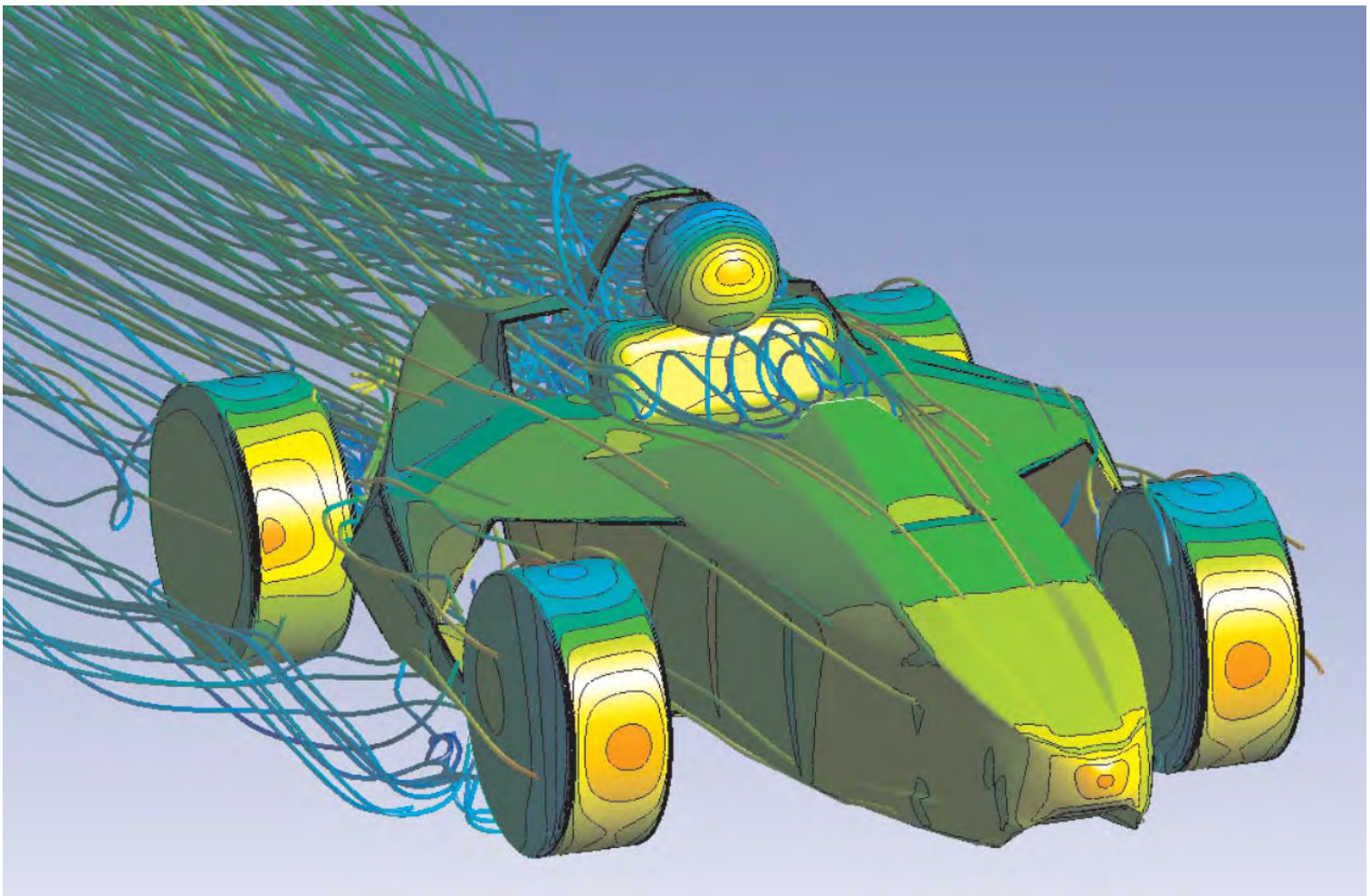




**INSTYTUT MECHANIKI
I INŻYNIERII OBLICZENIOWEJ**
WYDZIAŁ MECHANICZNY TECHNOLOGICZNY POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Studencka Konferencja Naukowa

**METODY
KOMPUTEROWE
2015**



Gliwice 2015

Instytut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Politechnika Śląska

Studencka Konferencja Naukowa
„METODY KOMPUTEROWE – 2015”

Gliwice, maj 2015 r.

Instytut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej

Wydział Mechaniczny Technologiczny
Politechnika Śląska
44-100 Gliwice, ul. Konarskiego 18A
tel.: 32 237 12 04, fax: 32 237 12 82

Komitet Naukowy:

Prof. dr hab. inż. Ewa Majchrzak
Dr hab. inż. Piotr Fedeliński, Prof. Pol. Śląskiej
Dr hab. inż. Antoni John, Prof. Pol. Śląskiej
Dr hab. inż. Waław Kuś, Prof. Pol. Śląskiej
Dr hab. inż. Jerzy Mendakiewicz, Prof. Pol. Śląskiej
Dr hab. inż. Alicja Piasecka-Belkhat, Prof. Pol. Śląskiej
Dr hab. inż. Witold Beluch
Dr hab. inż. Adam Długosz
Dr hab. inż. Grzegorz Kokot
Dr hab. inż. Mirosław Szczepanik

Komitet Organizacyjny:

Dr hab. inż. Piotr Fedeliński, Prof. Pol. Śląskiej
Dr inż. Grzegorz Działkiewicz
Dr inż. Jacek Ptaszny
Dr hab. inż. Adam Długosz
Dr inż. Łukasz Turchan
Inż. Barbara Domagała
Inż. Marcin Hatłas
Inż. Sylwester Ciukaj

Komitet Redakcyjny:

Dr inż. Grzegorz Działkiewicz
Dr inż. Jacek Ptaszny
Dr inż. Mirosław Dzięwoński

Wydanie zeszytów naukowych zostało sfinansowane
przez IBS Poland Sp. z o. o. w Gliwicach.

Rysunek na okładce wykonał inż. Paweł Kostyra, autor artykułu na stronie 49.

ISBN 978-83-930523-2-5

Artykuły opublikowano na podstawie oryginałów dostarczonych przez Autorów.

Druk i oprawę wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej.
Nakład 100 egz. Druk ukończono w maju 2015 r.

Wstęp

Zeszyt naukowy zawiera 22 artykuły prezentowane na dziewiątej Studenckiej Konferencji Naukowej „Metody Komputerowe”, odbywającej się 28 maja 2015 roku w Centrum Edukacyjno-Kongresowym Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Konferencję zorganizowali studenci i pracownicy Instytutu Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej. Artykuły przedstawiają wyniki prac studentów Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej. Publikacje dotyczą zastosowania metod komputerowych w różnych dziedzinach techniki, takich jak:

- wytrzymałość materiałów,
- mikromechanika,
- biomechanika,
- termodynamika,
- aerodynamika,
- hydrodynamika,
- badania operacyjne,
- badania doświadczalne,
- sterowanie,
- 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 artykułów świadczy o znacznej aktywności naukowej studentów i potrzebie organizacji tego rodzaju konferencji. Życzę studentom owocnych dyskusji w czasie konferencji. Mam nadzieję, że udział w niej 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 2015 r.

Studenckie Koło Naukowe „Metod Komputerowych”
Instytut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej
Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska
www.imio.polsl.pl

Zarząd Koła w roku akademickim 2014/2015:

Przewodnicząca: inż. Barbara Domagała, Mechatronika
Wiceprzewodniczący: inż. Marcin Hatłas, Mechatronika
Sekretarz: inż. Sylwester Ciukaj, Automatyka i Robotyka

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Piotr Fedeliński, Prof. Pol. Śląskiej
Opiekunowie ds. organizacji: dr inż. Grzegorz Działkiewicz, dr inż. Jacek Ptaszny

Studenckie Koło Naukowe „Metod Komputerowych” zostało zarejestrowane w dniu 6.12.2001 r. Głównym celem Koła jest poszerzanie 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 Instytutu Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej (IMiO),
- 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 IMiO nad pracami własnymi członków Koła,
- referaty pracowników naukowych IMiO oraz zaproszonych gości na zebraniach naukowych Koła,
- organizowanie kursów obsługi programów wspomagających prace inżynierskie oraz kursów programowania,
- organizowanie konkursów,
- 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.



Uczestnicy Studenckiej Konferencji Naukowej
„Metody Komputerowe – 2014” – Gliwice, 22.05.2014 r.



Zwiedzanie fabryki Tenneco Automotive Polska Sp. z o.o. – Rybnik, 24.04.2015 r.



Zebranie Studenckiego Koła Naukowego „Metod Komputerowych” – Gliwice, 21.04.2015 r.



Zebranie Studenckiego Koła Naukowego „Metod Komputerowych” – Gliwice, 21.04.2015 r.

W pomyśle PLM ujawnia się talent,
w wykonaniu sztuka.

- Dystrybucja rozwiązań CAD/CAM/CAE/PLM
- Audyty biznesowe PLM
- Wdrożenia systemów zarządzania wiedzą o produkcji
- Szkolenia i doradztwo inżynierskie
- Usługi projektowo-konstrukcyjne



IBS Poland, jako partner firmy Dassault Systemes, prowadzi sprzedaż i wdraża rozwiązania PLM (CATIA, ENOVIA, DELMIA, 3DVIA) na rynku polskim. Konsekwentnie analizujemy potrzeby rynku w zakresie unowocześnienia technologii i informatyzacji zakładów, oferując usługi wdrożeniowe i konsultacyjne. Dostarczamy rozwiązania informatyczne do wszystkich gałęzi przemysłu bazując na otwartej, skalowalnej platformie integrującej środowiska pracy działów inżynierskich w ramach realizowanych procesów biznesowych.

Bogate doświadczenie w obszarze implementacji rozwiązań PLM oraz wysokie kompetencje zespołu technicznego sprawiły, że firma jest rozpoznawalną marką na rynku i stale poszerza swoje horyzonty, m.in. poprzez członkostwo w Polskiej Izbie Gospodarczej Zaawansowanych Technologii.



Spis treści

BALMAS MATEUSZ Modelowanie komputerowe prób pęknięcia	1
CHOLEWA TOMASZ System transmisji danych w paśmie ISM	5
CICHOŃ ŁUKASZ Analiza zjawisk cieplnych w tranzystorach polowych MOSFET	9
CIUKAJ SYLWESTER Analiza termiczna układu tłok – korbówód za pomocą MES	13
DEJA ASTRID Modelowanie rozkładu temperatury i funkcji wrażliwości w tkance biologicznej	17
DOMAGAŁA BARBARA Wpływ geometrii na stan wyężenia w układzie kość – implant	21
DUDEK OLAF Sztywność resoru dwudrażkowego w zastosowaniu do pojazdów gąsienicowych	25
ELBIN PAWEŁ Analiza zjawiska pęknięcia dysków w zaworze RV	29
GIOŁBAS JAKUB Badanie wpływu parametrów lasera na nagrzewanie cienkich warstw metalowych	33
HATŁAS MARCIN Modelowanie wieloskalowe materiałów gradientowych	37
KARLIK MATEUSZ Dwuwęzłowy model systemu termoregulacji ciała ludzkiego	41
KORAL KATARZYNA Wielokryterialna optymalizacja planu produkcji	45
KOSTYRA PAWEŁ Analiza CFD bolidu PolSI Racing	49
KRZYMYK MAGDALENA Optymalizacja planu przepływu towaru z wykorzystaniem metod programowania liniowego	53
LIPIŃSKA DOROTA Modelowanie przewodzenia ciepła w aktuatorach ze stopu z pamięcią kształtu	57

PETRYŃSKA BARBARA	
Analiza wytrzymałościowa endoprotezy stawu kolanowego	61
POREBA MARTYNA	
Badania statyczne i obliczenia połączeń zgrzewanych	65
ROGALSKI MARCIN	
System automatycznego pozycjonowania na podstawie pomiaru odległości od obiektu	69
SEBASTJAN PRZEMYSŁAW	
Identyfikacja rodzaju wzmocnienia stali	73
SUCHOSTAWSKI DANIEL	
Ciepłno-przepływowa analiza numeryczna przeponowego wymiennika ciepła	77
ŚWITAŁA RAFAŁ	
Wpływ geometrii zaworu na charakterystyki przepływu	81
WARZYBOK PATRYK	
Analiza i projektowanie narożnego zawieszenia serpentynowego mikroakcelerometru	85

MODELOWANIE KOMPUTEROWE PRÓB PĘKANIA

inż. MATEUSZ BALMAS

Mechanika i Budowa Maszyn, MB4, semestr III, 2 stopień
Opiekun naukowy: dr hab. inż. Piotr Fedeliński, Prof. Pol. Śląskiej



Streszczenie. Celem pracy jest analiza znormalizowanych próbek stosowanych do badania odporności na pękanie. Próbki modelowane jako tarcze analizowano metodami komputerowymi: metodą elementów brzegowych (MEB) i metodą elementów skończonych (MES).

1. Zakres normy

Norma [1] opisuje metodę wyznaczania współczynnika K_{IC} dla jednorodnych materiałów metalowych. Jest on miarą odporności na rozwój szczeliny w warunkach, w których w otoczeniu jej wierzchołka przeważa płaski stan odkształcenia, a odkształcenie plastyczne jest ograniczone. Do badań wykorzystywane są próbki z karbem zmęczeniowym i inicjującą szczeliną zmęczeniową, które poddaje się wolno wzrastającej sile rozwierającej szczelinę. Współczynnik intensywności naprężeń dla I modelu obciążenia (rozrywania krawędzi pęknięcia) jest zależny od obciążenia zewnętrznego, długości szczeliny oraz wymiarów geometrycznych próbki. Norma określa kształt i wymiary dwóch próbek: trójpunktowo zginanej oraz zwartej.

2. Metody komputerowe w mechanice pękania

Program [2] dualnej metody elementów brzegowych służy do analizy tarcz ze szczelinami. Metoda ta charakteryzuje się tym, że są rozważane dwa niezależne brzegowe równania całkowe. Pierwszym z nich jest równanie sił, a drugim przemieszczeń. Różne równania brzegowe pozwalają na uzyskanie niezależnych równań całkowym mimo tego, że geometria obu powierzchni szczeliny jest identyczna. Brzegi pęknięcia zostały podzielone za pomocą elementów nieciągłych, natomiast wszystkie pozostałe ciągłymi elementami kwadratowymi.

Do analizy za pomocą metody elementów skończonych wykorzystano oprogramowanie Ansys posiadające moduł, który służy do wyznaczania parametrów mechaniki pękania [3]. Do utworzenia siatki elementów skończonych wykorzystano elementy trójkątne sześciowęgłowe (wokół wierzchołka pęknięcia) oraz elementy czworokątne ośmiowęgłowe.

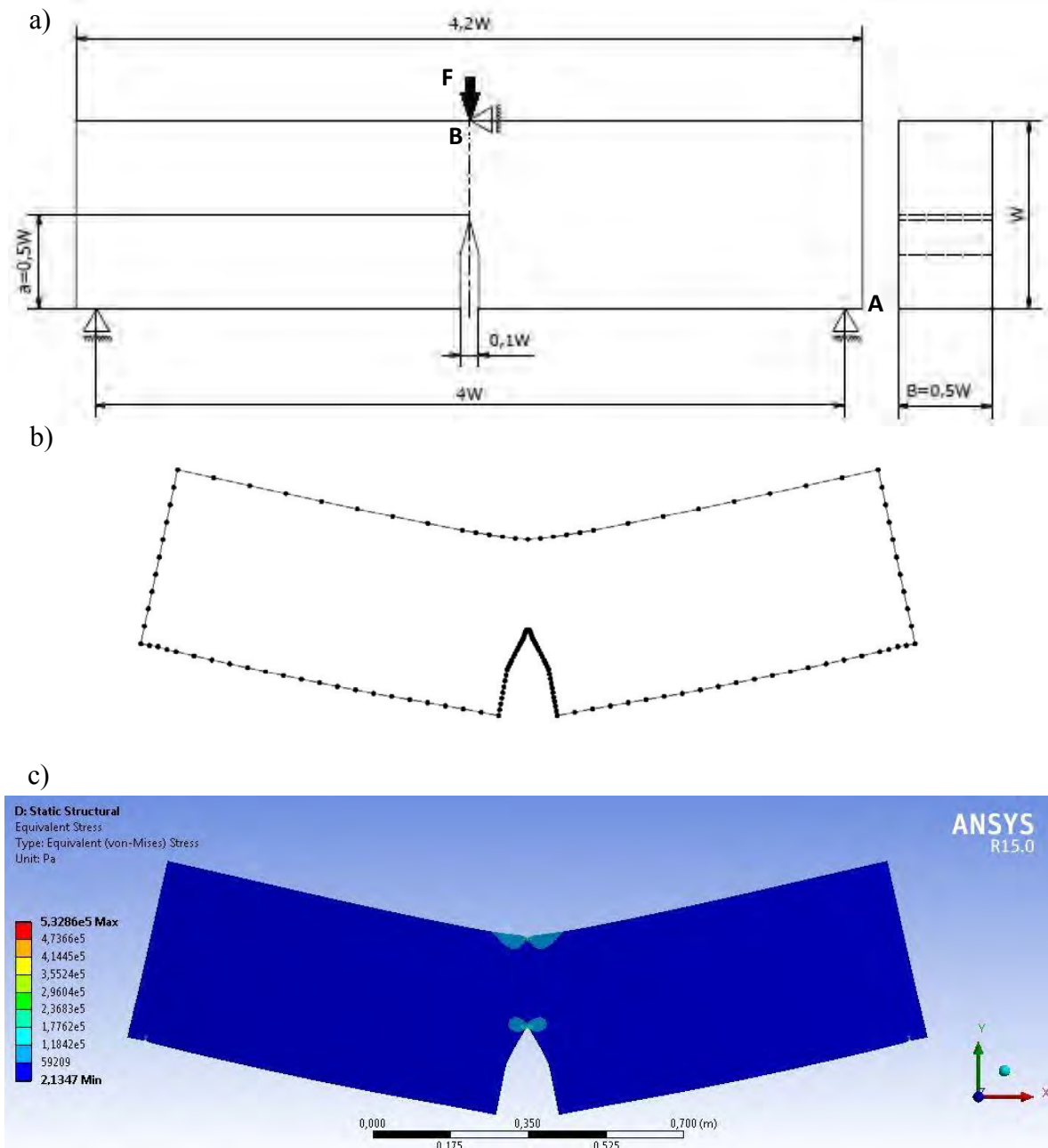
3. Przykłady numeryczne

Geometrię próbek dobrano na podstawie normy [1]. Warunki brzegowe zostały tak dobrane, aby w jak największym stopniu odpowiadały rzeczywistym warunkom przeprowadzania próby na maszynach wytrzymałościowych z użyciem niezbędnego oprzyrządowania opisanego w normie (rys. 1a oraz rys. 2a).

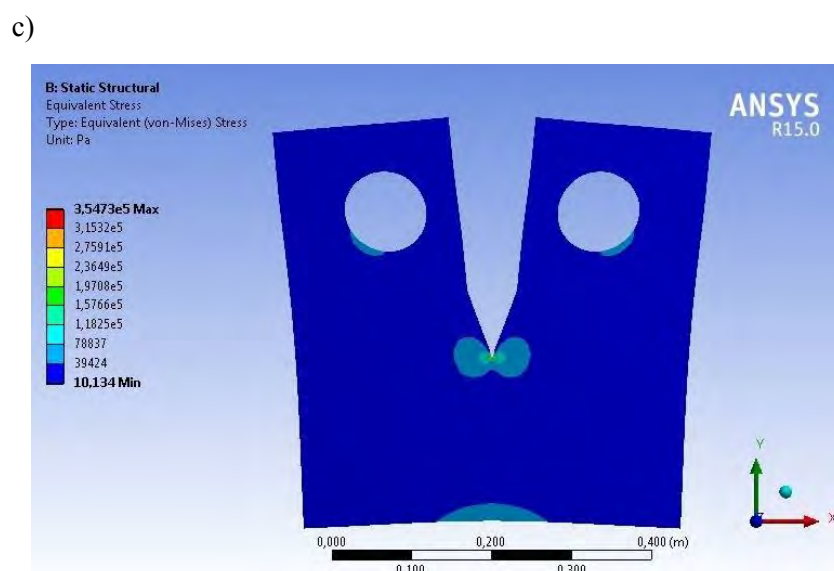
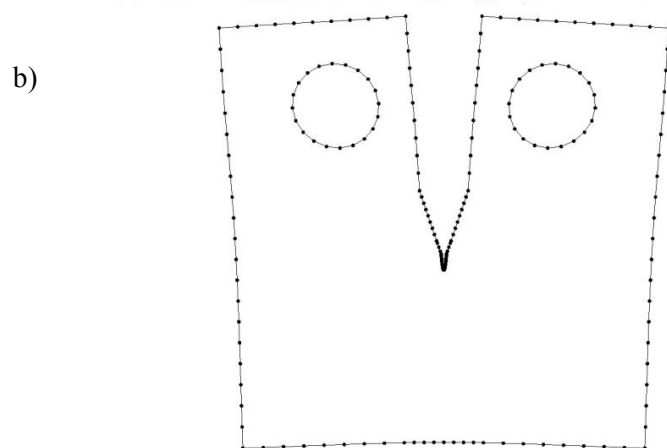
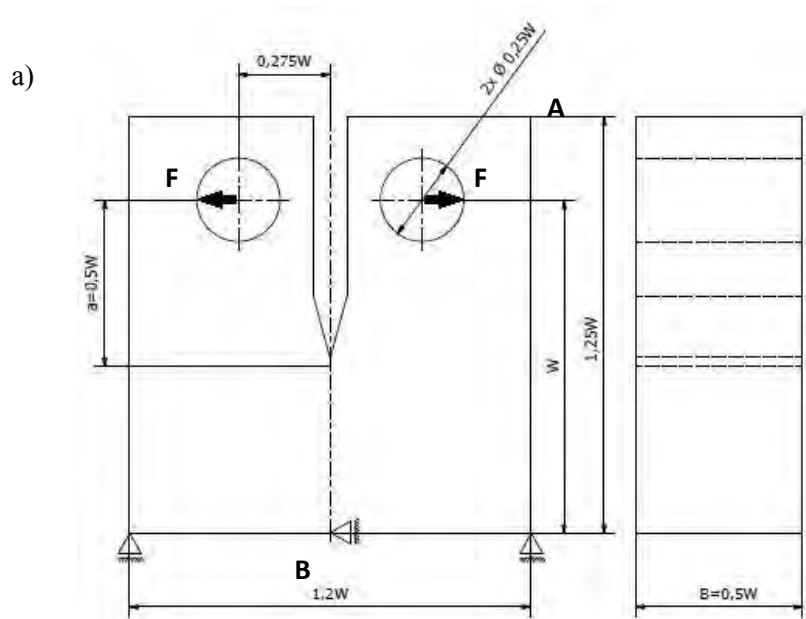
W metodzie elementów brzegowych siła skupiona $F=2000$ N została rozłożona na jeden element w próbce trójpunktowo zginanej, a w próbce zwartej na dwa elementy znajdujące się na krawędzi każdego z otworów.

Oprogramowanie do metody elementów skończonych pozwoliło na przyłożenie siły skupionej F do jednego węzła w próbce trójpunktowo zginanej. W przypadku próbki zwartej zastosowano obciążenie o wartości siły F , które symuluje działanie sztywnych sworzni umieszczonych w otworach i rozciąganie próbki w kierunku poziomym.

Jako materiał próbek przyjęto stal, której: moduł Younga $E=200\text{ Pa}$, współczynnik Poissona $\nu=0,3$.



Rys. . P róbka zginana: a) geometria z warunkami brzegowymi i wymiarami, b) MEB – odkształcony model, c) MES – naprężenia redukowane wg. hipotezy Hubera - Misesa



Rys. 2. Próbkę zwartą: a) geometria z warunkami brzegowymi i wymiarami, b) MEB – odkształcony model, c) MES – naprężenia zredukowane wg. hipotezy Hubera - Misesa

4. Analiza przemieszczeń i naprężeń

Przemieszczenia w metodzie elementów brzegowych zostały pokazane odpowiednio na rysunku 1b dla próbki zginanej oraz na rysunku 2b dla próbki zwartej. Rysunki 1c i 2c ukazują pola naprężeń oraz przemieszczenia dla metody elementów skończonych.

W celu zweryfikowania wyników otrzymanych w analizach numerycznych obliczona została wartość współczynnika intensywności naprężeń dla obu próbek z wykorzystaniem wzorów znajdujących się w normie [1].

Obliczone analitycznie wartości wraz z wynikami uzyskanymi z wykorzystaniem metod komputerowych zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela. 1. Porównanie współczynnika intensywności naprężeń [MPa m^{-2}] w analizie MEB i MES z rozwiązaniem analitycznym

Próbka	Analitycznie	MEB	MES
Zginana	0, 2	0,	0, 4
Zwarta	0, 2	0, 2	0, 4 2

Porównano również przemieszczenia w punktach A i B (tabela 2).

Tabela. 2. Porównanie przemieszczeń [m] w analizie MEB oraz MES w punktach A i B

Próbka	Przemieszczenie	MEB	MES
Zginana	$u_x(A)$, 0	, 3 0
	$u_y(A)$	2,0 0	, 0 0
	$u_y(B)$,02 0	,443 0
Zwarta	$u_x(A)$	2,4 0	2,4 2 0
	$u_y(A)$	3, 0	3, 2 0
	$u_y(B)$, 0 0	, 4 0

5. Podsumowanie

Przeprowadzenie symulacji za pomocą programów komputerowych do MEB i MES pozwoliło na wyznaczenie wartości współczynnika intensywności naprężeń przy zadanym obciążeniu. Różnica między wartościami obliczonymi analitycznie, a tymi wyznaczonymi w programach jest bardzo mała. Również nieznacznie różnią się wartości przemieszczeń wyznaczone różnymi metodami.

Literatura

1. PN-EN ISO 12737 Metale. Określanie odporności na pękanie w płaskim stanie odkształcenia
2. Portela A., Aliabadi M.H., Crack Growth Analysis Using Boundary Elements, Computational Mechanics Publications, Southampton (1993).
3. Users Guide ANSYS, Ansys Inc., Houston, USA.

SYSTEM TRANSMISJI DANYCH W PAŚMIE ISM

inż. TOMASZ CHOLEWA

Mechatronika, ME2, semestr I, 2 stopień

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Wacław Kuś, prof. Pol. Śląskiej

Streszczenie. Artykuł poświęcony jest projektowi bezprzewodowego systemu transmisji danych symulującego przesyłanie informacji pomiędzy stacją pośredniczącą, a urządzeniem docelowym – mobilnym robotem badawczym. Jest to element projektu złożonego systemu komunikacji dalekiego zasięgu z wykorzystaniem połączenia z Międzynarodową Stacją Kosmiczną. W artykule wyszczególniono i scharakteryzowano elementy składowe systemu oraz przedstawiono sposób reprezentacji danych. Omówiono także działanie programów sterujących komunikacją.

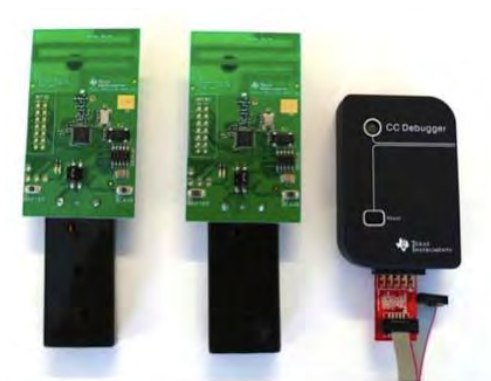


1. Wprowadzenie

Transmisja to proces przesyłania informacji (danych, dźwięku, obrazu), odpowiednio zakodowanej w sygnale, między nadajnikiem a odbiornikiem. Bezprzewodowe media transmisyjne stanowią fale elektromagnetyczne, a dokładniej fale radiowe i świetlne. Fale radiowe to fale elektromagnetyczne o częstotliwościach mniejszych niż 300 GHz i odpowiadających im długościach co najmniej mm. Od długości i częstotliwości fal radiowych zależy charakter ich propagacji, z którym ściśle związany jest obszar zastosowań danej grupy fal, jak i możliwy do uzyskania zasięg transmisji, a także wymiary anten [1]. W przypadku komunikacji z niewielkimi urządzeniami, gdy rozmiary anteny są ograniczone, stosuje się fale ultrakrótkie lub decymetrowe, których zasięg na kuli ziemskiej jest często niewystarczający. Można go wszakże istotnie zwiększyć poprzez wykorzystanie Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (International Space Station – ISS) lub satelitów okołoziemskich jako elementów pośrednich toru komunikacyjnego. System transmisji danych będący tematem artykułu stanowi część projektu systemu telekomunikacyjnego umożliwiającego łączność z urządzeniem docelowym (mobilnym robotem badawczym) za pośrednictwem ISS. W [2] autorzy przedstawili prototyp automatycznej stacji nasłuchowej służącej do komunikacji z ISS. W niniejszym artykule opisano model systemu przesyłania danych pomiędzy stacją pośredniczącą (odbierającą sygnał z ISS) a urządzeniem docelowym. Przedstawiono cechy układu radiowego, który stanowi podstawę systemu transmisji. Określono zadania systemu i podano warunki jego działania. Omówiono sposób kodowania przesyłanych informacji oraz działanie programów zarządzających procesem wymiany danych.

2. Opis urządzenia: TI CC1110 Mini Development Kit 868-915 MHz

System komunikacyjny oparty jest na zestawie radiowym CC1110 Mini Development Kit 868-915 MHz firmy Texas Instruments. CC1110 to urządzenie krótkiego zasięgu (SRD, ang. *Short Range Device*) zaprojektowane, by stanowić element radiowych torów komunikacyjnych w zastosowaniach wymagających niskiego poboru mocy (LPRF – ang. *Low Power Radio Frequency*) [3], jak bezprzewodowe sieci czujników czy systemy telemetryczne.

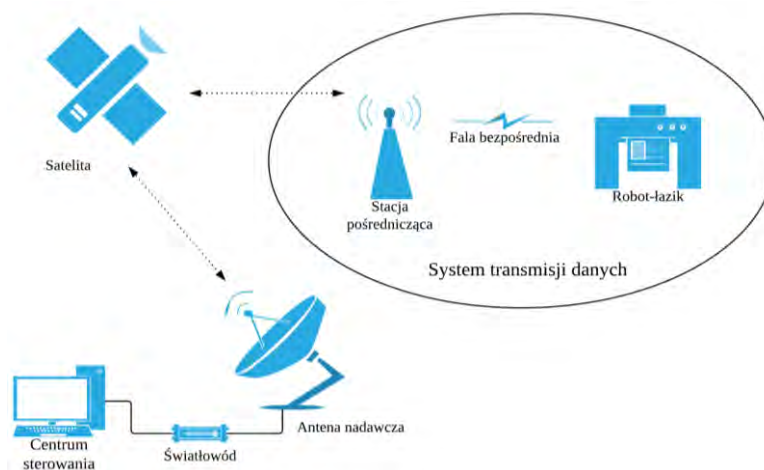


Rys. 1. Elementy zestawu CC1110 Mini Development Kit 868-915 MHz

Zestaw CC1110 Mini Development Kit (przedstawiony na rysunku) stanowią dwa moduły SmartRF CC 0 oraz CC Debugger (programator). SmartRF CC1110 to dwuwarstwowa płytko drukowana zawierająca układ mikroprocesorowy System-on-Chip typu CC1110F32 z modulem radiowym pracującym w zakresie fal decymetrowych (ang. UHF – *Ultra High Frequency*). Parametry pasma częstotliwości sygnału nośnego, a także format modulacji, ustalane są programowo za pomocą odpowiednich rejestrów radiowych [4].

3. Założenia projektowe systemu i ograniczenia

Projektowany system komunikacji ma na celu przesyłanie informacji o wymaganej do zbadania pozycji przez robota. Robot udaje się do wyznaczonego obszaru i po przeprowadzeniu badań wysyła wyniki pomiarów do stacji pośredniczącej. Schemat sieci przedstawiony jest na rysunku 2. Elipsą zaznaczono fragment sieci będący przedmiotem pracy.



Rys. 2. Schemat projektowanego systemu transmisji danych

System bazuje na dwóch urządzeniach SmartRF CC 0, z których jedno symuluje zachowanie stacji pośredniczącej, a drugie robota. Jako przykład danych pomiarowych służy wartość temperatury mierzonej przez układ robota. Do komunikacji wykorzystano pasmo ISM o częstotliwości fali nośnej 3 M Hz oraz format modulacji GFSK¹. Istotne

¹ GFSK – ang. *Gaussian frequency-shift keying*, rodzaj kluczowania częstotliwości, w którym prostokątny sygnał zawierający informację jest wygładzony za pomocą filtru gaussowskiego

ograniczenie w transmisji stanowi typ danych, które mogą zostać użyte w wiadomościach wysyłanych w ramce danych protokołu SimpliTI. Zajmują one bajt. Pojedyncza informacja przesyłana w wiadomości może być liczbą naturalną ze zbioru $\{0, 1, 2, \dots, 255\}$ lub znakiem alfanumerycznym. W pojedynczym komunikacie można wysłać 0 takich wartości.

4. Reprezentacja danych

Model obszaru roboczego łazika podzielono na 3 kwadratowych podobszarów, z których każdy jednoznacznie opisany jest parą liczb ze zbioru $\{0, 1, 2, \dots, 255\}$, na wzór płaskiego prostokątnego układu współrzędnych, zgodnie z rysunkiem 3.

255											
254											
253											
[...]											
129											
128											
127											
[...]											
2											
1											
0											
	0	1	2	[...]	127	128	129	[...]	253	254	255

Rys. 3. Przyjęty podział pola roboczego łazika na podobszary

Wiadomość zawierającą pozycję docelową zdefiniowano w postaci dwuelementowej tabeli liczb całkowitych, z których pierwsza określa numer podobszaru w kierunku poziomym, a druga – w kierunku pionowym. Wartość temperatury, będąca liczbą zmiennoprzecinkową, przesyłana jest w postaci tablicy trzech liczb całkowitych, z których pierwsza koduje znak (przyjmuje wartość 0, gdy mierzona temperatura jest nieujemna, a 1 gdy temperatura jest mniejsza od zera), a dwie kolejne to odpowiednio część całkowita i ułamkowa zmierzonej wartości.

5. Programy obsługujące komunikację

Do programowania i debugowania mikrokontrolerów μC zastosowano język C, natomiast edycji programów dokonano przy użyciu środowiska IAR Embedded Workbench μC firmy IAR Systems [1]. Każde z urządzeń SmartRF CC μC obsługiwane jest przez odrębny program. Moduł symulujący zachowanie stacji pośredniczącej określane jest mianem *mastera*, a układ zastępujący robota – jako *slave*. Po nawiązaniu połączenia, układy CC μC ustalają odpowiedni poziom mocy wysyłanego sygnału na podstawie odczytu wartości RSSI (ang. *Received Signal Strength Indication* – wskazanie mocy odebranego sygnału) z jednego z rejestrów radiowych. Następnie master wysyła komunikat z pozycją docelową do robota, który ją przetwarza i odsyła potwierdzenie jej otrzymania. Jeśli treść wiadomości otrzymanej od slave’a jest poprawna, master wysyła do slave’a żądanie podania temperatury. Ten sprawdza, czy otrzymana wiadomość ma oczekiwaną postać; jeśli tak, dokonuje pomiaru temperatury i wysyła jej wartość do mastera. Po otrzymaniu komunikatu zawierającego wartość temperatury układu slave’a, master wyświetla (w terminalu debuggera) całą treść korespondencji. Rysunek 4 przedstawia okno terminalu programu IAR Embedded Workbench 8051 w trybie debugowania. Diagram procesu komunikacji pokazano na rysunku 5.

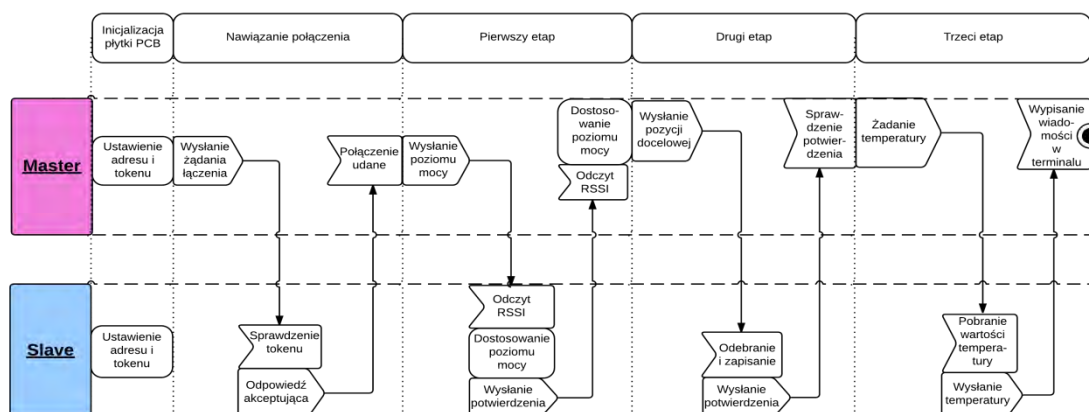
```

Terminal I/O
Output:
Log file: Off

A tutaj zawartość przesłanych i odebranych wiadomości
1. Wysłane współrzędne docelowe:
x = 17, y = 7
2. Odebrane potwierdzenie
DestAproved
3. Wysłana prośba o podanie temperatury:
CallForTemperature
4. Temperatura otoczenia odległego chipa:
22,15 stopni Celsjusza

```

Rys. 4. Widok konsoli debuggera wyświetlającej treści komunikatów



Rys. 5. Diagram czasowy procesu wymiany danych

6. Podsumowanie

Zaprojektowany system spełnia określone założenia, poprawnie realizując przesyłanie informacji sterującej. Możliwość zastosowania różnych interfejsów komunikacyjnych i obsługi urządzeń peryferyjnych sprawia, że układy takie, jak TI CC 0 Mini Development Kit, są uniwersalne. Oferują one użytkownikom szerokie możliwości budowy skomplikowanych systemów, począwszy od lokalnych układów alarmowych aż do fragmentów systemów łączności dalekiego zasięgu.

Literatura

1. Gregg D., Podstawy telekomunikacji analogowej i cyfrowej, WNT, Warszawa (1983).
2. Poręba M., Drozd M., Olczyk P., Ulman M., Automatyczna stacja nasłuchowa ISS oraz satelitów, w materiałach „METODY KOMPUTEROWE – 20 4”, Gliwice, s. -100 (2014).
3. CC1110 Mini Development Kit 868- MHz User’s Guide, Texas Instruments Inc., <http://www.ti.com/lit/swru23> [Dostęp 0.20 4] .
4. CC1110Fx/CC1111Fx Data Sheet, Texas Instruments Inc., <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1110-cc.pdf> [Dostęp 3. 20 4] .
5. IAR Embedded Workbench for 8051, IAR Systems, <http://www.iar.com/ew8051/> [Dostęp 20. 0.20 4] .
6. Cholewa T., Projekt i budowa systemu transmisji danych, Praca inżynierska, Wydział Mechaniczny-Technologiczny, Instytut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej, Politechnika Śląska, Gliwice (2015).

ANALIZA ZJAWISK CIEPLNYCH W TRANZYSTORACH POLOWYCH MOSFET

inż. LUKASZ CICHONÍ

Mechatronika, ME3, semestr III, 2 stopień

Opiekun naukowy: prof. dr hab. inż. Ewa Majchrzak

Streszczenie. Przedmiotem pracy jest dokonanie analizy rozkładu temperatury w tranzystorze MOSFET przy zastosowaniu równania z dwoma czasami opóźnień opisującego przepływ ciepła w mikroskali. Z powodu braku pakietów obliczeniowych umożliwiających analizę transportu ciepła w skali mikro, opracowano autorski program komputerowy bazujący na schemacie jawnym metody różnic skończonych. Otrzymane wyniki porównano z wynikami uzyskanymi przy zastosowaniu równania Fouriera opisującego przepływ ciepła w skali makro i na tej podstawie sformułowano wnioski.



1. Wprowadzenie

Tranzystor to element elektroniczny zbudowany najczęściej z trzech lub czterech elektrod, który charakteryzuje się możliwością wzmocnienia sygnału elektrycznego []. Tranzystory są elementami półprzewodnikowymi. Zastosowanie tranzystorów jest niezwykle rozległe, można je dostrzec w każdym układzie scalonym, zarówno w prostych układach wzmacniających jak i w bardzo skomplikowanych podzespołach wykorzystujących technikę mikroprocesorową. W ostatnich latach w każdej rozwijającej dziedzinie przemysłu oraz technologii duży nacisk jest kładziony na miniaturyzację zarówno elementów mechanicznych jak i układów scalonych, w których używa się tranzystorów MOSFET. Dużym utrudnieniem w miniaturyzacji jest nagrzewanie się elementów elektronicznych. Stwierdzono, że w skali mikro i nano wyniki analiz termicznych uzyskiwanych za pomocą klasycznego równania Fouriera znacząco odbiegają od danych uzyskiwanych eksperymentalnie. Przyczyny te spowodowały konieczność opracowania nowych modeli matematycznych tak modyfikujących klasyczne równanie Fouriera, aby ich użycie w symulacji przepływu ciepła w skali mikro i nano lepiej odtwarzało rzeczywiste procesy cieplne.

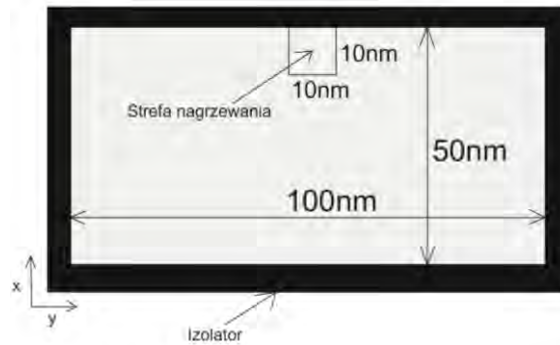
W artykule do modelowania procesów cieplnych zachodzących w tranzystorach MOSFET wykorzystano równanie z dwoma czasami opóźnień uzupełnione odpowiednimi warunkami brzegowymi i początkowymi. Zadanie rozwiązano stosując schemat jawny metody różnic skończonych. Opracowano autorski program komputerowy do wyznaczania rozkładów temperatury i obliczenia przeprowadzono zarówno dla modelu z dwoma czasami opóźnień jak i dla modelu Fouriera. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń wykazano, że występują istotne różnice w rozkładach temperatury uzyskiwanych za pomocą tych modeli.

2. Model matematyczny

Na rysunku 1 pokazano schemat rozpatrywanego tranzystora o wymiarach $100 \text{ nm} \times 50 \text{ nm}$ z zaznaczonym w okolicy bramki obszarem nagrzewania o wymiarach $10 \text{ nm} \times 10 \text{ nm}$. Rozkład temperatury w rozpatrywanym obszarze opisano za pomocą równania z dwoma czasami opóźnień [2]:

$$C \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \tau_q \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \lambda \tau_T \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q + \tau_q \frac{\partial Q}{\partial t}, \quad (1)$$

gdzie $T=T(x, y, t)$ [K] oznacza temperaturę, x, y [m] to współrzędne geometryczne, t [s] jest czasem, C [J/(m³ K)] – objętościowym ciepłem właściwym, λ [(W (mK))] – współczynnikiem przewodzenia ciepła, τ_q [s] – czasem relaksacji [s], τ_T [s] – czasem termalizacji. Funkcja źródła $Q=Q(x, y, t)$ [W/m³] związana z nagrzewaniem tranzystora poza obszarem nagrzewania jest równa zero. Dla $\tau_q = \tau_T = 0$ równanie () sprowadza się do równania Fouriera. Na zewnętrznych powierzchniach tranzystora przyjęto zerowy strumień ciepła, założono również temperaturę początkową rozpatrywanego obszaru.



Rys. 1. Schemat tranzystora

3. Metoda rozwiązania

W pracy do rozwiązania równania () wykorzystano metodę różnic skończonych [3], która polega na zastąpieniu pochodnych występujących w równaniu () odpowiednimi ilorazami różnicowymi. Po wykonaniu odpowiednich przekształceń otrzymuje się następujące równanie, na podstawie którego wyznacza się temperatury w kolejnych węzłach (i, j) siatki różnicowej

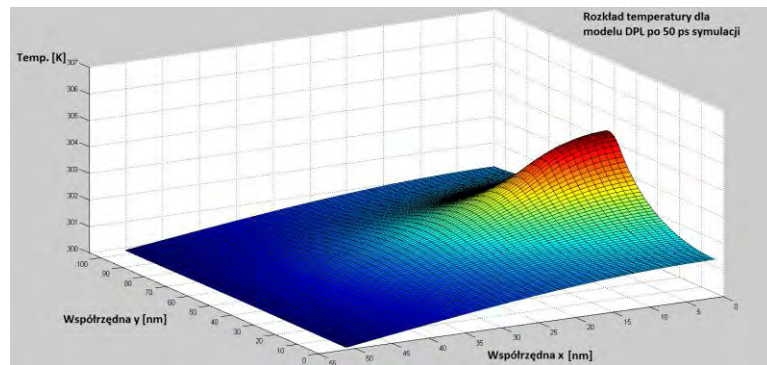
$$T_{i,j}^f = \frac{h^2(\Delta t + 2\tau_q) - 4a\Delta t(\Delta t + \tau_q)}{h^2(\Delta t)^2} T_{i,j}^{f-1} + \frac{a(\Delta t + \tau_T)}{h^2\Delta t} (T_{i-1,j}^{f-1} + T_{i+1,j}^{f-1} + T_{i,j-1}^{f-1} + T_{i,j+1}^{f-1}) + \frac{4a\tau_T\Delta t - h^2\tau_q}{h^2(\Delta t)^2} T_{i,j}^{f-2} - \frac{a\tau_T}{h^2\Delta t} (T_{i-1,j}^{f-2} + T_{i+1,j}^{f-2} + T_{i,j-1}^{f-2} + T_{i,j+1}^{f-2}) + \frac{\Delta t^2}{C(\Delta t + \tau_q)} Q_{i,j}^{f-1} + \frac{\tau_q(\Delta t)^2}{C(\Delta t + \tau_q)} Z_{i,j}^{f-1} \quad (2)$$

gdzie $a=\lambda C$, $Z^{f-} = \partial Q^{f-} / \partial t$, h oznacza krok siatki różnicowej, Δt jest krokiem czasu.

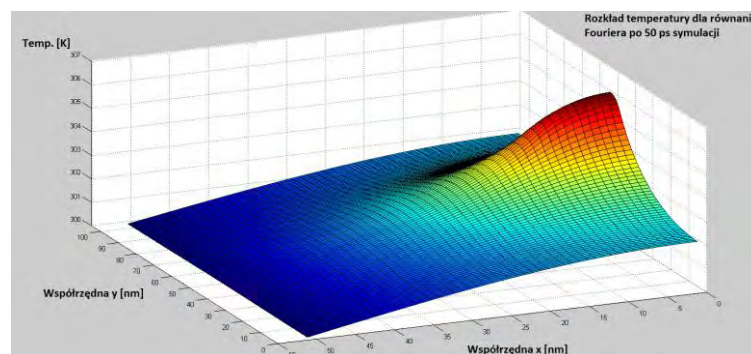
4. Wyniki symulacji

Obliczenia przeprowadzono dla następujących danych: temperatura początkowa= 300K, krok siatki= nm, krok czasu dobrany zgodnie z warunkiem stabilności 0,00 ps. Wartości liczbowe parametrów występujących w modelu matematycznym zaczerpnięto z pracy [2].

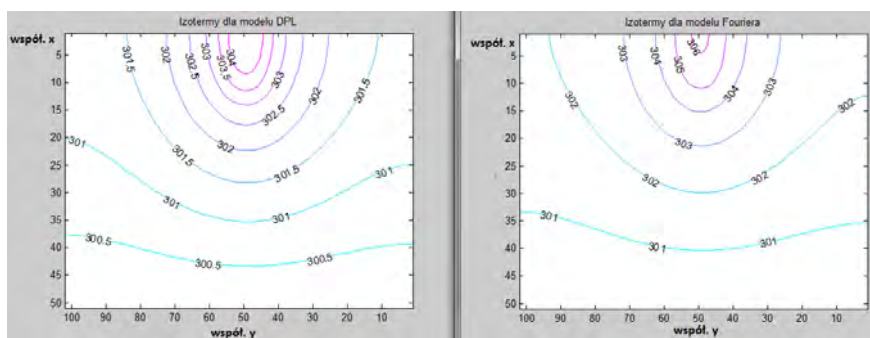
Rysunek 2 przedstawia rozkład temperatury w analizowanym tranzystorze po 0 ps jego działania przy zastosowaniu modelu DPL. Jak widać, najbardziej nagrzanym obszarem jest obszar bramki, w którym działa funkcja źródła. Maksymalna temperatura uzyskana podczas symulacji to 304,47 K. Z kolei rysunek 3 przedstawia rozkład temperatury otrzymany z zastosowaniem równania Fouriera. Zaobserwowana temperatura maksymalna to 30,4 K. Wykorzystując makroskopowe równanie Fouriera otrzymuje się wyższe wartości temperatury. Różnice w rozkładzie temperatur są również widoczne na rysunku 4 przedstawiającym izotermie dla obu przypadków. Na rysunku pokazano krzywe nagrzewania w punkcie położonym najbliżej bramki otrzymane za pomocą obu modeli.



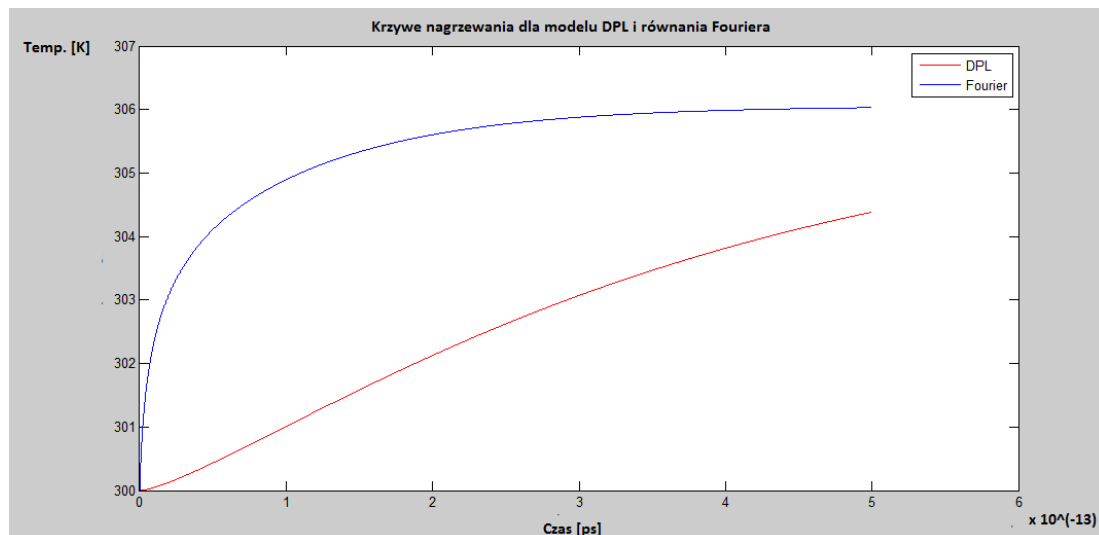
Rys. 2. Rozkład temperatury w tranzystorze po 0 ps – model DPL



Rys. 3. Rozkład temperatury w tranzystorze po 0 ps – model Fouriera



Rys. 4. Wykresy izoterm dla obu symulowanych modeli



Rys. 5. Krzywe nagrzewania w punkcie położonym blisko bramki:
 – model DPL, 2 – model Fouriera

5. Wnioski

Wartości temperatury otrzymane na podstawie równania Fouriera są wyższe w porównaniu z wartościami uzyskanymi na podstawie równania z dwoma czasami opóźnień. Nie należy stosować równania Fouriera do modelowania zjawisk zachodzących w skali mikro, ponieważ nie uwzględnia ono opóźnienia gradientu temperatury w stosunku do strumienia ciepła (i odwrotnie), co ma miejsce w obszarach, których wymiary wyrażone są w nanometrach.

W artykule przedstawiono uproszczony model tranzystora MOSFET. W dalszym etapie należy uwzględnić rzeczywistą geometrię tranzystora (model przestrzenny) oraz można rozszerzyć model na przypadek, kiedy w tranzystorze MOSFET znajduje się warstwa z dwutlenku krzemu, którego przewodność cieplna jest sto razy mniejsza niż krzemu [2]. Taka warstwa izolacyjna zmniejsza efektywną pojemność elektryczną w rejonie kanału i pozwala na zwiększenie prędkości pracy tranzystora.

Literatura

1. Tietze U., Schenk Ch., Układy półprzewodnikowe, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa (1993).
2. Ghazanfarian J., Somali Z., Investigation of dual-phase-lag heat conduction model in nanoscale metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 55, s. 6231-6237 (2012).
3. Majchrzak E., Mochnacki B., Metody numeryczne. Podstawy teoretyczne, aspekty praktyczne i algorytmy, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice (2004).

ANALIZA TERMICZNA UKŁADU TŁOK – KORBOWÓD ZA POMOCĄ MES

inż. SYLWESTER CIUKAJ

Automatyka i Robotyka, AB3, semestr III, 2 stopień

Opiekun naukowy: dr inż. Marek Paruch

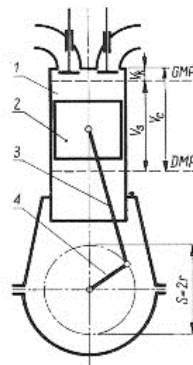
Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki symulacji numerycznej dotyczącej wyznaczenia rozkładu pola temperatury w układzie tłok-korbówód silnika spalinowego. Analizę przeprowadzono dla tłoka silnika spalinowego o pojemności skokowej 0 cm^3 firmy Meteor Minarelli oraz korbowodu standard Yamaha. Analiza numeryczna została wykonana za pomocą oprogramowania Ansys Workbench 4.



1. Wprowadzenie

Maszyny służące do przetwarzania dowolnej energii na pracę mechaniczną nazywamy silnikiem. Ze względu na rodzaj energii przetwarzanej rozróżniamy silniki cieplne, elektryczne, wodne, powietrzne itp. Najbardziej rozpowszechnione i znane są silniki cieplne, które przetwarzają energię cieplną otrzymaną w wyniku spalania paliw stałych, ciekłych lub gazowych w energię mechaniczną [1]. Silnik spalinowy przetwarza energię chemiczną, w postaci paliwa, na pracę mechaniczną. Zamiana tego typu energii polega na spalaniu paliwa w cylindrze roboczym. Podczas spalania tworzą się gazy o dużym ciśnieniu i temperaturze, rozprężając się przesuwają tłok w cylindrze tym samym wykonując pracę mechaniczną.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat mechanizmu korbowego silnika spalinowego z wyróżnionymi głównymi częściami: – cylinder, 2 – tłok, 3 – korbówód, 4 – wał korbowy.



Rys. 1. Schemat mechanizmu korbowego czterosuwowego silnika spalinowego [2]

2. Model matematyczny

Podstawowym równaniem opisującym przepływ ciepła jest równanie Fouriera [3, 4]:

$$X \in \Omega_e: c_e(T)\rho_e(T)\frac{\partial T_e(X,t)}{\partial t} = \text{div}[\lambda_e(T)\text{grad}T_e(X,t)] \quad (1)$$

gdzie X , t , T oznaczają odpowiednio współrzędne geometryczne, czas i temperaturę, λ jest współczynnikiem przewodzenia ciepła, c oznacza ciepło właściwe, ρ jest gęstością, natomiast $e=$, 2 oznaczają odpowiednio obszar tłoka i korbowodu.

Ponieważ w pracy analizę termiczną przeprowadzono dla stanu ustalonego równanie () przyjmuje postać

$$X \in \Omega_e : \operatorname{div}[\lambda_e \operatorname{grad} T_e(X)] = 0 \quad (2)$$

Równanie (2) zostało uzupełnione odpowiednimi warunkami brzegowymi (rys. 2). Na denku tłoka założono warunek brzegowy Dirichleta

$$X \in \Gamma_1 : T(X) = T_Z \quad (3)$$

gdzie temperatura T_Z jest temperaturą spalania mieszanki paliwowo-powietrznej w momencie zapłonu.

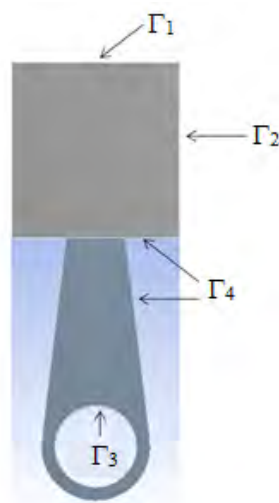
Na płaszczu tłoka Γ_2 oraz na powierzchni otworu stopy korbowodu Γ_3 założono warunek adiabatyyczny Neumanna

$$X \in \Gamma_{2,3} : q(X) = q_A = 0 \quad (4)$$

Na pozostałych powierzchniach (por. rysunek 2) został założony warunek brzegowy Robinia symulujący kontakt elementów układu z kąpielą olejową

$$X \in \Gamma_4 : q(X) = \alpha [T(X) - T_{ot}] \quad (5)$$

gdzie α [W/(m²K)] jest współczynnikiem wymiany ciepła, natomiast T_{ot} to temperatura otoczenia, czyli temperatura oleju.



Rys. 2. Warunki brzegowe

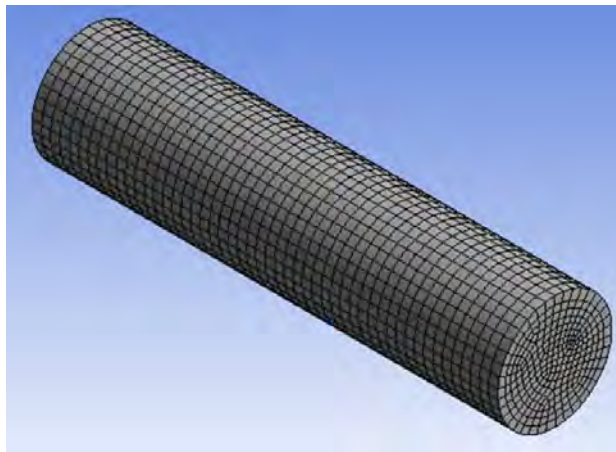
3. Wyniki symulacji numerycznych

Analizę przeprowadzono dla tłoka silnika spalinowego o pojemności skokowej 0 cm^3 firmy Meteor Minarelli oraz korbowodu standard Yamaha. Przyjęto, że na denko tłoka działa warunek I rodzaju z temperaturą równą 2000°C . Na płaszczu tłoka i otworu w korbowodzie przyjęto warunek II rodzaju, strumień ciepła $q_A=0$, na dolnej części tłoka oraz ściankach korbowodu założono warunek III rodzaju z temperaturą otoczenia równą 0°C i współczynnikiem wymiany ciepła $\alpha=$ [W/m²K]. Na materiał tłoka przyjęto stop aluminium ALSi 3M g CuNi o współczynniku przewodzenia ciepła $\lambda_1=200$ [W/mK], z kolei korbowód zostały wykonane ze stali węglowej o współczynniku przewodzenia ciepła $\lambda_2=58$ [W/mK].

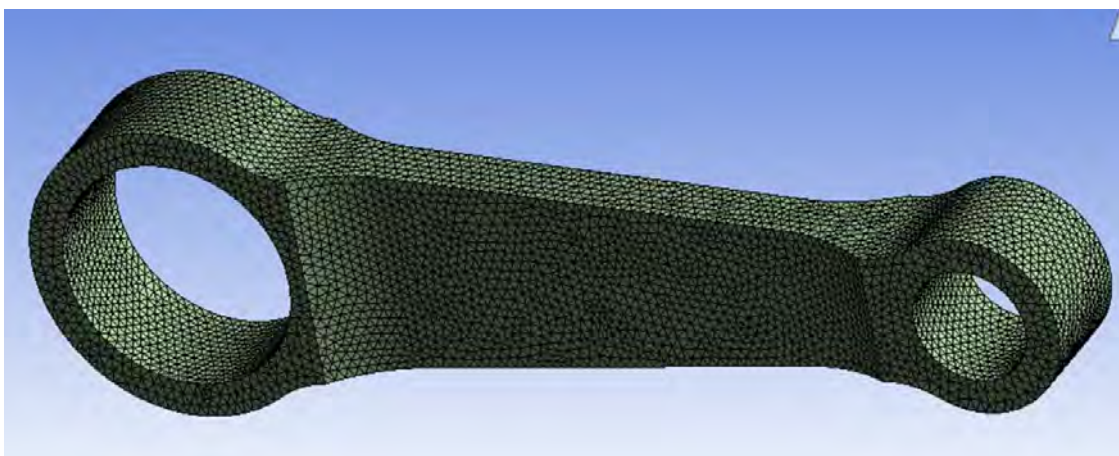
Na rysunkach 3, 4 i 5 przedstawiono siatkę elementów skończonych dla analizowanych elementów. Do dyskretyzacji zastosowano elementy tetragonalne czterowzłowe (tłok, korbowód) oraz heksagonalne ośmiowzłowe (sworzeń).



Rys. 3. Siatka tłoka

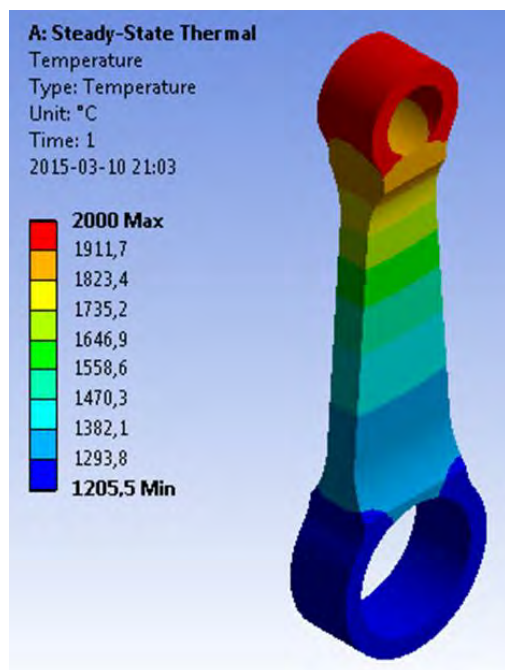


Rys. 4. Siatka sworznia

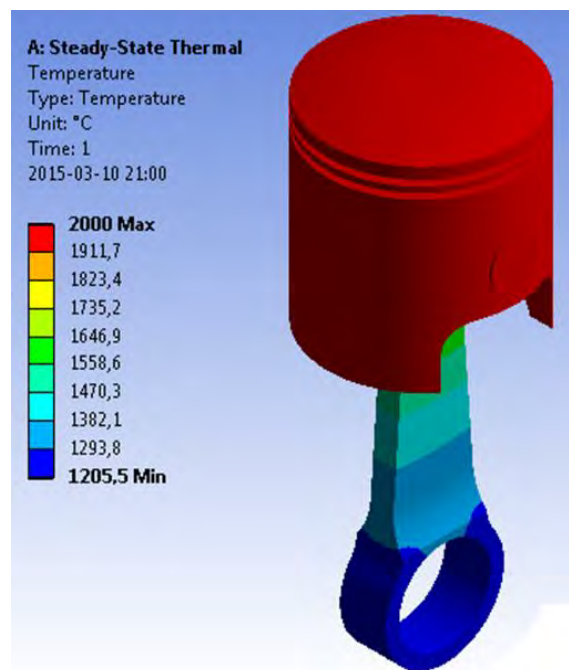


Rys. 5. Siatka korbowodu

Wyniki analizy numerycznej w postaci barwnych map obrazujących rozkład temperatur w układzie tłok – korbowód przedstawiono na rysunkach 6 i 7.



Rys. 6. Rozkład temperatury w korbowodzie



Rys. 7. Rozkład temperatury w układzie tłok-korbowód

4. Podsumowanie

Wyniki obliczeń numerycznych układu tłok-korbowód po przeprowadzeniu analizy termicznej w stanie ustalonym pozwalają jednoznacznie stwierdzić, że temperatura wynikająca ze spalania mieszanki paliwowo-powietrznej ma znaczący wpływ na cały analizowany układ. Ze względu na przyjęte warunki brzegowe oczywiste jest, że maksymalna temperatura pojawia się na denku tłoka, które najbardziej narażone jest na jej wpływ. Nie umniejsza to faktu, że pozostałe elementy układu również narażone są na działanie wysokiej temperatury. Wobec czego można wnioskować, że również elementy wału korbowego, bezpośrednio połączone z korbowodem za pomocą czopu, będą narażone na znaczące obciążenie termiczne. Na dalszym etapie prac zostanie przeprowadzona analiza wrażliwości ze względu na parametry termofizyczne występujące w modelu matematycznym, pozwalająca oszacować ich wpływ na rozkład pola temperatury

Literatura

1. Wardziński F., Samochodowe silniki spalinowe, WSiP, Warszawa (1988).
2. http://www.womkat.edu.pl/files/standaryzacja/grupa42/silniki%20spalinowe/budowa_silnika_spalinowego.html
3. Majchrzak E., Metoda elementów brzegowych w przepływie ciepła, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa (2001).
4. Kostowski E., Przepływ ciepła, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice (2006).

MODELOWANIE ROZKŁADU TEMPERATURY I FUNKCJI WRAŻLIWOŚCI W TKANCE BIOLOGICZNEJ

inż. ASTRID DEJA

Mechanika i Budowa Maszyn, MB4, semestr III, 2 stopień

Opiekun naukowy: dr inż. Grażyna Kałuża

Streszczenie. Przedmiotem pracy było wyznaczenie rozkładu temperatury i funkcji wrażliwości w numerycznym modelowaniu ustalonego przepływu ciepła. Do analizy wybrano tkankę biologiczną. W pracy rozpatrywano zadanie jednowymiarowe, jednowarstwowe. Następnie stosując podejście bezpośrednie przeprowadzono analizę wrażliwości kształtu rozpatrywanego obszaru. W końcowym etapie wykonano obliczenia numeryczne stosując Metodę Elementów Brzegowych i program narzędziowy *Mathcad 14*.



1. Wprowadzenie

Skóra jest powłoką zewnętrzną ciała. Jej powierzchnia u dorosłego człowieka osiąga ok. 1,7 [m²]. Zależnie od okolicy ciała posiada ona odmienną grubość i odporność. Skóra jest najcieńsza na powiekach, średniej grubości na przedniej powierzchni tułowia, na dłoniach i podeszwach jest z kolei najgrubsza. Skóra człowieka złożona jest z dwóch podstawowych warstw: naskórka oraz skóry właściwej [3].

Naskórek - warstwa zewnętrzna, zbudowana jest "z komórek nabłonka wielowarstwowego płaskiego rogowaciejącego". Grubość naskórka jest uzależniona od rodzaju pracy wykonywanej przez człowieka [3].

Skóra właściwa zbudowana jest z włókien tkanki łącznej zbitej nieukształtowanej, nadających jej odporność i elastyczność. W skórze właściwej umieszczona jest sieć naczyń krwionośnych oraz limfatycznych, a także zakończenia nerwów czuciowych.

Pod skórą właściwą znajduje się warstwa podskórna złożona z tkanki łącznej właściwej wiotkiej. Warstwa ta oficjalnie nie należy do skóry, jednakże pod względem anatomicznym i czynnościowym jest z nią bardzo związana [3].

W modelowaniu przepływu ciepła w tkance skórnej poddanej działaniu zewnętrznych źródeł ciepła przyjmuje się wiele uproszczeń związanych z jej budową. W niniejszej pracy przyjęto, iż przepływ ciepła w tkance skórnej jest ustalony, jednowarstwowy oraz jednowymiarowy.

2. Modelowanie przepływu ciepła w tkance biologicznej

Równanie Pennesa jest podstawowym równaniem opisującym transfer ciepła w tkance biologicznej [4], [], []. Równanie przepływu biociepła dla rozpatrywanego przypadku można przedstawić następująco:

$$L_0 < x < L_1 \quad \lambda \frac{d^2 T(x)}{dx^2} + k[T_B - T(x)] + Q_{met} = 0, \quad (1)$$

gdzie: λ [W (mK)] jest współczynnikiem przewodzenia tkanki, x [m] jest to współrzędna geometryczna, $T(x)$ [°C] jest temperaturą w punkcie x , T_B [°C] określa temperaturę krwi

w aorcie, natomiast Q_{met} [W/m³] jest składnikiem źródłowym związanym z przemianami metabolicznymi. W równaniu () współczynnik k [W/(m³K)] jest wartością stałą i wynosi $k = c_B G_B$, gdzie c_B [J/(m³K)] jest to ciepło właściwe krwi odniesione do jednostki objętości, G_B [(m³krwi/s)/(m³tkanki)] jest współczynnikiem perfuzji krwi.

Przepływ ciepła w obrębie tkanki biologicznej jest możliwy dzięki obecności naczyń krwionośnych, odpowiedzialnych za dostarczanie energii oraz procesy metaboliczne zachodzące w pewnych obszarach. Naczynia krwionośne uwzględnia się w równaniu () wprowadzając do niego składniki źródłowe związane z perfuzją krwi i przemianami metabolicznymi [4], [6].

Równanie () należy uzupełnić o warunki brzegowe przedstawione na rysunku 1:

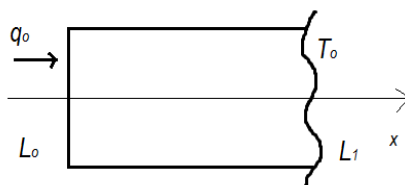
- na powierzchni zewnętrznej tkanki założono warunek brzegowy Neumanna

$$x = L_0 : \quad q(x) = -\lambda \frac{dT}{dx} = q_0, \quad (2)$$

- na powierzchni wewnętrznej tkanki założono warunek brzegowy Dirichleta

$$x = L_1 : \quad T(x) = T_b, \quad (3)$$

gdzie q_0 jest znaną stałą wartością strumienia ciepła, a T_b jest znaną wartością temperatury.



Rys. 1. Przyjęte warunki brzegowe

3. Analiza wrażliwości ze względu na grubość tkanki

Podczas modelowania procesów przepływu biociepła ważnym aspektem jest określenie wpływu zmienności parametrów występujących w opisie matematycznym na wyniki obliczeń. Ocena wpływu poszczególnych parametrów procesu na rozkład temperatury w tkance biologicznej jest możliwa dzięki analizie wrażliwości. Wykorzystując podejście bezpośrednie, wyznaczono zadanie dodatkowe otrzymane w wyniku różniczkowania równania () i warunków brzegowych (2), (3) opisujących proces, względem parametru geometrycznego $b = L_0$.

Zakładając, iż b jest parametrem kształtu oraz wykorzystując koncepcję pochodnej materialnej uzyskuje się [2], [4]:

$$\frac{DT}{Db} = \frac{dT}{db} + \frac{dT}{dx} v, \quad (4)$$

gdzie $v = v(x, b) = \frac{L_1 - x}{L_1 - L_0}$ jest prędkością zależną od parametru L_0 . W następnej kolejności należy wyznaczyć pochodną materialną funkcji dT/dx [4]:

$$\frac{D}{Db} \left(\frac{dT}{dx} \right) = \frac{d}{dx} \left(\frac{DT}{Db} \right) - \frac{dT}{dx} \frac{\partial v}{\partial x}, \quad (5)$$

oraz pochodną materialną funkcji d^2T/dx^2

$$\frac{D}{Db} \left(\frac{d^2 T}{dx^2} \right) = \frac{d^2}{dx^2} \left(\frac{DT}{Db} \right) - 2 \frac{dT}{dx^2} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{dT}{dx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad (6)$$

Po dokonaniu stosownych przekształceń problem dodatkowo związany z analizą wrażliwości ze względu na parametr L_0 przyjmuje następującą postać

$$\begin{cases} L_0 < x < L_1 & \lambda \frac{d^2 U(x)}{dx^2} - kU(x) - \frac{2}{L_1 - L_0} (kT_B - kT(x) + Q_{met}) = 0 \\ x = L_0 : & W(x) = -\frac{q_0}{L_1 - L_0} \\ x = L_1 : & U(x) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

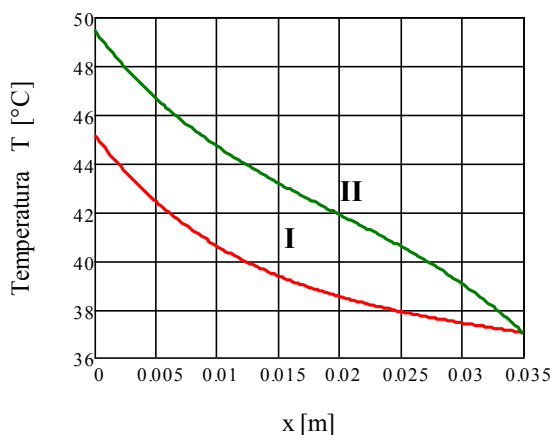
gdzie: $U(x) = DT/Db$ jest funkcją wrażliwości, natomiast $W(x) = -\lambda \frac{dU(x)}{dx}$. Problem podstawowy oraz dodatkowy rozwiązano stosując Metodę Elementów Brzegowych [1], [5].

4. Wyniki obliczeń

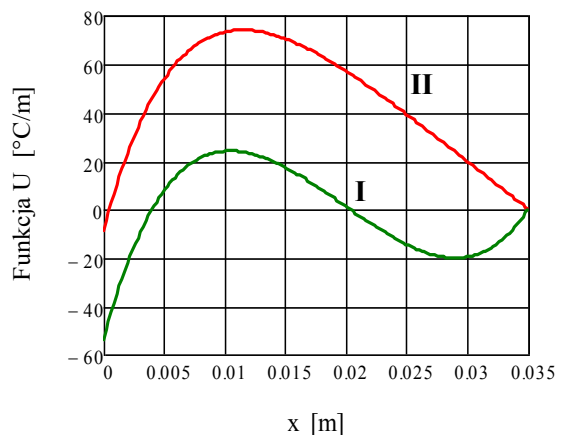
Analizie poddano obszar tkanki biologicznej o grubości $L = L_1 - L_0 = 0.035$ [m], współczynnika przewodzenia ciepła $\lambda = 0$. [W/(mK)], stałym współczynnikiem $k = 4995.25$ [W/m³K] oraz temperaturze krwi $T_B = 37$ [°C]. Rozpatrzono dwa przypadki, w I $Q_{met} = 245$ [W/m³] - spoczynek, natomiast w II $Q_{met} = 24500$ [W/m³] - wysiłek fizyczny.

W obu przypadkach przyjęto następujące warunki brzegowe: na powierzchni zewnętrznej tkanki $x = L_0 = 0$, założono warunek brzegowy II rodzaju $q_0 = 500$ [W/m²], na powierzchni wewnętrznej $x = L_1$, przyjęto warunek brzegowy I rodzaju $T_b = 3$ [°C] [4].

Na rysunku 2 przedstawiono rozkład temperatury w tkance biologicznej wyznaczony za pomocą algorytmu obliczonego w programie *Mathcad*. Rysunek 3 ilustruje rozkład funkcji wrażliwości $U(x)$ w tkance biologicznej dla $b = 0$.



Rys. 2. Rozkład temperatury $T(x)$



Rys. 3. Rozkład funkcji $U(x)$

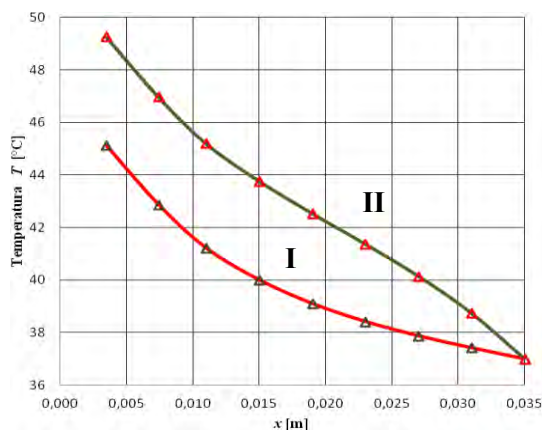
W ostatnim etapie analizy pokazano, jak zmiana parametru $b = L_0$ wpływa na rozwiązanie temperatury T . Korzystając z rozwinięcia funkcji $T(x)$ w szereg Taylora z dokładnością dwóch początkowych wyrazów mamy:

$$T(x, b + \Delta b) = T(x, b) + U(x, b) \Delta b \quad (8)$$

gdzie $\Delta b = 0.0035$ [m] oznacza przyrost parametru b .

Jak można zauważyć na podstawie obliczonych wartości funkcji wrażliwości $U(x,b)$ możemy określić zmianę temperatury związaną ze zmianą parametru od b do $b + \Delta b$.

Rysunek 4 przedstawia rozkład funkcji temperatury w tkance dla obliczeń bezpośrednich, czyli dla $L_0 = 0.0035$ [m] - linia ciągła, natomiast rozkład temperatury uzyskany za pomocą wzoru () przedstawiono symbolami (trójkąty).



Rys. 4. Rozkład temperatury $T(x, b + \Delta b)$

5. Wnioski

Znając podstawowy rozkład temperatury i stosując analizę wrażliwości możemy istotnie przyspieszyć realizację obliczeń numerycznych dotyczących przepływu ciepła przy różnych wymiarach geometrycznych tkanki biologicznej [4].

Metoda przedstawiona w niniejszej pracy może być stosowana w medycynie, w celu oszacowania wpływu strumienia ciepła, bądź temperatury na powierzchni naskórka na procesy uszkodzenia tkanki biologicznej.

Literatura

1. Burczyński T., Metoda elementów brzegowych w mechanice, WNT, Warszawa ().
2. Dems K., Sensitivity analysis in thermal problems - II: structure shape variation, Journal of Thermal Stresses, Vol. 10, s. 1-16, (1987).
3. Hoser P., Anatomia i fizjologia człowieka, Wydawnictwo WSiP, Warszawa ().
4. Kałuża G., Zastosowanie metod analizy wrażliwości w przepływie biociepła, Politechnika Śląska, Gliwice (200).
5. Majchrzak E., Metoda elementów brzegowych w przepływie ciepła, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa (200).
6. Majchrzak E., Mochnacki B., Szopa R., Metody numeryczne w zagadnieniach przepływu bio-ciepła, Annales Academiae Medicae Silesiensis, Suppl 2, s. 108-115, Katowice (1999).

WPLYW GEOMETRII NA STAN WYTEŻENIA W UKŁADZIE KOŚĆ-IMPLANT

inż. BARBARA DOMAGAŁA

Mechatronika, ME3, semestr III, 2 stopień

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



Streszczenie. W ramach pracy przejściowej został opracowany wstępny model numeryczny układu kość – implant (endoprotezy), który następnie po wprowadzeniu warunków brzegowych (podparcie oraz obciążenie w sposób zgodny z rzeczywistym działaniem stawu biodrowego) zostanie poddany analizie wytrzymałościowej. Celem analizy numerycznej będzie określenie wpływu geometrii na stan wyteżenia w modelu.

1. Wprowadzenie

W dzisiejszych czasach zabiegi alloplastyki (zwanej także egzoplastyką lub endoprotezoplastyką) stawu biodrowego, zniszczonego w wyniku choroby zwyrodnieniowej, stały się bardzo popularne. Całkowita wymiana stawu biodrowego stała się aktualnie jedną z najbardziej niezawodnych procedur medycznych. Spopularyzowanie tej metody leczenia zmieniło życie wielu pacjentów, umożliwiając im powrót do aktywnego życia oraz brak odczuwania bólu.

Zabieg alloplastyki jest zabiegiem operacyjnym, podczas którego następuje zastąpienie zniszczonego stawu. W tym celu chirurg ortopeda zastępuje uszkodzoną głowę kości udowej metalową lub ceramiczną kulą, która jest osadzona na trzpieniu, natomiast we wnętrzu panewki umieszczone jest wykonane z polietylenu lub metalu pokrytego polietylenem gniazdo panewki. Aktualnie coraz częściej endoprotezy wykonywane są z tytanu [] przy zachowaniu polietylenowej wyściółki.

2. Biomechaniczne aspekty alloplastyki stawu biodrowego

Obecnie produkowanych jest wiele rodzajów endoprotez. Ze względu na różne kryteria można podzielić je na poniższe grupy [2]. W każdym jednak przypadku należy pamiętać, że materiały z których wykonywane są dane podzespoły muszą być biokompatybilne.

1. Z uwagi na zasięg implantacji wyróżnia się:
 - endoprotezy połowiczne (częściowe),
 - endoprotezy całkowite.
2. Z uwagi na konstrukcję panewek wyróżnia się:
 - endoprotezy o panewkach jednolitych,
 - endoprotezy o panewkach modułowych (warstwowych).
3. Z uwagi na konstrukcję wyróżnia się:
 - endoprotezy jednolite (głowa spojona jest z trzpieniem),
 - endoprotezy dzielone (głowa osadzana jest na stożku ściętym trzpienia na zasadzie połączenia wciskowego).
4. W każdej z wyróżnionych grup można również wymienić:
 - endoprotezy z kołnierzem,
 - endoprotezy bez kołnierza.

5. Z uwagi na ustalenie w strukturach kostnych

- endoprotezy cementowe,
- endoprotezy bezcementowe.

Na odpowiednie działanie endoprotez, wpływ ma nie tylko rodzaj endoprotezy, jej mocowanie, ale również cechy konstrukcyjne [3]:

- krzywizna trzpienia (ma wpływ na wielkość przenoszonych obciążeń),
- przekrój poprzeczny trzpienia (ma wpływ na wielkość przenoszonych obciążeń oraz odporność struktury na przeciążenia),
- długość trzpienia (ma wpływ na wielkość przenoszonych obciążeń oraz odporność struktury na przeciążenia),
- średnica głowy endoprotezy (dobór odpowiednich parametrów zapewnia prawidłowy zakres ruchów),
- średnica panewki (zapewnia dobre dopasowanie z głową endoprotezy, co zapewnia prawidłowy zakres ruchów),
- kształt panewki (zapewnia prawidłowy zakres ruchów),
- obecność lub brak kołnierza,
- budowa geometryczna warstwy wierzchniej (przenoszenie obciążeń).

3. Materiały stosowane na endoprotezy

W przypadku całkowitej alloplastyki stawu biodrowego wprowadza się do organizmu trzy podstawowe elementy:

- trzpień endoprotezy – obecnie najczęściej używanym materiałem są stopy o osnowie kobaltu [3] (Cr-Co-Mo) lub stopy na bazie tytanu,
- główka stawu biodrowego – wytwarzana najczęściej jest z materiałów ceramicznych (np. korund - Al_2O_3 , cyrkon, ZrO_2),
- panewka – część zewnętrzna wykonywana jest ze stopów metali na bazie kobaltu bądź tytanu, natomiast część wewnętrzna wykonywana jest z polietylenu lub ceramiki.

Materiały, z których wykonywane są endoprotezy muszą spełniać szereg wymagań i charakteryzować się odpowiednimi własnościami, między innymi takimi jak:

- sprężystość,
- wytrzymałość zmęczeniowa,
- odporność na pękanie,
- zdolność do tłumienia drgań,
- odporność na ścieranie,
- biotolerancja,
- bioaktywność.

4. Model numeryczny

Model numeryczny układu kość-implant po zabiegu alloplastyki został opracowany na bazie programu Ansys oraz systemu Mimics umożliwiającego przetworzenie danych z tomografii komputerowej na geometrię modelu numerycznego.

Do budowy endoprotez użyto tradycyjnego modelowania CAD. Geometrię kości udowej zbudowano natomiast na podstawie danych tomograficznych. Symulację resekcji głowy kości udowej oraz właściwe umieszczenie endoprotezy przeprowadzono w środowisku CAD bazując na wytycznych zawartych w literaturze. Powstałe układy będą obciążane siłą działającą pionowo powodując powstanie maksymalnego momentu gnącego. Model kości

udowej obciążany będzie również siłą pochodzącą od reakcji mięśnia *gluteus medius*, którego wartość zostanie wyliczona w oparciu o model Pouwellsa.

Rozkład parametrów materiałowych dla tkanek kostnych uzyskano w oparciu o konwersję skali szarości zdjęć tomograficznych na wartości gęstości pozornej oraz te same na wartość modułu Younga E w systemie Mimics.

Otrzymywanie danych z badań wykonanych metodą tomografii komputerowej wiąże się z otrzymaniem obrazów w przekrojach kości o różnym poziomie szarości [4], które następnie muszą zostać poddane przekształceniom. W początkowych etapach na podstawie skali szarości należy wyznaczyć gęstość radiologiczną. Pierwsza zamiana polega na przyporządkowaniu odcienia szarości odpowiedniej wartości gęstości radiologicznej.

$$HU = K \frac{\mu_p - \mu_w}{\mu_w} \quad \text{albo} \quad HU = 1000 \frac{\mu_p - \mu_w}{\mu_w - \mu_a}, \quad (1)$$

gdzie:

K – stała wzmocnienia obrazu, charakterystyczna dla danego urządzenia (tomografu),

μ_p – wyznaczony współczynnik pochłaniania piksela,

μ_w – wyznaczony współczynnik pochłaniania wody (wartość odniesienia),

μ_a – wyznaczony współczynnik pochłaniania powietrza (wartość odniesienia).

Następnie na podstawie zależności między gęstością radiologiczną, a gęstością pozorną wyznacza się gęstości kości w poszczególnych obszarach uzyskanych z tomografii (2):

$$\rho = ,22HU + 4 \quad \text{lub} \quad \rho = 0,24HU + 3 . \quad (2)$$

Kolejnym krokiem jest wyznaczenie parametrów materiałowych kości na podstawie jej gęstości (3):

$$E = 0,02\rho^{1,75} \quad \text{lub} \quad E = ,2\rho - 170. \quad (3)$$

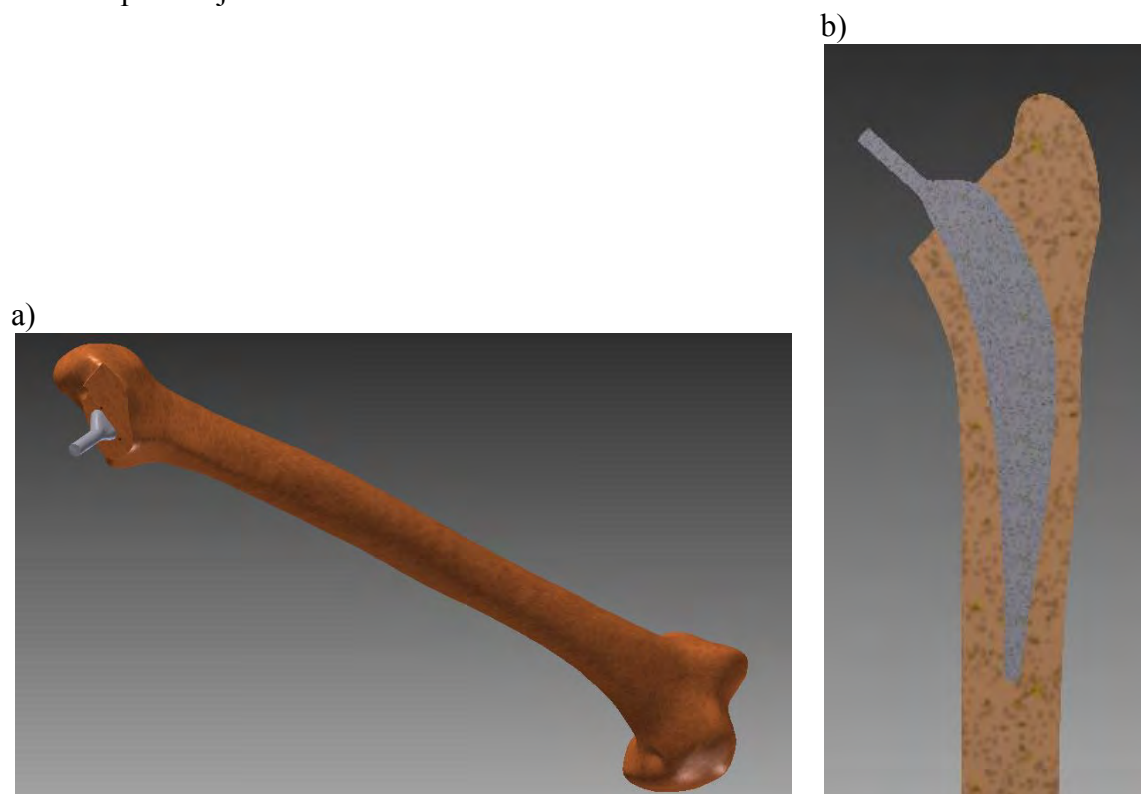
Kość zaliczana jest do tkanek anizotropowych, lepkosprężystych [4]. Tak specyficzna budowa kości warunkuje jej różną wytrzymałość w zależności od przyłożonego obciążenia. Poniższa tabela przedstawia podstawowe dane wytrzymałościowe kości.

Tabela . D ane materiałowe kości

	Kość beleczkowa	Kość korowa
Moduł Younga	1-200 MPa (nawet do 1000 MPa)	5000-25000 MPa
Współczynnik Poissona	0,4	0,3
Wytrzymałość na rozciąganie	4,63 MPa	107 MN/m ²
Wytrzymałość na ściskanie		159 MN/m ²
Wytrzymałość na zginanie		160 MN/m ²
Wytrzymałość na skręcanie		53 MN/m ²

Budując model numeryczny kości udowej w pierwszym etapie generuje się siatkę elementów powierzchniowych (2D) na bazie utworzonej geometrii a następnie otrzymane

wnętrze wypełnia się elementami skończonymi. Najczęściej są to elementy czworoboczne z liniową lub kwadratową funkcją kształtu. Na rysunku a) został przedstawiony układ kość-implant w widoku izometrycznym, natomiast na rysunku 1b) pokazano wyżej wymieniony układ w przekroju.



Rys. Model numeryczny układu kość-implant: a) całość, b) widok w przekroju

5. Podsumowanie

Opracowany model numeryczny jest wstępnym modelem, który będzie udoskonalany w toku dalszych prac. Ma służyć obliczeniom wytrzymałościowym układu kość-implant. Pokazuje on złożoność zagadnienia modelowania tego typu układów. Dzięki numerycznym analizom układów kość-implant można otrzymać szereg istotnych informacji. Wyniki analizy pozwalają określić rozkłady naprężeń, przemieszczeń oraz odkształceń w analizowanym układzie.

Literatura

1. źródło internetowe: http://www.poradnikzdrowie.pl/zdrowie/kregoslup/staw-biodrowy-kiedy-potrzebna-endoproteza_344.htm, dostęp: [12.2014]
2. Madej T., Modelowanie strefy ruchomej endoprotezy stawu biodrowego w aspekcie biomateriałów, Rozprawa doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Kraków (2008).
3. źródło internetowe: <http://student.agh.edu.pl/~kachat/endoprotezy.pdf>, dostęp: [12.12.2014]
4. John A., Modelowanie zmian osteoporotycznych i ocena ich skutków w kości miedniczej człowieka, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice (2013).

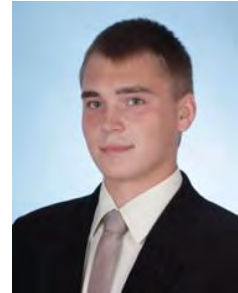
SZTYWNOŚĆ RESORU DWUDRĄŻKOWEGO W ZASTOSOWANIU DO POJAZDÓW GĄSIENICOWYCH

OLAF DUDEK

Mechanika i Budowa Maszyn, semestr VI, 1. stopień

Opiekunowie naukowci: dr inż. Grzegorz Działkiewicz, dr inż. Jacek Ptaszny

Streszczenie. Celem pracy było opracowanie modelu resoru dwudrążkowego, stosowanego w ciężkich pojazdach gąsienicowych, składającego się z układu dwóch jednocześnie zginanych i skręcanych prętów. Praca zawiera wyniki obliczeń analitycznych, porównane z wynikami analizy wykonanej metodą elementów skończonych (MES). Analizowano model prętowy ramy. Założono, że układ jest liniowosprężysty.

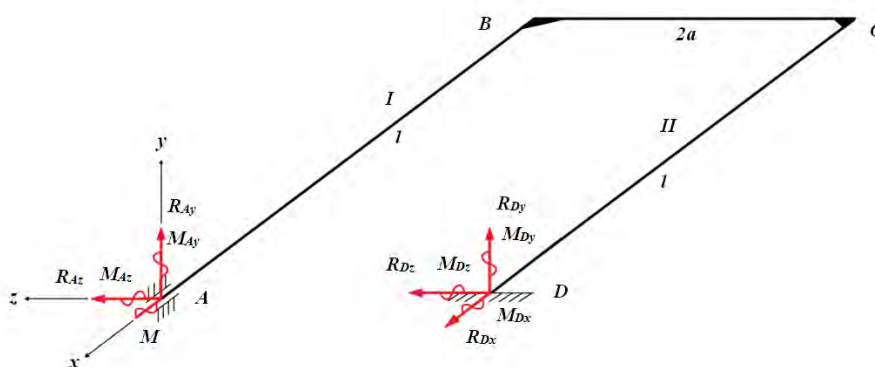


1. Wprowadzenie

Projektowanie zawiesznień pojazdów nie należy do łatwych zagadnień konstrukcyjnych i wiąże się z nim wiele trudności, również w kwestii obliczeniowej. Koniecznym zatem jest wykonanie poprawnego modelu matematycznego w celu analizy wytrzymałościowej układu zawieszenia. Resor dwudrążkowy stanowi ciekawą ideę konstrukcyjną z uwagi na jednoczesne zginanie i skręcanie drążków, wymuszane przez moment pochodzący od pracy koła nośnego. Zawieszenie pojazdu ma zapewnić odpowiedni komfort jazdy, który jednoznacznie wiąże się ze zmniejszeniem amplitudy drgań masy resorowanej, na którą ma wpływ sztywność zawieszenia [] .

2. Opis konstrukcyjny

Układ składa się z dwóch równoległe ułożonych drążków I i II, połączonych między sobą elementem sztywnym (między punktami B i C) (rys. 1). Na przeciwległym końcu znajduje się sztywno utwierdzony drugi drążek (punkt D) w kadłubie pojazdu, natomiast drążek pierwszy współpracuje bezpośrednio z łożyskowanym wahaczem (punkt A). Siła działająca na wahacz powoduje jego obrót i w efekcie skręcanie się drążka I. Równocześnie ze skręcaniem drążka I, następuje zginanie obu drążków oraz skręcanie drążka II.



Rys. 1. Model zawieszenia w postaci ramy przestrzennej

3. Model matematyczny

Układ zawieszenia przedstawiono jako ramę przestrzenną, gdzie drążki są reprezentowane przez pręty o kołowym przekroju. Układ równań równowagi jest 2-krotnie statycznie niewyznaczalny, więc występujące reakcje hiperstatyczne obliczono metodą energetyczną przy wykorzystaniu twierdzenia Menabrei - Castigliana. Duża część reakcji podporowych była równa zero, za wyjątkiem M_{Dx} , M_{Az} , M_{Dz} , R_{Dy} , R_{Ay} . W wyrażeniach określających wielkość reakcji występują następujące parametry: a – połowa długości elementu sztywnego, d – średnica drążka, l – długość drążka, M – moment pochodzący od wahacza, E – moduł Younga materiału, G – moduł Kirchhoffa materiału [3].

$$M_{Dx} = \frac{24 \cdot E \cdot I_z \cdot M \cdot a^2}{24 \cdot E \cdot I_z \cdot a^2 + G \cdot I_o \cdot l^2} - M, \quad (1)$$

$$R_{Dy} = \frac{-12 \cdot E \cdot I_z \cdot M \cdot a}{24 \cdot E \cdot I_z \cdot a^2 + G \cdot I_o \cdot l^2}, \quad (2)$$

$$R_{Ay} = \frac{12 \cdot E \cdot I_z \cdot M \cdot a}{24 \cdot E \cdot I_z \cdot a^2 + G \cdot I_o \cdot l^2}, \quad (3)$$

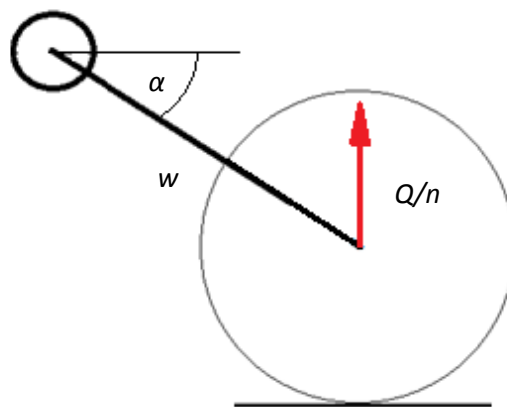
$$M_{Az} = \frac{6 \cdot E \cdot I_z \cdot M \cdot a \cdot l}{24 \cdot E \cdot I_z \cdot a^2 + G \cdot I_o \cdot l^2}, \quad (4)$$

$$M_{Dz} = -\frac{6 \cdot E \cdot I_z \cdot M \cdot a \cdot l}{24 \cdot E \cdot I_z \cdot a^2 + G \cdot I_o \cdot l^2}, \quad (5)$$

gdzie $I_o = \frac{\pi \cdot d^4}{32}$ oraz $I_z = \frac{\pi \cdot d^4}{64}$.

Wartość momentu M jest zależna od kąta pochylenia wahacza, przedstawionego na rys. 2. Dla uproszczenia obliczeń przyjęto sytuację postoju pojazdu, na płaskiej, poziomej nawierzchni, z równomiernym obciążeniem kół nośnych. Siła działająca na koło, na ramieniu wahacza w , jest równa sile ciężkości całego pojazdu Q podzielonej przez liczbę kół n , a kąt nachylenia α wynosi 0 [1]:

$$M = w \frac{Q}{n} \cos \alpha. \quad (6)$$



Rys. 2. Schemat obciążenia wahacza

Stosując twierdzenie Castigliana wyznaczono kąty obrotu przekrojów φ_B i φ_C drążków, odpowiednio w punktach B i C:

$$\varphi_B = \frac{M \cdot l}{G \cdot I_o}, \quad (7)$$

$$\varphi_C = -\frac{l \cdot (M - 2 \cdot R_{Ay} \cdot a)}{G \cdot I_o}. \quad (8)$$

Wyznaczone kąty zostaną użyte do porównania wyników z wynikami uzyskanymi metodą elementów skończonych.

4. Sztywność układu

Sztywność resoru można określić jako stosunek siły uogólnionej powodującej odpowiednie przemieszczenie uogólnione do tego przemieszczenia. W przypadku resora dwudrażkowego sztywność całego układu jest to sztywność skrętna, wyrażona stosunkiem momentu pochodzącego od wahacza koła nośnego do kąta skręcenia w badanym punkcie.

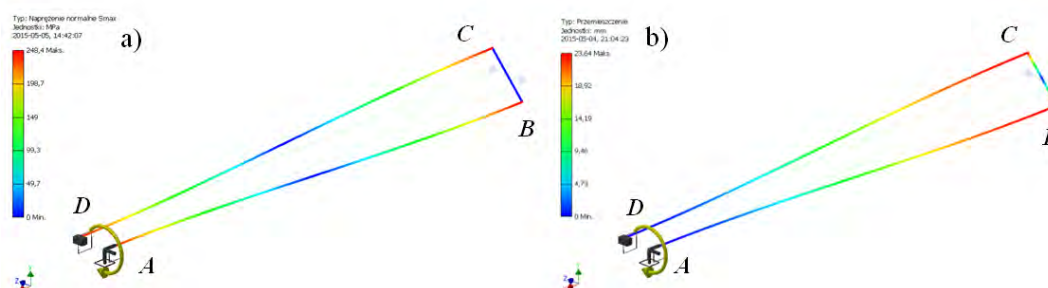
$$K_s = \left| \frac{M}{\varphi_A} \right|, \quad (9)$$

gdzie φ_A to całkowity kąt obrotu przekroju pręta w punkcie A. Wartość tego kąta została obliczona za pomocą twierdzenia Castigliana, i wynosi ona:

$$\varphi_A = \frac{-M \cdot l^3}{24 \cdot E \cdot I_z \cdot a^2 + G \cdot I_o \cdot l^2}. \quad (10)$$

5. Analiza metodą elementów skończonych

Wykonanie modelu prętowego wymagało określenia materiału oraz wymiarów układu. Posłużono się wymiarami resora dwudrażkowego zastosowanego do 4 –tonowego pojazdu bojowego PzKpfw V Panther. Na potrzeby porównania wyników, jako materiał przyjęto stal sprężynową OHS o $R_e=1180$ MPa, $E=210$ GPa, $G=80$ GPa. Parametry zawieszenia wynoszą: $w=0,42$ m, $l=1,69$ m, $a=0,06$ m, $d=0,05$ m.



Rys. 3. a) Rozkład naprężeń normalnych dla modelu prętowego,
b) Rozkład przemieszczeń w modelu prętowym

Na potrzeby analizy MES, każdy z prętów został podzielony na 100 równych elementów skończonych. W punkcie A został przyłożony moment $M = 11810$ Nm oraz zastosowano podpory z jednym stopniem swobody, z możliwością obrotu wokół osi x . W punkcie D zastosowano utwierdzenie sztywne [2].

W tabeli zostały przedstawione wyniki uzyskane metodą analityczną oraz wyniki analizy MES (Rys. 3).

Tabela . Zestawienie wyników obliczeń.

Wielkość	Obliczenia analityczne	Analiza MES modelu prętowego
M_{Dx} [Nm]	- 11690	- 11117
R_{Dy} [N]	- 3758	- 3688
R_{Ay} [N]	3758	3688
M_{Az} [Nm]	- 3176	- 3116
M_{Dz} [Nm]	3176	3116
φ_A [rad]	0,798	0,890
φ_B [rad]	0,407	0,445
φ_C [rad]	-0,391	-0,445
K_s [Nm/rad]	14799	13270

6. Podsumowanie

Wyniki analizy MES są zbliżone do wyników wykonanych analitycznie. Ich podobieństwo wskazuje na poprawność modelu obliczeniowego i może służyć do projektowania resorów podobnego typu.

Uzyskane różnice wynikają z różnego traktowania elementu sztywnego, mimo tego, że oba modele są liniowe. W obliczeniach analitycznych element traktowany jako idealnie sztywny. W analizie MES, z uwagi na wielokrotnie większe pole przekroju poprzecznego, element sztywny posiadał o wiele większą sztywność od pozostałych prętów. Innym powodem rozbieżności wyników są duże wartości kątów skręcenia drążków, co wskazuje na konieczność wykonania analizy nieliniowej.

Opracowany model prętowy MES może zostać użyty do określenia charakterystyki resoru w zakresie dużych przemieszczeń, odpowiadających rzeczywistym warunkom pracy pojazdu. Wymaga to wykonania analizy nieliniowej.

Literatura

1. Burdziński Z., Teoria ruchu pojazdu gąsienicowego, WKŁ, Warszawa (2) .
2. Bąk R., Burczyński T., Wytrzymałość materiałów z elementami ujęcia komputerowego, WNT, Warszawa (2001).
3. Banasiak M., Grossman K., Trombski M., Zbiór zadań z wytrzymałości materiałów, PWN, Warszawa (1998).

ANALIZA ZJAWISKA PĘKANIA DYSKÓW W ZAWORZE RV

inż. PAWEŁ ELBIN

Mechanika i Budowa Maszyn, MB4, semestr III, 2 stopień

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



Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań numerycznych powstałych na bazie wyników badań eksperymentalnych dysków w zaworze RV. Celem badań była analiza wpływu orientacji, ilości oraz grubości elementów (dysków) na otrzymywane w złożeniu naprężenia oraz ugięcie. W artykule omówiono zjawisko kontaktu oraz wpływ siatki na wyniki obliczeń.

1. Wprowadzenie

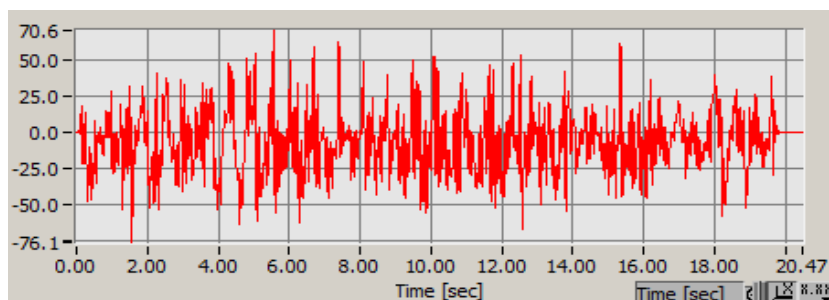
Zawór w amortyzatorze to kluczowy element, od którego zależy charakterystyka pracy całego amortyzatora, jego trwałość, jak i zawirowania ośrodka w samym amortyzatorze. Wadliwie zaprojektowany zawór może nasilać zjawisko spieniania oraz kawitacji oleju, w znaczny sposób pogarszając jego pracę. Ekstremalne przypadki, jakimi są zniszczenie któregoś z elementów zaworu, prowadzą do trwałego upośledzenia pracy amortyzatora w pewnym jego zakresie pracy oraz szybszego zużycia pozostałych części. Pożądaną charakterystykę tłumienia można uzyskać z wielu kombinacji dysków. Ze względu na negatywne skutki uszkodzenia elementu zaworu do produkcji wdraża się możliwie tanie złożenia, spełniające założenia testu zmęczeniowego.

2. Badania doświadczalne

Prototypowy zawór poddawany jest serii testów, m. in. badaniom na maszynie przepływowej oraz stanowisku symulującym oczekiwaną charakterystykę pracy. Maszyna przepływowa pozwala określić charakterystykę tłumienia w zależności od prędkości i parametrów cieczy oraz umożliwia odrzucenie zbudowanych w sposób oczywiście nieodpowiedni zaworów. Złożenia, których charakterystyka okazała się wystarczająca na potrzeby klienta, poddawane są symulacji pracy. Realizowane jest to poprzez zamontowanie testowego amortyzatora w maszynie oraz zadanie sygnału wejściowego, pod postacią przemieszczeń tłoka w czasie trwania testu (rys.).

Kryteria zaliczenia testu zmęczeniowego uzależnione są od wymaganego czasu pracy, stopnia zagrożenia itp. Zwyczajowo zakłada się dopuszczalne spadki sił tłumienia po pewnej ilości cykli oraz brak ewentualnych uszkodzeń. W przypadku złożenia, będącego przyczyną powstania tej pracy, zaobserwowano mechanizmy zniszczenia elementów złożenia, jak na rys. 2 oraz wynikające z nich spadki sił tłumienia.

Czas trwania badania pojedynczego złożenia wynosi około 2 godzin. Ze względu na wiele możliwych rozwiązań problemu, zdecydowano się na przeprowadzenie analizy numerycznej zagadnienia, umożliwiającej ograniczenie ilości złożzeń przeznaczonych do przebadania.



Rys. 1. Sygnał wejściowy testu



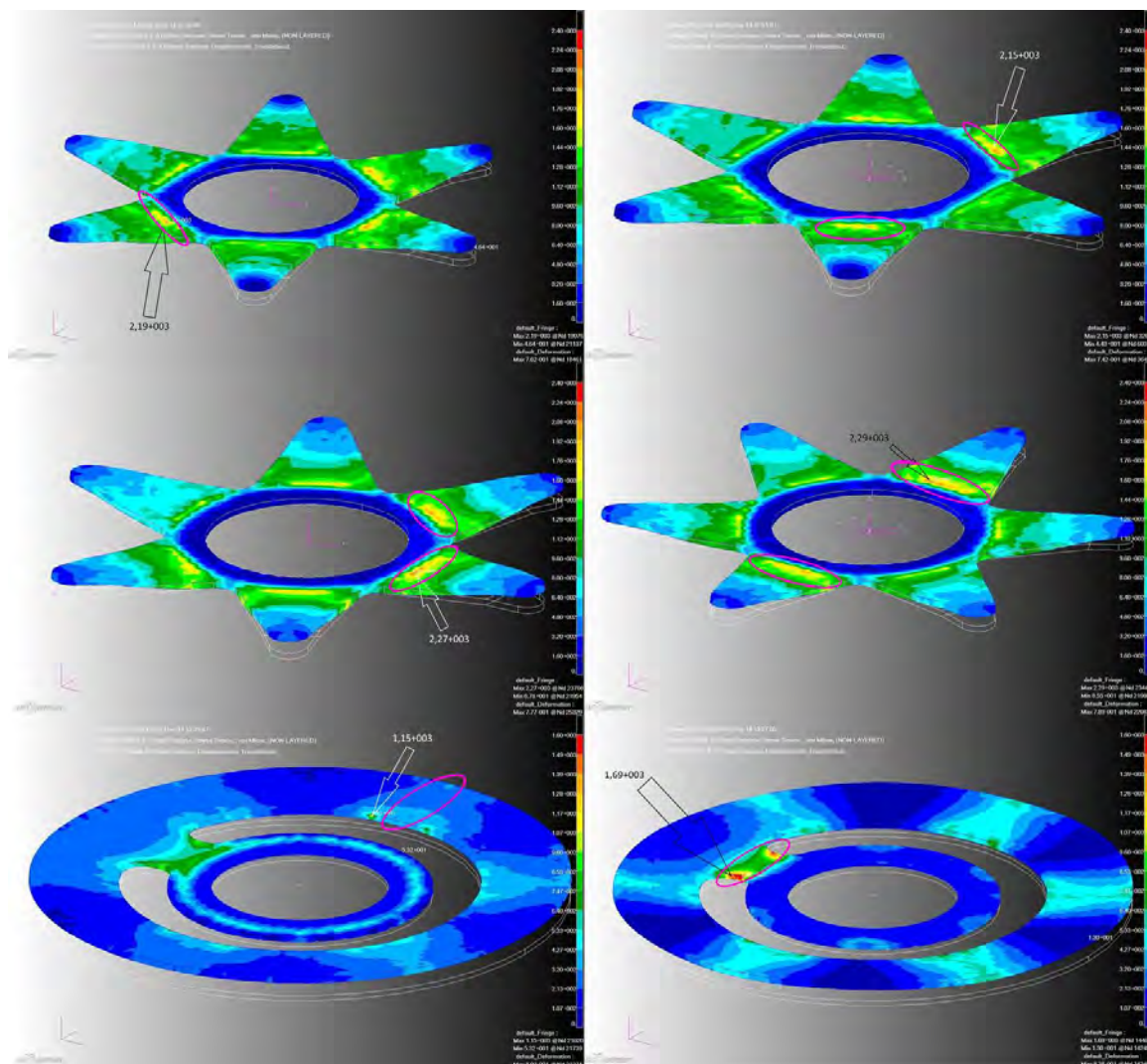
Rys. 2. Przykładowe postacie pęknięcia elementów

3. Zjawisko kontaktu

Kluczowym aspektem w przypadku tej analizy było prawidłowe ustalenie kontaktu między poszczególnymi częściami. Znakomita większość programów, służących do dokonywania analiz metodą elementów skończonych, umożliwia modelowanie kontaktu na wiele dostępnych sposobów. Najpopularniejszymi spośród nich są kontakt typu *glue* oraz *kontakt analityczny*. Różnią się one od siebie w zasadniczy sposób. Kontakt typu *glue* preferowany jest w przypadku zgrubnych siatek kilku elementów o niskiej zgodności. Powoduje on zablokowanie pozycji sąsiadujących węzłów w obszarze styku, uniemożliwiając w ten sposób wzajemne przemieszczanie elementów. Upraszcza to w znaczny sposób obliczenia związane z kontaktem, lecz w bardzo niekorzystny sposób wpływa na zachowanie elementów oraz wyniki numeryczne. Kontakt *analityczny*, nie posiada wad kontaktu typu *glue*. Umożliwia on wzajemne przesuwanie się części, dzięki czemu zachowują się one w sposób rzeczywisty. Ponadto, ustawienie to umożliwia poszukiwanie kontaktów w dalszych iteracjach analizy. Szczególnie istotne jest to w przypadku, gdy badane elementy nie stykają się ze sobą bezpośrednio, lecz znajdują się w pewnej odległości od siebie. Metoda ta cechuje się szczególną wrażliwością na rozmiar elementu oraz zgodność siatki. W przypadku nieodpowiednio dobranych parametrów można zaobserwować zjawisko penetracji – nieuzasadnionego przenikania elementów. W skrajnie niekorzystnym przypadku, kontakt może nie zostać wyznaczony, bądź zostać policzony niepoprawnie.

4. Analiza

Analizie numerycznej w programie MSC.Nastran Patran poddanych zostało 4 złożeń pod postacią różnych kombinacji ułożenia, liczby oraz grubości 3 elementów – *intake disc*, *intake spring* oraz *support washer*. Znalazło to swoje odzwierciedlenie w wynikach pod postacią map naprężeń oraz przemieszczeń. Dla tych samych warunków brzegowych – tzn. obciążeń oraz utwierdzeń otrzymano różne wyniki naprężeń oraz przemieszczeń. Miejsca, w których kumulują się najwyższe wartości naprężeń uznawane są za te, w których potencjalnie dojdzie do pęknięcia. Na wskutek przeprowadzonych analiz odtworzono wszystkie mechanizmy zniszczeń zaobserwowane podczas badań laboratoryjnych, oraz odkryto nowe, potencjalne przypadki, mogące wystąpić przy kolejnych próbach (rys. 3).



Rys. 3. Mechanizmy pęknięcia elementów

Spośród dokonanych analiz wytypowano te złożenia, w których naprężenia osiągały najniższą wartość (tab.). Są one kandydatami do badań laboratoryjnych, gdyż według obliczeń MES roszą największe szanse na sprostanie pełnemu procesowi badań. Ponadto, przeprowadzone analizy umożliwiają, z pewną dozą niepewności, określenie wpływu orientacji elementu na powstające naprężenia.

Tabela . Przykładowe wyniki analiz numerycznych

Wynik na podstawie naprężeń intake spring		
l.p.	nazwa	naprężenie [GPa]
1.	sim7_2	1,89
2.	sim7_1	1,95
3.	sim6_2	1,96
4.	sim5_4	2,07
5.	sim4_2	2,09
6.	sim6_1	2,1
7.	sim1	2,13
8.	sim4_1	2,14
9.	sim3_1	2,15
10.	sim3_2	2,15
11.	sim2	2,19
12.	sim5_1	2,2
13.	sim5_2	2,27
14.	sim5_3	2,29

Wynik na podstawie naprężeń intake disc		
l.p.	nazwa	naprężenie [GPa]
1.	sim3_1	0,874
2.	sim3_2	1,03
3.	sim5_2	1,03
4.	sim4_2	1,12
5.	sim1	1,14
6.	sim5_1	1,15
7.	sim2	1,19
8.	sim4_1	1,24
9.	sim5_4	1,29
10.	sim5_3	1,3
11.	sim7_2	1,38
12.	sim6_2	1,4
13.	sim6_1	1,6
14.	sim7_1	1,69

Wynik na podstawie naprężeń intake disc		
l.p.	nazwa	naprężenie [GPa]
1.	sim3_1	0,83
2.	sim3_2	0,929
3.	sim5_2	0,993
4.	sim5_1	0,995
5.	sim4_1	1,15
6.	sim4_2	1,28
7.	sim5_3	1,37
8.	sim5_4	1,44
9.	sim1	-
10.	sim2	-
11.	sim6_1	-
12.	sim6_2	-
13.	sim7_1	-
14.	sim7_2	-

5. Wnioski

W trakcie analizy wyników symulacji numerycznych zaobserwowane zostały wszystkie mechanizmy pęknięcia elementów, wraz z dwoma potencjalnymi, które nie wystąpiły podczas prób zmęczeniowych

Dokładność obliczeń przeprowadzonych system MSC.Software w wersji studenckiej, z punktu widzenia analizy dla przemysłu, jest zbyt niska, aby móc wyciągać definitywne wnioski.

Przeprowadzanie szczegółowych analiz MES nie jest w tym konkretnym przypadku uzasadnione finansowo, zarówno ze względu na niski koszt badanych podzespołów (kilkanaście eurocentów) jak i znaczny stopień skomplikowania zadania pod względem obliczeniowym.

Uzyskane wyniki numeryczne zdają się być zawyżone o co najmniej rząd wielkości. Jako przyczyny tego stanu rzeczy należy uwzględnić: niedopasowanie typu elementu do rodzaju analizy; zbyt mała ilość elementów, założenie sił większych niż w rzeczywistym układzie.

Literatura

1. Reimpell J., Betzler J., Podstawy konstrukcji podwozia samochodów, WKŁ, Warszawa, (2014).
2. Dokumentacja techniczna zaworów RV oraz materiały poglądowe.
3. Sikorski J., Amortyzatory pojazdów samochodowych. Budowa, badania, naprawa, Wyd. 3 poprawione i uzupełnione, WKŁ, Warszawa, (1984).
4. Krótki przewodnik po elementach skończonych, strona internetowa www.cae.info.pl, <http://www.cae.info.pl/artykuly/KrotkiPrzewodnik.pdf>, [dostęp .0 .20] .

BADANIE WPLYWU PARAMETRÓW LASERA NA NAGRZEWANIE CIENKICH WARSTW METALOWYCH

inż. JAKUB GIOŁBAS

Mechanika i Budowa Maszyn, MB4, semestr III, 2 stopień

Opiekun naukowy: dr inż. Jolanta Dziatkiewicz

Streszczenie. Artykuł dotyczy badania wpływu parametrów lasera na nagrzewanie cienkich warstw metalowych. Porównano dwa modele matematyczne opisujące przepływ ciepła – model Fouriera i model z dwoma czasami opóźnień. Obliczenia przeprowadzono dla stanu nieustalonego, stosując metodę różnic skończonych. W artykule zawarto informacje o nagrzewaniu się materiałów i o przepływie ciepła, zaprezentowano wykorzystane prawa fizyczne oraz uzyskane przebiegi czasowe temperatur, jak również przedstawiono wnioski z badań.



1. Wprowadzenie

Laser jest urządzeniem emitującym promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu częstotliwości optycznych (od ultrafioletu do podczerwieni). Jego nazwa jest akronimem od wyrażenia Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, co można przetłumaczyć jako wzmocnienie światła przez wymuszoną emisję promieniowania.

Podstawowe cechy i właściwości promieniowania laserowego [1][2]:

- wiązka emitowana jest w jednym określonym kierunku; kąt rozbieżności wiązki jest mały, wynosi kilka mrad,
- długość fali promieniowania laserowego wynosi od ok. 0 nm do ponad 1 mm,
- lasery mają możliwość pracy ciągłej i impulsowej; dla pracy impulsowej uzyskuje się większą gęstość mocy promieniowania,
- można uzyskać plamkę o małej średnicy (0 do 300 μm) i zwiększonej gęstości mocy poprzez stosowanie ogniskowania prostym układem optycznym.

W ramach pracy zbadano różnicę między temperaturami obliczonymi wg prawa Fouriera i modelu z dwoma czasami opóźnień. Sprawdzone także jaki wpływ na uzyskiwane wartości temperatur ma zmiana czasu trwania impulsu laserowego t_p z początkowej wartości 0,1 ps na 0,2 ps i 0, ps i zmiana intensywności lasera I_0 z początkowej wartości 30 J/m^2 na 15 J/m^2 i 60 J/m^2 . Obliczenia zostały wykonane na podstawie różniczkowych równań nieustalonego przewodzenia ciepła w ciałach stałych z objętościowym wewnętrznym źródłem ciepła.

2. Nagrzewanie materiałów za pomocą promieniowania laserowego

Lasery mogą służyć nie tylko jako źródło spójnej i monochromatycznej wiązki świetlnej, ale mogą również być źródłem ciepła o dużej gęstości mocy, wykorzystywanym np. do mikroobróbki cieplnej lub spawania cienkich blach.

Wpływ promieniowania laserowego na materiał można opisać modelem cieplnym, który obejmuje trzy etapy:

- absorpcję fotonów promieniowania przez powierzchnię materiału poddawanego działaniu lasera, przemianę energii fotonów w ciepło,
- nagrzewanie materiału do zakresu pożądaney temperatury,

- chłodzenie nagrzewanych obszarów materiału poprzez przewodnictwo ciepła do otaczających je „zimnych” części ciała [] .

3. Modele matematyczne przedstawiające oddziaływania lasera

W pracy zostały wykorzystane dwa modele matematyczne opisujące wpływ lasera na nagrzewanie cienkich warstw metalowych – model Fouriera i model z dwoma czasami opóźnień (Dual Phase Lag).

Prawo Fouriera zakłada, że gęstość przewodzonego strumienia ciepła jest wprost proporcjonalna do gradientu temperatury:

$$q = -\lambda \nabla T, \quad (1)$$

gdzie λ – współczynnik przewodzenia ciepła [W (mK)], ∇ - operator Hamiltona.

Strumień ciepła skierowany jest zgodnie ze spadkiem temperatury. Spadek ten jest największy w kierunku prostopadłym do powierzchni izotermicznych, a opisuje go wspomniany wyżej gradient temperatury.

Dla zagadnienia jednowymiarowego, równanie różniczkowe Fouriera nieustalonego przewodzenia ciepła w ciałach stałych z objętościowym wewnętrznym źródłem ciepła to:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{Q}{cp}, \quad (2)$$

gdzie $a = \lambda (\rho c)$ – dyfuzyjność termiczna [$\text{m}^2 \text{s}$], ρ – gęstość materiału [kg m^3], c – pojemność cieplna materiału [$\text{J (m}^3\text{K)}$], Q – objętościowe wewnętrzne źródło ciepła [W m^3].

W pewnych sytuacjach prawo Fouriera niedokładnie opisuje zjawisko przepływu ciepła. Ma to miejsce, gdy oddziaływanie lasera na materiał jest bardzo krótkim impulsem, o czasie trwania rzędu od 0^{-15} s do 10^{-9} s, a ponadto grubość nagrzewanej warstwy jest bardzo mała. W takim przypadku przepływ ciepła jest procesem nierównowagowym z punktu widzenia dziedziny czasu i przestrzeni.

Jednym z modeli opisującym wzajemną relację strumienia ciepła i gradientu temperatury jest tzw. model z dwoma czasami opóźnień (z ang. Dual Phase Lag Model). Jego podstawowym założeniem jest istnienie dwóch czasów opóźnień: τ_q i τ_T – odpowiednio czasu relaksacji i czasu termalizacji.

Czas relaksacji τ_q jest czasem opóźnienia powstania strumienia ciepła po przyłożeniu do badanej próbki gradientu temperatury. Z drugiej strony jest też czasem, po którym znika strumień ciepła, po usunięciu gradientu temperatury. Jest to czas powrotu do stanu równowagi. Czas termalizacji τ_T jest czasem opóźnienia wystąpienia gradientu temperatury w odniesieniu do strumienia ciepła.

W modelu Dual-Phase-Lag do współrzędnych czasu dodaje się wspomniane wyżej czasy relaksacji i termalizacji i prawo Fouriera zastępuje się równaniem

$$q(x, t + \tau_q) = -\lambda \frac{\partial T(x, t + \tau_T)}{\partial x}, \quad (3)$$

Dla zagadnienia jednowymiarowego, równanie różniczkowe nieustalonego przepływu ciepła w ciałach stałych z objętościowym wewnętrznym źródłem ciepła wg modelu z dwoma czasami opóźnień ma postać:

$$c \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \tau_q \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \right) = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \tau_T \lambda \frac{\partial \nabla^2 T}{\partial t} + Q + \tau_q \frac{\partial Q}{\partial t}, \quad (4)$$

Równanie Fouriera oraz równanie z dwoma czasami opóźnień zostały rozwiązane za pomocą metody różnic skończonych. W metodzie tej zjawisko nagrzewania się materiału dyskretyzowane jest na elementarne części o rozmiarach równym krokom dyskretyzacji. Dla nieustalonego przepływu ciepła dokonuje się dyskretyzacji obszaru i czasu. W metodzie

różnic skończonych pochodne cząstkowe występujące we wzorach zastępowane są odpowiednimi ilorazami różnicowymi. W obliczeniach wykorzystana została metoda różnicowa jawna (Eulera) [3][4].

4. Sformułowanie zadania i analiza wyników

Badane było nagrzewanie się cienkiej warstwy wykonanej ze złota o grubości $L=100$ nm, która została poddana działaniu impulsowego promieniowania laserowego. Zastosowano siatkę różnicową o 0 węzłach o stałym kroku $h = 1$ nm.

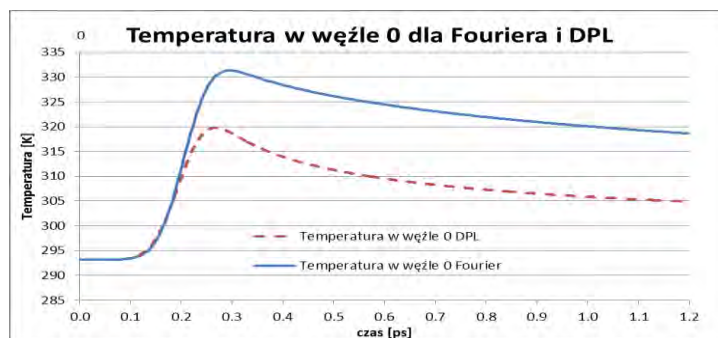
Dla obu analizowanych modeli warunkiem początkowym była stała temperatura równa 20°C . Ze względu na krótki czas nagrzewania, straty ciepła na brzegach obszaru można pominąć, zatem warunki brzegowe na obydwu brzegach mają postać $q = 0$ [W/m^2].

Wydajność objętościowego wewnętrznego źródła ciepła $Q(x,t)$ ma postać:

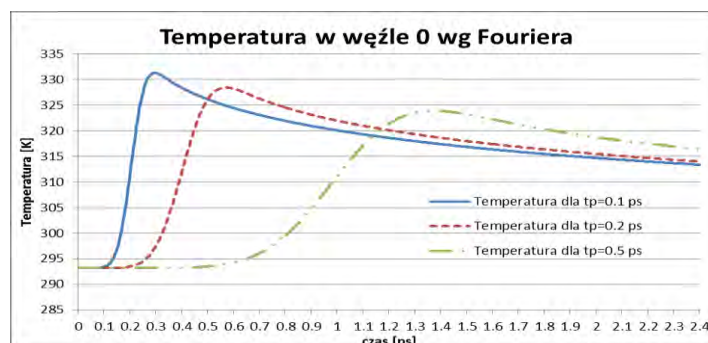
$$Q(x,t) = \sqrt{\frac{\beta}{\pi}} \cdot \frac{1-R}{t_p \delta} \cdot I_0 \cdot \exp\left(-\frac{x}{\delta} - \beta \frac{(t-2t_p)^2}{t_p^2}\right), \quad (5)$$

gdzie $\beta = 4\ln 2$, R – współczynnik odbicia materiału, t_p – czas trwania impulsu laserowego [s], I_0 – intensywność lasera [J/m^2], δ – głębokość penetracji [m] [].

Na rys. 1 przedstawiono przebiegi czasowe temperatury osiągniętej przez węzeł leżący na brzegu obszaru wg dwóch modeli matematycznych. Można zauważyć, że różnica w wynikach jest dość znaczna i wynosi ok. 2°C .



Rys. 1. Porównanie przebiegu temperatury w węźle $x = 0$ dla modelu Fouriera oraz modelu z dwoma czasami opóźnień ($I_0=30 \text{ J}/\text{m}^2$, $t_p=0,1 \text{ ps}$)

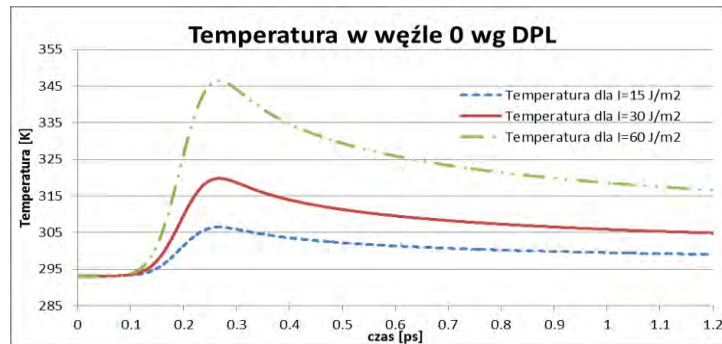


Rys. 2. Porównanie przebiegu temperatur dla węzła $x = 0$ - model Fouriera ($I_0=30 \text{ J}/\text{m}^2$)

Na rys. 2. przedstawiono przebiegi czasowe temperatury osiągniętej przez węzeł leżący na brzegu obszaru dla trzech różnych czasów trwania impulsu laserowego t_p wg prawa Fouriera.

Na jego podstawie można stwierdzić, że dla dłuższych impulsów temperatura wzrasta wolniej i osiąga o kilka stopni niższe wartości.

Na rys. 3. pokazano przebiegi czasowe temperatury osiągananej przez węzeł leżący na brzegu obszaru dla trzech różnych wartości intensywności lasera I_0 wg modelu z dwoma czasami opóźnień. Różnica pomiędzy osiągniętymi temperaturami dla lasera o największej intensywności i lasera o najmniejszej intensywności wynosi ok. 40 °C.



Rys. 3. Porównanie przebiegu temperatur dla węzła $x = 0$ - model DPL ($t_p=0,1$ ps)

5. Wnioski

- Promieniowanie laserowe ma największy wpływ na początek cienkiej warstwy. Wraz z oddaleniem od pierwszych węzłów znacznie maleje wydajność źródła ciepła, więc osiągnane przez materiał temperatury są znacznie mniejsze niż w początkowych węzłach.
- Otrzymane temperatury wg modelu Fouriera różnią się od wartości wg modelu Dual Phase Lag. W początkowych węzłach wg modelu Fouriera osiągnane są wyższe temperatury. W dalszych węzłach różnica między temperaturami jest raczej niewielka.
- Zmiany intensywności lasera wpływają znacznie na osiąganą przez materiał temperaturę, nie wpływają natomiast na charakter i przebieg procesu nagrzewania lub chłodzenia.
- Zmiany w czasie trwania impulsu laserowego wpływają na rozkład dostarczanej do warstwy energii. Dzięki temu, dla różnych czasów oddziaływania lasera na materiał, występuje różnica w czasie osiągnięcia maksymalnych temperatur. Maksymalne osiągnane temperatury różnią się nieznacznie dla pierwszych węzłów w warstwie, a wraz z zwiększaniem się numeru węzła, różnica ta zanika.

Literatura

1. Kusiński J., Lasery i ich zastosowanie w inżynierii materiałowej, Wydawnictwo Naukowe Akapit, Kraków (2000).
2. Ziętek B., Lasery, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń (2009).
3. Wiśniewski S., Wiśniewski T. S., Wymiana ciepła, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa (2009).
4. Zhang Z. M., Nano/Microscale Heat Transfer, McGraw-Hill Companies, Nowy Jork (2007).
5. Majchrzak E., Dziatkiewicz J., Kałuża G., Application of sensitivity analysis in microscale heat transfer, w materiałach "Computer Assisted Methods in Engineering and Science, 20", Polish Academy of Sciences, s.113-121 (2013).

MODELOWANIE WIELOSKALOWE MATERIAŁÓW GRADIENTOWYCH

inż. MARCIN HATŁAS

Mechatronika, ME3, semestr III, 2 stopień

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Witold Beluch

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodę modelowania wieloskalowego materiałów gradientowych na przykładzie kompozytu włóknistego o zmiennej średnicy włókna. Celem modelowania było wyznaczenie makroskopowych własności materiałowych określających zmiany w materiale gradientowym. Obliczenia wykonano w oparciu o analizę naprężeń z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES) oraz homogenizacji numerycznej.



1. Wprowadzenie

W związku z coraz większym zapotrzebowaniem przemysłu na materiały o specyficznych właściwościach, następuje szybki rozwój inżynierii materiałowej. Aktualnie głównymi kierunkami rozwoju tej nauki są m. in. nowoczesne stopy metali, materiały porowate, kompozyty oraz materiały gradientowe. W każdym z tych przypadków budowa mikroskopowa tych materiałów powoduje ich charakterystyczne własności makroskopowe. Materiały gradientowe różnią się od pozostałych wymienionych materiałów tym, że ich własności zmieniają się wzdłuż struktury materiału. Dzięki temu materiały te mogą jeszcze dokładniej spełniać warunki stawiane przez współczesny przemysł.

Celem pracy było wyznaczenie makroskopowych własności materiału gradientowego w postaci belki wykonanej z kompozytu włóknistego ze wzmocnieniem o zmiennej średnicy. Obliczenia zostały wykonane w oparciu o metody modelowania wieloskalowego oraz homogenizacji numerycznej.

Analizowanym materiałem był kompozyt włóknisty - kompozyt składający się ze wzmocnienia w postaci charakterystycznie ułożonych włókien znajdujących się w osnowie. W przypadku takich kompozytów włókna są podstawowym elementem nośnym a osnowa służy jako spoiwo zapewniając rozkład obciążeń na włókna kompozytu [1]. Zwykle kompozyty włókniste wykonywane są z użyciem włókien o stałej średnicy, zapewniając stałe własności makroskopowe, jednakże do specjalistycznych zastosowań możliwe jest wykonanie włókien o zmiennej średnicy i utworzenie na ich podstawie materiału gradientowego.

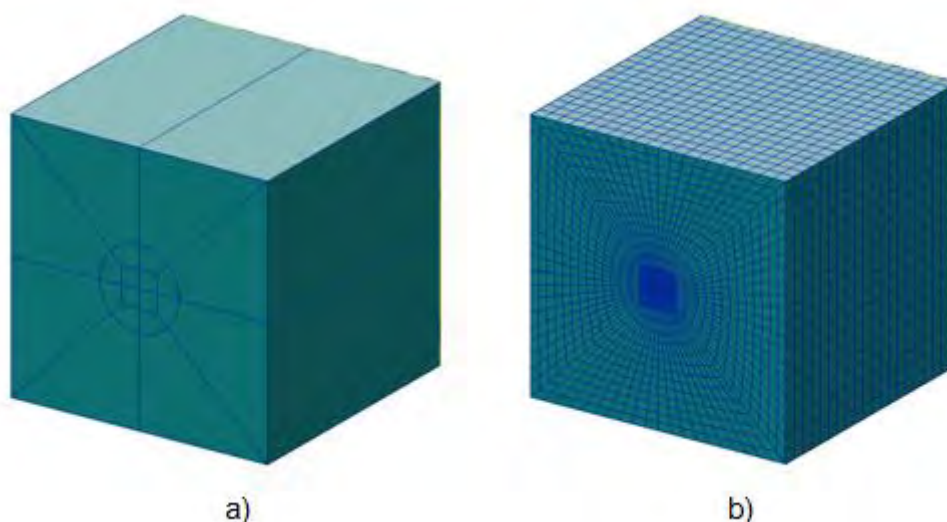
Aby wyznaczyć zastępcze własności materiałowe w postaci macierzy sztywności, należy zbadać zachowanie się mikrostruktury materiału pod wpływem makroskopowych obciążeń. Do tego celu wykorzystuje się tzw. reprezentatywny element objętościowy (Representative Volume Element – RVE). Jest on statystyczną reprezentacją swojego otoczenia, na której podstawie możemy wnioskować o całej strukturze materiałowej obiektu [2].

Zakładając nieznaną postać macierzy sztywności oraz wykorzystując trójwymiarową postać RVE należy wykonać sześć testów nakładając na RVE odkształcenia: normalne i styczne, związane z głównymi osiami współrzędnych. Każda z analiz RVE była przeprowadzana z zastosowaniem komercyjnego pakietu oprogramowania metody elementów skończonych MSC Patran Nastran [3].

Wynikiem analizy są naprężenia powstałe w RVE, na podstawie których możliwe jest wyznaczenie zależności między naprężeniami i odkształceniami, czyli zastępczej macierzy sztywności. Powyższą procedurę nazywa się homogenizacją numeryczną [4].

2. Modelowanie materiału gradientowego

W celu analizy materiału gradientowego został wykorzystany kompozyt włóknisty, składający się z osnowy w postaci żywicy epoksydowej oraz wzmocnienia w postaci włókna węglowego o liniowej zmianie średnicy. Założono, że średnica włókna może zmieniać się w przedziale od do 4 μm . W celu wykorzystania homogenizacji numerycznej, która zakłada, że materiał nie zmienia się w pewnym otoczeniu RVE, należało podzielić materiał gradientowy na przedziały. W każdym przedziale aproksymowano średnicę włókna i założono, że jest ona niezmienna w całym przedziale. Założono podział na 20 przedziałów, co oznacza, że procedurę homogenizacji należy wykonać 20 razy. W celu automatyzacji procesu homogenizacji dla różnych udziałów objętościowych włókna zostały napisane dwa sterujące programy komputerowe. Pierwszy z nich był skryptem działającym w środowisku Matlab, który zarządzał zmianą parametrów RVE dla danej iteracji obliczeń oraz wyznaczał stałe materiałowe na podstawie obliczeń MES. Drugi z nich był skryptem sterującym sesją programu Patran. Skrypt ten na podstawie danych generowanych przez pierwszy skrypt, generował geometrię, siatkę elementów skończonych oraz warunki brzegowe, a następnie uruchamiał obliczenia MES.



Rys. . P rzykładowy model RVE utworzony za pomocą skryptu 2:
a) geometria, b) siatka elementów skończonych

W celu przeprowadzenia procedury numerycznej homogenizacji z wykorzystaniem metody elementów skończonych należy zadać tzw. okresowe warunki brzegowe. Warunki te są związane z założeniem, że wokół analizowanego RVE występują dokładnie takie same RVE. Warunki te cechują się okresowością przemieszczeń oraz antyokresowością sił brzegowych []. Okresowe warunki brzegowe muszą być zadane na węzłach leżących na przeciwległych ścianach RVE.

3. Homogenizacja numeryczna

Procedura homogenizacji numerycznej była przeprowadzana z wykorzystaniem skryptu . Za pomocą funkcji programu Matlab wczytane zostały pliki tekstowe z wynikami analiz numerycznych. Ze względu na bardzo dużą dyskretyzację obszaru RVE oraz potrzebę zmniejszenia czasu obliczeń założono, że nie jest konieczne wykonywanie całkowania naprężeń w obszarze danego elementu skończonego []. Zamiast tego wartości zastępczej macierzy sztywności obliczono na podstawie wartości naprężeń w punktach środków geometrycznych elementów skończonych. Na podstawie otrzymanych wartości macierzy sztywności można wysnuć wniosek o tym, że modelowany materiał wykazuje własności ortotropowe. Przyjmując taki model materiału wyznaczono zastępcze stałe materiałowe dla kolejnych przedziałów materiału gradientowego. Parametry wybranych zastępczych stałych materiałowych w poszczególnych przedziałach belki zostały zamieszczone w tabeli .

Tabela 1. Wyniki homogenizacji numerycznej – stałe materiałowe

Przedział	Średnica włókna[μm]	$E_x=E_y$ [GPa]	E_z [GPa]	G_{xy} [GPa]	$\nu_{xy}=\nu_{yx}$	$\nu_{zx}=\nu_{zy}$
1	13,8	10,145	91,431	1,050	0,419	0,304
2	13,4	9,569	86,437	1,035	0,430	0,307
3	13	9,048	81,589	1,013	0,441	0,310
4	12,6	8,588	76,889	1,000	0,451	0,312
5	12,2	8,174	72,335	0,986	0,459	0,315
6	11,8	7,801	67,928	0,973	0,467	0,318
7	11,4	7,465	63,668	0,960	0,474	0,321
8	11	7,157	59,554	0,942	0,481	0,323
9	10,6	6,882	55,588	0,930	0,487	0,326
10	10,2	6,632	51,768	0,918	0,492	0,328
11	9,8	6,405	48,096	0,906	0,496	0,330
12	9,4	6,198	44,570	0,895	0,500	0,333
13	9	6,008	41,191	0,879	0,503	0,335
14	8,6	5,835	37,958	0,869	0,505	0,337
15	8,2	5,678	34,873	0,858	0,507	0,339
16	7,8	5,533	31,935	0,848	0,508	0,341
17	7,4	5,400	29,143	0,839	0,509	0,343
18	7	5,277	26,499	0,825	0,508	0,345
19	6,6	5,164	24,001	0,816	0,507	0,346
20	6,2	5,059	21,650	0,808	0,506	0,348

4. Podsumowanie

Na podstawie wyników modelowania wieloskalowego materiału gradientowego zostały wyznaczone zastępcze stałe materiałowe dla konkretnych przedziałów tego materiału. Można zauważyć, że pomimo liniowej zmiany parametru wejściowego w postaci średnicy włókna zmiany zastępczych stałych materiałowych są nieliniowe, co jest również związane z nieliniową zmianą udziału objętościowego materiałów składowych. Przedstawione wartości modułów sprężystości mieszczą się w przedziale wartości materiałowych substancji składowych oraz wykazują ciągłą zmianę. Na podstawie takiej analizy można uznać wyniki za prawidłowe. Nie zostały przeprowadzone doświadczalne badania wytrzymałościowe, co jest spowodowane niską dostępnością tak specjalizowanych materiałów.

Otrzymane wyniki mogą z powodzeniem służyć dalszemu modelowaniu elementów konstrukcyjnych wykonanych z materiału gradientowego []. Kolejnym etapem badań może być optymalizacja parametrów mikroskopowych takich jak średnice początkowe i końcowe włókien wzmocnienia kompozytu np. w celu zmniejszenia maksymalnego ugięcia obciążonej belki, przy minimalizacji udziału objętościowego włókna. Takie badania mogą służyć zwiększeniu przystosowania projektowanego materiału do konkretnych zadań.

Literatura

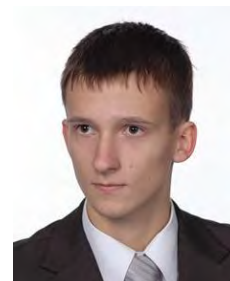
1. German J., Podstawy mechaniki kompozytów włóknistych, Politechnika Krakowska (2001).
2. Kaczmarczyk Ł., Numeryczna analiza wybranych problemów mechaniki ośrodków niejednorodnych, Politechnika Krakowska (2006).
3. Patran 2010 User's Guide, http://www.mscsoftware.com/training_videos/patran/Reverb_help/index.html#page/Patran%2520Users%2520Guide/preface.html# (data dostępu 0.04.20).
4. Kouznetsova V., Computational homogenization for the multi-scale analysis of multiphase materials, PhD. thesis, Technische Universiteit Eindhoven (2002).
5. Zohdi T., Wriggers P., An introduction to computational micromechanics, Springer (2004).
6. Łydźba D., Zastosowania metody asymptotycznej homogenizacji w mechanice gruntów i skał, Oficyna Wyd. Pol. Wrocławskiej, Wrocław (2002).
7. Hernik Sz., Projektowanie elementów konstrukcyjnych z materiałów gradientowych, Praca doktorska, Politechnika Krakowska (2009).

DWUWĘZŁOWY MODEL SYSTEMU TERMOREGULACJI CIAŁA LUDZKIEGO

inż. MATEUSZ KARLIK

Automatyka i Robotyka, AB3, semestr III, 2 stopień

Opiekun naukowy: prof. dr hab. inż. Ewa Majchrzak



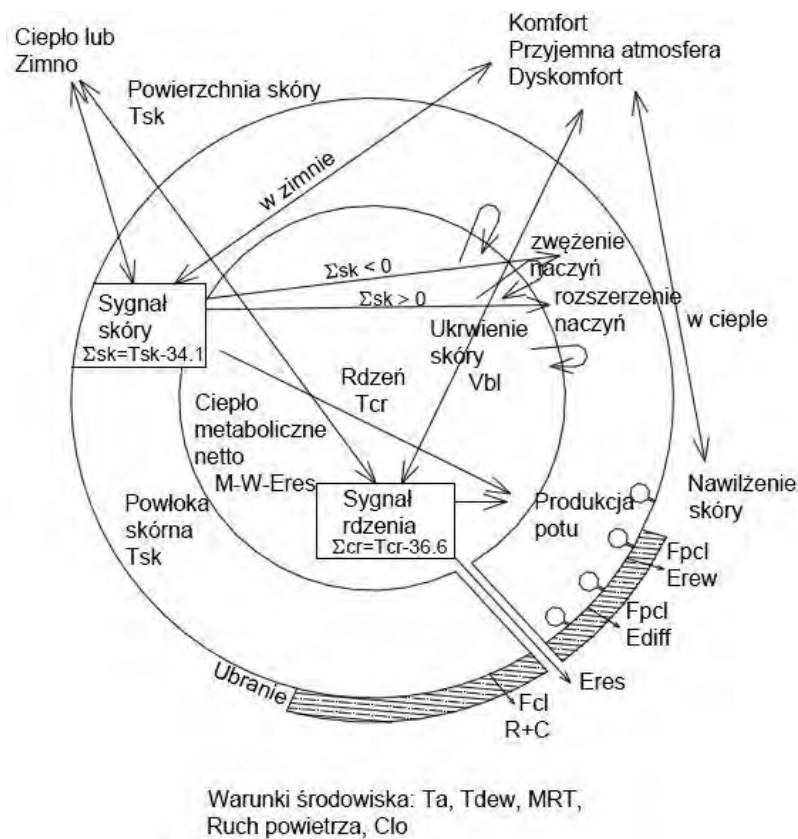
Streszczenie. Tematem niniejszego artykułu jest analiza modelu dwuwęzłowego Gagge'a. Model ten jest najpopularniejszym z modeli dwuwęzłowych, prowadzone na nim badania mogą przyczynić się do lepszego poznania zachowania ciała ludzkiego wystawionego na działanie różnych temperatur otoczenia przy różnych aktywnościach człowieka. Jest on prosty i łatwy do zastosowania, potocznie nazywany „rdzeń i skóra”. Model Gagge'a opiera się na chwilowym bilansie energetycznym między ciałem człowieka a otoczeniem i pozwala między innymi oszacować temperatury skóry oraz rdzenia, co pokazano w końcowej części artykułu.

1. Wprowadzenie

Matematycznie modelowanie systemu termoregulacji ciała ludzkiego jest cennym narzędziem do zrozumienia zachowań cieplnych zachodzących w naszych organizmach. Modele przepływu ciepła mogą być z powodzeniem stosowane w badaniach mających na celu polepszenie komfortu cieplnego, ocenę efektywności energetycznej, dyskomfortu cieplnego w ciężkich lub ekstremalnych warunkach [1, 2]. Człowiek (*Homo sapiens*) jest stworzeniem homotermicznym, to oznacza, że temperatura jego ciała jest stała i w dużej mierze niezależna od temperatury otoczenia. Prawidłowa temperatura człowieka to zazwyczaj $37,0^{\circ}\text{C} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Wzrost temperatury u ludzi o 2°C powoduje ból oraz dyskomfort, lecz nie ma większego wpływu na życie człowieka. Podwyższenie temperatury ciała powyżej tej wartości może być niebezpieczne dla życia, taka sytuacja może skutkować hipertermią. Gorączka od 40°C do 42°C powoduje drgawki, może ona doprowadzić również do śmierci człowieka. Z drugiej strony, gdy temperatura ciała osiągnie 33°C , człowiek zaczyna tracić świadomość. Poniżej tej temperatury, gdy temperatura ciała osiągnie w przybliżeniu 2°C następuje migotanie serca. Dlatego tak ważne dla ludzi jest utrzymanie temperatury w normalnym zakresie. System termoregulacji odpowiada za regulację temperatury ludzkiego ciała i jego głównym zadaniem jest utrzymanie temperatury rdzenia w bezpiecznym przedziale $37^{\circ}\text{C} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Znajduje się on w podwzgórze (części pnia mózgu). Utrzymanie temperatury ciała w wymaganym przedziale jest możliwe poprzez kontrolę przepływu ciepła (wytwarzanie i utratę) do otoczenia poprzez użycie termoreceptorów, które znajdują się w różnych częściach ciała takich jak skóra, mózg, rdzeń kręgowy itd. Sygnały emitowane przez te receptory kierowane są przez centralny układ nerwowy do podwzgórza, sygnały te określają ogólny stan termiczny ciała ludzkiego. System termoregulacji opiera się na sygnałach nerwowych generowanych przez podwzgórze i rozpatruje się trzy typy reakcji, które mogą ograniczać lub podwyższać wskaźnik ciepła produkcję lub stratę ciepła. Reakcje te są znane jako naczynioruchowe, reakcje potne i metaboliczne. Na przykład, jeżeli temperatura ciała wzrasta powyżej normalnej wartości, ilość przepompowanej krwi wzrasta, ponieważ rozszerzają się naczynia krwionośne z powodu warunków zewnętrznych. W odwrotnym przypadku, jeżeli temperatura ciała spada poniżej temperatury standardowej, naczynia krwionośne obkurczają się, a przepływ krwi się zmniejsza [2].

2. Model Gagge'a

Model Gagge'a jest najpopularniejszym modelem dwuwęzłowym, potocznie nazywanym „rdzeń i skóra”. Rozpatrywany model opiera się na chwilowych bilansach energetycznych dla rdzenia i skóry. Równania kontroli systemu termoregulacji zostały napisane w funkcji sygnałów temperatury (różnica pomiędzy rzeczywistą temperaturą i stałą neutralną temperaturą) dla dreszczy, układu potnego i dla odpowiedzi przepływu krwi w skórze. Model Gagge'a można stosować w przypadku umiarkowanej aktywności organizmu i dla jednolitych warunków otoczenia, jest on wykorzystywany do przewidywania komfortu termicznego. Główne braki tego modelu to fakt, iż nie opisuje on wymiany ciepła dla różnych naczyń krwionośnych i nie odzwierciedla zmian spowodowanych oporem odzieży, ponieważ zakłada, że ubrania są jednolite na powierzchni całego ciała. Na rysunku przedstawiony został dwupowłokowy model ludzkiego ciała wraz z otoczeniem.



Rys. . Dw upowłokowy model ciała człowieka

Skóra i rdzeń są traktowane jako dwa współosiowe walce, skóra jest reprezentowana przez warstwę walcową o masie m_{sk} , wewnątrz ciała z rdzeniem przez walec o masie m_{cr} , łączna masa ciała jest równa sumie $m_{sk} + m_{cr}$, pole powierzchni ciała wynosi A (dla tzw. standardowego człowieka: waga . kg wzrost . m, masa wnętrza ciała jest równa $m_{cr}=78.3$ kg, a masa skóry $m_{sk}=3.4$ kg, powierzchnia ciała $A=2$ m²).

Przepływ ciepła netto do i z warstwy skórnej jest dany zależnością [] :

$$S_{sk} = \lambda_{\min}(T_{cr} - T_{sk}) + c_{bl}v_{bl}(T_{cr} - T_{sk}) - E_{sk} - (R + C), \quad (1)$$

gdzie: S_{sk} [W/m²] – akumulacja ciepła w skórze, ciepło parowania z λ_{\min} [W/m²K] – minimalna przewodność cieplna tkanki skórnej, c_{bl} [W/(kgK)] – ciepło właściwe krwi, v_{bl} [litr/(godz m²)] – prędkość przepływu krwi. R – ciepło dostarczone (+) albo oddane (–) przez promieniowanie, C – ciepło dostarczone (+) albo oddane (–) przez konwekcję, E_{sk} [W/m²] – ciepło parowania z powierzchni skóry, T_{cr} [°C] – temperatura rdzenia, T_{sk} [°C] – temperatura skóry.

Przepływ ciepła netto od oraz do rdzenia opisuje zależność:

$$S_{cr} = M - E_{res} - W - \lambda_{\min}(T_{cr} - T_{sk}) + c_{bl}v_{bl}(T_{cr} - T_{sk}) \quad (2)$$

gdzie: S_{cr} [W/m²] – akumulacja ciepła w rdzeniu, M [W/m²] – prędkość metabolizmu, E_{res} [W/m²] – ciepło odparowanej wilgoci z płuc podczas oddychania, W [W/m²] – praca wykonana przez ciało.

Temperatury powłoki skórnej T_{sk} oraz rdzenia T_{cr} wyznacza się rozwiązując równania różniczkowe:

$$C_{sk} \frac{dT_{sk}}{dt} = S_{sk}A, \quad (3)$$

$$C_{cr} \frac{dT_{cr}}{dt} = S_{cr}A, \quad (4)$$

gdzie t oznacza czas.

Rozpatruje się następujące typy aktywności:

- A – siedzący tryb życia w ubraniu,
- B – umiarkowana aktywność,
- C – siedzący tryb życia bez ubrania,
- D – na bieżni przy prędkości 3 mile h,
- E – swobodne chodzenie przy prędkości 3 mile h,
- F – na ergometrze rowerowym (przy 50 obrotach/min).

W tabeli przedstawiono standardowe parametry otoczenia dla różnych typów aktywności. Przyjęto w niej następujące oznaczenia: M – prędkość metabolizmu, α_r – promienisty współczynnik wymiany ciepła, α_c – konwekcyjny współczynnik wymiany ciepła, $\alpha = \alpha_r + \alpha_c$, I_{cl} – izolacja spowodowana odzieżą, μ – efektywność mechaniczna (jeśli $\mu=0$ to praca $W=0$).

Tabela 1. Standardowe parametry otoczenia [1]

Oznaczenie	Jednostki	Typ aktywności					
		A	B	C	D	E	F
M	W/m ²	58,2	130,1	58,2	233	233	291
α_r	W/(m ² ·C)	5,23	5,23	5,23	5,23	5,23	5,23
α_c	W/(m ² ·C)	2,91	4,30	2,91	6,8	10,00	5,37
α		8,14	9,53	8,14	12,03	15,23	10,6
I_{cl}	0, · C·m ² /W	0,6	0,6	0	0,1	0,1	0,1
μ		0	0	0	0	0	0,2

Dla wybranego rodzaju aktywności oraz zadanej wartości temperatury otoczenia T_a i wilgotności względnej powietrza Φ_a , stosując wzór empiryczny [], określa się ciepło E_{res} odparowanej wilgoci z płuc podczas oddychania. Przed pętlą główną obliczeń należy zadać temperatury początkowe rdzenia T_{cr} oraz skóry T_{sk} , prędkość przepływu krwi v_{bl} , ciepło odparowanej wody dyfundującej przez warstwę naskórkową E_{diff} , ciepło odparowanego potu potrzebne do regulacji temperatury ciała E_{rsw} oraz zwilżenie skóry spowodowane poceniem regulacyjnym. Należy również przyjąć krok czasu Δt . W pętli oblicza się utratę ciepła związaną z parowaniem, akumulację ciepła w warstwie skórnej i rdzeniu (wzory (), (2)) i ze wzorów (3), (4) nowe wartości temperatury rdzenia oraz skóry. Następnie należy skorzystać z zależności opisujących system regulacji [], które pozwalają określić między innymi nową wartość prędkości przepływu krwi, ciepło odparowanego potu potrzebne do regulacji temperatury ciała oraz zwilżenie skóry spowodowane poceniem regulacyjnym.

3. Wyniki

Wybrano rodzaj aktywności *A*. Poniżej przedstawiono wyniki, jakie uzyskano przy użyciu opracowanego programu dla temperatury otoczenia 20°C i wilgotności względnej 0% :

temperatura skóry – 32.0 °C ,
temperatura rdzenia – 37.0 °C ,
prędkość przepływu krwi – 5.3 l/godz m²,
zwilżenie skóry spowodowane poceniem regulacyjnym – 0.06,
ilość odparowanego potu potrzebna do regulacji temperatury ciała – 0,
strata parowania z powierzchni skóry – 9.089 W/m².

Dla temperatury otoczenia 2 °C i wilgotności względnej 0% otrzymano następujące wyniki:

temperatura skóry – 37.0 2°C,
temperatura rdzenia – 37.0 °C ,
prędkość przepływu krwi – 18.9 l/godz m²,
zwilżenie skóry spowodowane poceniem regulacyjnym – 0.06,
ilość odparowanego potu potrzebna do regulacji temperatury ciała – 0.003 W/m²,
strata parowania z powierzchni skóry – 10.55 W/m².

4. Wnioski

Model Gagge'a pozwolił w dosyć łatwy sposób wyznaczyć temperatury rdzenia i skóry człowieka przebywającego w temperaturze pokojowej oraz o kilka stopni wyższej, który nie wykonuje żadnego wysiłku fizycznego. Jak widać, system termoregulacji w skuteczny sposób opisuje odprowadzanie ciepła z organizmu i model Gagge'a działa poprawnie. Dla wyższej temperatury otoczenia (przy tej samej wilgotności powietrza) otrzymano wyższe temperatury skóry i rdzenia, większą prędkość przepływu krwi i pojawiła się niezerowa ilość odparowanego potu. Stosując model dwuwęzłowy można oszacować jak zachowa się ciało ludzkie, które będzie poddane innym typom aktywności przedstawionym w tabeli .

Literatura

1. Gagge, A.P., Nishi Y., An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response, ASHRAE transactions 77 part I: pp. 247-262 (1971).
2. Maher, I., Salloum D., A new transient bio-heat model of the human body and its integration to clothing models, American University of Beirut, Beirut, Lebanon (2005).

WIELOKRYTERIALNA OPTIMALIZACJA PLANU PRODUKCJI

inż. KATARZYNA KORAL

Zarządzanie i Inżynieria Produkcji, ZZ, sem estr I, 2 stopień

Opiekun naukowy: dr inż. Marek Jasiński

Streszczenie. W artykule przedstawiono zastosowanie optymalizacji wielokryterialnej do rozwiązywania problemów związanych z optymalizacją planu produkcji. Sformułowano zadanie, które opiera się na przedsiębiorstwie zajmującym się produkcją mebli. Zadanie rozwiązano przy wykorzystaniu metody sumy ważonej. Po przeanalizowaniu wyników wprowadzono modyfikacje związane z usunięciem niektórych wyrobów.



1. Wprowadzenie

Zadanie wielokryterialne dotyczące optymalizacji planu produkcji dąży do spełnienia kilku założeń. Przeważnie cele, które zamierza się osiągnąć przy tworzeniu modelu wielokryterialnego są sprzeczne. Dlatego też, rzadko można zetknąć się z **rozwiązaniem dominującym**, czyli takim, które jest lepsze od pozostałych. Jeśli istnieje to jest ono przyjmowane jako **rozwiązanie optymalne**, jeśli nie to poszukuje się **rozwiązań niezdominowanych**. Rozwiązania niezdominowane to rozwiązania optymalne w **przestrzeni kryterialnej** (tzw. rozwiązania Pareto - optymalne), a rozwiązania odpowiadające im w przestrzeni decyzyjnej to rozwiązania sprawne [3].

Zbiór Pareto - optymalny to wszystkie rozwiązania Pareto - optymalne, a zbiór punktów, które mu odpowiadają to **front**.

Decyzję \mathbf{x}_1 uważa się za optymalną w sensie Pareto, gdy dla dowolnej decyzji \mathbf{x}_2 ze zbioru D spełnione są warunki:

$$\begin{aligned} y_i(\mathbf{x}_1) &\geq y_i(\mathbf{x}_2), & \text{dla wszystkich } i = 1, \dots, K, \\ y_i(\mathbf{x}_1) &> y_i(\mathbf{x}_2), & \text{dla co najmniej jednego } i \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie y_i oznaczają kryteria, a K liczbę kryteriów (funkcji celu).

Metoda sumy ważonej polega na wprowadzaniu do zadania współczynników wagowych oraz przypisaniu ich kryteriom. Wyznaczenie najlepszego rozwiązania spełniającego wszystkie kryteria jest tożsame z maksymalizacją **metakryterium**:

$$M(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^K w_i y_i(\mathbf{x}), \quad (2)$$

gdzie w_i to współczynniki wagowe i -tego kryterium.

Ponadto suma wartości współczynników wagowych musi spełniać warunek:

$$\sum_{i=1}^K w_i = 1. \quad (3)$$

2. Problem decyzyjny

Zadanie oparte jest na przedsiębiorstwie, które wytwarza meble. Są to: biurka, szafy, komoda i szafka. Biurka i szafy są produkowane w dwóch różnych wariantach wymiarowych, co daje łącznie liczbę sześciu wyrobów. Są one wytwarzane z płyty meblowej MDF o grubości m m, której wymiary to $2, m \times 2,0 m$.

Tabela 1. Dane wykorzystywane w modelu matematycznym

	Biurko1	Biurko2	Szafa1	Szafa2	Komoda	Szafka	Dostępność
Płyta MDF [m^2]	2,95	3,39	13,029	7,8	7,491	1,6	115,92
Energia [kWh]	1,8	2,1	2,7	1,9	4,5	1,5	100
Robocizogodziny [h]	3	4	5	3	8	2	800
Detale stalowe [szt.]	5	7	12	8	18	0	200
Okleina PCV [mb]	11	13	22	15	23	7	400
Śruby [szt.]	16	18	18	16	30	8	1000
Klej [g]	5	6	8	6	8	3	1000
Cena [zł]	240	290	800	570	610	125	MAX
Odpad [m^2]	2,846	2,406	4,362	3,792	4,099	4,196	MIN

Sposób wyznaczenia współczynników z tabeli , wraz ze wszystkimi niezbędnymi obliczeniami zawarto w [1].

Zmienne decyzyjne w analizowanym zadaniu określają wielkość produkcji poszczególnych wyrobów, a pełen model matematyczny został przedstawiony poniżej.

Model matematyczny

- funkcje celu:

$$y_1(x_i) = 240x_1 + 290x_2 + 800x_3 + 570x_4 + 610x_5 + 125x_6 \rightarrow \text{MAX}$$

$$y_2(x_i) = 2,846x_1 + 2,406x_2 + 4,362x_3 + 3,792x_4 + 4,099x_5 + 4,196x_6 \rightarrow \text{MIN}$$

- ograniczenia:

$$2,95x_1 + 3,39x_2 + 13,029x_3 + 7,8x_4 + 7,491x_5 + 1,6x_6 \leq 115,92$$

$$1,8x_1 + 2,1x_2 + 2,7x_3 + 1,9x_4 + 4,5x_5 + 1,5x_6 \leq 100$$

$$3x_1 + 4x_2 + 5x_3 + 3x_4 + 8x_5 + 2x_6 \leq 800$$

$$5x_1 + 7x_2 + 12x_3 + 8x_4 + 18x_5 \leq 200$$

$$11x_1 + 13x_2 + 22x_3 + 15x_4 + 23x_5 + 7x_6 \leq 400$$

$$16x_1 + 18x_2 + 18x_3 + 16x_4 + 30x_5 + 8x_6 \leq 1000$$

$$5x_1 + 6x_2 + 8x_3 + 6x_4 + 8x_5 + 3x_6 \leq 1000$$

(4)

- warunki brzegowe: $x_i \geq 0, i = 1, \dots, 6$
- warunki całkowitoliczbowości: $x_i \in \mathbb{C}, i = 1, \dots, 6$

W zadaniu przyjęto zestawów współczynników wagowych w_i z krokiem 0,1 dla każdego kryterium spełniających zależność (3).

3. Wyniki obliczeń

Wszystkie prezentowane obliczenia wykonano w programie Excel, przy użyciu dodatku Solver. Sposób wprowadzania odpowiednich formuł do Solvera opisano m.in. w [2].

Po rozwiązaniu jedenastu zadań otrzymano wartości zmiennych oraz metakryterium zgromadzone w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości metakryterium i zmiennych decyzyjnych

L.p.	$M(x)$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
1	0	0	0	0	0	0	0
2	875,83	0	24	0	4	0	2
3	1832,96	0	24	0	4	0	2
4	2790,09	0	24	0	4	0	2
5	3747,22	0	24	0	4	0	2
6	4693,58	3	23	0	3	0	3
7	5632,57	0	22	0	3	1	6
8	6586,93	0	22	0	3	1	6
9	7562,43	3	23	0	3	0	3
10	8518,72	3	23	0	3	0	3
11	9475	3	23	0	3	0	3

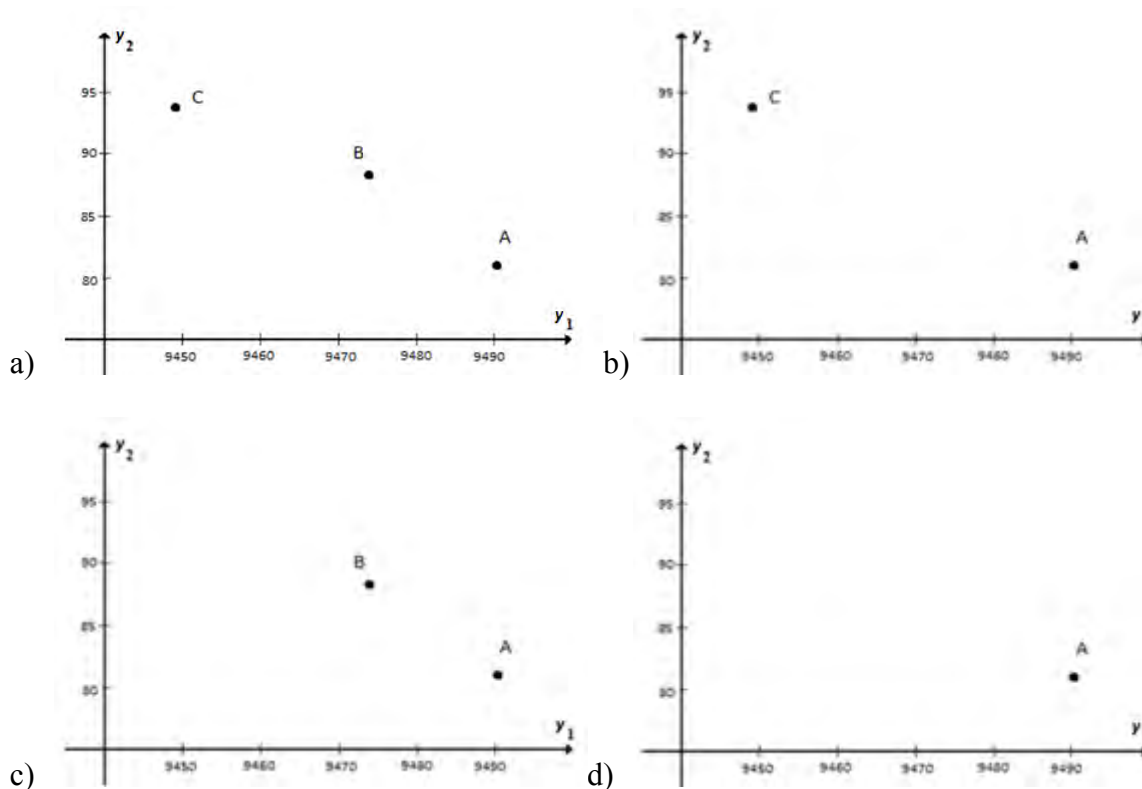
Jak wynika z tabeli 2, niektóre zmienne decyzyjne przyjmują wartości równe 0 (np. x_3) dla wszystkich zestawów wag lub przyjmują niskie wartości niezerowe tylko w kilku przypadkach (zmienna x_1 i x_5). W związku z tym dokonano analizy zmodyfikowanych zadań, w których pomijano zmienne decyzyjne związane z tymi wyrobami. Poszczególne rozpatrywane modyfikacje to:

- Modyfikacja 1: pominięcie wyrobu 3 (szafa).
- Modyfikacja 2: pominięcie wyrobu 1 (biurko).
- Modyfikacja 3: pominięcie wyrobu 2 (komoda).
- Modyfikacja 4: pominięcie wyrobów 1, 2 i 3 jednocześnie.

W tabeli 3 zebrano informacje o punktach Pareto - optymalnych uzyskanych we wszystkich pięciu wariantach obliczeń, natomiast na rysunku 3 przedstawiono ich położenie w przestrzeni kryterialnej.

Tabela 3. Punkty frontu Pareto

L.p.	Zadanie główne	Modyfikacja 1	Modyfikacja 2	Modyfikacja 3	Modyfikacja 4
1	O	O	O	O	O
2	A	A	A	A	A
3	A	A	A	A	A
4	A	A	A	A	A
5	A	A	A	A	A
6	B	B	C	B	A
7	C	C	C	B	A
8	C	C	C	B	A
9	B	C	A	B	A
10	B	C	C	B	A
11	B	C	C	B	A



Rys.1. Punkty frontu Pareto:

a) zadanie główne oraz pominięcie wyrobu 3, b) pominięcie wyrobu ,
 c) pominięcie wyrobu , d) pominięcie wyrobów ,3 i j jednocześnie

4. Wnioski

Rozwiązano pięć zadań wielokryterialnych dla jedenastu zestawów wag. Dostrzeżono zmiany frontu Pareto przy eliminacji poszczególnych wyrobów. Na podstawie otrzymanych wyników można wyciągnąć wniosek, że wraz ze zmniejszaniem się ilości zmiennych decyzyjnych ilość punktów jakie prezentowano w przestrzeni kryterialnej również maleje. W wyniku obserwacji zmian zachodzących w procesie produkcyjnym stwierdzono, że pozwoliły one na minimalizację strat, likwidację niepotrzebnych procesów i poprawiły wydajność produkcji. Wykazano, że optymalizacja wielokryterialna jest przydatnym i efektywnym narzędziem do rozwiązywania problemów związanych z optymalizacją planu produkcji. Istnieje możliwość modyfikacji zadania np. poprzez uwzględnianie wariantów cięcia płyty meblowej MDF. Można w ten sposób zmniejszyć straty wynikające ze złego wykorzystania materiału.

Literatura

1. Koral K., Wielokryterialna optymalizacja planu produkcji, Projekt inżynierski, Gliwice (2015).
2. Majchrzak E. (red.), Badania operacyjne, teoria i zastosowania, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice (200) .
3. Trzaskalik T., Wprowadzenie do badań operacyjnych z komputerem, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa (2008).

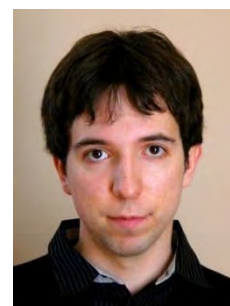
ANALIZA CFD BOLIDU POLSL RACING

inż. PAWEŁ KOSTYRA

Mechanika i Budowa Maszyn, MB4, semestr III, 2 stopień

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Mirosław Szczepanik

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę aerodynamiczną bolidu Polsl Racing. Celem było wyznaczenie charakterystyk sił oporu i docisku lub nośnej w funkcji prędkości poruszania się pojazdu. W artykule omówiono podstawy aerodynamiki pojazdów wyścigowych, proces przeprowadzania analizy oraz interpretację uzyskanych wyników. Obliczenia numeryczne zostały przeprowadzone z wykorzystaniem oprogramowania Ansys CFX.



1. Wprowadzenie

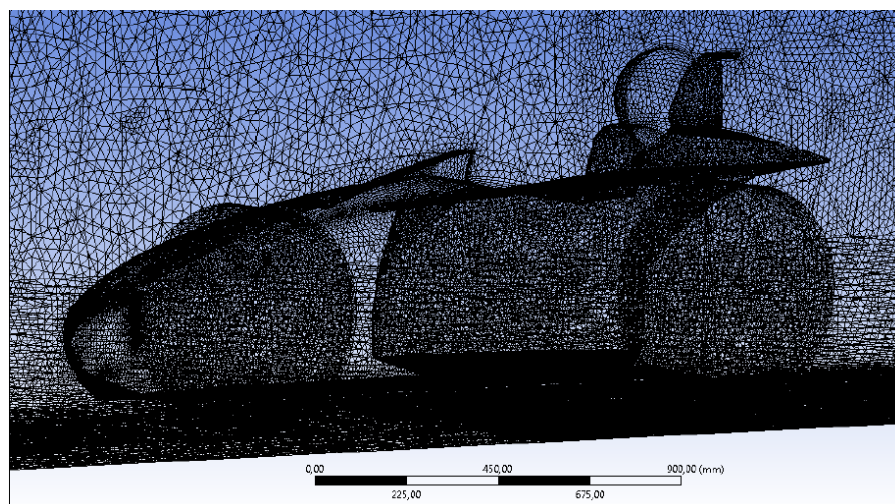
Omawiany w artykule bolid został skonstruowany z myślą o udziale w zawodach Formula Student. Celem zawodów jest zbudowanie lekkiego samochodu sportowego przeznaczonego do jazdy po torze wyścigowym. Ze względu na specyficzne wykorzystanie pojazdu wymagane jest odpowiednie podejście do procesu projektowego. Pewne czynniki (np. komfort kierowcy) stają się mniej ważne niż w normalnych samochodach, inne natomiast (takie jak prędkość maksymalna, czy przyspieszenie) zyskują priorytetowe znaczenie. Siły pochodzące od powietrza, które działają na bolid, rosną proporcjonalnie do kwadratu prędkości [] – sprawia to, że aerodynamika zyskuje duże znaczenie w przypadku samochodów sportowych. Siła oporu ma duży wpływ na przyspieszenie pojazdu, a siła docisku lub nośna wpływa na stabilność, głównie w zakrętach. Eksperymentalne badania powyższych sił można zrealizować tylko w tunelu aerodynamicznym, co jest zwykle trudnym i kosztownym procesem – dlatego właśnie analiza CFD nabiera dużego znaczenia w projektowaniu pojazdów, a zwłaszcza samochodów wyścigowych.



Rys. 1. Bolid 303

2. Analiza

Analiza została przeprowadzona z użyciem metody elementów skończonych. Pierwszym krokiem było uproszczenie modelu ze względu na dużą liczbę elementów (około 0 milionów), która powstaje w procesie dyskretyzacji tak skomplikowanego geometrycznie obiektu, jakim jest samochód. W związku z tym usunięte zostały podzespoły (np. zawieszenie), które mają stosunkowo niewielki wpływ na przepływ powietrza wokół bolidu, a których modelowanie znacznie skomplikowałoby proces tworzenia siatki. Następnie dokonano podziału na elementy skończone (rys. .) – zastosowane zostały głównie elementy typu tet, z wyjątkiem warstwy przyściennej, którą przybliżono elementami hex.



Rys. 2. Zarys siatki elementów skończonych

Kolejnym etapem było odpowiednie określenie warunków brzegowych związanych z geometrią układu (płaszczyzna drogi, symetria), ośrodkiem (lepkość, gęstość, ciśnienie otoczenia), oraz samą analizą (prędkość pojazdu). W celu zaoszczędzenia zasobów wykorzystana została symetria układu i obliczenia zostały przeprowadzone dla połowy bolidu.

Podczas analizy CFD rozwiązywany jest numerycznie układ równań Naviera-Stokesa [2]. W pewnym stopniu są one odpowiednikiem drugiej zasady dynamiki Newtona, lecz określonej dla płynów. Dla większości przypadków jest to zestaw nieliniowych cząstkowych równań różniczkowych. Ogólne rozwiązanie analityczne nie zostało znalezione (nie wiadomo czy istnieje), więc dla bardziej skomplikowanych układów konieczne jest zastosowanie metod numerycznych. Znając warunki brzegowe oraz równanie ciągłości można metodami iteracyjnymi wyznaczyć w przybliżeniu poszukiwane pola ciśnień i prędkości [3].

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) = -\nabla p + \rho g + \mu \nabla^2 v, \quad (1)$$

gdzie:

ρ – gęstość płynu,

v – prędkość płynu,

t – czas,

p – ciśnienie wywierane na płyn,

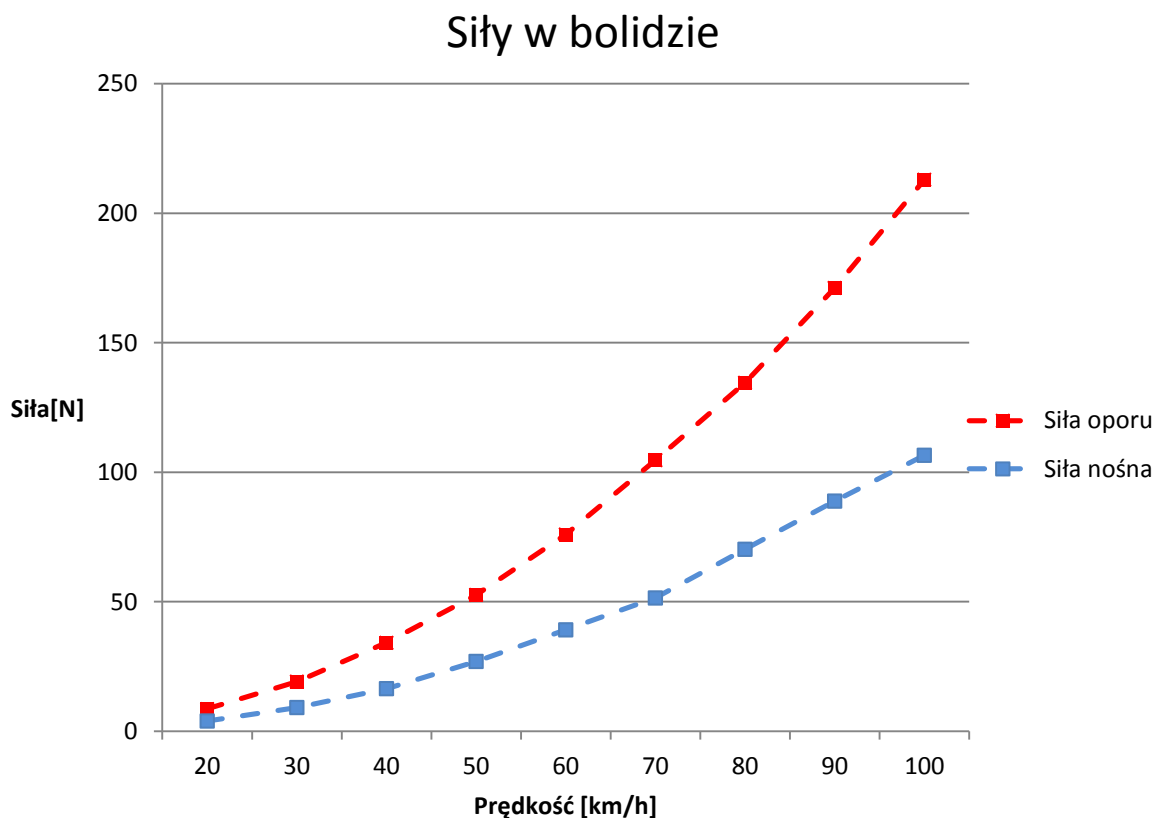
μ – lepkość dynamiczna,

g – przyspieszenie ziemskie.

Dodatkowo, jeśli w układzie występują turbulencje, należy zamodelować je pomocniczym zestawem równań. Do niniejszego problemu wybrano równania k-epsilon, które do opisu zjawiska wykorzystują energię kinetyczną turbulencji oraz jej dyssypację [4]. Równania te dobrze sprawdzają się w opisie układów poddźwiękowych o stosunkowo niewielkich gradientach ciśnień.

3. Wyniki

W wyniku przeprowadzonej analizy uzyskano oczekiwane charakterystyki sił docisku nośnej oraz oporu dla bolidu (rys. 3.) poruszającego się z prędkościami od 20 km/h do 100 km/h (maksymalna prędkość uzyskiwana na zawodach) z krokiem 10 km/h. Następnie dla uzyskanych punktów wykonano interpolację aby otrzymać rozkład ciągły. Wyniki zweryfikowano przez obliczenie współczynnika oporu aerodynamicznego dla jednej prędkości i analityczne wyznaczenie sił dla pozostałych. Różnice na poziomie dziesiętnych części procenta pozwalają przypuszczać, że otrzymane siły są zgodne z rzeczywistymi.

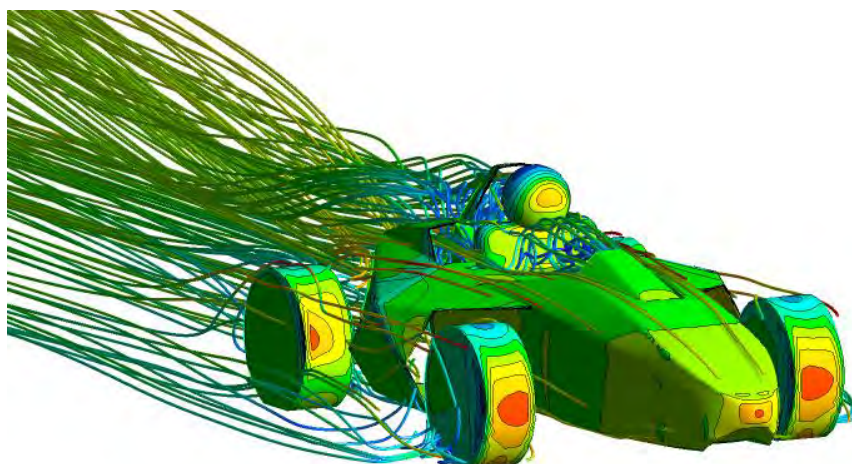


Rys. 3. Wykresy sił w bolidzie pochodzących od naporu powietrza

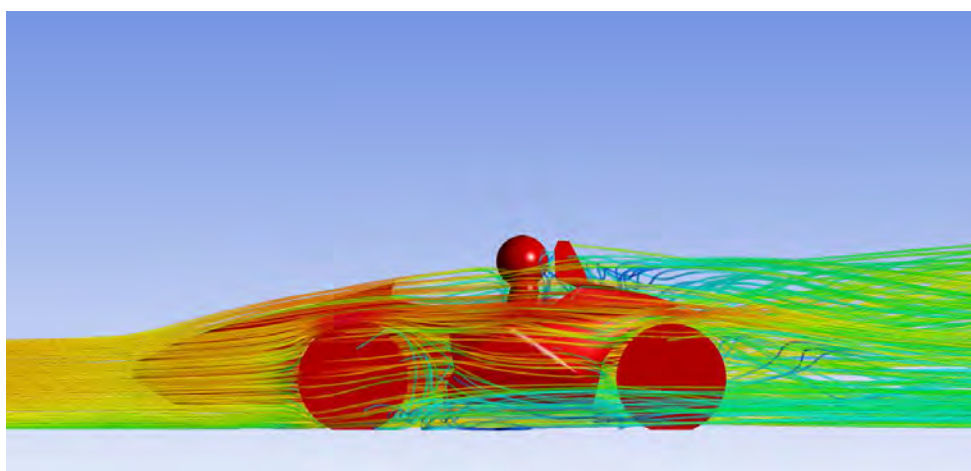
Zgodnie z rozważaniami teoretycznymi siły oddziaływujące na bolid rosną proporcjonalnie do kwadratu prędkości []. Postać funkcji zależy również od powierzchni czołowej pojazdu, gęstości powietrza oraz współczynników oporu i siły nośnej, co przekłada się na odmienny kształt krzywych na rysunku 3. Z uzyskanej siły oporu wyznaczono następnie wartość współczynnika oporu aerodynamicznego konstrukcji, który jest bezwymiarową wielkością pozwalającą porównywać różne obiekty pod kątem doskonałości aerodynamicznej poprzez odniesienie generowanej siły oporu do powierzchni czołowej. Bolid 303 posiada współczynnik oporu na poziomie 0.05, a więc bardzo podobny do innych

pojazdów biorących udział w zawodach, a także samochodów wyścigowych z odkrytymi kołami podobnej klasy (np. Caterham Seven).

Poza ilościowym opisem sił analiza CFD pozwala też na bardzo przydatne wizualizacje wyników w postaci strug powietrza (rys. 3) lub map ciśnień i prędkości (rys. 4.). Uzyskane za pomocą postprocesora jakościowe opisy pozwalają na opis wielu zjawisk wokół bolidu. Dzięki temu można zaobserwować, gdzie generowany jest największy opór, powstają turbulencje, lub następuje oderwanie strugi.



Rys. 4. Rozkład ciśnień na bolidzie i linie strugi – widoczne strefy dużego oporu na kołach i kasku kierowcy



Rys. 3. Linie strugi w płaszczyźnie symetrii bolidu

Literatura

1. Piechna J., Podstawy aerodynamiki pojazdów, WKiŁ (2000).
2. Blazek J., Computational Fluid Dynamics Principles and Application, Elsevier (2001).
3. Cebeci T., Shao, J.P., Kafyeke F., Laurendeau E., Computational Fluid Dynamics for Engineers, Springer (2005).
4. Falkovich G., Fluid Mechanics - A Short Course for Physicists, Cambridge University Press (2011).

OPTIMALIZACJA PLANU PRZEPLYWU TOWARU Z WYKORZYSTANIEM METOD PROGRAMOWANIA LINIOWEGO

inż. MAGDALENA KRZYMYK

Zarządzanie i Inżynieria Produkcji, ZZ, sem estr I, 2 stopień

Opiekun naukowy: dr inż. Marek Jasiński

Streszczenie. W artykule przedstawiono przykładowy problem dotyczący optymalizacji planu przepływu towaru z wykorzystaniem metod programowania liniowego. Rozpatrywane zagadnienie składało się z pięciu problemów decyzyjnych, dotyczących optymalizacji produkcji, minimalizacji odpadów oraz transportu produktu i surowców między poszczególnymi elementami analizowanego procesu produkcyjnego.



1. Wprowadzenie

Przeływ towaru jest połączeniem dwóch zagadnień związanych z logistyką. Pierwszym z nich jest zarządzanie operacjami, czyli planowanie, ustalanie harmonogramów, czy też kontrolowanie czynności umożliwiających przekształcenie nakładów w gotowe towary czy usługi. Drugim zagadnieniem jest zarządzanie czynnościami wykonywanymi w zakresie łańcucha dostaw oraz zarządzanie relacjami panującymi między poszczególnymi ogniwami w celu dostarczenia najwyższej wartości produktu dla potencjalnego odbiorcy oraz osiągnięcia trwałej przewagi konkurencyjnej [1]. Do wspomagania tego typu zagadnień można wykorzystać metody programowania liniowego [3].

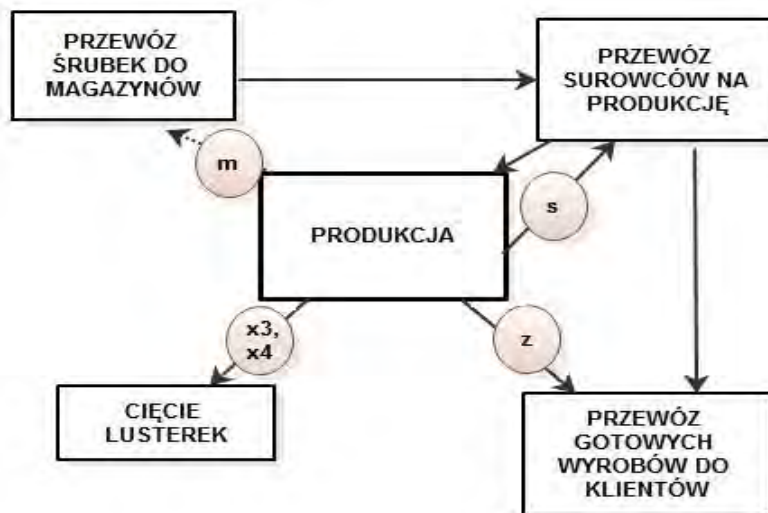
2. Problem decyzyjny

Optymalizacja przepływu towaru została przeprowadzona na podstawie przedsiębiorstwa produkującego akcesoria samochodowe. Akcesoria te to: mebelek centralny, mebelek centralny z wejściem na usb, lusterko małe, lusterko duże oraz schowek samochodowy.



Rys. 1. Mebelek centralny

Głównym problemem decyzyjnym zadania jest optymalizacja planu produkcji, tak aby otrzymać maksymalny zysk, przy minimalnych kosztach transportu i przy minimalnej ilości odpadów produkcyjnych. Cały proces optymalizacji został podzielony na mniejsze zadania optymalizacyjne (Rys. 2.), powiązane ze sobą poprzez wartości zmiennych decyzyjnych lub wartości wyrazów wolnych ograniczeń, będących jednocześnie danymi wejściowymi dla innych analizowanych modeli matematycznych.



Rys. 2. Układ rozpatrywanych zadań

W zadaniu PRODUKCJA celem była maksymalizacja zysku przy określonych zasobach materiałowych. Zmienne decyzyjne definiowały wielkość produkcji wytwarzanych wyrobów, które wymieniono wcześniej. Ograniczenia zadania dotyczą dostępności surowca, potrzebnego do produkcji poszczególnych wyrobów. Dodatkowym ograniczeniem było uzyskanie minimalnej produkcji każdego wyrobu, która musiała być większa bądź równa 0.

Drugie zadanie, czyli CIĘCIE LUSTEREK, nastawione było na uzyskanie minimalnych odpadów produkcyjnych, przy cięciu arkuszy szkła podczas produkcji lusterek wstecznych. Pierwszym etapem zadania było przyjęcie możliwych sposobów cięcia, z arkuszy szkła o wymiarach 100×00 cm, dwóch formatów lusterek. W rozpatrywanym zadaniu przyjęto siedem wariantów cięcia arkuszy szkła. Zmienne decyzyjne zdefiniowano jako ilość arkuszy szkła ciętych i -tym sposobem. Ograniczenia zadania wiążą się z wartościami zmiennych x_3 i x_4 otrzymanych w zadaniu PRODUKCJA, określających wielkość produkcji lusterek małych i dużych. Służą one jako minimalny poziom produkcji tych towarów.

Kolejnym rozpatrywanym zadaniem jest zadanie transportowo – produkcyjne. Celem tego zadania jest minimalizacja kosztów przewozu śrubek od producentów do magazynów z uwzględnieniem kosztów produkcji u poszczególnych producentów. W problemie wykorzystane zostały dane zawarte w zadaniu PRODUKCJA (parametr m , Rys. 2.), które określają stan magazynowy, tzn. dostępność danego materiału. Zmienne decyzyjne wyrażają wielkości przewozu na poszczególnych trasach pomiędzy dostawcami a magazynami.

W zadaniu PRZEWÓZ SUROWCÓW Z MAGAZYNÓW NA PRODUKCJĘ, zależnością oznaczoną symbolem s jest zapotrzebowanie produkcji na dany towar. Zostało one określone poprzez ograniczenie zadania PRODUKCJA, które związane było z dokładną ilością śrubek potrzebnych w procesie produkcji. Zmienne decyzyjne zadania to wielkość przewozów z poszczególnych magazynów na produkcję.

Ostatnie zadanie w projekcie, czyli PRZEWÓZ GOTOWYCH WYROBÓW DO KLIENTÓW, jest zagadnieniem, w którym rozważany był transport mebelka centralnego. Pierwszym etapem zadania jest określenie możliwości produkcji i magazynów oraz zdefiniowanie zapotrzebowania poszczególnych klientów. Możliwości produkcji zostały określone w zadaniu PRODUKCJA, dlatego w modelu matematycznym zależność ta została określona jako współczynnik z .

Tabela . Podstawowe dane rozpatrywanych zadań decyzyjnych

Zadanie	Cel zadania	Ilość zmiennych decyzyjnych	Ilość ograniczeń	Warunek całkowito-liczbowości
Produkcja	Maksymalizacja zysku	5	14	TAK
Cięcie lusterek	Minimalizacja odpadów	7	2	TAK
Przewóz śrubek do magazynów	Minimalizacja kosztów transportu	12	7	TAK
Przewóz surowców z magazynów na produkcję		3	5	TAK
Przewóz gotowych wyrobów do klientów		16	8	TAK

3. Wyniki obliczeń

Wszystkich obliczeń dokonano z wykorzystaniem Solvera dla arkusza kalkulacyjnego Excel [3].

W zadaniu PRODUKCJA maksymalny zysk wyniesie 401 900 zł. Poniżej, w tabeli 2 przedstawiono otrzymane wielkości produkcji poszczególnych wyrobów.

Tabela 2. Wielkość produkcji wyrobów w zadaniu PRODUKCJA

Towar	Ilość	Cena [zł]	Udział towaru w zysk [%]
Mebelek centralny	50	250	3,11
Mebelek centralny z usb	275	300	20,53
Lusterko wsteczne małe	51	100	1,27
Lusterko wsteczne duże	272	150	10,15
Schówek samochodowy	870	300	64,94

Niezerowe zmienne (warianty cięcia) z rozwiązania optymalnego zadania CIĘCIE LUSTEREK wraz z procentowym udziałem powstających odpadów przedstawia Tabela 3. Największy udział produkcji oraz w powstanie odpadu ma wariant pierwszy. Jak widać, wariant drugi cięcia jest najkorzystniejszy, gdyż nie wytwarza odpadów.

Rozwiązanie optymalne zadania PRZEWÓZ ŚRUBEK DO MAGAZYNÓW przedstawiono w Tabeli 4. Koszty transportu i produkcji dla tego rozwiązania wynoszą 80 , z ł.

Otrzymane wyniki obliczeń dla zadań transportowych PRZEWÓZ SUROWCÓW Z MAGAZYNÓW oraz PRZEWÓZ GOTOWYCH WYROBÓW DO KLIENTÓW zostały przedstawione w [2].

Tabela 3. Procentowy udział odpadów powstających przy cięciu danym wariantem

Wariant cięcia	Ilość arkuszy ciętych	Lusterka małe [szt.]	Lusterka duże [szt.]	Odpad [cm ²]	Odpad [%]
1	11	99	264	3080	95
2	1	50	0	0	0
6	1	36	8	160	5
Suma		185	272	3240	

Tabela 4. Rozwiązanie optymalne zadania przewozu śrubek do magazynów

Odbiorcy	Magazyn 1	Magazyn 2	Magazyn 3	Możliwości dostawców
Dostawcy				
Dostawca 1	30	0	150	180
Dostawca 2	70	0	0	150
Dostawca 3	100	150	0	250
Dostawca 4	0	0	0	130
Zapotrzebowanie magazynów	200	150	150	

4. Podsumowanie

Otrzymane wyniki w zadaniu PRODUKCJA można ulepszyć zwiększając liczbę towarów do wytworzenia, czy uzupełniając środki produkcyjne. W problemie ważną rolę odgrywa również dodatkowe ograniczenie narzucające, aby każda ilość określonej grupy towarów była większa bądź równa 0. Można to ograniczenie zmieniać w zależności od potrzeb danego przedsiębiorstwa, zwiększając lub zmniejszając jego wartość.

W zadaniu CIĘCIE LUSTEREK korzystając z uzyskanych wariantów cięcia uzyska się trzy razy więcej lusterek małych niż wynosi ich zapotrzebowanie na produkcji, co sugeruje zwiększenie produkcji lusterek małych. Zagadnienie to można usprawnić wykorzystując większą ilość wariantów cięcia szkła. Kolejną modyfikacją, mogłaby być kooperacja produkcyjna, czyli wykonywanie produktów dla innych przedsiębiorstw, np. produkcja lusterek umieszczonych w osłonie przeciwsłonecznej.

Obliczenia przeprowadzone dla rozpatrywanych zadań transportowych możliwe, a w niektórych przypadkach wręcz pożądane byłoby wyeliminowanie niektórych dostawców (Dostawca 4, Tabela 4).

Jak już wspomniano wcześniej wszystkie obliczenia wraz ze szczegółową analizą wyników zostały zawarta w [2].

Literatura

1. Bozarth C., Handfield R. B., Wprowadzenie do zarządzania operacjami i łańcuchem dostaw, Wydawnictwo HELION, Gliwice (2007).
2. Krzymyk M., Optymalizacja planu przepływu towaru z wykorzystaniem metod programowania liniowego, Projekt inżynierski, Gliwice (20) .
3. Majchrzak E. (red.), Badania operacyjne i teoria zastosowania, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice (200) .

MODELOWANIE PRZEWODZENIA CIEPŁA W AKTUATORACH ZE STOPU Z PAMIĘCIĄ KSZTAŁTU

inż. DOROTA LIPÍŃSKA

Mechatronika, ME3, semestr III, 2 stopień

Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Ewa Majchrzak



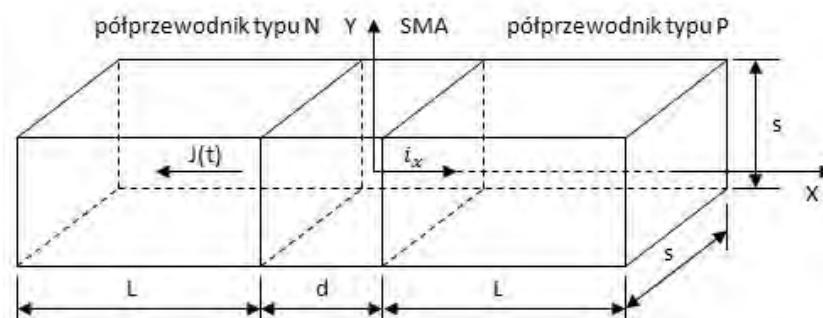
Streszczenie. Artykuł poświęcony jest przewodzeniu ciepła w akuatorze ze stopu niklu i tytanu (Ni-Ti). Przedstawia on jednowymiarowy model matematyczny analizowanego procesu, krótki opis metody różnic skończonych, którą wykorzystano do rozwiązania zadania oraz wyniki obliczeń.

1. Wprowadzenie

Urządzenie wykonawcze (nastawiające), które w oparciu o sygnał sterujący generuje sygnał wejściowy do obiektu regulacji nazywamy akuatorem [, 2]. Do tego typu urządzeń można zaliczyć siłowniki pneumatyczne, hydrauliczne, pompy, przełączniki itp. Jednym z nietypowych akuatorów jest akuator wykonany ze stopu z pamięcią kształtu (Shape Memory Alloy), który należy do materiałów typu SMART, czyli do materiałów o sterowalnych właściwościach. Zmiana kształtu jest pochodnym efektem zmiany wewnętrznych naprężeń mechanicznych, następujących w wyniku przemiany fazowej. Polega ona na powrocie materiału do pierwotnego (wyjściowego) kształtu, tego który został „zapamiętany”. Zjawiskiem fizycznym, które wywołuje zmianę kształtu jest odwracalna przemiana martenzytyczna polegająca na kooperatywnym przemieszczaniu atomów siatki krystalicznej. Wymuszenie tej przemiany w stopach SMA może odbywać się w sposób mechaniczny (przyłożenie odpowiednich sił) lub w sposób termiczny (przyłożenie odpowiednich obciążeń termicznych) [, 2].

2. Model termoelektrycznego przewodzenia ciepła w akuatorze z pamięcią kształtu

Jednowymiarowy przypadek przewodzenia ciepła, w którym materiał SMA znajduje się pomiędzy dwoma półprzewodnikami (półprzewodnik typu N oraz typu P) stanowi model termoelektryczny, jak pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Rozpatrywany przypadek jednowymiarowego modelu termoelektrycznego [3]

Ze względu na dominujący przepływ ciepła w jednym kierunku, uzasadnione jest założenie, że temperatura zmienia się jedynie wzdłuż osi x . Pozwala to potraktować problem jako jednowymiarowy. Równania przewodzenia ciepła dla trzech warstw systemu N-SMA-P mają postać [3]:

$$-L - \frac{d}{2} < x < -\frac{d}{2} : C_N \frac{\partial T_N(x,t)}{\partial t} = \lambda_N \frac{\partial^2 T_N(x,t)}{\partial x^2} + \rho_N J^2(t) - \alpha \frac{P}{A} [T_N(x,t) - T_0], \quad (1)$$

$$-\frac{d}{2} < x < \frac{d}{2} : C_S \frac{\partial T_S(x,t)}{\partial t} = \lambda_S \frac{\partial^2 T_S(x,t)}{\partial x^2} + \rho_S J^2(t) - \alpha \frac{P}{A} [T_S(x,t) - T_0], \quad (2)$$

$$\frac{d}{2} < x < L + \frac{d}{2} : C_P \frac{\partial T_P(x,t)}{\partial t} = \lambda_P \frac{\partial^2 T_P(x,t)}{\partial x^2} + \rho_P J^2(t) - \alpha \frac{P}{A} [T_P(x,t) - T_0], \quad (3)$$

gdzie: $T_N(x, t)$, $T_S(x, t)$, $T_P(x, t)$ - temperatury w kolejnych warstwach, x - współrzędna geometryczna, t - czas, C_N , C_S , C_P - objętościowe ciepła właściwe kolejnych warstw, λ_N , λ_S , λ_P - współczynniki przewodzenia ciepła, ρ_N , ρ_S , ρ_P - rezystywności elektryczne (opory właściwe), J - gęstość prądu, α - konwekcyjny współczynnik wymiany ciepła, P - obwód przekroju, A - pole przekroju, T_0 - temperatura otoczenia.

Warunki brzegowe na powierzchniach kontaktu zadano następująco:

$$x = -\frac{d}{2} : \quad T_S(x,t) = T_N(x,t) \quad (4)$$

$$-\lambda_S \frac{\partial T_S(x,t)}{\partial x} = -\lambda_N \frac{\partial T_N(x,t)}{\partial x} + \beta_N T_N(x,t) J(t),$$

$$x = \frac{d}{2} : \quad T_S(x,t) = T_P(x,t) \quad (5)$$

$$\lambda_S \frac{\partial T_S(x,t)}{\partial x} = \lambda_P \frac{\partial T_P(x,t)}{\partial x} + \beta_P T_P(x,t) J(t),$$

gdzie β_N , β_P to współczynniki Seebeck'a.

Na końcach aktuatora założono warunki brzegowe Dirichleta

$$x = -L - \frac{d}{2} : \quad T_N(x,t) = T_0, \quad (6)$$

$$x = L + \frac{d}{2} : \quad T_P(x,t) = T_0.$$

Przyjęto również warunki początkowe:

$$-L - \frac{d}{2} < x < -\frac{d}{2} : \quad T_N(x,t) = T_0, \quad (7)$$

$$-\frac{d}{2} < x < \frac{d}{2} : \quad T_S(x,t) = T_0,$$

$$\frac{d}{2} < x < L + \frac{d}{2} : \quad T_P(x,t) = T_0.$$

3. Metoda rozwiązania

Sformułowane zadanie rozwiązano za pomocą jawnego schematu metody różnic skończonych [4]. Wprowadzono siatkę różnicową ze stałym krokiem h oraz dokonano dyskretyzacji czasu ze stałym krokiem Δt . Stosując odpowiednie ilorazy różnicowe otrzymano wzory, z których wyznacza się temperatury w węźle na styku półprzewodnika N z SMA (węzeł m) oraz na styku SMA z półprzewodnikiem typu P (węzeł $m2$) – por. warunki brzegowe (4), (5):

$$T_{m1}^{f-1} = \frac{\lambda_{m1-1}T_{m1-1}^{f-1} + \lambda_{m1+1}T_{m1+1}^{f-1}}{\lambda_{m1-1} + \lambda_{m1+1} + \beta_N Jh} \quad (8)$$

$$T_{m2}^{f-1} = \frac{\lambda_{m2-1}T_{m2-1}^{f-1} + \lambda_{m2+1}T_{m2+1}^{f-1}}{\lambda_{m2-1} + \lambda_{m2+1} - \beta_P Jh} \quad (9)$$

W węzłach brzegowych oraz m , zgodnie ze wzorami () przyjęto $T_1 = T_0$ oraz $T_m = T_0$. Następnie, dla każdej warstwy niezależnie, czyli dla $i=2, 3, \dots, m-1$, dla $i=m+1, \dots, m2-1$ oraz dla $i=m2+1, \dots, m$ temperatury w węzłach wewnętrznych wyznaczono z następującego wzoru:

$$T_i^f = \left(1 - \frac{2a_i \Delta t}{h^2} - \frac{\alpha \Delta t}{C_i} \frac{P}{A}\right) T_i^{f-1} + \frac{a_i \Delta t}{h^2} (T_{i-1}^{f-1} + T_{i+1}^{f-1}) + \frac{\rho_i \Delta t}{C_i} J^2 + \frac{\alpha \Delta t}{C_i} \frac{P}{A} T_0 \quad (10)$$

gdzie $a_i = \lambda_i / C_i$, natomiast h oznacza krok siatki różnicowej. Sformułowano również warunek stabilności jawnego schematu różnicowego:

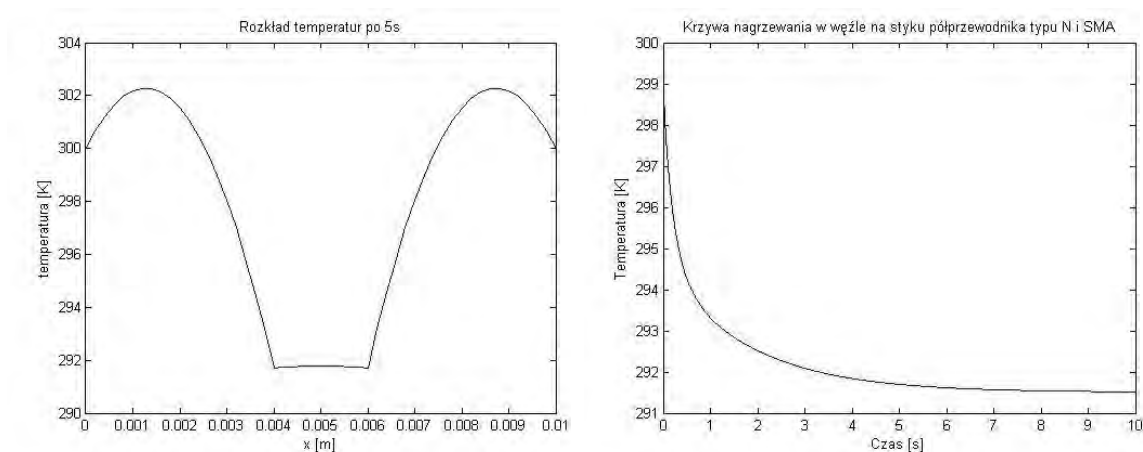
$$\Delta t \leq \frac{1}{\frac{2a_i}{h^2} + \frac{\alpha}{C_i} \frac{P}{A}} \quad (11)$$

4. Realizacja komputerowa oraz wyniki

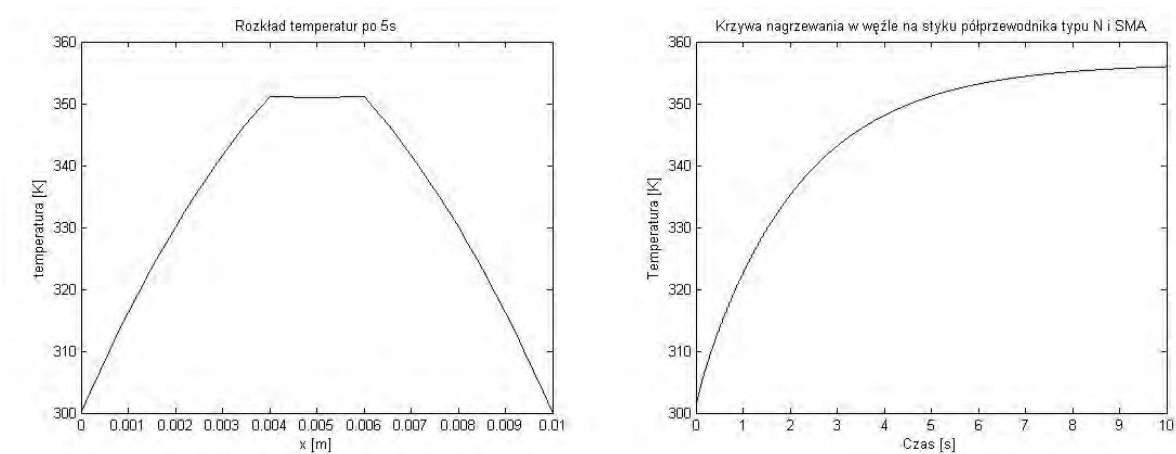
Kod został napisany w środowisku Matlab. Grubości poszczególnych warstw aktuatora były równe 0.004 m, 0.002 m i 0.004 m. Przyjęto krok siatki równy $h=0.01/50$. W takim przypadku węzeł na styku między półprzewodnikiem typu N-SMA to węzeł 2, a węzeł na styku między SMA-półprzewodnikiem typu N to węzeł 3. Obliczenia przeprowadzono na podstawie wzorów przedstawionych w poprzednim rozdziale. Przyjęto wartości parametrów materiałowych dla aktuatora ze stopu niklu i tytanu oraz półprzewodników typu P i N w warunkach pokojowych (300K) zgodnie z danymi podanymi w [3]. Objętościowe ciepło właściwe dla SMA przyjęto jako wartość stałą, co oznacza, że na obecnym etapie nie modelowano przemiany fazowej charakterystycznej dla stopów z pamięcią kształtu. Założono temperaturę początkową 300 K.

W celu zobrazowania zmian zachodzących w aktuatorze, wygenerowano wykresy przedstawiające rozkład temperatur oraz krzywe nagrzewania (zależność temperatury od czasu w ustalonym węźle). Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono wykres rozkładu temperatury po czasie t sekund oraz krzywą nagrzewania w węźle na styku półprzewodnika typu N z SMA dla wartości prądu $J=-2 \cdot 10^6$ [A/m²] oraz $J=2 \cdot 10^6$ [A/m²]. Jak widać, zmiana kierunku przepływu prądu istotnie zmienia przebiegi temperatury.

Kod obliczeniowy zostanie rozszerzony o możliwości analizy zmian rozkładów temperatury w aktuatorze poddanym działaniu prądu, który jest funkcją czasu oraz modelowanie przemian fazowych zachodzących w SMA.



Rys. 2. Wykres rozkładu temperatury oraz krzywa nagrzewania dla $J = -2 \cdot 10^6$ [A/m²]



Rys. 3. Wykres rozkładu temperatury oraz krzywa nagrzewania dla $J = 2 \cdot 10^6$ [A/m²]

5. Wnioski

Model matematyczny przewodzenia ciepła w akuatorze wykorzystano do opracowania algorytmu wyznaczania rozkładów temperatury bazującego na metodzie różnic skończonych. Obliczenia przeprowadzono dla akuatora wykonanego ze stopu niklu i tytanu. Możliwe jest uzyskanie rozkładu temperatur dla poszczególnych kroków czasu oraz wygenerowanie krzywych nagrzewania w wybranych węzłach. Należy podkreślić, że na obecnym etapie pracy nie modelowano przemiany fazowej charakterystycznej dla stopów z pamięcią kształtu.

Literatura

1. <http://www.matint.pl/materialy-z-pamiecia-ksztaltu.php> (21.10.2014r.).
2. <http://ppelczynski.swspiz.pl/userfiles/file/MECH/mech4.pdf> (21.10.2014r.).
3. Ding Z., Lagoudas D.C., Modeling of thermoelectric heat transfer in shape memory alloy actuators: transient and multiple cycle solutions, Department of Aerospace Engineering, Texas A&M University, College Station, TX 77843-3141.
4. Majchrzak E., Mochnacki B., Metody numeryczne. Podstawy teoretyczne, aspekty praktyczne i algorytmy, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice (2004).

ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA ENDOPROTEZY STAWU KOLANOWEGO

inż. BARBARA PETRYŃSKA

Mechatronika, ME2, semestr I, 2 stopień

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Antoni John prof. Pol. Śl.

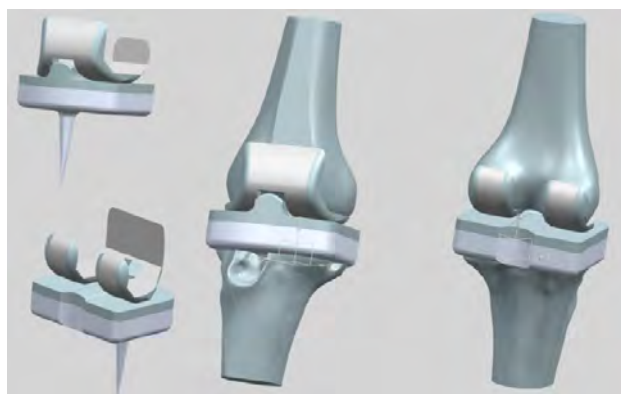
Streszczenie. Przedmiotem pracy była analiza wytrzymałościowa zamodelowanej endoprotezy stawu kolanowego. Dane do analizy zostały wprowadzone dla całkowitego wyprostu kolana. Analizowanymi materiałami były stopy tytanu, stopy kobaltu oraz ceramika w połączeniu z polietylenową wkładką. Do wykonania analizy wykorzystano oprogramowanie MSC Marc Mentat, a wyniki zostały przedstawione w postaci wykresów naprężeń redukowanych, przemieszczeń oraz odkształceń.



1. Wprowadzenie - budowa modelu

Zabieg alloplastyki jest wykonywany gdy występują nieodwracalne uszkodzenia tkanki naturalnej stawu. Mogą być one spowodowane chorobami zwyrodnieniowymi, urazami oraz zmianami związanymi z ruchem w warunkach ekstremalnych jak u sportowców lub w warunkach normalnych, guzami kości lub zmianami deformacyjnymi kolana spowodowanymi przesunięciem kolana poza oś biodro-staw skokowy. W zależności od wieku pacjenta oraz zwyrodnienia stawu stosuje się różne endoprotezy. W przypadku gdy mamy do czynienia z uszkodzeniem całego stawu łącznie z więzadłami, stabilizującymi pracę kolana, stosuje się wymianę całego stawu kolanowego. Wszczepiana jest wtedy endoproteza zawiasowa, której konstrukcja umożliwia jedynie zginanie w jednej osi. Skutkiem jest usztywnienie stawu- niemożliwa jest rotacja wewnętrzna oraz zewnętrzna. Ten rodzaj endoprotezy wszczepia się również gdy odchylenie kości od prawidłowej osi wynosi więcej niż 30° [3],[4].

W celu wykonania modelu wykorzystano program Mimics, dzięki któremu możliwe było utworzenie modelu CAD na podstawie wyniku badania tomografii komputerowej. Następnie otrzymany w ten sposób model stawu został wyedytowany w taki sposób, aby możliwe było zamocowanie endoprotezy. Model endoprotezy (Rys. 1) został utworzony w oprogramowaniu CAD.



Rys. 1. Budowa modelu endoprotezy wraz z kością udową oraz piszczelową

Kości zostały zamodelowane jako materiał ortotropowy, dodatkowo podzielono obszar tkanki kostnej na fragmenty kości gąbczastej oraz kości korowej. Zestawienie własności materiałowych przedstawia Tabela 1, a własności zastosowanych materiałów w endoprotezie Tabela 2.

Tabela 1. Własności materiałowe kości udowej 1

Kość korowa kości udowej	Moduł Younga [MPa]	Moduł Kirchhoffa [MPa]	Współczynnik Poissona
Kość jako materiał ortotropowy	$E_x = 16000$ $E_r = 6880$ $E_\varphi = 6300$	$G_{xr} = 3200$ $G_{r\varphi} = 3600$ $G_{\varphi x} = 3300$	$\nu_{xr} = 0,3$ $\nu_{r\varphi} = 0,45$ $\nu_{\varphi x} = 0,3$
Kość gąbczasta kości udowej	Moduł Younga [MPa]	Moduł Kirchhoffa [MPa]	Współczynnik Poissona
Kość jako materiał ortotropowy	$E_x = 1352$ $E_r = 868$ $E_\varphi = 676$	$G_{xr} = 292$ $G_{r\varphi} = 370$ $G_{\varphi x} = 505$	$\nu_{xr} = 0,3$ $\nu_{r\varphi} = 0,3$ $\nu_{\varphi x} = 0,3$

Tabela 2. Własności materiałowe materiałów zastosowanych do budowy endoprotezy [2]

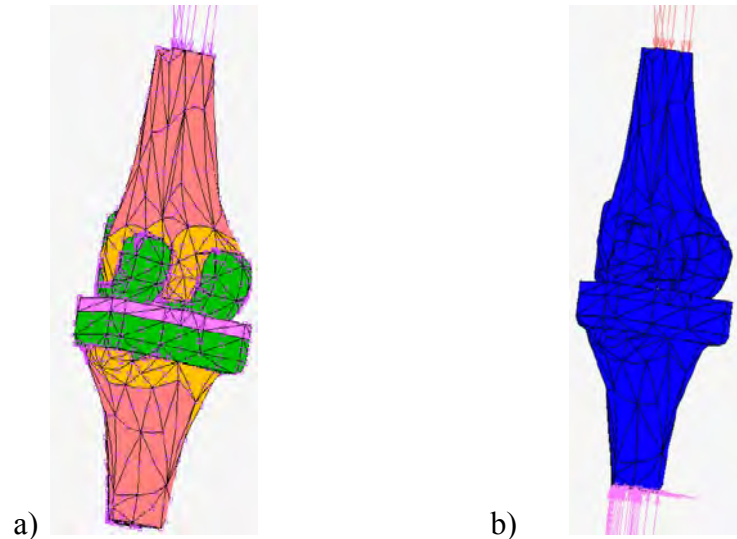
L.p.	Parametry materiału	Stop CoCrMo Endocast	Stop Ti6Al4V	Polietylen PE-UHMW Chirulen	Ceramika Al ₂ O ₃
1	Gęstość g cm ³	8,3	4,5	0,96	
2	Granica plastyczności [MPa]	700	÷ 0 0	21,5	3,9
3	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	1000	0 ÷ 20	46,2	
4	Wydłużenie %	15	0 ÷	434	
5	Moduł sprężystości [MPa]	$2,2 \times 10^5$	$,0 \times 10^5$	1000	$3, \times 10^5$
6	Wytrzymałość zmęczeniowa [MPa]	400	500	-	
7	Współczynnik Poissona	0,3		0,4	

2. Analiza

Po utworzeniu modelu w oprogramowaniu CAD został on wyeksportowany do oprogramowania MSC Marc/Mentat w celu dokonania analizy. Model został zdyskretyzowany poprzez nałożenie siatki z elementów czworościennych. Z powodu

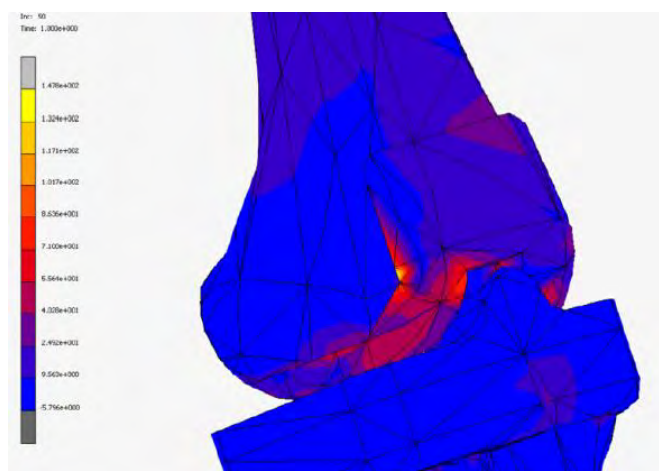
ograniczeń narzucanych na licencje studenckie, wielkość elementów była stosunkowo duża oraz niemożliwe było zamodelowanie kontaktu pomiędzy elementami. W związku z tym model został uproszczony.

Na Rys. 2 pokazano, w których rejonach zostały zastosowane odpowiednie struktury kostne, a w których materiały do budowy endoprotezy. Z prawej jest model z przedstawionym utwierdzeniem we wszystkich kierunkach w dalszej części kości piszczelowej. W bliższej części kości udowej zamodelowano ciśnienie odpowiadające obciążeniu kN.

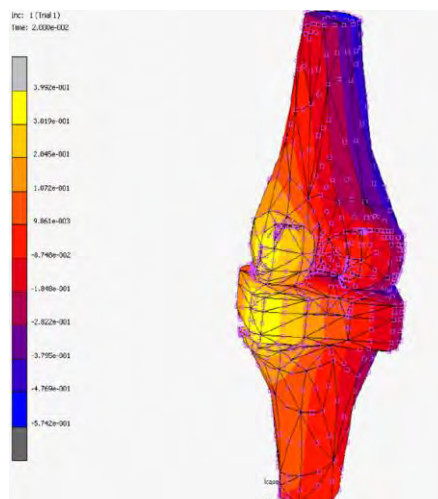


Rys. 2. Model numeryczny stawu kolanowego po zabiegu alloplastyki: a) podział na obszary, w których zastosowano różne materiały, b) warunki brzegowe.

W wyniku obliczeń otrzymano naprężenia redukowane [MPa] wg hipotezy wyężeniowej Hubera-Misesa, odkształcenia oraz przemieszczenia [mm]. W przypadku przemieszczeń można zauważyć, że oprócz ściskania kości podlegają również zginaniu, oraz że kłykiec wewnętrzny jest bardziej obciążony niż zewnętrzny. Na Rys. 3 oraz Rys. 4 zostały przedstawione przykładowe rozkłady naprężeń redukowanych (w MPa), dla endoprotezy wykonanej z tytanu oraz rozkład przemieszczeń w osi Z (w m) dla endoprotezy z materiałów ceramicznych, natomiast w Tabela 3 uzyskane wyniki.



Rys. 3. Przykładowy rozkład naprężeń redukowanych [MPa], dla endoprotezy wykonanej z tytanu



Rys. 4. Przykładowy rozkład przemieszczeń w osi Z [mm] dla endoprotezy z materiałów ceramicznych.

Tabela 3. Zestawienie otrzymanych wyników

Zastosowany materiał	Napężenia [MPa]	Przemieszczenia [mm]		Odształcenia
		całkowite	w osi z	
Stop tytanu	132	2,2	0,63	0,012
Ceramika	236	2,17	0,574	0,0127
Stop kobaltu	250,7	2,2	0,588	0,01264

3. Podsumowanie

Analizując otrzymane wyniki można stwierdzić, że stosowany materiał ma mały wpływ na rozkład naprężeń zredukowanych. Uzyskane wyniki pokazały również, że najmniejsze naprężenia zredukowane uzyskano stosując endoprotezę wykonaną z tytanu, jednakże ze względu na wielkość siatki należy te wyniki traktować jedynie orientacyjnie.

Literatura

1. Buśkiewicz J., *Podstawy Konstrukcji w Protetyce*, [online], [data dostępu 20. 2.20 4] http://etacar.put.poznan.pl/jacek.buskiewicz/dydaktyka/bi/Konspekt_IB_W01.pdf
2. Grabowska M., *Konstrukcja endoprotezy stawu kolanowego*, [online], [dostęp .0 .20 4] <https://prezi.com/r5qtbzkgpxz/konstrukcja-endoprotezy-stawu-kolanowego/>
3. Maciejewski R., Zubrzycki J. (red.), *Inżynieria biomedyczna. Wybrane obszary zastosowań*, Politechnika Lubelska, Lublin (2012).
4. Nałęcz M. (red.), *Biocybernetyka i inżynieria biomedyczna 2000*, t. 5, Akademicka Oficyna Wydawnicza, Warszawa (2004).

BADANIA STATYCZNE I OBLICZENIA POŁĄCZEŃ ZGRZEWANYCH

inż. MARTYNA POREBA

Automatyka i Robotyka, AB3, semestr III, 2 stopień

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Wacław Kuś, Prof. Pol. Śląskiej

Przy współpracy z *Tenneco Automotive Eastern Europe Sp. z o.o.*

Streszczenie. Celem pracy była analiza wytrzymałościowa połączenia zgrzewanego stosowanego w amortyzatorach Monroe w firmie Tenneco Automotive Eastern Europe Sp. z o. o. w Gliwicach. W artykule naukowym dokonano sprawdzenia jakości połączenia zgrzewanego oraz twardości, wykonano badania eksperymentalne podczas ścinania zgrzeiny i dopasowano modele numeryczne za pomocą programów HyperMesh oraz Abaqus, które najlepiej odzwierciedlały rzeczywistość.



1. Wprowadzenie

Weryfikacji wytrzymałościowej poddano połączenie wspornika stabilizującego z zewnętrzną rurą amortyzatora za pomocą zgrzeiny garbowej produkowanego w Tenneco Automotive Eastern Europe Sp. z o. o.

W celu sprawdzenia wytrzymałości zgrzeiny pod działaniem obciążenia osiowego przyjęto do dalszej analizy poniższe połączenie zgrzewane w wyniku uproszczenia badań i obliczeń numerycznych. Zgrzeiny w obydwóch przypadkach są wykonane w ten sam sposób.



Rys. . Analizowane połączenie zgrzewane

2. Sprawdzenie jakości i wymiarów zgrzeiny

W celu sprawdzenia jakości i powtarzalności wykonanych zgrzein utworzono ich zglądy. Połączenie zostało przecięte w miejscu występowania zgrzeiny. Następnie zatopiono je w żywicy, wyszlifowano i wytrawiono w celu lepszej widoczności przetopu. Po wykonaniu zglądów zmierzono pod mikroskopem wymiary zgrzein, które przedstawione są poniżej.



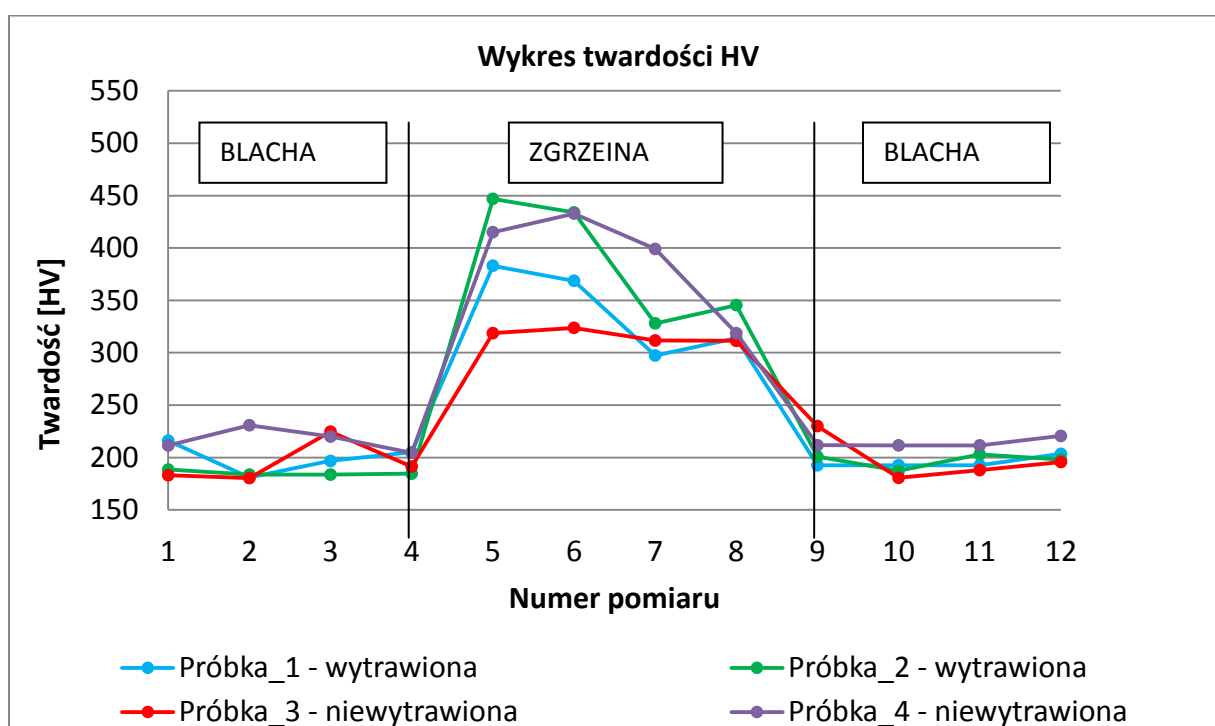
Rys. 2. Zdjęcia zgrzein pod mikroskopem dla czterech zglądów

Wartości przetopu znajdują się w tabeli .

Tabela 1. Wymiary przetopu zgrzeiny

Nr zglądu		1	2	3	4	ŚREDNIA
Długość przetopu	[mm]	6,36	6,092	5,49	5,53	5,868
Wysokość przetopu	[mm]	1,76	2,092	1,805	1,605	1,816

Kolejnym krokiem było dokonanie pomiaru twardości na czterech wcześniej wykonanych zglądach. Pomiarów z obciążeniem równym 0. kg wykonano na maszynie Mitutoyo w laboratorium jakości w Tenneco Automotive Eastern Europe. Uzyskane wyniki znajdują się poniżej.



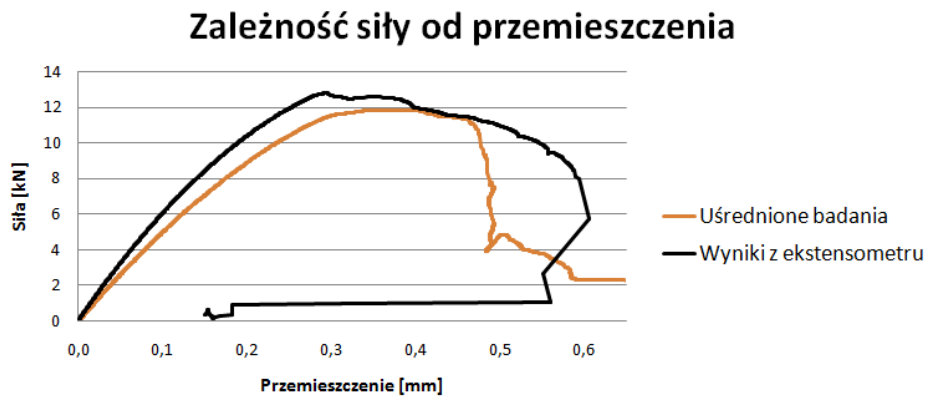
Rys. 3. Wykres twardości HV

3. Badania doświadczalne

Badania zostały przeprowadzone z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej MTS z ramą 322 oraz ze stołem wielozadaniowym. Maksymalne obciążenie maszyny równe jest 100kN. Zamocowane połączenie zgrzewane zawierało dodatkowo blachy o tej samej grubości w celu wyosiowania badanego modelu. Nadano prędkość przemieszczenia uchwytu ruchomego równą $V = 1 \frac{mm}{min}$. Maszyna MTS umożliwia zarejestrowanie wartości sił, przemieszczeń oraz czasu dokonywanego pomiaru.

W celu uzyskania jak najbardziej prawidłowych przemieszczeń podczas ścinania zgrzeiny zamocowano do dodatkowej próbki ekstensometr. Wyniki te zostały wykorzystane do dalszych analiz numerycznych.

Na podstawie powyższych założeń wygenerowano wykres zależności siły od przemieszczenia dla ekstensometru. Porównano otrzymane wyniki z wcześniej otrzymanymi bez dodatkowego oprzyrządowania.



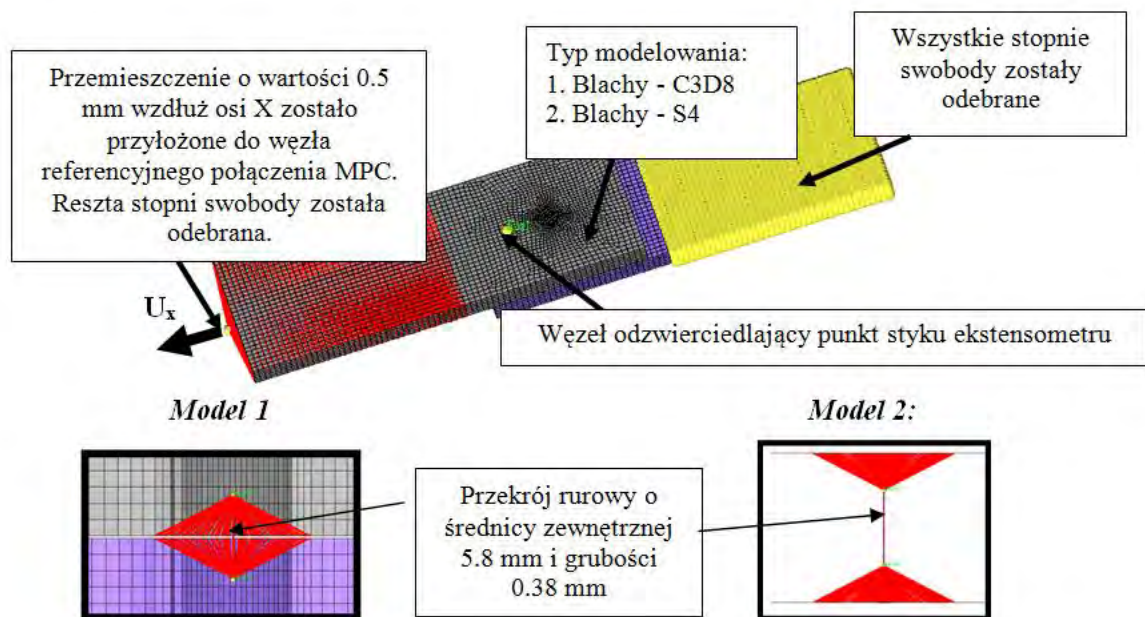
Rys. 4. Wykres zależności siły od przemieszczenia

Zakres liniowosprężysty dla badań eksperymentalnych z ekstensometrem znajdował się do siły ok. 12 kN. Ta wartość będzie docelowa dla wyników otrzymanych za pomocą metody elementów skończonych.

4. Statyczna analiza wytrzymałościowa połączenia zgrzanego

Drogą eksperymentalną wybrano sposób modelowania zgrzein, które najlepiej odzwierciedlały badania eksperymentalne. Pierwszy model zawierał blachy zamodelowane jako elementy typu HEXA pierwszego rzędu natomiast drugi - QUAD pierwszego rzędu. W obydwu przypadkach zgrzeiny zamodelowane były jako elementy belkowe pierwszego rzędu trójwymiarowe o przekroju rurowym.

Wszystkie przyjęte założenia i przygotowanie modelu do obliczeń przedstawiono na rysunku 5.



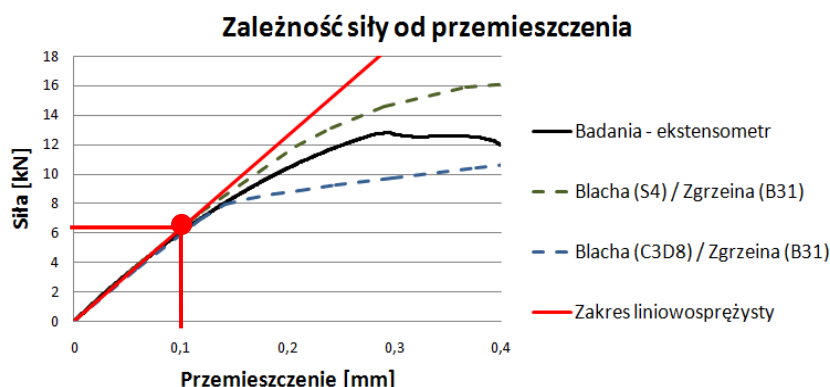
Rys. 5. Schemat siatki nałożonej za pomocą programu HyperMesh

Własności materiałowe jakie nadano we wszystkich przypadkach były takie same i przedstawiono je poniżej.

Tabela 2. Własności materiałowe dla poszczególnych elementów

Część	E [GPa]	Nu	Re [MPa]	Rm [MPa]	A [%]
Blachy	200	0.3	355	430	19
Zgrzeina					

Za pomocą programu Abaqus wygenerowano wykres zależności siły od przemieszczenia w celu sprawdzenia poprawności zamodelowanego połączenia. Wartość przemieszczeń odczytywano z węzła odzwierciedlającego miejsce styku ekstensometru.



Rys. . W ykres zależności siły od przemieszczenia

5. Wnioski

Otrzymane wartości w przypadku badań eksperymentalnych z ekstensometrem oraz z analiz numerycznych, gdzie zgrzeinę zamodelowano jako belkę, są satysfakcjonujące. Potwierdzają one, że wyniki uzyskane w programach MES prawidłowo odzwierciedlają warunki rzeczywiste modelu.

Tabela 4. Zestawienie wyników sił krytycznych po przekroczeniu zakresu liniowosprężystego dla poszczególnych przypadków

Rodzaj analizy	Siły krytyczne po przekroczeniu zakresu liniowosprężystego [kN]
Badania doświadczalne	~ 6
Blacha – C3D8, zgrzeina – C3D8	Brak dopasowania
Blacha – C3D8, zgrzeina – B31	~ 6
Blacha – S4, zgrzeina – C3D8	~ 4
Blacha – S4, zgrzeina – B31	~ 6

Literatura

- Hopkins P.: FEM Idealisation of Joints. Seminar held in April 2010, Wiesbaden Germany. 2011 NAFEMS.
- Pavlina E.J., Van Tyne C.J.: Correlation of Yield Strength and Tensile Strength with Hardness for Steels. February 1 (2008).

SYSTEM AUTOMATYCZNEGO POZYCJONOWANIA NA PODSTAWIE POMIARU ODLEGŁOŚCI OD OBIEKTU

inż. MARCIN ROGALSKI

Mechatronika, ME3, semestr III, 2 stopień

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Grzegorz Kokot

Streszczenie. W artykule przedstawiono porównanie silników krokowych oraz silników bezszczotkowych z wirującym magnesem w kontekście pozycjonowania. Zaproponowano rozwiązanie konstrukcyjne systemu umożliwiającego automatyczne pozycjonowanie. Projekt wykonano w programie Siemens NX. Został on odpowiednio dostosowany do systemu cyfrowej korelacji obrazu *Dantec Q-400*. Opisano budowę oraz sposób działania prototypu systemu automatycznego pozycjonowania na podstawie odległości od obiektu.



1. Wprowadzenie

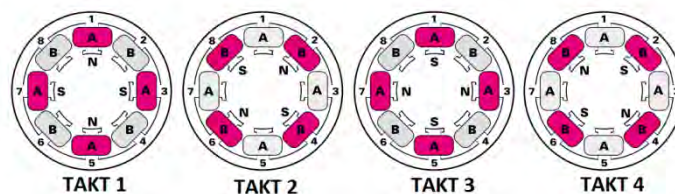
Każde urządzenie mechaniczne lub mechatroniczne wymaga zastosowania układu napędowego. Współczesne trendy rozwoju technologicznego ukierunkowane są na automatyzację nie tylko procesów technologicznych, ale również zminimalizowanie udziału człowieka w obsłudze maszyn i urządzeń gospodarstwa domowego. Większość maszyn i urządzeń wykorzystuje ruch obrotowy silników do napędzania swoich mechanizmów, przekształcając ruch obrotowy na liniowy. Równie często stosowana jest technika płynowa w postaci układów hydraulicznych i pneumatycznych. Z punktu widzenia mechatroniki najistotniejszymi własnościami napędów jest możliwość ruchu z programowalną prędkością, przyspieszeniem, przemieszczeniem oraz pozycjonowaniem. Takie cechy są niezbędne do budowy urządzeń precyzyjnych takich jak dyski twarde, napędy optyczne, numeryczne maszyny technologiczne, urządzenia pomiarowe, urządzenia wykorzystujące aktywną optykę.

Celem niniejszego artykułu jest porównanie silników krokowych oraz silników bezszczotkowych z wirującym magnesem w kontekście pozycjonowania oraz zaproponowanie rozwiązania systemu automatycznego pozycjonowania na podstawie odległości od obiektu.

2. Porównanie silników krokowych i BLDC

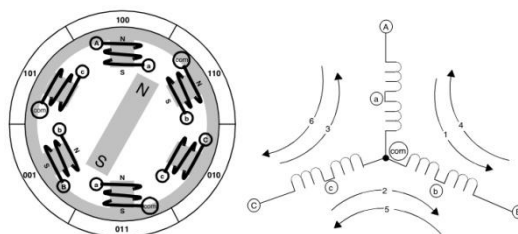
Silnik krokowy z definicji to taki napęd, w którym przemieszczenie – kąt obrotu wałka silnika jest wprost proporcjonalny do liczby dostarczonych impulsów sterujących a prędkość kątowa – średnia jest wprost proporcjonalna do częstotliwości dostarczanych impulsów sterujących. Silnik krokowy jest napędem o działaniu dyskretnym, każdemu impulsowi sterującemu dostarczonemu do silnika odpowiada elementarne przemieszczenie kątowe ϕ .

Do zalet silników krokowych można zaliczyć []: łatwość sterowania prędkością, praca przy niskich prędkościach obrotowych, wysoki moment obrotowy, możliwość zmiany kierunku, duża niezawodność oraz prostotę działania. Natomiast do wad można zaliczyć: drgania i rezonans wynikający ze skokowego charakteru ruchu wirnika. Silniki krokowe można podzielić na trzy najbardziej rozpowszechnione grupy: o zmiennej reluktancji, z magnesem trwałym i hybrydowe. Obecnie produkowane są dwa ostatnie typy silników.



Rys. 1. Konfiguracja zasilania cewek silnika krokowego [5]

Konstrukcja silnika bezszczotkowego z wirującym magnesem (BLDC - Brushless DC Motor) jest odwrotnością silnika komutatorowego z magnesem trwałym. Wirnik wykonany jest z odpowiednio ukształtowanego magnesu trwałego, a uzwojenie znajduje się w stojanie. Zgodnie z tradycyjnym podziałem silniki tego typu są zaliczane do grupy silników prądu stałego. W praktyce prądem stałym zasila się elektroniczny sterownik silnika, natomiast sam silnik jest zasilany falą prostokątną lub przebiegiem impulsowym przypominającym sinusoidę. Wyróżniamy silniki 2-fazowe i 3-fazowe. Ze względu na sposób sterowania uzwojenia, unipolarne i bipolarne. Ze wszystkich silników BLDC najczęściej stosowane w urządzeniach mechatronicznych są silniki 3-fazowe bipolarne.



Rys. 2. Konfiguracja uzwojenia silnika 3-fazowego BLDC [4]

Można przyjąć, że silniki 3-fazowe bipolarne – BLDC są pewną pod grupą silników krokowych o kroku 0° lub 20° , niektóre sterowniki scalone mogą być stosowane do obu typów silników. Kryterium odróżniającym silniki krokowe od BLDC może być fakt, że dla poprawnej pracy silnika BLDC, sterownik musi dysponować sygnałem zwrotnym o aktualnym położeniu kątowym wirnika (czujnik Halla). Silniki krokowe mogą działać w otwartej pętli. Porównując oba typy można powiedzieć że [2]:

- zjawisko rezonansu jest znacznie mniejsze dla silników BLDC – co pozwala znacznie zwiększyć prędkość tego typu silników,
- przy takiej samej wartości momentu obrotowego silnik BLDC może być mniejszy i lżejszy od silnika krokowego,
- silniki BLDC nie gubią kroków ze względu na pętle sprzężenia zwrotnego,
- bardziej rozbudowane sterownik dla silników BLDC,
- wszędzie tam gdzie konieczne jest precyzyjne pozycjonowanie lub szybkość zmiany kierunków i prędkości obrotowej, silnik BLDC nie zastąpi krokowego, ale w wielu innych aplikacjach silniki te mogą być stosowane.

3. Projekt systemu automatycznego pozycjonowania wraz z budową prototypu

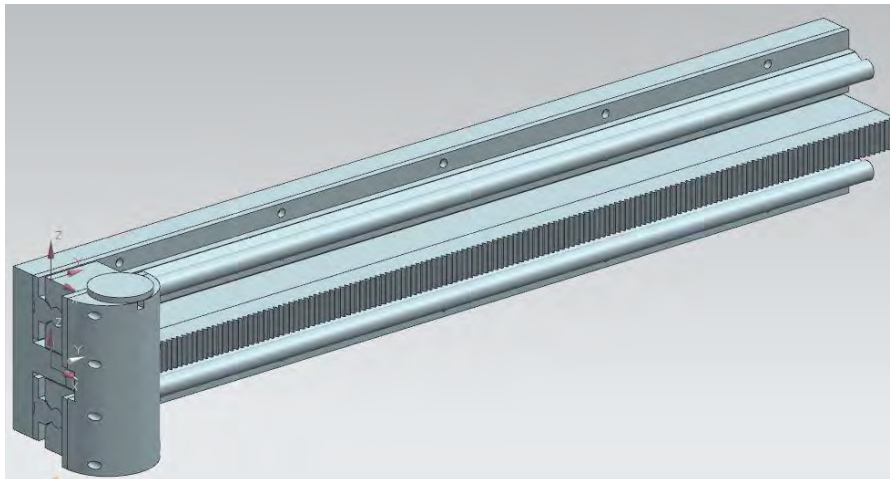
Propozycja systemu automatycznego pozycjonowania został zaprojektowany dla trójwymiarowego systemu cyfrowej korelacji obrazu *Dantec Q-400* w celu zautomatyzowania procesu pozycjonowania kamer do późniejszej kalibracji systemu.



Rys. 3. System cyfrowej korelacji obrazu *Dantec Q-400* [3]

Dantec Q-400 to optyczny, trójwymiarowy i bezdotykowy system do pomiaru odkształceń i przemieszczeń w czasie rzeczywistym. Z punktu widzenia mechaniki system składa się z dwóch kamer z obiektywami, belki oraz oświetlacza. Kamery mogą się przesuwać wzdłuż belki mocującej oraz wykonywać obrót w jej płaszczyźnie podłużnej. Ruchy każdej z kamer są niezależne, położenie zostaje utrzymane poprzez dokręcenie śrub motylkowych. Manualne dostosowanie pozycji kamer do procesu kalibracji jest czynnością żmudną i czasochłonna dlatego zautomatyzowanie jest uzasadnione.

Głównym założeniem projektu jest pełna automatyzacja ustawienia pozycji kamer gdzie obie kamery zostaną ustawione w tej samej odległości względem płyty kalibracyjnej. Konstrukcja została zaprojektowana od podstaw w oprogramowaniu *Siemens NX*, w taki sposób aby była dostosowana do montażu kamer oraz oświetlacza. Elementem nośnym jest rura prostokątna do której zostały przymocowane prowadnice liniowe. Napęd wzdłużny realizowany jest przez listwę zębata znajdująca się pomiędzy prowadnicami, przeniesienie napędu zapewnia koło zębate umieszczone w głowicy jezdnej.



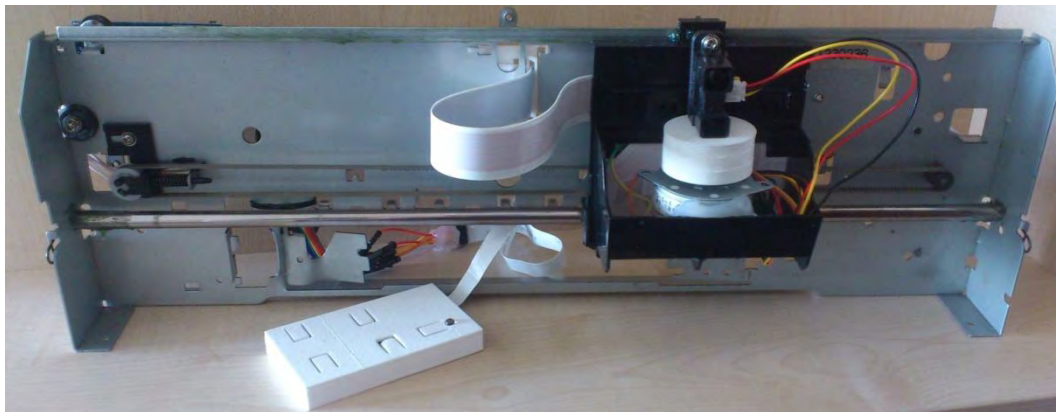
Rys. 3. Widok izometryczny konstrukcji mechanicznej systemu automatycznego pozycjonowania

Układ napędowy przypadający na pojedynczą głowicę jezdną to dwa silniki krokowe z przekładnią planetarną o bardzo dużej rozdzielczości kroków. Pełen obrót wału wyjściowego to 2000 kroków silnika. Taka rozdzielczość zapewni dokładne pozycjonowanie. Oba silniki zabudowane są w głowicy jezdnej w układzie pionowym. Wał silnik odpowiedzialny za obrót kamery w płaszczyźnie podłużnej belki jest mocowany bezpośrednio do tarczy montażowej kamery w górnej części głowicy jezdnej.

System detekcji pozycji płyty wzorcowej został oparty na ultradźwiękowych sensorach odległości umieszczonych na obrotowej tarczy montażowej kamery. Głowice wyposażone są w transoptory, które spełniają rolę krańcówek zapewniających bezkolizyjną pracę. System sterowany jest poprzez dwa mikrokontrolery *Arduino UNO* oparte na ATmega328 zasilane zasilaczem impulsowym 12 [V], sterowanie silnikami krokowymi zrealizowano poprzez dwukanałowe mostki H – chip L293D.

W celu weryfikacji działania systemu zbudowany został prototyp na podstawie elementów starych drukarek atramentowych. Napęd wzdłużny wózka zrealizowany jest poprzez przekładnię pasową. Napęd kamery oparty jest na silniku umieszczonym w koszu tonerowym, gdzie na wale silnika umieszczony jest ultradźwiękowy czujnik odległości. Sterowanie systemem możliwe jest przy pomocy przewodowego pilota.

System posiada dwa tryby pracy: manualny i automatyczny. Tryb manualny umożliwia dowolne ustawienie pozycji wózka głowicy oraz obrotu tarczy montażowej kamery - czujnika. Tryb automatyczny dostosowuje pozycję głowicy wózka oraz obrót kamery względem najbliższego przedmiotu w polu pomiarowym czujnika odległości. Ustalanie kąta obrotu kamery jest możliwe dzięki iteracyjnej pracy systemu pomiarowemu. Algorytm zostaje uruchomiony po przyjęciu pozycji krańcowej tarczy montażowej kamery – czujnika. Silnik krokowy wykonuje obrót o określoną ilość kroków a jednocześnie czujnik odległości dokonuje pomiaru po wykonaniu każdego kroku silnika. Zbiór danych zostaje zapisany do tablicy. Po wykonaniu pomiaru tablica zostaje przeszukana pod kątem najmniejszej zapisanej odległości dla danego kroku. Następnie silnik obraca się w stronę przeciwną, aby zatrzymać się w kroku gdzie odległość jest najmniejsza.



Rys. 3. Prototyp systemu automatycznego pozycjonowania

Literatura

1. Kosmol J., Napędy mechatroniczne, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice (20 3) .
2. Przepiórkowski J., Silniki elektryczne w praktyce elektronika, BTC, Warszawa (200).
3. Dantec Dynamics (<http://www.dantecdynamics.com/q-400-dic>) [Online] (25.04.2015).
4. RC and BLDC motor control (<http://bldc.wikidot.com/bldc-and-8051>) [Online] (11.01.2015).
5. Silniki krokowe i sterowniki silników krokowych (<http://silniki-krokowe.com.pl/informacje-techniczne/silniki-krokowe-zasada-dzialania-2/>) [Online] (12.01.2015).

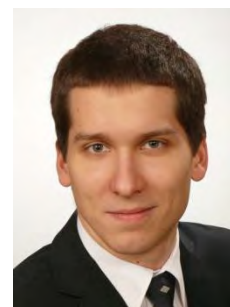
IDENTYFIKACJA RODZAJU WZMOCNIENIA STALI

inż. PRZEMYSŁAW SEBASTJAN

Mechanika i Budowa Maszyn, MB4, semestr III, 2 stopień

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

Streszczenie. W artykule został zawarty krótki opis procesu identyfikacji rodzaju wzmocnienia stali S420MC, wykorzystywanej do produkcji tłoczonych podzespołów amortyzatorów samochodowych. Proces ten składał się z eksperymentu przeprowadzonego na próbce wykonanej z w/w materiału oraz symulacji MES, której celem było znalezienie danych materiałowych, dla których wyniki symulacji i wyniki eksperymentu pokrywały się.



1. Wprowadzenie

Rozpatrywana stal S420MC należy do ferrytyczno-perlitycznych stali konstrukcyjnych, walcowanych na gorąco. Tego typu stale charakteryzują się dużą granicą plastyczności R_e oraz wysoką wartością wydłużenia odpowiadającego wytrzymałości na rozciąganie R_m , co tłumaczy ich szerokie zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym. Celem pracy było wyznaczenie wartości parametrów wzmocnienia mieszane go stali S420MC za pomocą próby cyklicznego gięcia próbki stalowej.

2. Eksperyment

W celu kalibracji danych materiałowych użyto próbki płaskiej o kształcie klepsydry, wyciętej strumieniem wody z 3mm blachy stalowej S420MC, zaprezentowanej na rys. 1. Podcięcia w próbce wynikają z potrzeby oddzielenia naprężeń powstałych w skutek zacisku śrub od naprężeń powstałych w wyniku oddziaływania głowicy na próbkę.



Rys. . P róbka do badań materiałowych

Oddziaływanie głowicy maszyny wytrzymałościowej Instron z zamontowaną okrągłą płytą o grubości mm na próbkę o grubości 3mm powoduje powstanie maksymalnych naprężeń zredukowanych von Misesa nie w strefie zacisku próbki, a właśnie w przewężeniu. Dzięki temu zabiegowi siła dokręcenia śrub nie wpływa znacząco na stan naprężenia w rozpatrywanej części próbki, a tym samym nie zakłóca procesu identyfikacji parametrów materiałowych.

Rys. 2 prezentuje zamontowaną próbkę poddaną obciążeniu powodującemu uplastycznienie materiału w strefie przewężenia.



Rys. 2. Strefa kontaktu głowicy oraz próbki

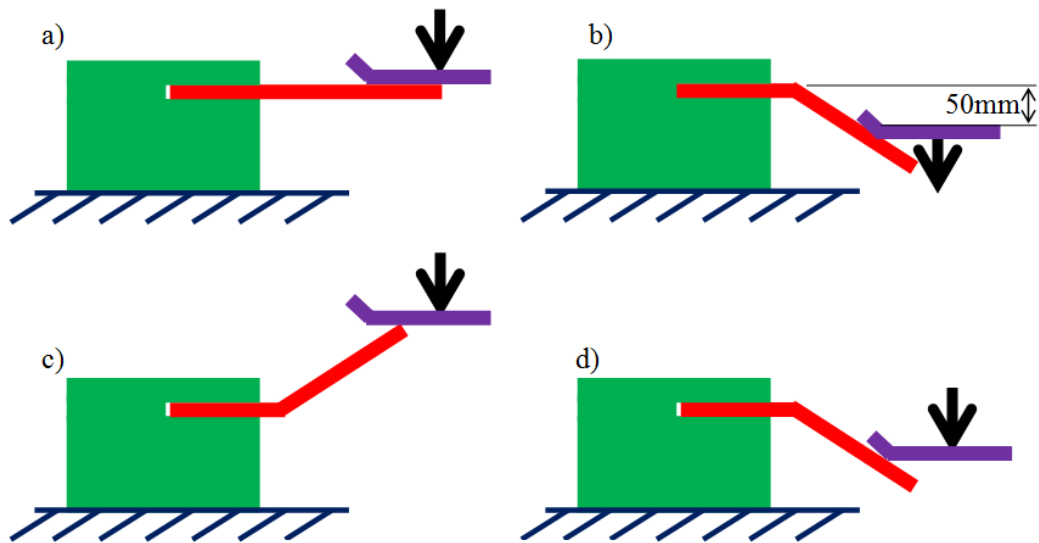
Aby zminimalizować działanie sił tarcia w układzie, na próbkę (w miejscach kontaktu z głowicą) została nałożona warstwa wazeliny technicznej (rys. 3).



Rys. 3. Próbkę z warstwą wazeliny technicznej

Proces obciążania próbki składał się z czterech kolejnych cykli gięcia. Na rys. 4 zaprezentowany został schematyczny proces obciążania oraz obracania próbki. Kolorem zielonym oznaczono zespół uchwytów, czerwonym próbkę, natomiast kolorem fioletowym

plytę, za pomocą której obciążenie przekazywane było na próbkę. Rys. 4 a) oraz 4 b) obrazują pierwszy cykl gięcia, z kolei 4 c) ukazuje obrót próbki, w celu jej odgięcia (drugi i czwarty cykl), a rys. 4 d) cykl trzeci.

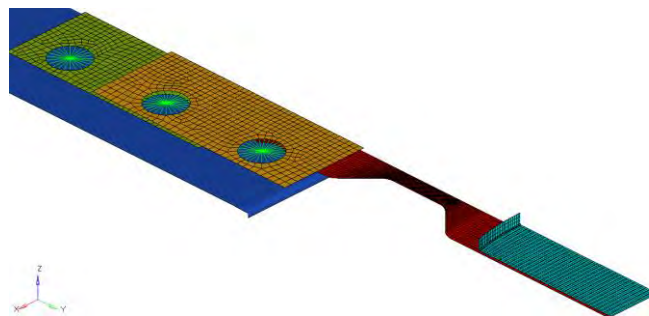


Rys. 4. Schemat obciążania próbki

Sterowanie obciążeniem odbywało się poprzez nadanie przemieszczenia głowicy, za każdym razem do tego samego położenia, tj. - 0 mm względem położenia początkowego. Dla danej wartości przemieszczenia odczytywano i zapisywano wartość siły reakcji za pomocą programu Instron BlueHill 2.

3. Model MES wraz z analizą naprzemiennego gięcia próbek

W celu przeprowadzenia kalibracji własności materiałowych model numeryczny układu powinien posiadać możliwie najmniejszą liczbę stopni swobody (konieczność wielokrotnego przeprowadzania analiz dla różnych danych materiałowych), przy wymaganej dokładności modelowania. Na potrzeby analiz cyklicznego gięcia próbek, stworzony został model połówkowy o 232 stopniach swobody, składający się z ponad 000 elementów powłokowych, 2 elementów belkowych oraz 2 powierzchni sztywnych. Model ten został przedstawiony na rys. 5.

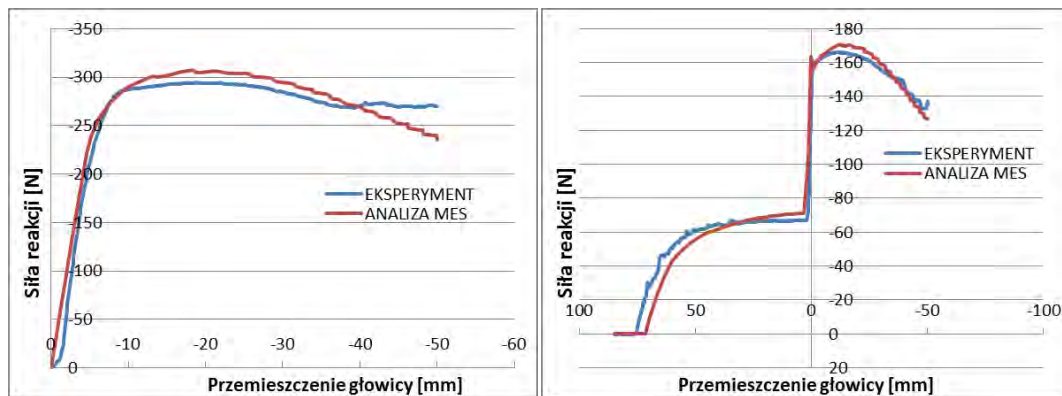


Rys. 5. Model numeryczny rozpatrywanego układu

Proces mocowania próbki w analizie jest analogiczny do procesu z eksperymentu. Proces obciążania próbki został rozwiązany poprzez nadanie warunku brzegowego przemieszczenia w osi pionowej na węzeł sterujący powierzchni sztywnej (na rys. jest to niebieski komponent w dolnym prawym rogu) przy jednoczesnym zapisywaniu siły reakcji (w kierunku pionowym). Wszystkie obliczenia przeprowadzono w programie Abaqus/Standard, natomiast do przygotowania modelu posłużył HyperMesh 2.0.

Do wyznaczenia danych materiałowych użyto programu Isight. Za dane początkowe materiałowe posłużyły wartości tablicowe, które nieznacznie różniły się od tych otrzymanych w eksperymencie. Uchwycenie efektu Bauschingera i wzmocnienia mieszanego udało się, poprzez wprowadzanie parametrów wzmocnienia mieszanego wg teorii Chaboche'a.

Wyniki eksperymentu oraz symulacji MES dla wartości uzyskanych po procesie identyfikacji danych materiałowych prezentuje rys. .



Rys. . W wykresy siła-przemieszczenie dla cyklu a) pierwszego, b) trzeciego

4. Wnioski

Kształt krzywych siła-przemieszczenie uzyskanych w eksperymencie odpowiada kształtem krzywym uzyskanym w symulacjach MES tylko w przypadku, gdy użyta zostaje teoria dużych odkształceń.

Uproszczenie modelu numerycznego nie musi prowadzić do zmniejszenia dokładności obliczeń. Istotny jest dobór typu elementu oraz parametrów wzajemnych oddziaływań między ciałami, jak współczynnik tarcia czy sformułowanie interakcji kontaktowych.

Istotne jest, aby elementy skończone, szczególnie w obszarze, w którym przedmiotem zainteresowania jest dokładny rozkład naprężeń, były zbliżone do idealnych. Im element czworokątny bardziej odbiega kształtem od kwadratu, tym większe błędy mogą być generowane przy obliczaniu przemieszczeń i odkształceń.

Literatura

1. Chaboche J.L., Lemaitre J: Mechanics of solid materials. Cambridge University Press, Cambridge (2002).
2. Nawal K. Prinja, Anup K. Puri: An Introduction to the Use of Material Models in FE. NAFEMS 2005.
3. Abaqus Analysis User's Guide (v. 3)
4. Karolczuk A.: Modelowanie odkształceń plastycznych przy wieloosiowym i zmiennym stanie naprężenia. Wieloosiowe Zmęczenie Materiałów i Elementów Konstrukcyjnych. 2 -2 . 0 .20 2 P oznań.

CIEPLNO-PRZEPLYWOWA ANALIZA NUMERYCZNA PRZEPONOWEGO WYMIENNIKA CIEPŁA

inż. DANIEL SUCHOSTAWSKI

Mechanika i Budowa Maszyn, MB4, semestr I, 2 stopień

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Adam Długosz

Streszczenie. Celem badań było wyznaczenie pola temperatury dla wybranego typu rekuperatora. Wyniki przedstawionych badań pozwalają na określenie efektywności cieplnej wymiennika. Pozwala to szacować ilości energii oszczędzonej w ośrodku dzięki zastosowaniu rekuperatora. W celu rozwiązania powyższego zadania wykonano szereg analiz cieplno-przepływowych z wykorzystaniem MES w oprogramowaniu Ansys v15 w module CFX.



1. Rekuperator krzyżowoprądowy - wprowadzenie

Zadaniem wymiennika przeponowego jest odprowadzenie ciepła z jednego czynnika do drugiego, bez wzajemnego mieszania się ze sobą. W tym celu wykorzystywane jest medium pośredniczące do transferu energii czyli przegrody, które oddzielają dwa czynniki. Pozwala to na przykład na odprowadzenie energii cieplnej z czynnika zużytego do czynnika nowego, przeznaczonego do eksploatacji.

2. Podstawowe pojęcia wymiany ciepła wykorzystywanego w wymienniku ciepła

Przewodzenie ciepła jest określone prawem Fouriera, które dla gęstości strumienia ciepła można wyrazić następująco [] :

$$\dot{q} = -\lambda \text{ grad } t, \quad (1)$$

gdzie:

\dot{q} – gęstość strumienia ciepła (strumień jednostkowy),

λ – współczynnika przewodzenia ciepła,

t – temperatura.

Konwekcja charakteryzuje się tym, że w płynie lub gazie równocześnie z przewodzeniem występuje ruch makroskopowy cząstek płynu. Podstawowe dla konwekcji prawo zostało sformułowane przez Newtona. We współczesnym zapisie ma ono postać:

$$\dot{q} = \alpha \cdot \Delta t, \quad (2)$$

gdzie α jest współczynnikiem wnikania (lub przejmowania) ciepła, zaś Δt jest różnicą temperatur powierzchni ciała i płynu (średniej temperatury).

Dla przepływu ciepła pomiędzy dwoma płynami oddzielonymi przegrodą, nazywanego przenikaniem ciepła, stosuje się równanie Pecleta:

$$\dot{q} = k \cdot (t_1 - t_2), \quad (3)$$

gdzie k to współczynnik przenikania ciepła, który ujmuje wszystkie wcześniej wymienione zjawiska.

Równanie Pecleta uzupełnione równaniami bilansu energii dla płynów jest podstawą teorii wymienników ciepła [1].

W celu obliczenia efektu wymiany ciepła stosuje się równanie strumienia jednostkowego i pola powierzchni wymiany ciepła:

$$d\dot{Q} = \dot{q}dA. \quad (4)$$

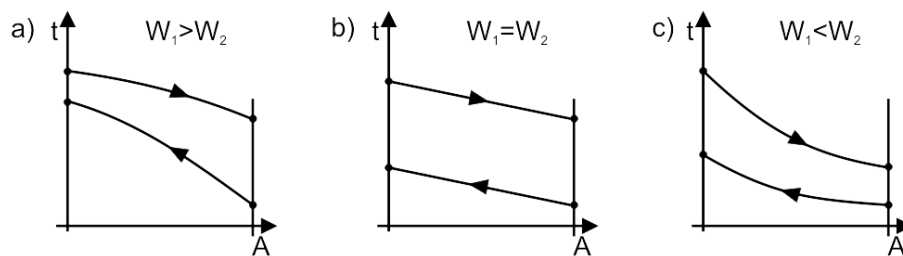
Jednostką strumienia ciepła w układzie SI jest W (wat), a gęstości strumienia ciepła jest odpowiednio $\frac{W}{m^2}$. Zgodnie z definicją strumienia ciepła (4) oraz równaniem Pecleta (3) otrzymujemy:

$$\dot{Q} = kA(t_1 - t_2). \quad (5)$$

Ponadto strumień ciepła w wymienniku cieplnym można opisać poprzez zmianę entalpii dla obu strumieni:

$$d\dot{Q} = -d\dot{i}_1 = -W_1 dt_1 = d\dot{i}_2 = W_2 dt_2, \quad (6)$$

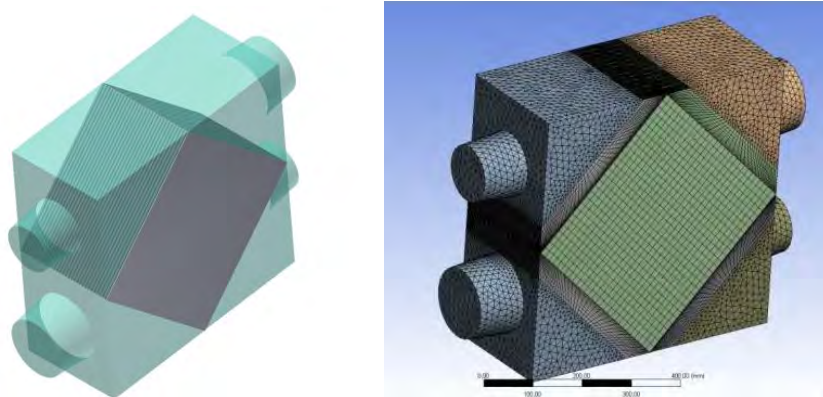
gdzie W_1, W_2 to pojemność cieplna strumienia poszczególnych czynników. Od ich stosunku zależy zatem sprawność wymiennika ciepła. Dla przeciwnieprądowego rekuperatora będącego uproszczeniem wymiennika krzyżowoprądowego rozróżnia się trzy rodzaje charakterystyk rozkładu temperatur zależnych od stosunku W_1 i W_2 :



Rys. 2. C charakterystyczne rozkłady temperatur w wymienniku przeciwnieprądowym: a) dla większej pojemności cieplnej strumienia ogrzewającego; b) dla takiej samej pojemności cieplnej ogrzewającego i nagrzewanego, c) dla większej pojemności cieplnej strumienia nagrzewanego [2]

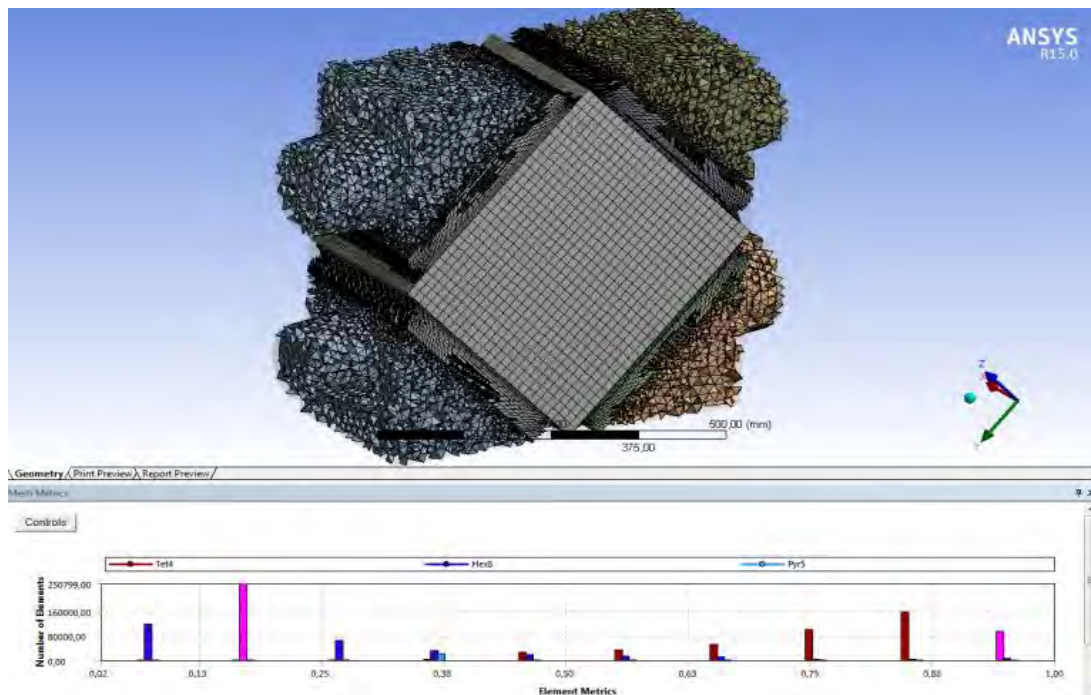
3. Model numeryczny rekuperatora w środowisku Ansys Workbench V15

W celu wykonania analizy metodą elementów skończonych wykonano model geometryczny, a następnie dokonano dyskretyzacji. Model pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Od strony lewej: model geometryczny wykonany w programie Inventor 2014; widok siatki nałożonej na model w programie Ansys v15

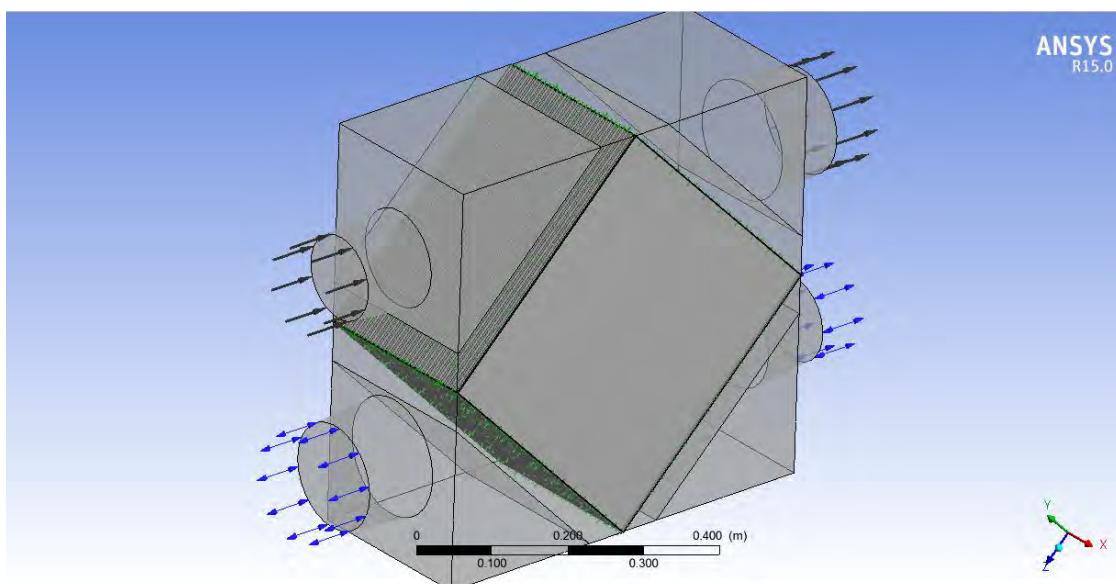
Ilość elementów, z których została wykonana siatka wynosi 440, generując tym samym ilość węzłów równą 3. Przy zastosowaniu metody Element Quality widoczny jest udział różnych kształtów elementów w wykonaniu siatki – najczęściej występującymi są elementy heksagonalne oraz tetragonalne.



Rys. 3. Charakterystyka geometrii elementów siatki

Kolejnym krokiem było wprowadzenie warunków brzegowych w postaci temperatur na wlotach, prędkości na wylotach oraz własności fizycznych wykorzystywanego powietrza i aluminium - materiału wykorzystanego na wykonanie przegród. Należy zwrócić uwagę, że w rozpatrywanej analizie przyjęto takie same parametry fizyczne dla powietrza wlotowego i wylotowego, zatem pojemność cieplna dla obu czynników jest taka sama.

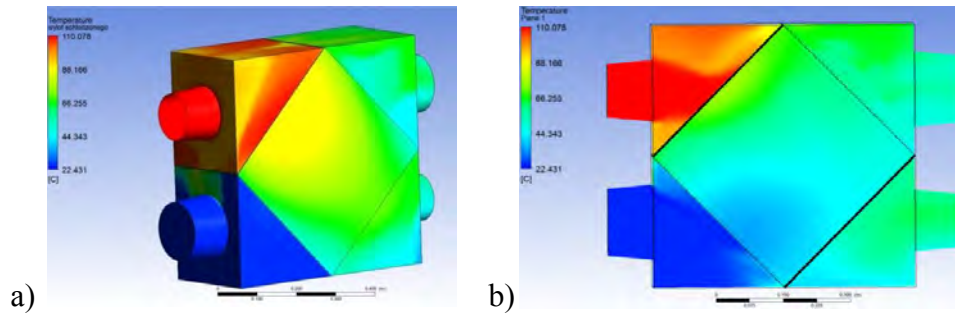
Dane do analizy numerycznej wprowadzono na podstawie charakterystyki dostarczonej przez producenta krzyżowoprądowych wymienników ciepła. Model z warunkami brzegowymi pokazano na rysunku 4.



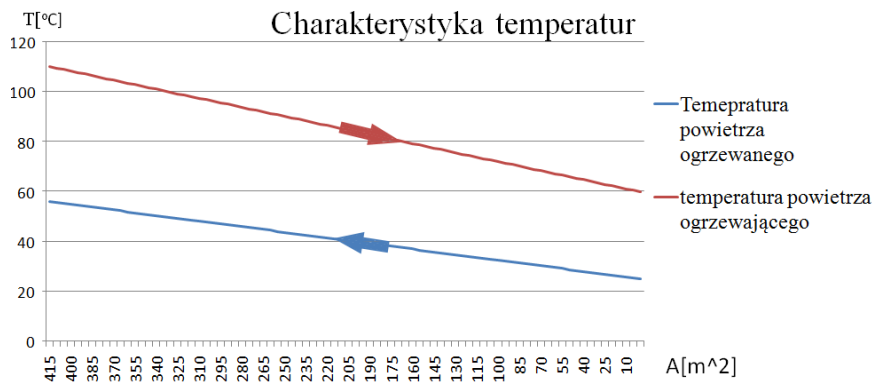
Rys. 4. Model wymiennika ciepła po założeniu warunków brzegowych

4. Podsumowanie oraz wnioski

Na rys. przedstawiono rozkład temperatury w wymienniku uzyskany w wyniku symulacji numerycznej.



Rys. . Rozkład temperatury w wymienniku ciepła:
a) widok ogólny wymiennika ciepła; b) widok w przekroju rekuperatora



Rys. . Charakterystyka rozkładu temperatury obliczanego numerycznie w wymienniku ciepła

Na podstawie przeprowadzonych symulacji numerycznych można wywnioskować charakterystyczny, dla tego typu rekuperatora przepływ w postaci krzyżowych strumieni ciepła. Z Rys. wykonanego na podstawie otrzymanych wyników, można zaobserwować zmianę temperatur powietrza ogrzewanego i ogrzewającego, w szczególności należy zwrócić uwagę na wpływ wzrostu powierzchni wymiany ciepła (oś pozioma) na wzrost temperatury powietrza ogrzewanego. Można zatem wywnioskować, że dla pola powierzchni czynnej rekuperatora dążącej do nieskończoności można otrzymać pełną odwracalność cieplną [3]. Należy także zwrócić na uwagę na podobieństwo charakterystyki z Rys. i Rys. podpunktu b) gdzie $\dot{W}_1 = \dot{W}_2$. Korzystając natomiast ze wzoru (), na podstawie otrzymanych wyników analizy otrzymano moc badanego wymiennika ciepła, wynoszącą $Q \approx 4,2kW$.

Literatura

1. Kostowski E. (red.), Zbiór zadań z przepływu ciepła, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice (1996).
2. Kostowski E., Przepływ ciepła, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice (2000).
3. Gdula S.J., Podstawy techniki cieplnej, Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej, Gliwice (1976).

WPLYW GEOMETRII ZAWORU NA CHARAKTERYSTYKI PRZEPLYWU

inż. RAFAŁ ŚWITAŁA

Mechanika i Budowa Maszyn, MB4, semestr I, 2 stopień

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Adam Długosz

Streszczenie. Najważniejszym elementem amortyzatora hydraulicznego jest zawór, od którego zależy charakterystyka jego pracy. Celem badań wykonanych w pracy było zapoznanie się ze zjawiskami zachodzącymi w zaworze amortyzatora samochodowego, kolejno modyfikując jego geometrię poprzez przysłanianie wylotu dyskami o różnych średnicach. Geometrię przygotowano przy pomocy oprogramowania Autodesk Inventor 2014, natomiast symulacje przeprowadzono w programie ANSYS .0. korzystając z modułu CFX.

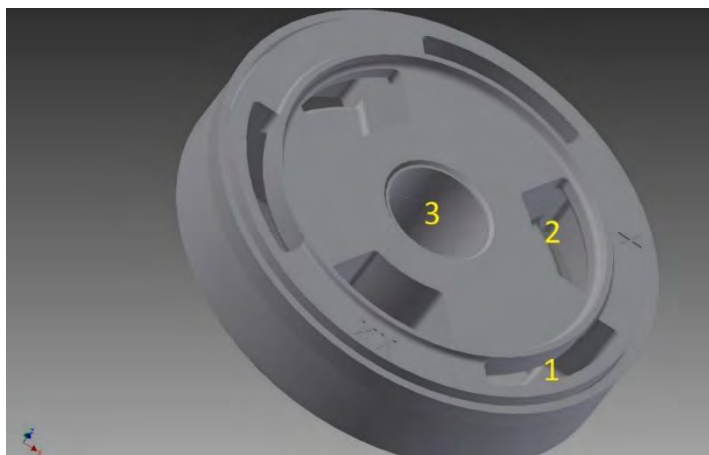


1. Wprowadzenie

Zagadnienia dynamiki płynów są możliwe do rozwiązania przy użyciu metod komputerowych dzięki dyskretyzacji badanych modeli i rozwiązaniu cząstkowych równań różniczkowych. Dzięki bujnemu rozwojowi komputerowej mechaniki płynów możliwe jest przybliżone przewidzenie takich parametrów badanego obiektu jak ciśnienie, temperatura czy rozkład prędkości [2, 3]. Wartości te są kluczowe w sporządzaniu wykresów spadków ciśnień i co za tym idzie doborze charakterystyki pracy amortyzatorów samochodowych. Przeprowadzenie symulacji numerycznych znacznie redukuje konieczność wytwarzania prototypowych złożeń zaworów i dysków.

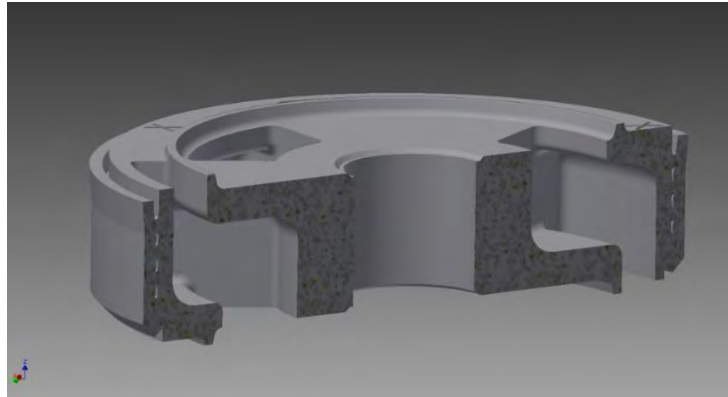
2. Budowa i zasada pracy zaworu

Celem niniejszej pracy jest numeryczna symulacja przepływu przez zawór w amortyzatorze. Na Rys. 1 oraz Rys. 2 przedstawiono budowę analizowanego zaworu.



Rys 1. Model zaworu

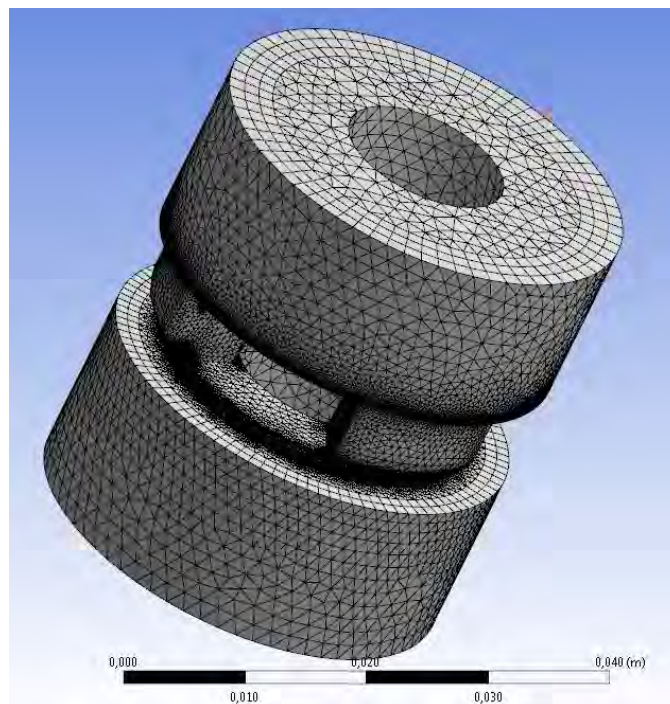
Numerem trzy oznaczono na rys. 2 otwór, przez który przechodzi tłoczyśko. Ma on średnicę 4mm. Numery jeden oraz dwa są wejściami do kanałów przepływowych. Olej wpływa kanałem nr 1 i wypływa kanałem nr 2 (Rys. 2).



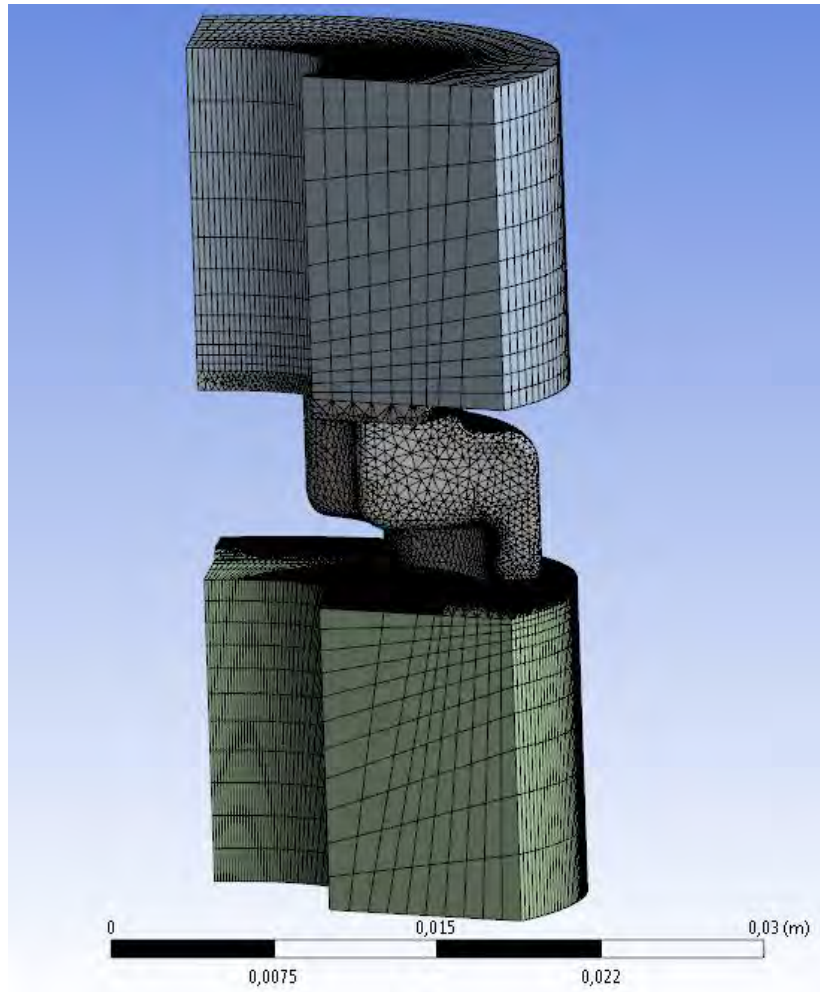
Rys 2. Przekrój przez model zaworu

3. Model numeryczny zaworu

Pierwszym zadaniem, które wykonano, było odpowiednie przemodelowanie zaworu tak, aby można było przeprowadzić odpowiednie symulacje numeryczne mechaniki płynów. Na potrzeby badań wpływu geometrii zaworu na charakterystyki przepływu przygotowano trzy różne modele zaworu. Założono zaślepienie płaszczyzny wlotowej wokół tłoczyśka i pozostawienie jedynie zewnętrznego pierścienia. Następnie podzielono model na trzy równe części aby zbadać różnicę w uzyskanych wynikach pomiędzy całym zaworem a jego częścią. Rysunki nr 3 oraz nr 4 pokazują przykładowe geometrie pokryte siatkami MES.



Rys. 3. Model całego zaworu nieprzysłoniętego dyskiem



Rys. 4. Model 1/3 zaworu nieprzysłoniętego dyskiem

4. Warunki brzegowe, parametry oleju oraz wyniki symulacji

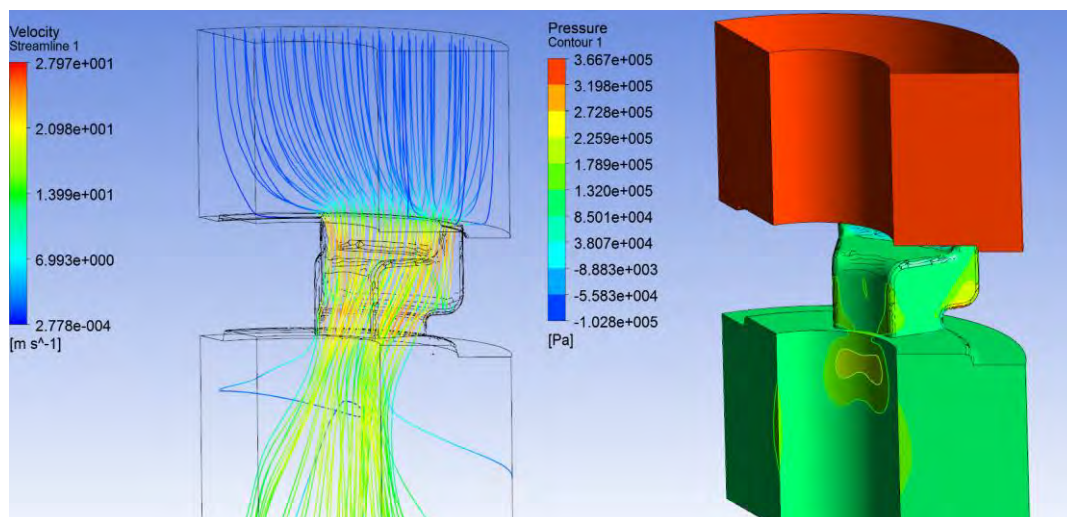
Badaną cieczą w przypadku symulacji przepływu przez zawór w amortyzatorze jest olej klasyfikowany wg standardu SAE [4]. Posiada on następujące parametry:

1. Gęstość w st. C wynosi $840-850 \text{ kg/m}^3$. Dla badań przyjęto 840 kg/m^3 .
2. Lepkość dynamiczna na poziomie $0.0204 \text{ Pa} \cdot \text{s}$.
3. Masa molowa wynosi 400 kg/kmol .

Dla przeprowadzonych symulacji numerycznych zdefiniowano następujące typy warunków brzegowych [4]:

- ściany wewnętrzne modelu – wall (zerowa prędkość płynu - tzw. warunek nieslizgania się płynu),
- wlot zaworu – mass flow inlet (przepływ masowy, podawany w kg/s),
- wylot zaworu – opened outlet (swobodny wypływ z uwzględnieniem ciśnienia zewnętrznego),
- płaszczyzny symetrii – symmetry (dla modelu będącego 1/3 geometrii).

Na Rys. 5 przedstawiono wyniki uzyskane dla 1/3 geometrii dla przepływu ustalonego na poziomie 84 l/min , ciśnieniu względnym 1 bar i turbulencjach obliczanych metodą BSL Reynolds Stress.



Rys. 5 Wyniki symulacji numerycznej -rozkład ciśnień i linie strug

5. Wnioski

Wyniki uzyskane dla pełnej geometrii, jak i dla modelu będącego 3 właściwego zaworu nieznacznie różniły się od siebie. Ponadto dokonano weryfikacji rezultatów symulacji numerycznej z badaniami przeprowadzonymi na maszynie przepływowej, uznając je za wiarygodne. Zaobserwowano znaczny wzrost prędkości przepływu i ciśnienia podczas zarówno przysłaniania wylotu z zaworu dyskami oraz zwiększania prędkości przepływu oleju przez badany zawór.

Literatura

1. Elżbieta Beran „Wpływ budowy chemicznej bazowych olejów smarowych na ich biodegradowalność i wybrane własności eksploatacyjne”, Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław (200) .
2. Thomas D. Gillespie „Fundamentals of Vehicle Dynamics”, Society of Automotive Engineers Inc. (2005).
3. Gryboś R. „Podstawy mechaniki płynów”, PWN Warszawa () .
4. SAS IP. „Using Inlets, Outlets and Openings” [online].

ANALIZA I PROJEKTOWANIE NAROŻNEGO ZAWIESZENIA SERPENTYNOWEGO MIKROAKCELEROMETRU

inż. PATRYK WARZYBOK

Automatyka i Robotyka, AC4, semestr I, 2 stopień

Opiekun naukowy: dr inż. Grzegorz Dziatkiewicz

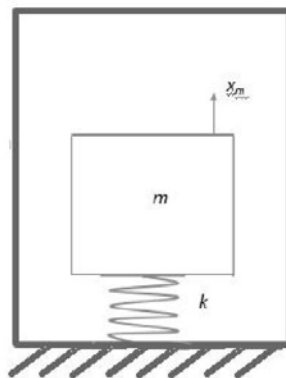
Streszczenie. W niniejszym artykule przedstawiono analizę wytrzymałościową narożnego zawieszenia serpentynowego mikroakcelerometru. Przeprowadzono obliczenia analityczne z zastosowaniem twierdzenia Castigliano oraz Menabrea-Castigliano, a następnie obliczenia numeryczne. Przedstawiono porównanie wyników. Następnie rozpatrzono przykład zaprojektowania elementów zawieszenia w zależności od wartości wymaganej podstawowej częstości drgań własnych układu.



1. Wprowadzenie

Akcelerometry MEMS (z ang. Micro ElectroMechanical Systems) są elektromechanicznymi urządzeniami, służącymi do pomiaru przyspieszeń, wykonanymi w skali mikro, czyli w zakresie wymiarów od 0,00 do 0, mm. Technologia MEMS polega na połączeniu elementów mechanicznych z układami elektrycznymi. Układy wyprodukowane w technologii MEMS mogą pełnić wiele różnych funkcji w układach elektronicznych, mechanicznych, elektromechanicznych i innych. Najczęściej służą jako sensory, akтуatory lub pomagają kondycjonować sygnały odbierane z sensorów [2].

Akcelerometr składa się z masy sejsmicznej, zamocowanej za pomocą zawieszenia do obudowy. Model akcelerometru w uproszczonej postaci przedstawiono na rysunku 1.

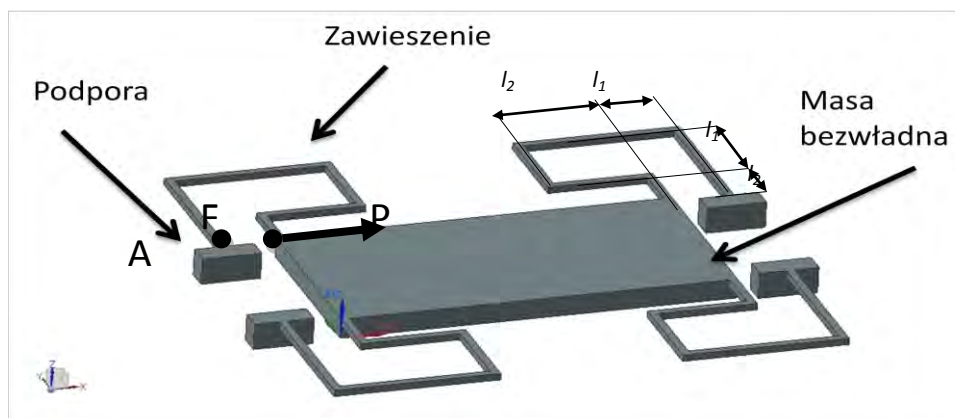


Rys. 1. Model akcelerometru

2. Model zawieszenia

Celem pracy jest analiza modelu zawieszenia serpentynowego, składającego się z 4 jednakowych elementów, zbudowanych z polikrystalicznego krzemu. Pojedynczy element zawieszenia składa się z odcinków. Zawiesie jest połączone z masą bezwładną i podporą.

Schemat modelu, dla którego zostanie przeprowadzona analiza, przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Model akcelerometru MEMS z zawieszeniem

Geometria masy bezwładnej to prostokąt o wymiarach: długość 100 μm , szerokość 10 μm , grubość 1 μm .

3. Obliczenia

Celem obliczeń jest wyznaczenie sztywności i podstawowej częstotliwości drgań własnych analizowanego zawieszenia. Obliczenia analityczne zostały wykonane przy zastosowaniu twierdzeń Castigliano oraz Menabrea-Castigliano. Obejmują one wyznaczenie przemieszczenia punktu połączenia masy bezwładnej z zawieszeniem (punkt F, jak na rys. 2). W punkcie podparcia (punkt A) przyjęto utwierdzenie sztywne – odebrano 3 stopnie swobody, natomiast w punkcie połączenia (punkt F) przyjęto, że punkt ten jest prowadzony (wynika to z charakteru połączenia masy z zawiesiem) – odebrano 2 stopnie swobody. Sztywność oraz częstotliwość drgań własnych układu wyznaczono na podstawie zależności podanych poniżej [] :

$$k_p = \frac{P}{u_p}, \quad (1)$$

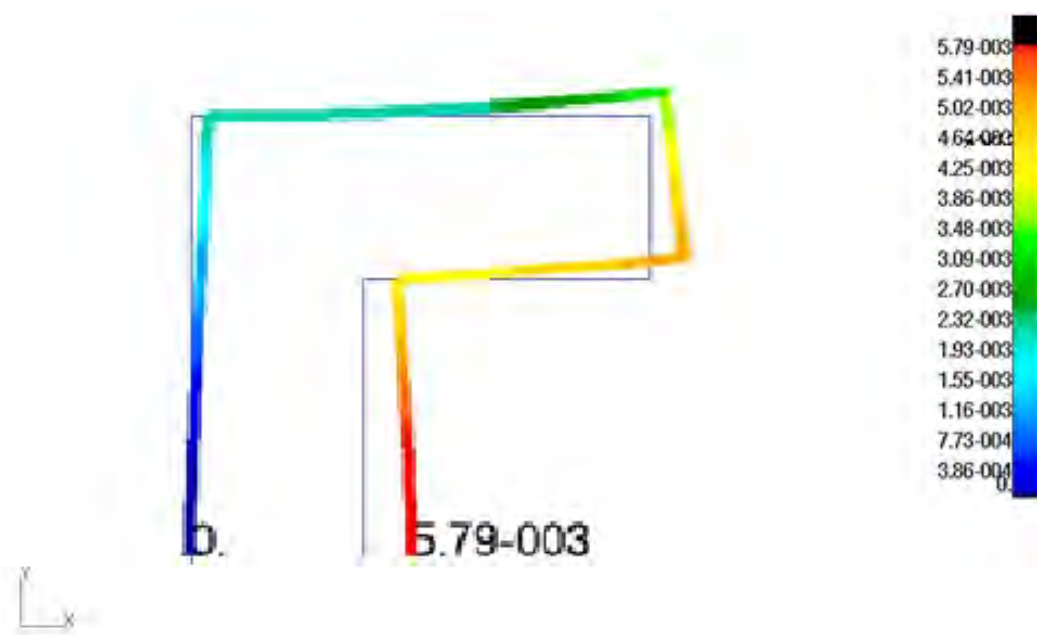
gdzie k_p to sztywność w kierunku działania siły P , u_p to przemieszczenie punktu przyłożenia siły P , P to siła obciążająca. Podstawową częstotliwość drgań własnych układu f można wyznaczyć z zależności (2).

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4k_p}{m}}, \quad (2)$$

gdzie m to wielkość masy bezwładnej. Liczba 4 wynika z modelu połączenia równoległego czterech zawiesi akcelerometru.

Do przeprowadzenia obliczeń numerycznych zastosowano metodę elementów skończonych z wykorzystaniem programu MSC Patran Nastran. Przyjęto, aby każdy pręt podzielić na 10 elementów skończonych. Model utworzono jako układ płaski, w związku z czym elementy skończone są rozłożone na krzywych tworzących model. Wykorzystano elementy o topologii Bar2, czyli elementy płaskie, dwuwęzłowe, gdzie każdy węzeł posiada 3 stopnie swobody.

Rozkład przemieszczeń uzyskanych za pomocą obliczeń numerycznych przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3 Rozkład przemieszczeń w kierunku osi x dla analizowanego modelu

Dla porównania wyników obliczeń analitycznych i numerycznych zestawiono je w tabeli .

Tabela Porównanie wyników obliczeń analitycznych i numerycznych

	przemieszczenie u_{Fx} [nm]	naprężenia maksymalne σ_{max} [MPa]	częstotliwość drgań własnych f_x [kHz]
obliczenia analityczne	5,76	1,26	128,7
obliczenia numeryczne	5,79	1,25	130,9

Naprężenia maksymalne zostały wyznaczone w punkcie połączenia masy bezwładnej z zawiesiem. Porównując powyższe wyniki obliczeń numerycznych z wynikami obliczeń analitycznych można zauważyć, że wartości te są zbliżone. Potwierdza to poprawność i dokładność obliczeń numerycznych, a także umożliwia stosowanie prostych modeli, bez utraty dokładności wyników.

4. Projektowanie zawieszenia

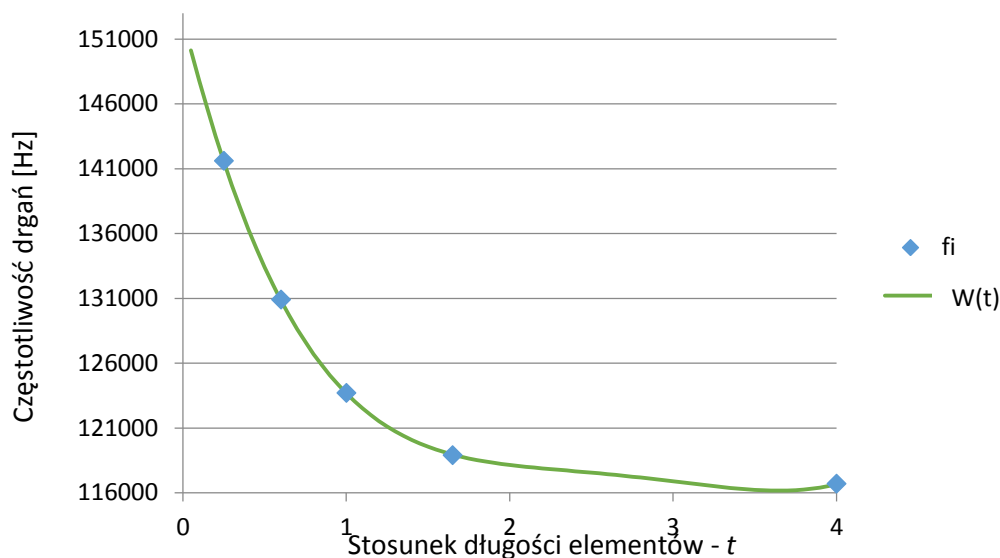
Celem dalszych obliczeń jest wyznaczenie charakterystyki układu, aby przy zadanej częstotliwości drgań własnych oraz przy zadanych ograniczeniach na wymiary elementów zawiesia, można było dobrać stosunek długości l_1 i l_2 prętów zawieszenia (rys. 2). W tym celu przeprowadzono obliczeń, dla różnych kombinacji długości prętów l_1 i l_2 , z założeniem, że suma długości prętów $l_1 + l_2$ jest równa $40 \mu\text{m}$.

W celu wyznaczenia zależności między częstotliwością drgań własnych f_x , a stosunkiem długości prętów zawieszenia $t = l_1/l_2$, dokonano interpolacji wielomianowej [3]. Wielomian interpolacyjny miał postać:

$$W(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + a_3 \cdot t^3 + a_4 \cdot t^4 = f_x, \quad (3)$$

gdzie a_i – współczynniki, t^i – funkcje bazowe.

Na wykresie na rysunku 4 przedstawiono interpolację przebiegu wyników obliczeń MES.



Rys. 4 Wykres zależności częstotliwości drgań własnych f_x od stosunku długości elementów zawiesia t

Na podstawie rys. 4 można dla danej częstotliwości drgań własnych dobrać wartość stosunku t długości prętów zawieszenia l_1 i l_2 . W celu sprawdzenia wykonano następujący eksperyment: założono, że dany układ ma wykazywać częstotliwość drgań własnych na poziomie równym 116000 kHz. Aby wyznaczyć stosunek długości prętów zawieszenia l_1 do l_2 , należy rozwiązać równanie (3). W wyniku otrzymano stosunek równy 2, 4, co daje długości prętów l_1 i l_2 równe odpowiednio 2, 4, μ m, przy ograniczeniu $l_1+l_2=40 \mu\text{m}$. Następnie zamodelowano układ z uwzględnieniem otrzymanych wymiarów geometrycznych i przeprowadzono symulację.

W wyniku otrzymano częstotliwość drgań własnych f_x równą 116000 kHz. Otrzymano błąd względny na poziomie 0, 0%. W związku z tym można stwierdzić, że wyznaczona charakterystyka dobrze odwzorowuje badany układ.

Literatura

1. Burczyński T., wykłady do „Wytrzymałość materiałów”, Politechnika Śląska, http://www.imio.polsl.pl/Dopobrania/WM_12_Uklady%20liniowosprezyste.pdf, (dostęp: 0.0.20).
2. Karbowniczek M., „Układy MEMS”, Elektronika praktyczna, nr 2 (20 0).
3. Majchrzak E., Mochnacki B., „Metody numeryczne. Podstawy teoretyczne, aspekty praktyczne i algorytmy”, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice () .