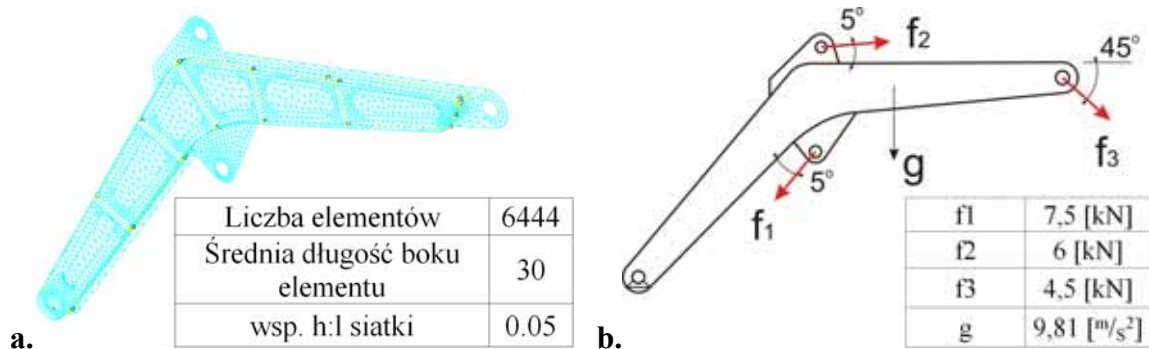


Rys. 3. Rysunek złożeniowy wysięgnika koparki

Konstrukcję zewnętrzną wysięgnika wykonano z blach o grubości 10 mm, natomiast szkielet z blach o grubości 8 mm. Materiał jaki użyto to dwa rodzaje stali, na blachy 40h41cr4 natomiast na tuleje i dystanse H15.

4. Analiza

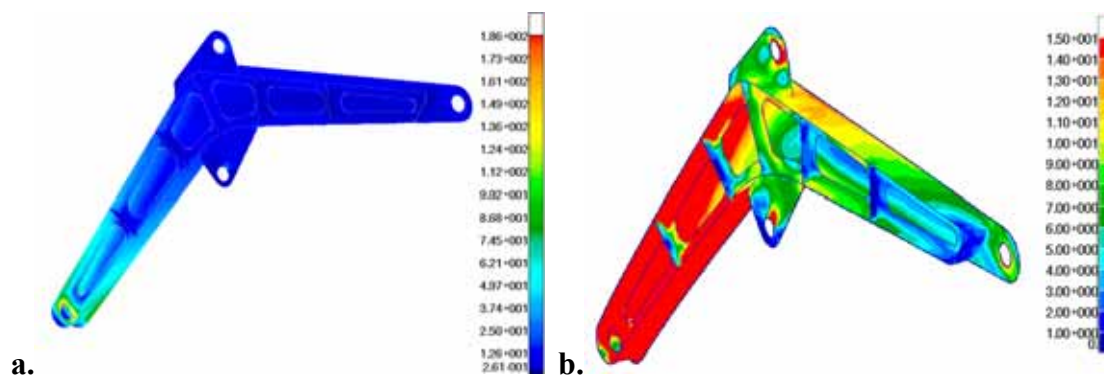
Model wysięgnika zaprojektowany w środowisku CAD [4] eksportowano do programu MSC.Patran, gdzie dokonano transformacji modelu bryłowego na powłokowy [2,3]. Uzyskany model zdyskretyzowano elementami typu Tria6 oraz Quad4 co obrazuje rysunek 4a, a następnie zadano warunki brzegowe zgodnie z rysunkiem 4b.



Rys. 4. Model MES: a) po dyskretyzacji, b) zadane warunki brzegowe

Z racji symetrii układu dokonano również podziału wysięgnika wzdłuż płaszczyzny symetrii. Odrzucenie symetrycznej części pozwoliło na dwukrotne zmniejszenie liczby elementów skończonych, oraz znacznie przyspieszyło czas obliczeń.

W wyniku analizy przeprowadzonej w pakiecie programów MSC.Software otrzymano mapy rozkładu naprężeń zredukowanych Von-Misesa, które pokazano na rysunku 5. Przedstawia on naprężenia globalne oraz „lokalne”, które uzyskano dzięki przeskalowaniu mapy naprężeń. Z rysunku 5a odczytano naprężenia maksymalne, które wnoszą $1,86e+2 \text{ N/mm}^2$, czyli 186 MPa. Rysunek 5b obrazuje rozkład naprężeń z zakresu 0 do 15 MPa.



Rys. 5. Mapy naprężeń zredukowanych Von-Misesa: a) globalne, b) lokalne

5. Wnioski

W wyniku wstępnej analizy wytrzymałościowej wysięgnika koparki uzyskano rozkład naprężeń obciążonego elementu oraz maksymalne naprężenia, jakie mogą wystąpić w pracującym układzie. Naprężenia te wynoszą 186 MPa. Taki wynik oraz graficzne przedstawienie rozkładu naprężeń, na którym nie występują spiętrzenia naprężeń, pozwala na wstępne zaakceptowanie konstrukcji oraz poddanie jej dalszej i dokładniejszej analizie wytrzymałościowej celem doboru poszczególnych parametrów konstrukcji (np. grubość poszczególnych elementów).

Brak dokładności w uzyskanych naprężeniach może być wynikiem niedokładnie odwzorowanych warunków brzegowych. Brak precyzji przy doborze sił obciążenia wynika z wyznaczenia ich na podstawie maksymalnych sił, które mogą wygenerować dobrane siłowniki.

W celu uzyskania dokładniejszych wyników konieczna jest kinematyczna analiza całego układu oraz przeprowadzenie analizy z obciążeniami dynamicznymi.

Literatura

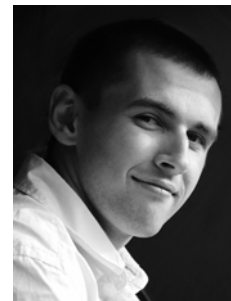
1. Dudczak A., Koparki: teoria i projektowanie, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa (2000).
2. Bąk R., Burczyński T., Wytrzymałość materiałów z elementami ujęcia komputerowego, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa (2001).
3. Łodygowski T., Kąkol W., Metoda elementów skończonych w wybranych zagadnieniach mechaniki konstrukcji inżynierskich, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań (1991).
4. Skarka W., Mazurek A., CATIA – Podstawy modelowania i zapisu konstrukcji, Wydawnictwo Helion, (2005).
5. PN-ISO 7135 : 1996, Maszyny do robót ziemnych. Koparki hydrauliczne.

OPTIMALIZACJA WŁASNOŚCI KOMPOZYTÓW PRZY UŻYCIU ALGORYTMU EWOLUCYJNEGO

JAN OPIELKA

Mechanika i Budowa Maszyn, MB4, 5 rok

Opiekunowie naukowci: dr hab. inż. Piotr Fedeliński, Prof. Pol. Śląskiej,
dr inż. Radosław Górski



Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki optymalizacji własności materiałów kompozytowych z wykorzystaniem algorytmu ewolucyjnego oraz połączonej metody elementów brzegowych i skończonych.

1. Wprowadzenie

Kompozyty są materiałami składającymi się z dwóch lub więcej oddzielnych faz [2]. Szczególnym przypadkiem, który będzie rozpatrywany, jest materiał złożony ze wzmocnienia oraz matrycy (osnowy). Do zamodelowania i analizy tego typu materiału została użyta połączona metoda elementów brzegowych i skończonych (MEB/MES). Obszar matrycy modelowany jest MEB jako tarcza, natomiast wzmocnienia modelowane są za pomocą belkowych elementów skończonych. W celu połączenia belki z tarczą, w miejscu ich styku wprowadzane są elementy i węzły wewnętrzne MEB, których współrzędne pokrywają się ze współrzędnymi węzłów elementów skończonych [3].

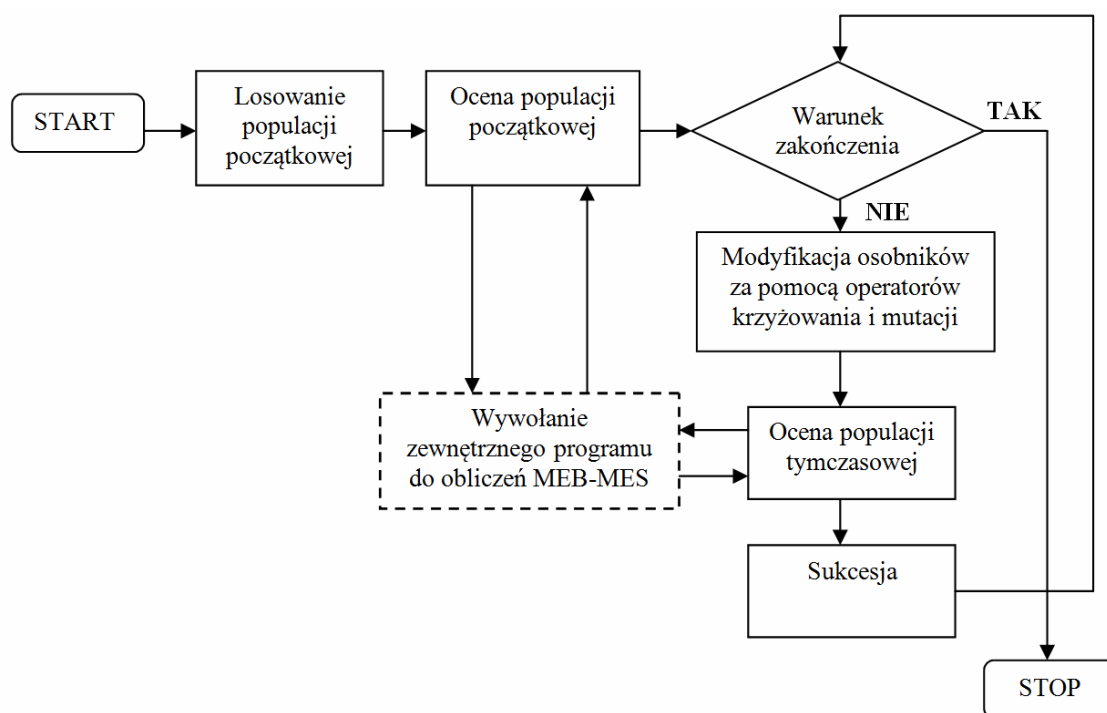
2. Algorytm ewolucyjny

Algorytm ewolucyjny (AE) jest programem do przeszukiwania zbioru rozwiązań alternatywnych w celu znalezienia optimum [1]. W pętli algorytmu wykonywane są operacje z użyciem operatorów genetycznych na osobnikach zawartych w populacji. Każdy osobnik jest potencjalnym rozwiązaniem problemu, natomiast populacja zbiorem osobników. Pojedynczy osobnik składa się z co najmniej jednego chromosomu, w którego skład wchodzi geny, czyli zmienne projektowe.

Obliczenia ewolucyjne zostały zrealizowane z wykorzystaniem autorskiego programu napisanego w języku C++. W pierwszym etapie działania programu tworzona jest populacja początkowa, której osobniki są generowane losowo ze zbioru rozwiązań dopuszczalnych. Tak utworzona populacja jest następnie oceniana. Ocena polega na wywołaniu dla każdego osobnika funkcji, która zwraca wartość określającą jego przystosowanie. Po ocenie populacji początkowej algorytm uruchamia pętlę, której każda iteracja odpowiada jednemu pokoleniu. W każdym pokoleniu stosowane są kolejno operacje reprodukcji, krzyżowania, mutacji, oceny oraz sukcesji. Reprodukacja polega na skopiowaniu wszystkich osobników z populacji początkowej lub otrzymanej w poprzednim pokoleniu do populacji tymczasowej. Operator krzyżowania losuje z populacji tymczasowej parę osobników rodzicielskich, z których w wyniku przekształceń powstaje para osobników potomnych. Mutacji podlega natomiast pojedynczy osobnik, którego geny są zmieniane poprzez dodanie zmiennej losowej o rozkładzie normalnym. Zarówno krzyżowanie, jak i mutacja, wykonywane są z pewnym prawdopodobieństwem, równym odpowiednio prawdopodobieństwu krzyżowania i mutacji. W wyniku działania sukcesji, z populacji rodzicielskiej i tymczasowej powstaje nowa, która staje się rodzicielską w kolejnej iteracji algorytmu.

3. Program do optymalizacji

Program do optymalizacji jest połączeniem dwóch modułów: algorytmu ewolucyjnego oraz programu do analizy układów ze wzmocnieniami połączoną MEB/MES. Komunikacja obu programów odbywa się z wykorzystaniem plików wejściowych i wyjściowych. Algorytm ewolucyjny, jako program nadrzędny, na podstawie danych z chromosomu, czyli zmiennych projektowych, tworzy pliki opisujące geometrię oraz własności danego układu. Następnie jest uruchamiany zewnętrzny program, który dokonuje analizy modelu oraz zapisuje wyniki do plików wyjściowych. Na podstawie tych danych algorytm ewolucyjny wyznacza przystosowanie danego osobnika. Rysunek 1 przedstawia przebieg obliczeń ewolucyjnych oraz sposób wywołania zewnętrznego programu w celu wyznaczenia wartości funkcji przystosowania.

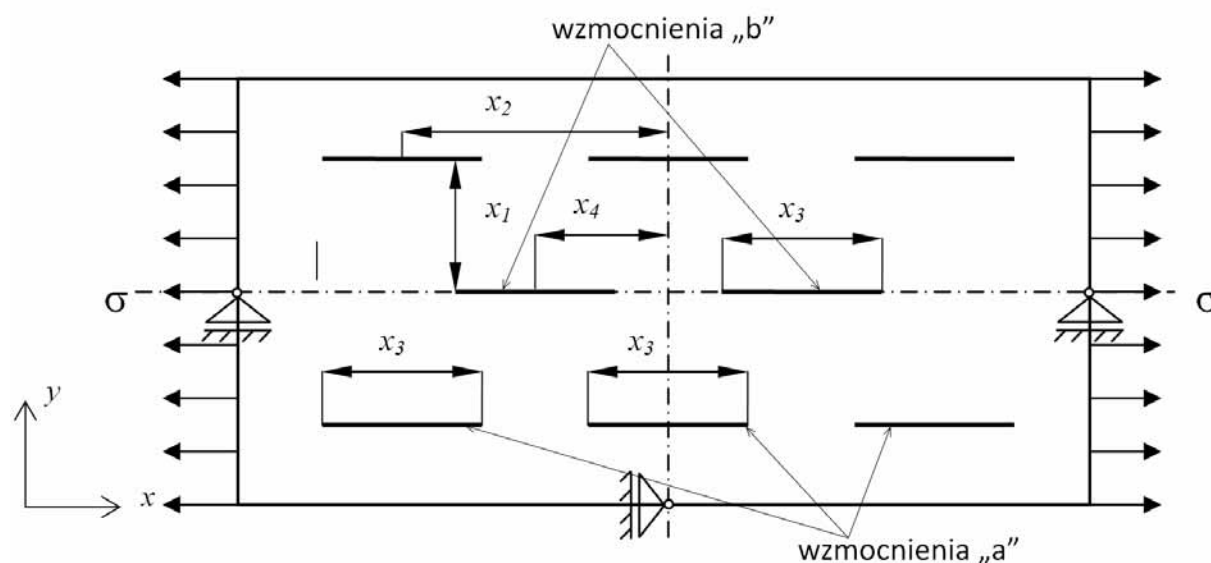


Rys. 1. Schemat blokowy programu do optymalizacji własności materiałów kompozytowych

4. Optymalizacja własności materiałów kompozytowych

W celu weryfikacji poprawności działania algorytmu ewolucyjnego, optymalizowano jednocześnie długość oraz rozłożenie ośmiu wzmocnień umieszczonych w osnowie. W zadaniu został wykorzystany płaski prostokątny układ o jednostkowej grubości i wymiarach $0.5 \times 0.25 \mu m$, który został poddany naprężeniu jednostkowemu σ i podparty w sposób pokazany na rysunku 2. Położenie oraz rozmiary wzmocnień zostały określone za pomocą czterech zmiennych projektowych $x_1 - x_4$ (rys. 2), na które nałożono ograniczenia. Własnościami niezmiennymi były: moduł Younga i współczynnik Poissona osnowy równe odpowiednio $1 GPa$ i 0.35 oraz moduł Younga wzmocnień równy $100 GPa$. Materiał osnowy znajduje się w płaskim stanie naprężenia. Optymalizacja została przeprowadzona ze względu na kryterium maksymalizacji zastępczego wzdłużnego modułu Younga, zdefiniowanego jako stosunek zadanego naprężenia do średniego odkształcenia układu (wyznaczonego na podstawie przemieszczeń obciążonych krawędzi). Każda krawędź układu została podzielona

na 20 elementów brzegowych, pojedyncze wzmocnienie na 8 elementów brzegowych i 16 skończonych. Całkowita liczba elementów brzegowych i skończonych wyniosła odpowiednio 144 i 128.



Rys. 2. Sposób obciążenia i podparcia układu oraz zmienne projektowe

Jednym z warunków ograniczających nałożonych na zmienne projektowe był stały udział objętościowy wzmocnień równy $V_{wzm}=1.5\%$, w stosunku do objętości całego układu. Zostało to uwzględnione przy obliczaniu pola powierzchni przekroju poprzecznego wzmocnienia, które zmieniało się wraz ze zmianą długości wzmocnienia tak, aby uzyskać stałą objętość. Ograniczenia na zmienne projektowe oraz parametry algorytmu ewolucyjnego przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry zadania

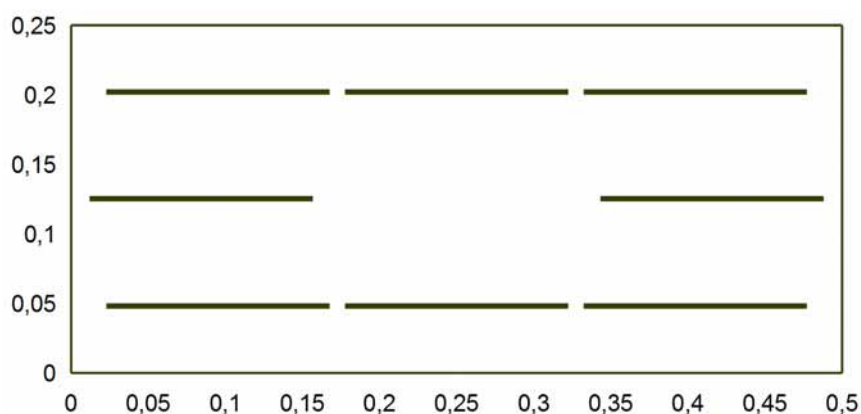
<i>Ograniczenia na zmienne</i>		
<i>Zmienne</i>	<i>dolne</i>	<i>górne</i>
x_1	0.01 μm	0.115 μm
x_2	0.04 μm	0.22 μm
x_3	0.01 μm	odległość między sąsiadującymi wzmocnieniami „a” większa bądź równa 0.01 μm oraz odległość od krawędzi bocznej większa bądź równa 0.02 μm
x_4	odległość wzmocnień „b” od pionowej osi symetrii układu większa bądź równa 0.01 μm	odległość wzmocnień „b” od krawędzi bocznej układu większa bądź równa 0.01 μm
<i>Parametry algorytmu ewolucyjnego</i>	liczba zmiennych = 4 liczba osobników = 40 liczba pokoleń = 70 prawdopodobieństwo krzyżowania = 0.6 prawdopodobieństwo mutacji = 0.25	
<i>Kryterium optymalizacji</i>	maksymalizacja zastępczego modułu Younga	

5. Wyniki optymalizacji

Algorytm ewolucyjny znalazł optymalne rozwiązanie w 54 pokoleniu. W tabeli 2 przedstawiono otrzymane wartości zmiennych projektowych układu po optymalizacji oraz układu przed optymalizacją, przedstawionego na rysunku 2. Poprawa wartości funkcji celu w stosunku do układu przed optymalizacją wyniosła 27%. Na rysunku 3 przedstawiono ułożenie wzmocnień po optymalizacji. Można zauważyć, że wzmocnienia osiągnęły długość bliską maksymalnej możliwej przy danych warunkach ograniczających.

Tabela 2. Wynik optymalizacji

Zmienne	Układ przed optymalizacją	Układ po optymalizacji
x_1	0.078 μm	0.076 μm
x_2	0.156 μm	0.154 μm
x_3	0.093 μm	0.144 μm
x_4	0.078 μm	0.165 μm
Wartość funkcji celu	1.227	1.564



Rys. 3. Rozłożenie wzmocnień w układzie po optymalizacji

6. Podsumowanie

Jedną z zalet wykorzystania połączonej MEB/MES jest brak konieczności dyskretyzacji całego obszaru, jak ma to miejsce w MES, co znacznie upraszcza proces przygotowania modelu. Jest to szczególnie ważne w zagadnieniach optymalizacji, zwłaszcza tych przedstawionych w pracy, gdzie optymalizowane są własności złożonych układów, jakimi są materiały kompozytowe, ponieważ dla każdego osobnika obliczenie funkcji przystosowania wymaga utworzenia nowego modelu numerycznego i rozwiązania zadania analizy.

Literatura

1. Arabas J., Wykłady z algorytmów ewolucyjnych, WNT, Warszawa (2001).
2. Brent Strong A., Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications, SME (2008).
3. Górski R., Fedeliński P., Optimal reinforcement of plates modelled by the coupled boundary and finite element method, SOLMECH (2006).

METAMODEL ODPOWIEDZI WYBRANYCH MODELI ELEMENTÓW TURBINY PRZEMYSŁOWEJ Z WYKORZYSTANIEM METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

DANIEL OŹGA

Automatyka i Robotyka, AB3, 5 rok

Opiekunowie naukowci: prof. dr hab. inż. Tadeusz Burczyński,
dr inż. Adam Długosz



Streszczenie. W artykule zawarto propozycję utworzenia metamodeli opisujących analizę termomechaniczną dla uchwytu turbiny przemysłowej. Wielkościami wejściowymi modelu są wybrane parametry geometryczne, natomiast wielkością wyjściową jest maksymalne naprężenie zredukowane. Utworzone metamodele pozwalają uzyskać informację dotyczącą maksymalnych naprężeń zredukowanych bez konieczności przeprowadzania czasochłonnej analizy numerycznej.

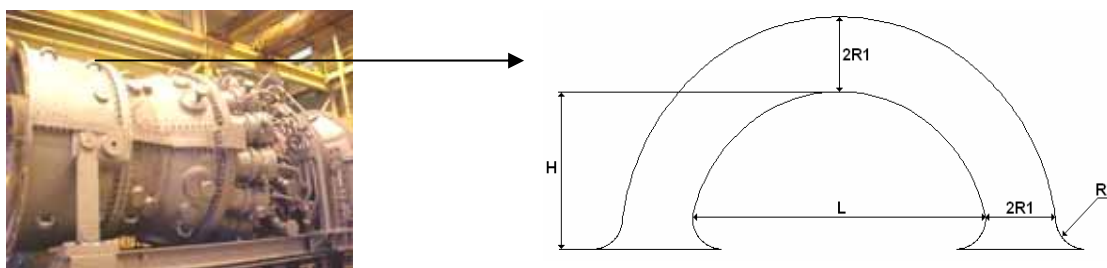
1. Wprowadzenie

W praktyce obliczeń inżynierskich często konieczne jest dokonanie kilkukrotnie obliczeń wytrzymałościowych tego samego elementu, który uległ nieznacznym przekształceniom pod względem geometrii. Niniejsze badania zostały wykonane, aby bez prowadzenia długotrwałych analiz można było określić wpływ temperatury na zachowanie uchwytu turbiny przemysłowej o określonej geometrii. Na badany element działa pole temperatur, które powstaje w wyniku zachodzących procesów wewnątrz turbiny i przenosi się z korpusu na badany uchwyt. Pod wpływem działania przyłożonej temperatury, badany obiekt odkształca się oraz powstają w nim naprężenia.

Aby osiągnąć założony cel badań, konieczne jest znalezienie metamodelu opisującego zachowanie badanego obiektu, który poprzez wprowadzenie wielkości wejściowych w postaci parametrów geometrycznych, pozwoli na określenie wielkości wyjściowej w postaci maksymalnego naprężenia zredukowanego.

2. Parametryzacja geometrii

W pierwszym etapie badań wybrano parametry, które w pełni opisują geometrię obiektu: promień $R1$, promień $R2$, wysokość H i długość L prezentowane na Rys.1. Następnie określono zakresy zmienności poszczególnych parametrów, biorąc pod uwagę możliwość realizacji geometrii dla wybranych zakresów oraz wymiary uchwytów stosowane w praktyce.



Rys. 1. Modelowanie geometrii

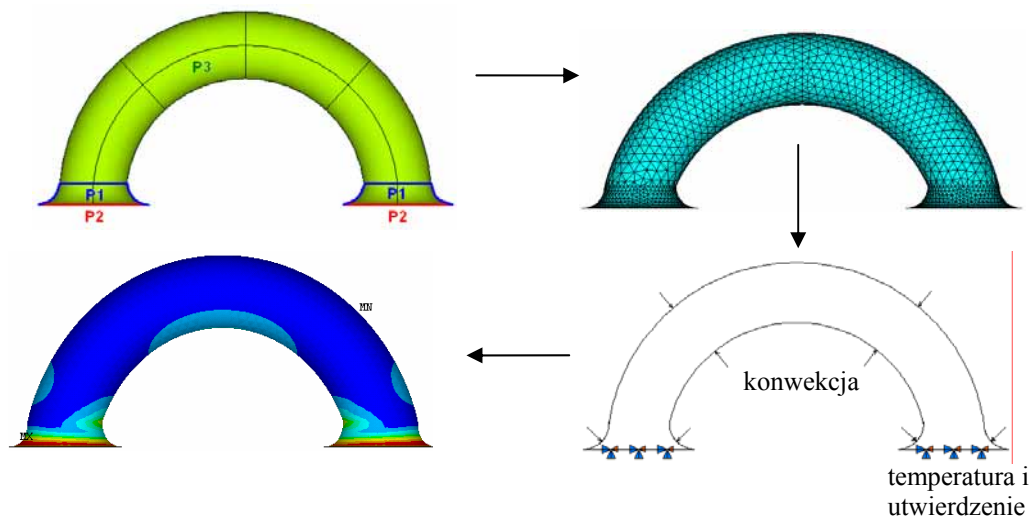
3. Plan eksperymentu

W postaci graficznej plan eksperymentu można przedstawić jako siatkę punktów pomiarowych na przestrzeni ograniczonej zakresami wielkości wejściowych badanego zjawiska. Pojedynczy punkt pomiarowy określany jest jako układ eksperymentu.

Po dokonaniu analizy literaturowej wybrano trójpoziomowy plan eksperymentu ze względu na możliwość badania nieliniowego wpływu wielkości wejściowych na odpowiedź badanego obiektu oraz ze względu na optymalną i możliwą do realizacji liczbę układów eksperymentu, jaką ten plan generuje. Trójpoziomowy plan eksperymentu wymaga określenia wartości maksymalnej, średniej i minimalnej w poszczególnych zakresach zmienności wielkości wejściowych. Następnie wyznaczane są wszystkie możliwe kombinacje tych wartości, których liczba równa jest 3^S , gdzie: S- liczba wielkości wejściowych. Dla badanej geometrii otrzymujemy 81 układów eksperymentu. Obliczenia dla takiej liczby układów eksperymentu zostały wykonane szeregowo z wykorzystaniem języka APDL, oferowanego w programie ANSYS.

4. Obliczenie naprężeń

Przyjęto, że badany uchwyt jest wykonany ze staliwa GS 38.3. Określone zostały trzy parametry (P1, P2, P3), od których uzależniona została wielkość siatki w poszczególnych obszarach. Okazało się, że możliwa do realizacji wielkość siatki jest mocno zależna od długości promienia R1 i R2. Ponieważ w planie eksperymentu wielkości te zmieniają się co 9 układów, opracowanych zostało 9 zestawów parametrów siatki, które określają jej wielkość we wszystkich 81. układach eksperymentu. Jako warunki brzegowe założono temperaturę i utwardzenie w podstawie oraz konwekcję z powietrzem. Dla uzyskanych w ten sposób zdyskretyzowanych i obciążonych modeli przeprowadzono obliczenia, co przedstawia Rys. 2.



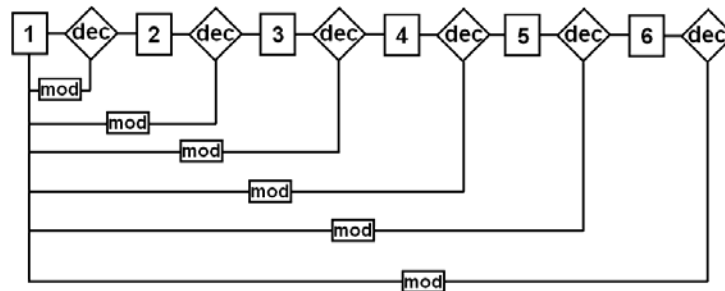
Rys. 2. Etapy prowadzonych obliczeń

5. Wyznaczenie metamodelu

W celu wyznaczenia metamodelu posłużono się metodą mniejszych kwadratów, którą wykorzystano na drodze rozwiązywania układu równań, w którym niewiadomą stanowiły współczynniki przyjętej postaci funkcji aproksymującej. W ramach metody najmniejszych kwadratów dąży się do minimalizacji błędu pomiędzy rzeczywistą odpowiedzią obiektu na dane wymuszenie a odpowiedzią modelu na to samo wymuszenie. Dąży się do uzyskania takich współczynników funkcji aproksymującej, dla których błąd aproksymacji jest najniższy.

6. Weryfikacja

W pierwszej fazie weryfikacji obliczono wartości naprężeń zredukowanych poprzez wstawienie odpowiednich danych do wyznaczonego metamodelu. Następnie na podstawie porównania uzyskanych wyników z wartościami naprężeń zredukowanych uzyskanych z analiz przeprowadzono dalsze badania. W zależności od otrzymywanych wyników w kolejnych etapach weryfikacji, podejmowana była decyzja o modyfikacji modelu lub kontynuowaniu weryfikacji. Kroki prowadzone na drodze weryfikacji modelu przedstawia Rys. 3.



Rys. 3. Etapy weryfikacji metamodelu

gdzie:

dec- decyzja; mod- modyfikacja

- 1- wyznaczenie wielkości wyjściowych na podstawie modelu
- 2- test F-Snedecora badający odchylenia standardowe i stanowiący o adekwatności modelu
- 3- błąd względny aproksymacji
- 4- badanie zachowania modelu dla pośrednich układów eksperymentu
- 5- badanie zachowania modelu dla układów z poza zakresu
- 6- test T-Studenta stanowiący o statystycznej istotności współczynników funkcji aproksymującej

Po przeprowadzeniu badań dla różnych postaci funkcji aproksymującej wybrano wielomian drugiego stopnia z interakcjami jako funkcję dla której błąd aproksymacji (9,13%) jest najniższy przy przewidywalnym zachowaniu modelu dla pośrednich układów eksperymentu:

$$\begin{aligned} \hat{y} = & a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{14}x_1x_4 \\ & + a_{23}x_2x_3 + a_{24}x_2x_4 + a_{34}x_3x_4 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 \\ & + a_{44}x_4^2 \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie: $x_1=R1$; $x_2=R2$; $x_3=L$; $x_4=H$.

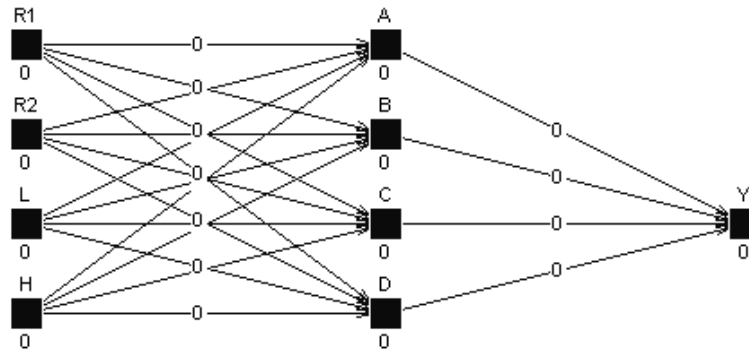
Współczynniki wielomianu aproksymującego przedstawia tabela 1.

Tabela 1. Współczynniki funkcji aproksymującej

a_0	2254,948	a_{12}	-0,4171387	a_{34}	-4,15E-02
a_1	31,580588	a_{13}	3,37E-02	a_{11}	-0,1360897
a_2	-83,044988	a_{14}	-0,1601952	a_{22}	1,1098938
a_3	2,0016216	a_{23}	-6,73E-02	a_{33}	4,59E-03
a_4	-32,632979	a_{24}	0,684452	a_{44}	0,1976657

7. Interpolacja za pomocą sieci neuronowych

Sieci neuronowe zostały wykorzystane w celu porównania modeli uzyskanych dwoma metodami oraz funkcjonalności samych metod. Po przeprowadzeniu wstępnej weryfikacji kilku architektur sieci wybrano jednokierunkową strukturę przedstawioną na Rys. 4.



Rys. 4. Architektura sieci neuronowej

Jako funkcję uczącą zastosowano standardową propagację wsteczną, następnie ze względu na rodzaj funkcji uczącej wybrano funkcję inicjalizacji generującą losowe wartości wag. Zastosowano sigmoidalną funkcję wejścia i nie wprowadzającą zmian funkcję wyjścia. Jako metodę aktualizacji wybrano metodę topologiczną.

Błąd aproksymacji dla zweryfikowanej sieci wyniósł 6,9% przy zachowaniu przewidywalności modelu dla pośrednich wzorców.

8. Wnioski

- Nadmiernie uproszczone postacie funkcji aproksymującej wpływały na znaczny wzrost błędu aproksymacji
- Dla rozwiniętych funkcji aproksymujących obserwowano spadek błędu aproksymacji dla podstawowych układów eksperymentu, jednak uzyskane w ten sposób modele okazywały się nieprzewidywalne dla układów pośrednich
- Model uzyskany przy pomocy sieci neuronowych okazał się dokładniejszy
- Sieci neuronowe są znacznie szybsze i wygodniejsze w stosunku do interpolacji poprzez poszukiwanie współczynników funkcji aproksymującej

Literatura

1. Bartosiński B., Hoja J., Kowalewski M., Toczek W., Zielonko R., Laboratorium z metrologii, skrypt Politechniki Gdańskiej (1995).
2. Dokumentacja programu Ansys: Release 11.0 Documentation for ANSYS.
3. Statsoft, Internetowy podręcznik statystyki, <http://www.statsoft.pl/textbook/stathome.html>, - luty 2010.
4. SNNS Group, Stuttgart Neural Network Simulator User Manual, Version 4.2.

MODELOWANIE ODDZIAŁYWAŃ LASERA NA TKANKI BIOLOGICZNE – ZADANIE OSIOWOSYMETRYCZNE

MONIKA PSARSKA

Automatyka i Robotyka, AB3, 5 rok

Opiekunowie naukowci: prof. dr hab. inż. Ewa Majchrzak,
dr inż. Marek Jasiński



Streszczenie. W artykule przedstawiono model matematyczny zjawiska przepływu ciepła w tkance biologicznej poddanej działaniu lasera bazujący na równaniu Pennes'a. Zadanie rozwiązano wykorzystując schemat jawny metody różnic skończonych, a obliczenia wykonano za pomocą autorskiego programu napisanego w języku C++.

1. Wprowadzenie

Lasery potocznie nazywa się wiązkę światła o niespotykanych właściwościach (koherentne, monochromatyczne, złożone z równoległych fal), dzięki którym znalazł on szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach nauki, także w medycynie (między innymi w chirurgii, kosmetologii, okulistyce, stomatologii).

Zjawiska jakie zachodzą w tkance biologicznej poddanej działaniu lasera dzieli się na cztery grupy: *termiczne* – w zależności od czasu oddziaływania i temperatury jaką osiąga tkanka wyróżnia się: hipertermię, koagulację, parowanie i zwęglenie [1]; *fotokemiczne* – wykorzystywane w terapii fotodynamicznej (PDT) do selektywnego niszczenia komórek zmienionych chorobowo, wypełnionych substancją światłoczułą [2]; *fotoblacyjne* – umożliwiają usunięcie tkanki tylko w obszarze bezpośredniego oddziaływania lasera o krótkim impulsie przez wywołanie mikrowybuchu będącego efektem zerwania wiązań międzycząsteczkowych [1,3]; *elektromechaniczne* – w miejscu skupienia wiązki lasera o dużej gęstości mocy tworzy się mikroobszar plazmy, który rozszerzając się wytwarza falę uderzeniową; w ten sposób powstają siły mechaniczne niszczące tkankę [1,3].

Wykorzystanie powyższych zjawisk w medycynie wymaga bardzo dokładnej analizy wpływu parametrów promieniowania laserowego na przebieg procesu.

2. Opis matematyczny zjawisk cieplnych wywołanych działaniem lasera

Do opisu przepływu ciepła w tkance biologicznej wykorzystano równanie Pennes'a, które dla obszaru zorientowanego we współrzędnych walcowych $\{r, z\}$ i stałych parametrów termofizycznych ma postać

$$c\rho \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\lambda \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \right) + Q(r, z, t) \quad (1)$$

gdzie c [J/(kgK)] jest ciepłem właściwym tkanki, ρ [kg/m³] – gęstością tkanki [kg/m³], T [°C] oznacza jej temperaturę, λ [W/(mK)] – współczynnik przewodzenia ciepła, natomiast t [s] – czas. Składnik źródłowy $Q(r, z, t)$ występujący w równaniu (1) jest sumą dwóch elementów

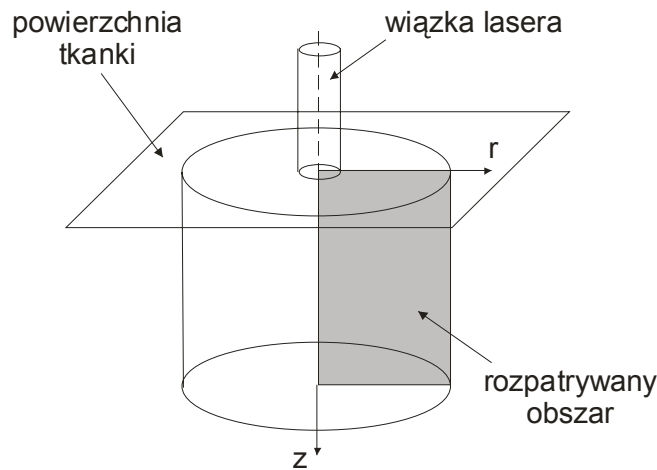
$$Q(r, z, t) = Q_{perf}(r, z, t) + Q_{met} \quad (2)$$

gdzie $Q_{perf}(r, z, t)$ to składnik związany z perfuzją krwi, a jego wartość wyznaczana jest ze wzoru

$$Q_{perf}(r, z, t) = Gc_B\rho_B[T_B - T(r, z, t)] \quad (3)$$

przy czym G [1/s] to współczynnik perfuzji krwi, c_B [J/(kgK)] – ciepło właściwe krwi, ρ_B [kg/m³] – gęstość krwi, T_B [°C] – temperatura krwi.

Druga składowa, Q_{met} , to funkcja źródła związana z przemianami metabolicznymi. Przyjmuje ona stałą wartość, ale zależną od warunków w jakich znajduje się badany organizm (ruch, spoczynek, chłód).



Rys. 1. Rozpatrywany obszar tkanki biologicznej

Równanie (1) należy uzupełnić warunkami brzegowymi i początkowym. Dla tkanek silnie pochłaniających, oddziaływanie lasera na tkankę biologiczną uwzględnia się w postaci warunku brzegowego Neumanna, założonego na powierzchni tkanki, w obrębie plamki lasera [4]

$$q(r, z, t) = q_b = I_o(1 - R_{odb}) \quad (4)$$

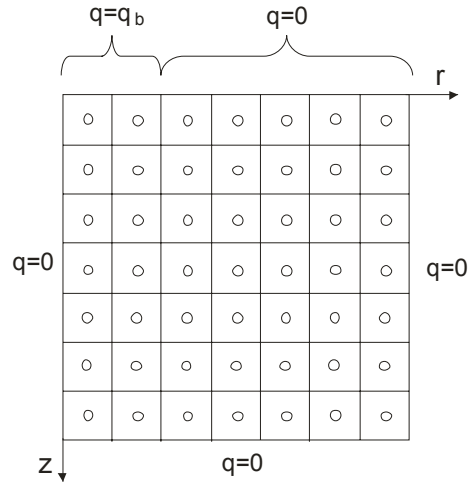
gdzie I_o [W/m²] jest intensywnością promieniowania laserowego, R_{odb} – współczynnikiem odbicia.

Na pozostałych brzegach przyjęto zerowy strumień ciepła. Opis matematyczny uzupełniono warunkiem początkowym: $T(r, z, t) = T_p$, gdzie T_p to temperatura początkowa tkanki.

3. Metoda różnic skończonych

Do rozwiązania przedstawionego zadania zastosowano metodę różnic skończonych, ze względu na jej prostotę i efektywność w rozwiązywaniu zadań związanych z przepływem ciepła.

Aby rozwiązać równanie (1) metodą różnic skończonych, należy wyznaczyć ilorazy różnicowe, którymi zastępuje się pochodne względem współrzędnych r , z i pochodną względem czasu zawarte w równaniu. W tym celu należy dokonać dyskretyzacji przestrzeni i czasu. Rysunek 2 przedstawia siatkę różnicową o stałym kroku h dla obu kierunków dyskretyzacji. Siatka czasu także ma stały krok $\Delta t = t^f - t^{f-1}$.



Rys. 2. Siatka różnicowa

Po podstawieniu w miejsce pochodnych odpowiednich ilorazów różnicowych, a także wprowadzeniu średnich wartości współczynnika przewodzenia ciepła, oporów cieplnych i funkcji kształtu siatki oraz uporządkowaniu, otrzymano równanie, za pomocą którego oblicza się wartości temperatury w węzłach siatki

$$T_{i,j}^f = \left(1 - \frac{\Delta t \Phi_{r+1}}{c \rho R_4} - \frac{\Delta t \Phi_{r-1}}{c \rho R_3} - \frac{\Delta t \Phi_z}{c \rho R_2} - \frac{\Delta t \Phi_z}{c \rho R_1} - \frac{\Delta t G c_B \rho_B}{c \rho} \right) T_{i,j}^{f-1} + \frac{\Delta t \Phi_{r+1}}{c \rho R_4} T_{i,j+1}^{f-1} + \frac{\Delta t \Phi_{r-1}}{c \rho R_3} T_{i,j-1}^{f-1} + \frac{\Delta t \Phi_z}{c \rho R_2} T_{i+1,j}^{f-1} + \frac{\Delta t \Phi_z}{c \rho R_1} T_{i-1,j}^{f-1} + \frac{\Delta t G c_B \rho_B}{c \rho} T_B + \frac{\Delta t}{c \rho} Q_{met} \quad (5)$$

gdzie opory ciepła i funkcje kształtu siatki dane są w postaci wzorów

$$R_1 = \frac{h}{2\lambda_{i,j-1}} + \frac{h}{2\lambda_{i,j}}, \quad R_2 = \frac{h}{2\lambda_{i,j+1}} + \frac{h}{2\lambda_{i,j}}, \quad R_3 = \frac{h}{2\lambda_{i-1,j}} + \frac{h}{2\lambda_{i,j}}, \quad R_4 = \frac{h}{2\lambda_{i+1,j}} + \frac{h}{2\lambda_{i,j}} \quad (6)$$

$$\Phi_z = \frac{1}{h}, \quad \Phi_{r+1} = \frac{r_{i,j} + \frac{h}{2}}{r_{i,j} h}, \quad \Phi_{r-1} = \frac{r_{i,j} - \frac{h}{2}}{r_{i,j} h}$$

Ponieważ zastosowano schemat jawny, zachodzi konieczność zachowania warunku stabilności, zgodnie z którym wszystkie współczynniki w równaniu (5) występujące przy temperaturach węzłowych muszą być większe lub równe zero. Stąd wyznacza się dopuszczalną wielkość kroku czasu Δt .

Powyższe równanie odnosi się do węzłów wewnętrznych. W przypadku węzłów leżących przy brzegu obszaru, należy uwzględnić warunki brzegowe poprzez odpowiednią modyfikację pierwszych dwóch składników występujących po prawej stronie równania (1).

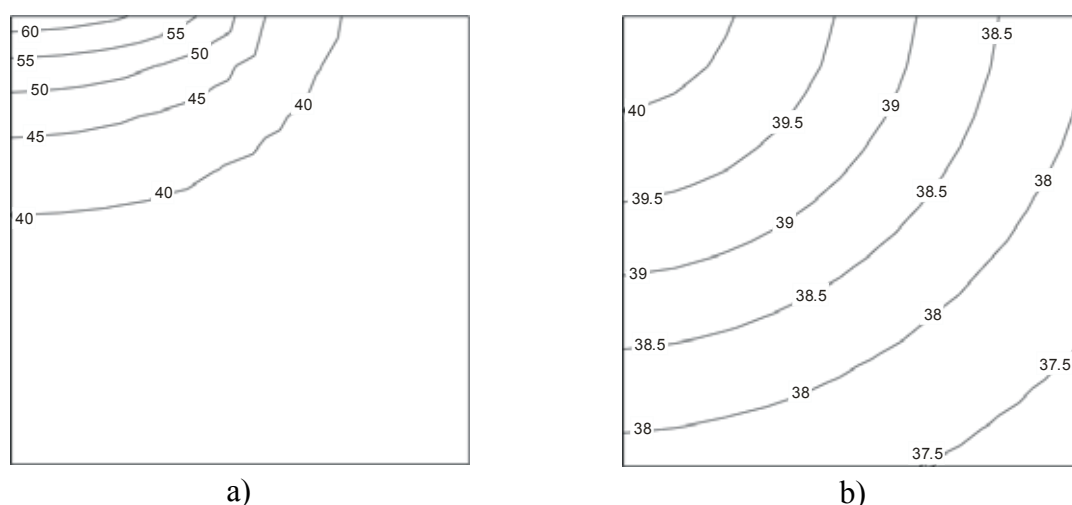
4. Program komputerowy

Do wykonania obliczeń rozkładu temperatury w tkance biologicznej według powyższego algorytmu wykorzystano autorski program napisany w języku C++. Ponadto program dokonuje obliczeń współczynnika zniszczenia tkanki dla każdego węzła siatki zgodnie z modelem Arrheniusa [4].

Wynikiem działania programu są dwa pliki tekstowe: plik zawierający wartości temperatur w węzłach siatki różnicowej oraz plik, w którym zapisane są wartości współczynnika zniszczenia tkanki dla wszystkich węzłów w chwili zakończenia symulacji.

W celu wizualizacji uzyskanych wyników rozkładu temperatury, plik importowano do programu MathCAD i generowano wykresy izoterm.

Rysunek 3a przedstawia rozkład temperatur po 6 sekundach, a rysunek 3b po 20 sekundach dla następujących parametrów tkanki $c=3600$ [J/(kgK)], $\rho=1048$ [kg/m³], $\lambda=0.558$ [W/(mK)], $Q_{met}=245$ [W/m³], $G=0.0005$ [1/s], $c_B=3840$ [J/(kgK)], $\rho_B=1058$ [kg/m³], $T_B=37$ [°C] oraz parametrów lasera: $I_o=20000$ [W/m²], $R_{odb}=0.05$, promień plamki lasera: 0.002 [m], przy czym laser oddziaływał na tkankę w sposób ciągły, przez 6 sekund. Rozpatrywano obszar tkanki o wymiarach 0.02x0.02 [m]. Przyjęto krok czasu $\Delta t=0.01$ [s] i dyskretyzację $n=50$.



Rys. 3. Rozkład temperatur (przybliżenie obszaru o wymiarach 0.004x0.004 [m]):
a) po 6 [s], b) po 20 [s]

5. Wnioski

Opracowany program komputerowy dotyczy tkanek silnie pochłaniających promieniowanie świetlne, w przypadku których oddziaływanie lasera uwzględniane jest w warunku brzegowym Neumanna. Program umożliwia analizę przepływu ciepła dla dwóch trybów pracy lasera: ciągłego (jak w powyższym przykładzie) i impulsowego.

Przedstawiony algorytm obliczeń bazuje na wariacie metody różnic skończonych, który pozwala uwzględnić zmiany parametrów termofizycznych tkanki następujące ze zmianami temperatury. Ze względu na brak danych obliczenia przeprowadzono dla stałych parametrów tkanki.

Literatura

1. Fizia A., Modelowanie rozkładu temperatur w tkance biologicznej poddanej działaniu lasera, Praca dyplomowa magisterska, Katedra Wytrzymałości Materiałów i Metod Komputerowych Mechaniki, Politechnika Śląska, Gliwice (2009).
2. <http://www.prion.astral.org.pl/domowa/terapia-fotodynamiczna.php>
3. <http://sllwp.w.interia.pl/6.htm>
4. Zhou J., Chen J.K., Zhang Y., Dual-phase-lag effects on thermal damage to biological tissues caused by laser irradiation, Computers in Biology and Medicine, 39, s.286-293 (2009).

OBLICZENIA Z UŻYCIEM JĘZYKA OPENCL

KRZYSZTOF RYCZEK

Edukacja Techniczno-Informatyczna, EC3, 5 rok

Opiekunowie naukowci: prof. dr hab. inż. Tadeusz Burczyński,
dr inż. Waclaw Kuś



Streszczenie. Celem niniejszej pracy jest zaprezentowanie możliwości obliczeń równoległych GPU z wykorzystaniem języka OpenCL. Przedstawiono przykład obliczeń z wykorzystaniem programu realizującego mnożenie macierzy kwadratowej przez wektor. Rozpatrywano wydajność obliczeniową dla dwóch kerneli.

1. Wprowadzenie

OpenCL (Open Computing Language) [1,2,3] to nowe, heterogeniczne środowisko obliczeniowe, wykorzystujące nowoczesną architekturę kart graficznych GPU (Graphics Processing Unit). Pozwala ono twórcom oprogramowania wykorzystać karty graficzne do obliczeń równoległych. OpenCL pozwala na znaczne zwiększenie działania aplikacji, począwszy od gier komputerowych, aż do oprogramowania naukowego i medycznego.

CUDA jest opracowaną przez firmę NVIDIA, równoległą architekturą obliczeniową, która zapewnia wzrost wydajności obliczeń dzięki wykorzystaniu mocy układów GPU. Aktualnie na rynku znajduje się ponad 128 milionów sprzedanych układów GPU z obsługą CUDA, wielu twórców oprogramowania, naukowców znajduje szereg zastosowań dla architektury CUDA, włączając w to przetwarzanie wideo, astrofizykę, biologię obliczeniową i chemię, symulację dynamiki płynów, badania interferencji elektromagnetycznych, rekonstrukcję obrazu w tomografii komputerowej, analizę sejsmiczną, ray tracing [3].

2. Architektura OpenCL

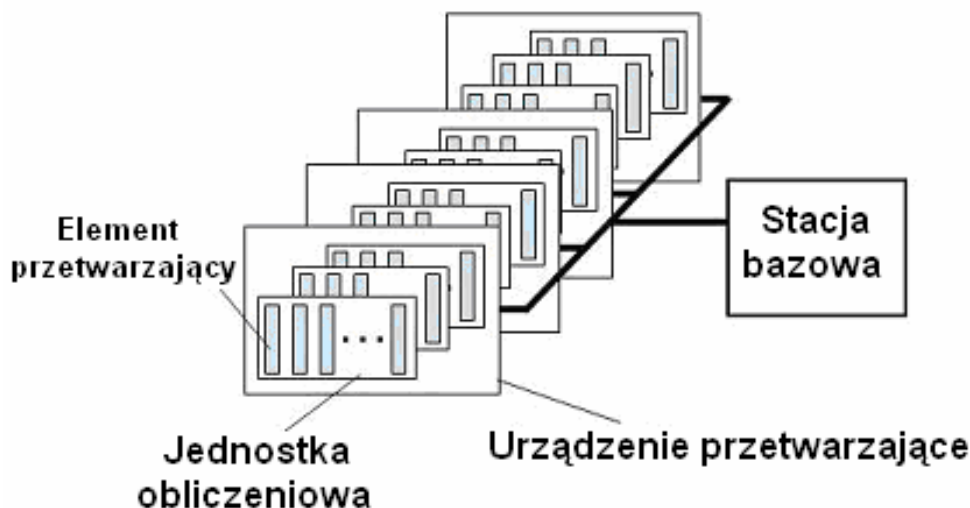
By opisać główne założenia języka OpenCL [1,2], można posłużyć się hierarchią modeli:

- model platformy
- model wykonawczy
- model pamięci
- model programowania

Na potrzeby artykułu przedstawione zostaną modele platformy i wykonawczy.

Model platformy.

Model (Rys. 1) zawiera stację bazową połączoną z jednym lub większą ilością urządzeń OpenCL. Urządzenie OpenCL podzielone jest na jedną lub więcej jednostek obliczeniowych (CU – compute unit), które z kolei dzielą się na jeden lub więcej elementów przetwarzających (PE - processing element). Obliczenia dokonywane są w elementach przetwarzających, które przetwarzają pojedynczy strumień instrukcji jako jednostki SIMD lub SPMD.



Rys. 1. Model platformy

Model wykonawczy.

Wykonanie programu OpenCL składa się z dwóch części:

- kernela uruchamianego na urządzeniu OpenCL
- programu uruchamianego na stacji bazowej (z użyciem procesora komputera)

Program tworzy kontekst dla kernela i zarządza jego wykonywaniem.

Wraz z przekazaniem kernela do wykonania, tworzona jest przestrzeń wskaźników. Dla każdego punktu w przestrzeni wskaźników wykonywana jest oddzielna instancja kernela, nazywana elementem roboczym (work-item). Element roboczy jest identyfikowany przez swój punkt w przestrzeni wskaźników, co zapewnia mu globalny numer identyfikacyjny. Każdy element roboczy wykonuje ten sam kod, lecz kolejność wykonywania instrukcji w kodzie oraz dane, na których operuje mogą być różne.

Elementy robocze są zorganizowane w grupy robocze (work-groups). Każda grupa robocza posiada swój unikalny numer identyfikacyjny. Każdemu elementowi roboczemu przydzielany jest unikalny numer wewnątrz grupy (lokalny numer identyfikacyjny) roboczej, tak więc pojedynczy element może być zidentyfikowany poprzez jego globalny numer identyfikacyjny, bądź kombinację jego numeru w grupie roboczej i numeru grupy roboczej, do której należy. Elementy robocze w danej grupie są wykonywane równocześnie w elementach przetwarzających pojedynczej jednostki obliczeniowej.

3. Funkcje kernel

Kernel jest najistotniejszą częścią programu napisanego w języku OpenCL, gdyż kod w nim zawarty będzie wykonywany na GPU. W przykładowej aplikacji realizującej mnożenie macierzy kwadratowej przez wektor użyto i porównano dwa kody Kernel 1 i Kernel 2.

Kernel nr. 1

```
kernel void macierz (const global float* M, const global float* V, uint rozmiar,
                    global float* W)
{
    uint y = get_global_id(0);
    if (y < rozmiar)
    {
        const global float* wiersz = M + y * rozmiar;

        float wynik = 0;
        for (int x = 0; x < rozmiar; ++x) wynik += wiersz [x] * V[x];

        W[y] = wynik;
    }
}
```

Kernel nr. 2

```
kernel void macierz (const global float* M, const global float* V, uint rozmiar,
                    global float* W, local float* wynik_czesciowy)
{
    for (uint i=get_group_id(0); i< rozmiar; i+=get_num_groups(0))
    {
        const global float* wiersz = M + i * rozmiar;

        float suma=0;
        for (uint j=get_local_id(0); j< rozmiar; j+=get_local_size(0)) suma+=wiersz[j]*V[j];
        wynik_czesciowy[get_local_id(0)]=suma;
        barrier(CLK_LOCAL_MEM_FENCE);
        if (get_local_id(0)==0)
        {
            float wynik=0;
            for (uint k=0; k< get_local_size(0); ++k) wynik+=wynik_czesciowy[k];
            W[i] = wynik;
        }
        barrier(CLK_LOCAL_MEM_FENCE);
    }
}
```

Pierwszy kernel działa na zasadzie: jeden element roboczy (work item) wykorzystywany jest do otrzymania wyniku mnożenia pojedynczego wiersza macierzy przez wektor. W drugiej funkcji, w celu przyspieszenia obliczeń, zastosowano grupowanie, dzięki czemu jeden element roboczy przemnaża kilka wierszy macierzy przez wektor.

4. Wyniki testów numerycznych

W tabeli 1 zestawiono czasy obliczeń na GPU z użyciem obu kerneli oraz czas obliczeń z wykorzystaniem procesora komputera (CPU).

Parametry maszyny testowej:

- system operacyjny: Microsoft Windows XP, Service Pack 3
- procesor: Intel Core 2 Duo 2x2.20 GHz
- pamięć RAM: 2 GB
- GPU: GeForce 8600 GT

Tabela 1. Czasy mnożenia macierzy przez wektor

Rozmiar macierzy	Rozmiar wektora	Czas CPU [s]	Czas GPU [s] (Kernel nr. 1)	Czas GPU [s] (Kernel nr.2)
100x100	100	0.000045	0.00008	0.00041
500x500	500	0.001040	0.00111	0.00210
1000x1000	1000	0.004216	0.00628	0.00457
2000x2000	2000	0.017124	0.03330	0.00933
3000x3000	3000	0.038755	0.05196	0.01937
5000x5000	5000	0.111280	0.06831	0.04683
6000x6000	6000	0.157753	0.10216	0.04016
7000x7000	7000	0.212114	0.12204	0.08187

5. Wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że aplikacje napisane za pomocą języka OpenCL charakteryzuje wysoka wydajność w przeliczaniu dużych zbiorów danych. Poprzez odpowiednią konstrukcję kernela (wykorzystanie grupowania) można osiągnąć znaczne przyspieszenia obliczeń. W przypadku rozmiaru macierzy 7000x7000 udało się uzyskać 2,5-krotne przyspieszenie w stosunku do obliczeń wykonywanych na CPU.

Literatura

1. The OpenCL Specification, Khronos OpenCL Working Group (2010).
2. <http://www.khronos.org/> stan na dzień 7.02.2010 r. – strona Khronos Group (2010).
3. http://www.nvidia.pl/object/cuda_what_is_pl.html stan na dzień 7.02.2010 - strona firmy NVIDIA (2010).

MODELOWANIE PÓL TEMPERATURY Z UWZGLĘDNIENIEM ZMIENNYCH PARAMETRÓW TERMOFIZYCZNYCH

WITOLD SZWED

Automatyka i Robotyka, AB3, 5 rok

Opiekunowie naukowci: prof. dr hab. inż. Ewa Majchrzak,
dr inż. Grażyna Kałuża



Streszczenie. Przedstawiono opis matematyczny procesu nagrzewania biorąc pod uwagę zmieniające się wraz z temperaturą wartości parametrów termofizycznych. W celu rozwiązania zagadnienia opracowano autorski program wykorzystujący metodę różnic skończonych dla zadań nieliniowych. Pokazano wyniki obliczeń i sformułowano wnioski.

1. Wprowadzenie

Modelowanie procesów cieplnych przeprowadza się zazwyczaj dla uśrednionych wartości parametrów termofizycznych. Badania eksperymentalne pokazują, że część tych parametrów istotnie zmienia wartość w zależności od temperatury, w której dokonuje się pomiarów. W związku z tym, w pracy przeprowadzono obliczenia rozkładów temperatury dla zmiennych parametrów termofizycznych. W tym celu opracowano autorski program komputerowy bazujący na metodzie różnic skończonych. Wyniki obliczeń porównano z rozwiązaniami uzyskanymi dla uśrednionych wartości parametrów i na tej podstawie sformułowano wnioski.

2. Model matematyczny

Nieustalony przepływ ciepła w obszarze płaskim opisuje następujące równanie (1)

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T(x,y,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T)\frac{\partial T(x,y,t)}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(T)\frac{\partial T(x,y,t)}{\partial y}\right) + Q(x,y,t) \quad (1)$$

gdzie $c(T)$ [J/(kgK)] jest ciepłem właściwym, $\rho(T)$ [kg/m³] gęstością, $\lambda(T)$ [W/(mK)] współczynnikiem przewodzenia ciepła, T [°C] oznacza temperaturę, x, y – współrzędne przestrzenne, t [s] – czas, Q [W/m³] jest funkcją źródła.

Na brzegu obszaru założono warunek brzegowy Robina

$$q(x,y,t) = \alpha[T(x,y,t) - T_{ot}] \quad (2)$$

gdzie α [W/(m²K)] jest współczynnikiem wymiany ciepła oraz T_{ot} – temperaturą otoczenia. W chwili $t=0$ przyjęto, że rozkład temperatury wewnątrz obszaru jest znany, czyli $T(x,y,0)=T_p$.

3. Zmienne parametry termofizyczne

Głównym celem badań było uwzględnienie w obliczeniach zmieniających się wraz z temperaturą wartości współczynnika przewodzenia ciepła oraz ciepła właściwego materiału,

z którego wykonany jest analizowany obiekt. Wykorzystano tutaj dane eksperymentalne [1] dla kilku materiałów: miedzi, aluminium i mosiądzu, które zebrano w tabeli 1.

Tabela 1. Dane eksperymentalne

Temperatura	Miedź		Aluminium		Mosiądz	
	λ	C	λ	c	λ	c
73.15	-	-	-	314	-	-
83.15	-	-	255.86	-	-	-
93.15	464.037	-	-	-	-	-
173.15	407.05	343	-	773	-	335
273.15	386.116	379	229.11	879	105.833	377
293.15	-	383	-	896		381
373.15	379.138	396	-	938	119.789	389
473.15	373.323	406	229.111	984	137.234	414
573.15	-	416	222.133	1009	152.353	-
673.15	364.019	427	-	1043	168.635	477
773.15	-	439	-	1089	186.080	-
873.15	353.552	-	-	-	200.036	-
1073.15	-	469	125.604	-	-	-
Średnia:	389.605	406.4444	212.3636	880.5556	152.8514	395.5

Założono, że zależność współczynnika przewodzenia ciepła od temperatury oraz ciepła właściwego od temperatury można opisać wielomianami odpowiedniego stopnia, a gęstość jest stała. Współczynniki wielomianów wyznaczono wykorzystując metodę najmniejszych kwadratów [2]. Na przykład przyjmujemy, że zmianę współczynnika przewodzenia ciepła w zależności od temperatury opisuje wielomian trzeciego stopnia

$$\lambda(T) = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 \quad (3)$$

Aby wyznaczyć współczynniki tego wielomianu formułuje się kryterium

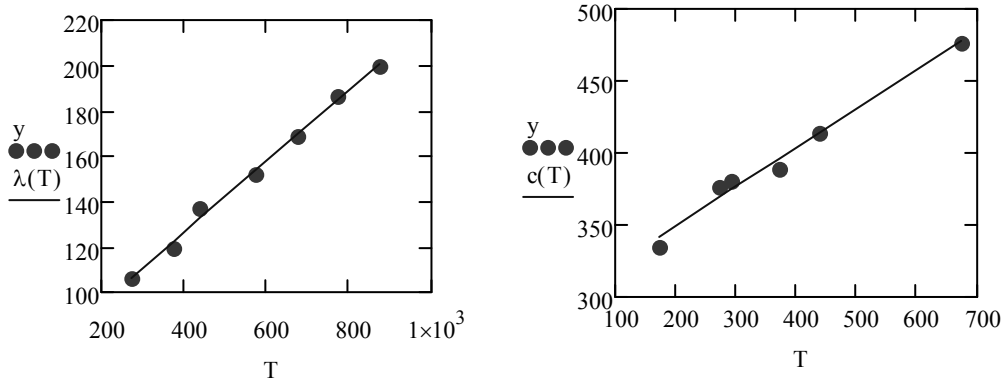
$$S(a_0, a_1, a_2, a_3) = \sum_{i=1}^n [a_0 + a_1T_i + a_2T_i^2 + a_3T_i^3 - \lambda_i]^2 = MIN \quad (4)$$

gdzie T_i to temperatury, dla których z eksperymentu znane są wartości λ_i (por. tabela 1), a n oznacza liczbę punktów pomiarowych. Zadanie sprowadza się do wyznaczenia minimum funkcji wielu zmiennych, czyli rozwiązania odpowiedniego układu równań. Obliczenia przeprowadzono w programie narzędziowym MathCad. Przykładowy wynik dla współczynnika przewodzenia ciepła i ciepła właściwego mosiądzu 60z%Cu 40%Zn pokazano na rysunku 1. Kropkami zaznaczono dane eksperymentalne, a linią ciągłą zależność tego współczynnika od temperatury. Dane eksperymentalne w tym przypadku sugerowały przyjęcie liniowej zależności. Jak widać, współczynnik przewodzenia ciepła dla zakresu temperatur od 200 do 900 wzrasta prawie dwukrotnie.

Wzory opisujące zależności parametrów termofizycznych od temperatury dla wszystkich rozpatrywanych materiałów umieszczono w tabeli 2.

Tabela 2. Parametry termofizyczne

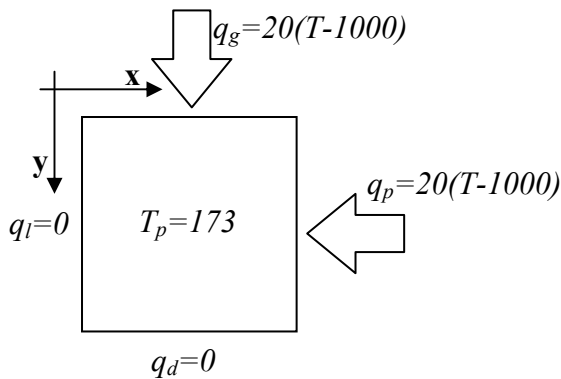
Material	Gęstość [$\frac{kg}{m^3}$]	Współczynnik przewodzenia ciepła	Ciepło właściwe
Miedź	8930	$\lambda(T) = 522.5573 - 0.8319T + 0.0015T^2 - 8.5496 \cdot 10^{-7}T^3$	$c(T) = 341.0267 - 0.1258T$
Aluminium	2700	$\lambda(T) = 249.8867 + 0.0036T - 1.1006 \cdot 10^{-4}T^2$	$c(T) = -28.3461 + 5.9433T - 0.0115T^2 + 7.3702 \cdot 10^{-6}T^3$
Mosiądz (Cu 60%, Zn40%)	8600	$\lambda(T) = 63.7598 + 0.1568T$	$c(T) = 295.1701 + 0.2708T$



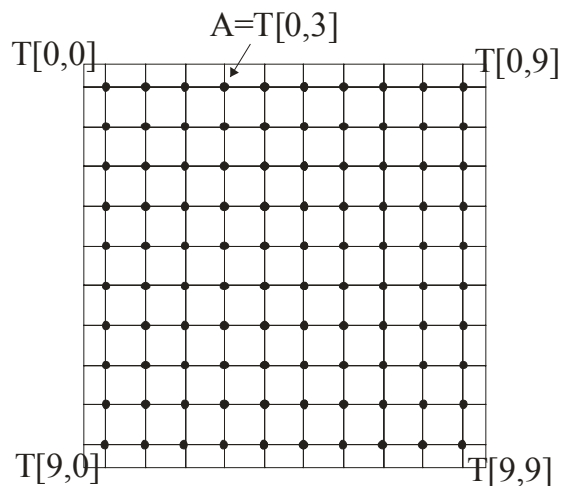
Rys. 1. Aproksymacja współczynnika przewodzenia ciepła i ciepła właściwego mosiądzu

4. Wyniki obliczeń

Rozpatrywano obszar o wymiarach 0.1×0.1 [m²] pokazany na rysunku 2. Zadanie opisane równaniem (1) z warunkami brzegowo-początkowymi przedstawionymi na rys. 2 i zerową funkcją źródła rozwiązano stosując schemat jawny metody różnic skończonych dla zadań nieliniowych [3,4]. Opracowano autorski program komputerowy w obiektowym języku programowania C++. Na rysunku 3 pokazano przyjętą siatkę różnicową. Obliczenia przeprowadzono z krokiem czasu $\Delta t = 0.1$ [s].

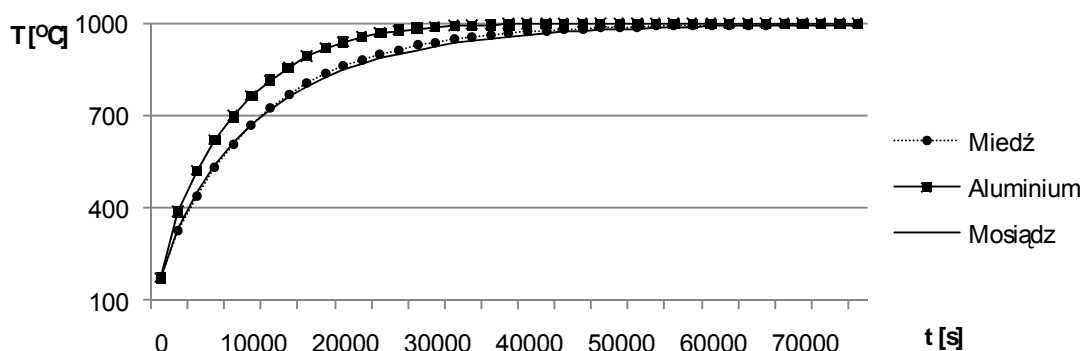


Rys. 2. Analizowany obszar



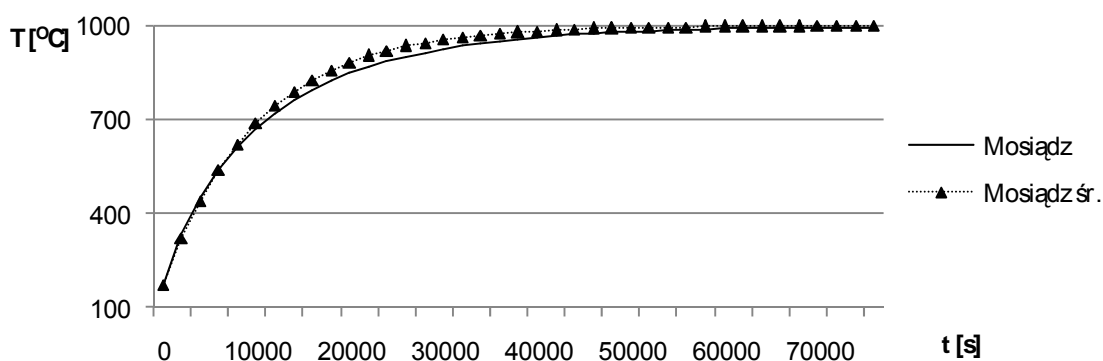
Rys. 3. Siatka różnicowa

Rysunek 4 ilustruje przebieg krzywych nagrzewania w punkcie A zaznaczonym na rys. 3.



Rys. 4. Krzywe nagrzewania dla różnych materiałów

Obliczenia przeprowadzono powtórnie dla uśrednionych wartości parametrów (tabela 1). Na rysunku 5 przedstawiono krzywe nagrzewania w punkcie A dla mosiądzu. Linią ciągłą oznaczono wyniki dla pomiaru ze współczynnikami termofizycznymi zależnymi od temperatury, a przerywaną dla wartości średnich.



Rys. 5. Krzywe nagrzewania dla zmiennych i średnich wartości parametrów (mosiądz)

5. Wnioski

Analiza wyników dla zmiennych i uśrednionych parametrów termofizycznych wskazuje na różnice w otrzymywanych rozkładach temperatury. Największy błąd względny wystąpił dla mosiądzu i wyniósł 3.6%, nieco mniejszy dla aluminium 3.4%, natomiast dla miedzi 0.81%. Jeżeli zakres wartości, jakie przyjmują współczynniki termofizyczne jest duży, to uśrednianie ich wartości wprowadza błąd w obliczeniach, tak jak miało to miejsce dla mosiądzu.

Literatura

1. Raznjevic K., Tablice cieplne z wykresami, WNT Warszawa.
2. Praca zbiorowa pod redakcją E. Straszackiej, Laboratorium Metod Numerycznych, str. 42, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice (2002).
3. Mochnacki B., Suchy J. S., Modelowanie i symulacja krzepnięcia odlewów, Wyd. PWN, Warszawa (1993).
4. Majchrzak E., Mochnacki B., Metody numeryczne. Podstawy teoretyczne, aspekty praktyczne i algorytmy, Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice (2004).

MODELOWANIE METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH WPLYWU SKURCZU SPAWALNICZEGO NA OSTATECZNĄ POSTAĆ KONSTRUKCJI

MATEUSZ WARCHOLIŃSKI

Automatyka i Robotyka, AB3, 5 rok

Opiekunowie naukowci: dr hab. inż. Antoni John, Prof. Pol. Śląskiej,
dr. inż. Mirosław Szczepanik



Streszczenie. Obiektem badań tej pracy jest określenie wpływu skurczu spawalniczego na odkształcenie się wspornika względem rury amortyzatora. W tym celu został zbudowany model wirtualny w programie, który w oparciu o metodę elementów skończonych umożliwił wyliczenie żądanych odkształceń. Dane materiałowe zostały określone i skorelowane z odpowiednimi normami oraz modelem rzeczywistym.

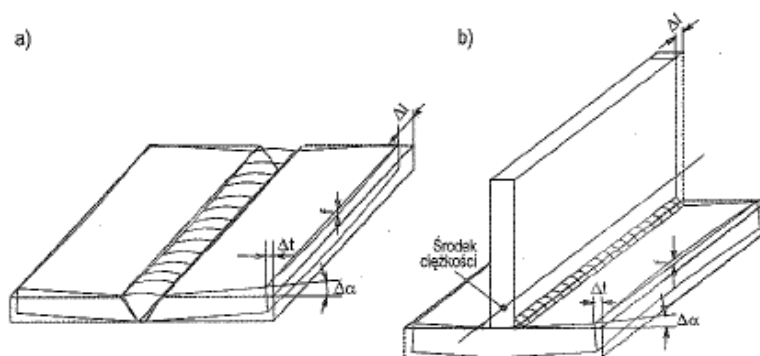
1. Wprowadzenie

Skurcz spawalniczy jest odkształceniem spawalniczym powstałym po procesie spawania w wyniku łącznego oddziaływania krzepnącego metalu spoiny oraz stref przyspoinowych elementów spawanych [1]. Skurcz powstaje we wszystkich kierunkach w spoinie, dlatego też rozróżniamy:

- Odkształcenie wzdłużne (skurcz wzdłużny) – odkształcenie spoiny oraz elementów do niej przyległych zgodnie z osią spoiny,
- Odkształcenie poprzeczne (skurcz poprzeczny) – odkształcenie spoiny oraz elementów do niej przyległych prostopadle do osi spoiny.

Odkształcenia te mogą powodować wiele wad połączeń spawanych. Mogą być to:

- Wygięcia – spowodowane odkształceniami poprzecznymi lub wzdłużnymi i cechujące się kątem wygięcia elementu od płaszczyzny,
- Skręcanie – najczęściej występujące w przypadku długich belek i określone kątem obrotu względem osi,
- Utrata stateczności – objawiająca się np. powstawaniem wybrzuszeń i zwichrzeń elementu o małej sztywności poprzecznej [1].



Rys. 1. Odkształcenia po spawaniu występujące w złączach:
a) doczołowym, b) teowym [2]

2. Plan eksperymentu

W pierwszej kolejności został przeprowadzony proces spawania na rzeczywistym modelu składającym się z dwóch elementów wykonanych z jednakowej blachy o grubości 5 mm, a połączonych ze sobą spoiną pachwinową (Rys. 2).



Rys. 2. Blachy po procesie spawania: a) zestawienie próbek, b) przekrój poprzeczny

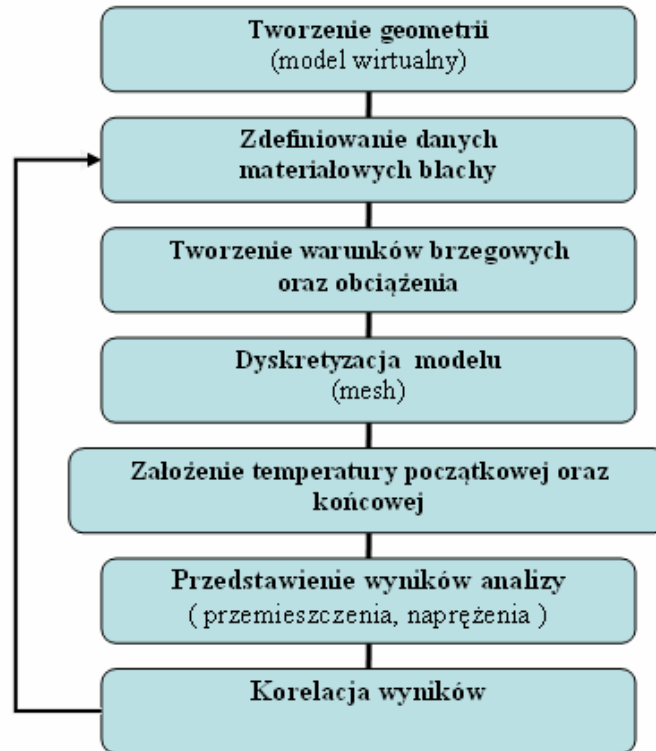
Następnie zostały przeprowadzone pomiary geometrii. Przy użyciu wysokościomierza dla każdej z trzech próbek w zaznaczonych wcześniej miejscach zmierzono wysokość blach w pionie po spawaniu. Następnie został zmierzony kąt odkształcenia po sczepieniu przy pomocy poziomicy elektronicznej. Dane te pozwoliły na skorelowanie modelu rzeczywistego z modelem wirtualnym i określenie na tej podstawie poprawności dobranych własności materiałowych, potrzebnych do właściwego badania modelu, składającego się ze wspornika i rury amortyzatora.

3. Schemat analizy

Analiza została przeprowadzona dla trzech różnych przypadków (Tabela 1.). Pozwoliło to na określenie wpływu danych materiałowych na otrzymane wyniki. Schemat kompletnej analizy został przedstawiony na rys. 3.

Tabela 1. Dane materiałowe (na podstawie [3])

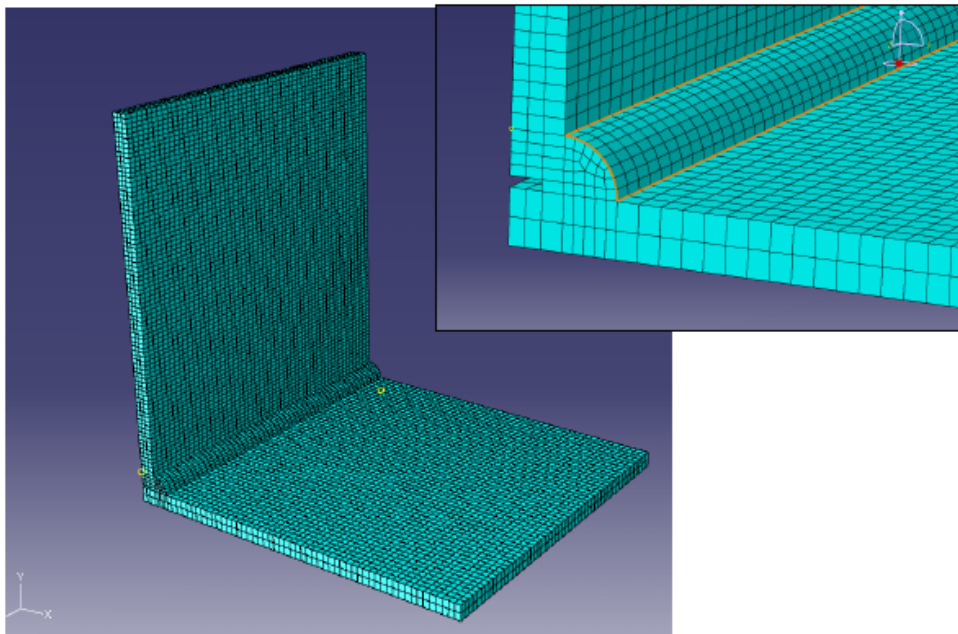
Dane materiałowe		
Przypadek I	Przypadek II	Przypadek III
Temperaturę spoiny $T_s = 1580$ [°C], Temperaturę otoczenia $T_o = 20$ [°C], Temperaturę strefy wpływu ciepła $T_{str} = 900$ [°C], Moduł Young'a $E = 210000$ [MPa], Współczynnik Poissona $\nu = 0,3$, Współczynnik rozszerzalności liniowej $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5}$ [1 /K], Współczynnik przewodzenia ciepła $k = 55$ [W/m*K],	Temperaturę spoiny $T_s = 1650$ [°C], Temperaturę otoczenia $T_o = 20$ [°C], Temperaturę strefy wpływu ciepła $T_{str} = 900$ [°C], Moduł Young'a $E = 210000$ [MPa], Współczynnik Poissona $\nu = 0,3$, Współczynnik rozszerzalności liniowej $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5}$ [1 /K], Współczynnik przewodzenia ciepła $k = 55$ [W/m*K], Gęstość materiału $\rho = 7,86$ [g/cm ³] Ciepło właściwe stali $c = 455$ [J/kg*K]	Temperaturę spoiny $T_s = 1650$ [°C], Temperaturę otoczenia $T_o = 20$ [°C], Temperaturę strefy wpływu ciepła $T_{str} = 900$ [°C], Moduł Young'a $E = 210000$ [MPa], Współczynnik Poissona $\nu = 0,3$, Współczynnik rozszerzalności liniowej $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5}$ [1 /K], Współczynnik przewodzenia ciepła $k = 55$ [W/m*K],



Rys. 3. Schemat budowy modelu w programie MES

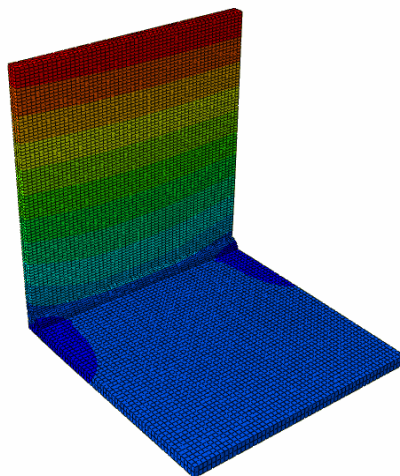
4. Model numeryczny

Geometria modelu została odtworzona na podstawie wymiarów wcześniej zespawanej próbki. Podczas dyskretyzacji modelu zostały wykorzystane elementy ośmiowzłowe 3D odpowiednie dla sprzężonej analizy temperaturowo-przemieszczeniowej (Rys. 4.).



Rys. 4. Model zdyskretyzowany

5. Wyniki analizy i wnioski



Rys. 5. Przemieszczenia wzdłuż osi X

Tabela 2. Wyniki analizy

Przypadek I	Przypadek II	Przypadek III	Model rzeczywisty
Przemieszczenia [mm]			
1,845	1,658	2,147	-
Ugięcie blachy [°]			
89,14	88,22	89,99	88,6

Celem tej analizy było otrzymanie odkształceń blachy pionowej wzdłuż osi X (Rys.5.) w celu określenia kąta ugięcia blachy (wywołanego skurczem spawalniczym). Porównano odkształcenie oraz dokładności otrzymanych wyników z wynikami otrzymanymi dla takiego samego modelu rzeczywistego.

Różnica wyników może wynikać z wprowadzonych uproszczeń:

- Stała wartość temperatury dla całej spoiny oraz stref wpływu ciepła,
- Geometria spoiny, którą trudno jest idealnie odwzorować w modelu,
- Wartości współczynników, które różnią się od siebie zależnie od rodzaju stali.

Literatura

1. Ferenc K., Ferenc J., Konstrukcje spawane – Połączenia, WNT, Warszawa (2003).
2. Poradnik inżyniera. Spawalnictwo. Praca zbiorowa, WNT, Warszawa (2003).
3. PN-EN 10149-2:2000 Wyroby płaskie walcowane na gorąco ze stali o podwyższonej granicy plastyczności do obróbki plastycznej na zimno, po walcowaniu termomechanicznym.

OBLICZENIA MES Z WYKORZYSTANIEM OPROGRAMOWANIA AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS 2010

BARTOSZ WILK

Mechanika i Budowa Maszyn, MB4, 4 rok

Opiekunowie naukowci: prof. dr hab. inż. Tadeusz Burczyński,
dr inż. Waław Kuś



Streszczenie. W artykule tym zostały przedstawione wybrane możliwości pakietu Autodesk Robot Structural Analysis 2010. Jest to rozbudowany system MES stosowany głównie do obliczeń konstrukcji budowlanych. Jako przykład możliwości jego wykorzystania przedstawiona została analiza wieży przekaźnikowej o wysokości 35 m.

1. Wstęp

Metoda Elementów Skończonych (MES) [2,3] jest jedną z najbardziej popularnych metod rozwiązywania zagadnień wytrzymałościowych. Istotą tej metody jest zastąpienie rzeczywistego obiektu modelem dyskretnym, dla którego rozwiązanie uzyskujemy w oparciu o układy równań algebraicznych. Analiza metodą elementów skończonych wymusza na użytkownika wykonania kilku operacji, m.in. dyskretyzacji konstrukcji, wyrażenia obciążeń w postaci sił węzłowych oraz odpowiednim doбором warunków podporowych.

2. Autodesk Robot Structural Analysis 2010

Rozpoczęcie pracy w systemie Autodesk Robot Structural Analysis 2010 [1] wymaga określenia typu konstrukcji, jaka ma zostać analizowana. System oferuje szeroki wybór typów takich jak: rama płaska oraz przestrzenna, kratownica płaska i przestrzenna, ruszt, płyta, powłoka, konstrukcje w płaskim stanie naprężenia i odkształcenia, konstrukcje osiowosymetryczne oraz konstrukcje objętościowe (bryły). Robot jest pakietem przeznaczonym głównie do tworzenia geometrii i analizy konstrukcji budowlanych. Wyposażony jest w przyjazny dla użytkownika interfejs, program umożliwia pracę w języku polskim.

Program Robot wyposażony został w tzw. ekrany, które stanowią specjalnie zaprojektowane okna dialogowe, pola edycyjne i tabele. Układ ekranów dobrany jest w sposób wskazujący na kolejność wykonywania operacji projektowych. Menu tekstowe systemu wraz z paskiem narzędziowym dostosowane jest do potrzeb poszczególnych modułów. Funkcje menu, klawisze skrótu oraz paski narzędzi mogą zostać zmodyfikowane do indywidualnych potrzeb użytkownika. Kliknięcie prawym przyciskiem myszy podczas pracy w edytorze graficznym powoduje otwarcie dodatkowego menu kontekstowego, gdzie znajdują się najczęściej używane funkcje.

Parametry programu Robot mogą zostać ustawione za pomocą dwóch opcji: Preferencji i Preferencji zadania. W oknie preferencji można definiować podstawowe parametry programu, takie jak: język, parametry ogólne, parametry widoku. Okno preferencji zadania różni się tym, że modyfikowane zostają parametry jedynie zadania wykonywanego w bieżącej sesji. Znajdują się tu m.in. jednostki i formaty, materiały, katalogi itp.

Podczas pracy w różnych modułach często wykorzystywane są opcje wyboru. Pozwalają one definiować listy węzłów, prętów, paneli, przypadków obciążeniowych, na których będą dokonywane późniejsze operacje. Proces wyboru zakończony jest utworzeniem zbioru elementów, aktywnych do momentu zmiany wyboru. Selekcja ta może być wykonywana na kilka sposobów: graficznie na ekranie, poprzez okno dialogowe „Selekcja”, z listy danych elementów lub też dzięki podświetleniu odpowiednich linii w tabeli. Poszczególne metody selekcji wiążą się ze sobą, co oznacza, że wybrany element w polu graficznym, podświetlony zostanie również w tablicy i odwrotnie. W oknie dialogowym Selekcja użytkownik może tworzyć grupy, które definiowane są po zaznaczeniu odpowiednich części, po czym przypisuje się im nazwę i kolor. W programie istnieje również opcja Filtry rezultatów, która służy do globalnej selekcji wyników otrzymanych dla węzłów, prętów itd.

System Robot posiada funkcje wyświetlania atrybutów konstrukcji. W oknie tym znajduje się lista dostępnych szablonów wyświetleń, która ujawnia wszelkie istotne informacje na temat danej konstrukcji. Można w nim włączać i wyłączać widoki danych elementów konstrukcji. Innym pomocnym oknem jest Legenda.

Podczas pracy w programie, może się okazać przydatne wykorzystanie list pewnych wielkości. Aby uprościć pracę, użytkownik może wykorzystać skrócone listy. Definicja takich list jest prosta i można ją wykonywać na wiele sposobów. Pierwszym z nich jest wpisanie ciągu numerów należących do listy np. 6 7 8 9 10. Można to jednak osiągnąć w prostszy sposób wykorzystując komendy „DO” i „Krok”, np. 6DO10 (6 7 8 9 10) 6DO10K2 (6 8 10). Kolejnym uproszczeniem jest komenda „Powtórzyć” np. 4P3 (4 5 6 7, domyślnym krokiem jest 1), lub 4P3K2 (4 6 8 10). Przy wyborze większej ilości pozycji można użyć komendy „BEZ” np. 1DO65 BEZ 22 35 48, komendy tej można użyć tylko raz w oznaczeniu listy. W przypadku definiowania listy składowych obiektów wygenerowanych przy pomocy opcji: Wyciąganie, Przekreślenie, Wyciąganie po linii należy użyć odpowiedniej składni nrobiektu_częśćobiektu(lista części obiektu), gdzie: nrobiektu - numer obiektu podlegającego operacjom wyciągania lub przekreślenia, częśćobiektu - w obecnej części programu dostępne są trzy możliwości: bok, krawędź (kraw) oraz obraz obiektu po modyfikacji (ref), lista części obiektu- lista części składowych obiektów (podlega regułom przedstawionych powyżej), np. 2_ref(1,2,5), 1_bok(3DO7), 4_kraw(5DO8,11).

Aktywne pola okna programu podświetlane są kolorami (zielony, żółty i czerwony) w celu pomocy podczas definiowania wartości liczbowych. Wielkości z inną jednostką wpisuje się poprzedzając znakiem „=”, po czym system automatycznie przelicza daną wartość na jednostkę ustawioną w oknie preferencji zadania. Program posiada budowany kalkulator, który działa polach edycyjnych jako kalkulator wyrażeń arytmetycznych. Jego uruchomienie następuje automatycznie po wpisaniu wyrażenia i dodaniu znaku „=”.

Autodesk zaproponował rozwiniętą bazę profili przekrojów prętów i belek. Istnieje również możliwość zaprojektowania nowego profilu w oknie dialogowym „Nowy przekrój”. Typy Profilów stalowych dostępnych w programie to: prostokątny, rurowy, kołowy,

skrzynkowy (dwa typy), dwuteowy o jednej i dwóch osiach symetrii, teowy, ceowy, o przekroju krzyżowym i wielobok. Każdemu z tych profili można nadać zawarte w bazie własności materiałowe, np. stal, aluminium. Profile można łączyć ze sobą za pomocą przewiązek lub spoin. Baza profili betonowych jest również dostępna, można tu wybrać kilka przekrojów: prostokątny, teowy, dwuteowy, teowy z obniżonymi półkami.

System posiada specjalnie przygotowane przypadki obciążeń konstrukcji, a mianowicie: ciężar własny, stałe, eksploatacyjne, wiatr, śnieg, temperatura, wyjątkowe i sejsmiczne. Po zdefiniowaniu przypadku należy zmodyfikować działające w nim obciążenia. Lista dostępnych obciążeń systemu jest obszerna, znajdują się w niej dla konstrukcji prętowych: ciężar własny, siły węzłowe, obciążenia jednorodne, obciążenie trapezowe, siły prętowe, temperatura, przemieszczenia wymuszone, dylatacja i moment rozłożony. Dla konstrukcji płytowo-powłokowych: ciężar własny, obciążenie jednorodne, obciążenie liniowe, obciążenie zmienne (na trzech punktach), obciążenie ciśnieniem, temperatura, obciążenie jednorodne na konturze i obciążenie zmienne (na trzech punktach) na konturze. Dodatkową opcją jest tworzenie obciążeń kombinowanych, normowych bądź ruchomych. Programiści wyposażyli system w ekran obciążeń klimatycznych: wiatrem bądź śniegiem zgodnie z obowiązującymi normami. Jest to szereg okien (w zależności od wyboru), w których w mało skomplikowany sposób można obciążać konstrukcje 2D i 3D w sposób prawie automatyczny.

Program udostępnia szeroko rozbudowaną analizę konstrukcji. Standardowo przypisany jest typ statyka liniowa, można go zmienić w oknie dialogowym opcje obliczeniowe. Jednocześnie w oknie tym można nadawać nowe typy obciążenia. Wszelkie obliczenia są zabezpieczone przed utratą i automatycznie zapisywane w plikach *.RTD. W tej wersji osiągalne są następujące typy analizy: statyka liniowa, statyka nieliniowa (z uwzględnieniem efektu P-Delta), wyboczenie (nie uwzględniane są efekty II rzędu), analiza modalna oraz analiza modalna z uwzględnieniem sił statycznych, analiza harmoniczna, analiza sejsmiczna, analiza spektralna, całkowanie równań ruchu (analiza czasowa), analiza Pushover, analiza harmoniczna w dziedzinie częstotliwości (FRF), dynamiczne wymuszenie ruchem pieszych (Footfall), analiza sprężysto-plastyczna prętów (obecnie dla profili stalowych) oraz analiza prętów pracujących tylko na ściskanie/rozciąganie wraz z analizą konstrukcji kablowych.

3. Przykład obliczeń

Zamodelowano wieżę przekaźnikową o wysokości 35m. Model zbudowany jest z elementów typu pręt i belka. Definicje elementów można przeprowadzić graficznie lub za pomocą tabeli poprzez nadanie początku i końca elementu. Następnym krokiem jest utworzenie podpór i nadanie obciążeń. Wieża została przeanalizowana dla pięciu typów obciążeń: ciężar własny, obciążenie jednorodne, siłą węzłową oraz dwoma różnymi temperaturami skrajnie się różniącymi. Jeżeli warunki obciążenia są już zdefiniowane można przeprowadzić wstępną analizę. Wyniki otrzymywane są w postaci wykresu globalnej analizy prętów (Rys. 1), mapy wyteżeń (Rys. 2) bądź w formie notatki.

Naprężenia zredukowane określono bazując na hipotezie Hubera-Misesa. Aby przeprowadzić analizę należy wybrać typ obciążenia z wcześniej zdefiniowanych. Wyniki przedstawiane są w formie wykresów na prętach konstrukcji. Istnieje też możliwość ich zmiany na mapy naprężeń (Rys. 3). Dodatkowo otwierana jest tabela zawierająca reakcje

METODA KOMPUTEROWA WYZNACZANIA RDZENIA PRZEKROJU PRĘTA

MIROSŁAW ZELENT

Edukacja Techniczno-Informatyczna, EC3, 5 rok

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Piotr Fedeliński, Prof. Pol. Śląskiej



Streszczenie. W artykule przedstawiono metody komputerowego wyznaczania parametrów geometrycznych i rdzenia przekroju pręta. Metoda wymaga określenia współrzędnych wybranych punktów na konturze przekroju. Pokazano zastosowanie metody na przykładzie przekroju krzywoliniowego.

1. Wprowadzenie

Rdzeń przekroju jest miejscem geometrycznym punktów przyłożenia siły (działającej osiowo), dla których w przekroju wystąpią naprężenia wyłącznie jednego znaku [1]. Słupy, kolumny i filary wykonuje się z materiałów, które wykazują dużą wytrzymałość na ściskanie i bardzo małą wytrzymałość na rozciąganie. Do materiałów tych należą m.in: beton, cegła, kamień. Przesunięcie punktu przyłożenia siły ściskającej poza obręb rdzenia jest wówczas szczególnie niepożądane, ponieważ wywołuje naprężenia rozciągające.

2. Parametry geometryczne przekroju pręta

Wyznaczenie rdzenia wymaga uprzedniego przedstawienia przekroju w układzie głównych centralnych osi bezwładności, czyli takiego układu współrzędnych, w którym moment dewiacji przekroju jest równy zero (rysunek 1). Obliczenie podstawowych parametrów przekroju, takich jak:

$$A = \frac{1}{2} \sum_k (y_{k+1} - y_k)(z_{k+1} + z_k) \quad (1)$$

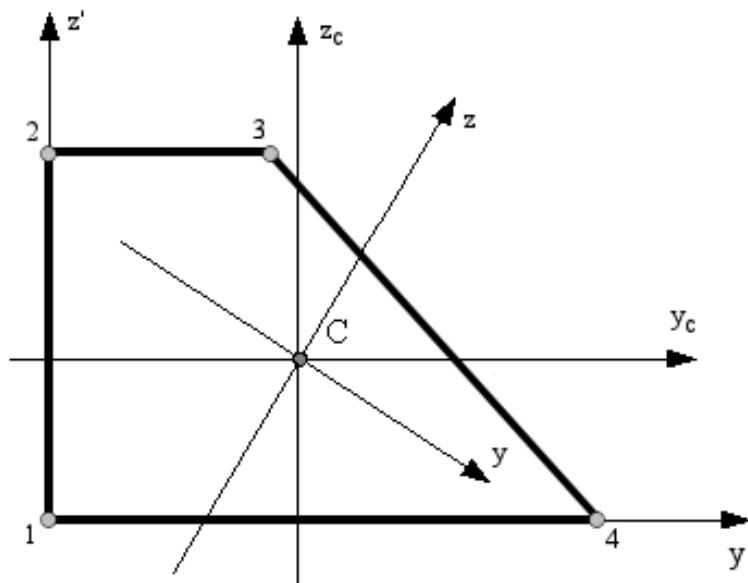
$$S_y = \frac{1}{6} \sum_k (y_{k+1} - y_k)(z_k^2 + z_k z_{k+1} + z_{k+1}^2) \quad (2)$$

$$S_z = \frac{1}{6} \sum_k (z_k - z_{k+1})(y_k^2 + y_k y_{k+1} + y_{k+1}^2) \quad (3)$$

$$I_y = \frac{1}{12} \sum_k (y_{k+1} - y_k)(z_k^3 + z_k^2 z_{k+1} + z_k z_{k+1}^2 + z_{k+1}^3) \quad (4)$$

$$I_z = \frac{1}{12} \sum_k (z_k - z_{k+1})(y_k^3 + y_k^2 y_{k+1} + y_k y_{k+1}^2 + y_{k+1}^3) \quad (5)$$

$$I_{yz} = \frac{1}{24} \sum_k (y_{k+1} - y_k)[y_k(3z_k^2 + z_{k+1}^2 + 2z_k z_{k+1}) + y_{k+1}(3z_{k+1}^2 + z_k^2 + 2z_k z_{k+1})] \quad (6)$$



Rys. 1. Układy odniesienia: początkowy ($y'z'$), centralny ($y_c z_c$) oraz osi głównych centralnych (yz)

3. Algorytm wyznaczania rdzenia

W przekroju wystąpią tylko naprężenia ściskające, jeżeli oś obojętna nie będzie przecinała przekroju (będzie co najwyżej styczna do konturu przekroju). Zatem zagadnienie wyznaczenia rdzenia sprowadza się do znalezienia współrzędnych punktów przyłożenia siły osiowej, którym odpowiadają osie obojętne styczne do każdego z boków konturu przekroju. W przypadku, gdy kontur przekroju jest wielobokiem wklęsłym, osie obojętne styczne poprowadzono tak, aby obejmowały cały przekrój i żadna z nich nie przecinała wnętrza przekroju [2]. Oś obojętna styczna odcina na osiach układu współrzędnych odcinki a_y i a_z , spełniając równanie odcinkowe prostej:

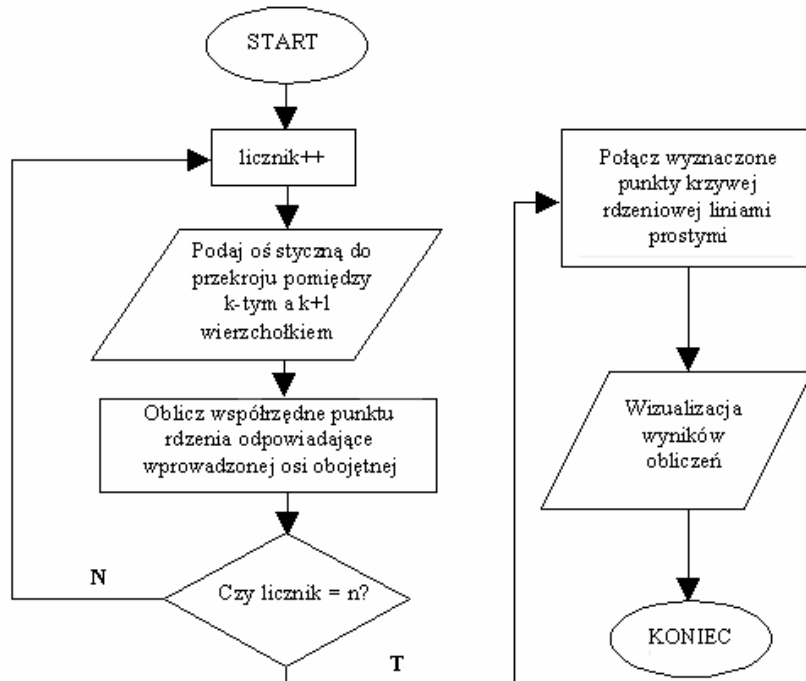
$$\frac{y}{a_y} + \frac{z}{a_z} = 1 \quad (7)$$

Odpowiadające osi obojętnej współrzędne (y_p z_p) punktu przyłożenia siły osiowej (który to punkt jest jednocześnie wierzchołkiem konturu krzywej rdzeniowej) wyznaczono z następujących zależności [3]:

$$y_p = -\frac{I_z}{A \cdot a_y} \quad (8)$$

$$z_p = -\frac{I_y}{A \cdot a_z} \quad (9)$$

Dla przekroju o n osiach obojętnych stycznych obejmujących cały przekrój powyższe obliczenia powtarzane są n -krotnie, po czym następuje połączenie wyznaczonych wierzchołków konturu rdzenia liniami prostymi. Algorytm wyznaczenia rdzenia przedstawiono schematycznie na rysunku 2.



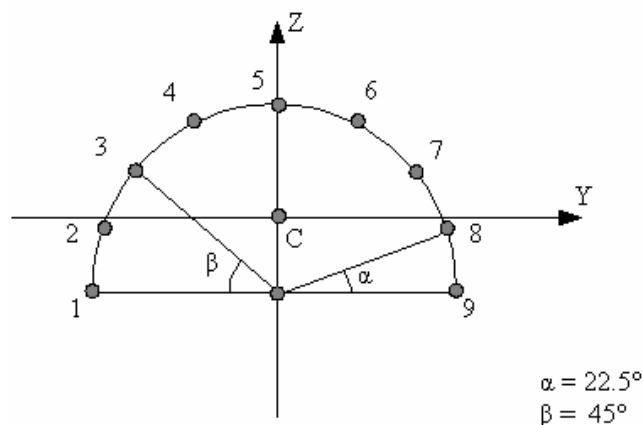
Rys. 2. Algorytm wyznaczania rdzenia przekroju

4. Wyznaczenie rdzenia przekroju krzywoliniowego

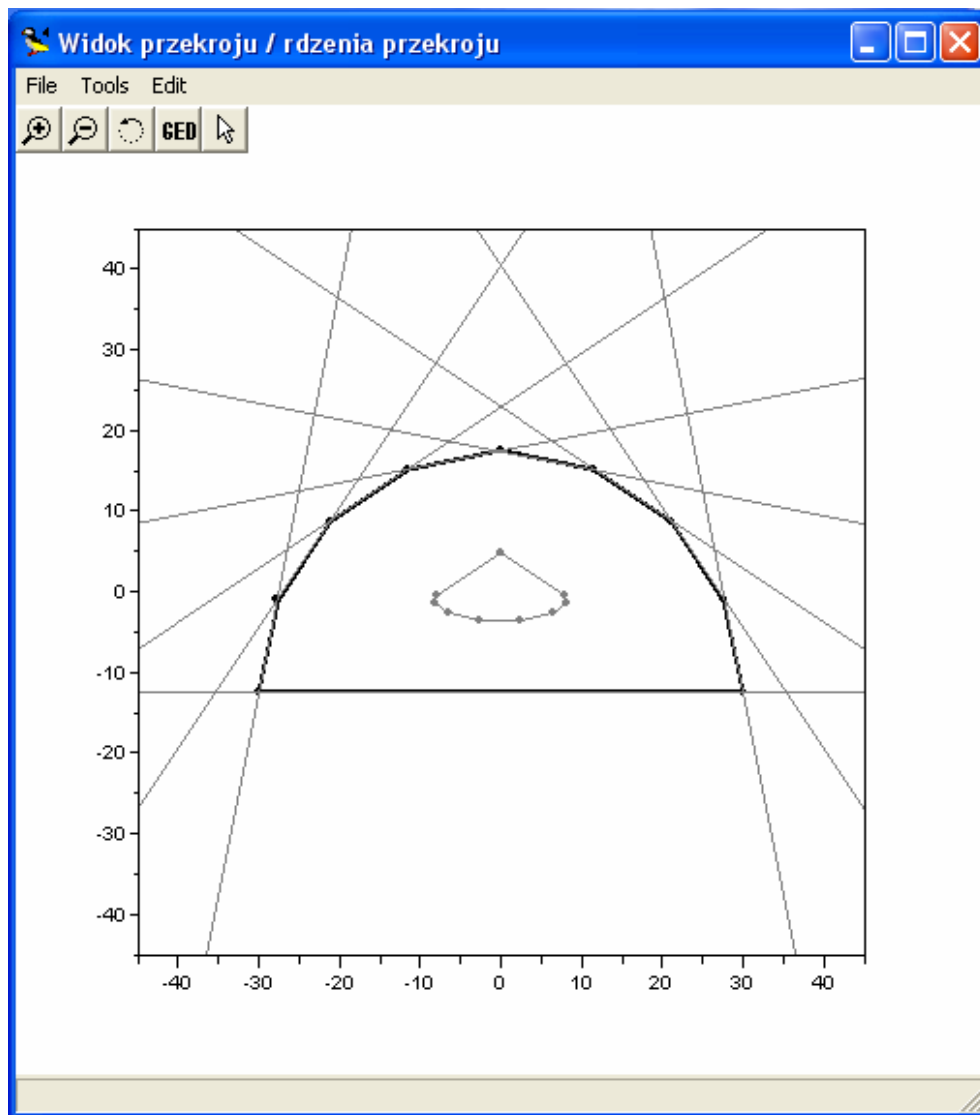
Przy użyciu stworzonej aplikacji wyznaczono rdzeń dla półkola przedstawionego na rysunku 3. Współrzędne (w cm) wierzchołków konturu przekroju w układzie osi głównych centralnych zestawiono w tabeli 1. Otrzymany w programie rdzeń pokazano na rysunku 4.

Tabela 1. Współrzędne wierzchołków półkola w układzie osi głównych centralnych

Współrzędne	Punkty								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
y	-30	-27.71	-21.21	-11.48	0	11.48	21.21	27.71	30
z	-12.73	-1.255	8.48	14.98	17.27	14.98	8.48	-1.255	-12.73



Rys. 3. Analizowany przekrój krzywoliniowy



Rys. 4. Wyznaczony rdzeń przekroju wraz z osiami obojętymi stycznymi do przekroju

5. Wnioski

Opracowany program pozwala wyznaczyć rdzeń dowolnego przekroju. Krzywoliniowy kontur przekroju przybliżany jest wielokątem, zaś dokładność uzyskanego brzegu rdzenia zależy bezpośrednio od gęstości rozmieszczenia wierzchołków w miejscach o największej krzywiznie. Program rozbudowano o czytelny interfejs oraz możliwość wizualizacji wyznaczonego kształtu rdzenia.

Literatura

1. Jakubowicz A., Orłoś Z., Wytrzymałość materiałów, WNT Warszawa (1978).
2. Duda I., Materiały pomocnicze z wytrzymałości materiałów dla studiów zaocznych. Część II, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej (2005).
3. Bodnar A., Wytrzymałość materiałów: podręcznik dla studentów wyższych szkół technicznych, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej (2004).

OPTIMALIZACJA UKŁADÓW POWIERZCHNIOWYCH Z ZASTOSOWANIEM ALGORYTMÓW ROJOWYCH I METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

RAFAL ZIĘTEK

Automatyka i Robotyka, AB3, 5 rok

Opiekunowie naukowci: prof. dr hab. inż. Tadeusz Burczyński,
dr inż. Mirosław Szczepanik



Streszczenie. W artykule opisano optymalizację topologiczną układów tarczowych z zastosowaniem algorytmu rojowego (ang. Particle Swarm Optimization – PSO) i metody elementów skończonych (MES). W ramach pracy wykonano testy optymalnych ustawień parametrów optymalizacji. Do obliczeń i wizualizacji wyników wykorzystano oprogramowanie firmy MSC Software.

1. Wprowadzenie

W procesie produkcyjnym, średnio- i wielko- seryjnym, nawet niewielkie oszczędności uzyskane na jednym elemencie, stają się niezwykle istotne w odniesieniu do całej produkcji. Coraz popularniejsze stało się stosowanie różnych metod optymalizacji konstrukcji. Bezgradientowy algorytm rojowy bazuje na obserwacji dużych społeczności żywych organizmów, których poszczególne cząstki warunkują zachowanie całej populacji. Pozwala to na rozwiązywanie zadań optymalizacji z dużym prawdopodobieństwem znalezienia optimum globalnego [1]. Obliczenia algorytmu roju cząstek zostały dokonane za pomocą programu do optymalizacji rojem cząstek układów powierzchniowych [2]. Jako funkcje celu przyjęto minimalną masę.

2. Algorytm PSO

Algorytm rojowy realizowany jest według następujących punktów:

- Przyjęcie danych wejściowych
- Nadanie cząstkom roju losowych położeń i prędkości początkowych;
- Obliczenie wartości funkcji dopasowania (*fitness*) dla wszystkich poszczególnych cząstek roju;
- Wybranie cząstki z największą wartością funkcji celu oraz uaktualnienie najlepszych położeń cząstek;
- Aktualizacja wektora prędkości każdej cząstki na podstawie informacji pozyskanej od niej oraz od najlepszej cząstki według zależności (1)

$$v_{k+1}^i = wv_k^i + c_1 r_1 (p^i - x_k^i) + c_2 r_2 (p^g - x_k^i) \quad (1)$$

gdzie:

v_{k+1}^i - wektor prędkości i-tej cząstki w k-tej iteracji,

p^i - liczba określająca najlepsze dotąd uzyskane położenie przez i-tą cząstkę,

p^g - liczba określająca najlepsze dotąd położenie uzyskane przez lidera roju,

w - współczynnik bezwładności ruchu cząstki,

c_1, c_2 - współczynniki przyspieszenia,

r_1, r_2 - liczby losowe o rozkładzie równomiernym z przedziału [0,1].

- Aktualizacja położenia każdej cząstki na podstawie aktualnego wektora prędkości oraz poprzedniego położenia cząstki według zależności (2)

$$x_{k+1}^i = x_k^i + v_{k+1}^i \quad (2)$$

gdzie:

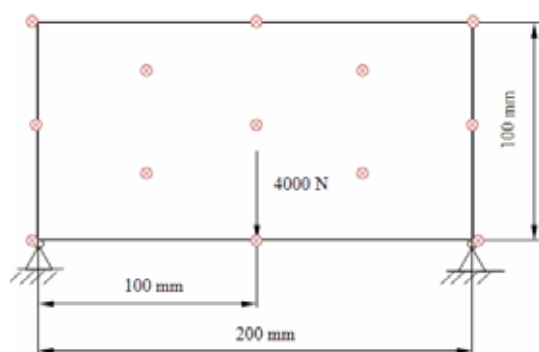
x_k^i - wektor położenia i-tej cząstki w k-tej iteracji,

- Sprawdzenie warunku zatrzymania

3. Optymalizacja parametrów algorytmu rojowego

Układ tarczowy dla którego dokonano optymalizacji parametrów algorytmu rojowego przedstawiony jest na rysunku 1 oraz jego parametry optymalizacji w tabeli 1:

Tabela. 1. Parametry optymalizacji



Rys. 1. Geometria tarczy wraz z rozkładem punktów kontrolnych

Gęstość minimalna	7,3 [g / cm ³]
Gęstość maksymalna	7,9 [g / cm ³]
Warunek usunięcia elementu	7,3 ≤ ρ ≤ 7,5
Warunek istnienia elementu	7,5 ≤ ρ ≤ 7,9
Typ elementu skończonego	trójkątny
Liczba elementów skończonych	1600
Naprężenia minimalne σ _{min}	8 [MPa]
Naprężenia dopuszczalne σ _{dop}	84 [MPa]
Naprężenie dodawane σ _{dod}	1 [MPa]

Wybrane wyniki przeprowadzonych testów przedstawia tabela 2.

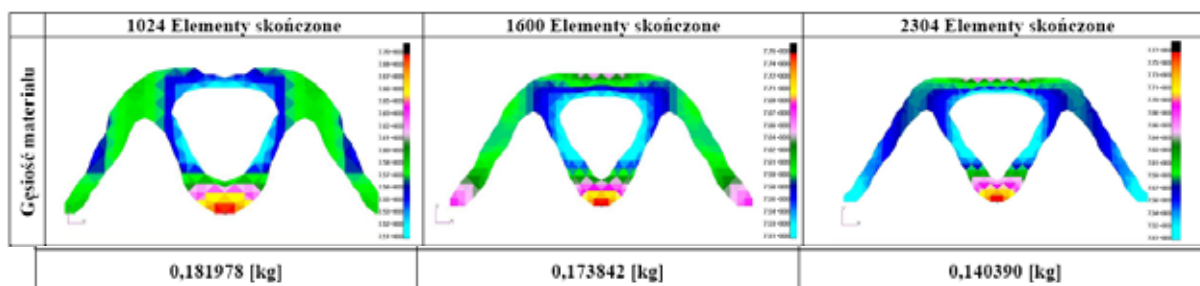
Tabela. 2. Wyniki testów parametrów PSO

w	c ₁	c ₂	Liczba wywołań funkcji celu							Średnia
0.75	1.5	1.5	51	1144	224	1342	600	618	1805	826,3
0.55	1.7	1.7	780	1433	1379	1685	560	1155	2945	1419,5
0.6	1.7	1.7	805	4520	5460	698	6300	409	5650	3406
0.6	1.1	1.1	145	381	159	226	329	358	350	278,3
0.8	1.9	1.9	1915	1474	1938	1072	211	3609	1278	1642,4

4. Testy ustawień parametrów algorytmu optymalizacji układów powierzchniowych

Parametry, które zostały wzięte pod uwagę w procesie testowania PSO:

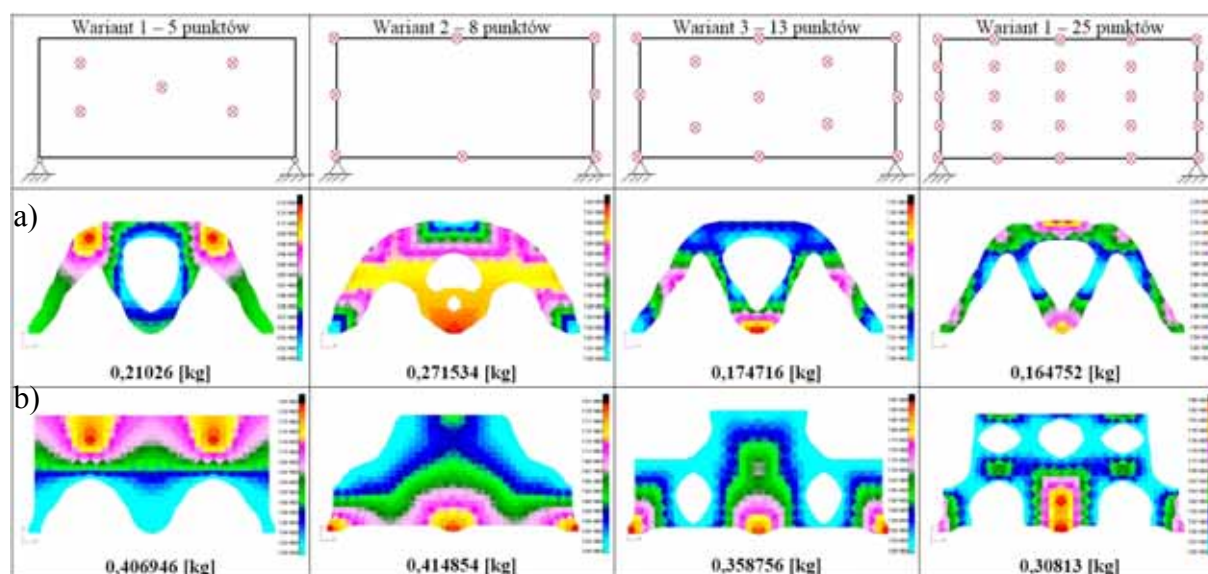
1. Gęstość siatki MES wybranego układu tarczowego, (rys.2. tabela 3.)
2. Liczba i rozmieszczenie punktów kontrolnych na powierzchni układu tarczowego dla algorytmu z procedurą wspomagającą optymalizację topologii; (rys. 3a. tabela 4.)
3. Liczba i rozmieszczenie punktów kontrolnych na powierzchni układu tarczowego dla algorytmu bez procedury wspomagającej optymalizację topologii; (rys. 3b. tabela 5.)
4. Wartość naprężenia dopuszczalnego układu tarczowego dla procedury wspomagającej optymalizację topologii; (rys. 4, tabela 6.)



Rys. 2. Wpływ gęstości siatki dla procedury wspomagającej

Tabela 3. Wynik optymalizacji układu dla różnych wartości gęstości siatki

Gęstość siatki MES					
Liczba elementów skończonych	Przemieszczenie [mm]	Naprężenie [MPa]		Masa [kg]	Ubytek masy [%]
		Maksymalne	Minimalne		
1024	0,0601	83,3	23,2	0,181978	71,34
1600	0,0589	79,5	16,6	0,173842	72,62
2303	0,0748	89,7	15,9	0,14039	77,89



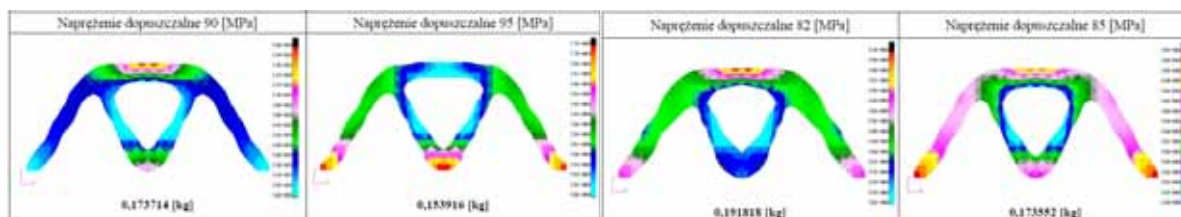
Rys. 3. Wpływ liczby i rozmieszczenia punktów kontrolnych dla metody PSO: a) z procedurą wspomagającą, b) bez procedury wspomagającej

Tabela 4. Wynik optymalizacji układu tarczowego dla różnego rozkładu punktów

Punkty kontrolne (procedura wspomagająca)					
Wariant	Przemieszczenie maksymalne [mm]	Naprężenie [MPa]		Masa [kg]	Ubytek masy [%]
		Maksymalne	Minimalne		
1	0,0499	75,2	19,3	0,21026	66,88
2	0,0371	70,4	13,9	0,271534	57,23
3	0,0582	80,8	16,2	0,174716	72,48
4	0,0622	82,2	15,7	0,164752	74,05

Tabela 5. Wynik optymalizacji układu tarczowego dla różnego rozkładu punktów

Punkty kontrolne (bez procedury wspomagającej)					
Wariant	Przemieszczenie [mm]	Naprężenie [MPa]		Masa [kg]	Ubytek masy [%]
		Maksymalne	Minimalne		
1	0,0363	72,9	23,4	0,406946	35,91
2	0,0256	70,1	18,5	0,414854	34,66
3	0,0404	81,2	12,2	0,358786	44,35
4	0,0443	79,0	14,7	0,30813	51,47



Rys. 4. Wpływ wartości naprężenia dopuszczalnego dla procedury wspomagającej

Tabela 6. Wynik optymalizacji układu dla różnych wartości naprężeń

Naprężenie dopuszczalne dla procedury wspomagającej					
Naprężenie dopuszczalne [MPa]	Przemieszczenie [mm]	Naprężenie [MPa]		Masa [kg]	Ubytek masy [%]
		Maksymalne	Minimalne		
82	0,0519	70,4	23,9	0,191818	69,79
85	0,0590	79,6	16,6	0,173552	72,66
90	0,0646	73,8	25,9	0,157054	75,26
95	0,0659	74,4	21,9	0,153916	75,76

5. Podsumowanie

Wraz ze wzrostem liczby punktów kontrolnych, gęstości siatki MES, oraz naprężeń dopuszczalnych maleje masa otrzymanych układów. Układy otrzymane bez użycia procedury wspomagającej optymalizację mają znacznie większą masę w porównaniu do analogicznych przypadków z procedurą wspomagającą. Masa początkowego układu tarczowego przy założeniu równomiernego rozkładu maksymalnej wartości gęstości wynosi 0,635 [kg]. Najlepszy otrzymany układ w procesie testowania wpływu parametrów optymalizacji charakteryzował się 77,9% ubytkiem masy układu pierwotnego, natomiast najgorszy 35% ubytkiem masy. Otrzymane wyniki są dowodem na zasadność wprowadzania procesu samej optymalizacji, jak również tej z zastosowaniem algorytmu rojem cząstek. Dowodzą one celowości testów doboru parametrów i dostosowania algorytmu. Obrazuje to jak ważna jest znajomość zasad działania algorytmu do prawidłowego, świadomego sterowania pracą algorytmu i analizowania uzyskanych rezultatów.

Literatura

1. Szczepanik M., Optymalizacja układów powierzchniowych z wykorzystaniem algorytmów Ewolucyjnych, Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice (2003).
2. Eberhart R.C., Kennedy J., A new optimizer using particle swarm theory, Proc. Sixth Int. Symp. on Micromachine and Human Science, Nagoya, s. 39-43 (1995).