

Instytut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Politechnika Śląska

Studencka Konferencja Naukowa
„METODY KOMPUTEROWE – 2019”

Gliwice, maj 2019 r.

Instytut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej

Wydział Mechaniczny Technologiczny

Politechnika Śląska

44-100 Gliwice, ul. Konarskiego 18A

tel.: 32 237 12 04, fax: 32 237 12 82

Komitet Naukowy:

Prof. dr hab. inż. Ewa Majchrzak

Prof. dr hab. inż. Antoni John

Prof. dr hab. inż. Piotr Fedeliński

Dr hab. inż. Grzegorz Kokot, Prof. PŚ

Dr hab. inż. Waclaw Kuś, Prof. PŚ

Dr hab. inż. Alicja Piasecka-Belkhat, Prof. PŚ

Dr hab. inż. Witold Beluch, Prof. PŚ

Dr hab. inż. Adam Długosz, Prof. PŚ

Dr hab. inż. Grzegorz Działkiewicz, Prof. PŚ

Dr hab. inż. Marek Jasiński, Prof. PŚ

Dr hab. inż. Jerzy Mendakiewicz, Prof. PŚ

Dr hab. inż. Arkadiusz Poteralski, Prof. PŚ

Dr hab. inż. Mirosław Szczepanik, Prof. PŚ

Dr hab. inż. Marek Paruch

Komitet Organizacyjny:

Prof. dr hab. inż. Piotr Fedeliński

Dr hab. inż. Adam Długosz, Prof. PŚ

Dr hab. inż. Grzegorz Działkiewicz, Prof. PŚ

Dr inż. Waldemar Mucha

Dr inż. Witold Ogierman

Dr inż. Jacek Ptaszny

Mgr inż. Mateusz Holek

Mgr inż. Natalia Molęda

Mgr inż. Olaf Popczyk

Mgr inż. Tomasz Schlieter

Inż. Jakub Lisicki

Inż. Piotr Lubszczyk

Inż. Michał Skolarczyk

Komitet Redakcyjny:

Dr hab. inż. Grzegorz Działkiewicz, prof. PŚ

Dr inż. Jacek Ptaszny

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

Rysunek na okładce wykonał inż. Paweł Witek, autor artykułu na stronie 65.

ISBN 978-83-951185-0-0

Artykuły opublikowano na podstawie oryginałów dostarczonych przez Autorów.

Druk i oprawę wykonano w Wydawnictwie Politechniki Śląskiej.

Nakład 100 egz. Druk ukończono w maju 2019 r.

Wstęp

Zeszyt naukowy zawiera 18 artykułów prezentowanych na trzynastej Studenckiej Konferencji Naukowej „Metody Komputerowe”, odbywającej się 30 maja 2019 roku na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Konferencję zorganizowali studenci i pracownicy Instytutu Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej Politechniki Śląskiej. Publikacje dotyczą zastosowania metod komputerowych w różnych dziedzinach techniki, takich jak:

- wspomaganie komputerowe prac inżynierskich,
- wytrzymałość materiałów,
- biomechanika,
- termodynamika,
- automatyka,
- informatyka,
- badania doświadczalne.

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.

Szczególne podziękowania za współpracę ze Studenckim Kołem Naukowym „Metod Komputerowych” oraz wsparcie finansowe organizacji konferencji składam przedstawicielom firmy IBS Poland Sp. z o. o.

Duża liczba zgłoszonych artykułów świadczy o znacznej aktywności naukowej studentów i potrzebie organizacji tego rodzaju konferencji. Życzę studentom owocnych dyskusji w czasie konferencji. Mam nadzieję, że udział w niej będzie inspiracją do dalszych badań naukowych.

Opiekun Naukowy Studenckiego Koła Naukowego
„Metod Komputerowych”

Prof. dr hab. inż. Piotr Fedeliński

Gliwice, maj 2019 r.

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

Zarząd Koła w roku akademickim 2018/2019:

Przewodniczący: inż. Jakub Lisicki, Mechanika i Budowa Maszyn

Wiceprzewodniczący: inż. Piotr Lubszczyk, Mechanika i Budowa Maszyn

Sekretarz: inż. Michał Skolarczyk, Mechatronika

Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Piotr Fedeliński

Opiekunowie ds. organizacji: dr hab. inż. Grzegorz Działkiewicz, prof. PŚ,

dr inż. Jacek Ptaszny

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

Zakres merytoryczny działania Koła:

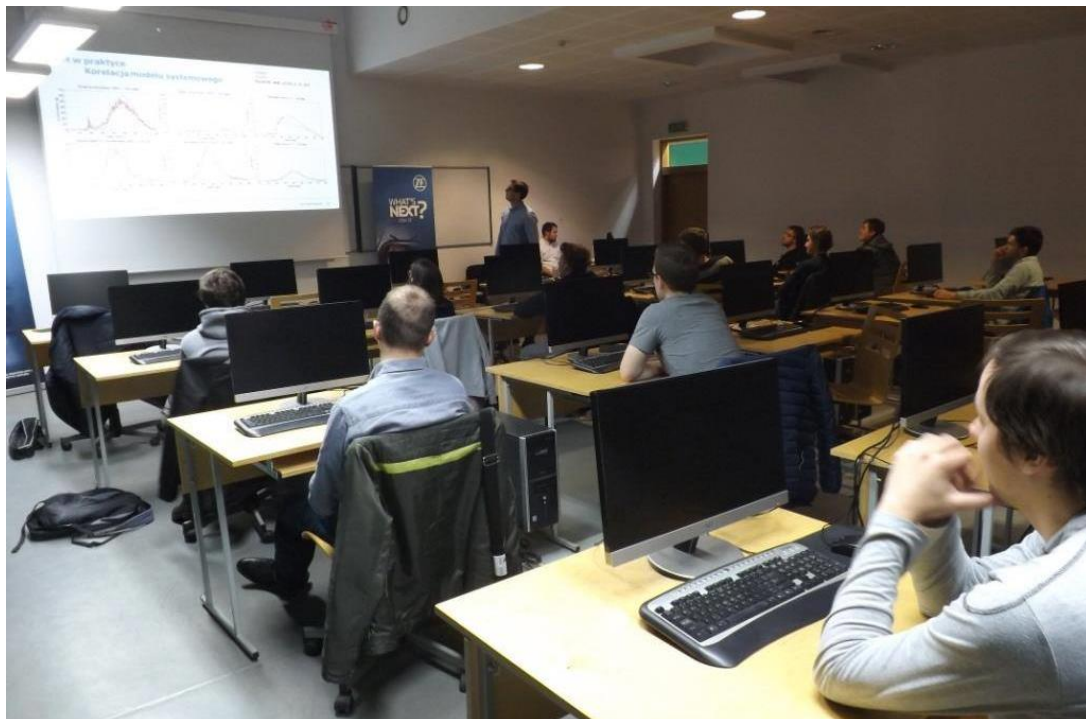
- poznanie nowych metod komputerowych i technik informatycznych, ze szczególnym uwzględnieniem zastosowań w dziedzinie mechaniki,
- zapoznanie się ze sprzętem i programami komputerowymi oraz ich obsługą,
- pogłębienie wiedzy z zakresu mechaniki układów odkształcalnych, termomechaniki, biomechaniki, analizy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

Formy działalności Koła:

- udostępnianie członkom Koła sprzętu oraz programów komputerowych znajdujących się w Laboratorium Metod Komputerowych Instytutu Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej (IMiIO),
- 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 IMiIO nad pracami własnymi członków Koła,
- referaty pracowników naukowych IMiIO oraz zaproszonych gości na zebraniach naukowych Koła,
- organizowanie kursów obsługi programów wspomagających prace inżynierskie oraz kursów programowania,
- organizowanie konkursów,
- uczestniczenie w wystawach i prezentacjach sprzętu i programów komputerowych,
- zapoznanie się z pracą biur projektowo-konstrukcyjnych, instytutów, szkół wyższych stosujących metody mechaniki komputerowej, przez organizowanie wycieczek,
- współpraca naukowa z innymi studenckimi kołami naukowymi.



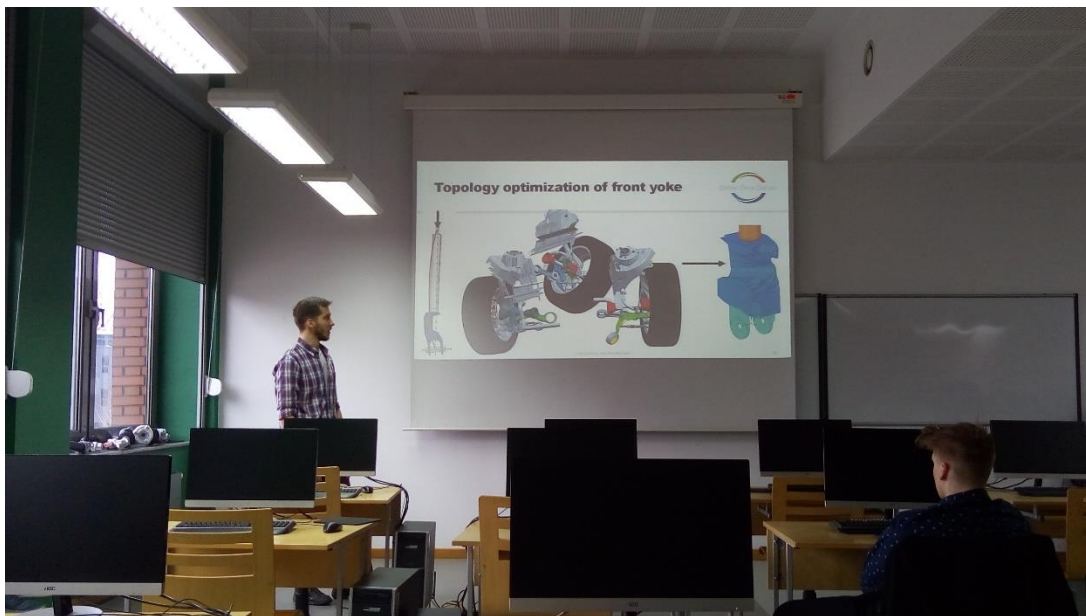
Studencka Konferencja Naukowa „Metody Komputerowe – 2018” – Gliwice, 24.05.2018 r.



Wykład pracowników ZF Group (TRW Polska Sp. z o. o.) – Gliwice, 10.12.2018 r.



Wykład pracownika FFT Produktionssysteme Polska Sp. z o. o. – Gliwice, 7.01.2019 r.



Wykład pracowników DRiV (Tenneco Automotive Eastern Europe Sp. z o. o.)
– Gliwice, 25.03.2019 r.

Transform ideas into reality

10 LAT NA RYNKU

Jedyny Platynowy Partner Dassault Systemes w Polsce

DORADZTWO I OPTYMALIZACJA

w obszarze Zarządzania Cyklem Życia Produktu

WDROŻENIA

3DExperience / CAD / CAM / CAE / PLM

SZKOLENIA I WSPARCIE

w pracach projektowo-konstrukcyjnych



VALUE SOLUTIONS
PLATINUM
PARTNER

DS DASSAULT
SYSTEMES

Spis treści

BAGSIK DARIUSZ KRZYSZTOF

Projekt bramy wjazdowej wraz z analizą wytrzymałościową 1

CIOMPERLIK NIKODEM, PAJĄK KAMILA, SZEWCZYK MAGDALENA, ALEGAZE MIKIR LAKEW

Modelling and simulation of an axisymmetric docking port for 1U nanosatellites 5

CISZYŃSKA BARBARA

Analiza wytrzymałościowa karabinka wspinaczkowego 9

DUDAJEK ADRIAN

Dobór nastaw regulatora PID układu napędowego wielowirnikowca trójfazowego 13

DYMNICKI JULIUSZ

Analiza numeryczna porowatego materiału hipersprężystego 17

DYRAGA ŁUKASZ

Analiza strat ciepła przy przepływie gorącej cieczy przez rurociąg 21

FRANCUZ MARTYNA

Zastosowanie cyfrowej korelacji obrazu jako narzędzia weryfikacji wyników obliczeń numerycznych MES 25

KITA MATEUSZ

Obciążenie cięgien 29

KONIECZNY KAROL

Projekt bramy garażowej sterowanej zdalnie z analizą wytrzymałościową 33

KOTAS KRZYSZTOF

Wpływ temperatury i szybkości drukowania na wytrzymałość materiału PET-G po procesie wydruku przestrzennego 37

LISICKI JAKUB

Modelowanie procesu laserowej obróbki powierzchni 41

OŚWIĘCIMSKI PIOTR

Analiza MES kompozytów wzmacnianych włóknami 45

PODGÓRSKI JAKUB

Komputery kwantowe – przyszłość symulacji numerycznych? 49

RYCHLIKA KLAUDIA

Zastosowanie MES w zagadnieniach przepływu ciepła w tkance biologicznej 53

SKORUPA ANNA

Modelowanie procesu uszkodzenia termicznego tkanki pod wpływem zewnętrznego impulsu cieplnego 57

STRYCZYŃSKI MIKOŁAJ

Sprzężona analiza tętnicy mózgowej ze zmianami miażdżycowymi 61

WITEK PAWEŁ

Metoda generowania struktur siatkowych z użyciem oprogramowania MES 65

ZAGRAJEWSKA KAROLINA

Computational aided decision-making for portfolio optimization 69

PROJEKT BRAMY WJAZDOWEJ WRAZ Z ANALIZĄ WYTRZYMAŁOŚCIOWĄ

inż. DARIUSZ KRZYSZTOF BAGSIK

Automatyka i Robotyka, semestr VII, 1 stopień

Opiekun naukowy: dr inż. Anna Korczak

Streszczenie. W projekcie przedstawiono szereg elementów, które składają się na wykonanie zestawu bramy wjazdowej wraz z automatyką. Wybór zakresu pracy i materiału bramy. Wykonane zostały projekty konstrukcyjne bram, optymalizacja wariantowa siłownika bramy skrzydłowej oraz analiza MES uchwytu siłownika do słupka ogrodzeniowego.



DESIGN OF A REMOTELY CONTROLLED ENTRANCE GATE WITH STRENGTH ANALYSIS

Abstract. The project presents a number of elements that make up the entry gate set together with automation and also is shown choice of work range and gate material. In the project designs of gates were made, variant optimization of the swing gate operator and MES analysis of the actuator holder for the fence post.

1. Wprowadzenie

Celem projektu było wykonanie 3 różnych rozwiązań konstrukcyjnych bramy wjazdowej wraz z optymalizacją wariantową i analizą wytrzymałościową jednego z elementów składowych całego zestawu. Należało dokonać wyboru jaki rodzaj bramy będzie brany pod uwagę przy projektowaniu. Następnie dokonano rozeznania w szerokiej gamie dodatkowych części w celu złożenia całego zestawu. Kolejnym krokiem była analiza bramy pod kątem jakości i doboru materiału [1], wykonania, wagi i wytrzymałości. Do analizy wytrzymałościowej został zastosowany program MSC Nastan with Patran. Kolejnym etapem był dobór odpowiednich części dodatkowych i automatyki, by w efekcie pracy przedstawić gotowy zestaw bramy wjazdowej ze zdalnym sterowaniem.

2. Optymalizacja wariantowa

Do optymalizacji wariantowej został wybrany siłownik główny otwierania – zamykania bramy skrzydłowej. W tym celu do porównania zostaną wzięte trzy różne napędy trzech firm. Dobór siłownika do bramy jest ważnym elementem stawianym przed konstruktorem. Końcowy użytkownik automatyki często nie dysponuje pełnymi informacjami na temat bramy, którą chciałby zautomatyzować. Większość usterek w funkcjonowaniu automatyki nie wynika z wady produktu, a często jego błędnego montażu lub błędów popełnionych w trakcie doboru urządzeń do automatyzacji bramy. W analizie poniższe kryteria od K1 do K6 stanowią odniesienie, który z siłowników będzie optymalnym wariantem.

- K1 – długość skrzydła
- K2 – ciężar skrzydła
- K3 – maksymalny pobór mocy dla skrzydła
- K4 – prędkość otwierania
- K5 – wymiary montażowe (uchwyty do słupka)
- K6 – cena pełnego zestawu

Tabela 1 Optymalizacja wielokryterialna siłownika bramy
 Table 1. Multicriteria optimization of the gate operator

X	K1	K2	K3	K4	K5	K6	$\sum K_i$	W1	W2	W3	W _i
K1	X	0.5	0.0	0.0	0.5	0.5	1.5	3	2	1	3
K2	0.5	X	0.5	0.0	0.0	0.5	1.5	2	3	1	3
K3	1.0	0.5	X	0.5	1.0	0.0	3.0	2	3	1	3
K4	1.0	1.0	0.5	X	0.5	0.0	3.0	2	1	2	3
K5	0.5	1.0	0.0	0.5	X	0.5	2.5	3	1	2	3
K6	0.5	0.5	1.0	1.0	0.5	X	3.5	2	1	3	3

	W1	W2	W3	W _i
Ow	34	25.5	27.5	45
%	75.5	56.6	61.1	100

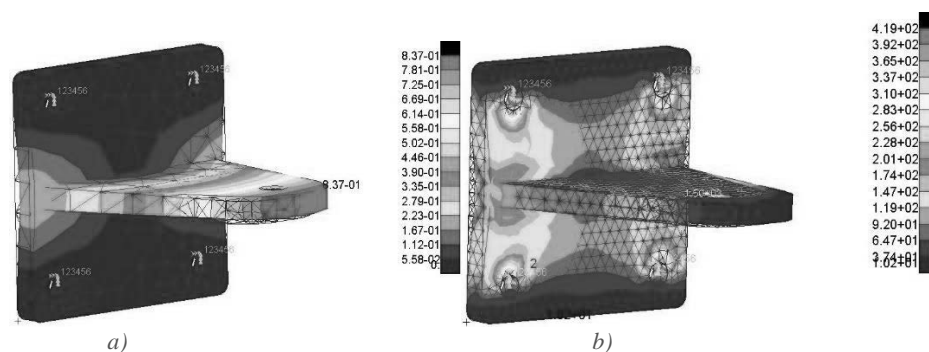
W tabeli zaprezentowano optymalizację wielokryterialną, dla trzech wariantów siłownika bramy skrzydłowej podlegających sześciu kryteriom. Według analizy okazało się, że najważniejszym kryterium jest cena zestawu. Najmniej znaczącymi kryteriami są z kolei kryterium pierwsze i drugie, czyli długość i ciężar skrzydła bramy. Pierwszy wariant spełnia założone kryteria w 75.5 [%], drugi w 56.6 [%], a trzeci w 61.1 [%]. Powyższe wskazówki powinny stać się standardem przebiegu prac związanych z wyborem odpowiedniego zestawu automatyki dla bramy skrzydłowej. Jednak należy pamiętać również o właściwym instalatorze, który fachowo zamontuje napęd zgodnie z wytycznymi producenta.

3. Analiza wytrzymałościowa uchwytu dla wybranego siłownika

Z przeprowadzonej powyżej optymalizacji wariantowej został wybrany napęd firmy SOMMER TWIST XL. W związku z czym zostały wykonane trzy warianty uchwytu do słupka dla tego napędu. Uchwyt te są elementem łączącym słupki ogrodzenia z siłownikiem automatyki bramy. Na element ten działa głównie siła rozciągająca i zginająca przy zamykaniu oraz otwieraniu bramy. Z informacji zawartych w kartach technicznych siłownika można odczytać, że siłownik działa z nominalną siłą 1500 [N]. Jednak nie jest to maksymalna siła ciągu i nacisku na skrzydło bramy. Maksymalna siła ta wynosi 4500 [N] i może pojawić się w ciężkich warunkach np. atmosferycznych jak przy silnym wietrze. Należy zatem sprawdzić jak będzie siła ta oddziaływać na uchwyt i który wariant będzie optymalny dla zastosowanego siłownika. Do analizy wytrzymałościowej zostanie zastosowany program MSC Nastran with Patran (wersja studencka). Jest to jeden z najszerzej stosowanych programów do analizy elementów skończonych (FEA). Obecnie większość profesjonalnych producentów z różnych dziedzin gospodarki używa tego rodzaju programów, które dają im w końcowej fazie dokumentacji certyfikaty dobrej jakości ich produktów. MSC Nastran jest wielodyscyplinarnym programem do analizy strukturalnej, wykorzystywanym do analizy statycznej, dynamicznej i termicznej w liniowych i nieliniowych układach.

Tabela 2. Zestawienie analizy wytrzymałościowej uchwytów
 Table 2. List of strength analysis of handles

Wariant	Największe przemieszczenia [mm]	Największe naprężenia [MPa]
I	2.37	3.71
II	1.96	2.27
III	0.837	2.19



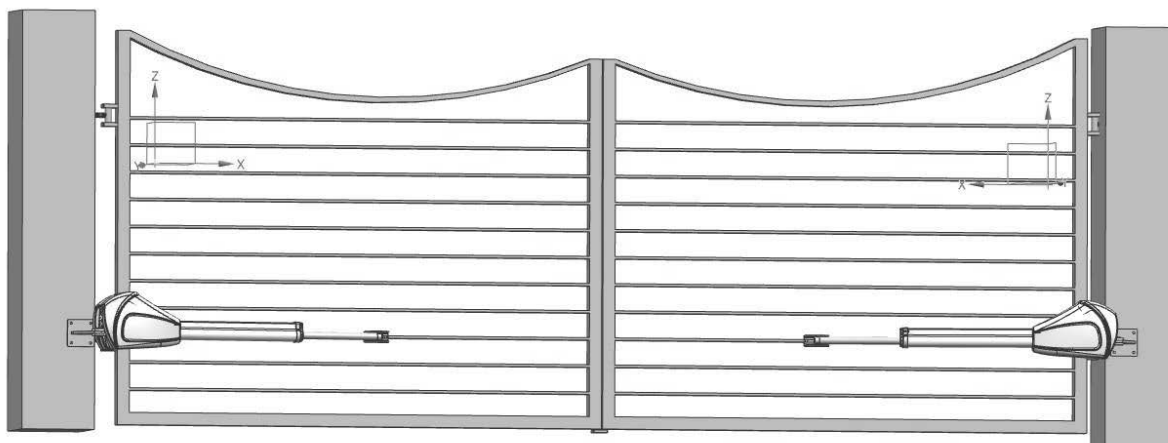
Rys. 1. Analiza MES uchwytu trzeciego a) naprężenia, b) odkształcenia
 Fig. 1. FEM analysis of the third holder a) stress, b) strain

Wyniki wszystkich trzech uchwytów są zadawalające a ich analiza jest podsumowana w tabeli 2 zarówno dla przemieszczeń jak i dla naprężeń. Naprężenia dopuszczalne stali konstrukcyjnej np. E295 wynoszą $k_r = 141.6$ [MPa]. Wskazuje to, że każdy z uchwytów przeszedł test poprawnie. Nie mniej jednak uchwyt trzeci posiada najmniejsze możliwe deformacje i nieznacznie góruje nad pozostałymi. Analiza MES jest coraz szerzej stosowanym narzędziem podczas projektowania wielu różnych elementów skracając cały proces zaprojektowania bez użycia czasochłonnych testów prototypów [2].

4. Projekt konstrukcyjny bram

Zaprojektowanie bramy wjazdowej jest dużym wyzwaniem dla projektanta. Trzeba posiadać odpowiednią wizję i sprostać wymaganiom stawianym przez kupujących. Projekty mogą być proste lub niezwykle skomplikowane. Im projekt będzie bardziej wymagający do wykonania tym cena i materiał spowodują, iż grono klientów będzie mniejsze. W tym projekcie mamy trzy warianty bram. Można powiedzieć, że każdy z nich posiada różny stopień skomplikowania i wykorzystania różnych rodzajów profili.

Pełny zestaw będzie zawierał szereg różnych elementów. Z trzech bram, które zostały w wcześniejszym etapie zaprojektowane zostanie wybrana brama druga. Ten rodzaj bramy posiada, oprócz walorów praktycznych, nowoczesny design. Jest to również dobry projekt pod względem małego zagęszczenia światła skrzydła bramy co umniejsza działaniom warunkom atmosferycznym. Do tego dołożony został siłownik SOMMER twist XL. Zostały również zaprojektowane z myślą o tym rodzaju bramy zawiasy, które wytrzymają taki rodzaj i ciężar skrzydła oraz rygiel blokujący.



Rys. 2. Projekt bramy z automatyką w 3D
 Fig. 2. Gate design with automation in 3D

5. Wnioski

Ogólne informacje potrzebne do zaprojektowania bram można zasięgnąć głównie z stron internetowych producentów bram i automatyki bram [3,4,5]. Pomoc w zaprojektowaniu takiego zestawu bramy pomoże nam odniesienie się do różnych poradników konstrukcji maszyn. Kwestie bezpieczeństwa i wymogi prawne z kolei są zawarte w Prawie Budowlanym i Normach dotyczących bram co stanowi podstawę przy rozpoczęciu prac nad projektem. Podczas projektowania nie wolno pominąć analizy żadnego elementu, gdyż jakość zestawu jest tak dobra jak jej najsłabszy element.

Literatura

1. Ashby M.F., Dobór materiałów w projektowaniu inżynierskim, WNT, Warszawa 1998
2. Bąk R., Burczyński T., Wytrzymałość materiałów z elementami ujęcia komputerowego, WNT, Warszawa 2013.
3. <https://www.budujemydom.pl/ogrodzenia/366-bramy-ogrodzeniowe-obowiazujace-przepisy-i-charakterystyka> - strona poświęcona zagadnieniom technicznym i prawnym podczas budowy (dostęp 11.2018).
4. <https://www.wisniowski.pl/> - producent bram i ogrodzeń (dostęp 11.2018).
5. <https://www.sommer.eu/pl/napedy-do-bram-wjazdowych-i-zewnetrznych.html> - producent automatyki do bram (dostęp 11.2018).

MODELLING AND SIMULATION OF AN AXISYMMETRIC DOCKING PORT FOR 1U NANOSATELLITES

NIKODEM CIOMPERLIK, B.Eng.

Mechanical Engineering, MB9, semester I, master's programme

KAMILA PAJĄK

Technical Physics, semester II, undergraduate programme

MAGDALENA SZEWCZYK

Transport, Aviation Mechanics, semester IV, undergraduate programme

MIKIR LAKEW ALEGAZE, B.Eng.

Mechanical Engineering, MB9, semester I, master's programme

Supervisor: Tomasz Błachowicz, PhD hab., Prof. at SUT



Abstract. The aim of this paper is modelling and simulation of an axisymmetric docking port for 1U nanosatellites, taking into account forces interacting between two modules. The finite element analysis was performed in Ansys software. The conical-shaped interface is designed to prevent cold welding.

MODELOWANIE I SYMULACJA OSIOWOSYMETRYCZNEGO PORTU DOKOWANIA NANOSATELIT 1U

Streszczenie. Celem niniejszej pracy było modelowanie i symulacja osiowosymetrycznego portu dokowania nanosatelity z uwzględnieniem bilansu sił występujących między poszczególnymi modułami. Do utworzenia symulacji zastosowano oprogramowanie Ansys z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Interfejs zaproponowany w tym artykule przyjmuje kształt stożkowy i jest zaprojektowany tak, aby zapobiegać spawaniu na zimno.

1. Introduction

Over the last decades, there has been a noticeable growth of interest in CubeSat nanosatellites [1]. Possibilities of satellite docking broaden capabilities such as resources exchanging. In addition, studies on CubeSats contribute to the miniaturization of orbital devices, and thus cost reduction. There are several different types of mechanisms connecting two satellites, characterized by different capturing techniques [2]. Conical-shaped docking port being developed by the Student's Scientific Society "Space Project" at the Silesian University of Technology, characterized mainly by its simplicity and reliability, consists of a chaser module with male port and a spring, connected to a magnetic tip. The target module consists of a female port and three pins for mating. Proposed mechanism is shown in Fig. 1.

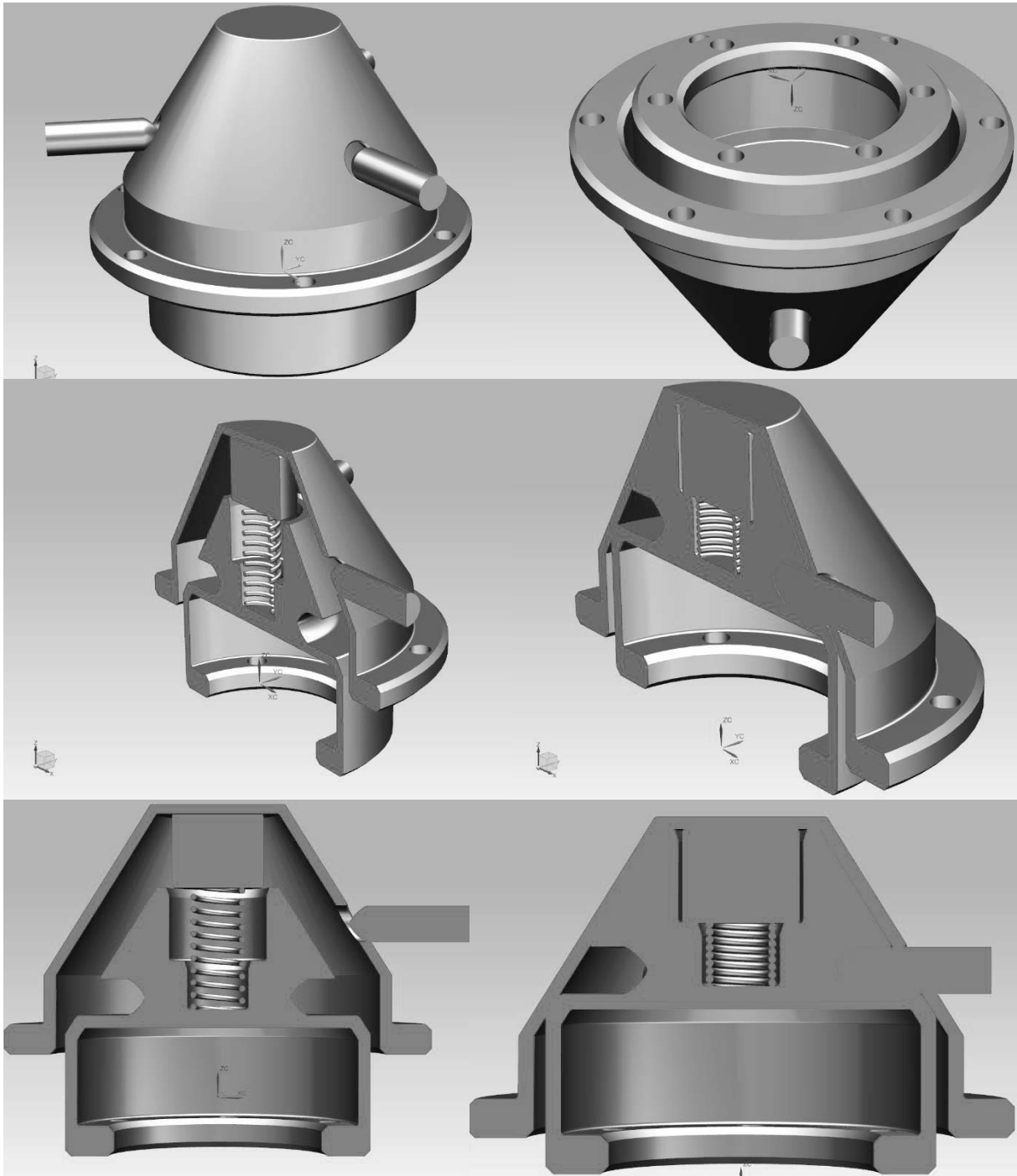


Fig. 1. Detailed model and its cross-sections, left side – docking, right side – mated.
 Rys. 1. Model szczegółowy i jego przekroje, po lewej – dokowanie, po prawej – zadokowany.

2. Analytical model

Capture mechanism consists of two modules: chaser (male) and target (female). The first one has a magnetic tip made of Steel 4340 in its end. The tip is connected to the module via spring. Target module magnet will be positioned on the inside of the satellite and is separated from the male magnetic tip with a thin Al 6061 T-6 plate which prevents cold welding from occurring. Magnet is attached on the other side of plate and has the same material parameters as the magnetic tip.

Taking all the forces into consideration and basing on equations (1) and (2), forward dynamic of the chaser module may be analyzed. Using these equations, spring stiffness is calculated.

Equation (1) describes a position constrain, and Equation (2) is a second order derivative of Equation (1).

Equation (2) includes Jacobian constrain J_c which is necessary to create matrix [4].

$$g(q) = 0, \quad (1)$$

$$\ddot{g} = J_c \frac{d}{dt}(v) + \frac{d}{dt}(J_c)v = 0. \quad (2)$$

Estimated spring stiffness equals 1210 N per meter, which is about three times bigger than value obtained in simulation.

Steinberg-Guinan model is a widely used in engineering software i.e. Ansys in order to simulate behavior of materials. S-G equations describe relations between temperature and pressure, as the yield stress Y and the shear modulus G . They increase with increasing pressure and decrease with increase of temperature. In below calculations η represents compression, ε – effective plastic strain and t – temperature:

$$Y_0(1 + \beta\varepsilon)^n \leq Y_{max}, \quad (3)$$

$$Y = Y_0 \left\{ 1 + \left(\frac{Y'_p}{Y_0} \right) \frac{P}{\eta^{1/3}} + \left(\frac{G'_t}{G_0} \right) (t - 300) \right\} (1 + \beta\varepsilon)^n, \quad (4)$$

$$G = G_0 \left\{ 1 + \left(\frac{G'_p}{G_0} \right) \frac{P}{\eta^{1/3}} + \left(\frac{G'_t}{G_0} \right) (t - 300) \right\}. \quad (5)$$

3. Simulation

To ensure that the analytical model developed is able to accurately predict docking port behavior, a simulation was performed. Simulation setup consists of simplified parts, namely: male port (Titanium), female port (Al 6061 T-6), magnetic tip (Steel 4340), and additionally: spring joint, CubeSat mass. Docking procedure occurs at 0,2 m/s.

Optimal docking procedure would occur without impact, when the male port velocity relative to the female port reaches 0 m/s at the mating point, that is the point at which mating pins are able to be inserted, to secure the interface from undocking. As this condition is nearly impossible to obtain, the spring stiffness should be lowered, so both pin insertion can be performed and the stress caused by male port impact is relatively low.

Multiple simulations showed that in order to minimize stress and allow the mating to occur, spring stiffness of 410-430 N/m is required. At such conditions the maximal stress is below 1 MPa and strain is marginal.

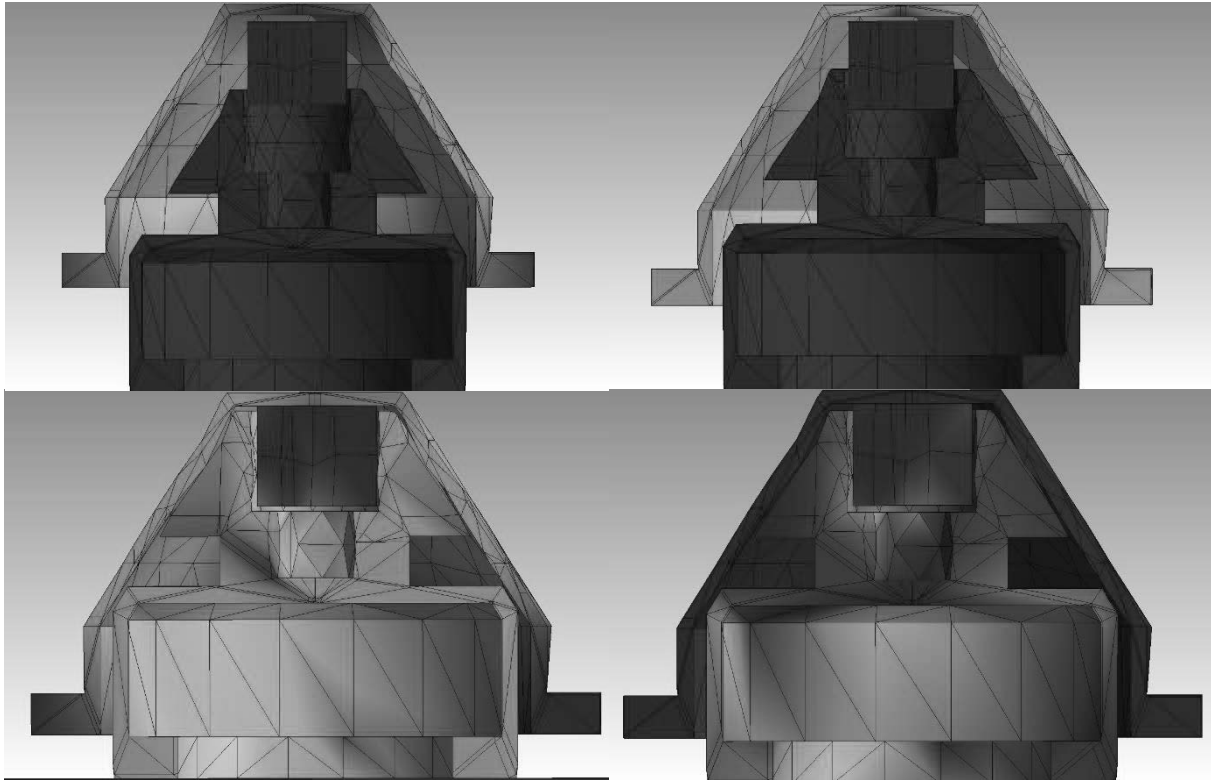


Fig. 2. Stress distribution, from top left: after making contact; docking in progress; modules mating (pins activation); decreasing stress (pins insertion).

Rys. 2. Rozkład naprężeń, od lewej na górze: po kontakcie; w trakcie dokowania; w pełni zadokowano (aktywacja trzpieni); malejące naprężenia (łączenie trzpieniami).

4. Conclusions

In summary, this paper presents discrepancy between calculations and simulation. Disparities among received parameter k follow from consideration all forces either not. Although simulation does not include magnetic interactions therefore outcome is less credible. Results leads to necessity of broaden research on simulation to prove that this type of capture mechanism is able to function in space. Specific construction selected, including parameters and used materials provide the basis to prosecute next studies in this subject matter as well as capabilities of optimization of this exact docking port.

References

1. Olivieri L., Branz F., Savioli L., Francesconi A., Conceptual Design of Small Spacecraft Docking Mechanism Actuated by Electroactive Polymers, 2nd IAA Conference on University Satellite Missions and Cubesat Workshop, Rome (2013).
2. Olivieri L., Francesconi A., Design of Docking Mechanism for Small Spacecraft, 63rd International Astronautical Congress, Naples (2012).
3. Olivieri L., Branz F., Sansone F., Francesconi A., Docking Mechanisms for Nano and Micro Satellites, AIDAA 2017 XXIV International Conference, Palermo (2017).
4. Hardt M., Villa J.R., Cocho D., Simulation and Control of an Active Steward Platform for Docking and Berthing of Space Vehicles, (2006).

ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA KARABINKA WSPINACZKOWEGO

BARBARA CISZYŃSKA

Automatyka i Robotyka, semestr VI, 1 stopień

Opiekun naukowy: dr inż. Jacek Ptaszny

Streszczenie. Celem pracy jest wykonanie obliczeń wytrzymałościowych karabinka wspinaczkowego ClimbX Ultra Wire Straight Gate. Wykorzystując metodę elementów skończonych (MES) przeprowadzono trzy symulacje w środowisku ANSYS Workbench, które przedstawiają wpływ zdefiniowanych kontaktów i połączeń na odwzorowanie zachowania się rzeczywistego karabinka przez model. W wyniku przeprowadzonych analiz uzyskano mapy naprężeń zredukowanych oraz wykresy zależności siły od przemieszczenia rolki rozciągającej karabinek.



STRENGTH ANALYSIS OF THE CLIMBING CARABINER

Abstract. The aim of this work is to carry out the strength analysis of the ClimbX Ultra Wire Straight Gate climbing carabiner. By using the finite element method implemented in ANSYS Workbench environment, three simulations were performed. These simulations show the influence of contact type and joints between elements of the carabiner on proper reflection of real carabiner behaviour by the model. As a result of the performed analyzes, distributions of reduced stressess and force versus loading roll displacement plots are obtained.

1. Wprowadzenie

Analiza wytrzymałościowa z zastosowaniem metody elementów skończonych została poprzedzona badaniami doświadczalnymi, w której karabinek z zamkiem drucianym ClimbX został poddany statycznej próbie rozciągania [1]. W próbie tej dokonano pomiaru siły powodującej zniszczenie karabinka. Zgodnie z normą karabinki powinny zostać przetestowane w osi podłużnej, osi poprzecznej oraz przy otwartym zamku. W ramach niniejszej pracy model karabinka został poddany analizie nieliniowej w środowisku ANSYS Workbench, przy obciążeniu wzdłuż osi podłużnej. Norma wymaga, aby w osi podłużnej karabinek był rozciągany za pomocą dwóch wałków o średnicy 12 mm, przy czym jeden z wałków pozostaje nieruchomy, a drugi przemieszcza się wzdłuż wymaganej osi [2]. Zadeklarowana przez producenta wytrzymałość w osi podłużnej to 25 kN. Przeprowadzono trzy symulacje, które obrazują wpływ zadanych kontaktów i połączeń na zgodność utworzonego modelu z rzeczywistością oraz na wyniki analizy.

2. Analiza wytrzymałościowa karabinka z zastosowaniem MES

Pierwszym etapem analizy było przygotowanie geometrii karabinka za pomocą programu SpaceClaim (Rys. 1a) oraz dobór odpowiedniego materiału. Założono, że model karabinka wykonany jest ze stopu aluminium o module Younga $E = 71$ GPa i granicy plastyczności $R_e = 280$ MPa. Jest to model materiału nazwany w bazie programu Workbench „Aluminium

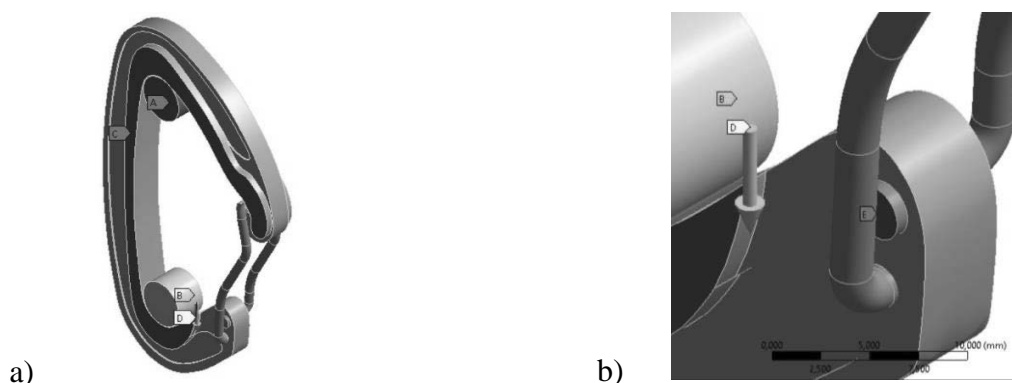
Alloy NL”, opisany charakterystyką biliniową z wzmocnieniem izotropowym. Następnie została utworzona siatka składająca się z 24375 elementów skończonych (Rys. 2b), w której dominują elementy typu HEX20. Z wykorzystaniem funkcji Body Sizing wielkość pojedynczego elementu w siatce korpusu karabinka została ustawiona na 1 mm, natomiast dla obu wałków wielkość pojedynczego elementu wynosi 2 mm. Modelowi ramienia przypisano materiał „Stainless Steel NL” (materiał biliniowy z wzmocnieniem izotropowym).



Rys. 1. Model karabinka: a) geometria opracowana za pomocą programu SpaceClaim, b) siatka elementów skończonych

Fig. 1. Carabiner model: a) geometry developed by using SpaceClaim, b) finite element mesh

Kolejnym etapem było zdefiniowanie obciążeń i więzów (Rys. 2). W każdej z trzech symulacji górny wałek został pozbawiony wszystkich stopni swobody z wykorzystaniem podpory Fixed Support zadanej na jego powierzchni (oznaczenie A). Dla dolnego wałka zdefiniowano przemieszczenie o 2,2 mm wzdłuż osi podłużnej z wykorzystaniem funkcji Displacement. Należy zaznaczyć, że w przypadku trzeciego modelu udało uzyskać się zbieżność rozwiązania dla maksymalnego przemieszczenia wałka wynoszącego jedynie około 1,8 mm (oznaczenie D). Dodatkowo utworzono podporę bez tarcia na powierzchni bocznej karabinka z zastosowaniem funkcji Frictionless Support (oznaczenie C) a w przypadku trzeciego modelu zastosowano tę funkcję również dla powierzchni bocznej nitu ramienia (oznaczenie E).

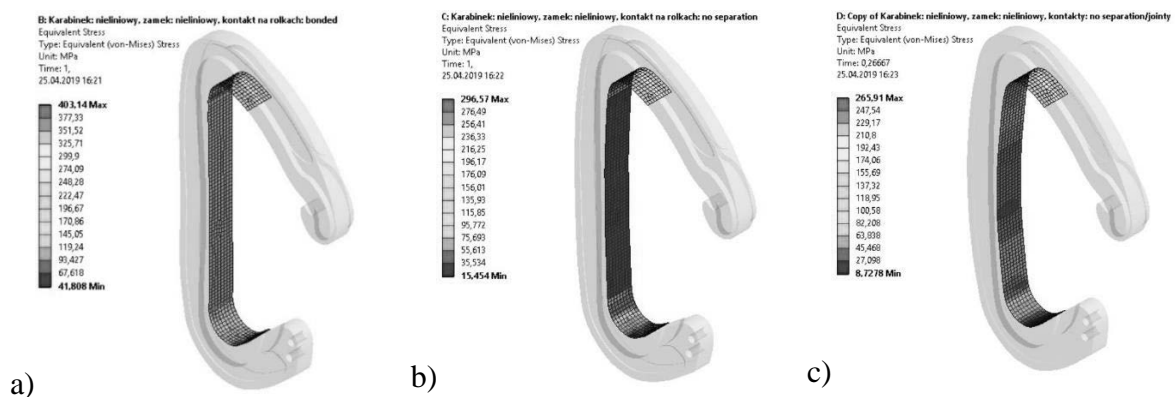


Rys. 2. Podparcie i obciążenie modelu: a) obciążenia i więzy wspólne dla wszystkich analiz, b) podpora bez tarcia dodana w trzeciej analizie

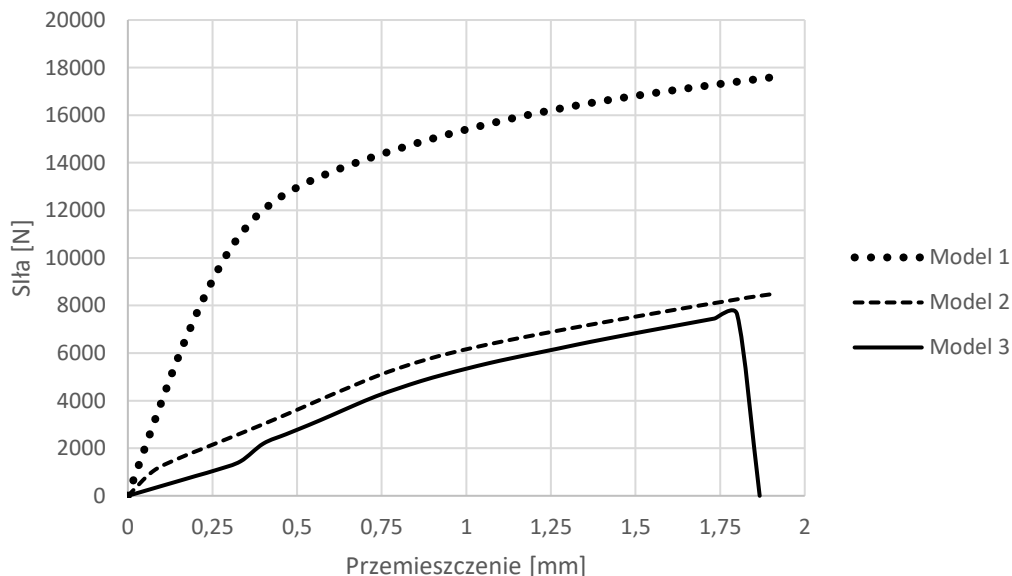
Fig. 2. Loads and supports: a) loads and constraints defined for all analyzes, b) frictionless support applied in the third analysis

Analizy różniły się zdefiniowanymi kontaktami między korpusem a wałkami oraz między korpusem a ramieniem, co spowodowało znaczne różnice w wynikach widoczne na mapach naprężeń zredukowanych Hubera-Misesa. Zostały one przedstawione na powierzchni wewnętrznej karabinka, na której dochodzi do uplastycznienia materiału (Rys. 3) oraz na wykresie zależności siły obciążającej od przemieszczenia wałka (Rys. 4).

Dla pierwszego modelu zdefiniowano kontakty wyłącznie typu Bonded między korpusem a wałkami oraz między korpusem a stykającymi się z nim powierzchniami ramienia. W drugim modelu utworzono kontakty typu No Separation między korpusem a wałkami, natomiast pozostawiono kontakty typu Bonded między korpusem a ramieniem. W przypadku trzeciego modelu zdefiniowano kontakty typu No Separation między korpusem a wałkami oraz kontakt Frictionless między górną i boczną powierzchnią ramienia a korpusem. Zapewniono również możliwość obrotu jego fragmentów umieszczonych w otworach poprzez utworzenie między nimi połączenia obrotowego Revolute, co sprawia, że jest to model najbardziej zbliżony do rzeczywistości. Charakterystykę modeli oraz wyniki analiz zawarto w Tabeli 1.



Rys. 3. Mapy naprężeń zredukowanych Hubera-Misesa (MPa) dla modelu: a) 1, b) 2, c) 3
 Fig. 3. Distribution of reduced Huber-Mises stress (MPa) for model: a) 1, b) 2, c) 3



Rys. 4. Wykres zależności siły obciążającej [N] od przemieszczenia wałka [mm]
 Fig. 4. Loading force [N] versus roll displacement [mm]

Tabela 1. Wpływ zdefiniowanych połączeń na uzyskane wyniki
 Table 1. The impact of defined connections on the obtained results

Model	Połączenie wałki - korpus	Połączenie korpus - ramię	Połączenie otwory w korpusie - ramię	Przemieszczenie wałka [mm]	Siła [N]
1	Bonded	Bonded	Bonded	1,8	17466
2	No Separation	Bonded	Bonded		8336
3	No Separation	Frictionless	Revolute		7626

3. Wnioski

Przeprowadzone analizy wytrzymałościowe karabinka z zastosowaniem metody elementów skończonych ukazują istotny wpływ utworzonych kontaktów i połączeń między karabinkiem a rozciągającymi go w osi podłużnej wałkami oraz między współpracującymi elementami karabinka. W pierwszej analizie zadane kontakty typu Bonded wpłynęły na niewłaściwe zachowanie się ramienia, które pod wpływem przemieszczenia dolnego wałka odginało się do wewnątrz korpusu. W drugim przypadku zmiana kontaktu między korpusem a wałkami na No Separation wpłynęła na znaczny spadek zależności siły od odkształcenia, co można odczytać z uzyskanego wykresu (Rys. 4), jednak nadal następowało niewłaściwe zachowanie się ramienia ze względu na sztywne utwierdzenie w otworach korpusu. W trzeciej analizie zmiana kontaktu między górną częścią ramienia a korpusem na Frictionless oraz dołączenie do tego kontaktu powierzchni bocznej ramienia (co wyeliminowało jego wygięcie i oparcie się o powierzchnię boczną korpusu), a także zapewnienie swobodnego obrotu części znajdujących się w otworach poprzez połączenie obrotowe Revolute, spowodowało właściwe zachowanie się ramienia. Wszystkie te modyfikacje sprawiły, że trzeci model jest najbardziej zbliżony do rzeczywistości, przy czym zbieżność rozwiązania udało się uzyskać dla przemieszczenia wałka ok. 1,8 mm.

Kolejnym etapem prowadzonych badań może być utworzenie modelu karabinka z uwzględnieniem jego zniszczenia oraz przeprowadzenie badań doświadczalnych, w których możliwe będzie zmierzenie rzeczywistego przemieszczenia wałka w trakcie próby wytrzymałościowej.

Literatura

1. Ciszewska B. Ptaszny J., Testy wytrzymałościowe karabinków wspinaczkowych. Studencka Konferencja Naukowa „Metody Komputerowe 2018”, s. 9-12, Politechnika Śląska, Gliwice (2018).
2. BS EN 12275:2013 Mountaineering equipment. Connectors. Safety requirements and test methods.

DOBÓR NASTAW REGULATORA PID UKŁADU NAPĘDOWEGO WIELOWIRNIKOWCA TRÓJSILNIKOWEGO

inż. ADRIAN DUDAJEK

Mechanika i Budowa Maszyn (studia dualne), semestr I, 2 stopień

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Grzegorz Działkiewicz, Prof. Pol. Śląskiej

Streszczenie. W artykule opisano dobór nastaw regulatorów osi układu napędowego wielowirnikowca trójsilnikowego, ze względu na jego nietypową budowę oraz dodatkowe układy sterowania. Zastosowano klasyczne metody strojenia regulatorów – metodę Zieglera-Nicholsa oraz trzy metody Pettita-Carra. Dodatkowo zaprojektowano stanowisko wraz z torem pomiarowym służącym do oceny jakości dobranych nastaw. Przedstawiono także oprogramowanie służące do akwizycji i analizy uzyskanych danych doświadczalnych.



PID CONTROLLER TUNING OF TRIMOTORED MULTIROTOR DRIVE

Abstract. The article discusses the problem of PID controller tuning of trimotored multirotor drive, due to its unusual construction and additional control systems. Classic methods of PID controller tuning were used, such as the Ziegler-Nichols method and Pettit-Carr methods. The measuring stand was also constructed to acquire measuring data and assess the quality of PID settings. This article also includes an overview of used software for empirical data analysis.

1. Wprowadzenie

Współcześnie można zaobserwować dynamiczny rozwój konstrukcji i metod sterowania bezzałogowych statków powietrznych, przy jednoczesnym wzroście złożoności problemów dotyczących ich eksploatacji [3]. Jednym z istotnych problemów eksploatacji dronów jest dobór nastaw regulatorów ich układu napędowego. Mnogość rozwiązań konstrukcyjnych układów napędowych oraz algorytmów ich sterowania, sprawia że użytkownik drona staje przed trudnym problemem technicznym, który wpływa na jakość procesu użytkowania tego obiektu latającego. Dlatego celem pracy było opracowanie metody strojenia regulatorów PID układu napędowego wielowirnikowca trójsilnikowego. Jest to konstrukcja nietypowa, ze względu na istnienie mechanizmu wychylania jednego z silników napędowych, co sprawia że cechy dynamiczne tego statku powietrznego odróżniają się od cech typowych konstrukcji, np. czterosilnikowych.

2. Konstrukcja układu napędowego wielowirnikowca trójsilnikowego

W konstrukcjach z parzystą liczbą śmigieł momenty obrotowe bezwładności obracających się śmigieł i silników kompensowane są samoistnie, ponieważ silniki i śmigła występują w parach obracających się w przeciwnych kierunkach – w przypadku quadcoptera dwa silniki ze śmigłami obracają się zgodnie z ruchem wskazówek zegara oraz dwa obracają się przeciwnie

do ruchu wskazówek zegara. W tricopterze taka kompensacja nie zachodzi ze względu na nieparzystą liczbę silników. Wymaga to zastosowania układu wychylania jednego z silników, aby dron nie obracał się samoistnie wokół osi pionowej. Na Rys. 1. przedstawiono opracowaną w ramach pracy konstrukcję drona.



Rys. 1. Tricopter rozpatrywany w pracy
Fig. 1. Tricopter considered in the paper

Aby lepiej ukazać stopień złożoności układu napędowego tricoptera, na Rys. 2. przedstawiono mechanizm wychylania tylnego silnika tricoptera opisywanego w artykule.



Rys. 2. Mechanizm wychylania tylnego silnika w rozpatrywanym tricopterze
Fig. 2. The mechanism for tilting rear motor in the considered tricopter

3. Stanowisko badawcze i tor pomiarowy

Zadaniem stanowiska było umożliwienie badania wpływu nastaw regulatorów PID układu napędowego na odpowiedź dynamiczną obiektu oraz wyeliminowanie występowania efektu przyziemnego poprzez zamocowanie drona na pewnej wysokości od podłoża. Ponadto, jednym z wymagań był możliwy obrót tricoptera wokół tylko jednej osi, aby wyeliminować wpływ regulatorów PID innych osi, na regulator PID osi aktualnie badanej. Tor pomiarowy zastosowany do badań składa się z płytki Arduino oraz żyroskopu z akcelerometrem. Tor pomiarowy komunikuje się z komputerem klasy PC poprzez interfejs USB [2]. Dane uzyskiwane z akcelerometru były przesyłane do terminala wbudowanego w środowisko

Arduino, natomiast obróbka danych, rysowanie wykresów, obliczenia oraz ich interpretacja odbywały się w środowisku Microsoft Excel. Wygląd stanowiska wraz z zamocowanym obiektem badań oraz torem pomiarowym przedstawiono na Rys. 3.



Rys. 3. Stanowisko pomiarowe z zamocowanym obiektem badań oraz torem pomiarowym
Fig. 3. Measuring stand with attached test object and the measuring path

4. Badania eksperymentalne oraz strojenie regulatorów PID

W celu doboru nastaw regulatorów PID w pierwszej kolejności należy znaleźć dwie wielkości charakterystyczne dla każdej z osi układu napędowego – nastawę krytyczną członu proporcjonalnego, oznaczaną jako K_u , przy której występują nienarastające oscylacje oraz okres tych drgań, oznaczany jako T_u . Te dwie wielkości pozwalają na obliczenie wartości nastaw regulatora na podstawie Tab. 1 [1].

Tabela 1. Metody doboru nastaw regulatorów PID dla układu o nieznanym modelu.
Table 1. Tuning methods of PID controllers for an unknown system model

Metoda	K_c	T_i	T_d
Zieglera-Nicholsa (ZN)	$[0.6K_u, K_u]$	$0.5T_u$	$0.125T_u$
Pettita-Carra z tłumieniem podkrytycznym (PCU)	K_u	$0.5T_u$	$0.125T_u$
Pettita-Carra z tłumieniem krytycznym (PCC)	$0.6667K_u$	T_u	$0.167T_u$
Pettita-Carra z tłumieniem nadkrytycznym (PCO)	$0.5K_u$	$1.5T_u$	$0.167T_u$

Badania eksperymentalne przeprowadzone w celu wyznaczenia wyżej wymienionych wielkości, wykonywane były z użyciem algorytmu, obejmującego takie zmienne jak stopień naładowania akumulatora, czy stopień stabilności układu [2].

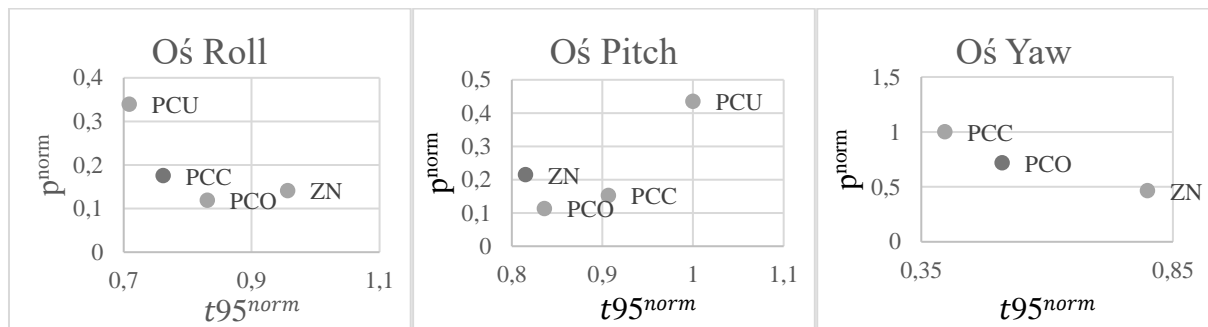
5. Wyniki badań

W drodze postępowania zgodnie z algorytmem poszukiwania charakterystycznych wielkości niezbędnych przy strojeniu regulatorów PID dla układów o nieznanym modelu, uzyskano wykresy odpowiedzi układu, na podstawie których określono wartości nastaw krytycznych członu proporcjonalnego oraz odpowiadające im okresy oscylacji [1].

Na podstawie Tab. 1 oraz wartości nastaw krytycznych wyznaczono nastawy dla każdej z osi napędowych drona, a następnie z wykorzystaniem toru pomiarowego oraz odpowiedniego oprogramowania pozyskiwano informacje o stabilności układu oraz jego odpowiedzi czasowej na wymuszenie skokowe Heaviside'a [2]. Aby ułatwić określanie jakości nastaw, wykresy wygładzono z zastosowaniem średniej ruchomej.

Do oceny jakości nastaw wykorzystano jedne z najbardziej klasycznych metod oceny jakości regulacji – przeregulowanie oraz stałą czasową z tolerancją [2].

Ze względu na dwie miary jakości regulacji, wykorzystano ich normalizację do wielkości bezwymiarowych, znacznie ułatwiając porównywanie wyników. Zakładając, że oba kryteria są tak samo istotne oraz prowadzi się minimalizację rozważanych kryteriów jakości regulacji, optymalne nastawy reprezentował punkt na płaszczyźnie kryteriów, znajdujący się najbliżej początku układu współrzędnych.



Rys. 4. Płaszczyzny kryteriów z punktami reprezentującymi optymalność metod
Fig. 4. Criteria planes with points representing optimality of methods

Na podstawie uzyskanych w ten sposób danych można określić, że:

- dla osi Roll (oś poprzeczna układu napędowego) optymalną metodą strojenia jest metoda Pettita-Carra z tłumieniem krytycznym,
- dla osi Pitch (oś wzdłużna) optymalną metodą strojenia jest metoda Zieglera-Nicholsa
- dla osi Yaw (oś pionowa) optymalną metodą strojenia jest metoda Pettita-Carra z tłumieniem nadkrytycznym

6. Wnioski

Celem pracy było opracowanie metody obiektywnego wyboru i badania sposobów strojenia regulatorów PID układu napędowego wielowirnikowca trójsilnikowego, czyli konstrukcji słabo udokumentowanej w literaturze oraz przede wszystkim nietypowej ze względu na nieparzystą liczbę śmigieł. Samo zagadnienie doboru nastaw regulatora PID jest zagadnieniem trudnym, często takiego doboru dokonuje się doświadczalnie, bez sformalizowanych metod, jednak z przeprowadzonych w pracy badań doświadczalnych wynika, że nawet klasyczne metody strojenia regulatorów, niewielkim nakładem pracy ułatwiają znacząco przygotowanie układu napędowego drona do eksploatacji.

Literatura

1. O'Dwyer A., Handbook of PI And PID Controller Tuning Rules, Imperial College Press, London (2009).
2. Brzózka J., Regulatory i układy automatyki, Wydawnictwo MIKOM, Warszawa (2004).
3. Audronis T., Drony. Wprowadzenie, Helion, Gliwice (2015).

ANALIZA NUMERYCZNA POROWATEGO MATERIAŁU HIPERSPRĘŻYSTEGO

inż. JULIUSZ DYMNIKI

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

Opiekun naukowy: dr inż. Witold Ogierman

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę zachowania się porowatego materiału hipersprężystego w odpowiedzi na zadane obciążenie mechaniczne. Utworzono dwuwymiarowe reprezentatywne elementy objętościowe oraz rozpatrzono kołową geometrię porów. Celem badań jest określenie wpływu rozmieszczenia oraz rozmiaru porów na efektywne zachowanie się materiału. W celu przeprowadzenia analizy numerycznej wykorzystano oprogramowanie ANSYS.



NUMERICAL ANALYSIS OF POROUS HYPERELASTIC MATERIAL

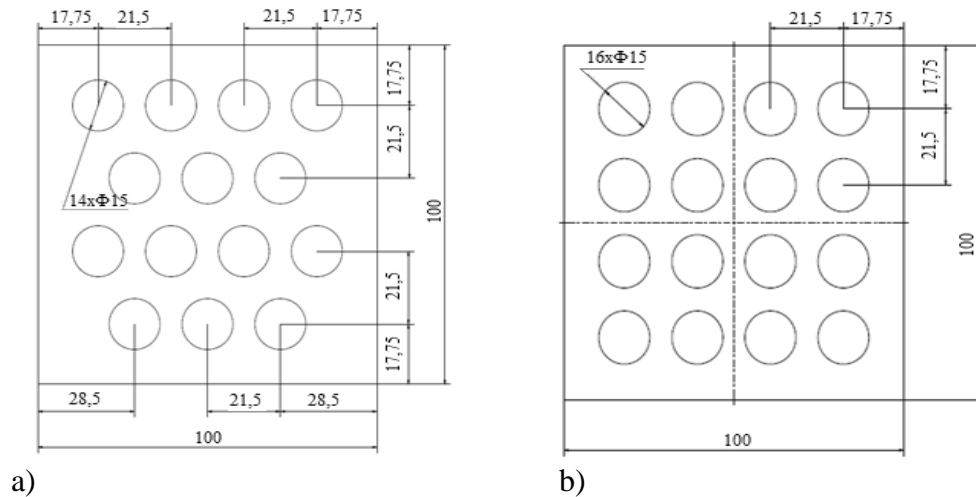
The paper presents the analysis of behavior of porous hyperelastic material in response on the mechanical loading. Two dimensional representative volumes element have been created and circular pores were taken into account. The aim of the study is determination of an influence of arrangement and size of pores on the effective material behavior. The numerical analysis has been carried out by using ANSYS software.

1. Wprowadzenie

W pracach [1, 2] zwrócono uwagę na specyficzne własności mechaniczne, które można uzyskać przez odpowiedni dobór geometrii i rozmieszczenia porów w materiałach hipersprężystych. Ze względu na uzyskanie nietypowych własności autorzy skategoryzowali tego typu materiały jako metamateriały. Uzyskanie właściwości metamateriałów jest współzależne w większym stopniu od projektowanej struktury materiału, a nie od jego struktury cząsteczkowej [3]. W ramach niniejszej pracy przeanalizowano dwuwymiarowe reprezentatywne elementy objętościowe (RVE) uwzględniając płaski stan odkształcenia i kołową geometrię porów. Celem badań jest określenie wpływu rozmieszczenia oraz średnicy porów na efektywne zachowanie się materiału. Elastomer będący materiałem bazowym zamodelowano wykorzystując model Mooneya-Rivlina. Obliczenia metodą elementów skończonych przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS.

2. Modelowanie materiału

Przeanalizowano trzy warianty średnic porów oraz dwa warianty ich rozmieszczenia. Trzy reprezentatywne elementy objętościowe posiadają szesnaście porów o średnicach kolejno: 5, 10, 15 mm. Pozostałe trzy reprezentatywne elementy objętościowe posiadają natomiast czternaście porów o innym ułożeniu geometrycznym. Przykłady ich rozmieszczenia pokazano na rys.1.



Rys.1. Przykłady modeli RVE z porami o średnicy 15 mm: a) I wariant rozmieszczenia otworów, b) II drugi wariant rozmieszczenia otworów

Fig.1. Examples of the RVE models with the pores of diameter 15 mm: a) I case of the pores arrangement, b) II case of the pores arrangement,

W celu opisu hipersprężystego zachowania się materiału bazowego uwzględniono pięcioparametrowy model materiału Mooneya-Rivlina, dla którego potencjał sprężysty W jest wyrażony jako [4]:

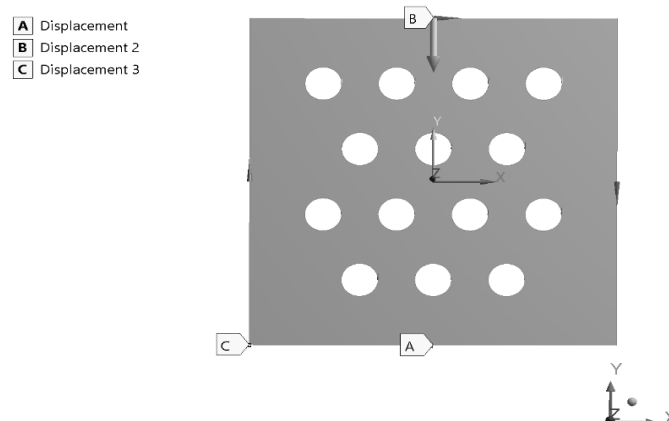
$$W = c_{10}(I - 3) + c_{01}(II - 3) + c_{20}(I - 3)^2 + c_{11}(I - 3)(II - 3) + c_{02}(II - 3)^2 + \frac{1}{d}(J - 1)^2, \quad (1)$$

gdzie I , II oraz III są niezmiennikami tensora deformacji Cauchy'ego-Greena, J to wyznacznik gradientu deformacji, natomiast c_{10} , c_{01} , c_{20} , c_{11} , c_{02} , oraz d są stałymi materiałowymi, których przyjęte wartości zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry modelu Mooneya-Rivlina
Table 1. Parameters of the Mooney-Rivlin model

c_{10} , Pa	c_{01} , Pa	c_{20} , Pa	c_{11} , Pa	c_{02} , Pa	d , Pa ⁻¹
-3196,4	4242,3	624,1	-2632,5	4367,8	0,8

Dla każdego RVE zostały przyjęte takie same warunki brzegowe zgodnie z rys. 2.

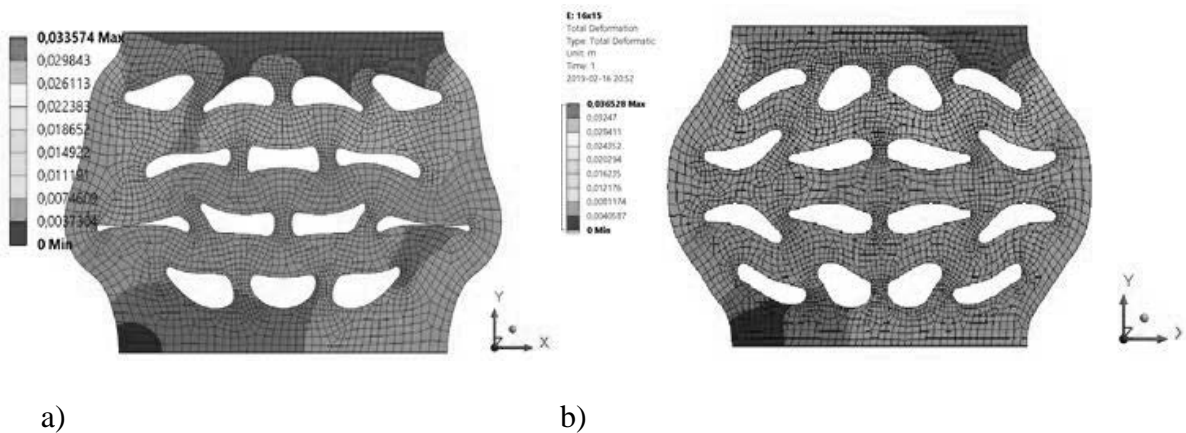


Rys. 2. Warunki brzegowe
Fig. 2. Boundary conditions

Przemieszczanie A w kierunku osi Y jest równe 0. Przemieszczenie B w kierunku osi Y jest równe -30mm co stanowi 30% długości krawędzi bocznej. Przemieszczenie C dotyczy wierzchołka reprezentatywnego elementu objętościowego uniemożliwiając ruch w kierunkach osi X i Y. Ze względu na analizę w zakresie nieliniowym obliczenia przeprowadzono w dziesięciu krokach.

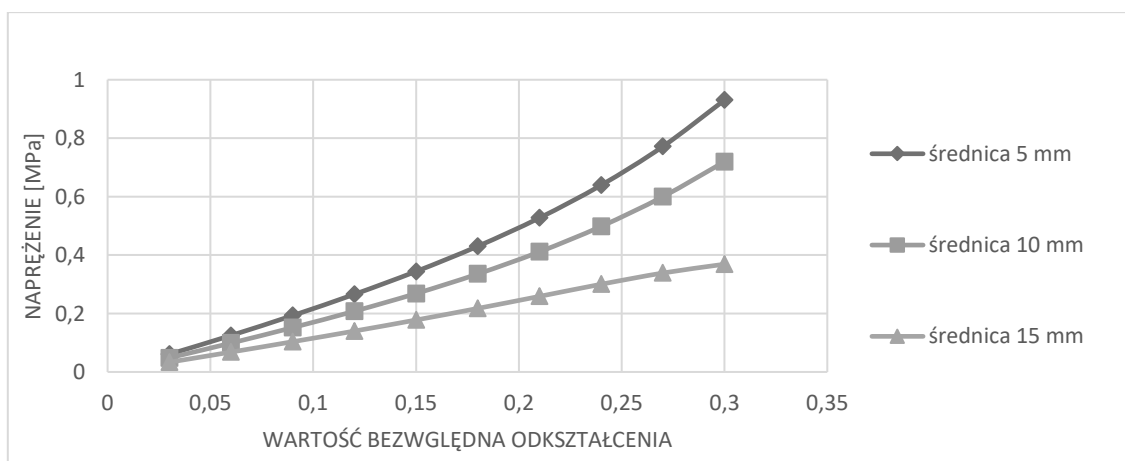
3. Wyniki analizy

Poniżej przedstawione zostały najważniejsze różnice w wynikach dla przeanalizowanych wariantów rozmiarów i rozmieszczeń porów. Mapy przemieszczeń przedstawione na rys. 3 dotyczą porów o średnicy 15 mm dla obu wariantów ich rozmieszczenia.

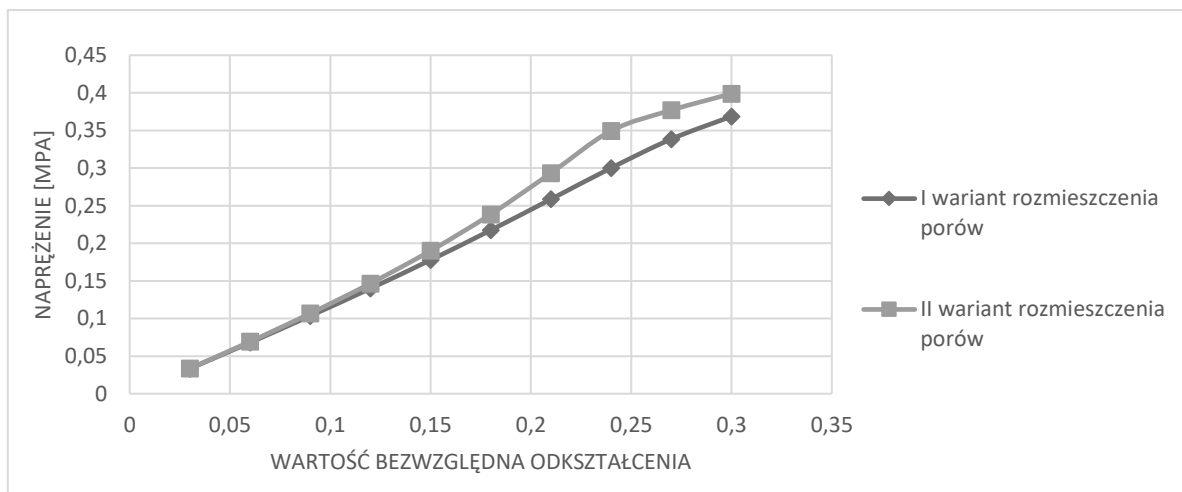


Rys.3. Wypadkowe przemieszczenie dla RVE z porami o średnicy 15 mm: a) I wariant rozmieszczenia otworów, b) II wariant rozmieszczenia otworów
 Fig.3. Total displacement of the RVE with the pores of diameter 15 mm.

Na rys. 4 przedstawiono zależność naprężenia od odkształcenia makroskopowego dla I wariantu rozmieszczenia porów dla różnych średnic porów natomiast rys. 5 przedstawia wynik dla średnicy porów 15 mm i dwóch różnych wariantów ich rozmieszczenia.



Rys. 4. Zależność naprężenia od odkształcenia makroskopowego dla I wariantu rozmieszczenia porów i różnych średnic porów
 Fig. 4. Stress in terms of macroscopic strain for the I case of pores arrangement and different diameters of pores



Rys. 5. Zależność naprężenia od odkształcenia makroskopowego dla średnicy porów 15 mm dla dwóch analizowanych wariantów rozmieszczenia porów

Fig. 5. Stress in terms of macroscopic strain for the pores of diameter 15 mm for the two cases of pores arrangement

4. Wnioski

Wyniki obliczeń numerycznych pozwoliły na określenie wpływu średnicy i rozmieszczenia porów na efektywną odpowiedź materiału. Zaobserwowano znaczne różnice w charakterystykach naprężenie-odkształcenie wyznaczonych dla różnych średnic porów. Dodatkowo zaobserwowano różnicę w odpowiedzi materiałów o różnych sposobach rozmieszczenia porów, w szczególności dla dużej wartości odkształcenia. W ramach dalszych prac zostaną zastosowane okresowe warunki brzegowe oraz analizie poddanej zostaną inne geometrie porów i sposoby ich rozmieszczenia.

Literatura

1. Rokoš O., Ameen M.M., Peerlings R.H.J., Geers M.G.D., Micromorphic computational homogenization for mechanical metamaterials with patterning fluctuation fields, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 123, s. 119-137 (2019).
2. Coulais C., Overvelde J.T. B., Lubbers L.A., Bertoldi K., van Hecke M., Discontinuous Buckling of Wide Beams and Metabeams, *Physical Review Letters*, Vol. 115, 044301(2015)
3. Knitter R., Królikowski T., Metamateriały mechaniczne wytwarzane w sposób przyrostowy, *Mechanik*, Vol. 7, s. 502-504 (2018).
4. Theory reference for the mechanical APDL and mechanical applications, ANSYS Inc., (2009).

ANALIZA STRAT CIEPŁA PRZY PRZEPLYWIE GORĄCYCH CIECZY PRZEZ RUROCIĄG

inż. LUKASZ DYRAGA

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

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Jerzy Mendakiewicz, Prof. Pol. Śląskiej

Streszczenie. W artykule zostały przedstawione wyniki dotyczące analizy strat ciepła przy przepływie gorącej cieczy przez rurociąg oraz sposób rozwiązania zagadnienia. Algorytm obliczeniowy został opracowany na podstawie literatury i zapisany w programie *Scilab*.



ANALYSIS OF HEAT LOSSES DURING THE FLOW OF HOT LIQUIDS THROUGH A PIPELINE

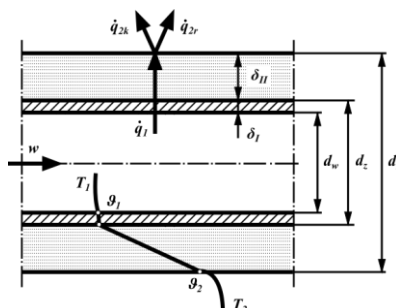
Abstract. The article presents the results obtained from the analysis of heat loss when hot water flows through the pipeline and the approach of solving the problem. The computational algorithm was developed based on literature and wrote in the *Scilab* program.

1. Wstęp

Rozpatrywane zagadnienie dotyczy przepływu gorącej wody przez rurociąg, który jest umieszczony poziomo na słupach oraz jest izolowany cieplnie warstwą wełny żuźlowej. Analiza strat ciepła została przeprowadzona dla układu z przepływającą wodą z różnymi wariantami: zwiększona średnica przewodu d_w oraz zwiększona grubość ścianki izolacji λ_{II} . Dane wejściowe, wykorzystane w pracy, zostały zaczerpnięte z literatury [1].

2. Schemat geometryczny oraz dane wejściowe

Wymiary geometryczne rozpatrywanego układu zostały przedstawione na rys. 1.



Rys. 1. Przenikanie ciepła przez ściankę izolowanej rury [1]

Fig. 1. Heat transfer through the wall of an insulated pipe [1]

Dane wejściowe, czyli właściwości termodynamiczne: wody, izolacji, otoczenia oraz wymiary geometryczne rury oraz izolacji zostały zestawione w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie danych wejściowych
Table 1. List of input data

Dane wejściowe			Zadanie podstawowe	Zwiększona średnica przewodu d_w	Zwiększona grubość izolacji δ_{II}
Wielkość	Symbol	Jednostka			
średnica wewnętrzna przewodu	d_w	[m]	0,08	0,16	0,08
grubość ścianki przewodu	δ_I	[m]	0,004	0,004	0,004
średnia prędkość wody	w	$\left[\frac{m}{s}\right]$	1	1	1
średnia temperatura wody	T_1	[K]	413	413	413
współczynnik przewodzenia ciepła wody	λ_I	$\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$	0,685	0,685	0,685
kinematyczny współczynnik lepkości wody	ν	$\left[\frac{m^2}{s}\right]$	2,12E-07	2,12E-07	2,12E-07
liczba <i>Prandla</i> wody	Pr		1,23	1,23	1,23
współczynnik przewodzenia ciepła izolacji	λ_{II}	$\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$	0,093	0,093	0,093
grubość ścianki izolacji	δ_{II}	[m]	0,03	0,03	0,06
temperatura otoczenia	T_2	[K]	286	286	286
emisyjność izolacji	ε_1		0,92	0,92	0,92
emisyjność otoczenia	ε_2		1	1	1
długość przewodu	l	[m]	1	1	1
przyspieszenie ziemskie	g	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	9.80665	9.80665	9.80665
stała <i>Stefana-Boltzmana</i>	C_c	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4}\right]$	5,67	5,67	5,67

3. Analiza strat ciepła, metoda prób

Celem analizy jest wyznaczenie następujących wartości:

- 1) współczynniki wnikania ciepła przez konwekcję α_{1k} , α_{2k} , oraz współczynnik wnikania ciepła przez promieniowanie α_{2r} (rys. 1);
- 2) strumień ciepła traconego przez konwekcję \dot{q}_{2k} i promieniowanie \dot{q}_{2r} na długości l przewodu (wartość jednostkowa, rys. 1).

Ruch wody wewnątrz rury został wywołany sztucznie tzn. przy wykorzystaniu pompy, a więc występuje konwekcja burzliwa. Natomiast w przypadku powietrza w otoczeniu występuje konwekcja swobodna, gdyż powietrze jest w bezruchu [2, 3].

Strumień ciepła \dot{q}_1 wyznacza się na podstawie następującego równania:

$$\dot{q}_1 = \frac{T_1 - \vartheta_2}{R_{\alpha_{1k}} + R_\lambda} \quad (1)$$

gdzie: T_1 – średnia temperatura wody [K], $R_{\alpha_{1k}}$ – opór wnikania $\left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}\right]$, R_λ – opór przewodzenia $\left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}\right]$, ϑ_2 – temperatura na powierzchni zewnętrznej izolacji [K].

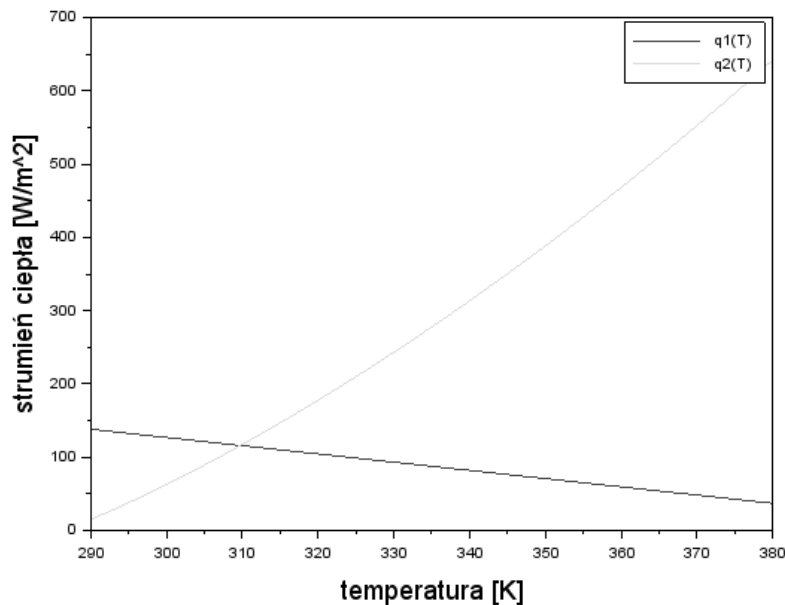
Strumień ciepła \dot{q}_2 jest równy sumie strumienia ciepła traconego przez konwekcję oraz przez promieniowanie, jego postać jest następująca:

$$\dot{q}_2 = \pi \cdot d_2 \cdot (\alpha_{2k} + \alpha_{2r})(\vartheta_2 - T_2), \quad (2)$$

gdzie: d_2 – średnica przewodu [m], α_{2k} – współczynnik wnikania ciepła przez konwekcję $\left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}\right]$, α_{2r} – współczynnik wnikania ciepła przez promieniowanie $\left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}\right]$.

Do wyznaczenia wartości strumieni ciepła \dot{q}_1 , \dot{q}_2 potrzebna jest wartość temperatury na powierzchni zewnętrznej izolacji ϑ_2 . Temperaturę ϑ_2 wyznacza się metodą prób wykorzystując to, że strumień ciepła \dot{q}_1 dopływający do powierzchni izolacji jest równy strumieniowi \dot{q}_2 odpływającemu z powierzchni izolacji.

Algorytm zapisany w programie *Scilab* wyznacza wartości \dot{q}_1 , \dot{q}_2 , α_{2k} , α_{2r} w zależności od wartości ϑ_2 i generuje wykres $\dot{q}_1(\vartheta_2)$, $\dot{q}_2(\vartheta_2)$ (rys. 2). Wartości ϑ_2 są z przedziału od 290 K do 380 K (obliczane są z krokiem 0,01 K). W punkcie przecięcia się krzywych $\dot{q}_1(\vartheta_2)$, $\dot{q}_2(\vartheta_2)$ (rys. 2) znajduje się szukaną wartość ϑ_2 dla tej wartości oblicza się \dot{q}_{2r} , \dot{q}_{2k} , α_{2k} , α_{2r} . Obliczone parametry są rozwiązaniem analizowanego zagadnienia.



Rys. 2. Wykres wartości strumienia ciepła dla zadania podstawowego
Fig. 2. Graph of heat flux values for basic task

4. Wyniki

Wyniki dotyczące analizy strat ciepła dla wszystkich wariantów zadania zostały przedstawione w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie danych wyjściowych
Table 2. List of output data

Wyniki końcowe			Zadanie podstawowe	Zwiększona średnica przewodu d_w	Zwiększona grubość izolacji δ_{II}
Wielkość	Symbol	Jednostka			
opór przewodzenia	R_λ	$\left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}\right]$	0,89	0,523	1,472
opór wnikania	$R_{\alpha 1}$	$\left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}\right]$	6,43E-04	3,69E-04	6,43E-04
temperatura na powierzchni zewnętrznej izolacji	ϑ_2	[K]	309,74	312,48	299,31
współczynnik wnikania ciepła przez konwekcję	α_{1k}	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}\right]$	6190,04	5388,75	6190,04
współczynnik wnikania ciepła przez promieniowanie	α_{2r}	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}\right]$	5,523	5,602	5,233
współczynnik wnikania ciepła przez konwekcję	α_{2k}	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}\right]$	4,98	4,529	3,64
strumień ciepła traconego przez konwekcję	\dot{q}_{2k}	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right]$	54,966	85,911	31,655
strumień ciepła traconego przez promieniowanie	\dot{q}_{2r}	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right]$	60,967	106,253	45,511
strumień ciepła dopływający do powierzchni izolacji	\dot{q}_1	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right]$	115,98	192,205	77,196
strumień ciepła odpływający z powierzchni izolacji	\dot{q}_2	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right]$	115,933	192,164	77,166

5. Wnioski

Największe wartości strumieni ciepła traconego przez konwekcję \dot{q}_{2k} i promieniowanie \dot{q}_{2r} uzyskano dla układu z dwukrotnie zwiększoną średnicą wewnętrzną przewodu d_w . Najmniejsze wartości strumieni ciepła traconego przez konwekcję \dot{q}_{2k} i promieniowanie \dot{q}_{2r} uzyskano dla układu z dwukrotnie zwiększoną grubością ścianki izolacyjnej δ_{II} .

Algorytm opracowany na podstawie literatury jest poprawny, gdyż uzyskane wyniki są technicznie uzasadnione, ponieważ zwiększając tylko średnicę przewodu następuje wzrost traconego ciepła, zwiększając tylko grubość ścianki izolacji następuje spadek traconego ciepła.

Literatura

1. J. Szargut: Termodynamika. Warszawa: PWN (2000).
2. J. Walker, D. Halliday, R. Resnick: Podstawy fizyki, Tom II. Warszawa: PWN (2018).
3. E. Kostowski: Przepływ ciepła. Gliwice: WPS (2006).
4. R. Petela: Przepływ ciepła. Gliwice: WPS (1980).

ZASTOSOWANIE CYFROWEJ KORELACJI OBRAZU JAKO NARZĘDZIA WERYFIKACJI WYNIKÓW OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH MES

inż. MARTYNA FRANCUZ

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

Opiekun naukowy: dr hab. inż., Grzegorz Kokot, prof. PŚ.

Streszczenie. Artykuł przedstawia wstępne wyniki badań nad metodą weryfikacji wyników obliczeń numerycznych MES wykorzystującą cyfrową korelację obrazu. Wykonano próbę rozciągania płaskownika aluminiowego i za pomocą metody cyfrowej korelacji obrazu zarejestrowano pole przemieszczeń. Wyniki symulacji numerycznej próby rozciągania płaskownika uzyskano w oprogramowaniu Msc.Patran\Nastran. W ramach weryfikacji porównano ze sobą wyniki przemieszczeń z eksperymentu i analizy MES, otrzymując mapę różnic zarówno przemieszczeń jak i odkształceń.



APPLICATION OF DIGITAL IMAGE CORRELATION AS A TOOL FOR VALIDATION OF NUMERICAL MODELS FEM

Abstract. The purpose of present work was to conduct verification of numerical FEM results with use of the Digital Image Correlation. A tensile strength test was carried out on an aluminum flat bar and the displacement field along the stretching axis was obtained using the DIC method. Numerical results for flat bar was obtained in Msc.Patran\Nastran software. Within the verification process, displacements results from experiment and FEM analysis were compared, receiving the map of differences in displacements and strains.

1. Wprowadzenie

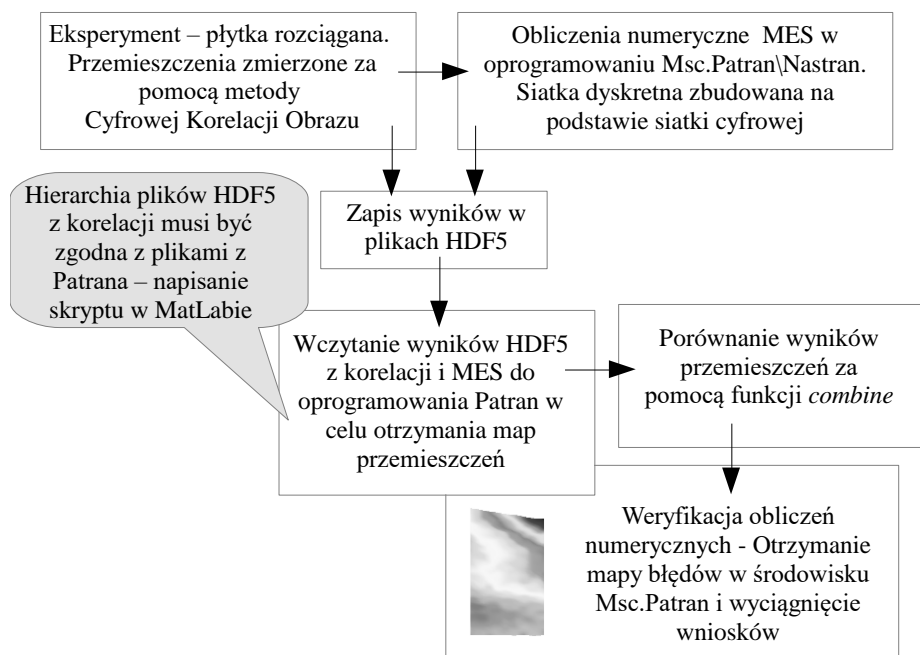
Walidacja to metodologia umożliwiająca ocenę dokładności z jaką model numeryczny reprezentuje obiekt rzeczywisty, natomiast weryfikacja jest procesem pozwalającym na porównanie wyników symulacji na modelu numerycznym w stosunku do odpowiedzi obiektu rzeczywistego czy też modelu matematycznego. W praktyce inżynierskiej są to istotne procedury pozwalające zapobiegać katastrofom powstałym na skutek przybliżeń metod numerycznych [1]. Jedną z najpopularniejszych metod numerycznych w mechanice jest metoda elementów skończonych, której istota sprowadza się do zastąpienia ciągłego modelu matematycznego dyskretnym modelem numerycznym, w wyniku czego model numeryczny przyjmuje postać układu równań algebraicznych [3]. Metoda Cyfrowej Korelacji Obrazu to metoda eksperymentalna, pozwalająca na bezkontaktowy pomiar przemieszczeń i odkształceń na obciążanych obiektach rzeczywistych. Powierzchnia elementu badanego musi zostać pokryta strukturą plamkową, naniesioną np.: za pomocą aerografu. Wyposażenie niezbędne do przeprowadzenia metody cyfrowej korelacji obrazu składa się ze stanowiska badawczego,

zestawu kamer, oświetlenia oraz oprogramowania komputerowego. Kamery wykonują serię zdjęć na obciążonym obiekcie rzeczywistym, a oprogramowanie komputerowe, np.: ISTR4D, przetwarza wyniki i uzyskuje się barwne mapy przemieszczeń i odkształceń, tak jak w analizach MES.

Wyniki numeryczne i eksperymentalne można również zapisać w plikach HDF5, gdzie odpowiednia struktura plików zawiera liczbowe wartości przemieszczeń i odkształceń dla poszczególnych węzłów siatki cyfrowej i siatki numerycznej. Siatka numeryczna MES powstaje w wyniku dyskretyzacji elementami skończonymi powierzchni analizowanego zadania. Natomiast proces powstawania regularnej siatki w metodzie cyfrowej korelacji obrazu jest związany z kalibracją kamer oraz strukturą plamkową naniesioną na obiekt badany. Porównując wyniki eksperymentu z wynikami numerycznymi, otrzymane wyniki nigdy nie będą w 100% zbieżne. Model zasymulowany w środowisku komputerowym jest modelem przybliżonym. Obiekt rzeczywisty z kolei już na samym etapie produkcji może zawierać błędy związane z technologią wytwarzania, a kalibracja urządzeń niezbędnych do przeprowadzenia korelacji może mieć istotny wpływ na jakość otrzymanych wyników. Po prawidłowo przeprowadzonej weryfikacji i walidacji, otrzymane wyniki powinny być jak najbardziej zbieżne, a kolejnym etapem jest oszacowanie błędów wynikających z założeń postawionych modelowi numerycznemu i niedokładności przeprowadzenia eksperymentu [2, 4].

2. Tok postępowania

Celem niniejszej pracy było przeprowadzenie weryfikacji wyników obliczeń numerycznych wykorzystując metodę cyfrowej korelacji obrazu. Obiektem badanym był płaskownik aluminiowy poddany statycznej próbie rozciągania. W ramach weryfikacji porównano przemieszczenia wzdłuż osi rozciągania płytki w oprogramowaniu MSC.Nastran\Patran. Realizacja celu niniejszej pracy wymaga wykonania czynności przedstawionych na rysunku 1.



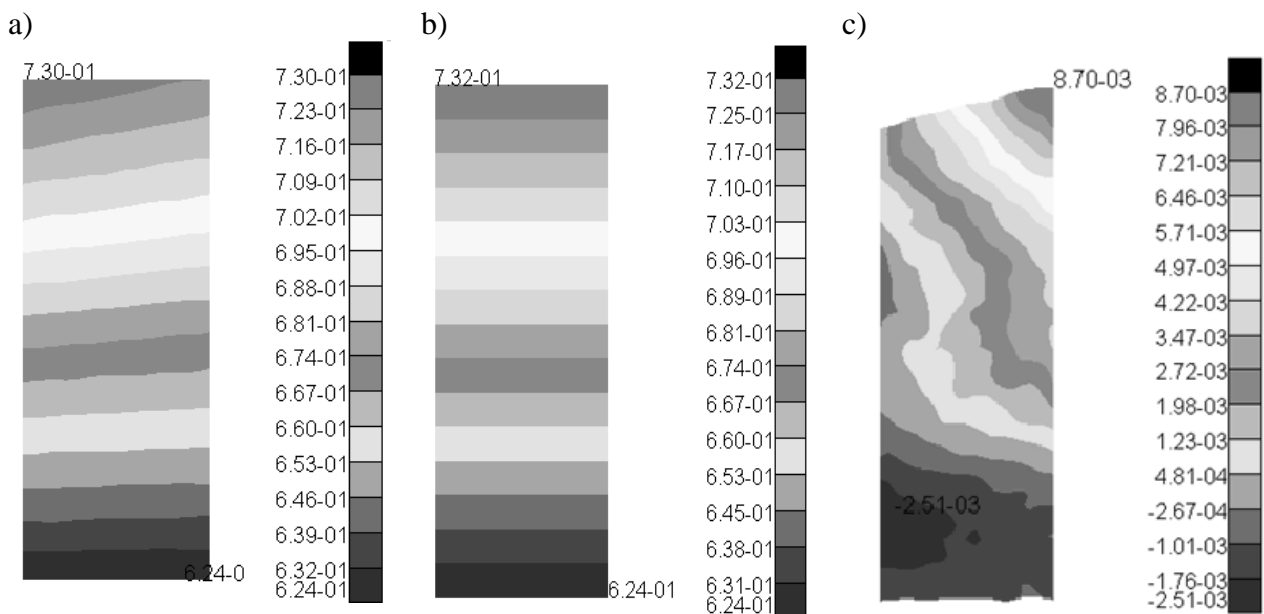
Rys. 1. Schemat postępowania

Fig. 1. Workflow

3. Prezentacja wyników

Badanym obiektem był płaskownik aluminiowy poddany statycznej próbie rozciągania wykorzystując do tego celu uniwersalną maszynę wytrzymałościową MTS Insigth 10. Wymiary badanej płytki wynosiły 20x50x1,6mm. Po przeprowadzeniu cyfrowej korelacji obrazu otrzymano wyniki przemieszczeń wzdłuż osi rozciągania. Wyniki z korelacji zapisane w plikach HDF5 uzyskuje się dla poszczególnych kroków czasowych. Krok 0 dotyczy obiektu nieobciążonego. Kolejne kroki rejestruje się wraz ze wzrastającym obciążeniem, aż do momentu zerwania próbki. W ramach weryfikacji analizowano wyniki dla jednego z wybranych kroków, gdzie siła rozciągająca wynosiła 4602,9N. Model numeryczny został rozpatrzony jako zagadnienie 2D. Następnie po odpowiedniej modyfikacji plików HDF5 z wynikami z korelacji, wczytano je do środowiska MSC.Patran.

Barwną mapę przemieszczeń z wynikami z eksperymentu przedstawiono na rysunku 2a. Wyniki z analizy MES przedstawiono na rysunku 2b. Natomiast na rysunku 2c pokazano mapę błędów.



Rys. 2. Mapa przemieszczeń otrzymana w środowisku Msc Patran z wynikami z: a) cyfrowej korelacji obrazu, b) analizy MES, c) różnic z eksperymentu i analizy MES
Fig. 2. Displacement map obtained in the Msc Patran environment with results from: a) digital image correlation, b) MES analysis, c) differences from experiment and MES analysis

W tabeli 1 zestawiono maksymalne i minimalne rozbieżności w wynikach, wraz z odpowiadającymi im numerami węzłów.

Tabela 1. Maksymalne i minimalne rozbieżności w wynikach
Table 1. Maximum and minimum discrepancies in results

Nr węzła	Przemieszczenia MES [mm]	Przemieszczenia cyfrowa korelacja obrazu [mm]	Różnica [mm]
23	0,731843	0,723139	0,0087038
1061	0,646052	0,648561	-0,0025096

W ramach przeprowadzonej weryfikacji wyciągnięto następujące wnioski:

- Wyniki są zadowalające, gdyż różnica występuje w częściach tysięcznych rozpatrywanych wartości przemieszczeń. Możliwe jest jednak uzyskanie bardziej zbieżnych wartości przemieszczeń,
- Największa różnica w przemieszczeniach wynika najprawdopodobniej ze sposobu zamocowania płytki w szczękach maszyny wytrzymałościowej. Próbka została dodatkowo ścinana, co wpłynęło na wyniki rozbieżne z analizą MES,
- Poślizg w szczękach maszyny wytrzymałościowej miał wpływ na dokładność uzyskanych wyników,
- W przypadku metody cyfrowej korelacji obrazów wpływ na dokładność wyników ma również kalibracja urządzeń i odpowiednie przygotowanie powierzchni próbki,
- W ramach analizy MES uśrednione zostały dane wykorzystane do odtworzenia siatki elementów skończonych na podstawie siatki cyfrowej z korelacji oraz dane uwzględniające przemieszczenia w szczękach co również wpłynęło na rozbieżność wyników.

Przedstawione wyniki badań wstępnych wskazują, że rozwój metod optycznych badań eksperymentalnych daje nowe narzędzia do stosunkowo szybkiej weryfikacji wyników uzyskiwanych w obliczeniach metodą elementów skończonych tak więc mogą być również narzędziem weryfikacji modeli numerycznych.

Literatura

1. Thacker B. H., Doebbling S. W., Hemez F. M., Anderson M. C., Pepin J. E., Rodrioguez E.A., Concepts of Model Verification and Validation. US, 2004-10-30.
2. Górszczyk J., Malicki K., Przenośny system cyfrowej korelacji obrazu 2D do wyznaczania przemieszczeń i odkształceń próbek materiałów drogowych. Czasopismo logistyka, art. 6377, 06-2014, pp. 4093-4097.
3. Banaś K., Wprowadzenie do MES. AGH, 2002-10-24.
4. Zbigniew L., Kowalewski, Dietrich L., Kopeć M., Szymczak T., Grzywna P., Nowoczesne systemy optyczne w badaniach mechanicznych – budowa, działanie, zastosowania. <http://www.ippt.pan.pl/Repository/o1955.pdf>, 23-04-2019.

OBCIĄŻENIE CIĘGIEN

MATEUSZ KITA

Mechanika i Budowa Maszyn, semestr VI, 1 stopień

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Jarosław Kaczmarczyk, prof. PŚ

Streszczenie. Artykuł przedstawia obciążenie cięgien oraz wyprowadzenie wzorów na obciążenie cięgien w zależności od funkcji wielomianowych opisujących obciążenie ciągłe.



LOAD OF THE CABLE

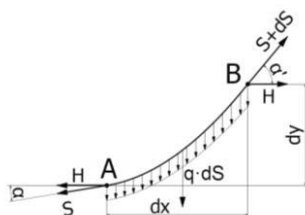
Abstract. The article depicts continuous load of the cables, with derivation of the main polynomial formula of continuous loads function.

1. Wprowadzenie

W pracy poruszane są zagadnienia związane z modelowaniem cięgien. Cięgnem nazywamy element, który pracuje na rozciąganie wzdłużne. Może być ono liną, łańcuchem bądź pasem. Za cięgna niekiedy uznaje się cienkie pręty, których wymiary przekroju poprzecznego są małe w stosunku do ich długości. Stosowane są one do przesyłu energii elektrycznej, napędu przekładni pasowych, klinowych itp. Czasem cięgna mają za zadanie sprzężać konstrukcje np. cięgna wielożyłowe stosowane jako wzmocnienia mostów. Kształt, który przyjmują zależy od rodzaju obciążenia ciągłego, wynikającego z materiału, z którego zbudowane jest cięgno. Przedstawione w pracy wyprowadzenie jest uzyskane na drodze teoretycznej i dlatego przyjęto standardowe założenia dotyczące mechaniki klasycznej.

2. Opis matematyczny

Fragment infinitezymalnie małego cięgna pokazano na rys 1. Na cięgno działają następujące siły: siła rozciągająca H , siła poprzeczna T oraz siła w cięgnie S . Siła S ma zawsze kierunek stycznej do cięgna. Jeśli w pkt. A kąt pomiędzy siłą w cięgnie a osią odciętych wynosi α , to w przesuniętym o bardzo mały odcinek punkcie B kąt wynosi α' . Spowoduje to wzrost siły wewnętrznej w cięgnie S o przyrost dS .



Rys. 1. Cięgno z zaznaczonymi siłami oraz obciążeniem ciągłym
Fig. 1. The cable with marked forces and continuous load

Dokonując rzutowania sił na oś rzędnych otrzymano następującą zależność:

$$\sum F_{iy} = -Htg \alpha - qdS + Htg \alpha' = 0. \quad (1)$$

Kolejnym krokiem jest zapisanie funkcji $tg \alpha$ i $tg \alpha'$ jako przyrostu wartości na osi rzędnych względem osi odciętych. Następujące przekształcenie zapisano poniżej:

$$tg \alpha = \frac{dy}{dx}, \quad (2)$$

$$tg \alpha' \approx tg \alpha + d(tg \alpha) = \frac{dy}{dx} + \frac{d^2y}{dx^2} dx. \quad (3)$$

Podstawiając równania (2) i (3) do równania (1) otrzymano:

$$-H \frac{dy}{dx} - qdS + H \left(\frac{dy}{dx} + \frac{d^2y}{dx^2} \right) dx = 0. \quad (4)$$

Dodatkowo zauważyć można, że przyrost siły wewnętrznej dS można zapisać z twierdzenia Pitagorasa jako pierwiastek sumy kwadratów przyrostów po osiach odciętych i rzędnych.

$$dS = \sqrt{dx^2 + dy^2} = dx \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2}. \quad (5)$$

Podstawiając równanie (5) do prawej strony równania (4) otrzymano:

$$\frac{d^2y}{dx^2} dx = \frac{q}{H} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2} dx. \quad (6)$$

Równanie (6) jest równaniem różniczkowym rzędu II, którego rozwiązaniem jest poszukiwana funkcja $y(x)$. Założono przypadek, że obciążenie ciągle $q = \mathbf{const}$ i dokonano następującego podstawienia:

$$p = \frac{dy}{dx}, \quad (7)$$

$$\frac{dp}{dx} = \frac{q}{H} \sqrt{1 + p^2}. \quad (8)$$

Rozdzielając zmienne i całkując obustronnie otrzymujemy:

$$\int \frac{dp}{\sqrt{1+p^2}} = \int \frac{q}{H} dx. \quad (9)$$

Aby rozwiązać całkę po lewej stronie można skorzystać z I podstawienia Eulera, pokazanego poniżej lub skorzystać z tzw. jedynki hiperbolicznej ($\mathbf{cosh} p^2 - \mathbf{sinh} p^2 = \mathbf{1}$). W opisywanym przypadku zdecydowano się na I podstawienie Eulera.

$$\sqrt{1 + p^2} = t - p. \quad (10)$$

Podnosząc obustronnie do potęgi drugiej otrzymujemy:

$$1 + p^2 = p^2 - 2pt + t^2 \Rightarrow p = \frac{t^2-1}{2t}. \quad (11)$$

Różniczkując obustronnie równanie (11) otrzymano:

$$dp = \frac{2t \cdot 2t - 2 \cdot (t^2-1)}{(2t)^2} \Rightarrow \int \frac{dp}{\sqrt{1+p^2}} = \int \frac{\frac{t^2+1}{2t^2} dt}{\frac{t^2+1}{2t}}. \quad (12)$$

Poprzez wykonane operacje matematyczne całka po lewej stronie równania (9) upraszcza się do postaci:

$$f(t) = \int \frac{dt}{t}. \quad (13)$$

Całkując równanie (9) otrzymujemy następującą zależność:

$$\ln(p + \sqrt{1+p^2}) = \frac{qx}{H} + C_1 \Rightarrow p + \sqrt{1+p^2} = e^{\frac{qx}{H} + C_1} \Rightarrow p = \frac{e^{2(\frac{qx}{H} + C_1)} - 1}{2e^{\frac{qx}{H} + C_1}}. \quad (14)$$

Dzieląc licznik i mianownik prawej strony równania (14) przez $e^{\frac{qx}{H} + C_1}$, otrzymano:

$$p = \frac{e^{\frac{qx}{H} + C_1} - e^{-\frac{qx}{H} + C_1}}{2} = \sinh\left(\frac{qx}{H} + C_1\right). \quad (15)$$

Wiedząc, że $p = \frac{dy}{dx}$ można scałkować obustronnie równanie (15) by otrzymać funkcję zwisu $y(x)$:

$$\int dy = \int \sinh\left(\frac{qx}{H} + C_1\right) dx, \quad (16)$$

$$y(x) = \cosh\left(\frac{qx}{H} + C_1\right) + C_2. \quad (17)$$

Następnie wyznaczono stałe całkowania C_1 i C_2 korzystając z poniższych warunków brzegowych:

$$(y)_{x=0} = 0 \Rightarrow 0 = \frac{q}{H} \cosh(C_1) + C_2 \Rightarrow C_2 = -\frac{H}{q}, \quad (18)$$

$$(y')_{x=0} = 0 \Rightarrow 0 = \sinh C_1 \Rightarrow C_1 = 0. \quad (19)$$

Ostateczna postać wzoru na funkcję zwisu jest następująca:

$$y(x) = \frac{H}{q} \left(\cosh\left(\frac{qx}{H}\right) - 1 \right). \quad (20)$$

Należy zauważyć, że nawet jeśli obciążenie ciągłe $q \neq \text{const}$ to kształt cięgna również może przyjąć postać cosinusa hiperbolicznego. Zakładając, że obciążenie ciągłe q przyjmuje postać funkcji kwadratowej $q = x^2$, to zwis cięgna można opisać równaniem:

$$y(x) = \frac{1}{H} \cdot \frac{x^4}{12} \left(\cosh\left(\frac{x^3}{3H}\right) - 1 \right). \quad (21)$$

Uogólniając, jeśli uznamy, że q jest funkcją wielomianową w postaci x^n , to dla każdego $n > 0$, zwis przyjmie następującą postać:

$$y(x) = \frac{1}{H} \cdot \frac{x^{n+2}}{(n+1)(n+2)} \left(\cosh\left(\frac{x^{n+1}}{H \cdot (n+1)}\right) - 1 \right), \quad (22)$$

gdzie n to dowolna liczba naturalna

3. Podsumowanie

Obciążenie cięgien jest zagadnieniem ważnym w praktyce inżynierskiej. Gdy projektuje się cięgna, istotne jest zadbanie, by wyężenie materiału było takie same w każdym punkcie cięgna. Wyprowadzone wzory i zależności między obciążeniem cięgna a jego zwisem mogą pomóc inżynierom i konstruktorom w trakcie projektowania np. linii elektroenergetycznych. Wyprowadzone wzory mogą być podstawą do optymalizacji jednokryterialnej z warunkami ograniczającymi nakładanymi na naprężenia. Mogą one również posłużyć w trakcie optymalizacji wielokryterialnej projektowanych konstrukcji inżynierskich, w których wykorzystywane są cięgna.

Literatura

1. Leyko J., Mechanika ogólna. Tom.1 Statyka i kinematyka. PWN, Warszawa (2002).
2. Fichtenholz G. M., Rachunek różniczkowy i całkowy. Część 2. PWN, Warszawa (1978).

PROJEKT BRAMY GARAŻOWEJ STEROWANEJ ZDALNIE Z ANALIZĄ WYTRZYMAŁOŚCIOWĄ

inż. KAROL KONIECZNY

Automatyka i Robotyka, semestr VII, 1 stopień

Opiekun naukowy: dr inż. Anna Korczak

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki analizy wytrzymałościowej MES wybranego elementu bramy garażowej mające na celu wybór optymalnej konstrukcji cechującej się najlepszymi właściwościami wytrzymałościowymi. W pracy zostały wykonane modele geometryczne trzech typów bram istniejących na rynku, oraz dzięki wykonanej optymalizacji wielokryterialnej dobrano napęd do zdalnego sterowania ruchem bramy.



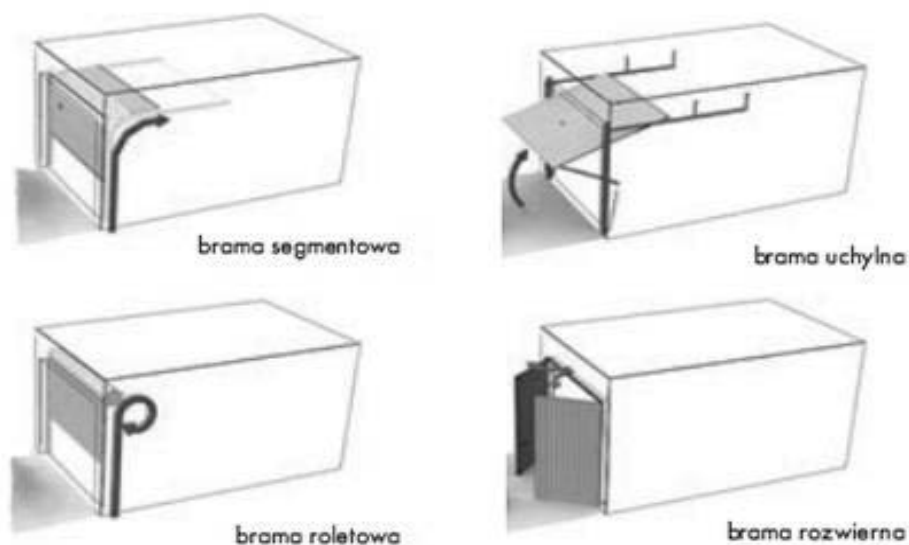
PROJECT OF REMOTE CONTROLLED GARAGE DOOR WITH STRENGTH ANALYSIS

Abstract. The paper presents the results of the FEM strength analysis of a selected garage door element. This analysis is used to select the optimal structure characterized by the best strength properties. Three types of geometry of garage door was proposed by the author. Their shape are similar to the gates existing on the market. Using multi-criteria optimization, a drive for remote control of the gate movement was selected.

1. Wprowadzenie

Bramy od zamierzchłych czasów były używane jako element ogrodzenia. Służą do otwierania i zamykania obszarów, w tym wypadku garaży. Jeszcze kilka lat temu ludzie nie przywiązywali uwagi do wyglądu, wygody, aspektów technicznych budynków mieszkalnych. Dlatego zazwyczaj montowano bramy skrzydłowe, otwierane i zamykane ręcznie, bez warstwy ocieplenia, dodatkowo wyposażone jedynie w stopki uniemożliwiające niechciany ruch skrzydeł. Zamykanie składało się z mosiężnej kłódki zakładanej na prosty mechanizm przesuwany.

W dzisiejszych czasach na rynku istnieje ogromna ilość danego wyrobu, który należy podzielić na podstawowe wersje: segmentowe, uchylne, roletowe - rys. 1. Konstrukcje występują w postaci ocieplonej lub nie. Aby zwiększyć wygodę klientów, oferowane są automatyczne napędy do sterowania zdalnego oraz podłączenia pod system inteligentnego domu który coraz częściej widoczny jest w budynkach prywatnych



Rys. 1. Rodzaje bram garażowych [3]

Fig. 1. Types of garage doors [3]

2. Zastosowanie Metody elementów skończonych (MES)

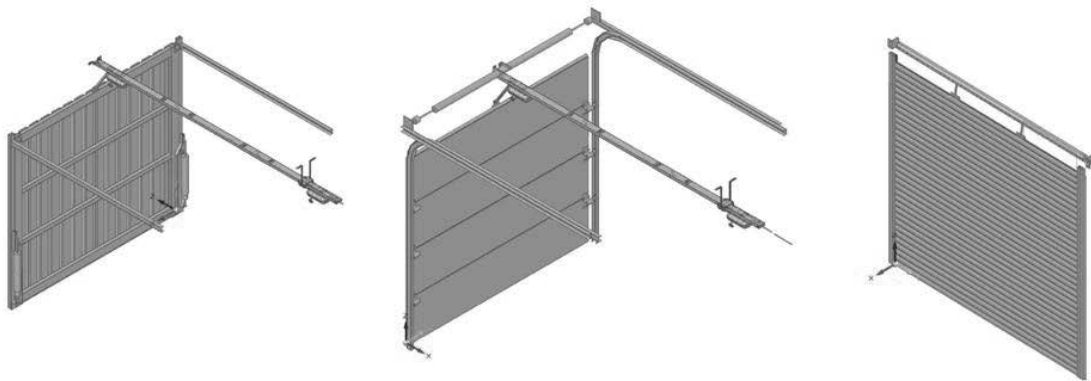
Istotą Metody Elementów Skończonych (z ang. FEM -Finite Element Method) jest odejście od analitycznego rozwiązywania problemu w celu podzielenia obiektu na elementy skończone i następnie wykonanie obliczeń tylko dla wybranych węzłów.

Obecnie produkowane urządzenia, w fazie projektowej w większości zostaje poddana analizie MES. W wyniku obliczeń w podanym środowisku, wyniki pozwalają na przedstawienie informacji na temat obciążonego elementu [1]. Do podstawowych informacji otrzymanych z obliczeń z zastosowaniem MES należą [2] :

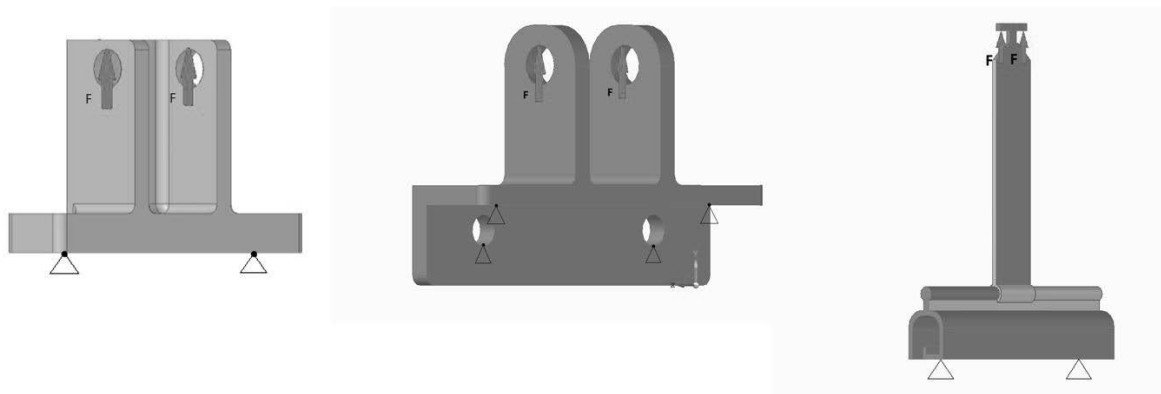
- rozkłady naprężeń,
- rozkłady przemieszczeń,
- rozkłady nacisków,
- rozkłady temperatur,
- reakcje momentów i sił.

3. Praca własna oraz wyniki analiz wytrzymałościowych

W pracy wykonano projekty trzech wybranych konstrukcji bram widocznych na rys. 2. Następnie wytypowano element który jest najbardziej narażony na uszkodzenia, spowodowane przeniesieniem całej siły wytworzonej przez napęd do wprowadzenia w ruch konstrukcji bramy. Na rys. 3. przedstawiono wybrany element w różnych wariantach o zaproponowanych geometriach wziętych do analizy wytrzymałościowej, celem wyboru optymalnego uchwytu o najlepszych parametrach wytrzymałościowych.



Rys. 2. Projekt bramy segmentowej, uchylnej, roletowej
 Fig. 2. Design of sectional, tilting and roller doors



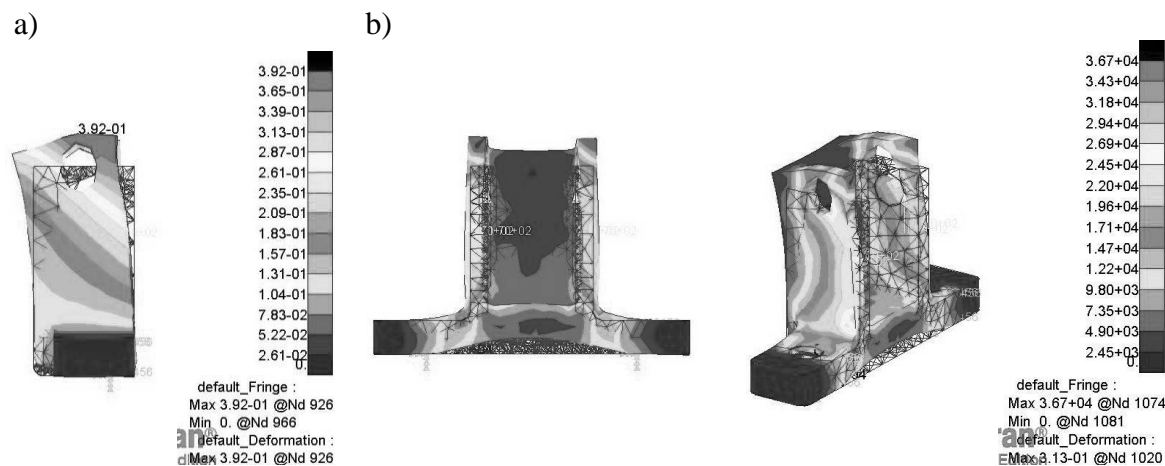
Rys. 3. Warianty uchwytów z zaznaczonym kierunkiem działania siły oraz utwierdzeniem
 Fig. 3. Handle variants with marked direction of force and restraint

Powyższe uchwyty poddano analizie wytrzymałościowej MES w środowisku MSC PATRAN. Model zaimportowano do programu, zdefiniowano właściwości materiałów, warunki brzegowe oraz obciążenie. Wygenerowano siatkę o optymalnej liczbie elementów skończonych w ilości 3000-4000 dla każdego z wybranych wariantów. Następnie wykonano analizę wytrzymałościową. Wyniki przedstawiono poniżej w Tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki przemieszczeń i naprężeń
 Table 1. Results of displacements and stresses

	Obciążenie 300 N	
	Największe przemieszczenie	Największe naprężenie
Wariant 1	0,55 mm	0,065 MPa
Wariant 2	1,84 mm	0,125 MPa
Wariant 3	8,46 mm	0,124 MPa

Wyniki analizy wytrzymałościowej wskazują jednoznacznie na uchwyt nr 1, który cechuje się najmniejszą wartością przemieszczeń i naprężeń o wartościach widocznych w Tabeli 1. Wybrany wariant uchwytu, poddano kolejnej analizie wytrzymałościowej. Na element przyłożono siłę nominalna o wartości 150 N, która panuje w normalnych warunkach działania bram. Poniżej przedstawiono wyniki analizy wytrzymałościowej uchwytu nr 1. na rys. 4.



Rys. 4. Rozkład przemieszczeń (a) oraz naprężeń (b) uchwytu 1. w wariantcie 2.
Fig. 4. Distribution of displacement (a) and stresses (b) for handle 1. in option 2.

Z przedstawionej analizy wytrzymałościowej, wyniki prezentują się następująco:

- największe przemieszczenie wynosi 0,39 mm,
- największe naprężenie wynosi 0,037 MPa.

4. Wnioski

Dzięki wykorzystaniu oprogramowania ze środowiska CAE, wykonano analizę wytrzymałościową MES wybranych elementów konstrukcji bramy. Z otrzymanych map naprężeń i przemieszczeń optymalnym uchwytem charakteryzującym się najmniejszymi wartościami naprężeń oraz przemieszczeń jest element nr. 1.

Środowisko CAE umożliwia zasymulowanie rzeczywistych obciążeń, które występują podczas pracy bram garażowych, dzięki czemu skrócona zostaje faza konstruowania.

Przeprowadzono analizę wielokryterialnej zestawów napędowych do sterowania bramą, z której wyniki jednoznacznie wskazują na produkt firmy SOMMER s9060 TIGA oraz wykonano porównanie cech dostępnych na rynku konstrukcji garażowych, wskazując na bramę typu uchylnego.

Literatura

1. Zienkiewicz O.C., Metoda elementów skończonych. Warszawa , Arkady , 1972
2. Chlebus E., Technika komputerowa CAx w inżynierii produkcji, Warszawa, WNT, 2000.
3. Oficjalna strona internetowa dystrybutora bram i ogrodzeń PAWBRAM <https://pawbram.pl/> (dostęp 20.12.2018).

WPLYW TEMPERATURY I SZYBKOŚCI DRUKOWANIA NA WYTRZYMAŁOŚĆ MATERIAŁU PET-G PO PROCESIE WYDRUKU PRZESTRZENNEGO

inż. KRZYSZTOF KOTAS

Mechanika i Budowa Maszyn, MB2, semestr I, 2 stopień

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Grzegorz Działkiewicz, prof. Pol. Śl.

Streszczenie: Celem niniejszej pracy było zbadanie wpływu temperatury i szybkości drukowania na wytrzymałości materiału PET-G po procesie wydruku przestrzennego. Przeprowadzono statyczną próbę rozciągania próbek wykonanych przy pomocy technologii druku przestrzennego FDM. Na podstawie otrzymanych wyników wykonano analizę regresji oraz sformułowano i rozwiązano problem optymalizacji procesu w celu określenia parametrów zapewniających maksymalną wytrzymałość na rozciąganie.



INFLUENCE OF TEMPERATURE AND PRINTING SPEED ON PET-G MATERIAL STRENGTH AFTER A PROCESS OF 3D PRINTING

Abstract. The aim of the paper was to investigate the influence of temperature and printing speed on PET-G material strength after a process of 3d printing. The static tensile test was carried out on samples made in 3D printing technology FDM. Based on received results a regression analysis was performed, allowing to determine values of process parameters for the maximum tensile strength.

1. Wprowadzenie

Ze względu na specyfikę druku 3D w technologii FDM, półpłynny filament po nałożeniu na powstający element musi związać z materiałem, który już został naniesiony na platformę roboczą. Ze względu na próbę zmniejszenia rozlania materiału na powierzchni, do której ma on przylegać, stosuje się układ chłodzący, który poprzez przyspieszenie wychładzania nałożonego filamentu przyspiesza proces zmiany stanu z półpłynnego na stały. Ma to pozytywny skutek przy druku z materiału PLA, ponieważ nałożony materiał w stopniu minimalnym rozlewa się po powierzchni. Przy wydrukach elementów które wymagają lepszych parametrów mechanicznych, takich jak wytrzymałość na rozciąganie czy udarność, z materiałów PET-G czy ABS, chłodzenie jest zjawiskiem niekorzystnym, które zwiększa skurcz (pomijalnie mały przy PLA), oraz skraca czas jaki jedna warstwa materiału ma na związanie z drugą. Prowadzi to do niekorzystnych zmian własności mechanicznych takich jak wzrost kruchości czy obniżenie wytrzymałości na rozciąganie.

2. Przygotowanie badań eksperymentalnych

Do wydruku próbek do badań wytrzymałościowych został wybrany filament PET-G w kolorze „transparent green” o średnicy 1,75 mm, marki F3D FILAMENT [1]. Zakupione zostały 2 kg rozłokowane na dwóch, jednokilogramowych szpulach, pochodzących z jednej partii materiału.

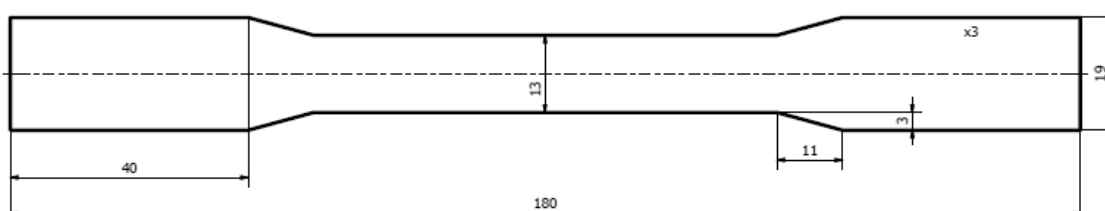
Na podstawie danych uzyskanych w trakcie przeglądu literatury został sporządzony 5-poziomowy centralny kompozycyjny plan eksperymentu, jak w [2]. Ze względu na dyskretne sterowanie mocą wiatraka chłodzącego wydruk, została ona potraktowana jako parametr eksperymentu. Z tego powodu wszystkie eksperymenty przedstawione w Tabeli 1 zostały powtórzone dla warunków chłodzenia odpowiadających 0%, 50% i 100% maksymalnej mocy wiatraka.

Tabela 1. Plan eksperymentu dla wszystkich nastaw warunków chłodzenia
Table 1. Experiments for all cooling conditions settings

Lp.	Temperatura [°C]	Prędkość [mm/s]	Liczba powtórzeń
1	228	29	2
2	228	71	2
3	242	29	2
4	242	71	2
5	225	50	2
6	235	20	2
7	235	80	2
8	245	50	2
9	235	50	5

W celu zapewnienia niezmiennych warunków eksperymentów, zaprojektowano i wykonano komorę izolującą drukarkę od środowiska zewnętrznego.

Dla potrzeb pracy została zamodelowana próbka w środowisku Autodesk Inventor. Ze względu na ułatwienie wydruku zostały zastosowane fazy (pokazane na Rys. 1), zamiast karbów opisanych w [3]. Na Rys. 1 została przedstawiona próbka wraz z głównymi wymiarami.



Rys. 1. Próbką wraz z głównymi wymiarami
Fig. 1. The pattern with main measurement

3. Wyniki eksperymentu

W Tabeli 2 zestawiono podstawowe statystyki określone na podstawie pomiarów wszystkich badanych próbek dla wszystkich nastaw chłodzenia. Analiza jakościowa przedstawionych wyników prowadzi do wniosku, że zastosowanie chłodzenia zwiększa rozstęp wartości obserwowanych cech geometrycznych, przy zbliżonej mierze rozproszenia.

Tabela 2. Zestawienie cech geometrycznych badanych próbek
Table 2. List of geometric characteristics of the tested specimens

	Chłodzenie 0%		Chłodzenie 50%		Chłodzenie 100%	
	Grubość [mm]	Szerokość [mm]	Grubość [mm]	Szerokość [mm]	Grubość [mm]	Szerokość [mm]
Wartość nominalna	3,30	13,00	3,30	13,00	3,30	13,00
Średnia	3,26	13,43	3,53	13,46	3,55	13,37
Odchylenie standardowe	0,11	0,10	0,25	0,13	0,16	0,17
Rozstęp	0,49	0,49	1,20	0,74	0,61	1,01

W Tabeli 3 przedstawiono uśrednione wartości pomiarów wytrzymałości na zginanie próbek zgodnie z założonym planem eksperymentu, dla wszystkich stopni chłodzenia. Najwyższe wartości wytrzymałości na rozciąganie zostały pogrubione.

Tabela 3. Wyniki pomiarów wytrzymałości na rozciąganie R_m
Table 3. The results of tensile strength R_m measurements

Parametry procesu			Chłodzenie 0%	Chłodzenie 50%	Chłodzenie 100%
Lp.	Temperatura [°C]	Prędkość [mm/s]	Średnie R_m [MPa]	Średnie R_m [MPa]	Średnie R_m [MPa]
1	228	29	32,25	26,85	24,05
2	228	71	30,45	21,55	16,70
3	242	29	34,20	35,15	29,60
4	242	71	33,80	31,30	21,65
5	225	50	31,70	25,55	22,50
6	235	20	35,30	34,05	22,95
7	235	80	32,80	19,55	16,35
8	245	50	34,90	30,00	26,20
9	235	50	34,38	28,24	24,84
Średnia			35,60	28,03	22,76
Odchylenie standardowe			1,61	4,98	3,99
Rozrzut			4,85	15,60	13,25

Analiza regresji pozwoliła na uzyskanie modeli liniowych procesu ze względu na otrzymane wartości wytrzymałości na rozciąganie próbek; człony wyższych rzędów, w równaniu regresji okazały się statystycznie nieistotne. Korzystając z rozwiązania Lagrange'a dla ekstremum warunkowego, poszukiwano maksimum R_m w obszarze planu eksperymentu, co daje optymalne rozwiązanie x^* dla parametrów procesu w postaci [4]:

$$x^* = \rho \frac{b}{\|b\|} \quad (1)$$

gdzie:

$\|b\|$ to długość wektora współczynników przy składnikach liniowych funkcji regresji; b to wektor współczynników przy składnikach liniowych funkcji regresji, a $\rho = 1$ i oznacza promień planu eksperymentu w zmiennych zakodowanych.

Po weryfikacji wyników optymalizacji okazało się, że największe różnice pomiędzy uzyskanymi optymalnymi wartościami parametrów procesu, a tymi zaobserwowanymi podczas doświadczeń, mają miejsce przy braku chłodzenia wydruku. Wartości optymalne uzyskane na podstawie modelu empirycznego wyniosły odpowiednio 243,64 °C i 34,88 mm/s. Wartości uzyskane dla poziomów mocy wiatraka chłodzącego 50% i 100% wyniosły odpowiednio 241,34 °C i 26,81 mm/s oraz 240,38 °C i 24,72 mm/s. Ze względu na małe różnice między optymalnymi wartościami R_m przewidywanymi przez model regresyjny, a wartościami uzyskanymi w eksperymencie, zaniechano weryfikacji doświadczalnej wyznaczonych optimów.

Na Rys. 2 przedstawiono różne rodzaje zniszczeń próbek, powstałe w trakcie badania. Najczęstszym zaobserwowanym typem zniszczenia było wydłużenie próbki wraz z dekohezją.



Rys. 2. Przykłady typów zniszczeń próbek
Fig.2 Examples of specimen damage

4. Podsumowanie

Analizując dane przedstawione w powyższym artykule ustalono, że temperatura i szybkość drukowania ma istotny wpływ na wytrzymałość elementu drukowanego z materiału PET-G. Temperatura procesu ma również wpływ na dokładność wymiarową powstającego elementu. Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono optymalne parametry procesu druku. Maksymalną wytrzymałość na rozciąganie próbek uzyska się w trakcie wydruku bez chłodzenia z temperaturą 244 °C i szybkością 35 mm/s.

Literatura

1. Strona producenta materiału, użytego w niniejszej pracy: <https://f3dfilament.com/> (dostęp na dzień 13.01.2019).
2. Mańczak K., Technika planowania eksperymentu, WNT, Warszawa (1976).
3. PN-EN ISO 527-1:2012. Statyczna próba rozciągania tworzyw sztucznych i materiałów kompozytowych.
4. Del Castillo E, Process Optimization. A Statistical Approach, Springer Science, New York (2007).

MODELOWANIE PROCESU LASEROWEJ OBRÓBKI POWIERZCHNI

inż. JAKUB LISICKI

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

Opiekun naukowy: dr inż. Jacek Ptaszny, mgr inż. Marcin Hatłas

Streszczenie. Niniejszy artykuł traktuje o zastosowaniu metody elementów skończonych jako narzędzia do modelowania procesów obróbki powierzchniowej przy wykorzystaniu promieniowania laserowego. Jego celem było opracowanie modelu numerycznego, dzięki któremu możliwe byłoby wyznaczanie rozkładu temperatur w obrabianych detalach. Aby to osiągnąć posłużono się środowiskiem ANSYS Mechanical, będącym częścią pakietu ANSYS Workbench.

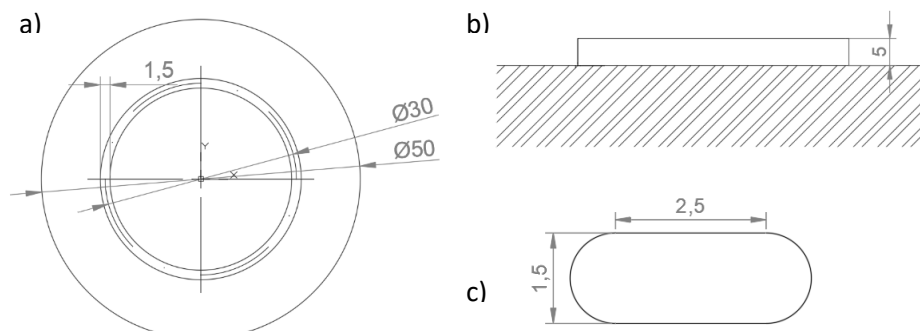


MODELLING THE PROCESS OF SURFACE LASER TREATMENT

Abstract. This article deals with the application of finite element method as a tool for modeling the process of surface treatment with the use of laser radiation. Its purpose was to develop a numerical model that would allow to determine the temperature distribution in the processed details. To achieve this, the ANSYS Mechanical environment was used, which is part of the ANSYS Workbench suite.

1. Wprowadzenie

Celem pracy było przygotowanie modelu numerycznego uproszczonego procesu stopowania laserowego, w którym miedziana próbka poddawana była oddziaływaniu laserowego źródła ciepła. Należało wyznaczyć rozkład temperatur w obrabianym elemencie. Wymagano, aby w modelu zachowane były niezbędne parametry takie jak wymiary detalu, kształt i rozmiar plamki lasera.



Rys. 1. Wymiary charakterystyczne (mm): a) rzut górny, b) rzut boczny, c) plamka lasera

Fig. 1. Model dimensions (mm): a) top view, b) side view, c) laser beam section

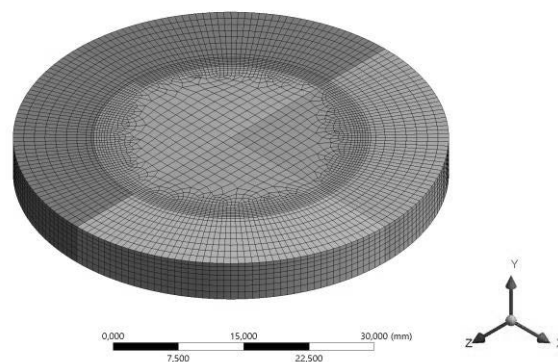
Dodatkowo należało uwzględnić maksymalną gęstość lasera, która wynosiła $163.4 \frac{W}{mm^2}$, a także czas trwania obróbki wynoszący 37.7 sekundy.

2. Model numeryczny

Do utworzenia modelu posłużono się środowiskiem ANSYS Workbench w wersji 19.2. Przygotowanie symulacji składało się z kilku etapów: utworzenia geometrii, oraz przygotowanie jej do wygenerowania odpowiedniej siatki elementów skończonych, opracowania modelu materiałowego, obejmującego zmiany parametrów termomechanicznych oraz zdefiniowania warunków brzegowych.

2.1. Geometria i siatka elementów skończonych

Geometrię, która wiernie odzwierciedlałaby rzeczywiste wymiary, przygotowano w programie SpaceClaim Direct Modeler, który jest zintegrowany w środowisku ANSYS Workbench. Za pomocą funkcji Split Body wydzielono fragment, na który oddziaływała ruchoma wiązka promieniowania laserowego. Dodatkowo całą bryłę podzielono na mniejsze części, aby można było wygenerować regularną siatkę elementów skończonych. Aby to osiągnąć posłużono się funkcjami kontroli siatki, takimi jak metoda Sweep, czy też Edge Sizing, pozwalający na określenie wielkości elementu wzdłuż wybranej krawędzi. Należało również pamiętać o ograniczeniach studenckiej licencji oprogramowania ANSYS, które wprowadza limit ilości węzłów i elementów w symulacji wynoszący 32000. Efektem pracy była liniowa pokazana na Rys. 2 siatka elementów skończonych, składająca się z 26520 elementów typu Hex8 oraz Wed6 o minimalnym współczynniku zniekształcenia na poziomie 0,31.

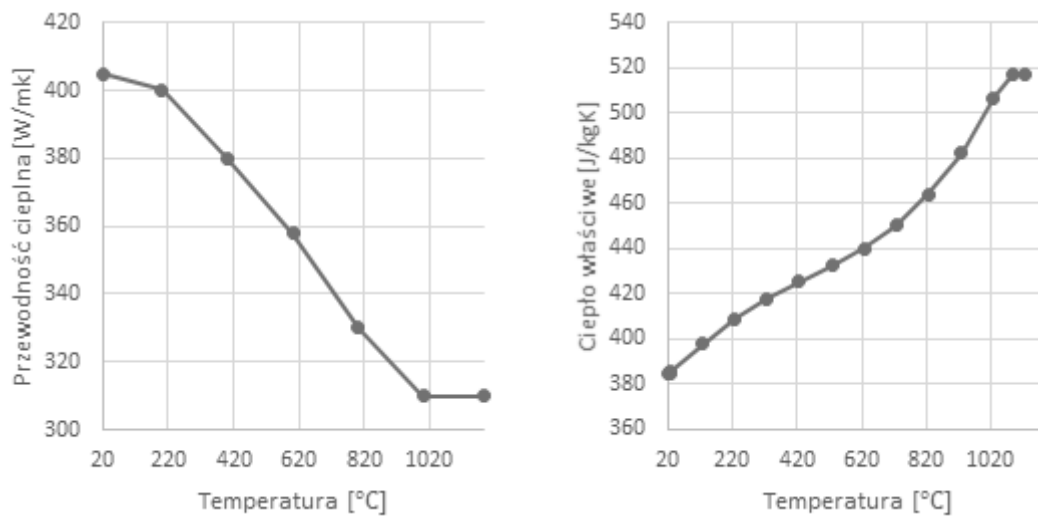


Rys. 2. Utworzona siatka elementów skończonych
Fig. 2. Finite element mesh

2.2. Model materiału

Jednym z kluczowych etapów przygotowywania symulacji było zdefiniowanie odpowiedniego modelu materiałowego. Było to o tyle ważne, że w przypadku większości materiałów, w tym miedzi, własności termomechaniczne zmieniają się znacznie wraz ze wzrostem temperatury. Na podstawie danych z baz materiałowych, a także literatury określono

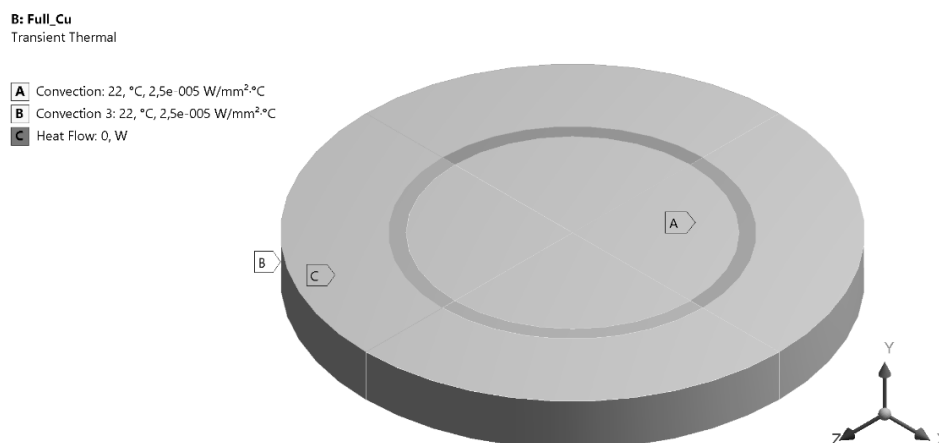
zmiany ciepła właściwego oraz przewodności cieplnej w funkcji temperatury [1, 2]. Przebiegi zmienności tych parametrów pokazano na Rys. 3. Nie zdefiniowano krzywej entalpii, przez co model nie uwzględniał ciepła utajonego przemiany fazowej.



Rys. 3. Zmienność przewodności cieplnej oraz ciepła właściwego funkcji temperatury
 Fig. 3. Thermal conductivity and specific heat versus temperature

2.3. Warunki brzegowe

Istotną trudnością, napotkaną podczas przygotowywania symulacji, była odpowiednia implementacja ruchomego źródła ciepła. Nie można było wykorzystać predefiniowanej w środowisku Mechanical funkcji, ponieważ dotychczas nie została takowa wprowadzona. Problem ten rozwiązano posługując się iteracyjnym skrypcem w języku APDL, który pozwala na konfigurowanie modelu numerycznego w sposób niedostępny z poziomu interfejsu użytkownika. Dzięki temu uzyskano poruszający się po wydzielonym, środkowym obszarze geometrii, strumień ciepła o wymaganej gęstości mocy. Dodatkowo, jak pokazano na Rys. 4 na górnych i bocznych powierzchniach próbki zadano warunek konwekcji o wartości współczynnika wnikania ciepła na poziomie $25 \frac{W}{m^2K}$.

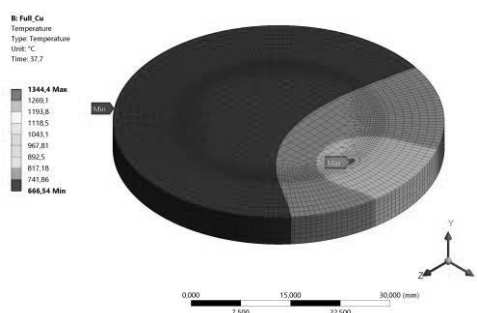


Rys. 4. Przyjęte warunki brzegowe konwekcji oraz przepływu ciepła
 Fig. 4. Convection and heat flow boundary conditions

Na dolnej, oznaczonej literą C, opierając się na literaturze [3], zadano warunek zerowego przepływu ciepła.

3. Obliczenia i wyniki

Aby odwzorować rzeczywisty, ciągły charakter poruszającego się źródła ciepła, w modelu numerycznym ruch lasera podzielony został na 400 kroków o równym odstępem kątowym oraz czasowym. Efektem tak przygotowanej analizy był rozkład temperatury pokazany na Rys. 5.



Rys. 5. Rozkład temperatury dla czasu $t = 37,70$ sekundy

Fig. 5. Temperature distribution at time $t = 37,70$ s

4. Wnioski

Na drodze przeprowadzonej symulacji uzyskano maksymalną wartość temperatury na poziomie 1344 stopni Celsjusza. Pokazuje to, że dla zadanych parametrów obróbki uzyskano przetopienie materiału, a tym samym zmianę właściwości powierzchni. Dla sprawdzenia poprawności utworzonego modelu należałoby przeprowadzić jego walidację, na przykład w postaci badania termograficznego. W przypadku wystąpienia istotnych różnic między uzyskanymi wynikami konieczne byłoby wprowadzenie odpowiednich poprawek, takich jak: zagęszczenie siatki w miejscu oddziaływania strumienia ciepła dla jego lepszego odwzorowania, uwzględnienie ciepła utajonego przemiany fazowej, czy zdolności absorpcyjnej obrabianej powierzchni. Zjawiska te zostały celowo pominięte w opisywanym modelu dla jego uproszczenia oraz skrócenia czasu obliczeń [3, 4].

Literatura

1. National Institute of Standards and Technology, copper parameters, <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?Name=copper&Units=SI&cTG=on&cTC=on&cTP=on>, dostęp z dnia 1.02.2019r.
2. Jian Z., Deying L., Longzhi Z., Mingjuan Z., Simulation of Temperature Field in Selective Laser Sintering of Copper powder, East China Jiaotong University, China (2010).
3. de La Batut B., Feragni O., Brotan V., Bambach M., El Mansouri M., Analytical and Numerical Temperature Prediction in Direct Metal Deposition of Ti6Al4V, Journal of Manufacturing and Materials Processing, Vol. 1, No. 3, pp. 1-14 (2017).
4. Luo Z., Zhao Y., A survey of finite element analysis of temperature and thermal stress fields in powder bed fusion. Additive Manufacturing, Additive Manufacturing, No. 21, pp. 318-332 (2018).

ANALIZA MES KOMPOZYTÓW WZMACNIANYCH WŁÓKNAMI

inż. PIOTR OŚWIĘCIMSKI

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

Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Piotr Fedeliński

Streszczenie. Celem pracy była analiza MES kompozytów wzmacnianych włóknami na podstawie modelu numerycznego reprezentatywnego elementu objętościowego. Analizowany element ma przekrój kołowy i poddany jest obciążeniu rozciągającemu. Próbkę modelowano w programie MSC Patran/Nastran przy użyciu trójwęzłowych trójkątnych elementów skończonych z wykorzystaniem osiowej symetrii. Wyznaczono przemieszczenia, naprężenia i sprężyste własności zastępcze.



FEM ANALYSIS OF FIBER – REINFORCED COMPOSITES

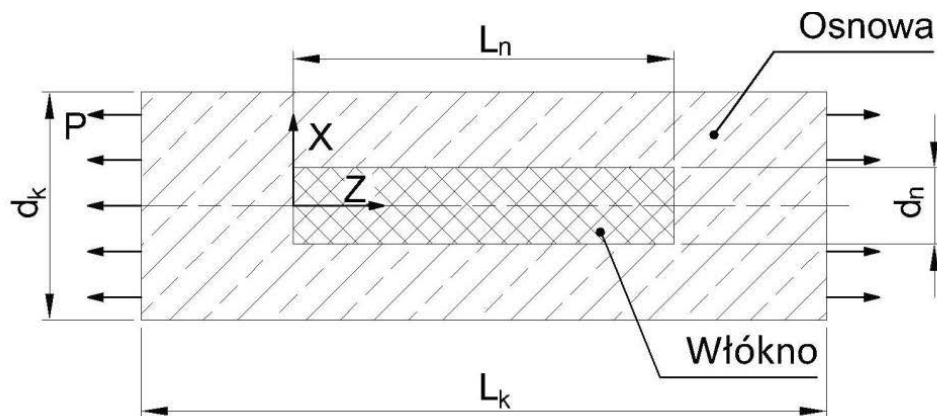
Abstract. The aim of the work was the FEM analysis of fiber-reinforced composites based on the numerical model of the representative volume element. The representative volume element is circular in cross section and subjected to a tensile load. The sample was modeled in the MSC Patran/Nastran code using three-node triangular finite elements with the application of the axial symmetry. Displacements, stresses and effective elastic properties were calculated.

1. Wprowadzenie

Kompozyty są materiałami niejednorodnymi, a co więcej w większości przypadków również anizotropowymi. Komponenty zbrojące mogą posiadać postać cząstek o różnej wielkości i kształcie, ale najczęściej wykorzystywane jest wzmocnienie w formie włókien. Ilość fazy zbrojącej w materiałach wzmacnianych włóknami, wyrażona w procentowym udziale objętościowym waha się w granicach od kilku procent do około 70% [1]. Średnice włókien zmieniają się od kilku do kilkudziesięciu mikrometrów. Osobliwość mikrostruktury kompozytów zbrojonych włóknami polega na tym, że jeden z wymiarów fazy zbrojącej jest znacznie większy od pozostałych wymiarów. W materiałach tych z reguły głównie włókna stanowią fazę przenoszącą obciążenia, natomiast osnowa jest fazą łączącą i przekazującą obciążenia na włókna [2]. W celu uzyskania możliwie najlepszego efektu wzmocnienia należy zatem, poprawnie pod względem jakościowym i ilościowym, dobrać i połączyć ze sobą odpowiednie włókna i osnowę. Istotnym aspektem doboru składników kompozytu są wymiary włókna, jego udział objętościowy oraz różnice właściwości fizycznych stosowanych materiałów [3].

2. Analizowane warianty kompozytów

Obiektem badań jest walcowa komórka elementarna kompozytu zbrojonego krótkimi włóknami przedstawiona na rysunku 1. W ramach badań analizowano wpływ udziału objętościowego włókna na stan naprężenia i własności zastępcze.



Rys. 1. Analizowana komórka elementarna

Fig. 1. The analyzed elementary cell

Analizowano również wpływ właściwości materiałowych na zachowanie dwóch rodzajów kompozytów: kompozytu zbrojonego włóknami szklanymi i osnowie epoksydowej oraz kompozytu zbrojonego włóknami borowymi i osnowie epoksydowej. Dane materiałowe oraz wymiary próbek przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wymiary i własności kompozytu
Table 1. Dimensions and properties of composites

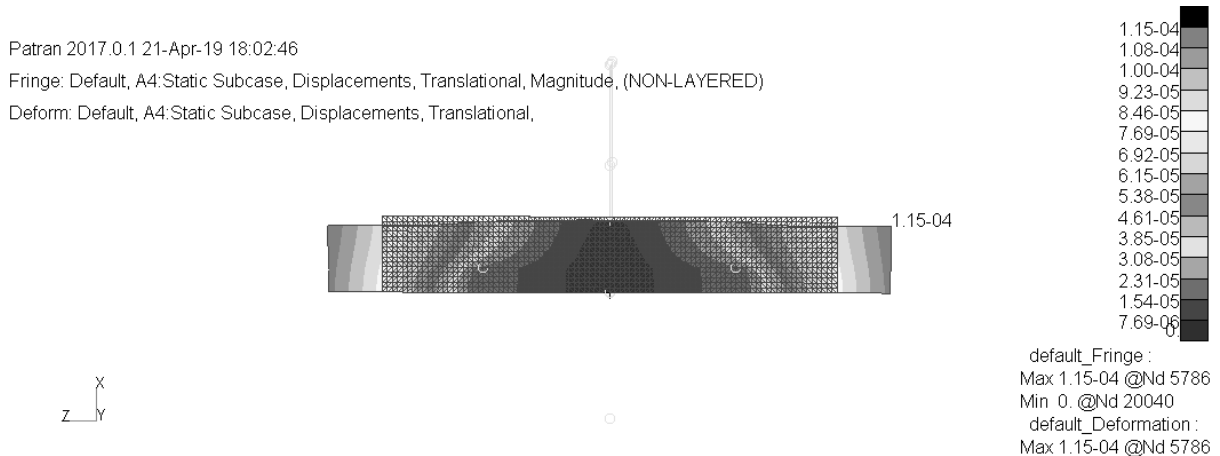
Nr próbki	1	2	3	4	5	6
d_k [mm]	0,3	0,45	0,9	0,3	0,45	0,9
d_n [mm]	0,15			0,15		
L_n [mm]	0,75			0,75		
L_k [mm]	1,35			1,35		
Rodzaj próbki	Szlano-epoksydowa			Borowo-epoksydowa		
E włókna [MPa]	66500			420000		
E osnowy [MPa]	3430			3430		
P [MPa]	7,94			7,94		
ν włókna	0,23			0,27		
ν osnowy	0,35			0,35		

3. Model MES

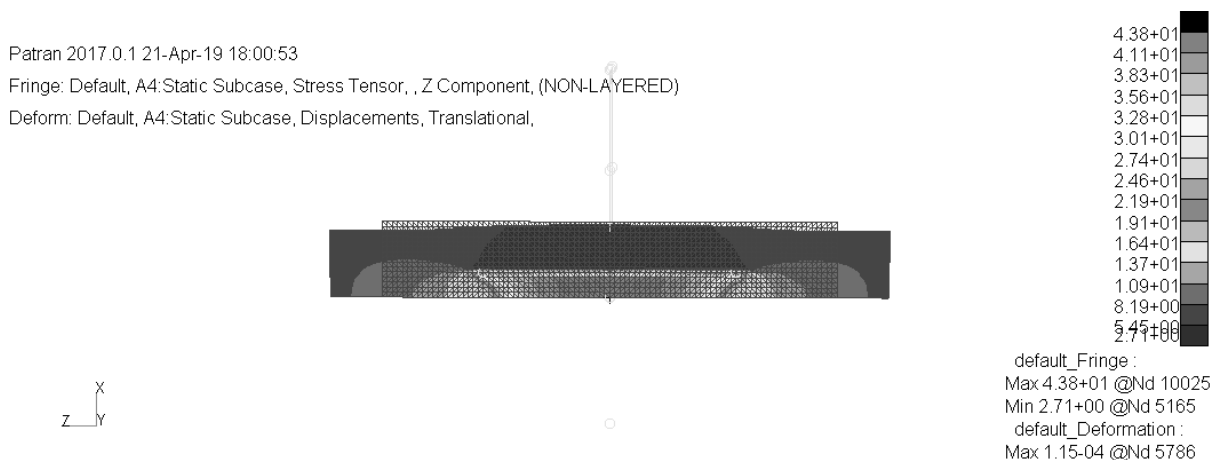
Komórka jednostkowa kompozytu została zamodelowana w środowisku MSC Patran/Nastran. Geometrię odwzorowano przy użyciu elementów trójkątnych. Włókno zbudowane jest z 500 elementów oraz 311 węzłów zaś osnowa z 2200 elementów skończonych oraz 1145 węzłów (dla próbki o średnicy osnowy równej 0,45mm). Model uwzględnia osiową symetrię komórki, dlatego modelowana jest jedynie połowa przekroju podłużnego komórki elementarnej. Warunkami brzegowymi modelu był warunek osiowej symetrii oraz symetryczne siły powierzchniowe na końcach próbki. Problem rozwiązano w zakresie liniowej statyki.

4. Przemieszczenia, naprężenia i własności zastępcze

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono odpowiednio mapę przemieszczeń wypadkowych i rozkład naprężenia normalnego w kierunku obciążenia dla próbki szklano-epoksydowej o średnicy 0,45mm. Zestawienie wartości powyższych wielkości dla poszczególnych próbek przedstawiono w tabeli 2. Na rysunku 4 przedstawiono naprężenia normalne wzdłuż włókna uzyskane metodą analityczną [1] i numeryczną.



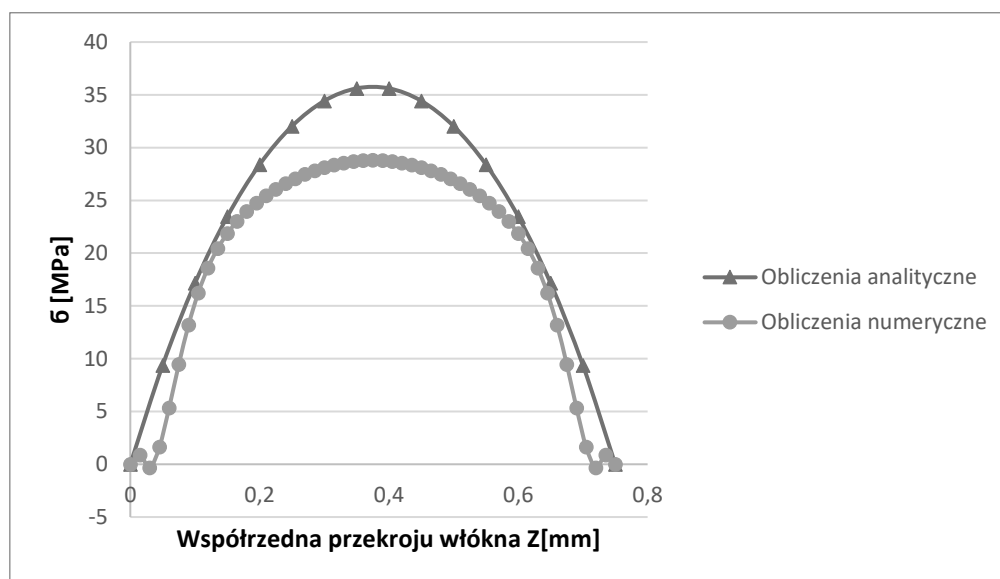
Rys. 2. Mapa przemieszczeń wypadkowych [mm]
Fig. 2. Map of resultant displacements [mm]



Rys. 3. Mapa naprężenia normalnego [MPa]
Fig. 3. Map of normal stress [MPa]

Tabela 2. Przemieszczenia, naprężenia, własności zastępcze
Table 2. Displacements, stresses, effective properties

Nr próbki	1	2	3	4	5	6
Maks. przem. wypadkowe [um]	0,093	0,115	0,154	0,082	0,103	0,152
Maks. napr. osiowe [MPa]	27,1	43,8	58,6	30,4	54,7	80,9
Maks. napr. styczne. [MPa]	4,94	7,76	10,3	6,47	11,0	15,9
Zast. moduł Younga [MPa]	12190	7323	4403	61287	29144	9859



Rys.4. Naprężenia normalne wzdłuż włókna obliczone metodą analityczną i numeryczną [MPa]

Fig.4. Normal stresses along the fiber calculated by analytical and numerical methods [MPa]

5. Wnioski

Wraz ze wzrostem średnicy osnowy wzrastają naprężenia we włóknie, ponieważ objętościowo materiał jest bardziej obciążony. W każdym przypadku żywica posiada mniejszy poziom naprężeń niż włókno. Różnica sztywności wpływa na wielkość naprężeń stycznych. Rozkład naprężeń normalnych we włóknie uzyskany za pomocą obliczeń analitycznych i obliczeń MES jest podobny.

Literatura

1. Gibson R., Principles of composite material mechanics, McGraw – Hill, Inc., New York (1994).
2. Hyla I, Elementy mechaniki kompozytów, Politechnika Śląska, Gliwice (1995)
3. Hyla I, Ślężiona J, Kompozyty. Elementy mechaniki i projektowania, Politechnika Śląska, Gliwice (2004).

KOMPUTERY KWANTOWE – PRZYSZŁOŚĆ SYMULACJI NUMERYCZNYCH ?

JAKUB PODGÓRSKI

Zarządzanie i Inżynieria Produkcji, semestr IV, 1 stopień.

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Wacław Kuś prof. PŚ

Streszczenie. Artykuł ten ma na celu przybliżenie podstawowych parametrów komputerów kwantowych oraz możliwych obszarów ich stosowania. Przedstawiono rozwiązania obecnie dostępne na rynku oraz dwa przykłady rozwiązania prostych zagadnień optymalizacji dla problemu sformułowanego jako programowanie binarne bez ograniczeń.



QUANTUM COMPUTERS – FUTURE FOR NUMERICAL SIMULATIONS ?

Abstract. The aim of this work was to refer basic parameters of quantum computers together with their possible applications. The solutions currently available on the market and two examples of solving simple optimization problems for a problem formulated as unconstrained binary programming are presented.

1. Wprowadzenie

Historia komputerów kwantowych sięga wczesnych lat 80. Przełom nastąpił w 1994, gdy Peter Shore opublikował swój algorytm służący do faktoryzacji liczb całkowitych. Algorytm ten przez swoją złożoność wielomianową, zajmuje zbyt dużo czasu by stosować go na klasycznych komputerach, natomiast komputery kwantowe mogą znacznie przyspieszyć jego wykonanie. Przewagę komputera kwantowego nad klasycznym stanowi kubit [8]. Kubit (inaczej bit kwantowy) w odróżnieniu od bitu, który przyjmuje jedynie wartości 0 lub 1 może przyjąć oba stany naraz. Z superpozycją kubitów wiążą się możliwości obliczeniowe komputerów kwantowych. Dwa kubity reprezentują cztery stany (00,01,10,11), trzy kubity osiem, pięć to trzydzieści dwa. Jako że poszczególne kubity nie są od siebie niezależne – czyli są splątane, możemy przeprowadzać na nich obliczenia równoległe, a więc znacznie szybciej niż w komputerze klasycznym, który wykonuje jedną operację po drugiej. Inną istotną cechą jest wykorzystanie zjawiska tunelowania [6]. Polega ono na przenikaniu elektronu przez barierę potencjału, nawet jeśli nie ma on dostatecznej energii do jej pokonania. W zjawisku tunelowania wykorzystywana jest nieokreśloność położenia cząstki. Położenie to jest opisane poprzez funkcję falową, która określa prawdopodobieństwo jej lokalizacji. Napotkana bariera, nawet „klasycznie” nieprzekraczalna dla cząstki, nie zeruje prawdopodobieństwa wystąpienia cząstki po jej drugiej stronie. Zjawisko to istotne jest w rozwiązywaniu problemów wielomodalnej optymalizacji.

2. Dostępne komputery kwantowe

Rynek komputerów kwantowych rozwija się bardzo dynamicznie, poniżej zaprezentowano krótkie zestawienie dostępnych komputerów kwantowych.

Google "BRISTLECONE" [1] zaprezentowany w marcu 2018 roku, 72 kubitowy kwantowy procesor ogólnego zastosowania. Głównym celem postawionym przez Google Quantum Ai Lab była minimalizacja błędów obliczeń. Google udostępniło oprogramowanie Cirq służące do tworzenia algorytmów kwantowych.

IBM Q SYSTEM ONE 20 [7] zaprezentowany w 2019 roku, 20 kubitowy komputer. IBM udostępnia za pośrednictwem swojego serwisu IBM Q Experience dwa komputery kwantowe z 5 kubitami. Dzięki przyjaznemu interfejsowi serwisu, i prostocie jego użytkowania udostępnionych komputerach skorzystało już ponad 100 000 osób i przeprowadziło ponad 6 000 000 eksperymentów.

Kanadyjska firma D-Wave, i jej komputer 2000Q [2] zaprezentowany w 2017, posiada 2038 kubitów. Jest obecnie liderem w segmencie rozwiązań kwantowych. Pomimo początkowych zastrzeżeń dotyczących sposobu działania komputerów, przedstawione przez firmę dowody, potwierdziły ich wiarygodność i przynależność do grupy komputerów kwantowych. D-Wave jest pierwszym komercyjnie sprzedawanym komputerem kwantowym, korzystają z jego możliwości między innymi: Lockheed Martin, NASA oraz Uniwersytet południowej Karoliny. D-Wave udostępnia swój komputer w chmurze. W 2020 roku planuje udostępnić zamawiającym 5000 kubitowy komputer o nowej architekturze połączeń.

Intel "Tangle Lake" [5] został przedstawiony w 2018 roku 49 kubitowy procesor, jest trzecią generacją procesorów kwantowych produkcji Intelu (wcześniej 7 i 17 kubitów).

3. Zastosowanie komputerów kwantowych

Komputery kwantowe, ich sposób działania i możliwości obliczeniowe, znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach, takich jak uczenie maszynowe, optymalizacja, symulacje. Ze względu na ograniczoną liczbę kubitów rozwiązywane są proste problemy oraz poszukiwane są nowe algorytmy i zastosowania. W uczeniu maszynowym z zastosowaniem komputerów kwantowych używany jest algorytm Grovera, który pozwala na kwadratowe przyspieszenie operacji przeszukiwania nieposortowanej bazy danych - N operacji dla klasycznego komputera i \sqrt{N} dla komputera kwantowego. Kwantowe uczenie maszynowe wykorzystywane jest również w zaawansowanych symulacjach. Google pracuje nad jego implementacją w swoim systemie pozycjonowania stron, NASA skutecznie je wykorzystwała w systemie rozpoznawania cyfr, a Los Alamos National Lab do rozpoznawania twarzy. Optymalizacja z zastosowaniem kwantowych metod jest jedną z najbardziej obiecujących gałęzi tej technologii. Stosuje się w niej między innymi problem optymalizacji binarnej (QUBO). Kwantową optymalizację zastosowano między innymi przy optymalizacji dystrybucji taksówek w Pekinie. W 2012 roku naukowcy z Harvardu przeprowadzili symulację związania białka na 128 kubitowym komputerze D-Wave, w wyniku której udało się uzyskać konfigurację białka o minimalnej energii. Komputery kwantowe są od 2012 roku używane do kalkulacji ryzyka, oraz tworzenia modeli biznesowych.

Największym problemem w stosowaniu obecnych i przyszłych komputerów kwantowych jest niewielka liczba algorytmów dla nich przeznaczonych. Ze względu na specyficzne operacje niespotykane w typowych komputerach konieczne jest opracowanie nowych algorytmów oraz

adaptacja istniejących algorytmów dla potrzeb komputerów kwantowych. Niektórzy producenci podejmują próby tworzenia oprogramowania pozwalającego na automatyczną konwersję typowych algorytmów do postaci, która może być użyta w komputerze kwantowym.

4. Przykład zastosowania komputera kwantowego D-Wave do rozwiązania zadania optymalizacji

Komputer kwantowy D-Wave pozwala na rozwiązanie tylko jednego typu problemu minimalizacji – programowania binarnego bez ograniczeń [3,4] (ang. unconstrained binary programming lub quadratic unconstrained binary optimization QUBO). Funkcja celu określona jest za pomocą funkcji:

$$f(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} \quad (1)$$

gdzie macierz \mathbf{Q} jest macierzą górną trójkątną zawierającą liczby rzeczywiste będące mnożnikami, \mathbf{x} jest wektorem zawierającym wartości binarne z zakresu $\{0,1\}$.

Ze względu na ograniczenie możliwych do rozwiązania zadań optymalizacji, komputer D-Wave wymaga zazwyczaj konwersji zadania do sformułowania programowania binarnego bez ograniczeń, nie zawsze jest to możliwe, często jest to trudne. Dodatkowo ze względu na fizyczną budowę procesora D-Wave wartości niezerowe w macierzy \mathbf{Q} są dopuszczalne tylko dla wybranych elementów co powoduje dalsze ograniczenia.

Producent D-Wave udostępnia w chmurze jeden ze swoich komputerów umożliwiając prowadzenie testów obliczeniowych. W celu wykorzystania komputera konieczne jest użycie odpowiedniego API lub oprogramowania Ocean dostarczanego w postaci bibliotek języka Python [4]. Skrypt w języku Python jest bardzo prosty, zawiera instrukcje łączenia się z komputerem dostępnym w chmurze, wysłanie macierzy współczynników \mathbf{Q} , uruchomienie obliczeń na komputerze kwantowym oraz pobranie wyników. Dodatkowo można skorzystać z funkcji umożliwiających jak najlepsze mapowanie problemu do architektury komputera. Rozwiązano dwa przykładowe problemy, pierwszy z nich jest przykładem z dokumentacji systemu.

Dla pierwszego problemu poszukiwane jest minimum funkcji dwóch zmiennych binarnych:

$$f(\mathbf{x}) = -x_1 - x_2 + 2x_1x_2, \quad (2)$$

czyli

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} -1 & 2 \\ & -1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Po uruchomieniu problemu 2000 razy otrzymano dwa rozwiązania, zgodne z rozwiązaniami teoretycznymi, $\mathbf{x}=[0,1]$ otrzymano 852 razy, a $\mathbf{x}=[1,0]$ 1148 razy.

Drugi z problemów zawiera 3 zmienne binarne oraz macierz współczynników:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} -1 & -3 & -2 \\ & -5 & 4 \\ & & 2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Otrzymano rozwiązanie $x=[1,1,0]$ dla wszystkich 2000 uruchomień problemu optymalizacji. Dostępny komputer pozwala rozwiązać problemy dla maksymalnie około 2000 zmiennych binarnych, jednak ze względu na ograniczenia elementów niezerowych w macierzy Q zazwyczaj część z nich jest wykorzystywana w celu mapowania problemu.

W wynikach optymalizacji mogą się pojawić rozwiązania nieoptymalne, w celu uniknięcia otrzymania wyników nieoptymalnych rozwiązuje się zadanie wielokrotnie. W pierwszym z przykładów istnieją dwa poprawne rozwiązania, po uruchomieniu optymalizacji 2000 razy należałoby się spodziewać, że oba rozwiązania otrzymamy z takim samym udziałem (po 1000 razy). Okazuje się jednak, że stochastyczna natura procesora prowadzi do otrzymania pierwszego z rozwiązań w 43% rozwiązań, a drugiego w 57%. Gdybyśmy zwiększyli znacznie liczbę prób (np. do kilkunastu, kilkudziesięciu tysięcy) pojawiłyby się również rozwiązania nieoptymalne (np. 1 na kilka tysięcy optymalnych). Jak widać z powyższego przykładu wielokrotne rozwiązanie problemu jest bardzo istotne w celu oszacowania poprawności otrzymanych rozwiązań. System D-Wave umożliwia również zaawansowaną kontrolę procesu optymalizacji poprzez np. wstrzymywanie go na pewien czas, zwiększa to prawdopodobieństwo otrzymania rozwiązań optymalnych, lecz komplikuje proces optymalizacji poprzez konieczność doboru parametrów procesu.

5. Podsumowanie

Komputery kwantowe są obecnie w okresie niemowlęcym ale są dynamicznie rozwijane, przewiduje się, że wzrost dostępnych kubitów będzie prowadził do możliwości rozwiązywania wielu problemów szybciej niż z użyciem tradycyjnych komputerów. Tak jak pokazano w przykładzie numerycznym już dzisiaj można rozwiązywać problemy z użyciem komputerów kwantowych, nawet nie mając bezpośredniego dostępu do nich, poprzez wykorzystanie zasobów udostępnionych w chmurze. Odpowiadając na pytanie postawione w tytule pracy należy stwierdzić, że w przyszłości pojawi się wiele nowych algorytmów umożliwiających prowadzenie symulacji numerycznych z użyciem komputerów kwantowych i istnieje duża szansa, że będą one wydajniejsze niż algorytmy obecnie stosowane.

Literatura

1. <https://ai.googleblog.com/2018/03/a-preview-of-bristlecone-googles-new.html> (dostęp 30.04.2019).
2. <https://www.dwavesys.com/> (dostęp 30.04.2019).
3. D-Wave Systems Inc.: D-Wave's Ocean Software. <https://ocean.dwavesys.com/> (dostęp 30.04.2019).
4. Gibney E., D-Wave upgrade: how scientists are using the world's most controversial quantum computer, *Nature* 541(7638), 447–448 (2017).
5. <https://www.intel.pl/content/www/pl/pl/research/quantum-computing.html> (dostęp 30.04.2019).
6. Parsons P., 30 sekund o teorii kwantów, Olesiejuk (2019).
7. <https://www.research.ibm.com/ibm-q/system-one/> (dostęp 30.04.2019).
8. Sawerwain M., Wiśniewska J., *Informatyka kwantowa*, PWN (2015).

ZASTOSOWANIE MES W ZAGADNIENIACH PRZEPLYWU CIEPŁA W TKANCE BIOLOGICZNEJ

inż. KLAUDIA RYCHLICKA

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

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Marek Paruch

Streszczenie W artykule rozpatrywano przepływ ciepła w zdrowej tkance biologicznej i tkance z guzem nowotworowym. W celu przeprowadzenia analizy numerycznej zastosowano wielowarstwowy, dwuwymiarowy model piersi. Do opisu matematycznego wykorzystano równanie Pennesa uzupełnione odpowiednimi warunkami brzegowo-początkowymi. Na podstawie uzyskanych wyników, możliwe było porównanie rozkładów temperatur w tkance zdrowej oraz tkance zaatakowanej nowotworem.



APPLICATION OF FEM IN THE ISSUES OF THE HEAT TRANSFER IN BIOLOGICAL TISSUE

Abstract The article considered the heat transfer process in healthy biological tissue and tissue with a tumor. A multilayer, two-dimensional breast model was used to perform numerical analysis. The Pennes equation was used for the mathematical description, supplemented by appropriate boundary-initial conditions. Based on the obtained results, it was possible to compare temperature distributions in healthy tissue and tissue affected by cancer.

1. Wprowadzenie

Rak piersi jest drugim najczęściej występującym w świecie rodzajem nowotworu. Badania wykazały, że pewne rodzaje guzów wywołują nienaturalny rozrost naczyń krwionośnych, co powoduje wzrost perfuzji i metabolizmu. Skutkiem tego zjawiska jest lokalny wzrost temperatury powierzchni ciała.

Przeprowadzono analizę przepływu ciepła w zdrowej tkance biologicznej oraz tkance zmienionej chorobowo. Wykorzystano wielowarstwowy, dwuwymiarowy model piersi, który dostatecznie dobrze odwzorowuje rzeczywistość. Do opisu matematycznego zagadnienia wykorzystano równanie Pennesa, uzupełnione odpowiednimi warunkami brzegowo-początkowymi. Przeprowadzono dwie analizy – w pierwszej założono warunek adiabatyczny na powierzchni skóry, natomiast w drugiej wykorzystano warunek brzegowy Robina, który definiuje wymianę ciepła z otoczeniem. Zadanie rozwiązano korzystając z metody elementów skończonych.

2. Model matematyczny

Rozpatrywano wielowarstwowy model tkanki biologicznej składającej się z gruczołu, mięśni oraz tłuszczu z centralnie umiejscowionym guzem (Rys. 1) [2, 3]. Nieustalone pole temperatury opisane zostało za pomocą równania Pennesa [1]

$$x \in \Omega_e : c_e \rho_e \frac{\partial T_e(x,t)}{\partial t} = \lambda_e \nabla^2 T_e(x,t) + k_e [T_B - T_e(x,t)] + Q_{met e} \quad (1)$$

gdzie $e = 1, 2, 3, 4$ odpowiada podobszarowi gruczołu, mięśnia, tkanki tłuszczowej oraz guza, c_e [J/kgK] jest ciepłem właściwym, ρ_e [kg/m³] jest gęstością, λ_e [W/mK] jest współczynnikiem przewodzenia ciepła, $k_e = G_{BCB}$ jest współczynnikiem perfuzji (gdzie: G_B [1/s] – prędkość perfuzji krwi, c_B [J/m³K] – ciepło właściwe krwi w odniesieniu do jednostki objętości), $Q_{met e}$ [W/m³] oznacza metaboliczny składnik źródłowy, x to współrzędne geometryczne, natomiast t [s] oznacza czas.

Na powierzchni kontaktu Γ_C pomiędzy podobszarami założono warunek idealnego kontaktu termicznego

$$x \in \Gamma_C : \begin{cases} q_I(x,t) = -q_{II}(x,t) \\ T_I(x,t) = T_{II}(x,t) \end{cases} \quad (2)$$

gdzie symbole I oraz II oznaczają powierzchnie będące ze sobą w kontakcie.

Na pozostałych powierzchniach Γ_1 oraz Γ_2 założono następujące warunki brzegowe:

$$x \in \Gamma_1 : T_1(x,t) = T_b \quad (3)$$

$$x \in \Gamma_2 : q_2(x,t) = 0. \quad (4)$$

Warunek brzegowy (4) jest warunkiem adiabatycznym symulującym izolację cieplną, na powierzchni skóry Γ_2 można również przyjąć warunek brzegowy Robina, określający kontakt skóry z otoczeniem

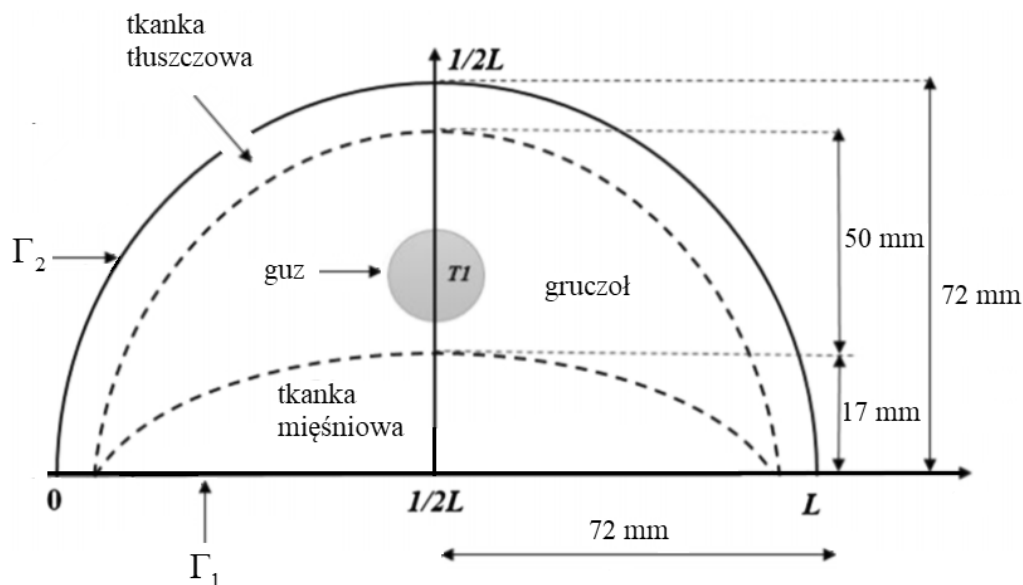
$$x \in \Gamma_2 : q_2(x,t) = -\lambda \frac{\partial T_2(x,t)}{\partial n} = \alpha [T(x,t) - T_{ot}] \quad (5)$$

gdzie T_{ot} jest temperaturą otoczenia, natomiast α [W/m²K] jest współczynnikiem wymiany ciepła.

Parametry termofizyczne tkanek wykorzystane do przeprowadzenia analizy przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry termofizyczne tkanek [3]
Table 1. Thermophysical parameters of tissues [3]

Tkanka	c [J/kgK]	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	Q_{met} [W/m ³]	G_B [1/s]
gruczoł	2960	0.33	1041	700	$0,5 \times 10^{-3}$
tłuszcz	2348	0.21	911	400	$0,2 \times 10^{-3}$
mięsień	3421	0.49	1090	700	$0,8 \times 10^{-3}$
guz	3770	0.48	1050	7792.48	$0,53 \times 10^{-3}$
krw	3617	-	1050	-	-



Rys.1. Model geometryczny
Fig. 1. Geometrical model

W przeprowadzonej analizie założono wartość temperatury krwi $T_B = 37^\circ\text{C}$ oraz temperaturę na wewnętrznym brzegu modelu $T_b = 37^\circ\text{C}$, temperaturę otoczenia T_{ot} przyjęto równą 24°C , natomiast współczynnik wymiany ciepła $\alpha = 13,5 \text{ [W/m}^2\text{K]}$, średnica guza jest równa 20 mm.

3. Wyniki obliczeń

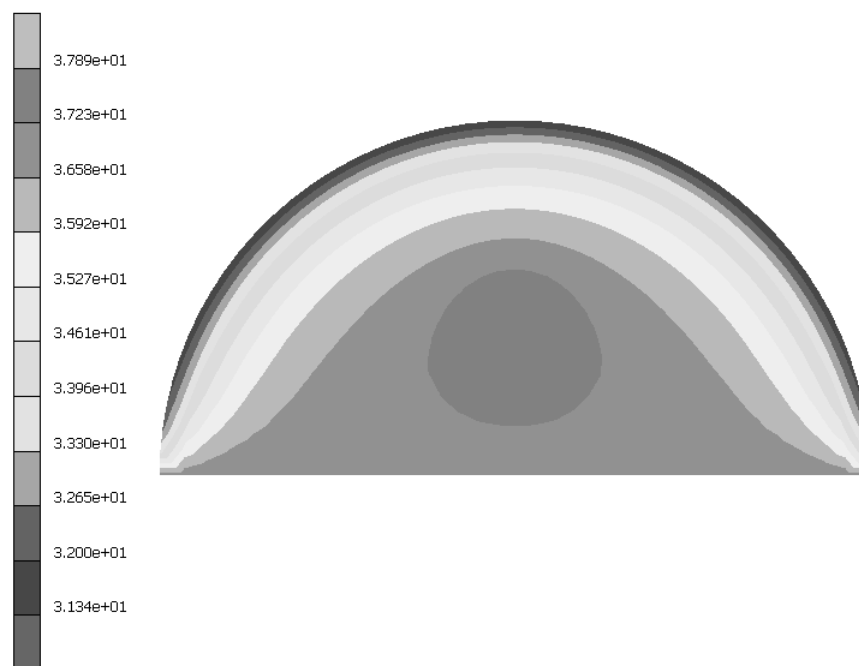
Przeprowadzono dwie analizy – w pierwszej z nich założono warunek brzegowy III rodzaju na powierzchni skóry, a w drugiej warunek adiabatyczny na tejże powierzchni. Do rozwiązania zadania wykorzystano oprogramowanie MSC Marc/Mentat. Zgodnie z oczekiwaniami, w obu analizach zaobserwowano lokalny wzrost temperatury. Aby porównać uzyskane wyniki, wyznaczono dziewięć punktów znajdujących się w osi symetrii modelu. Uzyskane w analizie wartości temperatur w poszczególnych punktach przedstawiono w tabeli 2. Na rysunku 2 przedstawiono rozkład pola temperatury dla tkanki biologicznej zaatakowanej nowotworem.

Tabela 2. Porównanie temperatur poszczególnych punktów dla tkanki zdrowej i tkanki z guzem

Table 2. Comparison of temperature of individual points for healthy tissue and tissue with tumor

Odległość od wnętrza [mm]	0	2	12	22	32	42	52	62	72
Temperatura – tkanka zdrowa [$^\circ\text{C}$]	37	37,04	37,10	37,08	36,92	36,52	35,85	34,26	31,33
Temperatura – tkanka chora [$^\circ\text{C}$]	37	37,08	37,31	37,67	37,88	37,18	36,19	34,37	31,38

Przy założonej temperaturze otoczenia 24°C , punkty w tkance zdrowej osiągają temperatury z zakresu od $31,33^{\circ}$ do $37,10^{\circ}\text{C}$. Różnica między tymi wartościami wynosi $5,77^{\circ}\text{C}$. Co się tyczy tkanki z guzem, w tym przypadku ta różnica wynosi $6,5^{\circ}\text{C}$. Wartości graniczne to odpowiednio $31,38^{\circ}$ przy powierzchni skóry i $37,88^{\circ}$ w miejscu występowania nowotworu. Porównując wyniki w tkance zdrowej i zmienionej chorobowo, widać że największa różnica temperatur pojawia się w punkcie oddalonym o 32 mm od wewnętrznej krawędzi. Jest to centralne miejsce występującego guza, a różnica wartości temperatur wynosi $0,96^{\circ}\text{C}$.



Rys. 2. Rozkład temperatury
Fig. 2. Temperature distribution

4. Wnioski

Przeprowadzona analiza pozwoliła zauważyć lokalny wzrost temperatury w miejscu występowania guza nowotworowego. W przypadkach obu analiz, różnica między temperaturami tkanki zdrowej i zmienionej chorobowo, wynosi prawie 1°C . Jest to znaczna różnica dla ludzkiego organizmu.

Literatura

1. Będziński R., Mechanika techniczna. Biomechanika, Tom XII, Wyd. IPPT PAN, Warszawa (2011).
2. Singh, S., Repaka R., Parametric sensitivity analysis of critical factors affecting the thermal damage during RFA of breast tumor, International Journal of Thermal Sciences, 124, s. 366-374 (2018).
3. Wahab, A.A., Thermal distribution analysis of three – dimensional tumor embedded breast models with different breast density compositions, Medical & Biological Engineering & Computing, 54, s. 1363-1373 (2016).

MODELOWANIE PROCESU USZKODZENIA TERMICZNEGO TKANKI POD WPLYWEM ZEWNĘTRZNEGO IMPULSU CIEPLNEGO

inż. ANNA SKORUPA

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

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Marek Jasiński, prof. PŚ

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę procesu uszkodzenia tkanki biologicznej pod wpływem zewnętrznego impulsu cieplnego. Wykorzystując model przepływu biociepła (równanie Pennesa) oraz model termicznego uszkodzenia tkanki (schemat Arrheniusa) oszacowano skutki wywołane przez strumień ciepła w dwuwymiarowym obszarze tkanki. Obliczenia przeprowadzono w wykorzystaniu metody różnic skończonych. Wyniki analizy przedstawiono w formie wykresów oraz sformułowano wnioski.



MODELING OF TISSUES THERMAL DAMAGE PROCESS CAUSED BY EXTERNAL HEAT IMPULSE

Abstract. The paper presents an analysis of the biological tissue damage process under the influence of external heat impulse. The effects caused by the external heat flux in the 2D domain of the tissue were estimated by the bioheat transfer model (Pennes formulation) and the model of thermal tissue damage (Arrhenius scheme). At the stage of numerical realization the finite difference method has been applied. The results of the analysis as well as the conclusions are presented at the end of the paper.

1. Wprowadzenie

Oddziaływanie zewnętrznych impulsów cieplnych na tkankę biologiczną może spowodować różne reakcje w organizmie: odwracalne lub nieodwracalne (np. zwęglenie). Oddziaływania termiczne mogą być również zarówno kontrolowane, jak i niekontrolowane [1, 2].

Oszacowanie stopnia uszkodzenia oraz wielkości termicznego zniszczenia danej tkanki, jest niezwykle istotne w medycynie. Podczas planowania zabiegów chirurgicznych wiedza ta pozwala ograniczyć uszczerbek na zdrowej tkance. W rzeczywistości ocena wielkości takiego obszaru z wykorzystaniem aparatury medycznej jest stosunkowo trudna. Przy znajomości m.in. temperatury i/lub czasu oddziaływania impulsu cieplnego możliwe jest natomiast oszacowanie pewnych skutków oddziaływania termicznego poprzez użycie modelu matematycznego [1].

Warto również nadmienić, że efekt oddziaływania cieplnego na tkankę biologiczną zależy od temperatury w niej wywołanej. W przypadku tkanki ludzkiej jako prawidłową temperaturę zakłada się 37°C , zwaną też stanem normotermii. Zjawiska występujące w tkance biologicznej podczas dalszego nagrzewania zostały przedstawione w tabeli 1 [1, 3].

Tabela 1. Zestawienie efektów termicznych zachodzących w tkance podczas nagrzewania
Table 1. Thermal effects occurring in biological tissue during heating

Temperatura [°C]	Efekt w tkance biologicznej
37	Prawidłowa temperatura, normotermia
42 – 45	Niezauważalne zmiany w tkance lub zmiany odwracalne
45 – 50	Hipertermia, niszczenie wiązań, rozrywanie makromolekuł, w strukturach błony komórkowej
50 – 60	Spadek aktywności enzymów, ograniczona zdolność poruszania się przez komórki
60 – 80	Koagulacja białek, nekroza tkanki, denaturacja kolagenu i białek
80 – 100	Zakłócenie równowagi chemicznej, wzrost przepuszczalności błony komórkowej
100 – 150	Parowanie płynnych składników, wzrost ciśnienia w komórce i ich rozerwanie, zamykanie naczyń krwionośnych, spalanie tkanki
>150	Całkowite zwęglenie tkanki, uwalnianie wodoru, tlenu i azotu

2. Model matematyczny termicznego uszkodzenia tkanki

Przepływ ciepła w tkankach biologicznych stanowi bardzo złożone zagadnienie, przez co jego zamodelowanie w sposób uniwersalny staje się problematyczne [1].

Najstarszym modelem przepływu ciepła w organizmie żywym jest model Pennesa [1]:

$x \in \Omega$:

$$c\rho \frac{\partial T(X,t)}{\partial t} = \text{div}[\lambda(T)\text{grad}T(X,t)] + Q_{perf}(X,t) + Q_{met}(X,t) + Q_{zew}(X,t), \quad (1)$$

gdzie: c – ciepło właściwe tkanki [J/kgK], ρ – gęstość tkanki [kg/m³], $T(x,t)$ – temperatura [K] zależna od współrzędnych geometrycznych X i czasu t , λ – współczynnik przewodzenia ciepła tkanki [W/mK], $Q_{perf}(X,t)$, $Q_{met}(X,t)$ i $Q_{zew}(X,t)$ – wydajność wewnętrznych źródeł ciepła związane z perfuzją krwi i metabolizmem oraz z zewnętrznym źródłem ciepła [W/m³].

Składnik związany z perfuzją definiowany jest jako [1]:

$$Q_{perf} = \omega c_b \rho_b (T_b - T(X,t)), \quad (2)$$

gdzie: ω – współczynnik perfuzji tkanki [m_{krwi}³/s·m_{tkanki}³] lub [1/s], c_b – ciepło właściwe krwi w aorcie [J/kgK], ρ_b – gęstość krwi w aorcie [kg/m³], T_b – temperatura krwi w aorcie [K].

W przypadku równania przepływu biociepła konieczne jest uzupełnienie modelu warunkami brzegowe i początkowym. Najczęściej zewnętrzny impuls cieplny jest przyjmowany w postaci strumienia ciepła działającego na jednym z brzegów (warunek Naumanna), podczas gdy na pozostałych brzegach działa warunek adiabatyczny, czyli strumień ciepła równy zero [1].

W celu określenia stopnia uszkodzenia danej tkanki pod wpływem temperatury stosuje się modele destrukcji tkanki. Jednym z nich jest tzw. schemat Arrheniusa w postaci [1]:

$$\psi(X,t) = P \int_0^{t^F} \exp\left[-\frac{E}{RT(X,t)}\right] dt, \quad (3)$$

gdzie: ψ – stopień zniszczenia tkanki, P – współczynnik zderzeń efektywnych [1/s], E – energia aktywacji [J/mol], R – stała gazowa [J/molK], $R=8,314472$, t^F – czas końca analizy [s].

Zakłada się, że nieodwracalne zniszczenie tkanki nastąpi, w przypadku gdy, wartość całki Arrheniusa osiągnie wartość co najmniej równą 1 [1].

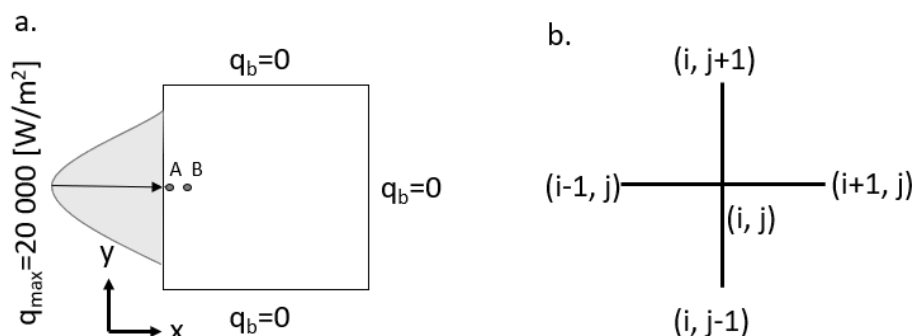
Współczynnik perfuzji (por. wzór (2)) stanowi parametr ściśle związany z obecnością krwi w tkankach. Parametr ten może być także wykorzystywana jako marker uszkodzenia tkanki pod wpływem oddziaływań termicznych. Podczas początkowego wzrostu temperatury, perfuzja również rośnie, co wynika z rozszerzania się naczyń krwionośnych. Natomiast w przypadku, gdy dalszy wzrost temperatury przyczynia się do zniszczenia tkanki, perfuzja zanika. Współczynnik perfuzji jako funkcja zależna od stopnia zniszczenia tkanki opisany jest przez następującą zależność [1]:

$$\omega(\psi) = \begin{cases} \omega_0, & \psi = 0 \\ (1 + 25\psi - 260\psi^2)\omega_0, & 0 < \psi \leq 0,1 \\ (1 - \psi)\omega_0, & 0,1 < \psi \leq 1 \\ 0, & \psi > 1 \end{cases} \quad (4)$$

gdzie: ω_0 – początkowa wartość współczynnika perfuzji [1/s].

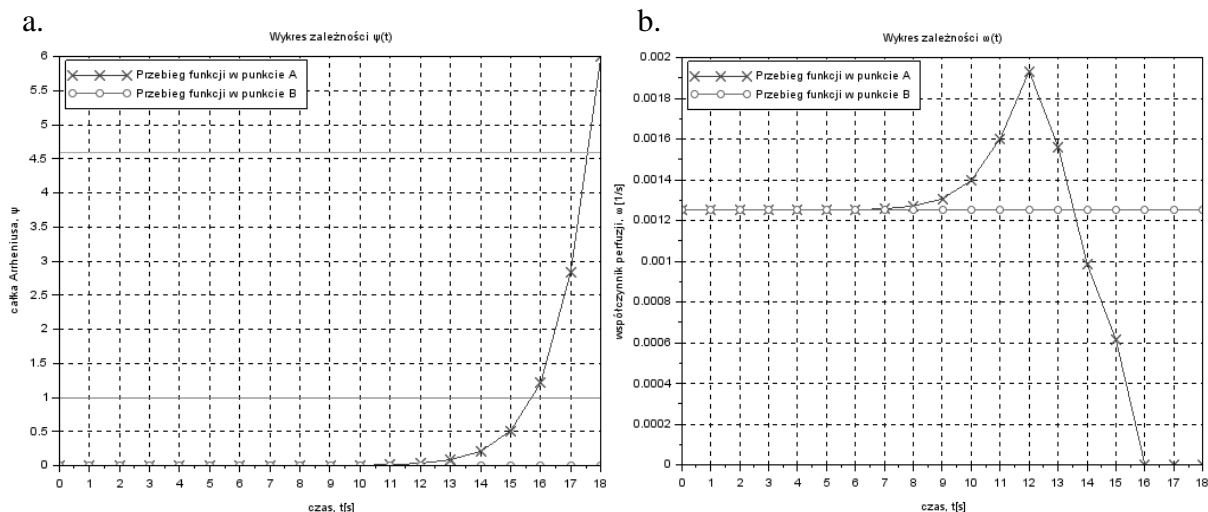
3. Obliczenia

Wykonano analizę uszkodzenia termicznego modelu tkanki pod wpływem impulsu cieplnego. Analizowano obszar o wielkości 4x4 cm, przy czym na brzegach założono warunek II rodzaju w sposób przedstawiony na rys. 1a. Pole temperatur zostało wyznaczone za pomocą schematu jawnego metody różnic skończonych (wykorzystano gwiazdy 5-punktowe - rys.1b.), przy czym warto wspomnieć, że węzły brzegowe zostały umieszczone od brzegu w połowie odległości stanowiącej skok siatki. Analizę przeprowadzono dla stanu nieustalonego, czas symulacji wynosił 40 s, natomiast oddziaływanie strumienia ciepła na tkankę przez 30 s. Przyjęto następujące parametry termofizyczne tkanki: $\lambda=0,3$ [W/mK], $c=3,647 \cdot 10^6$ [J/m³K], $c_b=3,99 \cdot 10^6$ [J/m³K], $Q_{met}=245$ [W/m³], $T_b=37^\circ\text{C}$. Założono, że w początkowej chwili czasu temperatura w całym obszarze wynosi 37°C. Współrzędne punktów, w których przedstawiono wyniki to: A(0,0005; 0,0195), B(0,0035; 0,0195).



Rys. 1. a) Przyjęte warunki brzegowe dla danego obszaru; b) Gwiazda 5-punktowa
Fig. 1. a) Assumed boundary conditions; b) Five-point stencil

Na podstawie obliczonych temperatur wyznaczono całkę Arrheniusa oraz współczynnik perfuzji dla wybranych punktów analizowanego obszaru. Wyniki zamieszczono na rys. 2.



Rys. 2. Przebieg całki Arrheniusa (a) oraz współczynnika perfuzji (b) w punktach A i B
 Fig. 2. History of the Arrhenius integral (a) and the perfusion factor (b) at the nodes A and B

4. Wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników analizy numerycznej można zauważyć, że rozpatrywany obszar tkanki nagrzej się do głębokości ok. 5 mm.

Dla danego przypadku trwałe uszkodzenie tkanki w punkcie A (głębokość 0,5 mm) wystąpi po 16 s (wtedy wartość całki Arrheniusa przekroczy wartość 1). Dodatkowo można zauważyć, że całkowite zniszczenie tkanki (przekroczenie wartości $\psi=4,6$) w punkcie A będzie miało miejsce po 18 s. W punkcie B, który znajduje się w odległości 3,5 mm od brzegu tkanki, nie zaobserwowano żadnego uszkodzenia.

Wartości otrzymane dla współczynnika perfuzji wynikają z wartości całki Arrheniusa (por. wzór (4)). Wartość współczynnika perfuzji dla punktu A rośnie do 12 s, a następnie maleje. Perfuzja w rozpatrywanym miejscu całkowicie zanika po 16 s, co świadczy o wystąpieniu trwałego uszkodzenia tkanki.

Literatura

1. Jasiński M., Modelowanie matematyczne procesu uszkodzenia tkanki wywołanego oddziaływaniem zewnętrznych źródeł ciepła. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice (2016).
2. Podbielska H., Optyka biomedyczna. Wybrane zagadnienia. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław (2011).
3. Kaczmarek S., Mierczyk Z., Kuzaka B., Oddziaływanie promieniowania laserowego na tkankę biologiczną, Wiadomości Lekarskie, Vol. 57, s. 868–880 (1994).

SPRZEŻONA ANALIZA TĘTNICY MÓZGOWEJ ZE ZMIANAMI MIAŻDŻYCOWYMI

inż. MIKOŁAJ STRYCZYŃSKI

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

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

Streszczenie. W artykule przedstawiono sprzężoną analizę cieplno-przepływową i wytrzymałościową tętnicy mózgowej, dotkniętej miażdżycą w różnych stadiach choroby. Analiza została przeprowadzona w programie ANSYS z wykorzystaniem metody elementów skończonych. W celu weryfikacji poprawności utworzonego modelu, uzyskane wyniki porównano z rzeczywistymi wartościami.



COUPLING ANALYSIS OF THE BRAIN ARTERY WITH ATHEROSCLEROSIS

Abstract. This article presents the coupling analysis of heat conduction, fluid flow and strength of the brain arteries in few states of a sickness. The analysis was carried out in ANSYS program, with usage of a finite element method. To verify created model, the obtained results were compared with the real values.

1. Wprowadzenie

Mało kto jest w stanie wyobrazić sobie współczesny świat funkcjonujący bez dobrodziejstw technologii takich jak smartfon, internet czy samochód, dzięki którym jesteśmy w stanie bezproblemowo obcować w coraz to prężniej rozwijającej się globalnej wiosce. Patrząc jednak na dobra techniki wyłącz

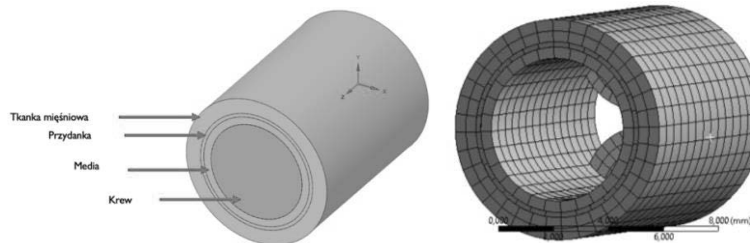
nie przez pryzmat korzyści płynących z ich użytkowania, można zapomnieć o ich negatywnym wpływie na nasze życie, zwiększającym ryzyko zachorowania na choroby cywilizacyjne. Jedną z najniebezpieczniejszych przedstawicieli tej grupy jest miażdżycy. Jest to przewlekła choroba dużych i średnich tętnic, objawiająca się zmianami na ścianach naczyń krwionośnych, która prowadzi do zwężenia lub zamknięcia światła naczynia i powoduje niedokrwienie narządu zaopatrywanego przez tętnicę [1]. Niestety, coraz częściej atakuje coraz to młodsze osoby.

Niedrożność tętnicy mózgowej, rozprowadzającej natlenioną krew do mózgu, prowadzi do wielu niebezpiecznych schorzeń, jak: udar mózgu, demencja miażdżycowa, czy wylewy. Systematyczna kontrola ciśnienia czy badanie poziomu cholesterolu we krwi, w znacznym stopniu umożliwiają wykrycie wczesnych stadiów choroby, zabezpieczając przed jej nieodwracalnymi skutkami. Prowadzenie analiz przepływu krwi pozwala więc na zaobserwowanie zmian zachodzących w tętnicy dotkniętej chorobą oraz za ich pomocą możliwe jest oszacowanie wytrzymałości chorego naczynia krwionośnego.

2. Model geometryczny tętnicy mózgowej

Model geometryczny tętnicy mózgowej powstał w oparciu o dane z literatury [1]. Ze względu na brak dostatecznie dokładnych parametrów materiałowych tego naczynia

krwionośnego, do przeprowadzenia analizy wykorzystuje się uproszczenie polegające na modelowaniu krótkiego odcinka tętnicy szyjnej, odpowiadającego tętnicy mózgowej. Umotywowane jest to faktem, iż tętnica mózgowa stanowi naturalne przedłużenie tętnicy szyjnej wewnętrznej oraz wykazuje podobne własności na bardzo krótkim odcinku. Utworzono więc dwuwarstwowy model (rys. 1) opisany promieniem wewnętrznym 2,56 mm i grubościami poszczególnych warstw: medii - 0,82 mm, przydanki - 0,38 mm. Naczynie krwionośne zostało otoczone tkanką mięśniową o grubości 2 mm.



Rys. 1. Model tętnicy mózgowej zdrowej oraz ze zwyrodnieniem miażdżycowym poddany dyskretyzacji

Fig. 1. Model of health brain artery and with atherosclerosis after discretization

3. Model i warunki brzegowe

Rozpatrywany obszar został podzielony na elementy skończone typu Hex20 (rys. 1). Utworzona siatka złożona jest z 3180 elementów i 21765 węzłów. Analiza została podzielona na trzy etapy, w trakcie których obserwowano zmiany zachodzące w chorym naczyniu krwionośnym. Pierwszy etap dotyczył modelowania przepływu krwi w naczyniu krwionośnym. Krew potraktowano jako ciecz newtonowską, a jej parametry zostały zaczerpnięte z literatury [2, 3].

W trakcie modelowania przepływu krwi, zadano następujące warunki brzegowe:

- prędkość krwi na wejściu naczynia $v = 0.3 \frac{m}{s}$,
- ciśnienie na wyjściu naczynia $p = 80 \text{ mmHg}$,
- prędkość cieczy na ścianach naczynia krwionośnego jest równa 0.

Drugi etap to modelowanie przepływu ciepła w naczyniu krwionośnym ze zmianami miażdżycowymi. Rozwiązywano równanie przewodzenia ciepła z następującymi warunkami brzegowymi:

- adiabatyczny warunek brzegowy na wejściu i wyjściu naczynia: strumień ciepła $q = 0$,
- warunek brzegowy III rodzaju na wewnętrznej ścianie medii $\alpha=500$, $T_M = 37 \text{ }^\circ\text{C}$,
- warunek brzegowy IV rodzaju na powierzchniach kontaktu między warstwami,
- zadano wyniki przepływu krwi (wektor prędkości).

Ostatni etap to analiza wytrzymałościowa, w której wykorzystano poniższe warunki brzegowe:

- zadano wyniki przepływu ciepła (rozkład temperatury) na całej powierzchni tętnicy,
- zadane wyniki ciśnienia krwi działającego na wewnętrznej ścianie naczynia,
- przyjęto sztywne utwierdzenie wejścia i wyjścia tętnicy.

Ze względu na nieliniową charakterystykę materiału oraz warstwową budowę naczynia krwionośnego, zdecydowano się na zastosowanie zmodyfikowanego modelu Yoth'a, który posłużył do opisu materiału

$$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{20}(\bar{I}_1 - 3)^2 + C_{30}(\bar{I}_1 - 3)^3 \quad (1)$$

gdzie W jest potencjałem energii odkształcenia, \bar{I}_1 to pierwszy niezmiennik tensora odkształcenia Green'a ($\bar{I}_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$), λ_i to i -ty składnik deformacji tensora odkształceń Green'a. Współczynniki C_{10} , C_{20} i C_{30} (tab. 1), zostały wyznaczone w oparciu o badania eksperymentalne tętnicy mózgowej [2].

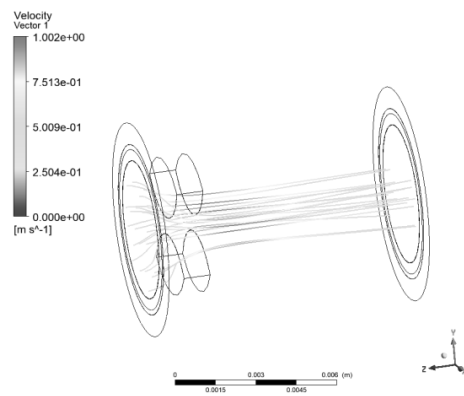
Tabela 1. Wartości współczynników
Table 1. The values of parameters

	Media	Przydanka
C_{10}	$1,17885 \cdot 10^5$	$1,7156 \cdot 10^5$
C_{20}	$2,8472 \cdot 10^5$	$1,4746 \cdot 10^6$
C_{30}	$1,0301 \cdot 10^7$	$3,1155 \cdot 10^8$

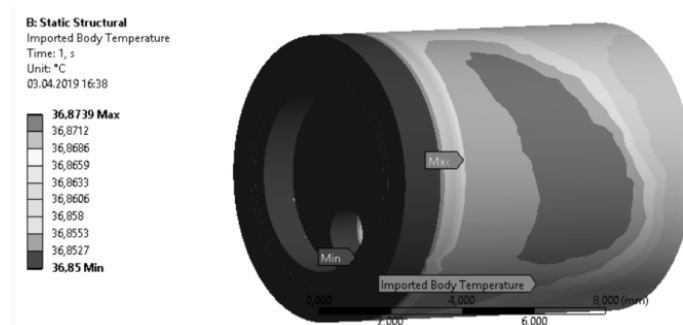
4. Wyniki

Analiza została podzielona na cztery procesy, w trakcie których poddano weryfikacji: zdrową tętnicę, naczynie z jedną płytką miażdżycową, z dwoma zwyrodnieniami miażdżycowymi oraz niedrożne naczynie krwionośne w zaawansowanym stadium choroby. Na każdym z etapów, stopniowemu wzrostowi ulegała płytka miażdżycowa, której parametry materiałowe zostały zaczerpnięte z literatury [4].

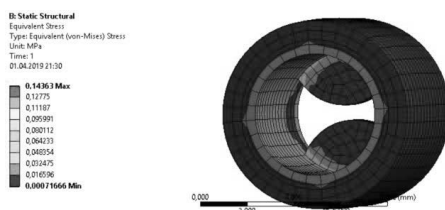
Wyniki analizy przepływu krwi (rys. 2) i ciepła (rys. 3) oraz wytrzymałości naczynia krwionośnego przedstawiono w tabeli 3. W celu zweryfikowania poprawności przeprowadzonej analizy, wyniki przepływu krwi porównano z rzeczywistymi wartościami zawartymi w literaturze [5].



Rys. 2. Przepływ krwi w tętnicy ze zwyrodnieniem miażdżycowym
Fig. 2. Blood flow in artery with atherosclerosis



Rys. 3. Rozkład temperatury w tętnicy ze zwyrodnieniem miażdżycowym
Fig. 3. Temperature distribution in artery with atherosclerosis



Rys. 4. Rozkład naprężeń w tętnicy ze zwyrodnieniem miażdżycowym
 Fig. 4. Stress distribution in artery with atherosclerosis

Tabela 3. Wyniki analizy
 Table 3. Results

	Zdrowe naczynie	Jedna płytką miażdżycowa	Dwie płytki miażdżycowe	Niedrożne naczynie
Maksymalna prędkość przepływu [m/s]	0,3	0,35	1,08	5,026
Maksymalna temperatura [°C]	36,85	36,85	36,85	36,87
Maksymalne naprężenia [MPa]	0,0692	0,0759	0,1436	0,379
Maksymalna deformacja [mm]	0,15	0,2	0,22	0,587

5. Wnioski

Porównując uzyskaną wartość prędkości przepływu na wyjściu naczynia krwionośnego z rzeczywistością [5], otrzymana różnica między wynikami wyniosła tylko 3,6%. Można więc uznać, iż utworzony model numeryczny wraz z przyjętymi wartościami współczynników oraz nałożonymi warunkami brzegowymi oddaje realne zachowanie się układu.

Zwężenie strugi krwi przyczynia się do spadku zdolności chłodzącej krwi, powodując lokalne wzrosty temperatur sięgające nawet 0,0239 °C (rys. 3). Rozrost płytki miażdżycowej powoduje lokalny wzrost naprężenia w jej okolicy (rys. 4), prowadząc do pęknięcia ścian naczynia, na które napiera hamowana krew w miejscu zwyrodnienia miażdżycowego.

Analiza wykazała realne zagrożenia, wynikające z choroby układu krążenia. Zauważalny wzrost prędkości przepływu krwi na odcinku ze zmianą miażdżycową (rys. 2), ma realny wpływ na zwężenie strugi krwi oraz spadek ilości hemoglobiny, znacząco obniżając jakość utlenionej krwi, doprowadzanej do mózgu [3, 5].

Literatura

1. *Miażdżyca*, w Encyklopedia powszechna PWN, 2019, <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/miazdzyca;3940414.html>, 10.04.2019.
2. Piechna, Badania ex vivo oraz modelowanie analityczne i numeryczne tętnic mózgowych, Warszawa, Praca doktorska, Politechnika Warszawska (2014).
3. L. Obdulia, K. Taehong, Calculation of arterial wall temperature in atherosclerotic arteries: effect of pulsatile flow, arterial geometry, and plaque structure, BioMedical Engineering OnLine (2007).
4. K. Mordal, A. Szarek, Modelowanie przepływu krwi w naczyniach krwionośnych miażdżycowo zmienionych, Aktualne Problemy Biomechaniki, nr 13/2017, 49-56.
5. H. Ozdemir, E. Oğur. Effect of overweight on luminal diameter, flow velocity and intima-media thickness of carotid arteries. Diagn Interv Radiol. 2006;12:142-6.

METODA GENEROWANIA STRUKTUR SIATKOWYCH Z UŻYCIEM OPROGRAMOWANIA MES

inż. PAWEŁ WITEK

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

Streszczenie. Wytwarzanie konstrukcji o jak najniższym stosunku masy do wytrzymałości jest jednym z podstawowych wyzwań pracy inżyniera. Rozwój addytywnych technologii wytwarzania oddaje nowe narzędzia w ręce projektanta, jednak wymaga innego podejścia do modelowania i optymalizacji układów. Celem pracy jest opracowanie prostej i szybkiej metody generowania układów siatkowych, możliwych do wytworzenia przy pomocy druku 3D. Wykorzystano do tego powszechnie używane w obliczeniach inżynierskich oprogramowanie MSC Patran/Nastran.



A METHOD FOR GENERATING LATTICE STRUCTURES USING FINITE ELEMENT ANALYSIS SOFTWARE

Abstract. Manufacturing any product with the lowest possible mass to strength ratio has always been one of the basic challenges in modern engineering. With the progression of additive manufacturing technologies it is possible to change the designer approach to his work, but it also requires using novel modelling and optimization methods. The goal of this paper is to propose an easy and fast method for generating lattice structures using broadly popular MSC Patran/Nastran engineering software package for numerical analysis. It would be possible to manufacture such structures using known 3D printing techniques.

1. Wprowadzenie

Struktury siatkowe to grupa materiałów inżynierskich składająca się z dwóch komponentów: jednorodnego materiału i pustej przestrzeni. Ze względu na strukturę przestrzenną dzieli się je na dwie kategorie: stochastyczne (piankowe) oraz periodyczne. Te pierwsze charakteryzują się losowym rozmieszczeniem komórek elementarnych o przypadkowym kształcie, w przeciwieństwie do struktur periodycznych, w których kształt i położenie komórek elementarnych są ściśle określone. Dodatkowo cechują się one większą wytrzymałością, ze względu na występowanie w nich głównie naprężeń wzdłużnych, w odróżnieniu od struktur piankowych, gdzie dominują naprężenia zginające [1].

Projektowanie z wykorzystaniem struktur siatkowych zakłada rozmieszczenie materiału w miejscach, gdzie jest to niezbędne, w taki sposób aby zapewnić jak najefektywniejsze przenoszenie obciążeń przy jednocześnie niskiej masie całkowitej. Pozwala również na zmianę innych własności materiałowych w przypadkach, w których jest to pożądanym, na przykład własności termicznych bądź akustycznych [2]. Wytwarzanie takich struktur stało się możliwe na przestrzeni ostatnich lat dzięki postępom dokonany w technologii druku 3D. Opracowane zostały już metody drukowania elementów metalowych, technikami takimi jak Selective Laser Melting (SLS) oraz Electron Beam Melting (EBM). W każdej z tych metod wykorzystywany

jako materiał wejściowy jest proszek metalu, który następnie przetapiany jest w jednolitą całość [3].

2. Struktura pliku wejściowego BDF

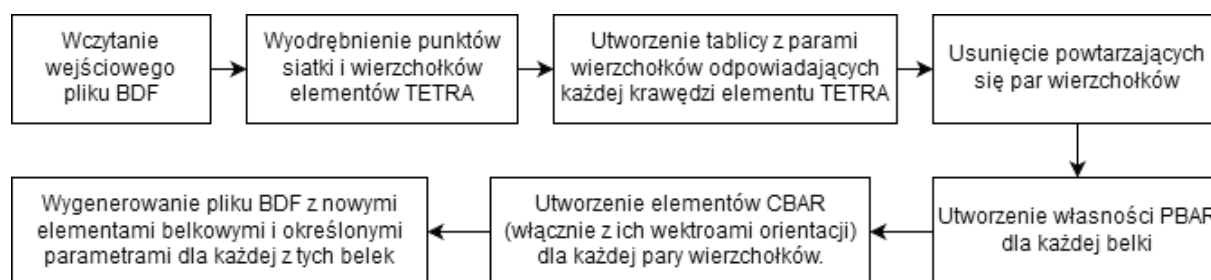
Oprogramowanie MSC Nastran korzysta z plików wejściowych w formacie BDF. Składają się one z 3 sekcji: Executive Control, Case Control oraz Bulk. W tej ostatniej zawarte są wszystkie informacje o geometrii obiektu, rodzajach elementów z jakich się składa oraz jego obciążeniach i warunkach brzegowych. Pliki BDF mają strukturę złożoną z pól o stałej szerokości 8 lub 16 znaków, w zależności od dokładności zawartych w nim danych.

Definicja każdego elementu skończonego składa się z jego nazwy umieszczonej w pierwszym polu, numeru porządkowego elementu, numeru definicji własności oraz numerów punktów siatki, do których przypisane są jego wierzchołki. W szczególności czterowęzłowe elementy tetragonalne (CTETRA) składają się z numeru porządkowego, numeru definicji własności (PSOLID) oraz numerów czterech węzłów odpowiadających wierzchołkom elementu. Elementy belkowe natomiast (CBAR) składają się z numeru porządkowego, numeru definicji własności (PBARL dla belek o określonej geometrii przekroju), dwóch numerów wierzchołków oraz trzech współrzędnych wektora orientacji.

3. Generowanie struktury siatkowej na podstawie pliku BDF

Proponowanym w niniejszej pracy sposobem na tworzenie struktur siatkowych jest utworzenie trójwymiarowego modelu przestrzeni, w której ma się znaleźć tworzona struktura, a następnie wygenerowaniu na niej siatki czterowęzłowych, tetragonalnych elementów skończonych. W następnym etapie elementy tetragonalne zostają zastąpione belkowymi, które przyłączone są w wierzchołkach poprzednich elementów i odpowiadają ich krawędziom.

Program działający według powyższego schematu został napisany w języku Python. Generuje on nowy plik wyjściowy w formacie BDF na podstawie wygenerowanego przez oprogramowanie MSC Patran pliku wejściowego do obliczeń solverem MSC Nastran. Zachowane są wszystkie parametry modelu, włącznie z warunkami brzegowymi oraz obciążeniami. Zmieniane są jedynie rodzaje elementów skończonych oraz definicje ich parametrów. Schemat programu przedstawiony został na rys. 1.



Rys. 1. Schemat programu generującego struktury siatkowe z pliku BDF
Fig. 1. Flow chart of a program generating lattice structures from BDF file

Dla każdego elementu belkowego „CBAR” tworzona jest osobna definicja jego parametrów, co pozwala na zmianę geometrii poszczególnych belek w późniejszym etapie pracy nad modelem. Dodatkowo definiując parametry belek za pomocą komendy „PBARL”, możliwe jest określenie geometrii przekroju belki z listy predefiniowanych w programie MSC Nastran kształtów. Przykładowe zmiany dokonywane w pliku BDF zostały przedstawione na schemacie z rysunku 2.

PSOLID	1	1	0				
CTETRA	1	1	19	3	20	2	

↓

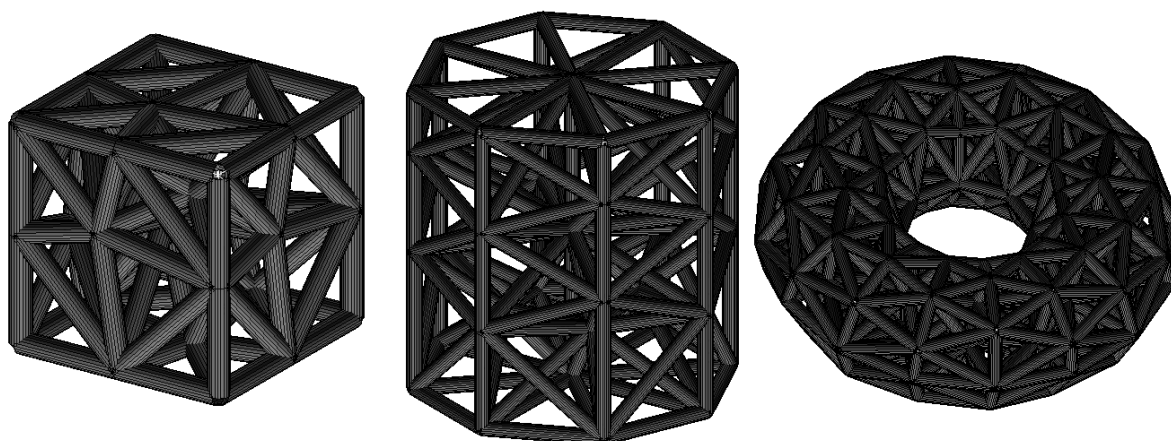
PBARL	1	1		ROD			
	0.05						
CBAR	1	1	2	3	-3.0	-2.0	0.0
...

PBARL	6	1		ROD			
	0,1						
CBAR	6	6	19	20	-2.0	4.0	0.0

Rys. 2. Przykład zmian dokonywanych w pliku BDF przez program
 Fig. 2. Example of changes made by the program in the BDF file

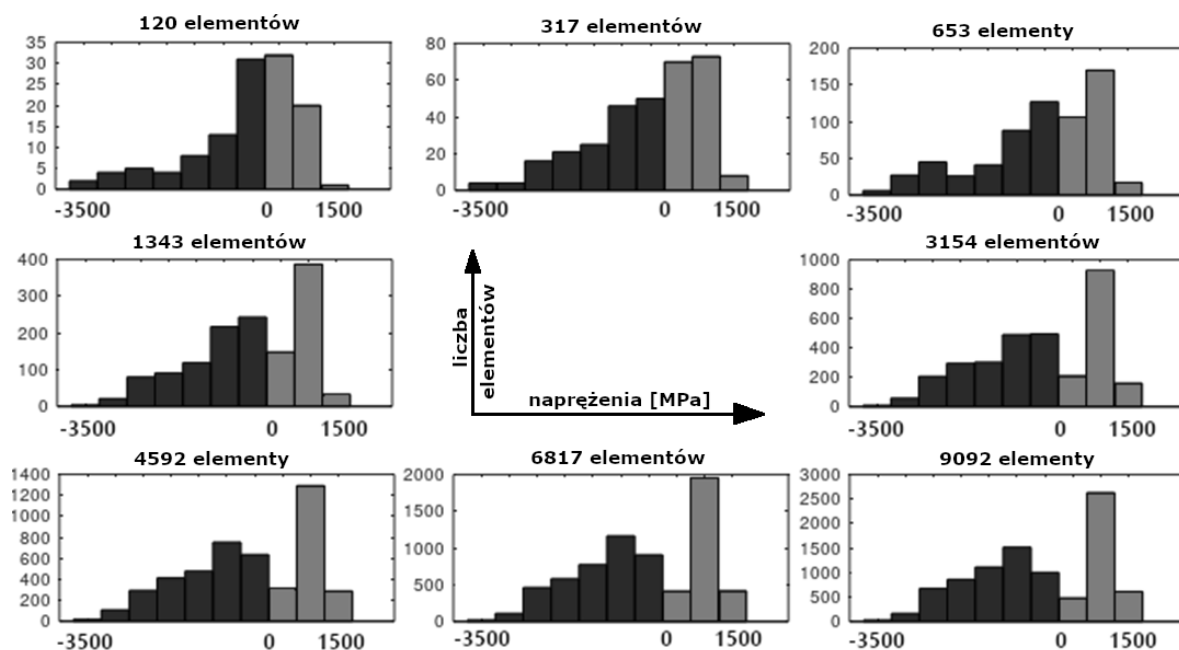
4. Przykładowe struktury siatkowe i ich analiza

W celu sprawdzenia poprawności działania programu wykonano kilka przykładowych struktur, które przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Przykładowe struktury siatkowe
 Fig. 3. Examples of lattice structures

Na elemencie sześciennym o wymiarach jednostkowych, dokonano analizy numerycznej. Element ten utwierdzono na dolnej ścianie poprzez odebranie wszystkich stopni swobody, na górnej ścianie natomiast obciążono jednostkową siłą ściskającą. Badany był stosunek ilości elementów rozciąganych do elementów ściskanych w zależności od zagęszczenia wygenerowanej siatki elementów skończonych, a co za tym idzie od całkowitej ilości elementów belkowych zawartej w sześciacie. Wygenerowano sześciiany składające się ze 120, 317, 653, 1343, 3154, 4592, 6817 oraz 9092 elementów. Histogramy przedstawiające rozkłady naprężeń ściskających i rozciągających w stworzonych strukturach siatkowych przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Histogramy naprężeń elementów różnych sześciątów
 Fig. 4. Histograms of stresses in elements for various cubes

5. Podsumowanie

Dzięki stworzonemu programowi możliwe jest szybkie i łatwe przekształcanie trójwymiarowych modeli w struktury siatkowe, dzięki wykorzystaniu wbudowanego w program MSC Patran meshera. Metoda ta może zostać wykorzystana w bryłach o dowolnym kształcie, które mogą być siatkowane programami do analizy metodą elementów skończonych.

Histogramy przedstawione na rysunku 4 świadczą o możliwym dążeniu układu do pewnej równowagi między elementami ściskanymi i rozciąganymi. Widoczne staje się to w modelach zawierających powyżej 3000 elementów, dla których histogramy stają się podobne, a różnica między procentowym udziałem elementów ściskających nie przekracza 3%.

Modelowanie struktur siatkowych możliwych do wytworzenia metodami addytywnymi stwarza szansę na powstanie konstrukcji lekkich i jednocześnie wytrzymałych, skupiających uwagę na niewrażliwych miejscach cechujących się największym obciążeniem. Zmniejszenie ilości materiału potrzebnego przy produkcji obniża jej koszty oraz wpływ na środowisko naturalne. Opracowanie łatwych i wiarygodnych sposobów modelowania struktur siatkowych przyczyni się do ich szybkiego wdrożenia i pozwoli na znalezienie dla nich zastosowania w wielu dziedzinach inżynierii.

Literatura

1. Hadi A., Vignat F., Villeneuve F., Configurations and Creation of Lattice Structures for Metallic Additive Manufacturing, 14ème Colloque National AIP-PRIMECA, La Plagne, Francja (2015).
2. Ashby M., Designing architected materials, Scripta Materialia, 68, s.4-7 (2013).
3. Azman A. H. Method for integration of lattice structures in design for additive manufacturing. Materials. Université Grenoble Alpes (2017).

COMPUTATIONAL AIDED DECISION-MAKING FOR PORTFOLIO OPTIMIZATION

KAROLINA ZAGRAJEWSKA, B.Sc., Eng.

Automation and Robotics, 3rd semester, graduate programme

Supervisor: Grzegorz Dziatkiewicz, Assoc. Prof. at SUT

Abstract. The aim of the work was to determine the parameters of risks and return in the problem of portfolio optimization, based on Markowitz's theory. Obtaining these parameters can provide enough data to implement a suitable tactic of portfolio optimization and receive a satisfactory result for the user's plan of investment.



OBLICZENIOWO WSPOMAGANE PODEJMOWANIE DECYZJI DLA PROBLEMU OPTYMALIZACJI PORTFELA

Streszczenie. Celem pracy było określenie parametrów ryzyka i zwrotu dla problemu optymalizacji portfela na podstawie teorii Markowitza. Uzyskanie tych parametrów może zapewnić wystarczającą ilość danych do wdrożenia odpowiedniej taktyki optymalizacji portfela i otrzymania zadowalającego wyniku dla planu inwestycyjnego użytkownika.

1. Introduction

The founder of the sole idea of portfolio optimization was Harry Markowitz, who presented the theory of it in 1952 in the Journal of Finance [1].

Markowitz first introduced his way of thinking about the risk itself. He used a standard deviation as a measure of risk, and according to his explanations – the greater the distance from the average in variation, the greater the risk. Then he found a way to determine the risk of the whole portfolio. Markowitz used covariance, which was based on the formula for the variance of the weighted sum, which measures the joint variability of two random variables and in case of the portfolio – the direction of a stocks' group. The low covariance means that for example two or more stocks are moving into different directions, and the high one means that they are moving together [1].

2. The problem of portfolio optimization

While talking about a portfolio, it is necessary to focus on its characteristics and the things which need to be considered in its optimization problem. Such as the rate of return.

The asset is considered as stock, options etc. at time t_0 for a price P_{t_0} and at time t_1 for a price P_{t_1} . The time period T which is located between t_0 and t_1 is a holding period. It means the absence of cash flows and the rate of return is given in percentage, indicated by R_T and calculated from [1]:

$$R_T = \frac{(P_{t_1} - P_{t_0})}{P_{t_0}} \times 100, \quad (1)$$

When the return of the assets is obtained, then the covariance between the assets must be calculated, basing on the Markowitz's work with given bellow formula for risk [1]:

$$\sigma = \sqrt{\sum_i \sum_j W_i W_j \sigma_{ij}}, \quad (2)$$

where:

σ_{ij} - covariance between returns of assets i and j ; W_i is the weight of the i -th asset.

In this work, the portfolio containing 6 assets is analyzed and the return is calculated on the period of three years with the time's sampling of three months. Four groups and two currencies are taken into account: BMW, Honda, Ferrari, Fiat, JPN/PLN and CHF/PLN.

There are different ways of doing optimization [1, 2, 3], such as minimizing the risk which is the basic method (MinRisk). More practical one is to achieve the biggest return with the lowest risks (Risk-Ret). There is also a possibility to do it while maximizing the return (MaxRet) [3].

Maximizing the portfolio's return is presented in the formula below:

$$Max(\sum_{i=1}^N W_i R_i), \quad (3)$$

where: R_i is the expected rate of return.

The MinRisk strategy can be considered as follows:

$$Min(\sqrt{\sum_i \sum_j W_i W_j \sigma_{ij}}), \quad (4)$$

The constraints need to be also considered and we use basic constraints in the form [1]:

$$\sum_{i=1}^N W_i = 1 \text{ and } 0 \leq W_i \leq 1, \quad (5)$$

The portfolio which represents such constraint is a *fully invested portfolio* [1]. Bound constraints are the second type of constraints and are given by the following formula:

$$\varepsilon_i \leq W_i \leq \delta_i, \quad (6)$$

where weights of assets lie between lower and upper bounds, but it is also possible to use a group of constraints:

$$\varepsilon_i \sum_{i \in \text{AssetClass } A} W_i \leq \delta_i, \quad (7)$$

where the assets belong to a specific sector or assets' class A and their bound imposed on their respective sum of weights [1].

3. Primary results

The return of each three months was calculated and put in Table 1.

Table 1. Quarter returns for the considered portfolio in %

Fiat	-1.84	-7.75	35.01	21.48	0.65	65.92	3.19	11.86	-9.45	-6.78	-19.16	-4.42
BMW	0.35	4.22	19.32	-7.79	6.84	1.88	2.93	-2.78	-2.68	5.9	-16.48	-2.55
Honda	-0.12	16.57	0.31	1.19	-9.87	9.24	15.73	-1.02	-10.34	1.5	-5.5	5.05
Ferrari	4.32	17.2	14.5	16.5	32.7	27.4	-5.65	14.21	15.21	-5.77	-28.47	27.4
JPN/PL	7.79	1.54	-5.58	-1.06	-4.12	-6.74	-2	4.74	4.29	-2.48	4.72	0.86
CHF/PL	-1.78	3.02	-3.52	4.54	-3.36	-2.2	-7.73	0.73	4.26	0.89	-0.01	-0.05

Based on these data the chart of *return's dynamics* was obtained and shown in Fig.1.

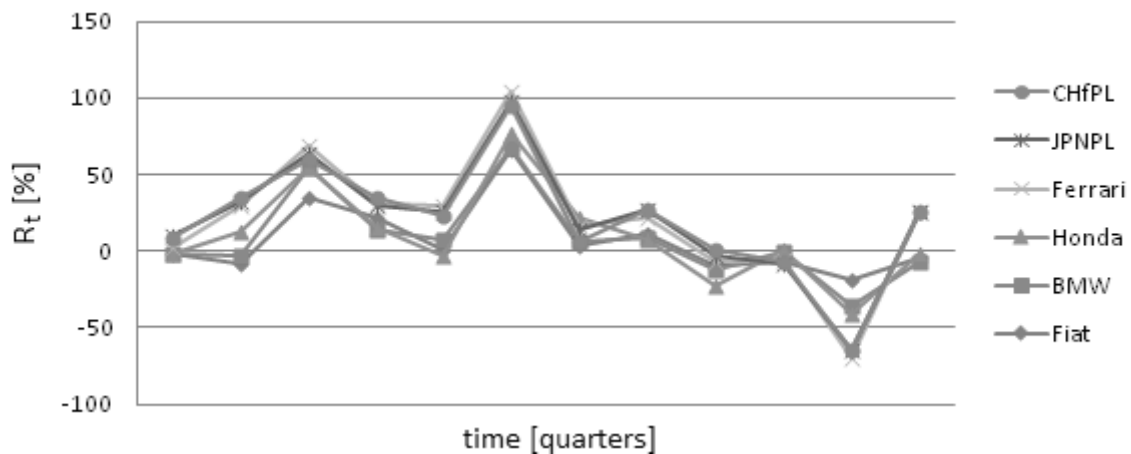


Fig.1. Chart of return's dynamics

The results allowed the creation of the covariance's matrix shown in Fig.2.

509.4472854	68.75858333	45.95674583	171.7376021	-64.49895	-18.03486458
68.75858333	69.30032222	13.52940833	55.87022222	-21.48466944	-12.07873611
45.95674583	13.52940833	69.09875833	1.6004375	-9.143833333	-7.331154167
171.7376021	55.87022222	1.6004375	273.186391	-27.61812778	5.570040972
-64.49895	-21.48466944	-9.143833333	-27.61812778	19.28647222	5.836180556
-18.03486458	-12.07873611	-7.331154167	5.570040972	5.836180556	11.53220764

Fig. 2 Covariance matrix

Investing in Fiat for that period of time brought the highest risk, while in Honda the smallest.

4. Conclusions

The low obtained covariance means that two or more stocks are moving into different directions, and the high one means that they are moving together, which means that stocks are correlated.

Risk can be calculated from variance and covariance of the gathered stock's data, which makes the desired results relatively easy to obtain, although the fact that the market is changing constantly should be taken into consideration and the shortest period of calculating the better for the precision of the calculations. Because the market is complex and its functions, investor's preferences, investment strategies and characteristics can differ drastically, it gives constraints which made the optimization difficult or even impossible to be done. It should be also remembered that even though in some cases risks are low, they still exist.

Literature

1. Vijayalakshmi P., Metaheuristics for Portfolio Optimization: An Introduction using MATLAB, John Wiley & Sons, New York (2018).
2. Hagstrom R.G., The Warren Buffett Portfolio Mastering the Power of the Focus Investment Strategy, John Wiley & Sons, New York (1999).
3. Fabozzi F.J, Portfolio Optimization Management, John Wiley & Sons, New York (2007).