

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

Studencka Konferencja Naukowa
„METODY KOMPUTEROWE – 2008”

Gliwice, maj 2008 r.

Katedra Wytrzymałości Materiałów i Metod Komputerowych Mechaniki

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

Komitety Naukowy:

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

Komitety Organizacyjny:

Dr hab. inż. Piotr Fedeliński, Prof. Pol. Śląskiej
Dr inż. Radosław Górski
Dr inż. Adam Długosz
Dr inż. Grzegorz Działkiewicz
Mgr inż. Jacek Ptaszny
Dawid Opilka
Michał Olejniczak
Andrzej Katunin

Komitety Redakcyjny:

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

Artykuły opublikowano na podstawie oryginałów dostarczonych przez Autorów.

Druk i oprawę wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach.
Nakład 120 egz. Druk ukończono w maju 2008 r.

Wstęp

Zeszyt naukowy zawiera 21 artykułów prezentowanych przez studentów na drugiej Studenckiej Konferencji Naukowej „Metody Komputerowe – 2008”, odbywającej się 29 maja 2008 roku w Centrum Edukacyjno-Kongresowym Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Konferencję zorganizowali studenci i pracownicy Katedry Wytrzymałości Materiałów i Metod Komputerowych Mechaniki Politechniki Śląskiej. Artykuły, przygotowane pod opieką naukową pracowników Katedry, przedstawiają wyniki prac zarówno studentów działających w ramach Studenckiego Koła Naukowego „Metod Komputerowych”, jak i dyplomantów. Publikacje dotyczą zastosowania metod komputerowych w różnych dziedzinach techniki, takich jak:

- metody komputerowe w obliczeniach wytrzymałościowych,
- wspomaganie komputerowe prac inżynierskich,
- modelowanie komputerowe badań doświadczalnych,
- modelowanie komputerowe układów biologicznych,
- grafika komputerowa,
- badania operacyjne.

Duża liczba zgłoszonych prac świadczy o znacznej aktywności naukowej studentów i potrzebie organizacji tego rodzaju konferencji.

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. Życzę studentom owocnych dyskusji w czasie konferencji. Mam nadzieję, że udział w konferencji będzie inspiracją do dalszych badań naukowych i prezentacji wyników prac na konferencjach i w publikacjach naukowych.

Opiekun Naukowy Studenckiego Koła Naukowego
„Metod Komputerowych”

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

Gliwice, maj 2008 r.

Studenckie Koło Naukowe „Metod Komputerowych”

Katedra Wytrzymałości Materiałów i Metod Komputerowych Mechaniki (KWMiMKM)

Zarząd Koła w roku akademickim 2007/2008:

Przewodniczący: Dawid Opilka, Automatyka i Robotyka, AB3, 5 rok

Wiceprzewodniczący: Michał Olejniczak, Automatyka i Robotyka, AB3, 5 rok

Sekretarz: Andrzej Katunin, Mechanika i Budowa Maszyn, MB2, 5 rok

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

Opiekun ds. Organizacji: dr inż. Radosław Górski

Studenckie Koło Naukowe „Metod Komputerowych” zostało zarejestrowane w dniu 6. grudnia 2001 roku. Głównym celem Koła jest poszerzenie wiedzy studentów na temat metod komputerowych i ich zastosowań w technice.

Zakres merytoryczny działania Koła:

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

Formy działalności Koła:

- udostępnienie członkom koła sprzętu oraz programów komputerowych znajdujących się w Laboratorium Metod Komputerowych KWMiMKM,
- samokształcenie i prowadzenie badań własnych przez członków Koła,
- prezentacje przez członków Koła prac własnych, prac przejściowych i prac dyplomowych na zebraniach naukowych Koła i konferencjach,
- opieka naukowa pracowników KWMiMKM nad pracami własnymi członków Koła,
- referaty pracowników naukowych KWMiMKM oraz zaproszonych gości na zebraniach naukowych Koła,
- 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 w kraju i za granicą.



Studencka Konferencja Naukowa „Metody Komputerowe – 2007” – Gliwice - CEK
Otwarcie konferencji przez Dziekana Prof. dra hab. inż. Jerzego Świdra – 23.05.2007 r.



Kurs programowania w języku Matlab (Scilab) – Gliwice – CEK, 20.11.2006 r.
Prowadzący – mgr inż. Jacek Ptaszny



Zwiedzanie fabryki amortyzatorów samochodowych Tenneco Automotive – Gliwice
15.05.2007 r.



Kurs obsługi programu metody elementów skończonych MSC Patran/Nastran
Gliwice - CEK – 6.11.2007 r. Prowadzący – dr inż. Waclaw Kuś

Spis treści

Spis treści	
Bogun Łukasz	
Proces modelowania elementów nadwozia przy użyciu oprogramowania ICEM Surf.....	1
Dumieński Piotr	
Analiza wytrzymałościowa połączeń spawanych metodą elementów skończonych	5
Gliszczyński Piotr	
Wizualizacja wyników obliczeń MES i dynamiki molekularnej	9
Janosz Mariusz	
Modelowanie zmian osteoporotycznych w strukturach biomechanicznych	13
Katunin Andrzej	
Modelowanie częstotści drgań własnych płyty kołowej transwersalnie izotropowej.....	17
Katunin Andrzej	
O modelowaniu temperatury samowzbudnej w laminacie	21
Kwinta Mateusz	
Komputerowe wspomaganie projektowania walca drukującego drukarki fleksograficznej...	25
Mazur Robert	
Analiza systemów rurowych za pomocą oprogramowania ANSYS.....	29
Mazur Robert	
Projektowanie elementów silnika spalinowego wysokoprężnego	33
Olejniczak Michał	
Model komputerowy stanowiska do badania zjawiska wyboczenia prętów	37
Opilka Dawid	
Analiza próbki obciążonej dynamicznie dzielonym prętym Hopkinsona za pomocą metody elementów skończonych	41
Reuter Zygmunt	
Modelowanie struktur biomechanicznych w aspekcie wypadków komunikacyjnych.....	45
Sroka Łukasz	
Modelowanie przepływu cieczy przez biorusztowanie z wykorzystaniem systemu MSC.Dytran	49
Stępka Kamil	
Modelowanie oddziaływania pola elektrycznego na tkankę biologiczną	53
Stol Dariusz	
Analiza zjawiska kontaktu ciał odkształcalnych metodą elementów skończonych.....	57
Śliwa Paweł	
Analiza numeryczna i doświadczalna układu zaworu dyskowego amortyzatora	61

Turchan Łukasz	
Zadanie programowania wielokryterialnego w oparciu o optymalizację metodą simplex.....	65
Warzecha Łukasz	
Analiza ram przestrzennych metodą elementów skończonych.....	69
Wojsiat Adam	
Badania zmęczeniowe zaworów dyskowych amortyzatora.....	73
Zwierzyński Tomasz	
Opracowanie projektu dotyczącego utworzenia serwisu komputerowego	77
Żabicki Kamil	
Zagadnienie transportowe – opracowanie oprogramowania.....	81

PROCES MODELOWANIA ELEMENTÓW NADWOZIA PRZY UŻYCIU OPROGRAMOWANIA ICEM SURF

ŁUKASZ BOGUN

Automatyka i Robotyka, AB3, 5 rok

Opiekun naukowy: prof. dr hab. inż. Tadeusz Burczyński,
dr inż. Mirosław Szczepanik



Streszczenie. W niniejszym artykule opisano szczegółowo etapy rozwoju nadwozia samochodu osobowego, które są związane z modelowaniem powierzchniowym oraz ich oceną. Aktualnie stosowane są trzy grupy metod, które umożliwiają utworzenie i zapis powierzchni nadwozi. Należą do nich metody modelowe, graficzne i komputerowe. Zastosowaną metodą jest metoda komputerowa, która polega na bezpośrednim tworzeniu powierzchni w wirtualnej przestrzeni trójwymiarowej. Do zamodelowania powierzchni przykładowego elementu nadwozia samochodu osobowego, jakim była obudowa dźwigni hamulca ręcznego, a także do oceny jakości modelu, zastosowano program ICEM Surf.

1. Dlaczego oprogramowanie ICEM Surf?

ICEM Surf jest programem należącym do systemów klasy CAD/CAM. Oprogramowanie to jest niezmiernie funkcjonalne w procesie tworzenia i późniejszej analizy tworzonej geometrii. Przede wszystkim jest stosowany przy kreowaniu powierzchni takich produktów jak: samochody, motocykle, pojazdy zarobkowe, rolnicze i budowlane oraz w szerokim zakresie w produkcji artykułów sportowych oraz trwałego użytku. Głównymi determinantami, o których należy pamiętać podczas projektowania nadwozi, są estetyka i aerodynamika. Te z kolei zależą od płynności i jakości modelowanych powierzchni. W tym wypadku właśnie ICEM Surf uznawany jest jako główne oprogramowanie do tworzenia i ciągłego rozwoju wysokiej jakości powierzchni, nazywanych często powierzchniami klasy A [2]. Należy również zaznaczyć, że modelowane powierzchnie powstają w wyniku procesu inżynierii odwrotnej, z uporządkowanych lub nieuporządkowanych danych wejściowych, w tym wypadku danych pochodzących ze skanu prototypu. Dzięki specjalnym funkcjom programu użytkownik w czasie rzeczywistym posiada możliwość kształtowania prawidłowej równowagi pomiędzy gładkimi i przyległymi powierzchniami a zdigitalizowanymi danymi, jak również może przeprowadzać analizę jakościową powierzchni.

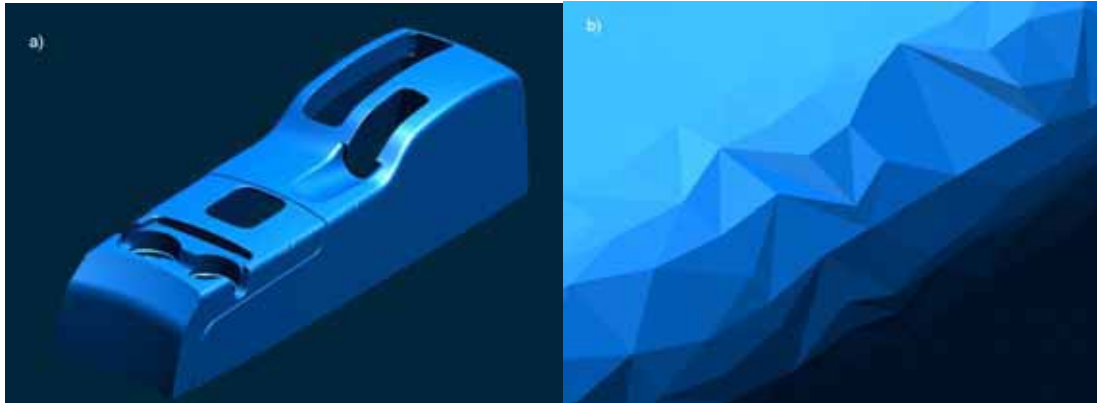
2. Metodologia dotycząca modelowania w programie ICEM Surf

Powierzchniami klasy A, które modelowane są w programie ICEM Surf, są zewnętrzne powierzchnie modeli konstrukcyjnych o najwyższej możliwej klasie jakości. W przemyśle motoryzacyjnym przyjęła się zasada, która sugeruje, że wszystkie powierzchnie widoczne samochodu powinny być klasy A [3]. Powierzchnie takie spełniają następujące kryteria:

- muszą być jednosegmentowe,
- powinny być opisane jak najmniejszą liczbą punktów kontrolnych,
- rozkład struktury punktów kontrolnych należących do takich powierzchni powinien być regularny oraz harmoniczny
- minimalna liczba punktów kontrolnych umożliwiająca uzyskanie zamierzonego kształtu.

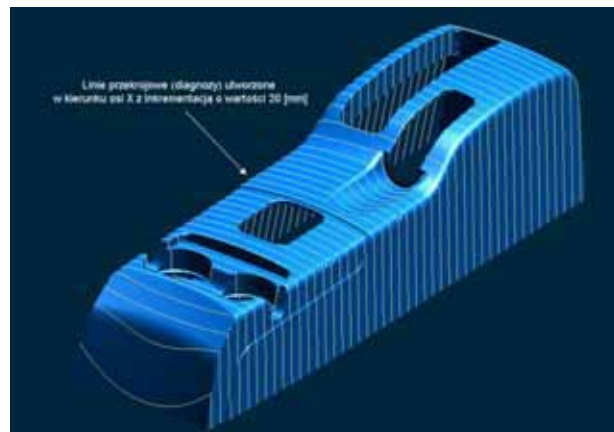
W przypadku, gdy łączymy ze sobą dwie powierzchnie klasy A wymagane jest zachowanie ciągłości przynajmniej G^1 (zachowanie ciągłości pozycji i styczności). Gdy jest to możliwe dąży się do ciągłości G^2 (pozycja, styczność oraz krzywizna), bądź też G^3 (torsja).

Proces modelowania powierzchni, które odzwierciedlają obudowę dźwigni hamulca ręcznego, zostanie rozpoczęty po wcześniejszym zaimportowaniu do środowiska ICEM Surf zdigitalizowanego modelu fizycznego w postaci siatki trójkątnych elementów powierzchniowych, która została utworzona z chmury punktów – rys.1. Proces digitalizacji przeprowadzony został przy pomocy maszyny pomiarowej (skaner laserowy). Model taki zorientowany został w przestrzennym układzie współrzędnych XYZ. Rozważany prototyp jest symetryczny względem płaszczyzny XZ.



Rys. 1. Skan zaimportowany do programu ICEM Surf: a) geometria scanu, b) powiększenie skanu ukazujące siatkę trójkątów

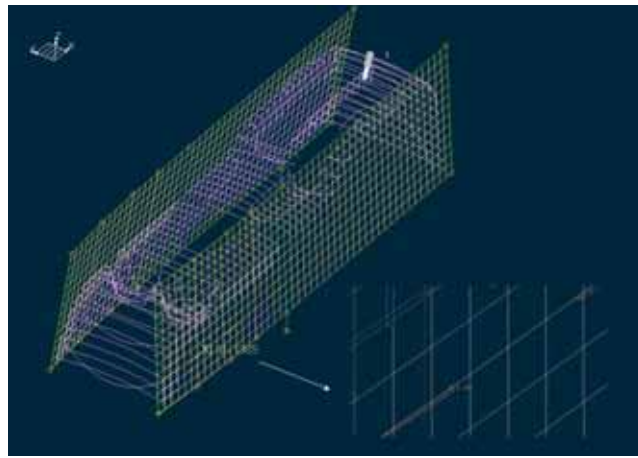
W kolejnym etapie prac projektowych dąży się do utworzenia szkieletu modelu poprzez wygenerowanie krzywych intersekcji płaszczyzn, wprowadzanych z określonym przyrostem odległości wzdłuż trzech kierunków głównych X, Y i Z, ze skanem. Wartość inkrementu powinna zostać tak dobrana, aby linie diagnozy w pełni odzwierciedlały kształt skanu (rys.2). Zaprezentowany powyżej obiekt zostaje więc, w pierwszej kolejności, zastąpiony krzywymi przekrojowymi (linie diagnozy), z których następnie wygenerowane zostają krzywe typu raw data (linie warstwowe). Na nich z kolei tworzone będą poszczególne powierzchnie.



Rys. 2. Efekt procesu próbkowania w postaci linii diagnozy

Warto zaznaczyć, że linie diagnozy są danymi pomocniczymi - chwilowo używanymi do wygenerowania dalszej geometrii (dane wejściowe służące do uzyskania danych

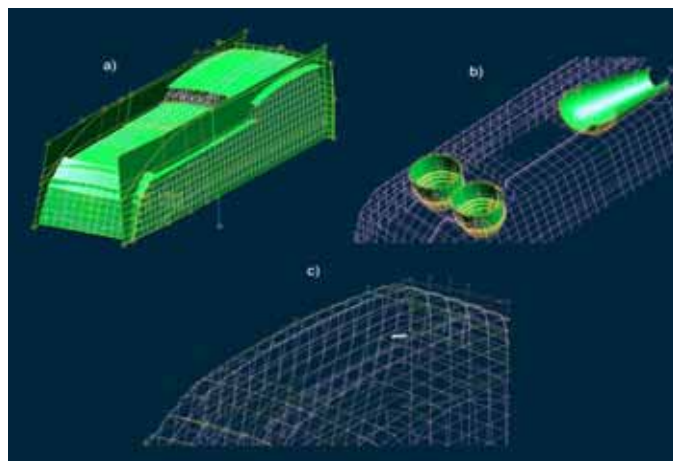
„trwałych”). Są tworzone zarówno na zdigitalizowanym prototypie, jak również na modelowanych powierzchniach, dzięki czemu użytkownik w czasie rzeczywistym posiada możliwość kontrolowania odległości pomiędzy tymi obiektami (rys.3).



Rys. 3. Proces modelowania powierzchni polegający na dopasowywaniu linii diagnozy powierzchni bocznej do obiektów typu raw data, które reprezentują zdigitalizowany obiekt

Do utworzenia obiektów typu raw data (rys. 3) został wykorzystany proces dyskretyzacji linii diagnozy. Proces ten polegał na znalezieniu zbioru punktów leżących na linii przekrojowej, i następnym połączeniu ich przy pomocy odcinków. Obiekty typu raw data są zbiorami danych „trwałych”, które są bazą do modelowania poszczególnych powierzchni.

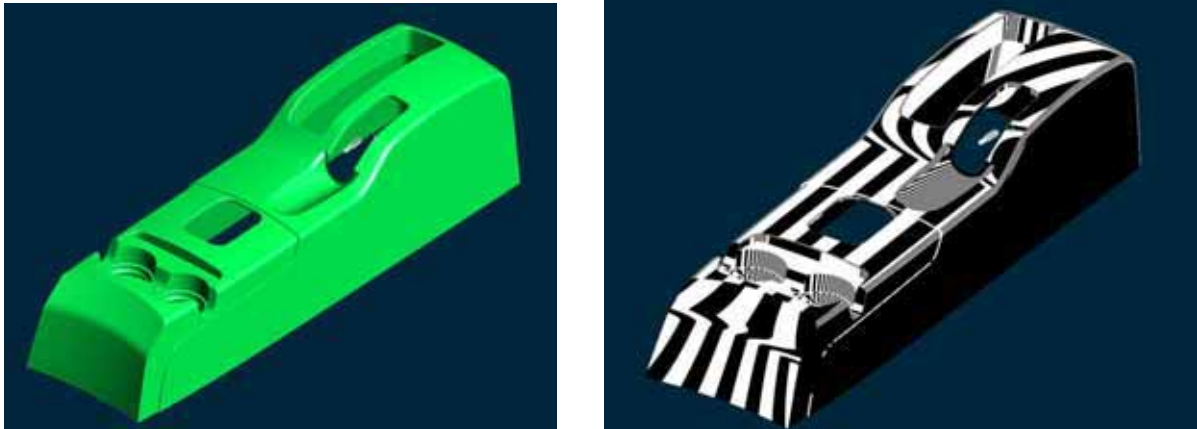
Posiadając bazę w postaci linii warstwic, można przejść do procesu, który związany jest z modelowaniem powierzchni rozpatrywanego obiektu. W początkowej fazie należy przeanalizować geometrię bryły i określić obszary, w których powstaną płaty powierzchni głównych oraz szczegółowych. Powierzchnie główne określają kształt (gabaryty) skanu. Powierzchnie szczegółowe opisują wszelkiego rodzaju otwory przetłoczenia, zaokrąglenia czy wypełnienia. W celu wygenerowania wspomnianych typów powierzchni stosuje się często geometryczne elementy pomocnicze, takie jak min. krzywe tworzące, krzywe kierujące, punkty i krzywe intersekcji płaszczyzny bazowe i tnące (rys. 4.).



Rys. 4. Powierzchnie: a) główne, b) szczegółowe, c) geometria pomocnicza

Modyfikacja kształtu powierzchni (modelowanie) dokonywana jest przy pomocy punktów kontrolnych, które służą do ich opisu. Konstruktor powinien zastosować minimalną liczbę

punktów kontrolnych umożliwiającą uzyskanie zamierzonego kształtu. Przykładowo niemieckie przedsiębiorstwo produkujące samochody osobowe i motory pod marką BMW dopuszcza powierzchnie, do których opisu zastosowano maksymalnie 36 pkt. kontrolnych (np. 6x6). Podczas procesu modelowania należy pamiętać, aby wszystkie tworzone powierzchnie, łączone były z zachowaniem danej ciągłości. Efekt prac modelowych przedstawiono na rysunku 5a.



Rys. 5. Zamodelowany obiekt w środowisku ICEM Surf 4.6.1: a) model powierzchniowy, b) ocena jakości powierzchni przy pomocy izofot

3. Ocena powierzchni

Bardzo ważnym aspektem, o którym należy pamiętać podczas modelowania, jest sprawdzenie jakości wygenerowanych powierzchni. Ocena jakości powierzchni jest podstawą do zaakceptowania danej konstrukcji, a w przypadku wystąpienia błędu do dalszej poprawy modelu. Metodą użytą do oceny zamodelowanych powierzchni jest metoda bazująca na izofotach – metoda highlight [1] (rys.5b). Biorąc pod uwagę zaprezentowany highlight wyraźnie można zaobserwować, że izofoty nie posiadają nagłych oraz niezamierzonych zafalowań. Przebieg ich jest gładki co świadczy o wysokiej jakości zamodelowanych powierzchni.

4. Podsumowanie

Metoda komputerowa wykorzystana do zamodelowania elementu nadwozia samochodu osobowego, o klasie powierzchni typu A, znacznie skraca czas projektowania, jak również prowadzi do uzyskania o wiele lepszych rezultatów w porównaniu z metodami modelowymi i graficznymi.

Literatura

1. Kiciak P., Podstawy modelowania krzywych i powierzchni. Warszawa, WNT (2005).
2. <http://www.icem.com/>.
3. <http://pliz.rucker.pl/dydaktyka/wyklady/>.

ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA POŁĄCZEŃ SPAWANYCH METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

PIOTR DUMIĘŃSKI

Mechanika i Budowa Maszyn, MB4, 5 rok

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



Streszczenie. W artykule omówiono rodzaje stosowanych połączeń spawanych. Następnie wyznaczono naprężenia metodą analityczną w połączeniu zakładkowym. Obliczono naprężenia w tym samym połączeniu programem MSC Patran/Nastran, który wykorzystuje metodę elementów skończonych. Wyniki numeryczne porównano z analitycznymi.

1. Wprowadzenie

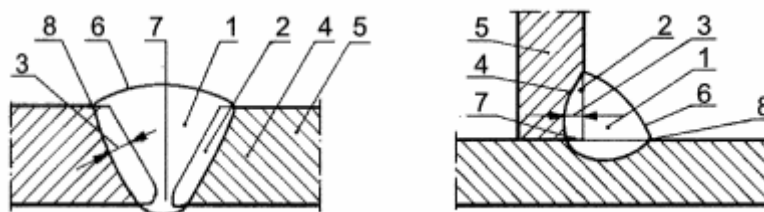
Połączenia spawane jak również lutowane, zgrzewane i klejone są połączeniami nierozłącznymi bezpośrednimi, gdyż nie wymagają dodatkowych elementów pośredniczących [1]. Obciążenia w tych połączeniach są przenoszone siłami spójności czyli kohezji.

Za pomocą spawania łączyć można stal, żeliwo, niektóre metale i stopy metali kolorowych oraz niektóre tworzywa sztuczne. Jako źródło energii do topienia spawanych materiałów wykorzystuje się energię łuku elektrycznego, promienia gazowego lub wiązki elektronów.

Spoina powstaje w wyniku topienia i krzepnięcia stopiwa (dodatkowy materiał dodawany do złącza) oraz jednorodnych materiałów rodzimych łączonych elementów.

Połączenia spawane ze względu na konstrukcję dzieli się na :

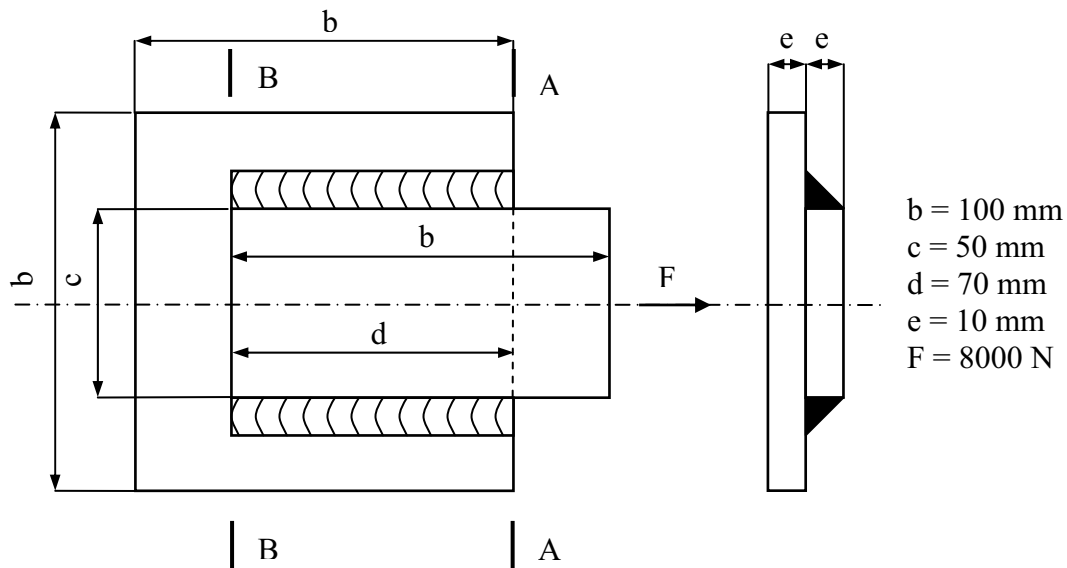
- czołowe,
- pachwinowe,
- brzeżne,
- otworowe.



Rys. 1. Podstawowe elementy spoin

Na rys. 1 zostały przedstawione podstawowe elementy spoiny czołowej i pachwinowej gdzie: 1. stopiwo, 2. wtop (warstwa stopionego metalu rodzimego), 3. głębokość wtopienia, 4. strefa wpływów cieplnych w metalu rodzimym, 5. materiał rodzimy, 6. lico spoiny, 7. grań spoiny, 8. brzeg spoiny.

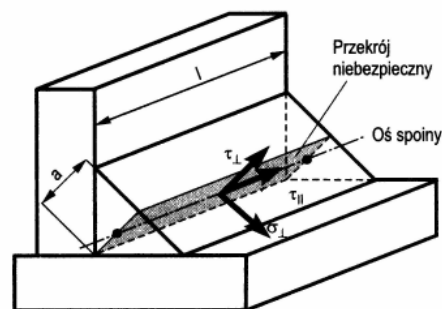
2. Obliczenia analityczne



Rys. 2. Połączenie zakładkowe

Na rys. 2 zostało przedstawione połączenie zakładkowe, składające się z dwóch blach połączonych dwoma spoinami pachwinowymi. Ponieważ długość każdej ze spoin jest większa od odległości między nimi ($d > c$), to w połączeniu zastosowano wyłącznie spoiny podłużne. Blachy zostały wykonane ze stali 18G2 o granicy plastyczności $Re = 350$ MPa i wytrzymałości obliczeniowej $f_d = 305$ MPa. Połączenie jest rozciągane siłą F .

Wytrzymałość połączenia spawanego oblicza się na podstawie normy przedmiotowej PN-90/B-03200 *Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie* [2].



Rys. 3. Stan naprężeń w spoinie pachwinowej

Rys. 3 przedstawia stan naprężeń w spoinie pachwinowej gdzie: σ_{\perp} - naprężenie normalne prostopadłe do płaszczyzny przekroju niebezpiecznego, τ_{\perp} - naprężenie styczne równoległe do płaszczyzny przekroju niebezpiecznego i prostopadłe, do osi spoiny, τ_{\parallel} - naprężenie styczne równoległe do płaszczyzny przekroju niebezpiecznego i do osi spoiny [3].

Grubość obliczeniową spoiny pachwinowej a jest wysokość trójkąta równoramiennego wpisanego w przekrój spoiny (rys. 3)

$$a = \frac{e * \sqrt{2}}{2} = \frac{10 * 1,41}{2} = 7,05 [mm] \quad (1)$$

Całkowite pole powierzchni spoin jest równe

$$A_s = 2 * a * d = 2 * 7,05 * 70 = 987 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (2)$$

Naprężenie styczne pochodzące od siły F

$$\tau_{\parallel} = \frac{F}{A_s} = \frac{8000}{987} = 8,1 \text{ [MPa]} \quad (3)$$

Warunek nośności spoiny pachwinowej jest opisany wzorem

$$k \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq f_d \quad (4)$$

przy czym $\sigma_{\perp} \leq f_d$

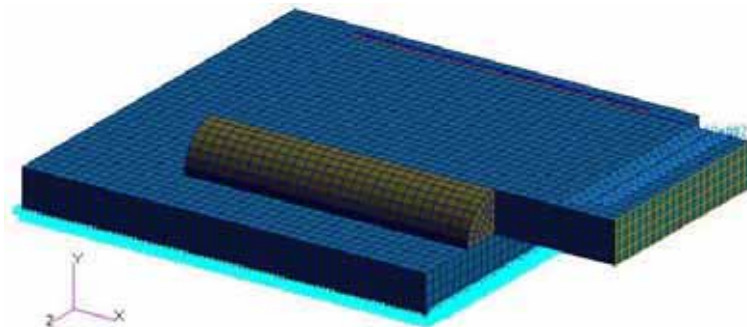
gdzie: k jest współczynnikiem zależnym od granicy plastyczności.

W przekroju występują tylko naprężenia styczne τ_{\parallel} więc warunek upraszcza się do

$$k \sqrt{3\tau_{\parallel}^2} = 0,85 \sqrt{3 * 8,1^2} = 11,9 \text{ [MPa]} < 305 \text{ [MPa]} \quad (5)$$

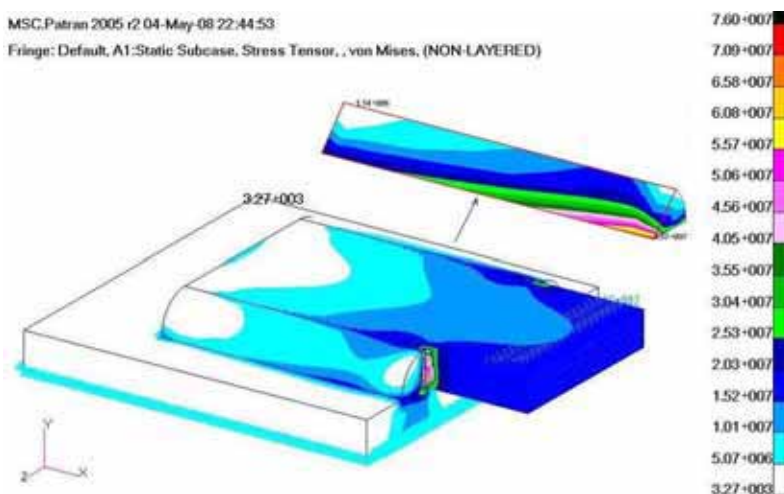
Warunek nośności spoiny został spełniony.

3. Obliczenia numeryczne

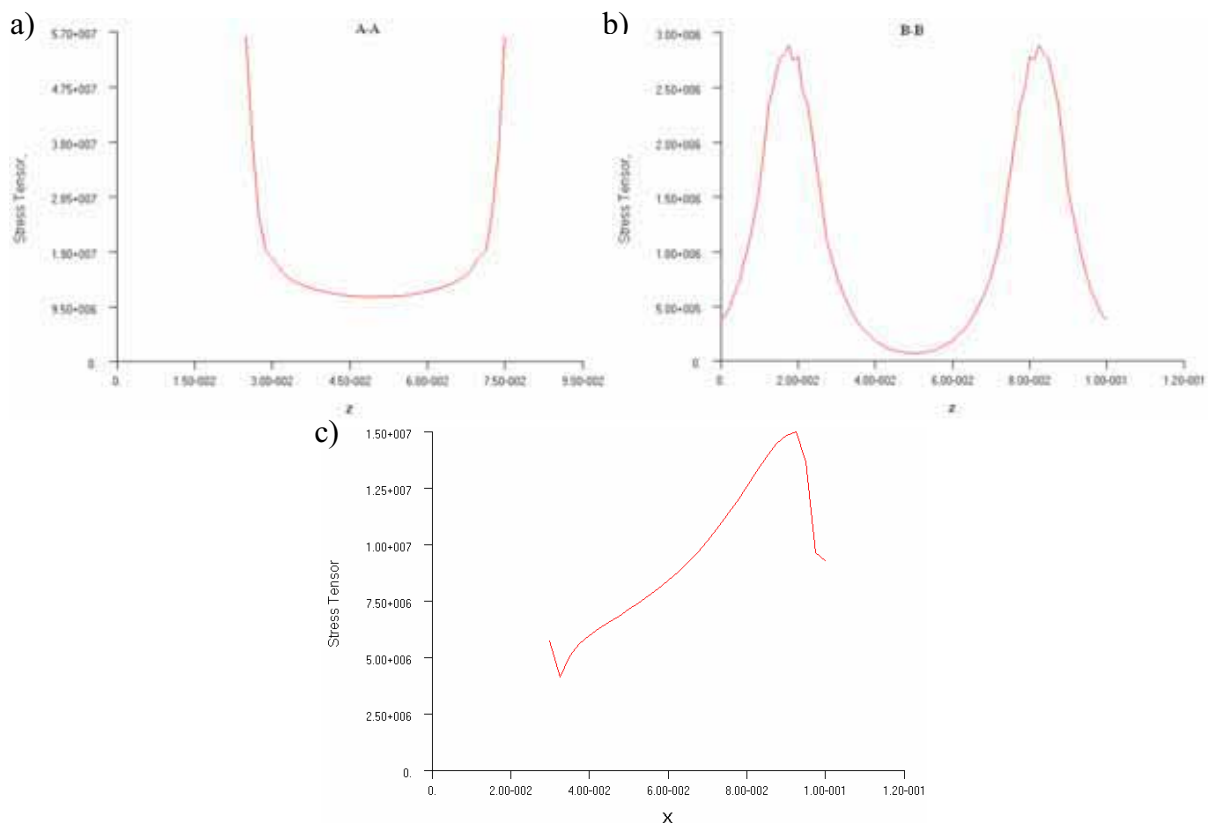


Rys. 4. Model numeryczny

Rys. 4 przedstawia model numeryczny połączenia zakładkowego składającego się z 10272 elementów skończonych. Obliczenia wykonano dwukrotnie z wykorzystaniem elementów bryłowych 8 - węzłowych i 20 - węzłowych. Blachy oraz spawy wykonano ze stali 18G2 o własnościach: moduł Younga 2,05 GPa i liczba Poissona 0,3.



Rys. 5. Rozkład naprężeń zredukowanych



Rys. 6. Rozkład naprężeń zredukowanych w przekroju: a) A-A, b) B-B, c) niebezpiecznym

Na rys. 5 i 6 zostały przedstawione rozkłady naprężeń zredukowanych Hubera – Misesa. Naprężenia rozkładają się w sposób nierównomierny. W pobliżu spoiny dochodzi do spiętrzenia naprężeń. Najmniejsze naprężenia występują w węzłach najbardziej oddalonych od brzegu spoiny.

4. Analiza wyników

W tabeli 1 zostały porównane wyniki obliczeń analitycznych (równ. 5) i numerycznych w przekroju niebezpiecznym (rys. 5). Wyniki numeryczne zostały obliczone jako średnia arytmetyczna naprężeń zredukowanych w przekroju niebezpiecznym (rys. 6c). Wyniki numeryczne są zbliżone do analitycznych. Różnica w wynikach dla elementu 8 - węzłowego wynosi 7,9%, natomiast dla elementu 20 – węzłowego wynosi 3,3%. Dokładność obliczeń wzrasta ze wzrostem liczby węzłów w elemencie.

Tabela 1. Porównanie wyników obliczeń

	Analityczne	MES 8 - węzłowy	MES 20 - węzłowy
Naprężenia $\tau_{ }$	11,9 MPa	10,9 MPa	12,3 MPa

Literatura

1. Dietrich M. (red.). Podstawy konstrukcji maszyn, WNT, 2006.
2. Norma PN-90/B-03200 Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
3. Pilarczyk J. (red.). Poradnik inżyniera. Spawalnictwo, WNT, Warszawa 2003.

WIZUALIZACJA WYNIKÓW OBLICZEŃ MES I DYNAMIKI MOLEKULARNEJ

PIOTR GLISZCZYŃSKI,

Automatyka i Robotyka, AB3, 5 rok

Opiekun naukowy: prof. dr hab. inż. Tadeusz Burczyński



Artykuł poświęcony jest wizualizacji modeli oraz wyników metody elementów skończonych oraz dynamiki molekularnej. Przedstawia podstawowe informacje dotyczące biblioteki graficznej. Zawarte w nim są również informacje dotyczące algorytmu wizualizacji oraz przykładowe modele.

1. Wprowadzenie

Zadaniem aplikacji jest wizualizacja modeli oraz wyników obliczeń szukanych metodą elementów skończonych (MES) [2] oraz dynamiką molekularną (MD) [4]. Analiza umożliwia poruszanie się w otoczeniu modelu i obserwowanie rozkładu naprężeń w wybranych przez użytkownika przekrojach. Aplikacja wizualizuje wyniki obliczeń ciągłych, jakimi są szukane wartości MES oraz wyniki obliczeń dyskretnych, jakimi są wyniki szukane używając MD.

Językiem programowania wybranym do realizacji tego zadania jest C++. Dzięki swojej uniwersalności daje możliwość zaprogramowania wszystkich elementów aplikacji – takich jak wczytywanie danych, obsługa zdarzeń urządzeń peryferyjnych, przetwarzanie danych modelu, obliczenia związane z wyświetlaniem geometrii elementów jak i ich wyświetlanie za pomocą biblioteki OpenGL.

OpenGL (Open Graphics Library) [1] jest biblioteką służącą do tworzenia grafiki dwu i trójwymiarowej w języku wysokiego poziomu. Jest to interfejs pomiędzy programistom wysokopoziomowym a sprzętem (w języku angielskim API - application programmer's interface). OpenGL umożliwia efektywne wykorzystanie zasobów sprzętowych, a jednocześnie zwalnia programistę z konieczności uwzględniania specyfiki konkretnego sprzętu podczas tworzenia oprogramowania.

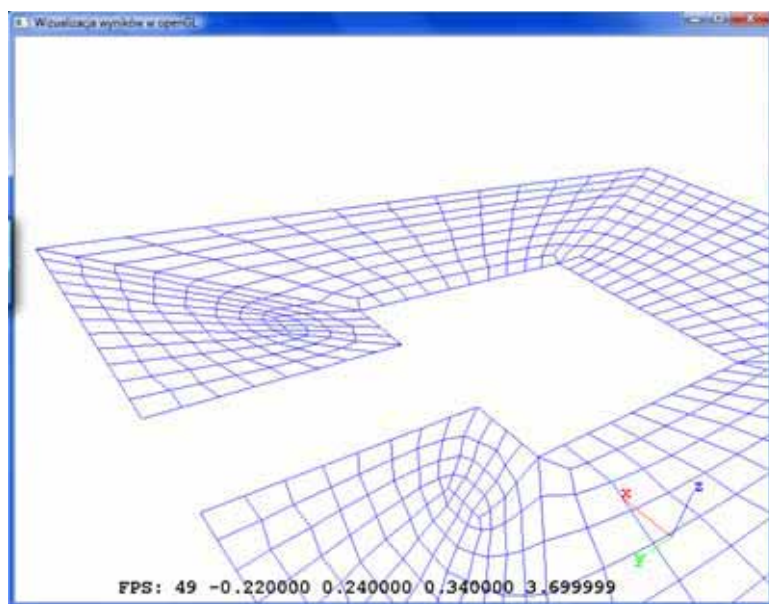
OpenGL daje prosty, bezpośredni dostęp do podstawowych obiektów i operacji grafiki trójwymiarowej. Pozwala operować na punktach, liniach i wielokątach, dokonywać przekształceń takich jak rzutowanie perspektywiczne, translacje, obroty i skalowania, wykonuje obliczenia związane z oświetleniem, odwzorowaniem tekstur i przesłanianiem powierzchni. Umożliwia posługiwanie się tak obiektami geometrycznymi dwu i trójwymiarowymi, jak i dwuwymiarowymi obrazami, pozwalając na swobodne łączenie obu technik do takich celów jak teksturowanie, czy umieszczanie obiektów geometrycznych na tle gotowych obrazów.

2. Metoda elementów skończonych

Element skończony jest podobszarem zdyskretyzowanego kontinuum. Jego wymiar jest skończony, a jego kształt jest zwykle prostszy od kształtu geometrii modelu, który jest idealizowany. Najważniejszą cechą metody elementów skończonych (lub metody elementu skończonego) jest możliwość zastąpienia problemu analitycznego, zapisywanego za pomocą równań różniczkowych, problemem algebraicznym. Zabieg ten znacznie upraszcza postępowanie prowadzące do rozwiązania problemu, a w wielu przypadkach, szczególnie w

zastosowaniach rzeczywistych problemów inżynierskich umożliwia w ogóle znalezienie satysfakcjonujących wyników [3].

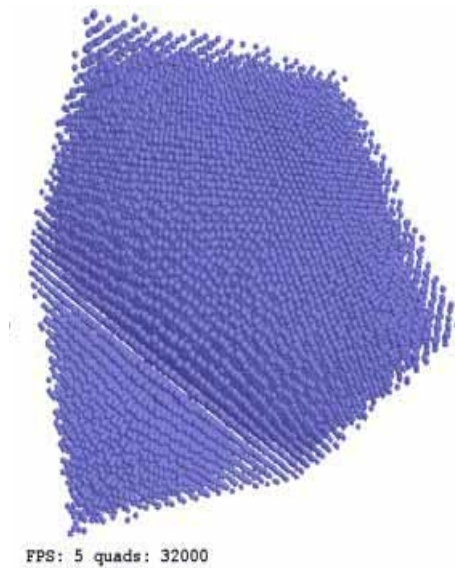
Najczęściej spotykanymi płaskimi elementami skończonymi są elementy trójkątne i czworoboczne (Rys. 1), natomiast przestrzennymi – czworościany i sześciściany.



Rys. 1 Wizualizacja MES – elementy płaskie czworoboczne

3. Dynamika molekularna

Dynamika molekularna (MD) jest komputerową symulacją w której atomy i molekuly mogą oddziaływać na siebie przez krótki czas według znanych praw fizyki. Ponieważ układy molekularne zazwyczaj zawierają olbrzymią liczbę cząsteczek jest niemożliwe znalezienie właściwości tak złożonego układu analitycznie. Symulacje MD omija ten problem wykorzystując metody numeryczne. Symulacje te przedstawiają połączenie pomiędzy eksperymentami laboratoryjnymi a teorią i mogą być rozumiane jako „wirtualne eksperymenty”. MD bada związek pomiędzy molekularną strukturą, przemieszczeniami i funkcjami. Molekularna dynamika jest metodą multidyscyplinarną. Jej prawa wywodzą się z matematyki, fizyki i chemii a jej algorytmy wywodzą się z informatyki i teorii informacji [4].

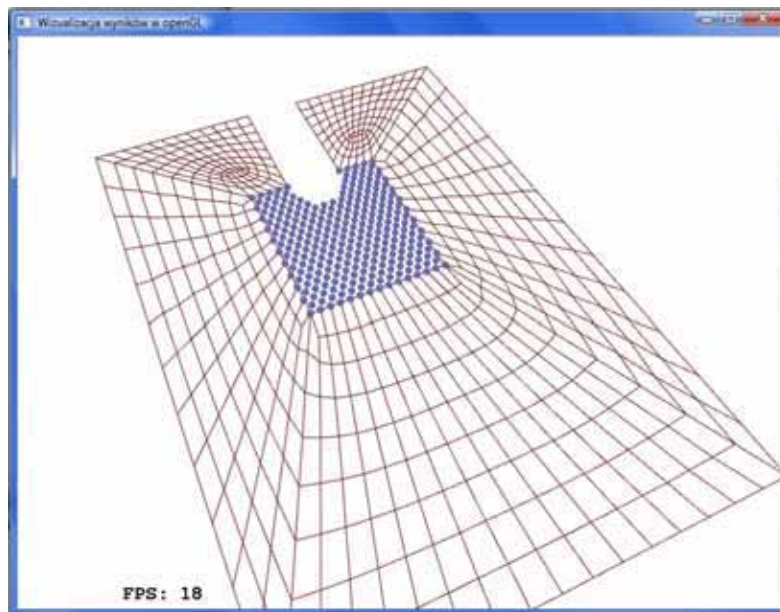


Rys. 2. Wizualizacja MD - układu 32000 atomów w jednym z kroków czasowych

4. Opis aplikacji

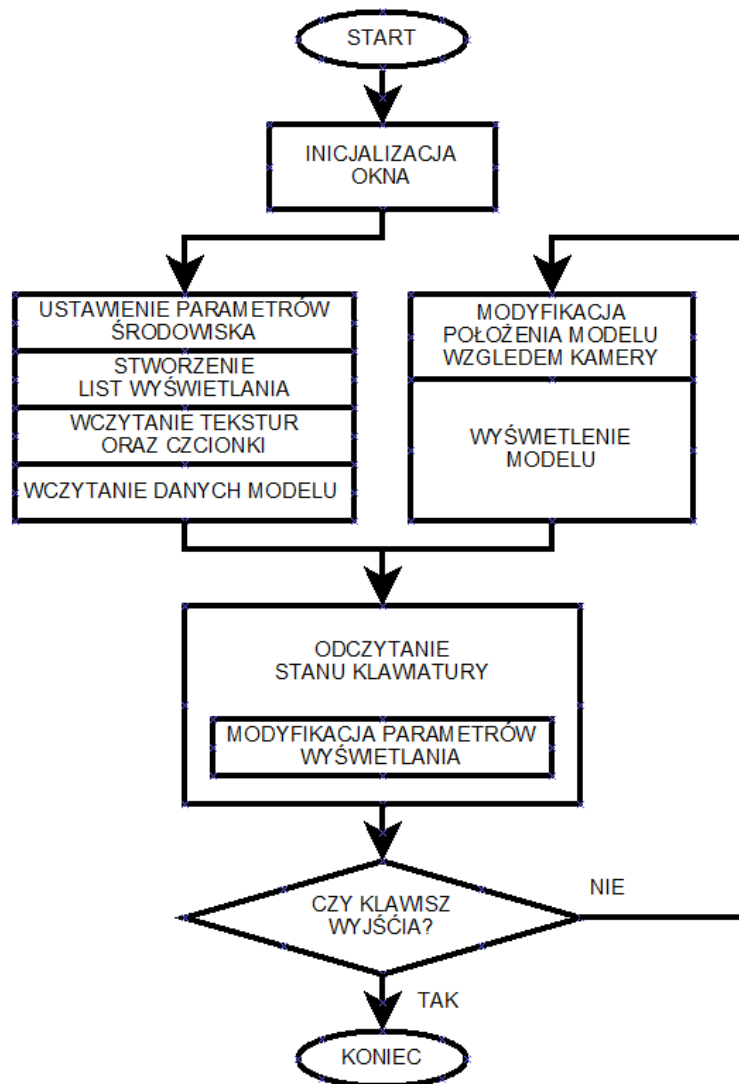
Główne zadania wykonywane przez opisywaną aplikację:

- Wczytywanie danych modelu z pliku
- Obsługa urządzeń peryferyjnych – myszka, klawiatura
- Obsługa urządzenia „space mouse” służącego do poruszania w trójwymiarowym środowisku
- Wyświetlanie modeli MES i MD (Rys.3)
- poruszanie się w trójwymiarowej przestrzeni
- wyświetlanie części modelu ograniczonego płaszczyzną oraz zmiana położenia tej płaszczyzny



Rys. 3. Wizualizacja MES i MD

W programie występuje główna pętla (Rys. 4) w której znajduje się blok wyświetlający obciążony model, oraz bloki odpowiedzialne za zmianę położenia pola widzenia użytkownika i zmianę parametrów płaszczyzny cięcia.



Rys. 4. Uogólniony schemat blokowy aplikacji

Literatura

1. Piotr Andrzejewski, Jakub Kurzak: Wprowadzenie do OpenGL – Programowanie zastosowań Graficznych, Warszawa, KWANTUM 2000.
2. Rakowski G., Kacprzyk Z., Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji. WPW, Warszawa, 1993
3. Łodygowski T., Kąkol W., Metoda elementów skończonych w wybranych zagadnieniach mechaniki konstrukcji inżynierskich, Skrypt PP, 1994
4. Wikipedia – Wolna encyklopedia internetowa, dostępna pod adresem: http://en.wikipedia.org/wiki/Molecular_dynamics

MODELOWANIE ZMIAN OSTEOPOROTYCZNYCH W STRUKTURACH BIOMECHANICZNYCH

MARIUSZ JANOSZ

Automatyka i Robotyka, AB3, 5 rok

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



Streszczenie. W obecnej dobie szybkiego rozwoju technik informatycznych następuje dynamiczny wzrost zainteresowania zastosowaniem informatyki jako narzędzia wspomagającego pracę lekarzy. W pracy opisano metodę tworzenia modelu numerycznego kości ze zmianami osteoporotycznymi na podstawie tomogramów z TK. W dalszej kolejności, wykorzystując programy bazujące na metodzie elementów skończonych (np. MSC.Patran), model może posłużyć do wyznaczenia stanu naprężenia i odkształcenia w strukturach kostnych osłabionych w wyniku wystąpienia osteoporozy.

1. Wprowadzenie

Osteoporoza należy do najczęstszych schorzeń współczesnego społeczeństwa. Obecnie funkcjonują równoległe dwie definicje osteoporozy. Pierwsza z nich określa osteoporozę jako chorobę układową szkieletu charakteryzującą się niską masą kostną, zaburzeniem mikroarchitektury i zwiększoną łamliwością kości. Druga definicja mówi, iż osteoporoza jest chorobą szkieletu charakteryzująca się upośledzeniem wytrzymałości kości, co powoduje zwiększone ryzyko złamania. Wytrzymałość kości przede wszystkim odzwierciedla gęstość mineralna w połączeniu z jakością kości [2].

2. Metoda uwzględniania zmian osteoporotycznych

Stosowane do oceny gęstości kości metody densytometryczne opierają się na opisanym przez prawo Lamberta-Beera zjawisku osłabienia wiązki promieniowania w trakcie przechodzenia przez badany obiekt. W trakcie badania część promieniowania zostaje pochłonięta oraz rozproszona. Natężenie wykorzystanego w detektorze promieniowania zależy od grubości kości i zawartości minerałów, przy czym natężenie promieniowania jest odwrotnie proporcjonalne do ich zawartości.

Współcześnie w badaniach masy kostnej stosuje się następujące metody [1]:

1. Absorpcjometria radiologiczna RA (Rentgen Absorptiometry)
2. Absorpcjometria rentgenowska jednoenergetyczna SXA
3. Absorpcjometria rentgenowska dwuenergetyczna DXA
4. Ilościowa tomografia komputerowa QCT
5. Ilościowa ultrasonografia QUS (Quantitative Ultrasonography)

Obecnie obowiązującym standardem w rozpoznawaniu osteoporozy jest pomiar gęstości kości (BMD) metodą DXA w szyjce kości udowej (bliższym końcu kości udowej) lub kręgosłupie [2].

Aparaty densytometryczne wyposażone są w programy pozwalające porównać wynik badanego pacjenta do normy w postaci procentów oraz wskaźników „T-score” i „Z-score”.

Wskaźnik „Z” oznacza o ile wynik badania danego chorego różni się od średniej BMD dla grupy w tym samym wieku. Wskaźnik „T” porównuje ten wynik do BMD grupy w wieku 30-35 lat, kiedy szkielet człowieka osiąga masę szczytową.

Na podstawie wartości wskaźnika „T” przyjęto następujące kategorie diagnostyczne [3]:

Tabela 1. Diagnostyka osteoporozy na podstawie wskaźnika T-score

Rozpoznanie	T-score
Norma	+ 1.0 - - 1.0
Osteopenia	- 1.0 - -2.4
Osteoporoza	- 2.5
Ciężka OP	- 2.5 i jedno lub więcej złamań

Kręgosłup, nasady i przynasady zbudowane są przede wszystkim z kości bełczkowej. Postępujący w osteoporozie zanik bełczkowania jest podstawą ilościowej oceny osteoporozy (wg Singha). Metoda ta określa zanik kości w stopniach 6-1 [1]:

stopień 6 – struktura idealna z obecnością wszystkich grup bełczkowania

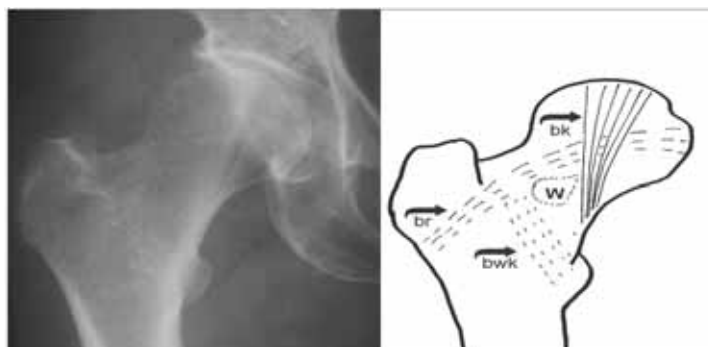
stopień 5 – pojawia się zanik w trójkącie Warda

stopień 4 – zanika wtórne bełczkowanie kompresyjne, nieprzerwane pasmo bełczek rozciągowych

stopień 3 – osteoporoza, przerwane bełczkowanie rozciągowe, ale jeszcze zauważalne

stopień 2 – osteoporoza, brak bełczkowania rozciągowego

stopień 1 – osteoporoza, resztki bełczkowania kompresyjnego.

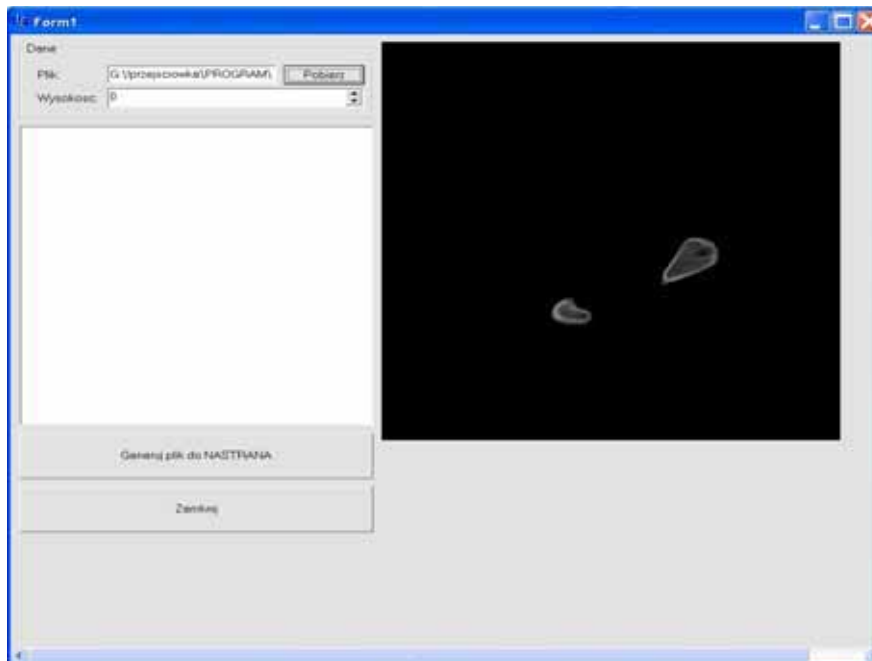


Rys. 1. Radiogram bliższego końca chorej kości udowej [5]

3. Program tworzący model numeryczny na podstawie zdjęć radiologicznych

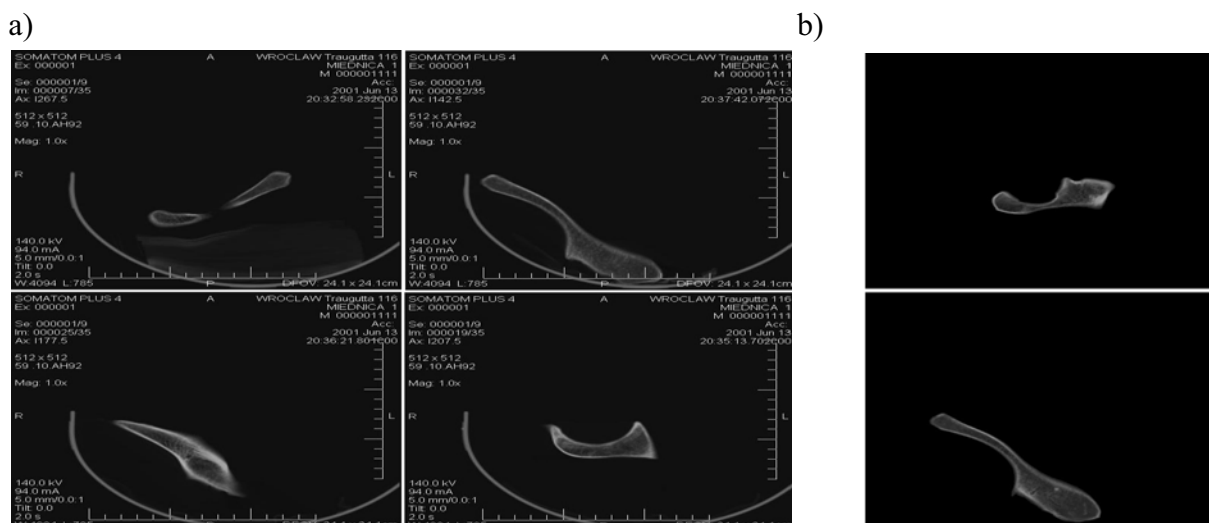
Na potrzeby opisywanego zagadnienia został napisany w języku C++ program, który automatycznie tworzy geometrię prześwietlonej kości w postaci siatki programu NASTRAN, wraz z odpowiednimi właściwościami materiałowymi. Aby możliwe było uzyskanie trójwymiarowego obiektu, niezbędne jest prześwietlenie kości w kilkunastu – równo oddalonych od siebie – warstwach. W badanym przykładzie miednica została prześwietlona w 36 płaszczyznach.

Program wykorzystuje fakt, iż każdy odcień koloru badanego zdjęcia odpowiada danej gęstości kości. Skanuje on więc zdjęcie piksel po pikselu począwszy od pierwszej linii po ostatnią i przypisuje odpowiednią wartość odcienia szarości z zakresu 0 – 255, gdzie 0 odpowiada kolorowi czarnemu (nie ma elementu) a 255 kolorowi białemu (element o maksymalnej gęstości). Jeden piksel to jeden element o indywidualnych właściwościach materiałowych.



Rys. 2. Program tworzący model 3D ze zdjęć radiologicznych

Aby powstał prawidłowy model numeryczny, zdjęcia muszą być odpowiednio przygotowane. Należy z nich usunąć wszystkie zbędne informacje (napisy, podziałkę, elementy innych kości) oraz zamienić tło na kolor czarny. W przeciwnym wypadku program rozpozna je jako obiekty o małej gęstości i weźmie pod uwagę przy tworzeniu geometrii.



Rys. 3. Przykładowe zdjęcia radiologiczne wykorzystane w programie:
a) zdjęcia oryginalne b) zdjęcia poprawione

Plik wyjściowy programu generowany jest według specyfikacji zawartej w przewodniku „MSC Nastran 2007 – quick reference guide”. Dzięki temu możliwe jest utworzenie prawidłowej geometrii modelu oraz nadanie odpowiednich właściwości materiałowych dla każdego voxela (najmniejszego elementu przestrzeni). Przykładowy fragment siatki programu NASTRAN wygląda następująco:

```
GRID      1      252.00 351.00 10.00
PSOLID    1      1      0
MAT1,1,549019607.843137,,0.300000
```

gdzie:

GRID - definiuje położenie siatki punktów, kierunki ich przemieszczeń oraz ich stałe jednopunktowe ograniczenia

PSOLID - definiuje właściwości elementu bryłowego

MAT1 - definiuje właściwości materiałowe dla liniowych, izotropowych, materiałów

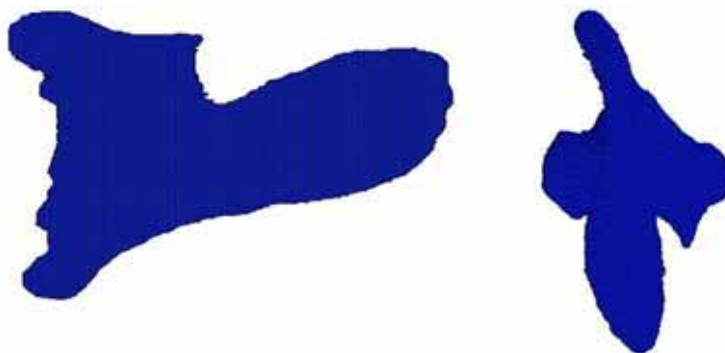
Tabela 2. Przykładowa struktura komendy

1	2	3	4	5
MAT1	MID	E	G	NU

MID – numer identyfikacyjny materiału
E – moduł Younga
G – moduł ścinania
NU – współczynnik Poissona

4. Model numeryczny

Mając gotowe siatki z geometrią i właściwościami materiałowymi każdej z warstw, należy zaimportować je do programu PATRAN. Kolejne warstwy należy importować po sobie bez wykonywania dodatkowych czynności. Program automatycznie dodaje warstwy na odpowiedniej wysokości oraz numeruje węzły i elementy by te były kontynuacją poprzednich.



Rys. 4. Gotowy model zaimportowany do programu PATRAN

Literatura

1. Czerwiński E.: Radiologiczne aspekty osteoporozy. Medycyna po Dyplomie, maj 2004 – wydanie specjalne.
2. Czerwiński E.: Zasady rozpoznawania osteoporozy. Medycyna po Dyplomie, maj 2005.
3. Lorenc R., Jaworski M.: Nieinwazyjna diagnostyka układu kostnego. Medycyna po Dyplomie, maj 2004 – wydanie specjalne.

MODELOWANIE CZĘSTOŚCI DRGAŃ WŁASNYCH PŁYTY KOŁOWEJ TRANSWERSALNIE IZOTROPOWEJ

ANDRZEJ KATUNIN

Mechanika i Budowa Maszyn, MB2, 5 rok



Streszczenie. Rozpatruje się płytę kołową z laminatu. W pracy zaproponowano określenie częstości własnej drgań osiowosymetrycznych cienkiej płyty kołowej transwersalnie izotropowej utwierdzonej na obwodzie na podstawie metody funkcji wpływu Cauchy'ego. Metoda została zweryfikowana modelem numerycznym oraz eksperymentalnie. Ze względu na poprawność wyników teoretycznych i eksperymentalnych może ona być zastosowana do detekcji uszkodzeń w kompozytach.

1. Sformułowanie zagadnienia własnego dla płyty izotropowej

Cienka płyta kołowa o promieniu R i sztywności walcowej D_0 może być opisana za pomocą zależności (1), gdzie grubość płyty h jest funkcją potęgową zmiennej promieniowej r w ogólnym przypadku. W przypadku niezmiennej grubości płyty $R = r$, czyli $D_0, h_0 = const$, parametr grubości $m = 0$ [1].

$$D = D_0 \left(\frac{r}{R} \right)^m \quad h = h_0 \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{m}{3}} \quad 0 < r \leq R \quad (1)$$
$$D_0 = \frac{Eh_0^3}{12(1-\nu^2)}$$

Zagadnienie swobodnych drgań osiowosymetrycznych płyty utwierdzonej na brzegu sprowadza się do rozwiązania zagadnienia brzegowego [2]:

$$L_0[u] - pr^{-\frac{2}{3}m} u = 0, \quad p = \frac{\rho h_0}{D_0} R^{\frac{2}{3}m} \omega^2. \quad (2)$$

$$u(R) = 0 \quad u'(R) = 0 \quad (3)$$

$$L_0[u] \equiv u^{IV} + 2r^{-1}(m+1)u^{III} + r^{-2}(m^2 + m + \nu m - 1)u^{II} + r^{-3}(m-1)(\nu m - 1)u^I \quad (4)$$

gdzie: u – amplituda ugięcia, $u = u(r)$, ρ – gęstość, ω – parametr częstości, ν – współczynnik Poissona, E – moduł Younga.

Biorąc pod uwagę niezmienną grubość płyty ($m = 0$) operator różniczkowy (4) przyjmuje postać (5).

$$L_0[u] \equiv u^{IV} + \frac{2}{r}u^{III} - \frac{1}{r^2}u^{II} + \frac{1}{r^3}u^I. \quad (5)$$

Po przyrównaniu operatora różniczkowego do zera i rozwiązaniu otrzymanego równania uzyskuje się cztery niezależne pierwiastki, na podstawie których buduje się funkcję wpływu. Przy stałej grubości płyty funkcja wpływu ma następującą postać [1]:

$$K_0(r, \alpha) = \frac{1}{4}\alpha \left[\alpha^2 - r^2 + (\alpha^2 + r^2) \ln \frac{r}{\alpha} \right]. \quad (6)$$

Upraszcza się wtedy równanie (2), do postaci liniowej. Następnie wyznaczane są człony szeregów potęgowych z zależności (7) i (8). Postać zamkniętą szeregów potęgowych można zapisać za pomocą wzorów (9) [3].

$$U = 1 + pu_1 + p^2u_2 + \dots, \quad V = r + pv_1 + p^2v_2 + \dots, \quad (7)$$

$$u_i = \int_0^r K_0(r,s)s^{-2}u_{i-1}(s)ds; \quad u_0 = 1, \quad v_i = \int_0^r K_0(r,s)s^{-2}v_{i-1}(s)ds; \quad v_0 = r, \quad (8)$$

$$U = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k p^k r^{2k} \prod_{i=1}^k \alpha_i, \quad V = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k p^k r^{2k-1} \prod_{i=1}^k \alpha_i. \quad (9)$$

Mając rozwiązanie równania (2) ograniczone w zerze, szeregi (7) oraz funkcje (8) otrzymuje się równanie (10), na podstawie którego buduje się wyznacznik charakterystyczny, który rozwija się w szereg charakterystyczny (11).

$$u = C_1U + C_2V. \quad (10)$$

$$\begin{vmatrix} U & V \\ U' & V' \end{vmatrix} = 1 - a_1(pR^2) + a_2(pR^2)^2 - \dots = 0. \quad (11)$$

Z równania (11) obliczane są współczynniki a , z których oblicza się dwustronne estymatory współczynnika częstości drgań własnych na podstawie wzorów Bernsteina-Kieropiana [4]:

$$(\gamma_1)_- = \sqrt{\frac{a_0}{\sqrt{a_1^2 - 2a_0a_2}}}; \quad (\gamma_1)_+ = \sqrt{\frac{2a_0}{a_1 + \sqrt{a_1^2 - 4a_0a_2}}}. \quad (12)$$

Na podstawie estymatorów współczynnika częstości podstawowej oblicza się częstość własną drgań płyty ze wzoru (13).

$$\omega_1 = \gamma \frac{1}{R^2} \sqrt{\frac{D_0}{\rho h_0}}. \quad (13)$$

2. Modelowanie drgań płyty transwersalnie izotropowej

W przypadku transwersalnej izotropii model drganiowy zmienia się pod względem konstrukcji sztywności walcowej D , która przyjmuje postać macierzy [5]:

$$[D] = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{21} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

gdzie:

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n \{Q_{ij}\}_k (z_k^3 - z_{k-1}^3), \quad (i,j = 1,2,3), \quad (15)$$

z – odległość rozpatrywanej warstwy od linii środkowej laminatu. Wówczas macierz sprężystości Q przyjmuje postać (16) [6], indeksy przy stałych materiałowych oznaczają kierunki rozpatrywanej warstwy. Przy uwzględnieniu kątów obrotu warstwy względem globalnego układu współrzędnych należy wprowadzić macierz cosinusów (17), która pozwala na transformację stałych materiałowych [6].

$$[\bar{Q}] = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{\nu_{21}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ \frac{\nu_{21}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix}. \quad (16)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Uwzględniając powyższe wzory można zapisać wzór dla sztywności pojedynczej warstwy laminatu symetrycznego typu „angle-ply”:

$$[D_{ij}]_k = [T][Q][T]^T (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (18)$$

oraz sztywności całego laminatu

$$D = \sum_{k=1}^n \left(\frac{D_{11} + D_{22}}{2} \right)_k, \quad (19)$$

która jest przedstawiona w postaci sumy średnich arytmetycznych sztywności warstw w kierunkach głównych.

Częstość własna drgań płyty transversalnie izotropowej wyraża się wzorem (20), gdzie współczynnik częstości podstawowej $\gamma = 10,214$ [7], ρ_z – gęstość zastępcza, obliczana na podstawie udziałów objętościowych składników laminatu.

$$\omega = \frac{\gamma}{R^2} \sqrt{\frac{D}{\rho_z h}}. \quad (20)$$

Częstotliwość drgań w Hz otrzymuje się po podzieleniu (20) przez 2π .

W celu porównania wyników z analizą numeryczną i wynikami eksperymentu do modelu należy wprowadzić masę skupioną w środku płyty, która zastępuje czujnik w eksperymencie, gdyż, jak pokazują wcześniejsze badania [1], wywiera ona istotny wpływ na częstość własną drgań. Masa skupiona może być uwzględniona w zależności [8]:

$$\omega_{0m} = \frac{4\alpha}{(2R)^2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}}, \quad (21)$$

gdzie: α – współczynnik częstości, D – sztywność płyty, ρ – masa właściwa, h – grubość płyty, R – promień płyty. Wartości współczynnika α można odczytać z tabeli [8], wyznaczone są one na podstawie stosunku masy skupionej do masy płyty: m / M .

3. Numeryczna i eksperymentalna weryfikacja modelu analitycznego

Modelowanie numeryczne było przeprowadzone za pomocą oprogramowania MSC.Patran/Nastran. Układ zamodelowano jako dwuwymiarowy, na którym utworzono siatkę 1380 elementów skończonych typu Quad4 2DShell z dodatkowym elementem typu 0Dmass imitującym masę skupioną o wartości 0,03 kg. Nałożono warunek brzegowy w postaci utwierdzenia na brzegu płyty. Własności materiałowe ($E_1 = 38,283$ GPa, $E_2 = 10,141$ GPa, $G_{12} = 3,533$ GPa, $\nu_{12} = 0,366$) zadano przy pomocy modułu Laminate Builder, co pozwoliło na uwzględnienie kątów obrotu warstw w laminacie.

Zaproponowany model analityczny zweryfikowano eksperymentalnie w Zamiejscowym Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej w Suwałkach dzięki uprzejmości dra hab. inż. Jerzego Jaroszewicza. Płytę utwierdzono za pomocą śrub i wzbudzono wzbudnikiem elektromagnetycznym. Badania przeprowadzono z zastosowaniem metody rezonansowej oraz impulsowej. Wyniki odczytano z charakterystyk FFT uzyskanych z akcelerometru w środku płyty za pomocą analizatora drgań KSD-400. Zestawienie wyników teoretycznych i eksperymentalnych przedstawiono w Tabelicy 1. Porównano także częstość własną drgań płyty z uszkodzeniami oraz bez uszkodzeń. Uszkodzenia były wprowadzone w postaci pęknięć matrycy. Wyniki badań zestawiono w Tabeli 2. Próbkę została wykonanie nieodpłatnie dzięki dr inż. Pawłowi Kostce przez Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, TU Dresden.

Tabela 1. Wyniki teoretyczne i eksperymentalne częstości własnej drgań płyty

Metoda analityczna	Metoda numeryczna	Metoda rezonansowa	Błąd bezwzględny	
f_{t1} [Hz]	f_{t2} [Hz]	f_{e1} [Hz]	Δ_{t1-e1} [%]	Δ_{t1-t2} [%]
213,46	220,91	218,95	2,57	3,37

Tabela 2. Porównanie częstości własnych drgań płyty z uszkodzeniami oraz bez uszkodzeń

Płyta nieuszkodzona		Płyta uszkodzona		Różnica bezwzględna (płyta uszkodzona i nieuszkodzona)	
Metoda rezonansowa	Metoda impulsowa	Metoda rezonansowa	Metoda impulsowa	Rezonansowa - rezonansowa	Impulsowa-impulsowa
f_{0_rez} [Hz]	f_{0_imp} [Hz]	f_{u_rez} [Hz]	f_{u_imp} [Hz]	Δ_{r-r} [%]	Δ_{i-i} [%]
218,95	222,94	236,94	218,95	8,22	1,79

4. Podsumowanie

Zaproponowany model analityczny cechuje się podobieństwem wyników z modelem numerycznym i eksperymentalnym. W zastosowaniu do detekcji uszkodzeń model może służyć jako odniesienie do układu bez uszkodzeń. Zastosowanie szybkiej transformaty Fouriera do oceny częstości własnej może być ograniczone w przypadkach bardzo małych uszkodzeń, np. mikropęknięć. Planuje się zastosowanie analizy falkowej do eksperymentalnego wyznaczenia częstości drgań własnych w celu zwiększenia dokładności.

Literatura

- Jaroszewicz J., Zoryj L., Metody analizy drgań osiowosymetrycznych płyt kołowych z zastosowaniem funkcji wpływu Cauchy'ego, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 2005, 120 s.
- Zoryj L., Jaroszewicz J., Investigation of the effect of axial loads on the traverse vibrations a vertical cantilever with variable parameters, International Applied Mechanics, vol. 36, 9, 2000, p. 1242-1251.
- Katunin A., Analysis of the influence of thickness parameter on frequencies of axisymmetrical vibrations of clamped circular plates with linearly and nonlinearly variable thickness, The Second International Conference of Young Scientists "Computer Science and Engineering 2007", Lviv 2007, p. 159-162.
- Бернштейн С.А., Керопян К.К., Определение частот колебаний стержневых систем методом спектральной функции, Госстройиздат, Москва 1960, 281 с.
- Hyla I., Ślężiona J., Kompozyty. Elementy mechaniki i projektowania, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2004, 258 s.
- Mechanika sprężystych płyt i powłok, red. Woźniak Cz., Mechanika Techniczna, tom VIII, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001, 768 s.
- Jaroszewicz J., Zoryj L., Katunin A., Dwustronne estymatory częstości własnych drgań osiowosymetrycznych płyt kołowych o zmiennej grubości, III Konferencja Naukowo-Praktyczna „Energia w Nauce i Technice”, Suwałki 2004, s. 45-56.
- Roberson R.E., Vibration of a clamped circular plate carrying concentrated mass, Journal of Applied Mechanics, vol. 18, 4, p. 349.

O MODELOWANIU TEMPERATURY SAMOWZBUDNEJ W LAMINACIE

ANDRZEJ KATUNIN

Mechanika i Budowa Maszyn, MB2, 5 rok



Streszczenie. W niniejszej pracy poruszono zagadnienie generowania temperatury samowzbudnej powstającej między warstwami laminatu. Wyznaczono temperaturę zeszklenia żywicy epoksydowej w laminacie, opracowano i zaprezentowano model numeryczny do wyznaczenia przebiegu temperatury samowzbudnej w czasie oraz funkcję aproksymującą otrzymane wyniki temperaturowo-czasowe. Oszacowano przybliżony czas wzrostu temperatury do temperatury zeszklenia badanego laminatu.

1. Sformułowanie zagadnienia

Rozpatrywany jest model płyty prostokątnej z symetrycznego transversalnie izotropowego 24-warstwowego laminatu epoksydowo-szklanego. Warstwy laminatu są obrócone względem globalnego układu współrzędnych i mogą być przedstawione przy pomocy wzoru strukturalnego: $[0 / 60 / -60 / -60 / 60 / 0]_{4S}$. Ułożenie warstw ilustruje Rys.1.

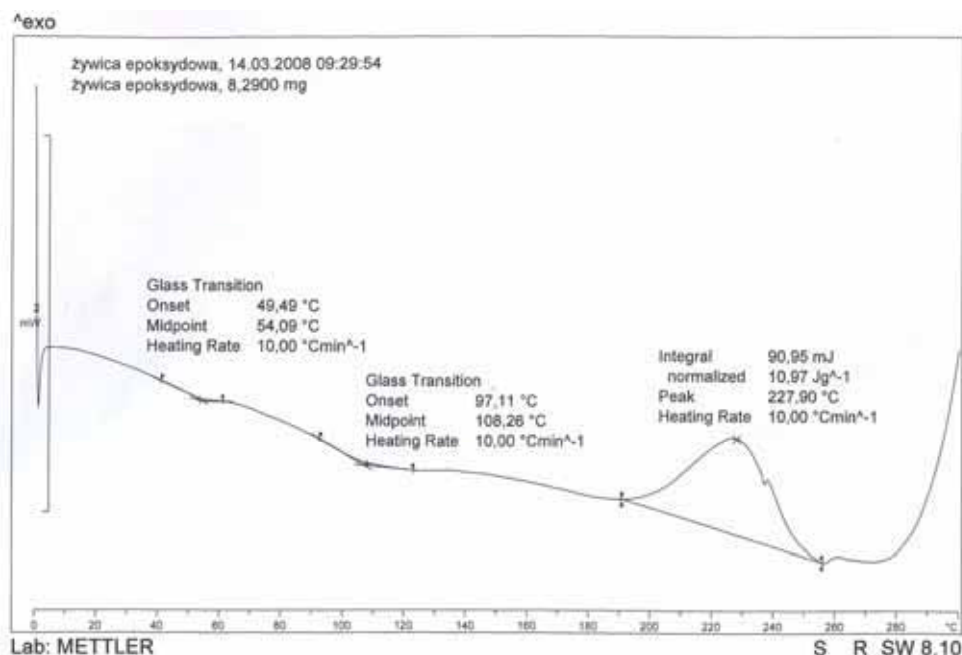


Rys.1. Struktura ułożenia warstw w laminacie

Temperatura samowzbudna, powstająca na skutek tarcia międzywarstwowego w laminacie ma istotny wpływ na zachowanie laminatu, w tym na jego wytrzymałość. Z tego względu, w pracy podjęto badania pola temperatury w funkcji czasu. W analizie ograniczono się do zbadania przedziału wzrostu temperatury w zakresie pomiędzy temperaturą pokojową a temperaturą zeszklenia. W stanie szklistym łańcuchy polimerowe są ze sobą splecione, dlatego w tym przedziale zachowanie laminatu może być opisane modelem Hooke'a. Po przejściu temperatury zeszklenia zachowanie laminatu można opisać modelem lepkosprężystym [1], co skutkuje przede wszystkim spadkiem modułu Younga i nie jest pożądanym zjawiskiem ze względu eksploatacji laminatu jako elementu konstrukcyjnego.

2. Wyznaczenie temperatury zeszklenia

W celu wyznaczenia temperatury zeszklenia żywicy epoksydowej w laminacie przeprowadzono badania metodą różnicowej kalorymetrii skaningowej przy pomocy termoanalyzera DSC 822^e Mettler Toledo i oprogramowania STAR^e. Pomiary były realizowane przy stałym przyroście temperatury 10⁰C/min i masie badanego materiału 8,29 mg. Wyniki badań w postaci termogramu zostały przedstawione na Rys.2. Temperatura zeszklenia jest środkiem odcinka przejścia fazowego zaznaczona na Rys.2. jako „Glass transition midpoint”.



Rys.2. Termogram z zaznaczonymi temperaturami zeszklenia

3. Definiowanie modelu numerycznego oraz przeprowadzenie analizy

Do modelowania i analizy numerycznej zjawiska użyto oprogramowania Marc/Mentat. Zamodelowano belkę o wymiarach 400x50x5,28 mm, gdzie grubość jednej warstwy wynosi 0,22 mm. Model geometryczny podzielono na siatkę 4800 bryłowych elementów skończonych o wymiarach 5x5x0,22 mm o właściwościach naśladowujących zachowanie powłoki i uwzględniających przyrost temperatury na skutek tarcia. Elementy te były wybrane w celu wyeliminowania dużej różnicy pomiędzy wymiarami elementów. Materiał został zdefiniowany za pomocą modelu anizotropowego w oprogramowaniu Marc/Mentat, co pozwoliło na dokładne odwzorowanie modelu transwersalnie izotropowego poprzez zdefiniowanie macierzy sprężystości, charakterystycznej dla danego przypadku. Dla stałych materiałowych laminatu ($E_1 = 38,283$ GPa, $E_2 = 10,141$ GPa, $G_{12} = 3,533$ GPa, $\nu_{12} = 0,366$) otrzymano współczynniki macierzy sprężystości w zależności od kąta obrotu warstwy. Wartości ww. współczynników zestawione są w Tabeli 1. Zdefiniowano również charakterystyki termomechaniczne materiału. Zastosowano izotropowy model przepływu ciepła, w którym współczynniki termomechaniczne wynosiły: współczynnik przewodzenia ciepła $0,29$ W/m²K [2], ciepło właściwe 1286 J/kgK [3], gęstość 1180 kg/m³ [2].

Tabela 1. Współczynniki macierzy sprężystości dla różnych kątów obrotu warstw laminatu

Kąt obrotu	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{33}	C_{44}	C_{66}
0°	$4,801 \cdot 10^{10}$	$1,998 \cdot 10^{10}$	$6,592 \cdot 10^9$	$1,142 \cdot 10^{10}$	$3,533 \cdot 10^9$	$1,401 \cdot 10^{10}$
+60°	$1,421 \cdot 10^{10}$	$7,036 \cdot 10^9$	$9,4 \cdot 10^9$	$2,214 \cdot 10^{10}$	$6,065 \cdot 10^9$	$3,588 \cdot 10^9$
-60°	$4,727 \cdot 10^9$	$1,363 \cdot 10^9$	$2,589 \cdot 10^8$	$2,937 \cdot 10^{10}$	$4,2798 \cdot 10^{10}$	$1,682 \cdot 10^9$

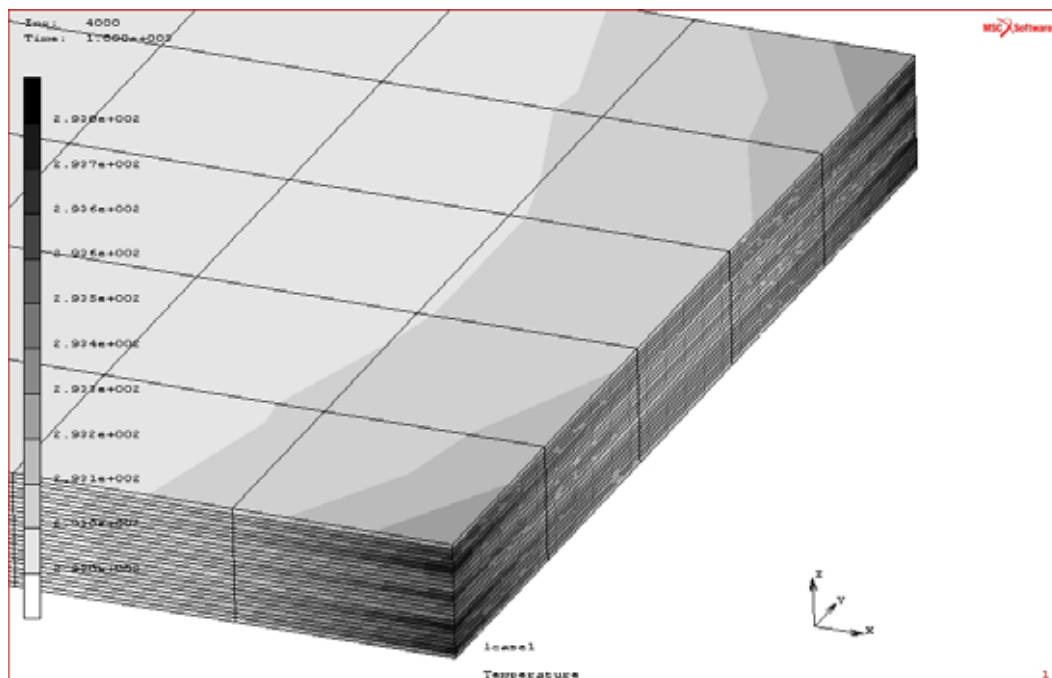
W modelu założono trzy typy warunków brzegowych. Przyłożono utwierdzenie w węzłach na jednym z boków modelu (odebrano możliwość przemieszczeń w osiach X, Y i Z), siły skupione przyłożone naprzemiennie sinusoidalnie w węzłach na przeciwległym boku od utwierdzenia o wartościach maksymalnych $5,3$ N oraz $-5,3$ N odpowiednio oraz warunek

termiczny typu „plastic heat generation” przyłożony w węzłach pomiędzy warstwami, warunek ten pozwala na uzyskiwanie temperatury na skutek tarcia.

Warunki kontaktu pomiędzy warstwami założono następująco. Każdą warstwę laminatu zdefiniowano jako ciało odkształcalne ze współczynnikiem tarcia 0,15 [4] gdzie jako model tarcia przyjęto model Coulomba typu stick-slip. Jako typ kontaktu wybrano „touching”, gdyż pozwala on na uwzględnienie przemieszczeń warstw oraz tarcia.

Zdefiniowano warunek początkowy w postaci temperatury o wartości 293 K i zastosowano go do wszystkich węzłów modelu. Analizę zdefiniowano jako termomechaniczną quasi-statyczną, do obliczeń użyto pełnego iteracyjnego algorytmu Newtona-Raphsona. Czas analizy ustawiono na 1000 s oraz zastosowano adaptacyjny krok czasowy z następującymi parametrami: początkowy krok czasowy 0,00025, minimalny krok czasowy 0,000025, maksymalny krok czasowy 0,00025, współczynnik tłumienia 0,0002, liczba cykli w kroku 20. Założono możliwość dużych odkształceń, czyli przyjęto model geometrycznie nieliniowy.

Analizę przeprowadzono dla 4000 kroków czasowych (co odpowiada 1000 s) w 26090 cyklach. Mapę rozkładu temperatur w warstwach laminatu przedstawiono na Rys.3.

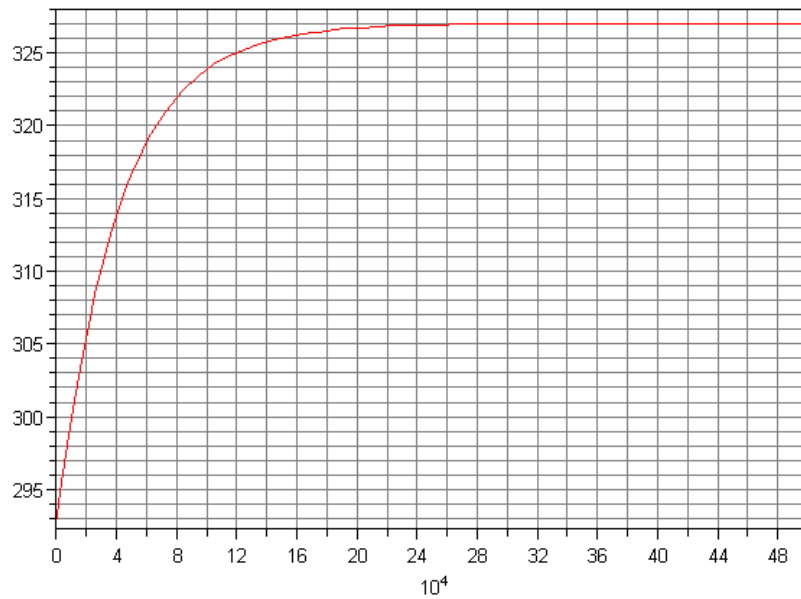


Rys.3. Mapa rozkładu temperatury samowzbudnej w laminacie po czasie 1000 sekund

Po przeprowadzeniu analizy zaobserwowano quasi-liniowy nieznaczny przyrost temperatury o wartości 0,8068 K. Na podstawie otrzymanych wyników wnioskowanie o charakterze wzrostu temperatury nie jest możliwe. Ze względu na czasochłonność obliczeń oraz zwiększenie kroku czasowego prowadzenie analizy dla dłuższego czasu również nie jest możliwe. Dla przybliżenia charakteru zmian zastosowano aproksymację funkcją eksponencjalną otrzymanych wyników, co wynika z fizyki zjawiska. Do aproksymacji użyto modułu Optimization pakietu Maple. Pod uwagę brano najwyższą temperaturę, jaka występowała w kolejnych krokach obliczeń numerycznych. Funkcja aproksymująca dla danego przypadku przybrała postać (1), gdzie a, b, c – stałe, n – liczba cykli.

$$T = a - b \exp(-cn). \quad (1)$$

Po wygenerowaniu residuów zastosowano funkcję, aproksymującą z użyciem metody najmniejszych kwadratów. Otrzymaną charakterystykę zmian temperatury (Rys.4) można opisać zależnością $T = 327,04 - 34,04 \cdot \exp(-0,000023987n)$.



Rys.4. Charakter zmian temperatury samowzbudnej w laminacie otrzymany z aproksymacji

Dane z analizy numerycznej porównano z otrzymaną funkcją i uzyskano maksymalny błąd aproksymacji ok. 0,02 %. Z otrzymanego wykresu uzyskano przybliżony czas, przy którym laminat osiąga temperaturę zeszklenia i wynosi on 560000 s.

4. Podsumowanie

Szereg przeprowadzonych obliczeń i badań daje możliwość wstępnej oceny charakteru zmian temperatury samowzbudnej w laminacie. Po pomyślnej weryfikacji eksperymentalnej modelu może on służyć podstawą do zbudowania zmęczeniowego modelu matematycznego dla danego zagadnienia.

Podziękowania

Autor wyraża wdzięczność dr inż. Grzegorzowi Działkiewiczowi i dr inż. Grzegorzowi Kokotowi za nieocenioną pomoc w postaci konsultacji z zakresu modelowania numerycznego, a także prof. Janowi Łukaszczykowi oraz dr inż. Izabelli Barszczewskiej-Rybarek z Wydziału Chemicznego Politechniki Śląskiej za możliwość przeprowadzenia badań dot. wyznaczenia temperatury zeszklenia żywicy epoksydowej laminatu.

Literatura

1. Verlag C.H., Tworzywa sztuczne. Poradnik. Wydanie piąte zmienione, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000, 1029 s.
2. Hyla I., Ślężona J., Kompozyty. Elementy mechaniki i projektowania, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2004, 258 s.
3. Koo H.S., Park S.J., Kim B.W., Kim M.C., Ha Y.K., Kim Y.S., Thermal analysis during epoxy casting process for joint units of high voltage cable, ANTEC 2000 Plastics: The magical solution, vol.1: Processing, Society of Plastics Engineers, 2000, 1415 p.
4. Licari J.J., Coating materials for electronic applications – polymers, processes, reliability, testing, William Andrew Publishing/Noyes, 2003, 547 p.

KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE PROJEKTOWANIA WALCA DRUKUJĄCEGO DRUKARKI FLEKSOGRAFICZNEJ

MATEUSZ KWINTA,

Zarządzanie i Inżynieria Produkcji, ZC6, 5 rok

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



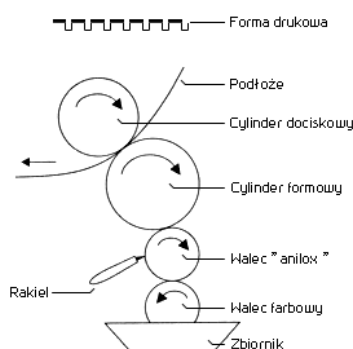
Streszczenie. Artykuł dotyczy wykorzystania systemów Komputerowego Wspomagania Projektowania, wraz z analizą wytrzymałościową, przeprowadzoną przy zastosowaniu Metody Elementów Skończonych, na konkretnym przykładzie projektowym. Optymalizacji wariantowej, możliwej dzięki wykorzystaniu powyższego systemu, poddany został walec drukujący drukarki fleksograficznej. Artykuł przedstawia również metodę druku fleksograficznego, szeroko stosowaną w produkcji opakowań kartonowych.

1. Wprowadzenie

Fleksografia jest techniką druku wypukłego elastycznymi formami drukowymi oraz ciekłymi farbami szybko schnącymi. Charakterystyczną cechą fleksografii jest występowanie elastycznej, wypukłej formy drukowej wykonanej zazwyczaj z polimeru, rzadziej z gumy. Technika ta jest najbardziej uniwersalną techniką druku, jeśli chodzi o możliwości zadruku różnych podłoży drukowych.

Zespół drukujący (rys. 1) [1] złożony jest najczęściej z pozbawionego obciążenia stalowego cylindra drukowego oraz z cylindra formowego (walec drukujący), na który jest nakładana fleksograficzna forma drukowa. Farba podawana jest na formę np. poprzez cylinder systemu „Anilox”. Walec farbowy zanurzony jest w farbie i rotując, zbiera ją. Styka się on z aniloxem, który wykonany jest zwykle ze stali a jego powierzchnia cechuje się jednakowymi zagłębieniami. Rakiel służy do usuwania nadmiaru farby z aniloxa, który styka się bezpośrednio z formą drukową. Przykładową maszynę fleksograficzną przedstawia rys. 2 [3].

Obecnie najpowszechniej na materiał formy drukowej stosuje się fotopolimery. Wysoki koszt takiego materiału powoduje, że rozwiązania konstrukcyjne walca drukującego muszą ułatwiać wymianę formy drukowej i zapewniać odpowiednie parametry pracy, przy których praktycznie nie występują błędy zadruku.



Rys. 1. Przykładowy zespół drukujący



Rys. 2. Przykładowa drukarka fleksograficzna

Fleksografia znajduje powszechne zastosowanie przede wszystkim w druku opakowań na podłożach z: kartonu, folii o dowolnej grubości, plastiku i aluminium, stosowana jest również do drukowania: prasy, czy książek.

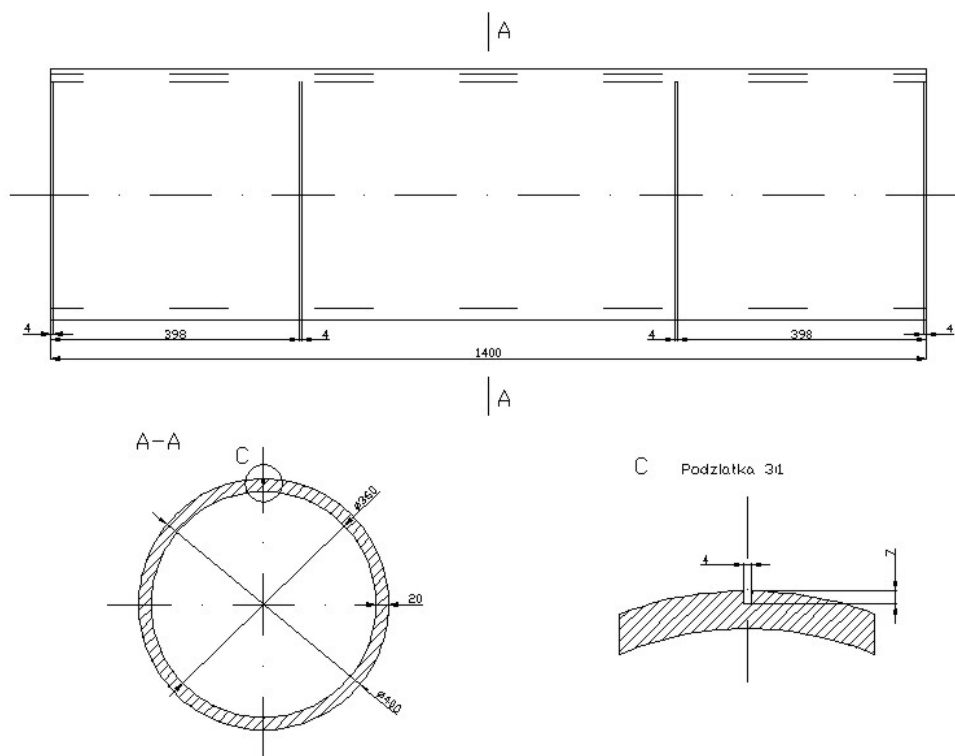
2. Model numeryczny walca drukującego

Walec drukujący, najczęściej wykonywany jest ze stali, a jego wymiary geometryczne są zróżnicowane i uzależnione zazwyczaj od modelu drukarki, jej producenta oraz konkretnych wymagań użytkownika. Do wykonania modeli numerycznych oraz późniejszej ich analizy wytrzymałościowej, został użyty jeden z przedstawicieli systemów CAE, jakim jest system MSC. PATRAN/NASTRAN.

Trzy podstawowe warianty wykonanych modeli numerycznych walca drukującego to:

- walec bez rowka,
- walec z rowkiem prostokątnym,
- walec z rowkiem trapezowym.

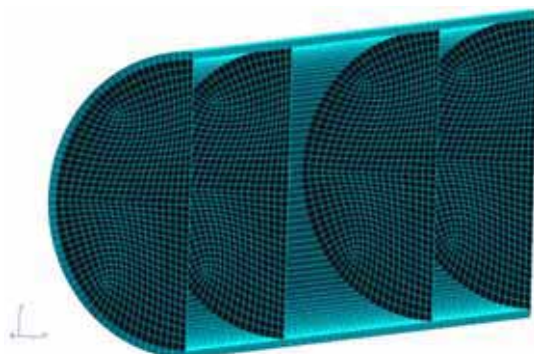
Wszystkie modele, mają oczywiście pewne cechy wspólne, którymi są podstawowe wymiary geometryczne (rys. 3). We wszystkich trzech rodzajach modeli, długość walca wynosi 1400mm, natomiast grubość ścianki 20mm. Cechą charakterystyczną takich walców, jest wzmocnienie poprzez tarcze, które są w spawane w środek walca, w różnych miejscach. Wariantowość modeli, to także różny rozstaw tarcz: 400 mm, 466mm, 500mm od krawędzi walca oraz grubość tarcz, w jakich mogą one być wykonane: 4mm, 6mm, 8mm oraz 10mm.



Rys. 3. Wymiary techniczne jednego z wariantów modelu z rowkiem prostokątnym

W programie zdefiniowano materiał, z jakiego wykonany jest walec o własnościach charakterystycznych dla stali: modułu Younga (200000MPa) i współczynnika Poissona (0.3). We wszystkich wykonanych modelach z rowkami (rys. 4), zostało zdefiniowanych sześć różnych wariantów obciążenia: 3 siły punktowe działające w 3-ch różnych miejscach na obwodzie walca, oraz 3 obciążenia ciągle działające wzdłuż całej długości walca.

Model bez rowka posiada 2 warianty: siłę punktową oraz obciążenie ciągłe, wystarczające ze względu na symetrię geometrii walca. Główne utwierdzenie zostało zadane w osi obrotu walca na jego końcach. Zadano także utwierdzenie dodatkowe, mające za zadanie zapobiegać obrotom walca przy działaniu obciążenia mimośrodowo (na krawędzi rowka).



Rys. 4. Model numeryczny walca drukującego drukarki fleksograficznej

3. Analiza wytrzymałościowa i optymalizacja wariantowa

Systemy Komputerowego Wspomagania Projektowania pozwalają na analizę różnych wariantów konstrukcyjnych przyszłego wyrobu [1], a co za tym idzie wybór najbardziej optymalnego rozwiązania, z uwzględnieniem zakładanych kryteriów. Analiza wytrzymałościowa w systemach tych, jest przeprowadzana z użyciem Metody Elementów Skończonych. Optymalizację wariantową wykonanego modelu, możemy podzielić na dwie zasadnicze części. Pierwszą część stanowi optymalizacja rozstawu tarcz wzmacniających, natomiast drugą optymalizacja grubości tych tarcz. W obydwóch przypadkach kryterium optymalizacyjnym są wartości maksymalne i mapy rozkładu głównie przemieszczeń, ale także naprężeń zredukowanych dla wariantów, gdy obciążenie działa na krawędzi rowka.

Model bez rowka traktowany jest jako model bazowy, gdyż wprowadzenie rowka powoduje znaczącą zmianę sztywności układu i wzrost przemieszczeń. Obecność rowka jest jednak niezbędna ze względu na pełnioną funkcję, a zastosowanie wewnętrznych tarcz wzmacniających, znacząco poprawia rozkłady przemieszczeń.

Tabela 1. Wartości maksymalne przemieszczeń oraz naprężeń zredukowanych dla przykładowych wariantów

Model	Przemieszczenia [mm]		Naprężenia zredukowane [MPa]	
	obc. ciągłe	obc. punktowe	obc. ciągłe	obc. punktowe
brak rowka, z tarczami wewn.	0.0213	0.0829	38.2	95.3
rowek prostokątny, bez tarcz wewn.	0.0595	0.155	38.4	326
rowek prostokątny, z tarczami wewn.	0.0230	0.104	38.4	328

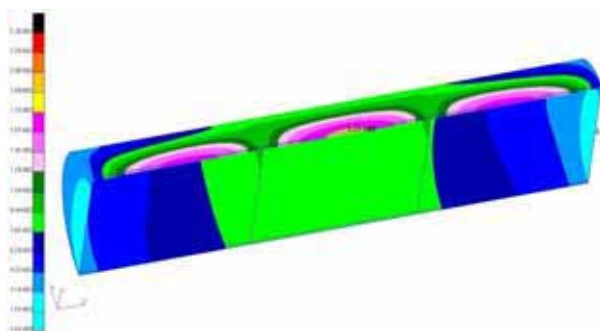
Wynikiem przeprowadzonej optymalizacji był wybór najlepszego wariantu, w którym zastosowano: rowek prostokątny, grubość tarcz wzmacniających zewnętrznych wynosi 6mm oraz wewnętrznych 4mm, przy rozstawie równym 466mm.

Wybór rowka prostokątnego, a nie trapezowego podyktowany był przede wszystkim uzyskanymi mniejszymi wartościami maksymalnych naprężeń redukowanych, dla przypadków obciążenia punktowego. Wybrany wariant, cechuje się równomiernymi rozkładami i względnie małymi wartościami przemieszczeń, z uwzględnieniem zasadności wykonania w nim wszystkich koniecznych zmian konstrukcyjnych (np. koszt, trudności technologiczne etc.).

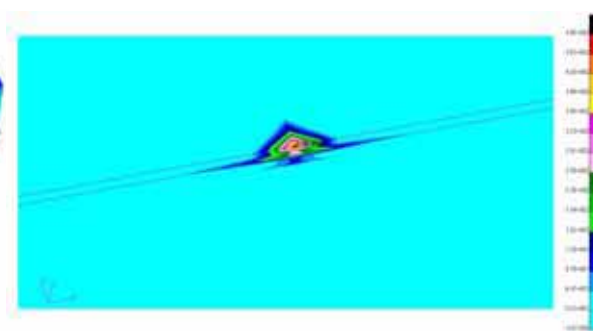
Tabela 2. Wartości maksymalne przemieszczeń oraz naprężeń redukowanych dla najlepszego wariantu rozwiązań konstrukcyjnych

Model	Przemieszczenia [mm]		Naprężenia redukowane [MPa]	
	obc. ciągłe	obc. punktowe	obc. ciągłe	obc. punktowe
najlepszy wariant	0.0177	0.0939	25.6	328

Rysunki 5 i 6 przedstawiają uzyskane rozkłady przemieszczeń oraz naprężeń redukowanych wg hipotezy Hubera-Misesa, dla wybranego najlepszego wariantu rozwiązań konstrukcyjnych.



Rys. 5. Rozkład przemieszczeń przy obciążeniu ciągłym [mm]



Rys. 6. Rozkład naprężeń redukowanych przy obciążeniu punktowym (fragment) [MPa]

4. Wnioski

Systemy komputerowego wspomaganie projektowania czy komputerowego wspomaganie prac inżynierskich (w tym przeprowadzanie analiz wytrzymałościowych), pozwalają na wybór najlepszego rozwiązania konstrukcyjnego przyszłego wyrobu. Daje to możliwości skrócenia czasu projektowania wyrobu, przygotowania produkcji oraz pozwala znacznie ograniczyć związane z tym koszty. Jednocześnie jesteśmy w stanie przewidzieć zachowania konstrukcji w warunkach, w jakich będzie pracował projektowany przez nas element.

Literatura

1. Chlebus E., Techniki Komputerowe CAx w Inżynierii Produkcji, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa (2000).
2. Strona internetowa: www.portaldtp.pl
3. Strona internetowa producenta maszyn do produkcji opakowań kartonowych "HMB Mikołów": www.hmb-opakowania.pl

ANALIZA SYSTEMÓW RUROWYCH ZA POMOCĄ OPROGRAMOWANIA ANSYS

ROBERT MAZUR

Automatyka i Robotyka, AB3, 5 rok

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

dr inż. Adam Długosz



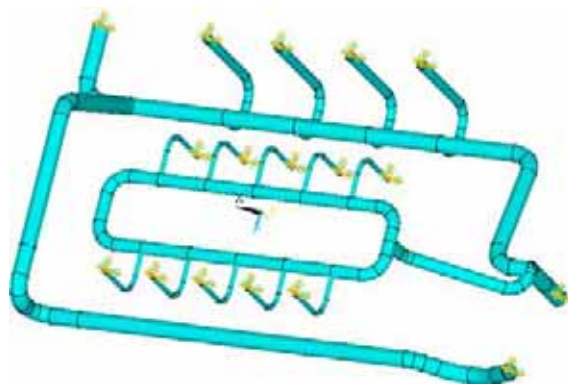
Streszczenie. W pracy przedstawiono analizę systemów rurowych wykonaną w programie ANSYS. Głównym celem było określenie optymalnego położenia i typu zawieszonych stosowanych w tych systemach, które pozwolą na taką pracę konstrukcji odkształcanej na skutek zmian temperatury i ciśnienia, aby powstające naprężenia i siły nie przekroczyły dopuszczalnych wartości.

1. Wprowadzenie

W zależności od przeznaczenia, rozróżnia się wiele typów sieci rurowych, począwszy od prostych układów stosowanych w gospodarstwach domowych poprzez bardziej rozległe i skomplikowane systemy występujące w zakładach przemysłowych bądź instalacjach okrętowych, a skończywszy na ogromnych dalekosiężnych sieciach rurociągów biegnących przez całe państwa. W rurociągach głównie transportuje się ciecze lub materiały sypkie.

W skład rurociągów, poza rurami wchodzi także dużo innych elementów: złącza rurowe, kolana, rozgałęźniki, zwężki, kompensatory odkształceń cieplnych, podpory, zawieszania, zawory, aparatura pomiarowa, pompy, filtry, sprężarki i inne. Wymagania, jakie stawia się układom rurowym, to przede wszystkim odpowiednia wytrzymałość, szczelność, małe opory przepływu i odporność na oddziaływanie przewodzonego czynnika.

W pracy analizowano system rurowy (rys. 1) transportujący parę wodną o temperaturze 300°C , pod ciśnieniem 6 MPa, przy czym cała sieć biegnie w powietrzu i zamocowana jest na odpowiednich zawieszaniach. Części rurociągu mogą być zawieszane za pomocą jednego z czterech elementów: na sprężynie, sprężynie z dystansem, siłowniku, utwierdzeniu stałym. Wraz ze wzrostem ciśnienia i temperatury, w układzie powstają nowe siły i naprężenia spowodowane wydłużaniem się materiału.



Rys. 1. Przykładowy system rurowy zamodelowany w programie ANSYS

W tabeli 1 umieszczono wartości współczynników rozszerzalności termicznej dla niektórych materiałów. Jak widać, wpływ wzrostu temperatury na zachowanie się układu jest

niezwykle istotny – materiał wydłuża się, a to z kolei powoduje powstanie nowych sił w układzie. Stosując odpowiednie kompensatory naprężeń cieplnych i manipulując rozmieszczeniem oraz typem zawiesznień można redukować naprężenia cieplne.

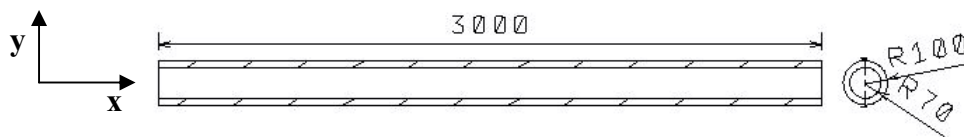
Celem pracy było dobranie optymalnego rozmieszczenia zawiesznień, to znaczy określenie położenia i typu zastosowanych zawiesznień, które pozwolą na taką pracę konstrukcji odkształcającej pod wpływem zmian temperatury i ciśnienia, aby powstające w układzie naprężenia i siły na króćcach nie przekroczyły dopuszczalnych wartości.

Tabela 1. Współczynniki rozszerzalności termicznej metali α

Materiał	Wartość	Jednostka
Stal węglowa	1,2	$\cdot 10^{-5} \cdot 1/^{\circ}\text{C}$
Żeliwo	1,05	$\cdot 10^{-5} \cdot 1/^{\circ}\text{C}$
Miedź	1,7	$\cdot 10^{-5} \cdot 1/^{\circ}\text{C}$
Aluminium	2,4	$\cdot 10^{-5} \cdot 1/^{\circ}\text{C}$

2. Moduł rurowy w systemie ANSYS

Ze względu na wysoką jakość oprogramowania i jego możliwości w zakresie obliczeń układów rurowych i zadań optymalizacji, zdecydowano się na klasyczną wersję systemu ANSYS. Aby sprawdzić system i określić najodpowiedniejszą metodę modelowania, dokonano obliczeń wstępnych dla prostego odcinka rury (rys. 2).



Rys. 2. Geometria i wymiary badanego obiektu

Rura jest nagrzana do temperatury 300°C i utwierdzona na stałe na obu końcach. Siły występujące w podstawach zostały wyznaczone analitycznie oraz za pomocą MES, wykorzystując:

- moduł „Piping Models”, w którym stosuje się m.in. elementy PIPE16,
- modelowanie powierzchniowe, w którym wykorzystano elementy SHELL181,
- modelowanie bryłowe, w którym wykorzystano elementy SOLI185,
- modelowanie osiowo symetryczne, w którym wykorzystano elementy PLANE182 ,
- modelowanie belkowe, w którym wykorzystano elementy BEAM188.

Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 2 i na rys. 3. Grubą linią poziomą przy wartości 12072790 N oznaczono rozwiązanie analityczne, które stanowiło w tym przypadku punkt odniesienia do interpretacji wyników analiz numerycznych. Symbole zastosowane przy nazwach elementów z tabeli 2 oznaczają: R – odebrane wszystkie stopnie swobody w podstawie, F – odebraną możliwość ruchu w kierunku osi X w podstawie.

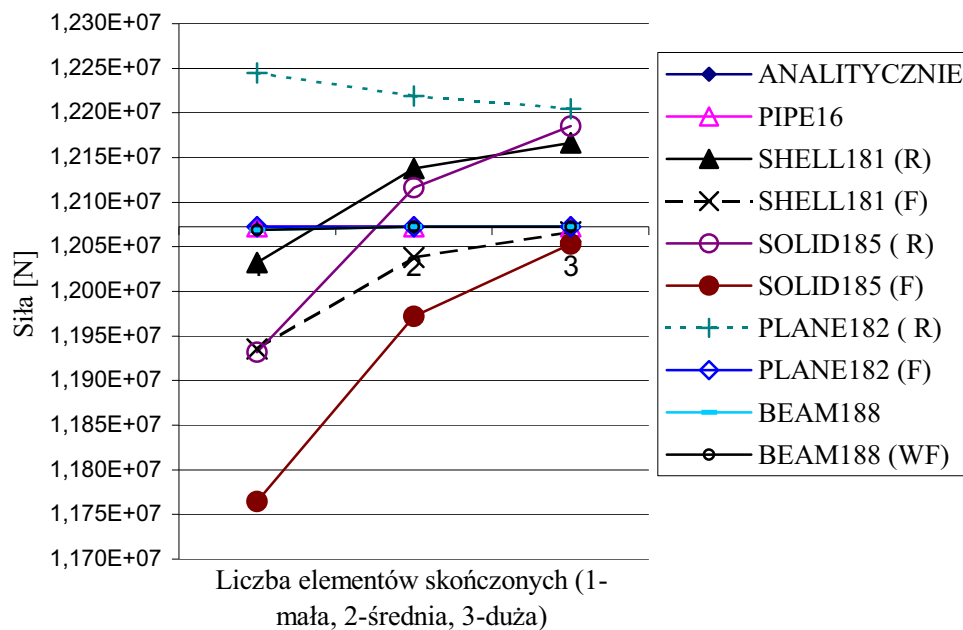
Jak widać na rys. 3, dopiero odpowiednie nałożenie warunków brzegowych (odebrana lub nie możliwość rozszerzania promieniowego rury w podstawie) pozwala uzyskać poprawne rozwiązania, czyli zbliżone do wyniku analitycznego. Wszystkie pozycje z (F) w nazwie szybciej lub wolniej zbiegają się do rozwiązania analitycznego. Najszybciej poprawne rozwiązanie osiągnięto w analizie wykorzystującej moduł „Pipe Module”.

Jak widać na rys. 3, dopiero odpowiednie nałożenie warunków brzegowych (odebrana lub nie możliwość rozszerzania promieniowego rury w podstawie) pozwala uzyskać poprawne rozwiązania, czyli zbliżone do wyniku analitycznego. Wszystkie pozycje z (F) w nazwie

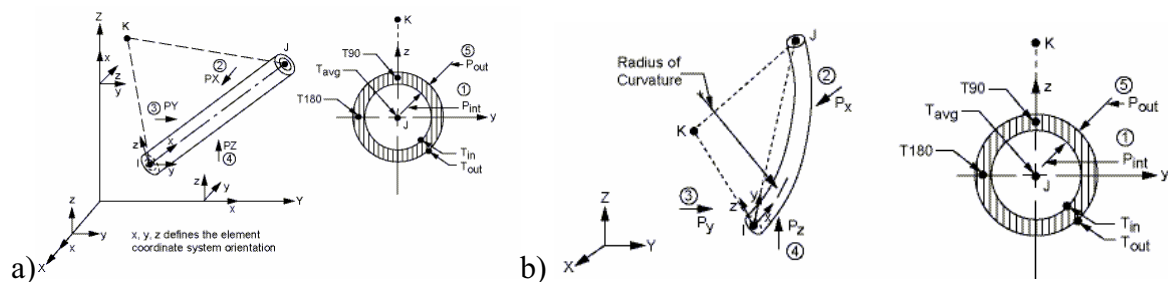
szybciej lub wolniej zbiegają się do rozwiązania analitycznego. Najszybciej poprawne rozwiązanie osiągnięto w analizie wykorzystującej moduł „Pipe Module”.

Tabela 2. Tabela błędów względnych uzyskanych przy wyznaczaniu w podstawie wartości reakcji działających na osi X wyrażona w % gdzie punktem odniesienia jest wartość z rozwiązania analitycznego

	PIPE16	SHELL181 (R)	SHELL181 (F)	SOLID185 (R)	SOLID185 (F)	PLANE182 (R)	PLANE182 (F)	BEAM188 (WF)	BEAM188 (WF)
1	0	0.33505	1.13843	1.16543	2.55045	1.422869	0	0.03214	0.03214
2	0	0.33505	0.28535	0.362302	0.83717	1.210242	0	0.00083	0.00083
3	0	0.33505	0.77538	0.931268	0.16058	1.093782	0	8.3E-05	8.3E-05



Rys. 3. Porównanie sił działających wzdłuż osi rury



Rys. 4. Elementy skończone stosowane w analizie systemów rurowych: a) PIPE16 , b) PIPE18

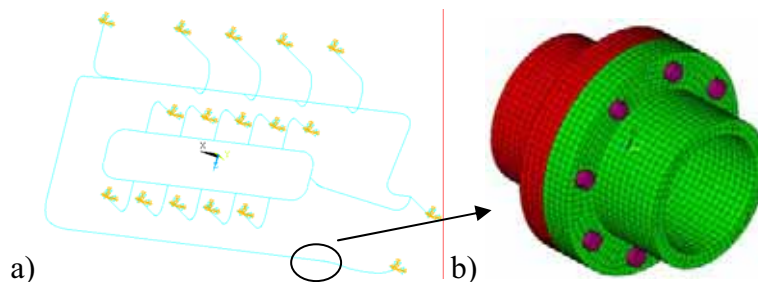
„Pipe Module” programu ANSYS jest modułem bardzo usprawniającym proces modelowania układów rurowych. Jego duża wydajność jest spowodowana tym, że w obliczeniach wykorzystuje się dwuwęzłowe elementy skończone o sześciu stopniach swobody w każdym węźle (rys. 4 a) i b)). Mniejsza liczba węzłów w stosunku do modeli bryłowych i powierzchniowych znacznie skraca czas obliczeń. Elementami PIPE16 modeluje się odcinki proste w układzie, a PIPE18 rury zakrzywione (np. kolanka). Kolejną zaletą tego

modułu jest usprawnienie samego procesu modelowania. Prawie wszystkie czynności związane z przygotowaniem modelu są dostępne z jednego poziomu, jedynie dane materiałowe i utwierdzenia należy zadać poleceniami znajdującymi się na innych poziomach programu.

3. Możliwości submodelingu i optymalizacji

Kolejnym istotnym zagadnieniem jest połączenie submodelingu z optymalizacją. Termin submodeling oznacza poddanie analizie jakiegoś obszaru (zwanego submodelem) wyciętego z całego układu, który został przeanalizowany. W procesie tym na brzegach submodelu zadaje się jako warunki brzegowe wartości obliczone w tych miejscach za pomocą modelu globalnego (np. utwierdzenia, siły, przemieszczenia). Submodel jest modyfikowany w celu uzyskania dokładniejszych wyników stosując np. zmianę geometrii, zagęszczenie siatki MES. Działania takie są dozwolone, ponieważ analizie poddana będzie tylko część układu, a nie cały, a przez to ilość danych do przetworzenia jest mniejsza.

Przykładem zastosowania submodelingu może być analiza połączenia rurowego. Analizując system rurowy za pomocą elementów PIPE, istnieje możliwość dokładnego wyznaczenia sił i naprężeń występujących w elementach, natomiast jeśli chodzi o wyniki w miejscach łączy i utwierdzeń, jest już dużo gorzej, gdyż często występują tam elementy, których nie uwzględniono (np. śruby) lub zastąpiono występujące elementy odpowiednimi współczynnikami bezpieczeństwa. Przykład takich modeli przedstawiono na rys. 4, gdzie część modelu rurowego zastąpiono modelem bryłowym.



Rys. 5. Model geometryczny: a) całego układu (PIPE) b) submodelu (SOLID)

Jeśli chodzi o zagadnienie optymalizacji, program ANSYS posiada duże możliwości także w tym zakresie. Z powodu braku miejsca na szerszy opis jego możliwości wymienione zostanie tylko kilka jego głównych cech: jako funkcję celu poszukuje się zawsze minimum tylko jednego parametru, system oferuje trzy własne metody poszukiwania rozwiązania (losowa, średnio-dokładna i dokładna) oraz stwarza możliwość skorzystania w tym celu z zewnętrznego programu. Posiada trzy metody służące ocenie jakości rozwiązania i zachowania układu, pozwala na definiowanie własnych rozwiązań. Moduł ten można zastosować w wielu zadaniach, praktycznie w każdym zagadnieniu, gdzie występują zmiany wartości konkretnych parametrów. Planuje się wykorzystać go w pracy, głównie do optymalizacji rozmieszczenia i typów zawiesznień, ale można go stosować także w innych celach np. aby zoptymalizować liczbę i wymiary śrub na kołnierzu połączeń rurowych (por. rys. 4).

Literatura

1. Dietrich M., Podstawy konstrukcji maszyn tom 2, WNT, Warszawa (1999)
2. Gosztowtt L., Rurociągi i armatura, PWN, Warszawa (1956)
3. <http://www.mece.ualberta.ca/tutorials/ansys>

PROJEKTOWANIE ELEMENTÓW SILNIKA SPALINOWEGO WYSOKOPRĘŻNEGO

ROBERT MAZUR

Automatyka i Robotyka, AB3, 5 rok

Opiekun naukowy: dr. inż. Adam Długosz



Streszczenie. Niniejszy artykuł poświęcony jest tematyce projektowania elementów silników spalinowych z zastosowaniem nowoczesnych technik komputerowych. Stwierdzenie "techniki komputerowe" w tym przypadku oznacza zastosowanie programów MathCAD, CATIA, INVENTOR oraz ANSYS w procesie projektowania i weryfikacji. Poza opisem ważniejszych elementów zastosowanej metodologii projektowania artykuł, zawiera także wyniki obliczeń analitycznych, numerycznych, oraz porównanie otrzymanych wyników z obiektem rzeczywistym.

1. Wprowadzenie

W ramach wykonanej drugiej pracy przejściowej zaprojektowano, zamodelowano i zweryfikowane niektóre elementy czterosuwowego silnika spalinowego tłokowego wysokoprężnego o zapłonie samoczynnym. Elementy te to: tłok, pierścienie uszczelniające i zgarniające, cylinder, sworzeń, korbówód, wał korbowy, obudowa silnika oraz miska olejowa (rys. 1). W oparciu o wytyczne literaturowe przeprowadzono analityczne obliczenia wstępne (wspomagane programem MathCAD) głównych parametrów części silnika, następnie w oparciu o te dane wykonano geometrię 3D i jej złożenie w programie CATIA V5 R14. Mając gotowe modele, przystąpiono do analiz numerycznych, w ramach których przeprowadzono analizę termomechaniczną MES dla stanu ustalonego za pomocą programu ANSYS v10 oraz analizę kinematyczną w programie INVENTOR 11. Następnie porównano wyniki analityczne i numeryczne z zaleceniami literaturowymi oraz sformułowano wnioski.



Rys. 1. Model 3D silnika złożonego ze wszystkich zamodelowanych elementów

2. Parametry elementów silnika

Zdecydowano, że należy zaprojektować taki silnik, który byłby mocniejszą alternatywą dla jednostek wykorzystywanych w pojazdach FSO Polonez Truck 1.9GLD. Pod tym kątem zostały wykonane wszystkie obliczenia. Obliczenia były wykonywane zgodnie z instrukcjami literaturowymi, a parametry tak dobierane, aby nie przekroczyły określonych wartości dopuszczalnych (przykład: jeśli zaprojektowany trzon korbowodu nie posiadał odpowiedniej odporności na wyoboczenie, przewymiarowano jego konstrukcję np: zwiększając jego najmniejsze pole powierzchni przekroju poprzecznego, ponownie przeliczono i sprawdzono, czy powstające naprężenia są mniejsze od maksymalnych dopuszczalnych naprężeń krytycznych). W tabeli 1 porównano literaturowe oraz obliczone wartości parametrów charakterystycznych dla silników.

Tabela 1. Porównanie parametrów silników

Parametr	Model	1.9GLD
Moc użyteczna silnika [kW] ($[KM]$)	70 (~95)	51 (~70)
Pojemność silnika [cm^3]	2417	1905
Stopień sprężania	20:1	23:1
Prędkość obrotowa silnika [obr / min]	4500	4600
Średnica cylindra [mm]	90	83
Liczba cylindrów	4	4
Skok tłoka [mm]	95	88
Rozstaw osi korbowodu [mm]	158	145
Odległość między osiami cylindrów [mm]	117	-

Różnice występujące w tabeli 1 są niewielkie, przy czym w zaprojektowanym modelu są one zazwyczaj większe, co w połączeniu z faktem iż modelowany silnik posiada więcej mocy, może świadczyć o poprawności wykonanych obliczeń.

3. Analizy numeryczne

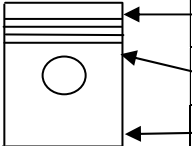
Po przeprowadzonych obliczeniach analitycznych, należałoby zweryfikować poprawność zaprojektowanych obiektów innymi metodami, rzeczywistymi (na przykład wykonując model rzeczywisty i poddając go testom) bądź wirtualnymi. W ramach niniejszej pracy przeprowadzono jedynie szereg analiz numerycznych.

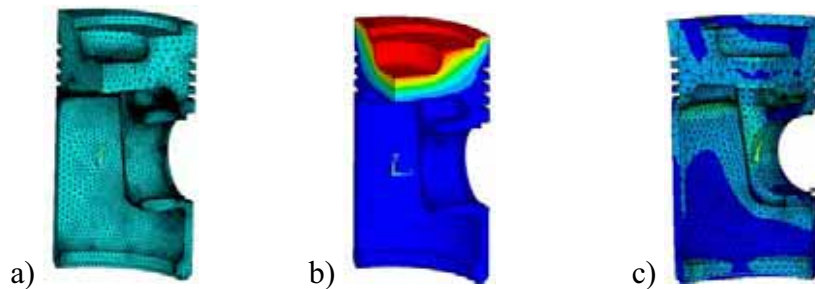
3.1 Analiza termomechaniczna tłoka

Przeprowadzono analizę termomechaniczną tłoka dla stanu ustalonego. Do tego celu wykorzystano metodę elementów skończonych (MES) w postaci programu ANSYS. Celem analizy jest wyznaczenie naprężeń i przemieszczeń. Założono, że naprężenia nie powinny przekraczać granicy plastyczności, a maksymalne dopuszczalne przemieszczenia powinny być mniejsze niż połowa wartości z tabeli 2.

Założono, że materiał z jakiego tłok został wykonany to odlew kokiłowy Al-Si ulepszany cieplnie. Wykonano 5 typów analiz: deko tłoka obciążono siłą gazową (maksymalną i średnią panującą w komorze spalania), gradientem temperatur (pochodzącym od temperatur i konwekcji), przeprowadzono ponadto analizę termomechaniczną, gdzie występowało jednocześnie obciążenie tłoka siłami gazowymi i gradientem temperatur.

Tabela 2. Dopuszczalne wartości luzów tłoka względem gładzi cylindrowej

Miejsce na powierzchni tłoka	Dopuszczalna wartość luzu punkcie	
	A	0.36 [mm]
	B	0.18 [mm]
	C	0.108 [mm]

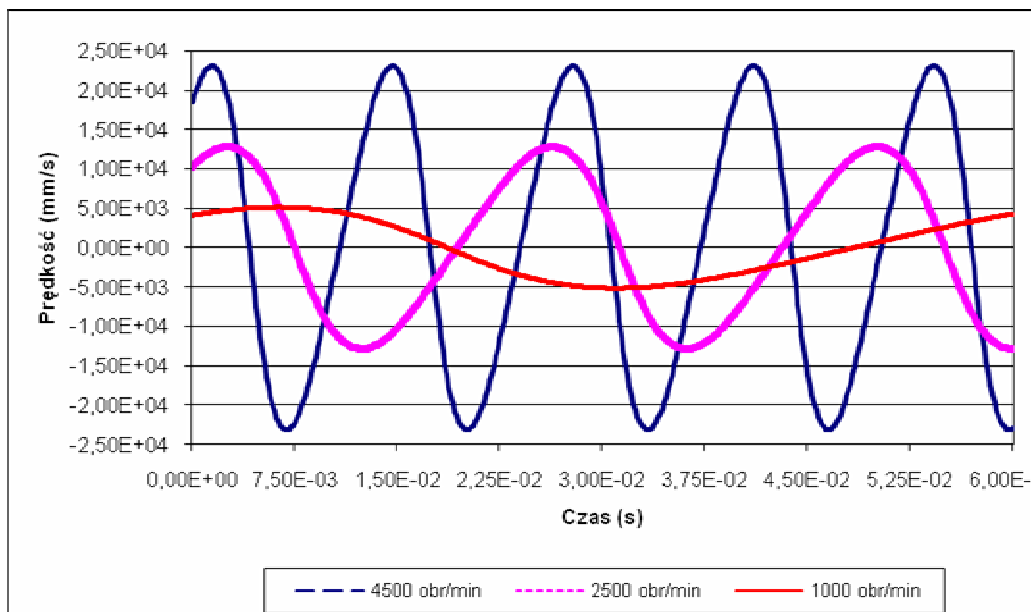


Rys. 2. Uproszczony symetryczny model tłoka: a) pokryty siatką MES, b) z naniesionymi wynikami temperaturowymi, c) z naniesionymi wynikami analizy termomechanicznej

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono iż wartości naprężeń i przemieszczeń mocno odbiegają od uznanych za dopuszczalne, jest to skutek przeprowadzenia analizy w stanie ustalonym.

3.2 Analiza kinematyczna elementów silnika

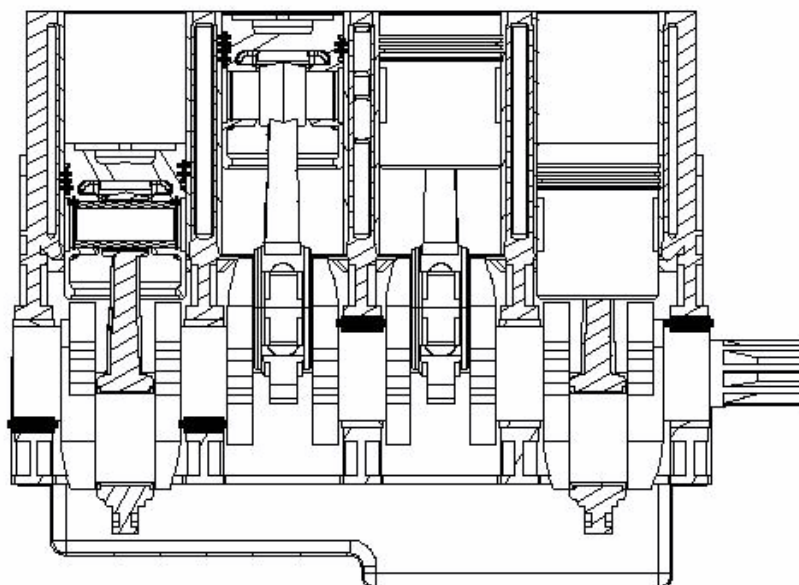
Mając kompletny model części głównej silnika, przeprowadzono analizę kinematyczną przy pomocy programu INVENTOR w celu wyznaczenia prędkości i przyspieszenia liniowego tłoka przy prędkościach obrotowych wynoszących 1000, 2500 i 4500 obr/min, wykresy przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Wykres prędkości posuwowej tłoka przy określonej prędkości obrotowej wału korbowego w zależności od czasu

Uzyskane maksymalne wartości prędkości posuwowych tłoka dla prędkości 1000, 25000 i 4500 obr/min wynoszą odpowiednio: 4.87, 12.3 i 22.15 m/s. Zgodnie z zaleceniami literaturowymi, dopuszczalne wartości prędkości dla tłoka powinny wynosić do 14 m/s ale nie jest to normą. Jak widać na wykresach, osiągnięte wartości prędkości i przyspieszeń dla tej konstrukcji nie mieszczą się w sugerowanym zakresie.

Rys.4 przedstawia przekrój podłużny przez wszystkie zaprojektowane i zamodelowane części silnika.



Rys. 4. Przekrój podłużny silnika przez cylindry wał korbowy i tłoki

4. Podsumowanie

Analizując informacje zawarte w powyższych punktach można wstępnie stwierdzić, iż elementy silnika zostały zaprojektowane poprawnie. W celu potwierdzenia poprawności uzyskanych rezultatów należałoby wykonać i przebadać model rzeczywisty oraz przeprowadzić analizę całego modelu numerycznego w stanie nieustalonym.

Proces projektowania elementów silników jest zadaniem bardzo czasochłonnym. Jakość uzyskanych rozwiązań zależy w dużej mierze od doświadczenia konstruktora, ponieważ często w oparciu o własne doświadczenie należy określić zależności pomiędzy parametrami, których zmiana powoduje poprawę jednych cech, a zarazem pogorszenie innych. Przykładem może być zależność pomiędzy średnicą cylindra a skokiem tłoka, gdzie wzrost tej wartości powoduje między innymi: zmniejszenie średniej prędkości tłoka i wysokości silnika oraz zwiększa straty cieplne i spadek średniego ciśnienia w komorze spalania.

Literatura

1. Wajand A., Silniki o zapłonie samoczynnym, WNT, Warszawa (1988).
2. Marek W., Krzysztof Z., CATIA: podstawy modelowania powierzchniowego i hybrydowego, Gliwice, (2003).
3. Fabian S., Autodesk Inventor 11: zbiór ćwiczeń, Łódź (2006)
4. Kent L. Lawrence, ANSYS Tutorial Release 9.0, SDC Publications
5. <http://ansys.belcan.com/support/tutorials>

MODEL KOMPUTEROWY STANOWISKA DO BADANIA ZJAWISKA WYBOCZENIA PRĘTÓW

MICHAŁ OLEJNICZAK

Automatyka i Robotyka, AB3, 5 rok

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



Streszczenie. W pracy wykonany został projekt stanowiska do badania zjawiska sprężystego wyboczenia prętów. Stanowisko zostało zaprojektowane w systemie CATIA V5. Układ pozwala na doświadczalne wyznaczenie metodą Southwella krytycznej siły ściskającej pręt. W pracy opisano podstawy teoretyczne zjawiska, przedstawiono przegląd istniejących rozwiązań, zaproponowano własną koncepcję konstrukcji stanowiska wraz z jego projektem oraz przedstawiono analizę stanu naprężenia w elementach stanowiska za pomocą metody elementów skończonych.

1. Metoda Southwella

Podczas przeprowadzania doświadczenia na opracowanym stanowisku wykorzystywana będzie metoda Southwella. Jest to jedna z metod doświadczalnych wyznaczania siły krytycznej dla pręta ściskanego. Bezpośredni pomiar siły krytycznej przez obciążenie pręta aż do wystąpienia zjawiska wyboczenia jest trudny do praktycznego zrealizowania [1]. Wynika to ze wstępnej krzywizny pręta oraz nieosiowego przyłożenia siły obciążającej. Podczas obciążania badanego pręta można zauważyć jego poprzeczne wygięcie już przy siłach mniejszych od siły krytycznej. Dlatego niemożliwe jest dokładne określenie kiedy rozpoczyna się właściwe wyboczenie pręta, czyli utrata stateczności. Tej wady nie ma metoda Southwella, która polega na pomiarze strzałki ugięcia pręta przy obciążeniu siłą osiową mniejszą od krytycznej. Możemy założyć, że pręt ma w płaszczyźnie najmniejszej sztywności zginania taką krzywiznę wstępną, że kształt jego osi bez obciążenia można przedstawić za pomocą zależności:

$$y_0 = a \sin \frac{\pi x}{l}, \quad (1)$$

gdzie a oznacza odchylenie środka pręta od prostej łączącej jego końce, gdy pręt nie jest obciążony, l jest długością pręta, a x współrzędną mierzoną od początku pręta. Wyrażenie spełnia warunki brzegowe podparcia pręta. Podczas obciążenia całkowite odchylenie osi od stanu prostoliniowego wynosi:

$$y_1 = y_0 + y, \quad (2)$$

gdzie y jest ugięciem pręta.

Po przekształceniu oraz rozwiązaniu równania różniczkowego osi ugiętej pręta ściskanego (przy uwzględnieniu warunków brzegowych) otrzymujemy następujące wyrażenie:

$$y = \frac{a}{\frac{P_{kr}}{P} - 1} \sin \frac{\pi x}{l}, \quad (3)$$

gdzie P jest siłą ściskającą, a P_{kr} siłą krytyczną.

Maksymalne ugięcie w rozpatrywanym przypadku zamocowania (rys. 1) wystąpi w połowie

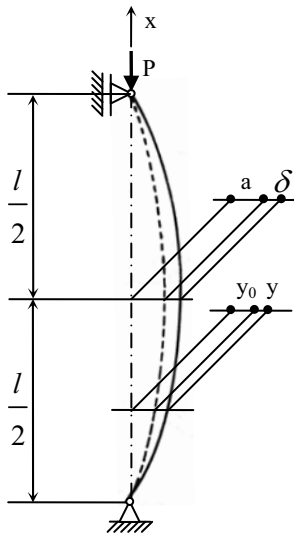
długości pręta:

$$y_{x=\frac{l}{2}} = \delta = \frac{a}{\frac{P_{kr}}{P} - 1} \quad (4)$$

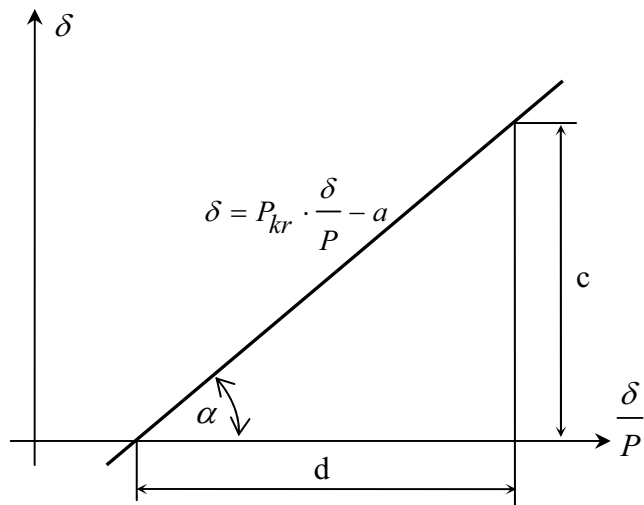
Po przekształceniu otrzymujemy:

$$\delta = P_{kr} \frac{\delta}{P} - a \quad (5)$$

Wyrażenie to można przedstawić na wykresie zależności δ w funkcji $\frac{\delta}{P}$ (rys. 2):



Rys. 1. Pręt obciążony siłą osiową P



Rys. 2. Wykres zależności δ w funkcji $\frac{\delta}{P}$

Wykres przedstawiony na rysunku 2 otrzymujemy poprzez pomiar strzałki ugięcia oraz siły obciążającej pręt podczas doświadczenia. Siła krytyczna jest równa tangensowi kąta nachylenia prostej:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{c}{d} = P_{kr} \quad (6)$$

2. Istniejące konstrukcje stanowisk

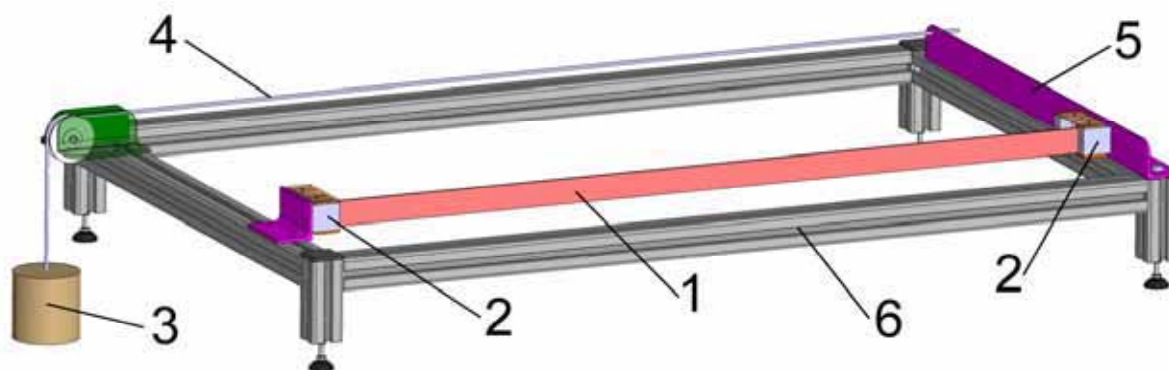
Istnieje kilka różnych rozwiązań konstrukcyjnych stanowisk badawczych do wyboczeń prętów. Są one do siebie bardzo podobne, różnice polegają głównie na rodzaju wykorzystanego mechanizmu zadawania obciążenia oraz metodzie pomiaru przemieszczenia. Wyróżnić można dwie główne grupy tych mechanizmów. Pierwszą grupę stanowią mechanizmy wykorzystujące dźwignię wraz z obciążnikami. Drugą grupę stanowią urządzenia, w których obciążniki wywierają nacisk bezpośrednio na pręt. Zastosowanie dźwigni pozwala na zmniejszenie masy obciążników. Na rysunku 3 przedstawiono dwa rozwiązania konstrukcyjne stosowane do badań zjawiska wyboczenia. Stanowiska takie znajdują się głównie w laboratoriach wyższych uczelni technicznych i są wykorzystywane przez studentów podczas zajęć dydaktycznych.



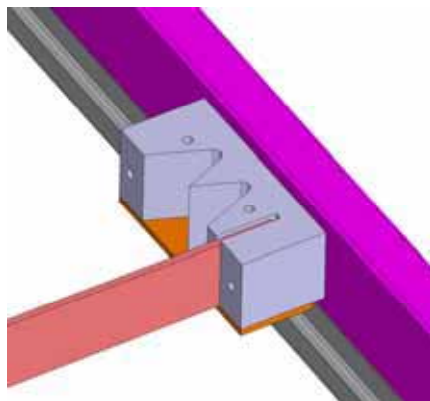
Rys. 3. Stanowiska do badania zjawiska wyboczenia firmy Gunt Hamburg [2]

3. Model komputerowy stanowiska

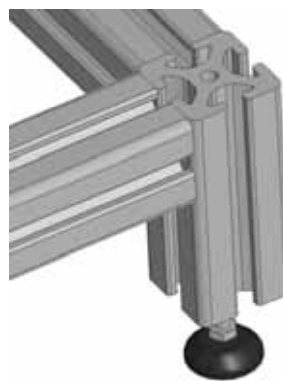
Projekt został w całości wykonany za pomocą oprogramowania CATIA V5. Do wykonania projektu wykorzystane zostały trzy moduły programu: Part Design, Assembly Design oraz moduł Drafting [3]. Oprogramowanie to pozwala na wykonanie modeli poszczególnych części układu oraz złożenie ich w wirtualny model całego urządzenia. Złożenie otrzymuje się poprzez nałożenie na kolejne elementy więzów, takich jak kontakt dwóch powierzchni, współosiowość otworów lub zachowanie odległości bądź kąta pomiędzy dwoma obiektami. Możemy również wygenerować rysunki wykonawcze poszczególnych części oraz rysunki złożeniowe całego układu. Założeniami do projektu były m.in. prostota konstrukcji oraz zastosowanie jak największej liczby elementów znormalizowanych. Stanowisko umożliwia doświadczalne wyznaczenie siły krytycznej dla trzech różnych rodzajów zamocowań końców pręta 1. Możliwe jest to dzięki zastosowaniu uchwytów 2. Zmiana zamocowania następuje poprzez przełożenie badanego pręta w kolejne wycięcia w uchwycie. Siła osiowa wywierana jest za pomocą obciążników 3 zawieszonych na stalowej lince 4. Wartość tej siły zwiększana jest kilkukrotnie poprzez zastosowanie dźwigni 5. Przemieszczenie osi pręta mierzone jest za pomocą czujnika zegarowego przymocowanego do przedniej części ramy urządzenia. Rama 6 stanowiska wykonana jest z prefabrykowanych profili aluminiowych firmy Item Ikasys [4].



Rys. 4. Widok perspektywiczny modelu stanowiska

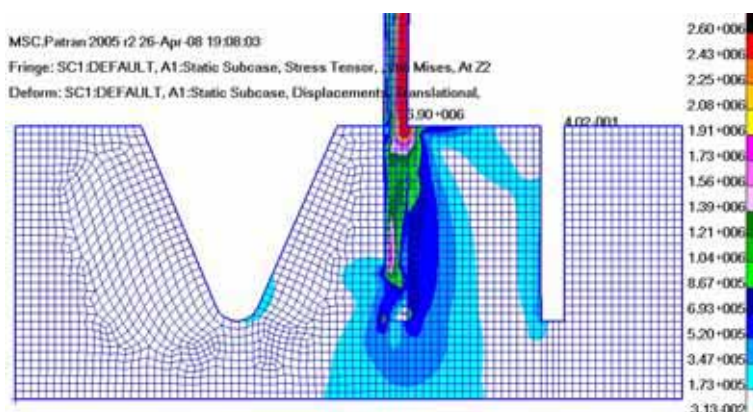


Rys. 5. Widok uchwytu ruchomego wraz z prętem



Rys. 6. Widok części ramy z otworem osadzenia sworznia dźwigni

W ramach pracy wykonano również analizę naprężeń oraz przemieszczeń występujących w elementach stanowiska podczas przeprowadzania doświadczenia. Na rysunku 6 pokazano rozkład naprężeń [Pa] redukowanych wg hipotezy Hubera, występujących w uchwycie podczas wybočenja. Analiza metodą elementów skończonych wykonana została w programie MSC.Patran/Nastran.



Rys. 7. Mapa barwna naprężeń występujących w uchwycie oraz pręcie podczas wybočenja

4. Podsumowanie

Projekt wykonany w ramach pracy zawiera zarówno wirtualny model stanowiska, jak i całą dokumentację techniczną pozwalającą na wykonanie rzeczywistego stanowiska. Urządzenie zaprojektowane w pracy będzie wykorzystywane podczas zajęć dydaktycznych prowadzonych w Katedrze Wytrzymałości Materiałów i Metod Komputerowych Mechaniki na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej.

Literatura

1. Banasiak M. i inni, Ćwiczenia laboratoryjne z wytrzymałości materiałów, PWN, Warszawa (1985).
2. http://www.usdidactic.com/html/educational_lab_experiments_st.html
3. Skarka W., Mazurek A., CATIA. Podstawy modelowania i zapisu konstrukcji, HELION, Gliwice (2005).
4. <http://www.item.info/en/>

ANALIZA PRÓBKI OBCIĄŻONEJ DYNAMICZNIE DZIELONYM PRĘTEM HOPKINSONA ZA POMOCĄ METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

DAWID OPIŁKA

Automatyka i Robotyka, AB3, 5 rok

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

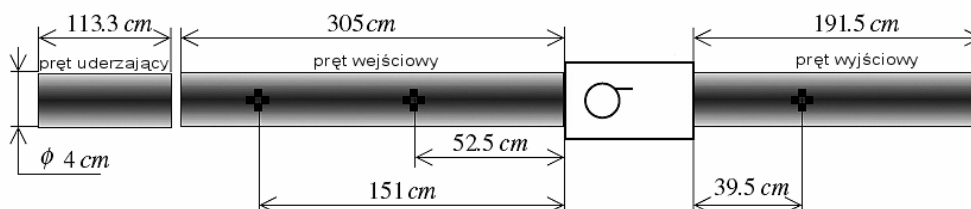


Streszczenie. W pracy przedstawiono analizę numeryczną próbki obciążonej dzielonym prętem Hopkinsona programem MSC Patran/Dytran, wykorzystującym metodę elementów skończonych (MES). Wyniki analizy numerycznej porównano z wynikami zderzenia eksperymentalnego, wykonanego w celu zbadania propagacji pęknięcia w próbce.

1. Wprowadzenie

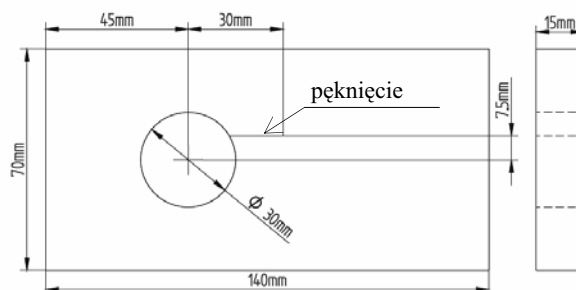
Dzielony pręt Hopkinsona to zestaw pomiarowy do badania zjawisk dynamicznych zachodzących w próbkach wykonanych z różnych materiałów. W 1914 roku Bertram Hopkinson zaproponował użycie prętów do badania zjawiska propagacji fali. W 1949 roku Herbert Kolsky opracował eksperyment, wykorzystujący dzielony pręt Hopkinsona [1].

Celem pracy było opracowanie modelu komputerowego stanowiska przedstawionego na rysunku 1 i próby obciążenia dynamicznego próbki za pomocą dzielonego pręta Hopkinsona.



Rys.1. Schemat stanowiska z dzielonym prętem Hopkinsona [2]

W skład stanowiska wchodzi dwa smukłe, przyłożone do próbki pręty, pręt uderzający oraz próbka z pęknięciem. Szczegółowe wymiary próbki użytej w eksperymencie przedstawiono na rysunku 2.



Rys.2. Geometria próbki [2]

Wykorzystywane w eksperymencie pręty zostały dobrane w ten sposób, aby zagwarantować dobrą propagację fali na ich styku z próbką oraz duże odkształcenia prętów.

W przypadku prezentowanego eksperymentu próbkę wykonano z polimetakrylanu metylu, natomiast jako materiał prętów wybrano nylon, ze względu na własności mechaniczne bardzo zbliżone do własności polimetakrylanu metylu. Szczegółowe własności polimetakrylanu metylu oraz nylonu zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Własności mechaniczne polimetakrylanu metylu oraz nylonu [2]

<i>Własności materiałowe</i>	<i>polimetakrylan metylu (PMMA)</i>	<i>nylon</i>
gęstość [kg/m ³]	1180	1145
moduł Younga [GPa]	3.3	3.5
współczynnik Poissona	0.42	0.41

Niewątpliwą zaletą stosowania układu dzielonego pręta Hopkinsona jest możliwość dokładnego pomiaru zarówno przyłożonego obciążenia oraz odpowiedzi dynamicznej próbki.

Eksperyment polega na uderzeniu prętem bijącym, który porusza się z prędkością 12.6m/s, w pręt wejściowy. W wyniku tego oddziaływania generowana jest fala naprężeń, która przemieszcza się przez pręt wejściowy, docierając poprzez próbkę do pręta wyjściowego.

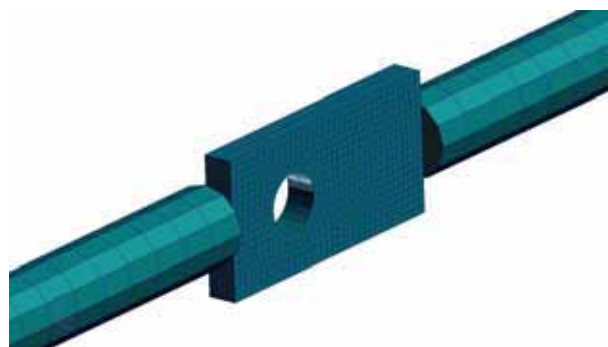
Na podstawie sygnałów z czujników tensometrycznych określono przebiegi prędkości na lewym i prawym brzegu próbki w kolejnych chwilach czasowych oraz wyznaczono przebiegi sił działających na próbkę w kolejnych chwilach eksperymentu. Doświadczenie trwało około 600 mikrosekund, zatem niewątpliwie jest to zjawisko szybkozmienne, które wymaga dużej precyzji przygotowania stanowiska pomiarowego oraz dokładnych odczytów z czujników pomiarowych. Z przebiegów wielkości wyznaczonych drogą eksperymentalną można wywnioskować, iż propagacja fali naprężeń poprzez próbkę trwa około 130 mikrosekund. Po tym czasie fala rozpoczyna propagację przez pręt wyjściowy.

2. Model numeryczny

Do zamodelowania zaprezentowanego przypadku wykorzystano oprogramowanie MSC Patran/Dytran, bazujące na metodzie elementów skończonych. MSC Dytran jest programem umożliwiającym analizę zjawisk szybkozmiennych, jednak nie pozwala on na zamodelowanie propagacji pęknięcia. Z tego względu analizie poddano próbkę o stałej długości pęknięcia.

Do dyskretyzacji próbki oraz prętów zastosowano elementy bryłowe ośmiowęzłowe. Fragment modelu układu, złożonego z próbki oraz pręta wyjściowego zaprezentowano na rysunku 3.

Liczbę elementów skończonych oraz węzłów zastosowanych do zamodelowania poszczególnych elementów układu zestawiono w tabeli 2.



Rys. 3. Wybrany fragment modelu układu

Tabela 2. Liczba węzłów oraz elementów skończonych dla poszczególnych części układu

<i>element</i>	<i>liczba elementów skończonych</i>	<i>liczba węzłów</i>
próbka	1779	2648
pręt uderzający	741	1160
pręt wejściowy	1989	3080
pręt wyjściowy	1248	1940

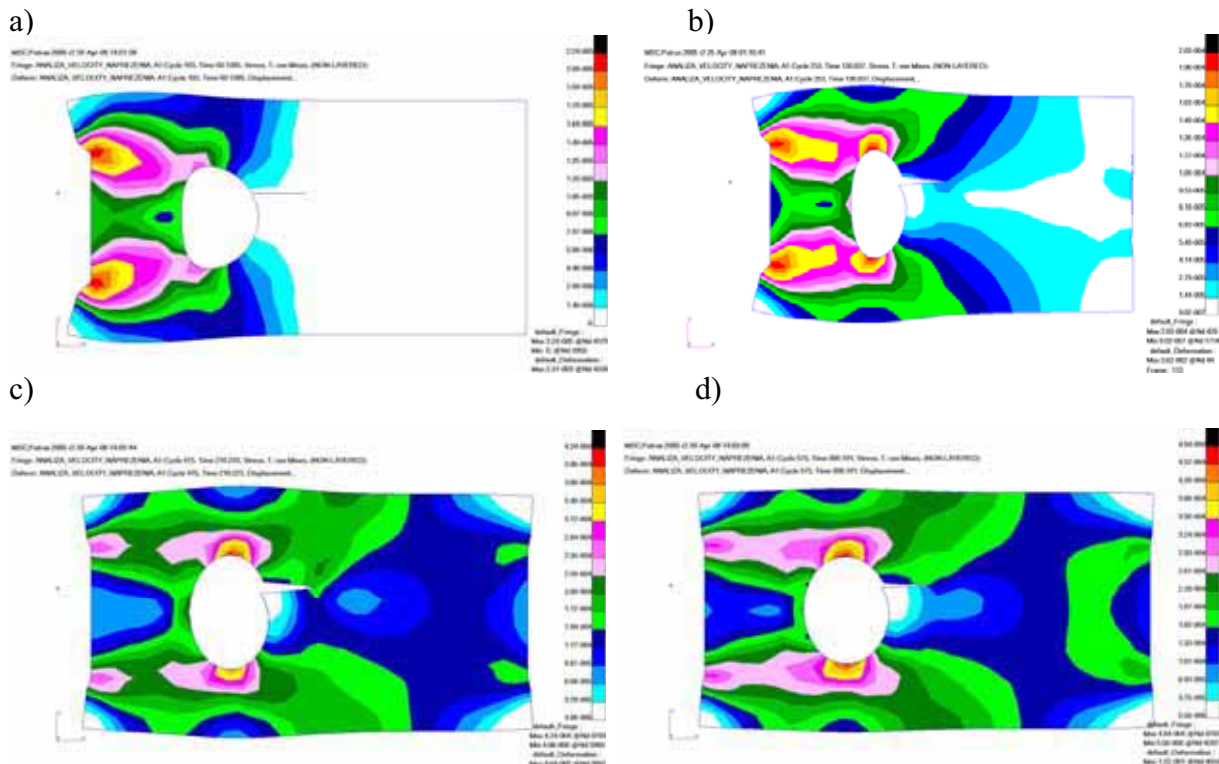
Zamodelowano trzy warianty układu. W pierwszym wariacie zamodelowano próbkę oraz trzy pręty. W wariacie drugim wyeliminowano pręt uderzający oraz wejściowy. Model składał się zatem z próbki oraz pręta wyjściowego. Na lewym brzegu próbki zadano przebieg prędkości otrzymano eksperymentalnie. Trzeci wariant obejmował wyłącznie próbkę, na brzegach której zadano przebiegi eksperymentalnie wyznaczonych prędkości wejściowych oraz wyjściowych.

Niezależnie od rodzaju analizowanego wariantu otrzymano identyczne przebiegi przemieszczeń w funkcji czasu, rozkłady naprężeń redukowanych w poszczególnych chwilach czasowych oraz prędkości wybranych węzłów. Prezentowane poniżej wyniki analizy numerycznej oraz mapy barwne rozkładu naprężeń redukowanych dotyczą trzeciego przypadku, w którym badano zachowanie samej próbki.

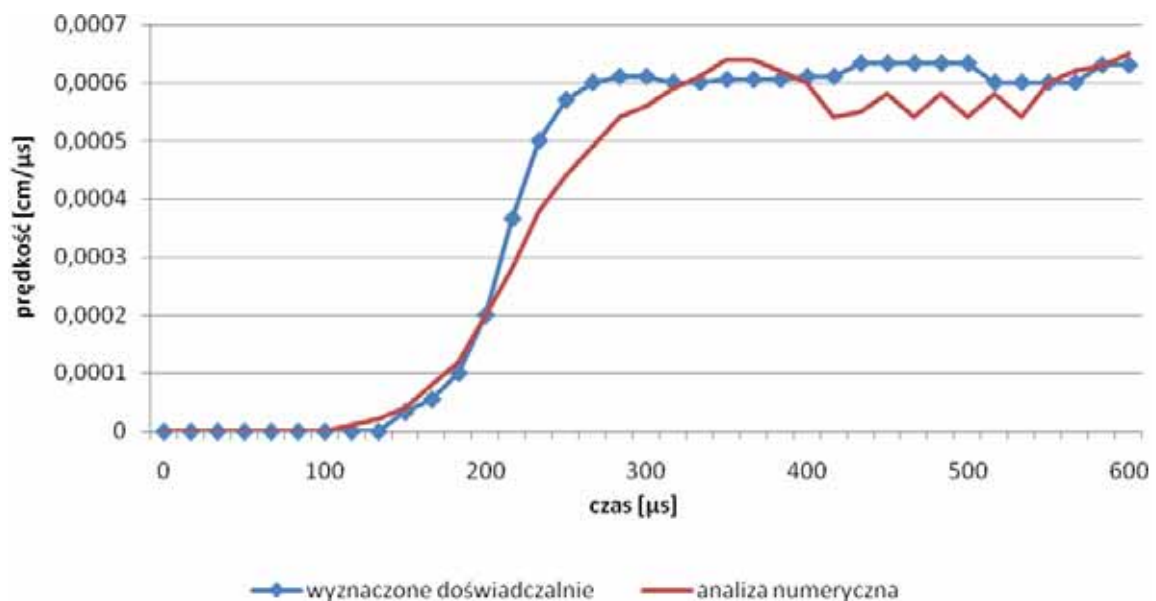
3. Wyniki analizy

Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe mapy barwne naprężeń redukowanych oraz deformację próbki w kolejnych chwilach czasu.

Na rysunku 5 zaprezentowano przebieg prędkości na prawym brzegu próbki.



Rys. 4. Mapy barwne naprężeń redukowanych według hipotezy Hubera w wybranych chwilach czasowych: a) 50 μ s b) 130 μ s c) 216 μ s d) 300 μ s



Rys. 5. Przebieg prędkości na prawym brzegu próbki

4. Wnioski

Analiza zjawisk szybkozmiennych metodą elementów skończonych jest zagadnieniem trudnym, a jej dokładność zależy od wielu czynników, takich jak gęstość siatki, topologia elementów skończonych oraz wielkość kroku czasowego.

Analizując poszczególne mapy barwne można zauważyć, iż po około 130 mikrosekundach propagująca fala dociera do końca próbki. W chwili czasowej równej 216 mikrosekund zaobserwowano maksymalne otwarcie pęknięcia. W eksperymentalnej próbkce po tym czasie zaobserwowano propagację pęknięcia. W analizowanym przypadku rozpatrywano pęknięcie o stałej długości, dlatego też wyniki analizy numerycznej można porównywać z wynikami eksperymentalnymi wyłącznie do chwili czasowej równej 216 mikrosekund. Po wspomnianej chwili czasowej wyniki mogą być różne ze względu na różny charakter zachowania się próbki.

Analizując wykresy prędkości wyznaczonych doświadczalnie oraz numerycznie można zauważyć dobrą zgodność wyników. Na tej podstawie można stwierdzić, iż analizę numeryczną przeprowadzono poprawnie.

Literatura

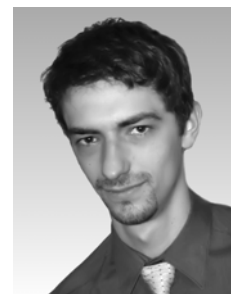
1. www.wikipedia.pl
2. Gregoire D., Maigre H., Rethore J., Combescure A., Dynamic crack propagation under mixed-mode loading – Comparison between experiments and X-FEM simulations, International Journal of Solids and Structures, Vol. 44, s. 6517-6534 (2007).
3. MSC.Software Corporation, MSC.Dytran 2004. Theory Manual, Santa Ana, 2005.

MODELOWANIE STRUKTUR BIOMECHANICZNYCH W ASPEKCIE WYPADKÓW KOMUNIKACYJNYCH

ZYGMUNT REUTER

Mechanika i Budowa Maszyn, MB4, 5 rok

Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Antoni John Prof. Pol. Śl.



Streszczenie. W pracy została przeprowadzona analiza zderzenia czaszki oraz odcinaka szyjnego kręgosłupa z zagłówkiem fotela samochodowego podczas zderzenia tylnego. W pierwszej kolejności został przygotowany model geometryczny kręgosłupa szyjnego i czaszki oraz stworzona została siatka elementów skończonych. W analizie wykorzystano system MSC.Dytran.

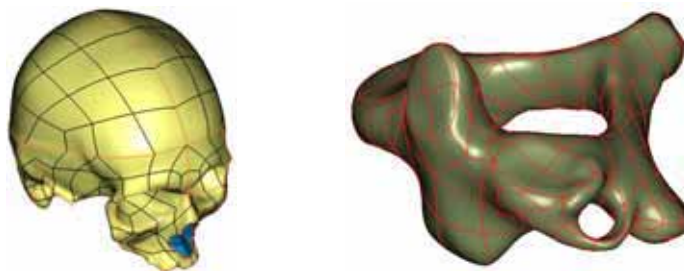
1. Wprowadzenie

Przy stale rozwijającym się postępie technologicznym jesteśmy w stanie budować coraz to szybsze i bardziej niezawodne pojazdy. Należy jednak zwrócić szczególną uwagę na poprawę bezpieczeństwa ludzi, którzy będą nimi podróżować. Badania nad mechaniką układu ruchowego człowieka [1] pozwalają nam lepiej zrozumieć zjawiska zachodzące podczas zderzeń oraz pozwalają przewidzieć ewentualne urazy.

2. Model geometryczny

Model geometryczny czaszki został stworzony na podstawie trójwymiarowego skanu czaszki. Otrzymana w ten sposób chmura punktów została przetworzona na siatkę trójkątów. Powierzchnie czaszki zostały poddane nieznacznej korekcie. Usunięte też zostały niektóre otwory mające niewielki wpływ na wyniki analizy, ponieważ stanowiły one znaczną przeszkodę w późniejszym tworzeniu siatki elementów skończonych. Uproszczony został także kształt łuku jarzmowego, a jego pierwotny kształt został zastąpiony powierzchnią. Powierzchnia ta została wygenerowana na krzywych rozpiętych na punktach należących do pozostałych części czaszki. Następnie na siatce trójkątów wygenerowane zostały powierzchnie oparte na krzywych NURBS.

Model kręgosłupa został przygotowany na podstawie plików DICOM uzyskanych podczas badania tomograficznego [3]. Przy użyciu programu 3D.Doctor pliki DICOM (obrazy w odcieniach szarości) zostały przekształcone w chmurę punktów. Dalsze postępowanie było identyczne jak w przypadku wcześniej opisanej geometrii czaszki.

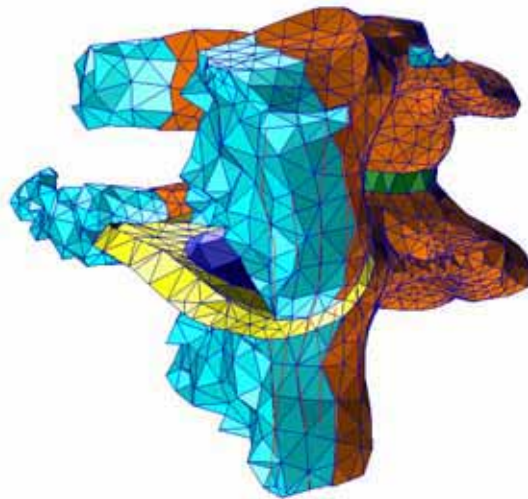


Rys. 1. Model geometryczny czaszki oraz jednego z kręgów szyjnych

3. Model numeryczny

Ponieważ czaszka, a zwłaszcza mózgowcześnie, składa się głównie z kości płaskich, do jej zamodelowania użyte zostały głównie elementy powierzchniowe czterowzłowe. W celu umożliwienia połączenia siatki czaszki z resztą modelu zdyskretyzowaną elementami czworosciennymi, niektóre jej obszary podzielono na elementy trójkatne. Dla uproszczenia siatka została zamodelowana jako symetryczna, co znacznie skróciło przygotowanie modelu. Grubość elementów ustalono na podstawie średniej grubości kości czaszki i wynosi 6 mm.

Ze względu na bardzo skomplikowaną budowę kręgosłupa, połączeń międzykręgowych i silnie rozwiniętego aparatu więzadłowego, dyskretyzacja kręgosłupa pochłonięła znaczną część czasu poświęconego pracy. Przy tworzeniu siatki kręgowo uwzględniono naturalny podział kości na istotę gębczastą, stanowiącą wewnętrzną część kości, oraz zewnętrzną warstwę korową. Do dyskretyzacji istoty gębczastej wykorzystano elementy czworoscienne czterowzłowe. Warstwa korowa została zastąpiona powłokowymi elementami trójkatnymi. W celu zweryfikowania takiego postępowania przeprowadzono dodatkową analizę porównawczą, której wyniki przedstawione zostaną w dalszej części artykułu. Przy tworzeniu siatki dysków międzykręgowych uwzględniony został podział na jądro miazdzyste oraz pierścień włóknisty. Więzadła zostały zamodelowane przy pomocy elementów prętowych dwuwzłowych, które zostały rozpięte na wzłach należących do elementów skończonych kręgowo.



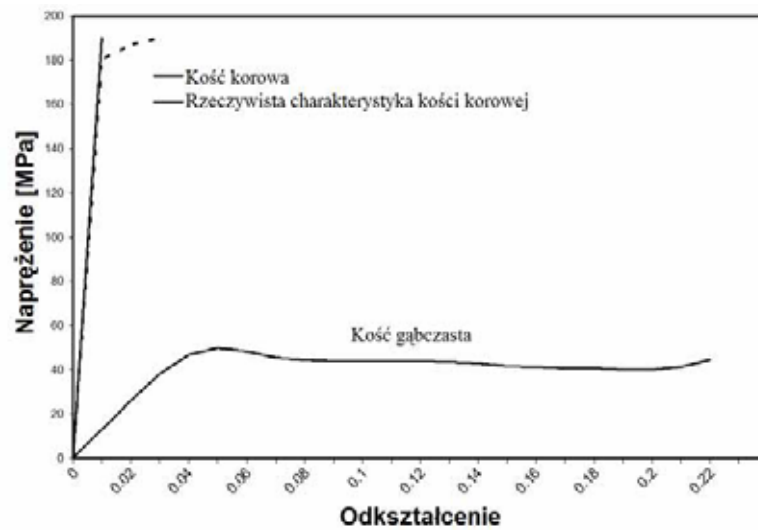
Rys. 2. Przekrój przez siatkę elementów kręgosłupa szyjnego

Zagłówek fotela samochodowego zamodelowany został elementami czworokątnymi, które zostały zdefiniowane jako nie odkształcalne.

4. Modelowanie materiału

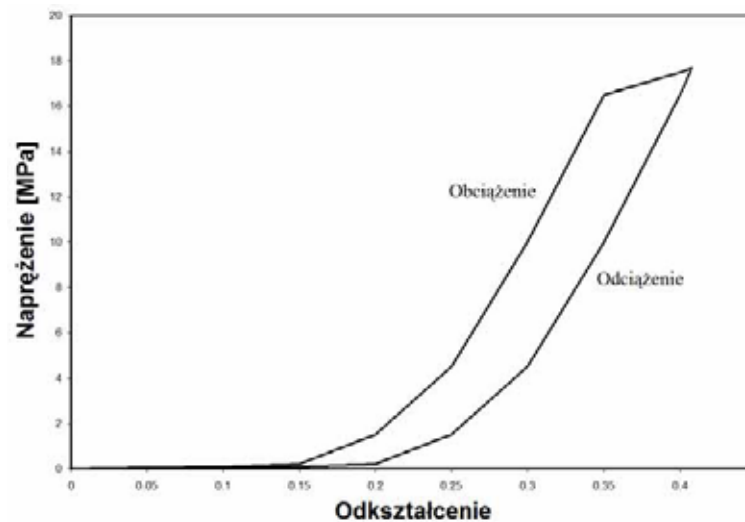
Materiał z którego zbudowane są kręgi można traktować jak naturalny materiał kompozytowy, o własnościach nieliniowych. W pracy do zamodelowania kręgowo wykorzystano dwa różne rodzaje materiałów co pozwoliło w przybliżeniu oddać strukturę kręgowo. Istotę gębczastą zamodelowano jako silnie nieliniowy materiał izotropowy, a warstwę korową jako materiał liniowy, ponieważ w rzeczywistości jego charakterystyka zbliżona jest do materiałów kruchych. Gęstość kości ustalona została na poziomie odpowiadającym osobie w wieku ok. 20-30 lat. Dyski międzykręgowo również można uznać za materiał kompozytowy. Zbudowane są z nieściśliwego galaretowatego jądra otoczonego

pierścieniami włóknistymi. W analizie zamodelowane one zostały jako liniowe o różnym współczynniku Poissona od 0,3 do 0,49.



Rys. 3. Charakterystyka naprężeniowo – odkształceniowa kości

Więzadła które w rzeczywistości można traktować jako ciągną zostały zamodelowane przy pomocy materiału anizotropowego, sprężyste-plastycznego z nieliniową charakterystyką w zakresie sprężystym, który umożliwił obciążenie więzadeł wyłącznie siłą rozciągającą. Dodatkowo wprowadzona została histereza naprężeniowo-odkształceniowa widoczna na wykresie poniżej.



Rys. 4. Charakterystyka naprężeniowo odkształceniowa więzadła podłużnego przedniego

5. Porównanie kręgu zamodelowanego elementami powłokowymi i bryłowymi.

Ponieważ w analizie do zamodelowania kręgów szyjnych wykorzystano elementy czworościenne na których później rozpięto powłokę z elementów trójkątnych o grubości równej średniej grubości warstwy korowej tj. 2 mm, należało sprawdzić czy takie podejście da pożądane rezultaty. Porównano model opisany wcześniej, model zamodelowany tylko elementami bryłowymi [4], oraz dane oparte na badaniach doświadczalnych.

Modele kręgów zostały utwierdzone na dolnej powierzchni trzonu, natomiast na powierzchni górnej trzonu przyłożona została równomiernie rozłożona siła na wszystkie węzły należące do tej powierzchni. Siła ta odpowiada naciskowi ok. 4 MPa.



Rys. 5. Modele kręgów poddanych analizie porównawczej

Analiza wykazała że sztywność modelu kręgu z elementami powłokowymi jest bardziej zbliżona do rzeczywistej sztywności kręgu niż w przypadku modelu zamodelowanego tylko elementami bryłowymi. Ponadto manipulując grubością elementów można jeszcze bardziej zbliżyć się do wyników otrzymanych na bazie eksperymentu [2].

Tabela 1. Porównanie wyników

Model	Sztywność [N/mm]
Elementy bryłowe i powierzchniowe	562
Tylko elementy bryłowe	1012
Wyniki doświadczalne	579

6. Podsumowanie

Szczególnych trudności podczas przygotowania analiz zderzeniowych przysparza uzyskanie odpowiedniego modelu struktury biomechanicznej. Ze względu na niezwykle skomplikowaną budowę zarówno na poziomie mikro jak i makro skopowym, oraz materiały o budowie kompozytowej i nieliniowych własnościach które dodatkowo mają charakter osobniczy, wyniki analizy często znacznie odbiegają od rzeczywistości. Poprawę wyników można uzyskać dobierając odpowiednie własności przy pomocy prób i błędów. Przeprowadzenie analizy dynamicznej struktury biomechanicznej mimo pominięcia wielu czynników wymaga bardzo dużej mocy obliczeniowej oraz znacznego nakładu czasu. Problemem również jest pozyskanie wyników opartych na badaniach eksperymentalnych, a co za tym idzie zweryfikowanie prowadzonych obliczeń.

Literatura

1. Gzik M., Biomechanika kręgosłupa człowieka, WPS, Gliwice (2007).
2. Skoworodko J., Skalski K., Analiza sztywności trzonów kręgosłupa z uwzględnieniem niejednorodności materiałowej ich struktury „I Kongres Mechaniki Polskiej”, Warszawa 2007
3. Bochenek A., Reicher M., Anatomia człowieka Tom I, PZEL, Warszawa (2002).
4. Rakowski G., Kacprzyk Z., Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji, WPW, Warszawa (2005).

MODELOWANIE PRZEPIYU CIECZY PRZEZ BIORUSZTOWANIE Z WYKORZYSTANIEM SYSTEMU MSC.DYTRAN

ŁUKASZ SROKA

Mechanika i Budowa Maszyn, MB4, 5 rok

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



Streszczenie. Artykuł dotyczy modelowania przepływu cieczy przez biorusztowanie stosowane w procesie regeneracji tkanki kostnej. Do przygotowania analizy i wizualizacji wyników wykorzystany został system MSC.Patran, same zaś obliczenia wykonane zostały w programie MSC.Dytran.

1. Wprowadzenie

Biorusztowania stosowane w procesie regeneracji tkanki kostnej umożliwiają jej odbudowę w sytuacji gdy uszkodzenie kości jest zbyt duże by organizm był w stanie sam sobie z nim poradzić. Zadaniem biorusztowania jest stworzenie odpowiedniego podłoża na którym będzie mogła wzrastać nowo powstająca tkanka kostna. W miarę postępowania procesu regeneracji rusztowanie ulega stopniowej bioresorpcji. Porowata struktura biorusztowania poddawana działaniu sił oraz przepływów musi zachować odpowiednią wytrzymałość, aż do momentu zregenerowania się kości. W niniejszym artykule przedstawiona została symulacja oddziaływania przepływającej cieczy (limfy) na strukturę biorusztowania.

2. Metoda objętości skończonych

Do modelowania zagadnień związanych z przepływem cieczy w programie MSC.Dytran wykorzystywana jest metoda objętości skończonych. W metodzie tej badany materiał przemieszcza się pomiędzy kolejnymi elementami siatki, która pozostaje niezmienna w czasie i przestrzeni.

Obliczenia wykonywane w programie dla płynów nielepkich oparte są na różniczkowym równaniu ruchu Eulera zapisanym w postaci :

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial f(q)}{\partial x} + \frac{\partial g(q)}{\partial y} + \frac{\partial h(q)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

poszczególne składowe definiowane są następująco :

$$q = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ E \end{pmatrix} \quad f(q) = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho uw \\ (E + p)u \end{pmatrix} \quad g(q) = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ \rho vw \\ (E + p)v \end{pmatrix} \quad h(q) = \begin{pmatrix} \rho w \\ \rho uw \\ \rho vw \\ \rho w^2 + p \\ (E + p)w \end{pmatrix} \quad (2)$$

gdzie :

ρ – gęstość

u, v, w – prędkości względem osi x, y, z

E – energia całkowita

p – ciśnienie

Aby układ równań był możliwy do rozwiązania wykorzystywane jest ponadto równanie stanu, które w najprostszej formie przybiera postać:

$$p = K \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) \quad (3)$$

gdzie :

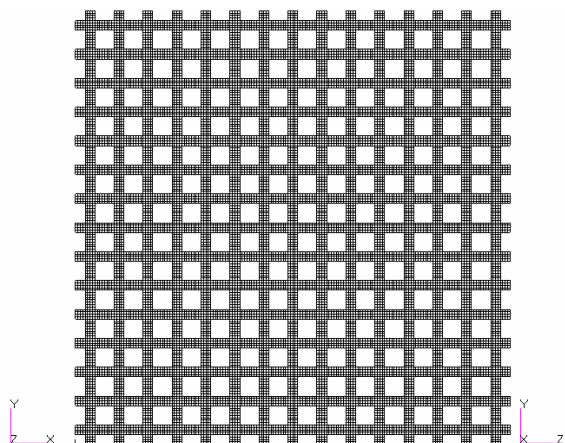
K – moduł ścisłości

ρ_0 – początkowa gęstość płynu

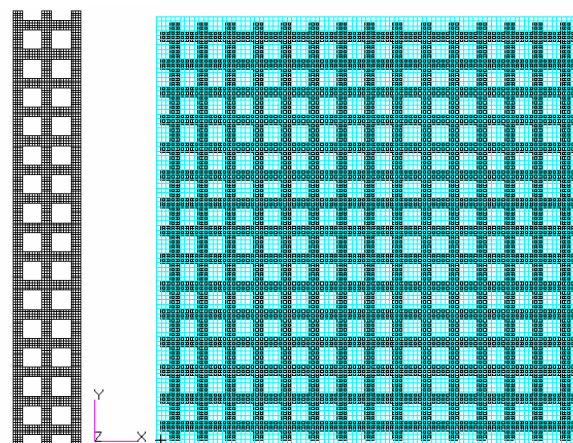
3. Przygotowanie modelu

Model biorusztowania, przedstawiony na rysunku 1, przygotowany został w programie MSC.Patran [2]. Wymiary modelu biorusztowania wynoszą 9x9x1.4 [mm], a do jego dyskretyzacji zostały zastosowane elementy sześciennie ośmiowęzłowe (HEX8). Pojedynczy element skończony rusztowania ma wymiary 50x50x50 [μm].

Model biorusztowania zawiera się we wnętrzu prostopadłościanu o wymiarach 9.2x9.2x1.6 [mm], (rys. 2). Obszar ten stanowi przestrzeń w której porusza się ciecz, jest to tzw. bryła Eulera (Eulerian Solid). Bryła została podzielona na elementy typu HEX8 o wymiarach 100x100x100 [μm].



Rys. 1. Model rusztowania



Rys. 2. Bryła Eulera

Przenoszenie oddziaływań pomiędzy cieczą a ciałem stałym odbywa się przy użyciu powierzchni sprzęgającej General Coupling. W metodzie tej węzły siatki utworzonej na ciele stałym nie muszą pokrywać się z węzłami siatki, we wnętrzu której porusza się ciecz.

Do analizy jako materiał biorusztowania przyjęty został hydroksyapatyt. Jest to bioresorbowalny materiał ceramiczny często wykorzystywany w produkcji biorusztowań. Zarówno dla materiału biorusztowania jak i dla przepływającej cieczy w programie zastosowano najprostszy model liniowy. Własności materiałów przedstawia poniższa tabela.

Tabela 1. Własności materiałowe [1]

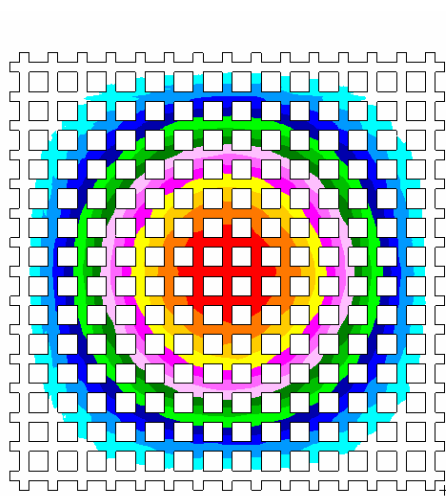
Materiał	Gęstość [kg/m ³]	Moduł Younga [GPa]	Moduł ścisłości [GPa]	Liczba Poissona
Hydroksyapatyt	3100	70	-	0.28
Limfa	1000	-	2.2	-

Program MSC.Patran wymaga przyjęcia spójnego układu jednostek, tak więc w analizie przyjęte zostały następujące jednostki podstawowe: kg/mm/ms.

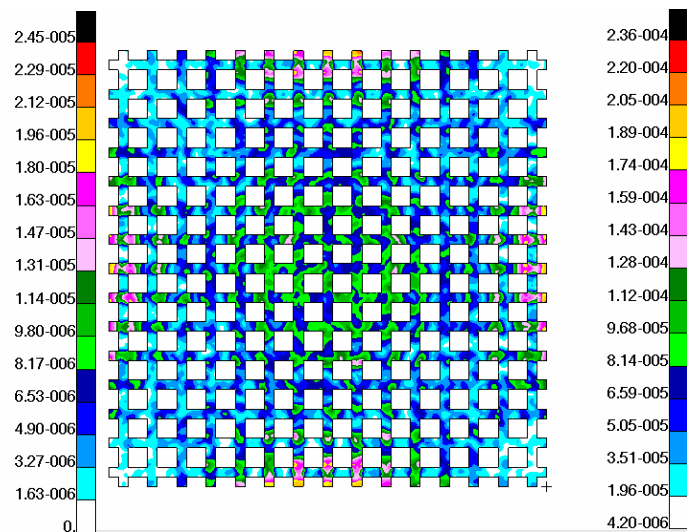
Analizowane rusztowanie zostało utwierdzone na brzegach i poddane działaniu przepływu, którego prędkość wynosiła 1[cm/s]. Płynowi nadano prędkość początkową (1[cm/s]), oraz początkową gęstość (1000[kg/m³]). Krok czasowy oraz czas analizy dobrane zostały eksperymentalnie i wynoszą odpowiednio 6e-9 [s], 5e-5 [s].

4. Wyniki analizy

Na poniższych rysunkach pokazany został rozkład naprężeń i przemieszczeń uzyskany w 8060 cyklu, czyli po czasie 5e-5 [s]. Maksymalne przemieszczenia występują, zgodnie z oczekiwaniami, w centralnej części rusztowania i wynoszą 2.45e-5 [mm]. Maksymalne naprężenia występujące w miejscach utwierdzenia rusztowania wynoszą 0.236 [MPa].

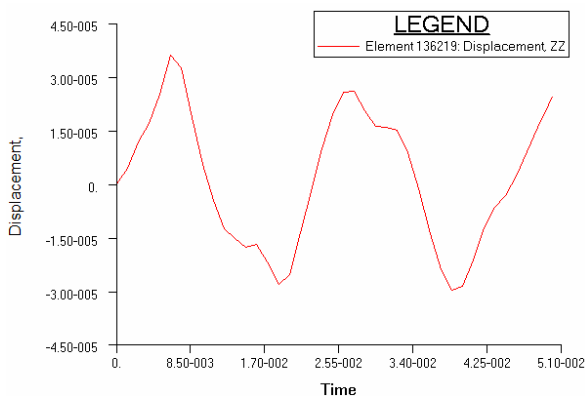


Rys. 3. Rozkład przemieszczeń

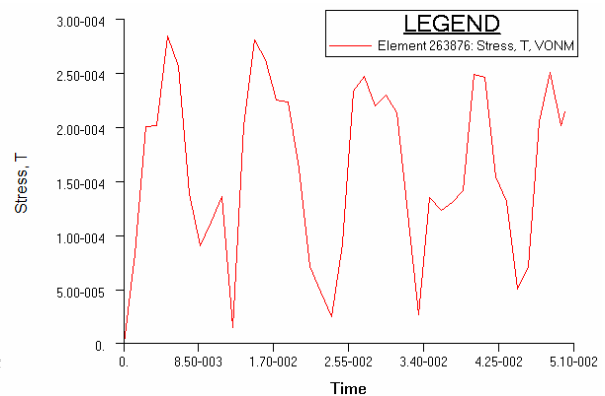


Rys. 4. Rozkład naprężeń

Wykres na rys. 5 przedstawia przemieszczenia w kierunku osi Z, elementu znajdującego się w centralnej części rusztowania. Zmiana naprężeń w czasie, dla elementu znajdującego się w miejscu utwierdzenia, została pokazana na rys. 6. Na wykresach zaobserwować można, że zarówno maksymalne odkształcenia jak i maksymalne naprężenia występują w początkowej fazie analizy.



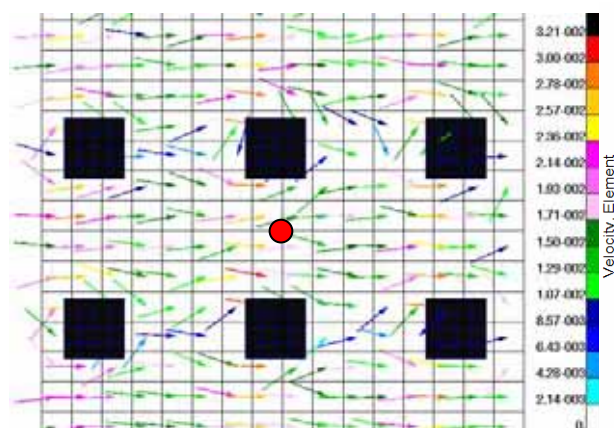
Rys. 5. Zmiana przemieszczeń w czasie



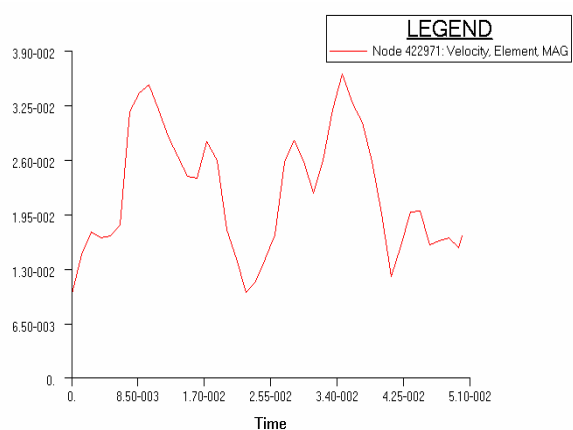
Rys. 6. Zmiana naprężeń w czasie

Rozkład prędkości przepływu cieczy dla poszczególnych elementów przedstawiony został na rysunku 7. Belki biorusztowania wymuszają zmianę kierunku przepływu oraz zwiększają jego prędkość, świadczy to o poprawnym działaniu warstwy sprzęgającej.

Zmiana prędkości przepływu w czasie dla pojedynczego węzła pokazana została na wykresie (rys. 8). Jak widać prędkość ta waha się w granicach od prędkości początkowej tj. 1 [cm/s] do 3.65 [cm/s].



Rys. 7. Prędkość przepływu cieczy



Rys. 8. Prędkość przepływu w węźle zaznaczonym na rys. 7.

5. Wnioski

Maksymalne naprężenia i odkształcenia wystąpiły w początkowej fazie analizy, w 1000 cyklu (czas 0.0062[ms]) i wynoszą odpowiednio :

- maksymalne naprężenie: 0.365 [MPa]
- maksymalne odkształcenie: 3.65e-5 [mm]

Jest to spowodowane zadaną prędkością początkową przepływu, której kierunek działania w początkowej fazie analizy jest prostopadły do powierzchni czołowej rusztowania. W kolejnych cyklach analizy kierunek ten stopniowo zaczyna się zmieniać, ciecz opływa napotykaną przeszkodą (rys.7). Otrzymane wartości naprężeń i przemieszczeń są niewielkie co jest spowodowane małą prędkością przepływu.

Ze względu na rozmiar zadania i wymagany krok czasowy na poziomie 6e-9 [s], czas analizy jest bardzo krótki (5e-5[s]). Czas ten nie pozwala na ustabilizowanie się prędkości przepływu cieczy, dlatego też na wykresie na rys.8 widzimy znaczne jej wahania.

Duży wpływ na rozkład naprężeń i przemieszczeń ma odpowiedni dobór gęstości i położenia siatki wewnątrz której porusza się płyn. Stosując metodę General Coupling należy unikać nakładania się węzłów poszczególnych siatek, gdyż prowadzi to do znacznego zmniejszania się kroku czasowego podczas analizy.

Otrzymane wyniki mogą być pomocne przy projektowaniu parametrów geometrycznych biorusztowania.

Literatura

1. Buddy D. Ratner, Allan S. Hoffman, Frederick J. Schoen, Jack E. Lemons, Biomaterials science : an introduction to materials in medicine - 2nd ed., Elsevier Academic Press, San Diego (2004)
2. MSC.Software Corporation, Documentation, (2005)

MODELOWANIE ODDZIAŁYWANIA POLA ELEKTRYCZNEGO NA TKANKĘ BIOLOGICZNĄ

KAMIL STĘPKA

Mechanika i Budowa Maszyn, MB4, 5 rok.

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



Streszczenie. Artykuł dotyczy modelowania oddziaływań pola elektrycznego na zdrową tkankę biologiczną jak i tkankę zaatakowaną nowotworem. Natężenie pola elektrycznego powoduje wzrost wydzielania się ciepła w tkance, a tym samym wzrost jej temperatury. Model matematyczny problemu składa się z równań opisujących rozkład potencjału elektrycznego oraz rozkład temperatury w tkance, uzupełnionych odpowiednimi warunkami brzegowymi. Zadanie rozwiązano za pomocą metody elementów brzegowych, a obliczenia zrealizowano w programie narzędziowym MathCAD. Pokazano wyniki obliczeń oraz sformułowano wnioski.

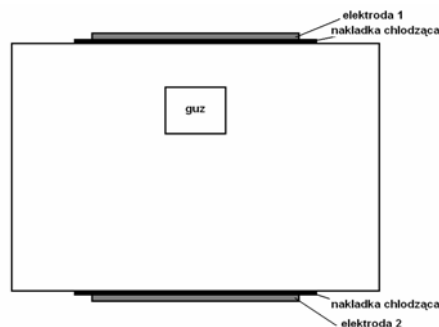
1. Wprowadzenie

Zjawisko hipertermii, czyli nadmiernego wzrostu temperatury ciała (powyżej 41°C) zachodzi wówczas, gdy organizm człowieka wytwarza lub absorbuje więcej ciepła w jednostce czasu, niż jest w stanie utracić. Do hipertermii naturalnej dochodzi najczęściej na skutek nadmiernego działania promieni słonecznych. Hipertermię można również wywoływać sztucznie, za pomocą odpowiednich urządzeń, w celu lokalnego podwyższenia temperatury ciała. Tego typu metody stosuje się między innymi w leczeniu chorób nowotworowych, ponieważ podwyższenie temperatury komórek rakowych prowadzi do ich zniszczenia [1]. Stan lokalnej hipertermii uzyskuje się np. za pomocą miejscowego oddziaływania pola elektromagnetycznego lub lasera na organizm człowieka.

W pracy zajmowano się modelowaniem oddziaływania pola elektrycznego (wywołanego dwoma elektrodami) na zdrową tkankę biologiczną oraz tkankę zmienioną chorobowo.

2. Model matematyczny i metoda rozwiązania

Lokalne, kontrolowane podwyższenie temperatury w obszarze guza można uzyskać między innymi za pomocą działania pola elektrycznego na tkankę biologiczną. Na rysunku 1 pokazano typowy system hipertermii.



Rys. 1. Schemat hipertermii wywołanej polem elektrycznym

Potencjał pola elektrycznego $\varphi_1(x, y)$ wewnątrz tkanki opisuje następujące równanie

$$x \in \Omega: \nabla[\varepsilon_1(x, y)\varphi_1(x, y)] = 0 \quad (1)$$

gdzie $\varepsilon_1(x, y)$ [$C^2/(Nm^2)$] jest przenikalnością elektryczną tkanki. Równanie opisujące potencjał pola elektrycznego $\varphi_2(x, y)$ wewnątrz guza ma postać

$$x \in \Omega_g: \nabla[\varepsilon_2(x, y)\varphi_2(x, y)] = 0 \quad (2)$$

gdzie $\varepsilon_2(x, y)$ [$C^2/(Nm^2)$] jest przenikalnością elektryczną obszaru nowotworu.

Na powierzchni kontaktu Γ_c zdrowej tkanki i guza przyjmuje się warunek ciągłości w postaci

$$(x, y) \in \Gamma_c: \begin{cases} \varphi_1(x, y) = \varphi_2(x, y) \\ -\varepsilon_1 \frac{\partial \varphi_1(x, y)}{\partial n} = -\varepsilon_2 \frac{\partial \varphi_2(x, y)}{\partial n} \end{cases} \quad (3)$$

Na zewnętrznej powierzchni tkanki pozostającej w kontakcie z elektrodami zakłada się następujące warunki brzegowe

$$\begin{aligned} (x, y) \in \Gamma_1: \varphi_1(x, y) &= -U \\ (x, y) \in \Gamma_2: \varphi_1(x, y) &= U \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie Γ_1 Γ_2 oznaczają odpowiednio powierzchnie działania elektrody 1 i 2, natomiast U jest napięciem elektrody w stosunku do ziemi.

Na pozostałej, zewnętrznej powierzchni tkanki założono warunek brzegowy w postaci

$$(x, y) \in \Gamma_3 \cup \Gamma_4: -\varepsilon_1 \frac{\partial \varphi_1(x, y)}{\partial n} = 0 \quad (5)$$

Natężenie pola elektrycznego wewnątrz tkanki oblicza się z zależności

$$E(x, y) = -\nabla\varphi(x, y) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial x} \\ \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Wydzielanie się ciepła w tkance spowodowane rozproszoną siłą elektromagnetyczną zależy od przewodności elektrycznej tkanki σ [S/m] oraz natężenia pola elektrycznego E . Przybliżoną wartość objętościowego ciepła wygenerowanego w tkance można wyznaczyć na podstawie wzoru

$$Q_e(x, y) = \frac{\sigma |E(x, y)|^2}{2} = \frac{\sigma}{2} \left[\left(\frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (7)$$

Ustalone pole temperatury w obszarze tkanki i guza opisuje równanie Pennesa

$$(x, y) \in \Omega \cup \Omega_g: \lambda \nabla^2 T(x, y) + Q_{perf} + Q_{met} + Q_e(x, y) = 0 \quad (8)$$

gdzie λ [W/(mK)] jest współczynnikiem przewodzenia ciepła (przyjęto, że współczynnik ten jest taki sam dla tkanki zdrowej i guza), Q_{pref} jest składnikiem źródłowym związanym z

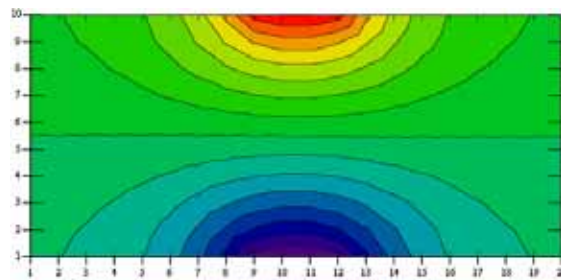
perfuzją, Q_{met} składnikiem źródłowym związanym z metabolizmem, Q_e - składnikiem źródłowym związanym z oddziaływaniem pola elektrycznego na tkankę. Dla uproszczenia dalszych rozważań założono, że Q_{pref} i Q_{met} są stałe, ale dla podobszaru nowotworowego wartości tych składników są znacznie wyższe niż dla tkanki zdrowej. Równanie (8) uzupełniono następującymi warunkami brzegowymi: na górnej i dolnej powierzchni tkanki (powierzchnia skóry) przyjęto stałą temperaturę T_b , na lewej i prawej powierzchni tkanki (wnętrze ciała) przyjęto strumień ciepła równy zero (warunek adiabatyczny).

Tak sformułowane zadanie rozwiązano za pomocą metody elementów brzegowych, przy czym zastosowano stałe elementy brzegowe oraz stałe elementy wewnętrzne.

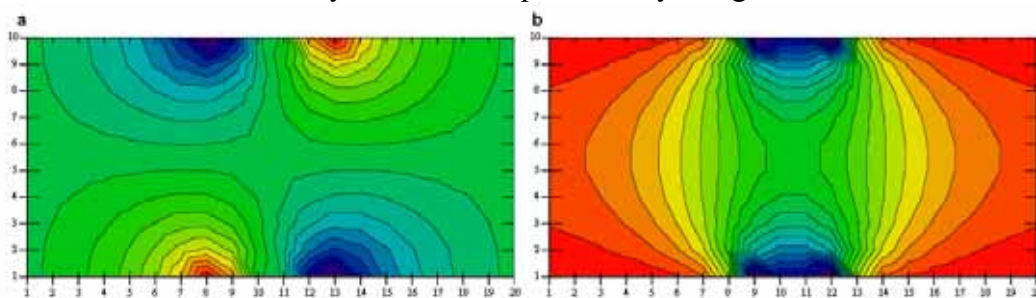
3. Wyniki obliczeń

Rozpatrywano obszar tkanki o wymiarach 0.08 m x 0.04 m. Powierzchnie elektrody górnej i dolnej są równe 0.016 m. Na górnej powierzchni kontaktu tkanki z elektrodą przyjęto napięcie 5V, a na dolnej -5V. Obszar oraz umiejscowienie guza o wymiarach 0.016m x 0.016m pokazano na rysunku 1.

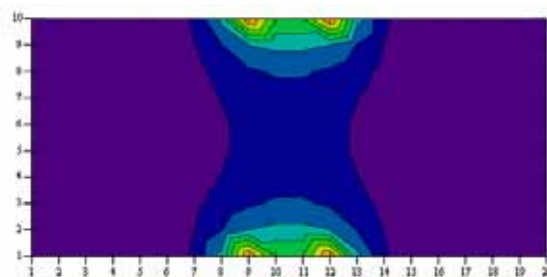
W pierwszej kolejności obliczono rozkład natężenia pola elektrycznego przy założeniu, że przenikalność elektryczna zdrowej tkanki ϵ_1 jak i guza ϵ_2 jest taka sama oraz przewodności elektryczne są równe: $\sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = 0.4$ [Ω/m]. Rozkład natężenia pola elektrycznego ilustruje rysunek 2, natomiast na rysunku 3 przedstawiono rozkłady pochodnych cząstkowych natężenia tego pola. Rozkład składnika źródłowego Q_e (por. wzór (7)) w obszarze tkanki i guza pokazano na rysunku 4.



Rys. 2. Rozkład pola elektrycznego



Rys. 3. Pochodne natężenia pola elektrycznego a) względem x, b) względem y

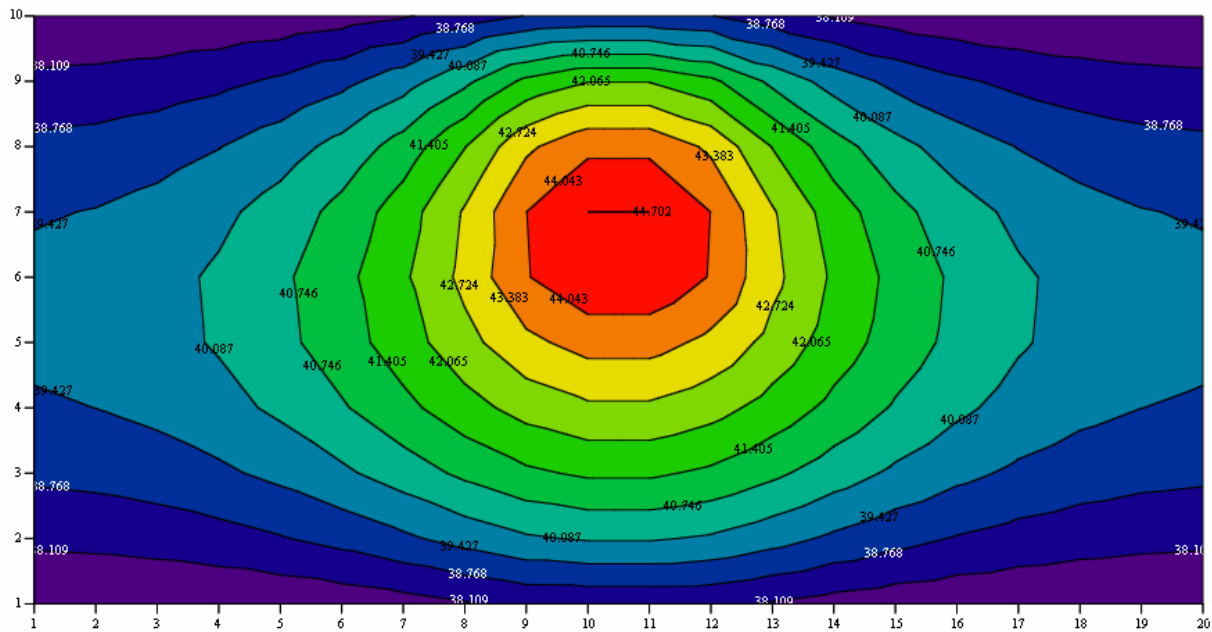


Rys. 4. Rozkład składnika źródłowego Q_e

W następnym kroku obliczeń rozwiązano równanie Pennesa (por. wzór (8)) dla wcześniej wyznaczonego składnika źródłowego Q_e wywołanego polem elektrycznym oraz pozostałych składników równych:

$$Q_{perf} = \begin{cases} -200, & (x, y) \in \Omega \\ -800, & (x, y) \in \Omega_g \end{cases} \quad Q_{met} = \begin{cases} 4200, & (x, y) \in \Omega \\ 42000, & (x, y) \in \Omega_g \end{cases}$$

Do obliczeń przyjęto taką samą wartość współczynnika przewodzenia ciepła dla tkanki zdrowej i guza równą $\lambda=0.5$ [W/(mK)] oraz temperaturę brzegową $T_b = 37$. Na rysunku 5 pokazano rozkład temperatury w analizowanym obszarze.



Rys. 5. Rozkład temperatury

4. Wnioski

Jak wynika z wykonanych obliczeń, zastosowanie pola elektrycznego wywołanego napięciem $\pm 5V$ powoduje wzrost temperatury w obrębie guza do maksymalnej wartości równej $44.7^{\circ}C$. W pozostałym obszarze również następuje wzrost temperatury, jednak jest on na tyle mały (poniżej $42^{\circ}C$), że nie powoduje uszkodzenia zdrowej tkanki. Rozkład temperatury jest oczywiście zależny od napięcia, jakim są zasilane elektrody oraz od ich wymiarów.

Literatura

1. Young-Gang Lv, Zhong-Shan Deng, and Jing Liu, *3-D Numerical Study on Induces Heating Effects of Embedded Micro/Nanoparticles on Human Body Subjects to Extenal Medical Electromagnetic Field*. IEEE Transactions in nanobioscience, Vol. 4, No 4, 284-294
2. E. Majchrzak, *Metoda elementów brzegowych w przepływie ciepła*. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2001
3. P.Jabłoński, *Metoda elementów brzegowych w modelowaniu pola elektromagnetycznego*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2003

ANALIZA ZJAWISKA KONTAKTU CIAŁ ODKSZTAŁCALNYCH METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

DARIUSZ STOL

Automatyka i Robotyka, AB3, 5 rok

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



Streszczenie. Artykuł dotyczy zjawiska kontaktu występującego pomiędzy dwoma odkształcalnymi walcami. Korzystając z metody elementów skończonych i pakietu programów MSC.Patran/Marc otrzymano rozkład naprężeń i przemieszczeń, a następnie porównano wyniki z analitycznymi. W pracy przeanalizowano dwa przypadki dyskretyzacji elementami skończonymi.

1. Wprowadzenie

Naprężenie kontaktowe, nazywane także stykowymi są to naprężenia, które powstają na niewielkim obszarze styku w wyniku zetknięcia się dwóch ciał sprężystych dociśniętych do siebie pewną siłą [1] i [2]. Przy stosunkowo małych siłach docisku naprężenia te osiągają niekiedy znaczną wartość i mogą doprowadzić materiał ciał w bezpośrednim otoczeniu obszaru styku do przekroczenia dopuszczalnego wyężenia materiału.

Podstawowe ujęcie teoretyczne zagadnienia wyznaczania naprężeń stykowych podał H. Hertz. W teorii Hertza przyjęto następujące założenia:

- stykające się ciała są wykonane z jednorodnego, izotropowego materiału podlegającego prawu Hooke'a,
- w obszarze styku ciała te są ograniczone powierzchniami gładkimi o krzywiznie regularnej,
- w obszarze styku w obu ciałach powstają jedynie małe odkształcenia,
- pole powierzchni styku jest małe w porównaniu z polem powierzchni stykających się ciał,
- na powierzchni styku występują jedynie naprężenia normalne.

Analizując zjawiska fizyczne czy procesy technologiczne mamy do czynienia z zagadnieniami kontaktu pomiędzy ciałami czy ciałem a płynem. Analiza ta ma na celu określenie przemieszczeń, odkształceń i naprężeń, które powstaną w wyniku kontaktu.

MSC.Marc jest bardzo zaawansowanym algorytmu do modelowania kontaktu pomiędzy ciałami. Są to ciała odkształcalne i nieodkształcalne zbudowane z elementów skończonych. Za pomocą programu możemy dokonać analizy kontaktu pomiędzy ciałem deformowalnym i sztywnym lub dwoma ciałami deformowalnymi. Dla ciał odkształcalnych jest też zapewniona możliwość rozpatrywania kontaktu pomiędzy powierzchniami tego samego ciała.

2. Rozwiązanie analityczne

Rozpatrzono przypadek dwóch stykających się walców o osiach równoległych dociśniętych pewną siłą. Walce mają następujące wymiary: średnica $d = 0,01$ m, długość $l = 0,05$ m. Ciała są dociśnięte siłą $P = 2000$ N i charakteryzują się następującymi własnościami materiałowymi: moduł sprężystości podłużnej (Younga): $E = 2,2 \cdot 10^{11}$ Pa i współczynnik Poissona $\nu = 0,3$.

W analizowanym przypadku, gdy elementami stykającymi się są walce o osiach równoległych, obszar styku jest prostokątem o połowie szerokości równej

$$b = \sqrt{\frac{4kr^2}{\pi 2r} P} \quad (1)$$

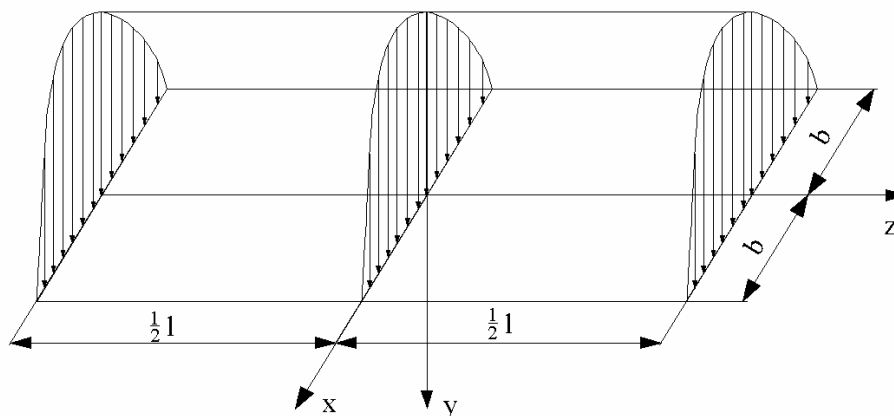
przy czym

$$k = 2 \frac{1-\nu^2}{E} \quad (2)$$

gdzie: r – promień walca, p – obciążenie na jednostkę długości

Dla przyjętych danych otrzymujemy następujące wartości: $b = 3,245 \cdot 10^{-5}$ m,
 $k = 8,273 \cdot 10^{-12}$ m²/N.

Wykresem przedstawiającym rozkład naprężeń w kierunku szerokości jest elipsa (rys.1).



Rys. 1. Rozkład naprężeń stykowych

Maksymalne ciśnienie na powierzchnię styku równe największemu naprężeniu ściskającemu liczymy następująco:

$$p_{\max} = \sqrt{\frac{4d}{\pi d^2 k} P} \quad (3)$$

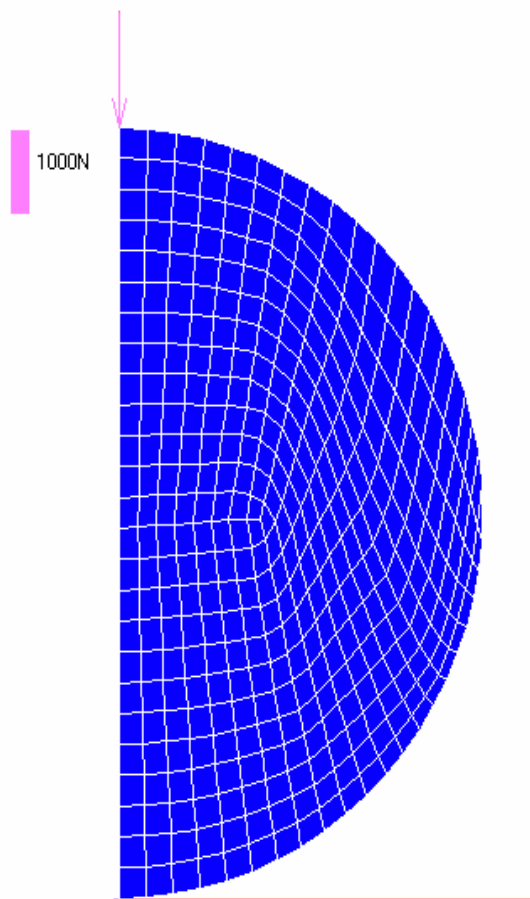
$$p_{\max} = 7,846 \cdot 10^8 \text{ Pa}$$

Największe naprężenie w miejscu styku wynosi:

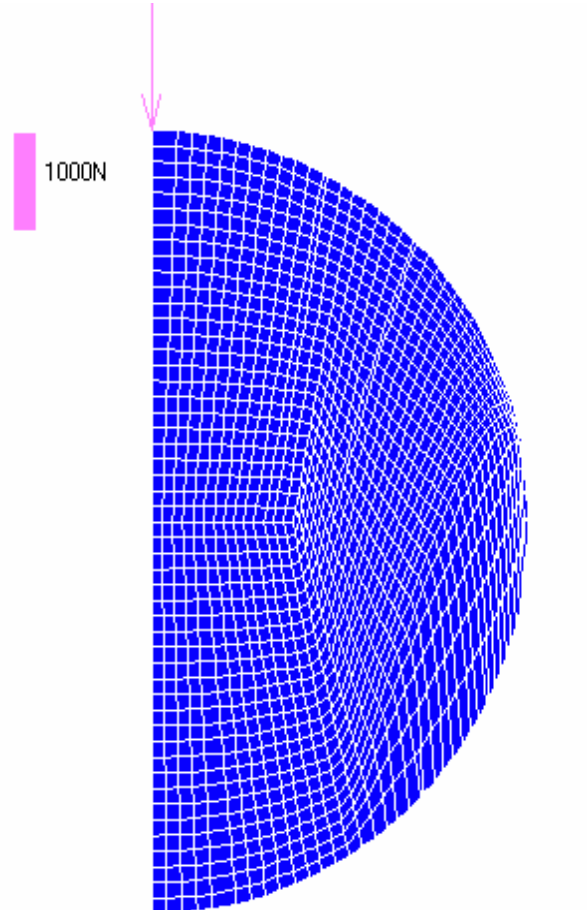
$$\sigma = -p_{\max} = -7,846 \cdot 10^8 \text{ Pa}$$

3. Model numeryczny

Do modelowania wykorzystano programy MSC.Marc i MSC.Patran [3]. Zadanie zostało rozpatrzone jako dwuwymiarowe. Dla uproszczenia modelu zastosowano symetrie. Geometria, własności materiałowe i dyskretyzacja na elementy skończone zostały zadane w programie MSC.Patran.



Rys. 2. Dyskretyzacja układu dla 356 elementów skończonych

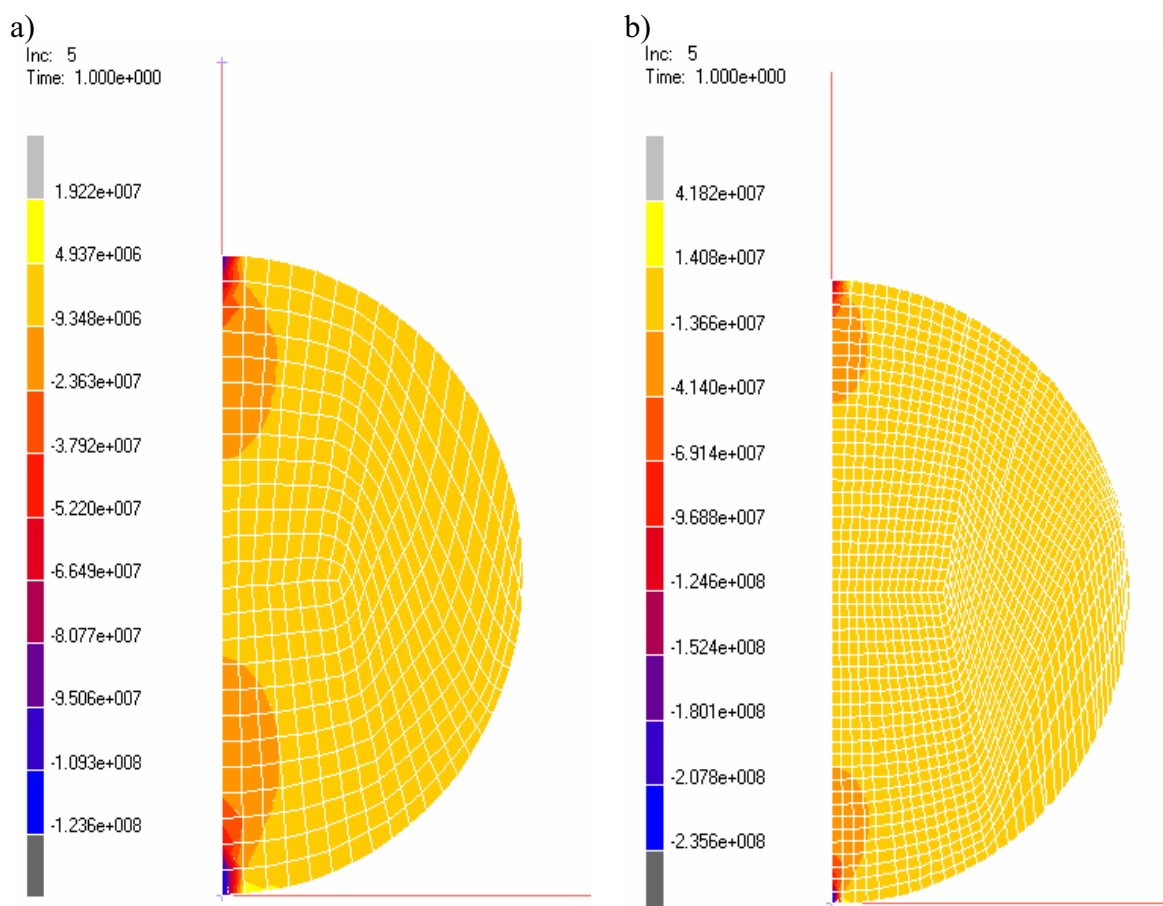


Rys. 3. Dyskretyzacja układu dla 3176 elementów skończonych

Została zastosowana siatka regularna. Na rysunku 2 i 3 przedstawiono podział rozpatrywanego walca na 356 i 3176 elementów skończonych. W obliczeniach wytrzymałościowych wykorzystano system MSC.Marc. W programie zadano kontakt jak i warunki brzegowe. Ponieważ zastosowano uproszczenie w postaci symetrii to została zadana połowa wartości siły.

4. Wyniki analizy numerycznej

Symulacja przebiegła w 5 iteracjach. Otrzymane wyniki naprężeń ściskających zaprezentowano na rysunku 4.



Rys. 4. Napężenie ściskające: a) dla siatki składającej się z 356 elementów skończonych, b) dla siatki składającej się z 3176 elementów skończonych

Tabela 1. Porównanie wyników

	Analitycznie	Numerycznie	
		356 elementów	3176 elementów
Napężenie ściskające [Pa]	$-7,846 \cdot 10^8$	$-1,236 \cdot 10^8$	$-2,356 \cdot 10^8$

5. Podsumowanie

Porównując wyniki obliczeń zagadnienie kontaktu w programie MSC.Marc z wynikami analitycznymi zauważamy różnice, które mogą wynikać z uproszczeń przyjętych w algorytmie wykrywania kontaktu. Badając układ przy pomocy oprogramowanie MSC.Marc zauważamy, że gęstość siatki ma duży wpływ na otrzymane wyniki. Stosując więcej elementów skończonych napężenia ściskające są bliższe wynikom otrzymanym metodą analityczną.

Literatura:

1. Dyląg Z., Jakubowicz A., Orłoś Z.: Wytrzymałość materiałów, WNT, W-wa 1996.
2. Brzoska Z.: Wytrzymałość elementów konstrukcyjnych, PWN, W-wa 1988.
3. MSC.Marc Volume A: Theory and User Information, Chapter 8 Contact.

ANALIZA NUMERYCZNA I DOŚWIADCZALNA UKŁADU ZAWORU DYSKOWEGO AMORTYZATORA

PAWEŁ ŚLIWA

Automatyka i Robotyka, AB3, 5 rok

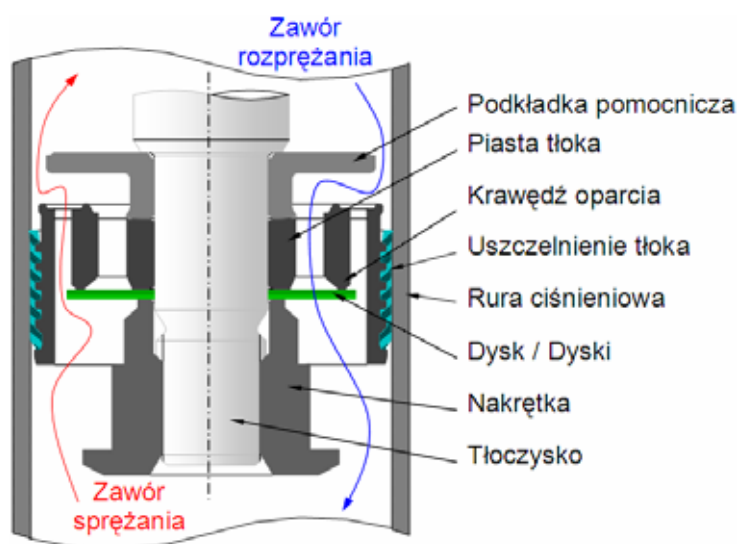
Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Tadeusz Burczyński



Streszczenie. Celem pracy była weryfikacja równoważnego modelu numerycznego układu zaworu dyskowego, używanego w amortyzatorach motoryzacyjnych. Wyniki przeprowadzonych badań oraz symulacji pozwoliły na lepsze zrozumienie wpływu parametrów konstrukcyjnych na wytrzymałość dysków zaworowych. Podstawą weryfikacji modelu numerycznego były pomiary statyczne, przeprowadzone na ramie obciążeniowej Instron®. Jakościowa analiza wrażliwości zastosowana do wyników symulacji identyfikowała parametry, które statystycznie były najbardziej znaczące dla funkcjonowania układu.

1. Wprowadzenie

Układ zaworowy składa się z połączenia dysków i podkładek, dalej nazywanych jako stos dysków. Stos dysków jest zaprojektowany tak, by stawiać opór zmiennym ciśnieniom działającym na tłok (rys. 1). Liczba dysków, ich średnice i grubości bezpośrednio wpływają na trwałość systemu zaworowego. Wybór zaworu i jego strojenie jest procesem optymalizacji, którego kryterium stanowi kompromis pomiędzy siłą tłumienia a wytrzymałością.

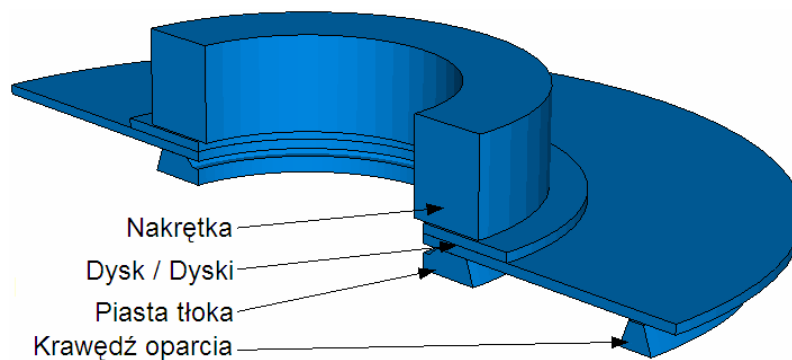


Rys. 1. Schemat układu zaworu dyskowego amortyzatora

2. Model numeryczny

Układ zaworu dyskowego amortyzatora został zamodelowany jako trójwymiarowy, niesymetryczny model (rys. 2). Za minimum przyjęto cztery elementy skończone budujące grubość dysku. Do generacji siatki użyto 8789 bryłowych, ośmiowęzłowych elementów sześciennych (Linear hexahedron, C3D8R [1]).

Symulacja składała się z trzech podstawowych kroków pozwalających na obciążenie i odciążenie układu: obciążenia wstępnego, wymuszenia przemieszczeniem oraz usunięcia obciążenia.



Rys. 2. Budowa modelu numerycznego

W pierwszym kroku nakrętka poruszała się w dół, ściskając układ z siłą równą sile występującej w gwincie podczas dokręcania [2]. W drugim kroku do krawędzi oparcia przyłożone zostało przemieszczenie, powodując odkształcenie dysków. W ostatnim kroku przemieszczenie zostało usunięte, układ wrócił do stanu sprzed kroku drugiego.

3. Pomiar obiektu doświadczalnego

Do testów wykorzystano ramę obciążeniową Intron® model 5582 (rys. 3). Sposób zamocowania oraz elementy oprzyrządowania pomiarowego przedstawiono na rys. 4. Procedura testu zawierała następujące kroki: kasowanie luzów układu, wymuszenie przemieszczeniem i usunięcie obciążenia.



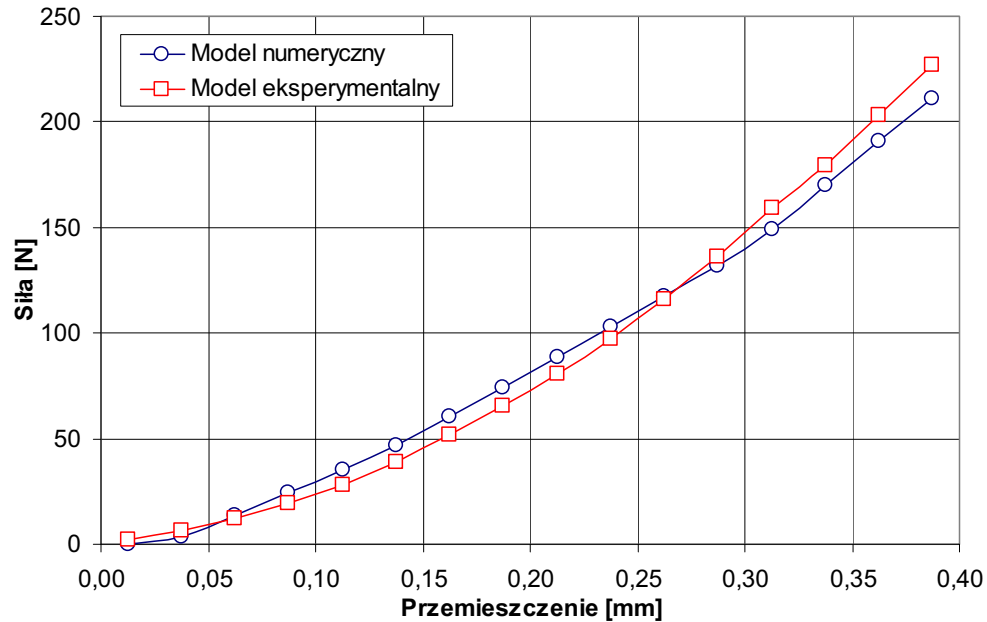
Rys. 3. Stanowisko pomiarowe (rama obciążeniowa, komputer PC)



Rys. 4. Zamocowanie oprzyrządowania pomiarowego (głowica, przetwornik siły, zawór, masywna tuleja)

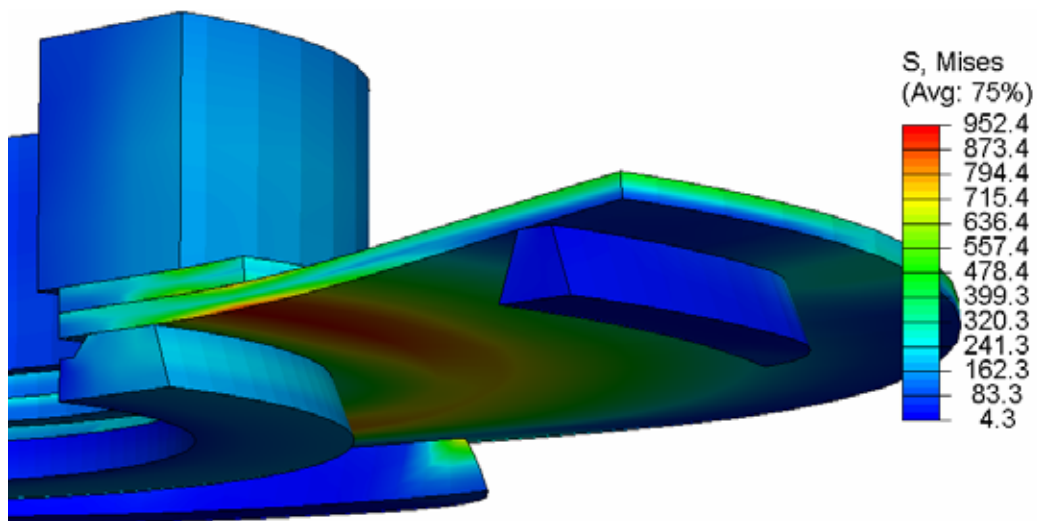
4. Wyniki analizy

Wyniki symulacji zostały bezpośrednio porównane z pomiarami eksperymentalnymi (rys. 5). Błąd względny między wynikami nie przekroczył 5%.



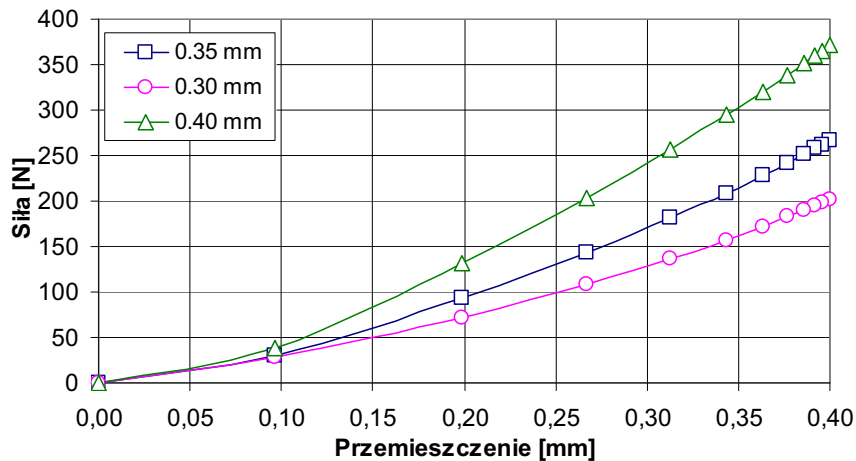
Rys. 5. Porównanie wyników symulacji i eksperymentu

Maksymalne naprężenia występowały w dolnej części dysku (rys. 6). Wartości te były stosunkowo nieduże, ponieważ typowe naprężenia występujące w dyskach zaworowych wynoszą od 1600 do 1800 MPa.

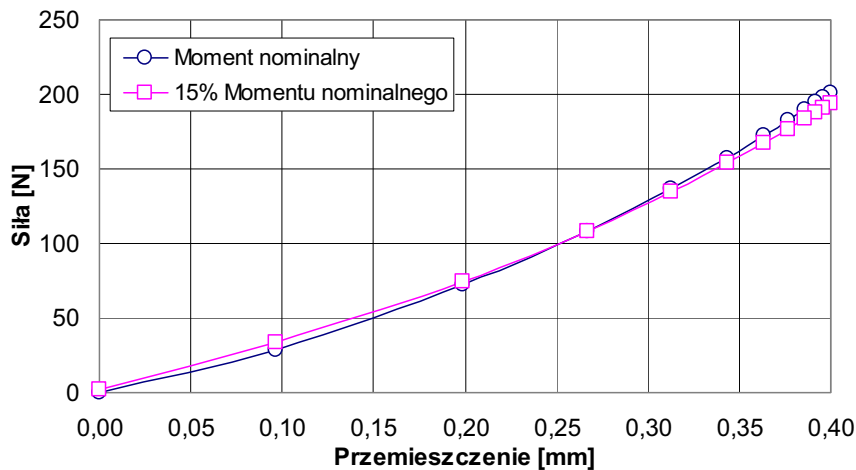


Rys. 6. Naprężenia występujące podczas drugiego kroku symulacji

W celu zidentyfikowania trendów i wartości odnoszących się do zmian parametrów modelu została wykonana jakościowa analiza wrażliwości. Głównymi czynnikami poddanymi analizie były: grubość dysku (rys. 7) i siła osiowa (rys. 8).



Rys. 7. Wyniki symulacji dla trzech różnych grubości dysków



Rys. 8. Wyniki symulacji dla różnych momentów dokręcenia nakrętki

5. Podsumowanie

W rzeczywistych zaworach dyskowych amortyzatora czynnikiem wymuszającym jest ciśnienie przetłaczanego oleju. Weryfikacja takiego układu mogłaby być bardzo trudna lub niemożliwa do przeprowadzenia. Przystosowanie obiektu doświadczalnego do „suchych testów” umożliwiło weryfikację układu zaworu dyskowego.

Przyjęty model numeryczny dostarczył zgodnych wyników. Moment dokręcenia nakrętki, zamodelowany jako siła osiowa, miał niewielki wpływ na wyniki symulacji. Natomiast najbardziej wpływowym parametrem symulacji była grubość dysku. Grubość pełnego stosu, zależna również od tolerancji wykonania dysku, miała istotny wpływ na funkcjonowanie całego układu.

Literatura

1. Abaqus V6.7 PDF Documentation
2. Rutkowski A., Części Maszyn, WSiP, Warszawa (1996)

ZADANIE PROGRAMOWANIA WIELOKRYTERIALNEGO W OPARCIU O OPTYMALIZACJĘ METODĄ SIMPLEX

ŁUKASZ TURCHAN

Automatyka i Robotyka, AB3, 4 rok

Opiekun naukowy: dr inż. Marek Jasiński



Streszczenie. W artykule sformułowano problem programowania wielokryterialnego. Omówiono autorski program komputerowy SimplexApp służący do rozwiązywania zadań programowania liniowego za pomocą metody simplex. Przedstawiono przykładowe zadanie wielokryterialne oraz sposób jego rozwiązania za pomocą programu SimplexApp.

1. Wprowadzenie

Optymalizacja wielokryterialna jest jednym z podstawowych sposobów wyznaczania kompromisów pomiędzy rozbieżnymi celami. Jest ona używana na różnych poziomach działania przedsiębiorstw, między innymi w projektowaniu i eksploatacji procesów, czy planowaniu i organizacji przedsięwzięć [2]. Zastosowanie optymalizacji wymaga od użytkownika znajomości koncepcji, umiejętności budowy modelu matematycznego, wyboru metody optymalizacji oraz właściwej interpretacji wyników [3]. W pracy skoncentrowano się na problemie optymalizacji wielokryterialnej wykorzystując metodę simplex oraz przedstawiono autorski program rozwiązujący zadania za pomocą tej metody. Przedstawiono sposób rozwiązania problemu optymalizacji wielokryterialnej na przykładzie zadania z trzema funkcjami celu.

2. Programowanie wielokryterialne

Optymalizacja wielokryterialna polega na znalezieniu wektora zmiennych decyzyjnych (1), który spełnia określone warunki (ograniczenia) (2) oraz optymalizuje wektor funkcyjny (3), którego elementami są funkcje celu [1].

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (1)$$

$$\begin{cases} a_{11} \cdot x_1 + a_{12} \cdot x_2 + \dots + a_{1n} \cdot x_n \leq b_1 \\ \dots \\ a_{m1} \cdot x_1 + a_{m2} \cdot x_2 + \dots + a_{mn} \cdot x_n \leq b_m \end{cases} \quad (2)$$

$$\mathbf{FC}(x_1 \dots x_n) = [fc_1(x_1 \dots x_n), fc_2(x_1 \dots x_n), \dots, fc_k(x_1 \dots x_n)] \quad (3)$$

gdzie n oznacza ilość zmiennych decyzyjnych, m – ilość ograniczeń natomiast k – ilość funkcji celu.

W prezentowanej metodzie, dla każdej kolejnej funkcji celu fc_i zakłada się znajomość pewnego poziomu jej zrealizowania q_i (por. tabela 1), satysfakcjonującego z punktu widzenia decydenta [2].

Określa się również współczynniki kar [3] związane z ewentualnym niezrealizowaniem celów, przy czym dla celów ograniczonych jednostronnie (\geq lub \leq) występuje tylko jeden niezerowy współczynnik, natomiast dla celów ograniczonych dwustronnie ($=$) występują dwa współczynniki kar [1]: $\hat{y}_i(+)$ dla niekorzystnych odchyień „in plus” oraz $\hat{y}_i(-)$ dla niekorzystnych odchyień „in minus”.

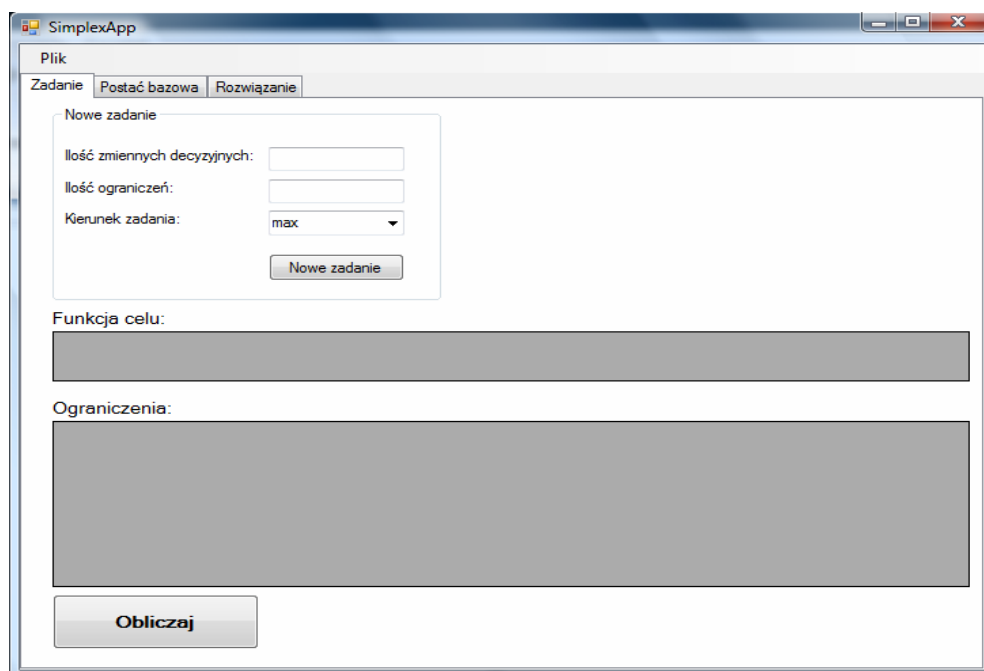
W tabeli 1 przedstawiono ogólną postać modelu matematycznego zadania [2]. W takim ujęciu rozwiązanie zadania należy uznać za optymalne, jeżeli nie istnieje możliwość znalezienia rozwiązania lepszego z uwagi na co najmniej jedno kryterium (funkcję celu), bez pogarszania z uwagi na pozostałe [4].

Tabela 1. Model matematyczny zadania [2]

Nr celu		Współczynniki kar		Priorytet
1	$fc_1(x_1 \dots x_n) \geq q_1$	$\hat{y}_1(+)$	$\hat{y}_1(-)$	p_1
2	$fc_2(x_1 \dots x_n) \leq q_2$	$\hat{y}_2(+)$	$\hat{y}_2(-)$	p_2
...
k	$fc_k(x_1 \dots x_n) = q_k$	$\hat{y}_k(+)$	$\hat{y}_k(-)$	p_k
Ograniczenia:	$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1$	Warunki brzegowe:	$x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0$	
	$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2$			
	...			
	$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m$			

3. Program komputerowy

Program komputerowy SimplexApp został napisany do rozwiązywania zadań optymalizacji liniowej metodą simplex. Dzięki przyjaznemu interfejsowi (rysunek 1) program



Rys. 1. Interfejs programu SimplexApp

ułatwia wpisywanie danych oraz ich późniejszą modyfikację, daje możliwość różnorodnego wyświetlania wyników, a także pozwala zapisywać wyniki do plików tekstowych. Przed wykonaniem obliczeń następuje walidacja wprowadzonych danych. Istnieje możliwość wyświetlenia postaci bazowej oraz wyznaczenia rozwiązań alternatywnych, jeżeli takowe istnieją. Program informuje o wystąpieniu przypadków szczególnych rozwiązań. Aplikacja ma niewielkie wymagania sprzętowe oraz nie wymaga instalacji.

4. Przykład obliczeń

Sposób wyznaczania rozwiązania optymalnego za pomocą programu SimplexApp w zadaniu wielokryterialnym przedstawiono na przykładzie [1] z tabeli 2.

Tabela 2. Model matematyczny przykładowego zadania [1]

Nr celu		$\hat{y}_i(+)$	$\hat{y}_i(-)$	Priorytet
1	$6x_1 + 5x_2 \geq 100$	0	5	2
2	$4x_1 + 3x_2 = 50$	4	2	2
3	$2x_1 + 4x_2 \leq 50$	3	0	1
Ograniczenia:	$9x_1 + 7x_2 \leq 63$	Warunki brzegowe:	$x_1, x_2 \geq 0$	
	$x_1 + x_2 \leq 8$			
	$x_1 + x_2 \geq 6$			

Na podstawie modelu należy utworzyć dwa podzadania, ponieważ występują trzy cele, z których dwa mają ten sam priorytet. W pierwszym kroku należy, za pomocą programowania liniowego, wyznaczyć rozwiązanie zadania o wyższym priorytecie (cel 3), czyli rozwiązanie zadania P1. W następnym kroku należy rozwiązać zadanie, w którym zostaną jednocześnie uwzględnione cele nr 1 i 2 – zadanie P2.

Nowo tworzone zadania P1 i P2 składają się z funkcji celu minimalizującej wartości odchyłek związanych z celami o danym priorytecie, ograniczeń pierwotnych (czyli wynikających z treści zadania) oraz ograniczeń wynikających z założonych celów. Dla i -tego celu ograniczenie takie ma postać

$$c_{1i}x_1 + c_{2i}x_2 - y_i(+) + y_i(-) = q_i \quad (4)$$

gdzie $y_i(+)$ i $y_i(-)$ oznaczają minimalizowane wartości odchyłek odpowiednio „in plus” i „in minus”. Zadania uzupełniamy warunkami nieujemności dla zmiennych decyzyjnych i odchyłek.

Zadanie P1: minimalizacja odchyłek „in plus” dla celu 3:

$$3y_3(+) \rightarrow MIN \quad (5)$$

Rozwiązanie zadania to kilka rozwiązań alternatywnych, w każdym rozwiązaniu $3y_3(+) = 0$

$$\begin{array}{cccc} x_1 = 2 & y_1(+) = 0 & y_2(+) = 0 & y_3(+) = 0 \\ x_2 = 0 & y_1(-) = 88 & y_2(-) = 42 & y_3(-) = 46 \end{array} \quad (6)$$

Zadanie P2: minimalizacja odchyłek „in minus” dla celów 1 oraz 2, a także odchyłkę „in plus” dla celu 2, z uwzględnieniem wartości odchyłki y_3 otrzymanej w zadaniu P1.

$$5y_1(-) + 4y_2(+) + 2y_2(-) \rightarrow MIN \quad (7)$$

Otrzymano jedno rozwiązanie, w którym: $5y_1(-) + 4y_2(+) + 2y_2(-) = 327,5$

$$\begin{array}{llll} x_1 = 3,5 & y_1(+) = 0 & y_2(+) = 0 & y_3(+) = 0 \\ x_2 = 4,5 & y_1(-) = 56,5 & y_2(-) = 22,5 & y_3(-) = 25 \end{array} \quad (8)$$

Odpowiedź:

Rozwiązanie zadania P2 jest optymalnym rozwiązaniem całego problemu. Wszystkie odchyłki „in plus” są zerowe. Cel 1 oraz 2 o priorytecie 2 nie zostaną zrealizowane, a niekorzystne odchyłki „in minus” przedstawione zostały w powyższym rozwiązaniu (8). Cel 3 został zrealizowany z korzystną odchyłką „in minus” równą 25.

5. Wnioski

Problem programowania wielokryterialnego, w przedstawionej formie, sprowadza się do rozwiązania kilku zadań optymalizacji liniowej. Metoda Simplex jest uniwersalną metodą wyznaczania rozwiązań zadań programowania liniowego. Dzięki zastosowaniu przedstawionego programu komputerowego SimplexApp można rozwiązywać zadania optymalizacji liniowej z praktycznie dowolną ilością zmiennych decyzyjnych oraz ograniczeń. Nie ma potrzeby sprowadzania modelu do postaci bazowej, ponieważ program sam ją wyznacza. Ilość dodatkowych zmiennych bilansujących i sztucznych jest przez program minimalizowana. Zaletą aplikacji SimplexApp jest graficzny interfejs użytkownika. Aby usprawnić proces wyznaczania rozwiązania wielokryterialnego należy uzupełnić program o funkcję dodawania kolejnego ograniczenia oraz zmiany funkcji celu bez modyfikacji wcześniejszych ograniczeń.

Literatura

1. Trzaskalik T., Wprowadzenie do badań operacyjnych z komputerem, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa (2008).
2. Praca zbiorowa pod red. Ewy Majchrzak. Dziewoński M., Jasiński M., Kałuża G., Majchrzak E., Mendakiewicz J., Paruch M., Piasecka-Belkhat A., Badania operacyjne. Teoria i zastosowania, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice (2007).
3. Strona internetowa: http://deuter.am.put.poznan.pl/zwm/eskrypty_pliki/inzynieriasystemow/podstawowepojeciaoptimalizacji.pdf
4. Strona internetowa: <http://home.agh.edu.pl/~astan/zip/optwekt.ppt>

ANALIZA RAM PRZESTRZENNYCH METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

ŁUKASZ WARZECHA

Zarządzanie i Inżynieria Produkcji, ZC6, 5 rok

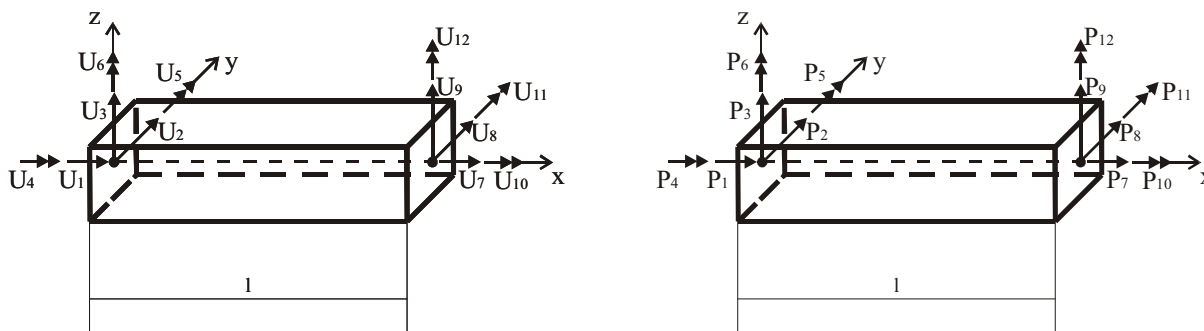
Opiekun naukowy: dr hab. inż. Piotr Fedeliński, Prof. Pol. Śląskiej
dr inż. Radosław Górski



Streszczenie. W niniejszym artykule została przedstawiona analiza numeryczna układu ramowego obciążonego statycznie za pomocą metody elementów skończonych (MES). Opracowano własny program komputerowy, który wyznacza przemieszczenia węzłów. W celu sprawdzenia poprawności otrzymywanych wyników układ analizowano profesjonalnym oprogramowaniem MSC Patran/Nastran.

1. Wprowadzenie

Główne założenie metody elementów skończonych (MES) to podział modelu geometrycznego ciągłego na elementy skończone, łączące się w tzw. węzłach, czego efektem jest utworzenie modelu geometrycznego dyskretnego. W zależności od rodzaju układu w MES rozróżnia się odpowiednio zdefiniowane elementy. Dla omawianej w artykule ramy przestrzennej elementem skończonym jest belka (rys. 1).



Rys. 1. Belkowy element skończony

gdzie: $U_1, U_2, U_3, U_7, U_8, U_9$ są przemieszczeniami liniowymi; $U_4, U_5, U_6, U_{10}, U_{11}, U_{12}$ są przemieszczeniami kątowymi; $P_1, P_2, P_3, P_7, P_8, P_9$ są to siły odpowiednio w kierunkach x, y, z ; $P_4, P_5, P_6, P_{10}, P_{11}, P_{12}$ są to momenty odpowiednio względem osi x, y, z .

W liniowo-sprężystym modelu układu podstawą obliczeń jest związek między siłami \mathbf{P} działającymi na węzły, a odpowiadającymi tym siłom przemieszczeniami składowymi węzłów \mathbf{U} . Związek ten wyraża się równaniem macierzowym [1]:

$$\mathbf{P} = \mathbf{K} \mathbf{U} , \quad (1)$$

gdzie: \mathbf{K} - macierz sztywności układu, \mathbf{P} - wektor sił, \mathbf{U} - wektor zawierający składowe poszukiwanych przemieszczeń.

Macierz sztywności pojedynczego elementu belkowego \mathbf{K}_e' w układzie lokalnym wiąże ze sobą przemieszczenia \mathbf{U}_e i siły \mathbf{P}_e tego elementu i ma wymiar 12×12 . Macierz tą zapisuje się w postaci [2]:

$$\mathbf{K}_e' = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{l^2} & 0 & -\frac{12EI_z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{l^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{l^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{l^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{l^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{l^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GI_s}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GI_s}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{l^2} & 0 & \frac{4EI_y}{l} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{l^2} & 0 & \frac{2EI_y}{l} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{l} & 0 & -\frac{6EI_z}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{l} \\ -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI_z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{l^2} & 0 & \frac{12EI_z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{l^2} \\ 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{l^3} & 0 & \frac{6EI_y}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_y}{l^3} & 0 & \frac{6EI_y}{l^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GI_s}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GI_s}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{l^2} & 0 & \frac{2EI_y}{l} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{l^2} & 0 & \frac{4EI_y}{l} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{l} & 0 & -\frac{6EI_z}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{l} \end{bmatrix} \quad (2)$$

gdzie: l - długość elementu skończonego, A - pole powierzchni przekroju poprzecznego, I_y , I_z - główne centralne momenty bezwładności przekroju, I_s - moment bezwładności na skręcanie, E - moduł Younga, G - moduł Kirchhoffa.

Model dyskretny konstrukcji określa się w odpowiednich układach współrzędnych. Rozróżnia się trzy rodzaje prostokątnych układów odniesienia: globalny, lokalny, węzłowy. Macierz sztywności elementu belkowego w układzie globalnym otrzymujemy z równania [2]:

$$\mathbf{K}_e = \mathbf{T}^T \mathbf{K}_e' \mathbf{T} \quad (3)$$

gdzie: \mathbf{K}_e - macierz sztywności elementu w układzie globalnym, \mathbf{T} - macierz transformacji pomiędzy układem globalnym, a układem lokalnym [1].

2. Program komputerowy

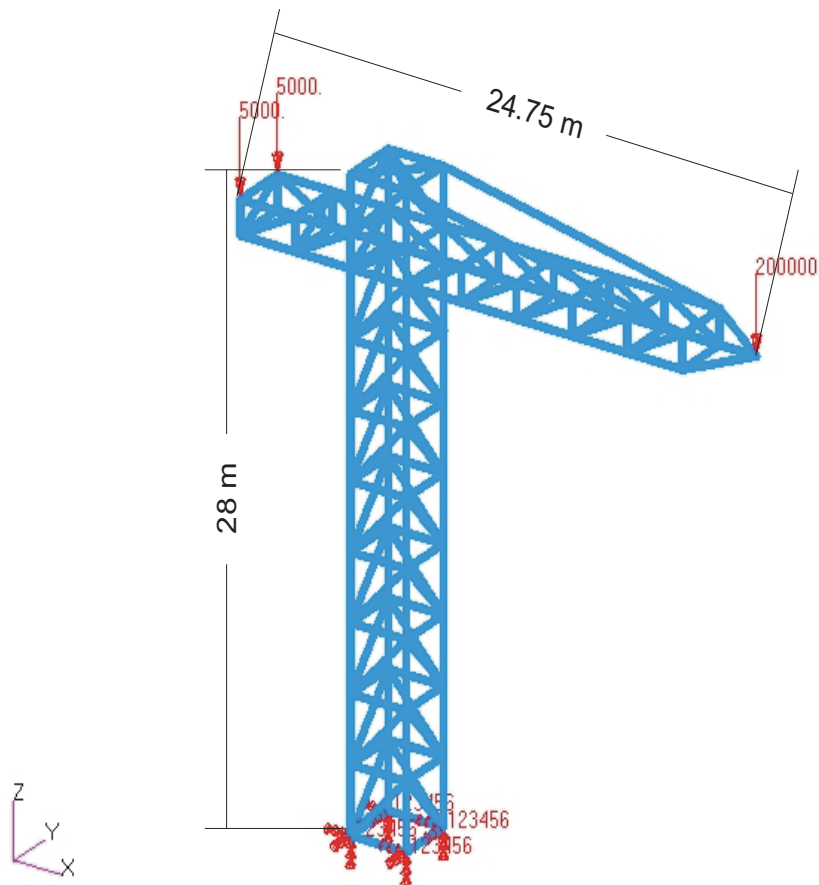
W celu analizy układu opracowano program komputerowy w środowisku Borland C++ 5.01. Za pomocą programu można otrzymać wyniki przemieszczeń w węzłach dowolnej ramy przestrzennej. W programie tworzy się model geometryczny przez podanie współrzędnych wszystkich węzłów układu oraz ich numeracji. Topologię ramy określa się przez podanie numeru węzła początkowego i końcowego każdego elementu. Następnie podaje się dane materiałowe i geometryczne poszczególnych elementów skończonych. Kolejnym krokiem jest wprowadzenie warunków brzegowych. Wyniki analizy otrzymuje się w postaci pliku tekstowego zawierającego przemieszczenia wszystkich węzłów układu lub ich wybranych składowych. Poprawność otrzymywanych wyników została sprawdzona przez porównanie z obliczeniami otrzymanymi profesjonalnym programem inżynierskim MSC Patran/Nastran.

3. Przykład obliczeniowy

Rozpatrywany układ jest uproszczonym modelem żurawia budowlanego o wysokości 28 m i rozpiętości 24.75 m. Analiza polega na obliczeniu przemieszczenia pionowego węzła, w którym została przyłożona siła 200000 N. Zastosowano również odciążenie układu w postaci dwóch sił 5000 N.

Własności pojedynczego elementu skończonego belkowego są następujące:
długość elementu skończonego - $l=3$ m, moduł Younga - $E=2.05 \cdot 10^{11}$ Pa,
moduł Kirchhoffa - $G=7.8846 \cdot 10^{10}$ Pa, średnica przekroju pełnego elementu - $d=0.3$ m,
pole przekroju poprzecznego - $A=0.706E-3$ m², momenty bezwładności przekroju -
 $I_z=0.397E-7$ m⁴, $I_y=0.397E-7$ m⁴, $I_s=0.794E-7$ m⁴. Układ złożony jest z 211 elementów skończonych oraz 74 węzłów.

Model analizowanego układu przestrzennego z uwzględnieniem założonego obciążenia oraz odebranych stopni swobody jest przedstawiony na rysunku 2.

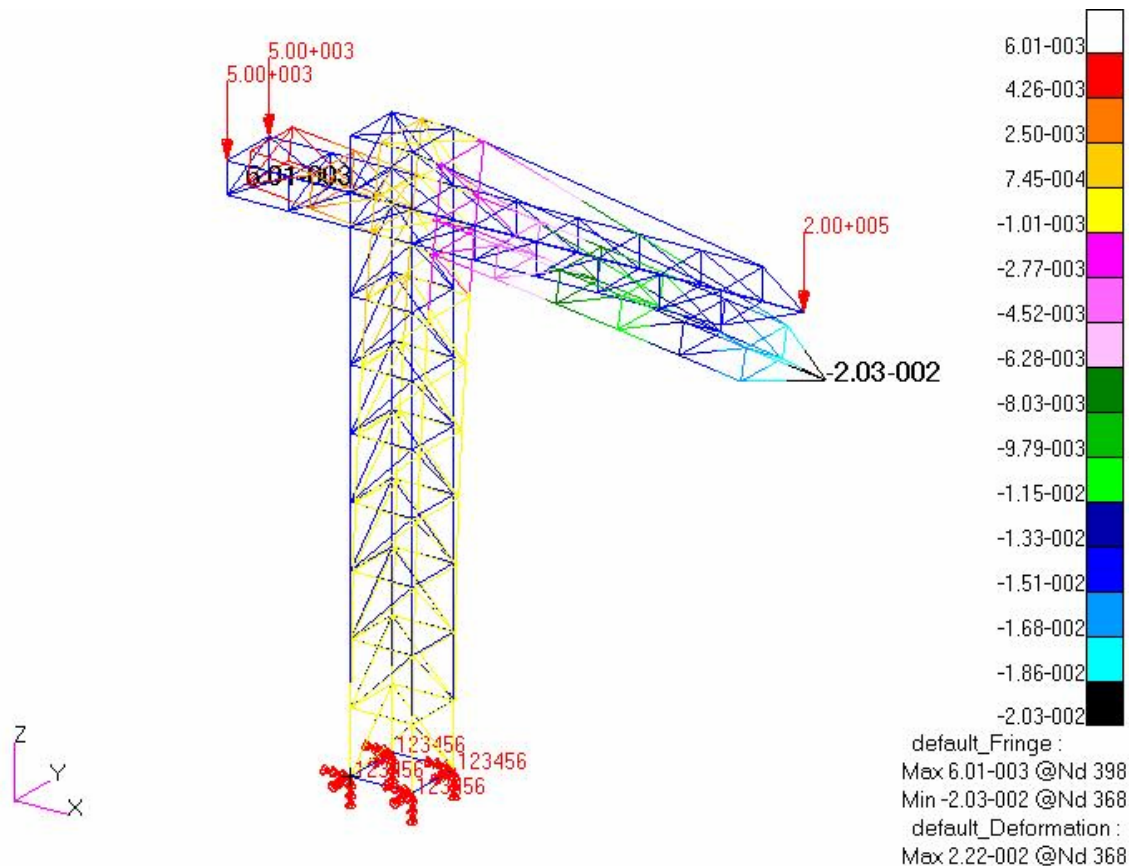


Rys.2 Model układu w programie MSC Patran

4. Wyniki i podsumowanie

Obliczenia przeprowadzono opracowanym własnym programem oraz oprogramowaniem MSC Patran/Nastran.

Wizualizacja deformacji układu w wyniku działającego obciążenia przedstawiona jest na rysunku 3.



Rys. 3 Deformacja układu w programie MSC Patran

W wyniku obciążenia końca wysięgnika, układ przemieścił się zgodnie z kierunkiem przyłożenia siły o -0.02032 m. Dokładnie taki sam wynik otrzymano własnym programem.

Metoda elementów skończonych (MES) we wspomaganych komputerowo analizach inżynierskich, umożliwia szybkie i względnie dokładne otrzymanie wyników. W przypadku układów o złożonej geometrii i obciążeniu zastosowanie metody analitycznej wiązałoby się z dużo większym nakładem czasu pracy.

Literatura

1. Dyląg Z., Jakubowicz A., Orłoś Z., Wytrzymałość materiałów, Tom I, WNT, Warszawa (1996).
2. Rakowski G., Kacprzyk Z., Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji, Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa (1993).

BADANIA ZMĘCZENIOWE ZAWORÓW DYSKOWYCH AMORTYZATORA

ADAM WOJSIAT

Automatyka i Robotyka, AB3, 5 rok

Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Tadeusz Burczyński.



Streszczenie. Celem niniejszego artykułu jest weryfikacja trwałości zaworu dyskowego amortyzatora. Elementy testowane były w przygotowanym oprzyrządowaniu na specjalnie zaprojektowanym do tego typu testów stanowisku. Ponadto niniejszy artykuł zawiera informacje na temat weryfikacji numerycznej naprężeń występujących w dyskach. Skorelowanie badań doświadczalnych oraz badań numerycznych pozwoliło sporządzić wykres Wöhlera dla kilku testowanych zaworów.

1. Wprowadzenie

Zmęczenie materiału najogólniej można określić, jako zjawisko zachodzące w materiałach i elementach konstrukcyjnych, poddanych zmiennym w czasie obciążeniom zewnętrznym, gdzie w efekcie następuje stopniowa utrata zdolności do przenoszenia założonych obciążeń eksploatacyjnych [1].

2. Wykresy zmęczeniowe – krzywa Wöhlera

W dzisiejszych czasach w praktyce inżynierskiej znany jest dobrze wykres Augusta Wöhlera. Wykres ten przedstawia zmęczenie materiału poddanego naprężeniom sprężystym (zmęczenie dużą liczbą cykli), za pomocą krzywej S-N (rys. 1.) opisującej wielkość cyklicznych naprężeń S jako funkcję liczby cykli N, aż do zniszczenia próbki. Najczęściej wykresy te sporządza się w układzie współrzędnych logarytmicznych ($\log S$, $\log N$).

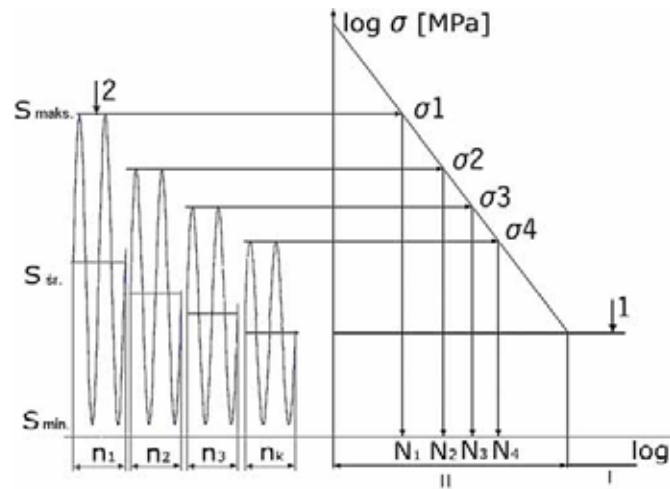


Rys.1. Typowy wykres S-N dla stali niskowęglowej [1]

3. Hipoteza kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych

W trakcie użytkowania danej konstrukcji amplituda naprężeń, którym poddana jest ta konstrukcja, może ulegać zmianie. W takich sytuacjach (tzn. przy zmiennej amplitudzie obciążenia) korzystanie z klasycznego wykresu Wöhlera nie jest właściwe, ponieważ jest on zbudowany przy założeniu stałej amplitudy obciążenia. W celu wyznaczenia trwałości zmęczeniowej, w przypadku ogólnym Palmgren i Miner zaproponowali podejście oparte na

założeniu, że pęknięcie zmęczeniowe powstaje w efekcie liniowej kumulacji drobnych, cząstkowych uszkodzeń.



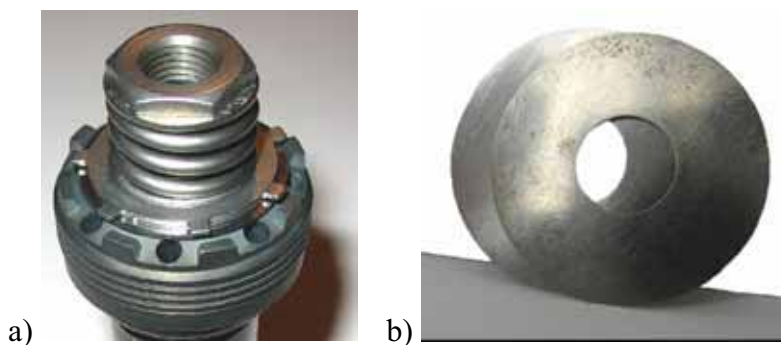
Rys. 2. Przedstawienie hipotezy Palmgrena Minera, gdzie: 1 – krzywa Wöhlera, 2 – obciążenie obustronnie zmienne, I – zakres nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej, II – zakres ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej, $\sigma_1, \dots, \sigma_k$ – wartość naprężeń cyklicznie zmiennych, $S_{min}, S_{max}, S_{mean}$ – naprężenia minimalne, średnie i maksymalne, $n_1 - n_k$ – liczba cykli poszczególnych naprężeń, $N_1 - N_k$ – liczba cykli niszczących dla danego naprężenia [2]

Równanie (1) ilustruje, jaka jest zasada kumulowania (sumowania) poszczególnych naprężeń całego widma możliwych obciążeń pracujących elementów [2].

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots + \frac{n_j}{N_j} = 1 \quad (1)$$

4. Zawory dyskowe amortyzatora

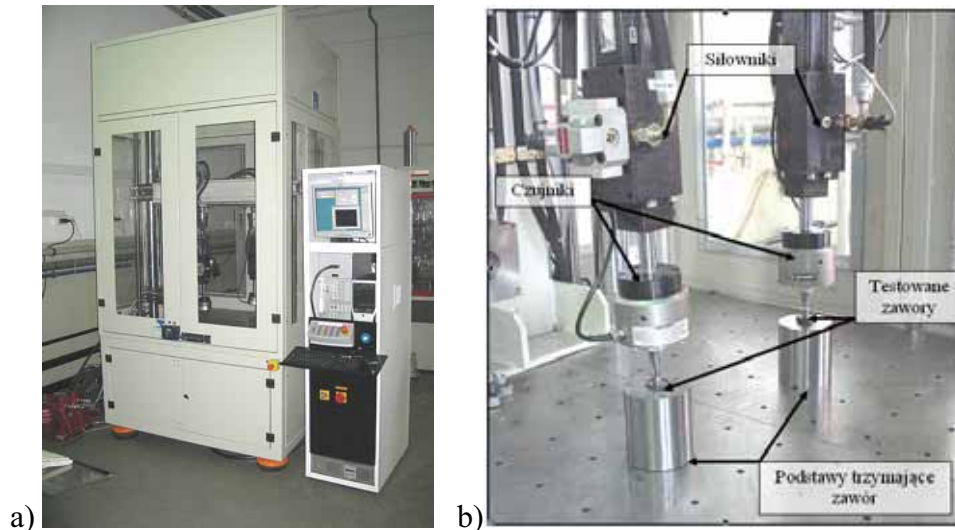
Zawory dyskowe umieszczone są w tłoczysku, które zamocowane jest na tłoku i otoczone obudową amortyzatora. Głównym ich celem, jest stawianie oporu dla przepływającego przez otwory w tłoczysku oleju. W zależności od typu samochodu i jego przeznaczenia stosuje się odpowiednie amortyzatory. Pod pojęciem „odpowiednie” rozumiana jest głównie siła tłumienia amortyzatora, a ta zależy od sztywności dysków. Stosuje się głównie dyski o grubości od 0.2 do 0.5 [mm].



Rys. 3. a) przykładowy kompletny zawór dyskowy, b) dyski amortyzatora

5. Stanowisko badawcze

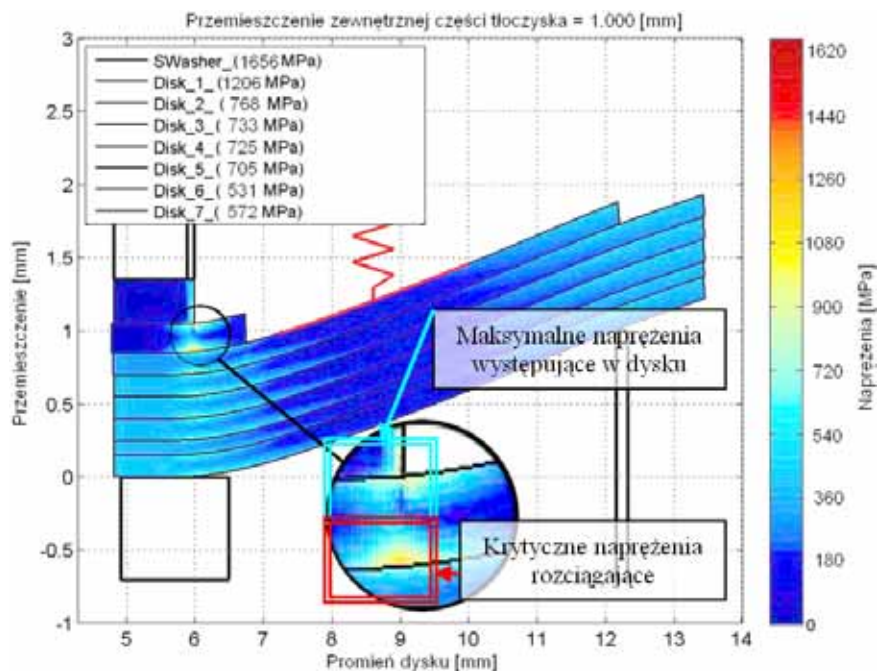
Badania zmęczeniowe zaworów dyskowych zostały przeprowadzone na stanowisku Mini-Pulse w firmie Tenneco Automotive Eastern Europe w Gliwicach. Stanowisko zawiera dwa siłowniki hydrauliczne PLF firmy Instron o maks. sile 7 [kN]. Zawory dyskowe testowane były przy wymuszeniu sygnałem harmonicznym (sinusoidalnym) o różnej amplitudzie siły i częstotliwości 50 [Hz].



Rys. 4. Widok: a) całego stanowiska badawczego, b) siłowników powodujących wymuszenia

6. Wyniki przeprowadzonych badań

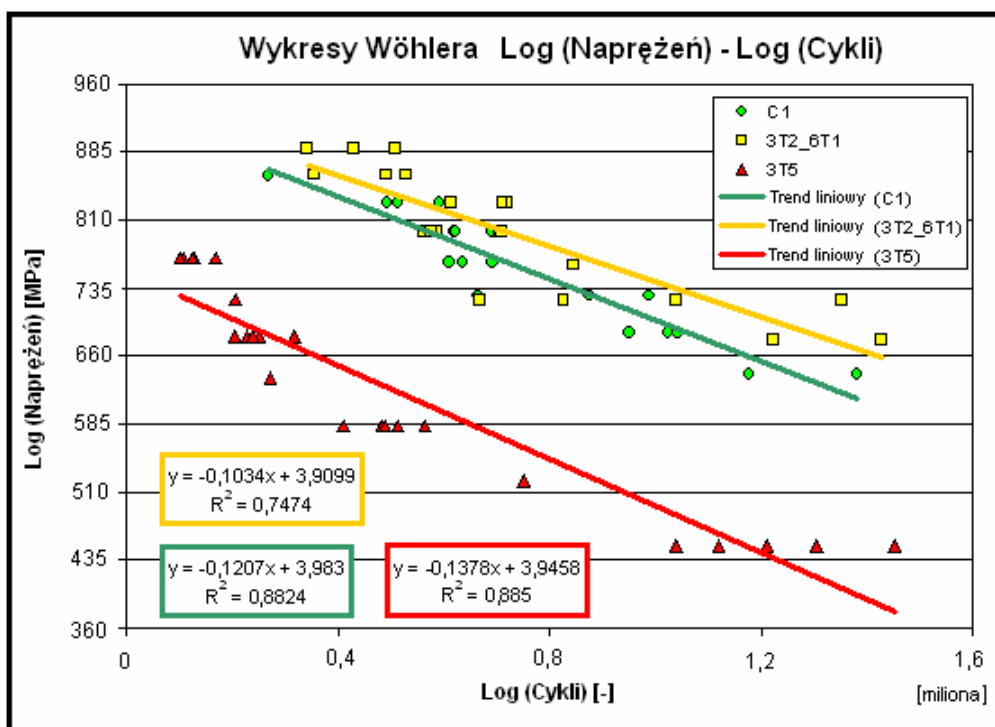
Badania na stanowisku Mini-Pulse pozwoliły otrzymać liczbę cykli, jaką zawór wytrzyma przy określonej sile wymuszającej. Następnie otrzymane wyniki trwałości należało skorelować z wynikami naprężeń obliczonymi numerycznie w systemie Abaqus (Rys. 5.).



Rys. 5. Obliczenia naprężeń w dyskach przeprowadzone w systemie Abaqus



Rys. 6. Widok dysków zaworu (C1) amortyzatora po ukończonym teście „czasu życia”



Rys. 7. Wykresy Wöhlera dla różnych zaworów dyskowych

7. Wnioski

1. Pomimo, że otrzymane maksymalne wartości naprężeń występują w miejscu ugięcia dysku, to krytyczne pod względem trwałościowym są naprężenia rozciągające (Rys. 6.).

2. Otrzymane wyniki potwierdzają, iż zastosowanie większej ilości cienkich dysków (zawory 3T2_6T1, oraz C1) zwiększa wytrzymałość zmęczeniową, w stosunku do mniejszej ilości dysków grubych (3T5).

3. Jak przedstawia (Rys. 7.) teoretycznie nieskończona trwałość zaworu 3T5 wystąpi poniżej wartości naprężeń 440 [MPa], zaworu C1 poniżej 640 [MPa], oraz zaworu 3T2_6T1 poniżej 675 [MPa].

Literatura

1. Sobczyk K., B.F. Spencer.: Stochastyczne modele zmęczenia materiałów. WNT, Warszawa (1996).
2. Tytko A.: Metoda wyznaczania trwałości zmęczeniowej lin stalowych na podstawie symulacji procesu zużycia zmęczeniowego. Mechanika 1998, T. 17, Zeszyt 4, s. 599 – 607.

OPRACOWANIE PROJEKTU DOTYCZĄCEGO UTWORZENIA SERWISU KOMPUTEROWEGO

TOMASZ ZWIERZYŃSKI, Zarządzanie i Inżynieria produkcji, ZC6, 5 rok
Opiekunowie naukowci: prof. dr hab. inż. Ewa Majchrzak,
dr inż. Alicja Piasecka-Belkhat

Streszczenie. W artykule przedstawiono projekt związany z realizacją przedsięwzięcia polegającego na utworzeniu sklepu-serwisu komputerowego. W tym celu opracowano sieć czynności, wyznaczono ścieżkę krytyczną, przedstawiono harmonogram optymalny oraz przeprowadzono analizę czasowo-kosztową planowanego przedsięwzięcia.



1. Wprowadzenie

Podjęcie działań związanych z realizacją dowolnego przedsięwzięcia powinno być poprzedzone właściwym jego zaplanowaniem. Taki plan można opracować stosując metody programowania sieciowego [1, 2, 3]. W tym celu należy utworzyć listę czynności wraz z czasami ich wykonania, wyznaczyć ścieżkę krytyczną, przedstawić harmonogram optymalny oraz przeprowadzić analizę czasowo-kosztową. W trakcie realizacji poprawnie zaplanowanego przedsięwzięcia łatwiej podejmuje się decyzje nawet wtedy, gdy pojawiają się wcześniej nieprzewidziane sytuacje, np. podwyżka cen materiałów albo wydłużenie czasu wykonania pewnych czynności. W artykule przedstawiono plan przedsięwzięcia polegającego na uruchomieniu serwisu komputerowego, który został opracowany zgodnie z zasadami programowania sieciowego.

2. Metoda ścieżki krytycznej

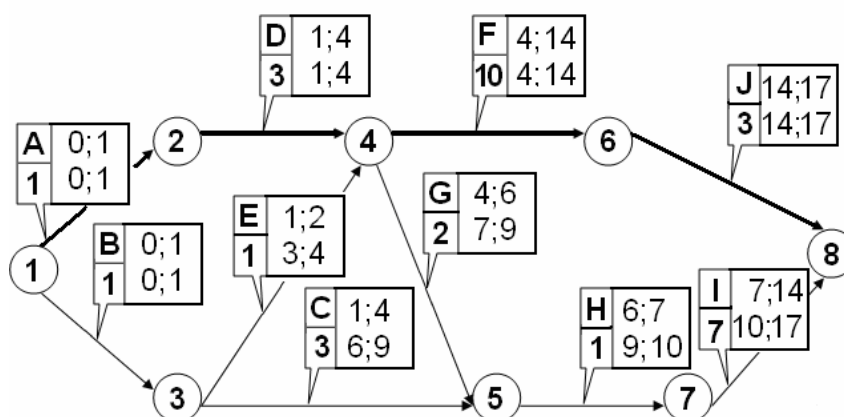
Planowanym przedsięwzięciem jest uruchomienie sklepu ze sprzętem komputerowym, w którym znajduje się punkt naprawy tego sprzętu. Przed wyborem lokalizacji należy dokonać szczegółowej analizy zapotrzebowania na tego typu usługi w miejscowościach lub dzielnicach miasta, które bierze się pod uwagę. Trzeba sprawdzić, czy w pobliżu nie występują sklepy oferujące podobne usługi, dokonać oceny, jaka jest potencjalna liczba zainteresowanych itd. Jeśli nie dysponujemy odpowiednią gotówką, należy rozważyć możliwości i oszacować koszty zaciągnięcia kredytu lub pożyczki. Trzeba również podjąć działania administracyjne związane np. z założeniem działalności gospodarczej, wynajmem lokalu, a następnie zaplanować remont pomieszczenia i dokonać zakupu wyposażenia. Potrzebne są również umowy z dostawcami sprzętu komputerowego oraz części do napraw, zatrudnienie personelu i reklama w mediach. Należy również oszacować czas trwania każdej czynności.

Im bardziej szczegółową listę czynności uda nam się opracować, tym mniej będziemy narażeni na nieprzewidziane sytuacje, które mogą pojawić się w trakcie realizacji przedsięwzięcia. W tabeli 1 przedstawiono listę zaproponowanych czynności związanych z uruchomieniem sklepu-serwisu komputerowego, kolejność, w jakiej muszą być wykonane oraz czasy ich wykonania (w dniach).

Tabela 1. Czynności wchodzące w skład projektu

Czynność	Opis czynności	Czynność bezpośrednio poprzedzająca	Czas trwania
A	Napisanie biznesplanu	-	1
B	Załatwienie formalności kredytowych	-	1
C	Wybór lokalizacji sklepu/serwisu komputerowego	B	3
D	Założenie działalności gospodarczej	A	3
E	Wynajem lokalu	B	1
F	Remont i dostosowanie pomieszczeń do działalności gospodarczej	D, E	10
G	Wyposażenie sklepu/serwisu w urządzenia potrzebne do pracy	D, E	2
H	Wybór hurtowni (dostawców)	G, C	1
I	Reklama w Internecie, prasie, ulotkach	H	7
J	Dobór kadry pracowniczej	F	3

W celu poprawnego oraz efektywnego zaplanowania realizacji projektu można wykorzystać metody programowania sieciowego [1, 2, 3, 4, 5]. W pierwszej kolejności należy zdefiniować zależności czasowe pomiędzy poszczególnymi czynnościami i na tej podstawie opracować sieć czynności. Następnie, stosując np. metodę ścieżki krytycznej określa się najkrótszy czas realizacji przedsięwzięcia. W etapie pierwszym, nazywanym *krokiem do przodu* wyznacza się najwcześniejsze czasy rozpoczęcia i zakończenia poszczególnych czynności, a w etapie drugim, nazywanym *krokiem do tyłu*, określa się najpóźniejsze czasy rozpoczęcia i zakończenia poszczególnych czynności. Na tej podstawie, dla każdej czynności oblicza się *rezervę czasową*. Odpowiednie wzory można znaleźć w literaturze, np. [1, 4, 5]. Na rysunku 1 pokazano sieć czynności z obliczonymi czasami i zaznaczoną ścieżką krytyczną. Z przeprowadzonej analizy wynika, że czas realizacji przedsięwzięcia wynosi 17 dni. Czynności krytyczne to czynności A (napisanie biznesplanu), D (założenie działalności gospodarczej), F (remont i adaptacja pomieszczeń) oraz J (dobór kadry pracowniczej). Opóźnienie wykonania którejkolwiek z nich spowoduje wydłużenie realizacji całego przedsięwzięcia.

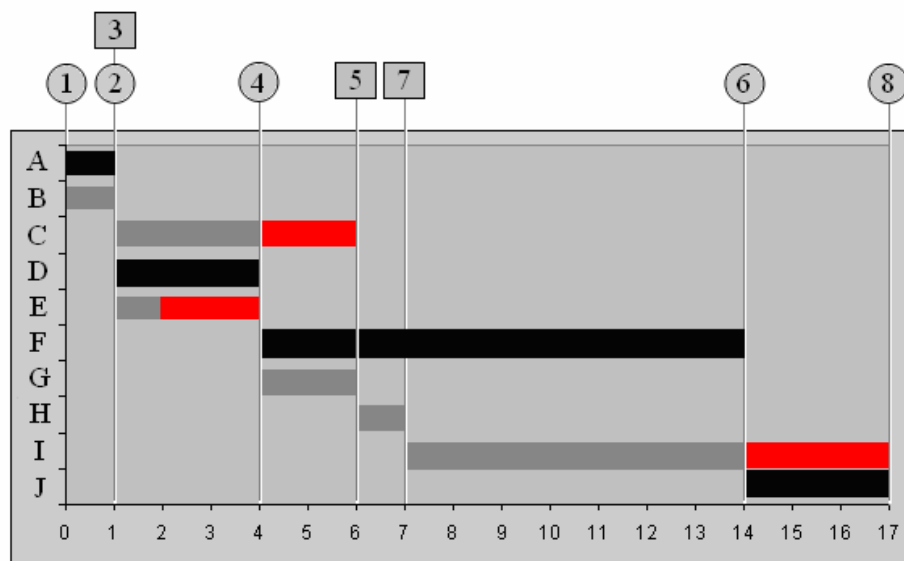


Rys. 1. Sieć czynności i ścieżka krytyczna

3. Harmonogram optymalny

Do konstruowania wykresów Gantta [4, 5] (harmonogramów optymalnych) bardzo przydatne są wyznaczone w metodzie ścieżki krytycznej najwcześniejsze i najpóźniejsze czasy realizacji poszczególnych czynności oraz rezerwy czasowe. Na rysunku 2 pokazano harmonogram optymalny dla omawianego przedsięwzięcia zbudowany dla czasów wyznaczonych w „kroku do przodu” metody ścieżki krytycznej.

Za pomocą takiego harmonogramu można zbadać, jak rozpoczęcie czynności w danym czasie wpłynie na rozpoczęcie innych czynności oraz czy możliwe jest wykorzystanie rezerw czasowych. Jak wynika z obliczeń, mimo że czynności G i H mają rezerwy czasowe (każda równą 3), to ich wykorzystanie nie jest możliwe, a dla czynności C można wykorzystać tylko część rezerwy (rezerwa wynosi 5).



Rys. 2. Wykres Gantta

4. Analiza czasowo-kosztowa

Często konieczne jest skrócenie czasu realizacji przedsięwzięcia. Należy wtedy uwzględnić konieczność poniesienia dodatkowych kosztów. Dzięki analizie czasowo-kosztowej [2, 4, 5] możemy określić zarówno możliwości jak i koszty szybszego zakończenia realizacji projektu. W tym celu trzeba sformułować i rozwiązać odpowiednie zadania programowania liniowego [1, 2, 3, 4, 5].

Założmy, że czas realizacji przedsięwzięcia chcemy skrócić do 14 dni (analiza kosztowa). Jest to możliwe tylko dzięki przyspieszeniu wykonania pewnych czynności. Musimy znać czasy przyspieszone oraz koszty przyspieszone i na tej podstawie dla każdej czynności obliczyć maksymalne przyspieszenie oraz jego koszt jednostkowy. W analizowanym przedsięwzięciu, dla czynności C wyznaczono maksymalne przyspieszenie równe 1 dzień i koszt jednostkowy tego przyspieszenia równy 100 zł, dla czynności F maksymalne przyspieszenie: 2 dni i koszt: 5500 zł, dla G: 1 dzień i 6000 zł, dla I: 2 dni i 625 zł oraz dla czynności J: 1 dzień i 850 zł. Założono, że pozostałych czynności nie da się przyspieszyć.

Model matematyczny zadania programowania liniowego składa się z funkcji celu, która określa łącznie koszty przyspieszenia i której wartość należy zminimalizować:

$$Z = 100y_C + 5500y_F + 6000y_G + 625y_I + 850y_J \rightarrow \text{MIN} \quad (1)$$

ograniczeń związanych ze zdarzeniami, ograniczenia dotyczącego czasu zakończenia projektu

$$\begin{aligned} x_1 = 0, & & x_2 \geq x_1 + 1, & & x_3 \geq x_1 + 1, & & x_4 \geq x_2 + 3, \\ x_4 \geq x_3 + 1, & & x_5 \geq x_3 + 3 - y_C, & & x_5 \geq x_4 + 2 - y_G, & & x_6 \geq x_4 + 10 - y_F, \\ x_7 \geq x_5 + 1, & & x_8 \geq x_6 + 3 - y_J, & & x_8 \geq x_7 + 7 - y_I, & & x_8 \leq 14 \end{aligned} \quad (2)$$

oraz ograniczeń dotyczących możliwości przyspieszenia czynności:

$$0 \leq y_C \leq 1, \quad 0 \leq y_F \leq 2, \quad 0 \leq y_G \leq 1, \quad 0 \leq y_I \leq 2, \quad 0 \leq y_J \leq 1 \quad (3)$$

Zadanie rozwiązano za pomocą metody simpleks, stosując program narzędziowy EXCEL (dodatek SOLVER). Z uzyskanego rozwiązania wynika, że jeżeli wykonanie czynności F przyspieszymy o 2 dni, a czynności J o 1 dzień, to możliwe jest zrealizowanie przedsięwzięcia w ciągu 14 dni. Koszty tego przyspieszenia wyniosą 11850 zł.

Podobne zadanie rozwiązuje się w przypadku analizy czasowej. W tym przypadku należy określić minimalny czas realizacji projektu

$$Z = x_8 \rightarrow \text{MIN} \quad (4)$$

przy znanych kosztach (8000 zł) związanych z przyspieszeniem czynności, których nie wolno przekroczyć:

$$100y_C + 5500y_F + 6000y_G + 625y_I + 850y_J \leq 8000 \quad (5)$$

i niezmiennych ograniczeniach (2) (bez ostatniego) oraz (3). Z rozwiązania tego zadania wynika, że jeżeli wykonanie czynności F przyspieszymy o 1,3 dnia oraz czynności J o 1 dzień, to realizację przedsięwzięcia uda się zakończyć w ciągu 14,7 dnia.

5. Podsumowanie

Metody programowania liniowego są skutecznym narzędziem wykorzystywanym do optymalnego zaplanowania realizacji przedsięwzięcia. Analiza czasowo-kosztowa pozwala na ocenę możliwości i kosztów skrócenia czasu realizacji projektu.

Literatura

1. Kochanowicz J., „Badania operacyjne : metody i przykłady”, Warszawa : Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1977.
2. Borucki W., Ignasiak E., „Badania operacyjne”, Warszawa : Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, 2001.
3. Wagner M., Kanton M., Kąciak E., „Badania operacyjne : zastosowania w zarządzaniu”, Warszawa : Państwowe Wydaw. Ekonomiczne, 1980.
4. Siudak M., „Badania operacyjne”, Warszawa : Oficyna Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 1997.
5. Pod red. E.Majchrzak, „Badania operacyjne. Teoria i zastosowania”, Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2007.

ZAGADNIENIE TRANSPORTOWE – OPRACOWANIE OPROGRAMOWANIA

KAMIL ŻABICKI

Zarządzanie i Inżynieria Produkcji, ZC6, 5 rok.

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

dr inż. Marek Jasiński



Streszczenie. W artykule omówiono zagadnienie transportowe i zadania pokrewne, które należą do tzw. problemów optymalizacji liniowej i które można rozwiązywać za pomocą metody simpleks. Przedstawiono autorski program komputerowy rozwiązujący zagadnienie transportowe i zilustrowano sposób jego działania na przykładzie zadania minimalizacji pustych przebiegów.

1. Wprowadzenie

Klasyczne zagadnienie transportowe polega na wyznaczeniu takiego planu przewozów między dostawcami i odbiorcami pewnego jednorodnego produktu, dla którego łączne koszty transportu są minimalne [1]. Istnieje również wiele innych problemów, które można sprowadzić do zagadnienia transportowego. W zagadnieniu transportowo-produkcyjnym, w którym dodatkowo uwzględnia się zdolności produkcyjne zakładów (dostawców) należy określić, które z zakładów mają podjąć produkcję i utworzyć taki plan jej przewozu, aby łączne koszty produkcji i transportu były minimalne. W zagadnieniu lokalizacji produkcji zakłada się, że dla zaspokojenia zapotrzebowania odbiorców trzeba uruchomić nowe zakłady i wyznaczyć ich lokalizację. Zagadnienie minimalizacji pustych przebiegów polega na określeniu optymalnego krążenia środków transportu rozwożących towar między ustalonymi miejscowościami. Wszystkie tego typu zadania należą do problemów optymalizacji liniowej i można je rozwiązywać między innymi za pomocą metody simpleks.

W artykule przedstawiono model matematyczny zagadnienia transportowego, metodę rozwiązania oraz autorski program komputerowy, którego działanie zilustrowano na przykładzie zadania minimalizacji pustych przebiegów.

2. Sformułowanie zadania i metoda rozwiązania

W klasycznym zagadnieniu transportowym [2] rozpatruje się m dostawców D_1, D_2, \dots, D_m i n odbiorców O_1, O_2, \dots, O_n tego samego produktu. Niech a_i określa podaż i -tego dostawcy, czyli liczbę sztuk produktu, jaką dysponuje i -ty dostawca, przy czym $i = 1, 2, \dots, m$, a b_j popyt j -tego odbiorcy, czyli liczbę sztuk produktu, jaką chce otrzymać j -ty odbiorca, przy czym $j = 1, 2, \dots, n$. Zakłada się, że znane są jednostkowe koszty transportu c_{ij} , $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$, to znaczy koszty transportu jednostki produktu od i -tego dostawcy do j -tego odbiorcy. W zadaniu zbilansowanym całkowita podaż jest równa całkowitemu popytowi

$$\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j \quad (1)$$

Należy wyznaczyć taki plan przewozów, który zapewnia każdemu odbiorcy otrzymanie żądanej ilości produktu i dla którego łączny koszt transportu jest minimalny.

Jeżeli przez x_{ij} oznaczymy liczbę sztuk produktu przewiezioną od i -tego dostawcy do j -tego odbiorcy, to model matematyczny zagadnienia transportowego składa się z funkcji celu

$$\text{FC: } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \text{MIN} \quad (2)$$

ograniczeń

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

i warunków brzegowych

$$x_{ij} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

Model ten można również przedstawić w postaci

FC:	$Z = c_{11}x_{11} + c_{12}x_{12} + \dots + c_{mn}x_{mn} \rightarrow \text{MIN}$	
O:	$x_{11} + x_{12} + \dots + x_{1n}$	$= a_1$
	$x_{21} + x_{22} + \dots + x_{2n}$	$= a_2$
	
	$x_{m1} + x_{m2} + \dots + x_{mn}$	$= a_m$
	$x_{11} \qquad \qquad +x_{21} + \dots \qquad \qquad +x_{m1}$	$= b_1$
	$x_{12} \qquad \qquad +x_{22} + \dots \qquad \qquad +x_{m2}$	$= b_2$
	
	$x_{1n} \qquad \qquad +x_{2n} + \dots \qquad \qquad +x_{mn}$	$= b_n$
WB:	$x_{ij} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$	

Zagadnienie transportowe jest szczególnym przypadkiem problemu optymalizacji liniowej, można je więc rozwiązywać za pomocą metody simpleks. Należy w tym miejscu podkreślić, że ze względu na szczególną postać ograniczeń występujących w zagadnieniu transportowym, opracowano kilka innych metod rozwiązywania tego zadania, które nie będą tutaj prezentowane.

W układzie równań (6) tworzącym ograniczenia, jedno z równań jest zależne od pozostałych, to oznacza, że można je skreślić (np. ostatnie). Mamy więc układ $m+n-1$ równań z mn niewiadomymi. Pierwszy etap metody simpleks polega na wyznaczeniu dowolnego dopuszczalnego rozwiązania bazowego. Należy utworzyć bazę złożoną z m liniowo

niezależnych kolumn macierzy głównej układu ograniczeń, wyróżnić w niej m zmiennych bazowych (odpowiadają one odpowiednim kolumnom macierzy głównej), a pozostałe zmienne to zmienne niebazowe. Następnie należy sprawdzić, dysponując kryterium optymalności, czy rozwiązanie jest optymalne. Jeśli nie, to przechodzi się do sąsiedniej bazy, czyli takiej, która różni się tylko jedną zmienną bazową i w której rozwiązanie daje mniejszą wartość funkcji celu. Reguły określające zmienną wychodzącą z bazy oraz zmienną wprowadzaną do nowej bazy są ściśle określone. Szczegóły algorytmu można znaleźć w literaturze, np. [1, 2].

3. Program komputerowy

Program komputerowy rozwiązujący zagadnienie transportowe opracowano w środowisku Borland C++ Builder. Zawiera on wiele procedur wspomagających obliczenia, między innymi algorytm rozwiązywania układów równań liniowych, algorytm przekształcania macierzy warunków ograniczających do postaci bazowej względem nowej bazy. Rolę użytkownika ograniczono do wprowadzenia danych. Wynikiem działania programu jest uzyskanie rozwiązania optymalnego, czyli takiego planu przewozów od dostawców do odbiorców, dla którego łączne koszty transportu są minimalne.

Opracowany program komputerowy wykorzystano między innymi do rozwiązania następującego zadania .

Klienci wypożyczalni żaglówek ŻAGIEL mogą wypożyczać i oddawać żagłówki w dowolnej z sześciu przystani $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$ znajdujących się nad jeziorem [3]. Na początku dnia, w każdej z przystani powinna znajdować się taka liczba żaglówek, która odpowiada przeciętnemu dziennemu zapotrzebowaniu. Dane dotyczące przeciętnych wielkości wypożyczeń i zwrotów oraz odległości między przystaniami (w kilometrach) podaje tabela 1. Należy ustalić taki plan transportu żaglówek, aby zminimalizować puste przebiegi.

Tabela 1. Wypożyczalnia żaglówek

Odległości	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	Liczba wypożyczeń
P_1	0	1	4	3	4	5	10
P_2		0	5	2	6	2	4
P_3			0	4	2	1	7
P_4				0	3	4	12
P_5					0	3	10
P_6						0	7
Liczba zwrotów	2	13	8	4	16	7	

Rozwiązanie tego przykładu rozpoczyna się od podziału rozważanych sześciu przystani na dostawców i odbiorców żaglówek. W tym celu oblicza się różnice między wielkościami zwrotów i wypożyczeń. Dostawcami będą te przystanie, dla których różnica pomiędzy liczbą zwrotów i wypożyczeń będzie większa od zera, zaś odbiorcami przystanie, dla których ta różnica jest mniejsza od zera. Przystań, dla której różnica pomiędzy liczbą zwrotów i wypożyczeń jest równa zero eliminuje się z dalszych rozważań, ponieważ nie pojawia się w tym przypadku problem decyzyjny. Obliczamy odpowiednie różnice: $P_1: 2 - 10 = -8$; $P_2: 13 - 4 = 9$; $P_3: 8 - 7 = 1$; $P_4: 4 - 12 = -8$; $P_5: 16 - 10 = 6$ oraz $P_6: 7 - 7 = 0$.

Jak widać, przystanie P_2, P_3, P_5 są dostawcami, ponieważ występuje tam nadwyżka, a przystanie P_1, P_4 są odbiorcami, ponieważ pojawia się w nich niedobór żaglówek.

Odpowiednikami elementów macierzy kosztów są odległości pomiędzy poszczególnymi przystaniami. Łączna podaż wynosi $9+1+6=16$, łączny popyt jest równy $8+8=16$. Otrzymuje się zatem zamknięte zagadnienie transportowe z trzema dostawcami i dwoma odbiorcami.

Dane występujące w zadaniu wprowadzono do programu komputerowego (rys. 1) i otrzymano następujące rozwiązanie. Wypożyczalnia ŻAGIEL powinna przesłać z punktu P_2 siedem żaglówek do punktu P_1 i dwie żaglówki do punktu P_4 oraz jedną żaglówkę z punktu P_3 do punktu P_1 i sześć żaglówek z punktu P_5 do punktu P_4 . Łączna odległość pokonywana przez żaglówki wyniesie wówczas 85 km.

The screenshot shows a software window titled "Zagadnienie transportowe" with the following elements:

- Input fields: "Liczba dostawców (max. 20): 3" and "Liczba odbiorców (max. 20): 2".
- Buttons: "OK", "Rozwiąż !", and "Nowe zadanie".
- Section: "Macierz kosztów jednostkowych:" with a table:

	1	2
1	6	8
2	3	7
3	9	4
- Section: "Podaż" with a table:

	Podaż
1	9
2	1
3	6
- Section: "Popyt" with a table:

	1	2
Popyt	8	8

Rys. 1. Wprowadzanie danych

4. Podsumowanie

Prezentowany program komputerowy można stosować do rozwiązywania zagadnień transportowych praktycznie dla dowolnej liczby dostawców i odbiorców. Użytkownik programu rozwiązywane zadanie musi samodzielnie sprowadzić do klasycznego zagadnienia transportowego, a następnie po wprowadzeniu danych otrzymuje wyniki dotyczące wartości zmiennych decyzyjnych (optymalny plan przewozu) oraz wartość minimalnych łącznych kosztów transportu.

Literatura

1. Tadeusz Trzaskalik, Wprowadzenie do badań operacyjnych z komputerem, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa (2003).
2. Praca zbiorowa pod redakcją Ewy Majchrzak, Badania operacyjne. Teoria i zastosowania, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice (2007).
3. Praca zbiorowa pod redakcją Donaty Kopańskiej-Bródki, Metody badań operacyjnych w zadaniach. Problemy liniowe, Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej, Katowice (2006).