

## ROZKŁAD NAPRĘŻEŃ MECHANICZNYCH W ŁYŻCE O SZEROKOŚCI 500 MM, PRZEZNACZONEJ DO KOPARKI PODSIĘBIERNEJ

### DISTRIBUTION OF MECHANICAL STRESS IN THE BUCKET OF WIDTH 500 MM INTENDED FOR THE BACKHOE

Anna Lesnau<sup>\*a</sup>, Jerzy Kowalski<sup>b</sup>

Uniwersytet Morski w Gdyni, Morska 81-87, 81–225 Gdynia, Wydział Mechaniczny,  
Katedra Podstaw Techniki, e-mail: annalesnau123@gmail.com,

<sup>a</sup> ORCID 0000-0002-4276-424X

<sup>b</sup> ORCID 0000-0002-2764-3765

\* Adres do korespondencji/Corresponding author

**Streszczenie:** W artykule zaprezentowano optymalizację kształtu łyżki koparki przedsięwziętej z wykorzystaniem analizy wytrzymałościowej. Analizę oparto na trójwymiarowym modelu konstrukcji łyżki z zastosowaniem metody elementów skończonych (MES). Opracowanie wspomnianej metody pozwoliło na modyfikację konstrukcji łyżki, która dała w efekcie obniżenie naprężeń złożonych w newralgicznych obszarach konstrukcji łyżki. Przedstawiona analiza okazała się prostym i relatywnie tanim sposobem optymalizacji konstrukcji mechanicznych o złożonych kształtach już na etapie projektowania.

**Słowa kluczowe:** analiza MES, łyżka koparki podsięwziętej, konstrukcja, wytrzymałość, naprężenia.

**Abstract:** The paper presents the optimization process of bucket shape of an excavator based on strength analysis. The analysis was based on a three-dimensional model of bucket construction using finite element method (FEM). Application of this method allowed to modify the structure, which resulted in the reduction of stresses in the most loaded areas of the construction. The presented analysis proved to be a simple and relatively inexpensive way of optimizing complex mechanical structures at the design stage.

**Keywords:** MES analysis, bucket backhoe, construction, strength, tension.

## 1. WSTĘP

Jeszcze niedawno powszechny był pogląd, że dziedzina badań, nazywana naukami obliczeniowymi, nie wymaga specjalnego wyodrębnienia w całokształcie problematyki danej nauki. Pogląd ten zaczął się inaczej kształtować wraz z pojawieniem się pierwszych elektronicznych maszyn cyfrowych, wspomagających pracę inżyniera. Pierwsze komputery powstały w latach czterdziestych ubiegłego wieku w USA, ale szybkie maszyny obliczeniowe znajdujące praktyczne zastosowanie pojawiły się dopiero w latach pięćdziesiątych i sześćdziesiątych XX wieku [Goliński 1974]. Od tego czasu nieustannie podejmowano próby udoskonalenia owych maszyn cyfrowych. Trend ten utrzymuje się do czasów obecnych.

Jak wskazują liczne prace oraz książki branżowe, podstawowym problemem polskich inżynierów XX wieku był brak bieżącego dostępu do maszyn obliczeniowych. Wraz z rozwojem technologii oraz znacznym wzrostem dostępności do komputerów oraz oprogramowania w użytku cywilnym, niezaprzeczalnym liderem wśród analiz wytrzymałościowych stały się metody komputerowe.

W dużym uogólnieniu metody obliczeniowe mogą być sklasyfikowane w dwóch grupach, takich jak metody analityczne i metody numeryczne. Metody analityczne stosowane są w przypadkach konstrukcji i przypadków teoretycznych, w których aparat matematyczny umożliwia uzyskanie ścisłych wyników ze stosunkowo prostych analiz matematycznych. W rozwiązywaniu problemów konstrukcyjnych o złożonej strukturze geometrycznej, z obciążeniami nieciągłymi lub też wykazujących się nieciągłością materiału lub właściwościami geometrycznymi, zastosowanie klasycznych metod analitycznych może być nieefektywne. W takich przypadkach stosowane są zazwyczaj metody numeryczne [Mukherjee i Mukherjee 2005].

Podczas projektowania konstrukcji mechanicznych najczęściej stosowane są metody elementów brzegowych (MEB) [Samarskii 2001], metody różnic skończonych (MRS), metody bezsiatkowe (MB) oraz metody elementów skończonych (MES) [Hartmann i Katz 2007].

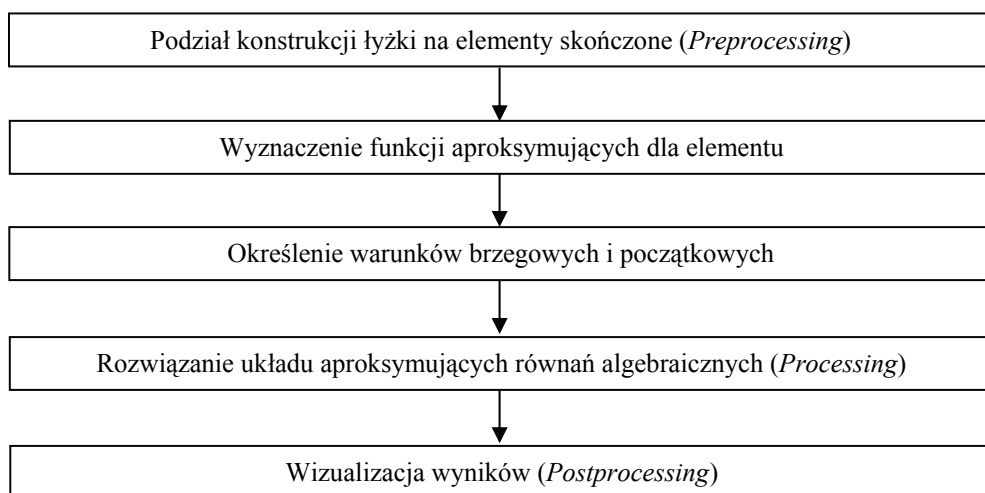
Metody elementów skończonych MES są stosowane w różnorodnych zadaniach konstrukcyjnych, nie tylko w celach optymalizacji konstrukcji. W pracy [Keprate, Chandima Ratnajake i Sankararaman 2017] zaprezentowano model oparty na MES, który umożliwia przewidywanie rozwoju pęknięć rurociągów, a także obliczenie propagującej fali temperatury i ciśnienia oraz związanych z nią naprężeń termicznych. Metody MES stosowane są również do modelowania działania głośników wraz z określeniem impedancji elektrycznej i akustycznej w zależności od częstotliwości dźwięku [Zhang i Lu 2017], działania piezoelektrycznych wtryskiwaczy paliwa do silników tłokowych [Ferrari i Mittica 2012], czy modelowania przepływu płynów [Bianco i in. 2017].

Celem pracy jest wykorzystanie MES do optymalizacji konstrukcji łyżki koparki przedsiębiernej pod względem jej wytrzymałości statycznej.

## 2. MODEL

Metoda elementów skończonych polega na podziale przestrzeni obliczeniowej, w tym wypadku konstrukcji łyżki koparki przedsiębiorczej, na pewne objętości skończone, które mają zwykle proste kształty geometryczne. Elementy te są z założenia na tyle małe, że równania matematyczne, opisujące zjawiska zachodzące w tych elementach, mogą być aproksymowane prostymi, zazwyczaj liniowymi równaniami/wielomianami algebraicznymi. Tak zbudowany algorytm może być obliczony z zastosowaniem zautomatyzowanego procesu za pomocą metod kolejnych przybliżeń, ze względu na założone warunki brzegowe i założoną dokładność obliczeń [Dhondt 2004; Ciechoń i in. 2009]. Dzięki możliwości prostego zalgorytmizowania MES zyskała miano uniwersalnej metody rozwiązywania problemów w zagadnieniach brzegowo-początkowych w różnych dziedzinach techniki.

Na rysunku 1 przedstawiono algorytm obliczeniowy, wykorzystany w metodzie MES.



**Rys. 1.** Algorytm obliczeniowy wykorzystany w metodzie MES

**Fig. 1.** Computational algorithm used in the FEM method

W ramach realizacji pracy przygotowano zostały dwa modele łyżki minikoparki hydraulicznej CAT® 304E CR [Minikoparki hydrauliczne 2012]. Model pierwszy stanowi odwzorowanie rzeczywistej konstrukcji łyżki ze standardowymi wzmocnieniami w postaci bocznych pasów blachy. Model drugi jest konstrukcją po modyfikacji, w której zastosowano dodatkową blachę wzmocniającą, wykonaną z materiału XAR400 o grubości 10 mm na płaszczu łyżki w pobliżu jej mocowania.

Oba modele zostały zaprezentowane na rysunku 2.

Badane modele podzielono na geometryczne elementy o kształcie prostopadłościanów o podstawie trójkątów.

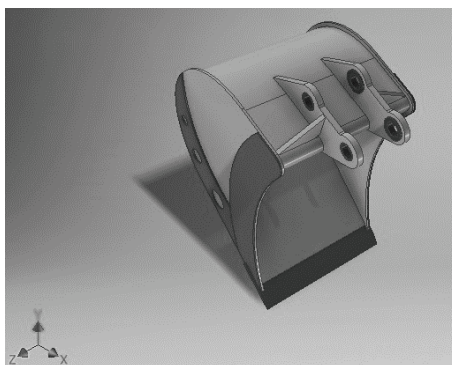
Parametry siatek przestrzennych pokazano w tabeli 1.

**Tabela 1.** Parametry siatek modeli

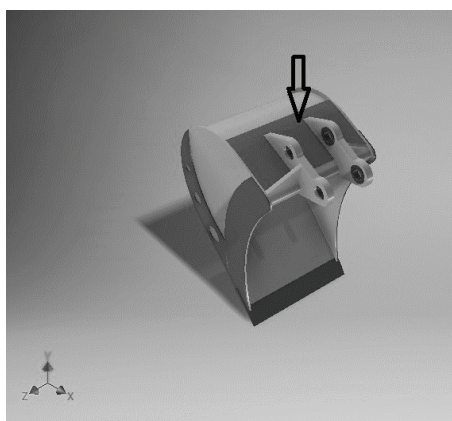
**Table 1.** Parameters of the model grid

Parametry	Model pierwszy	Model drugi
Średnia wielkość elementu	0,01	0,01
Współczynnik gradacji	1,5	1,5
Liczba elementów skończonych	20 822	22 634
Liczba węzłów	42 910	46 447

a)



b)

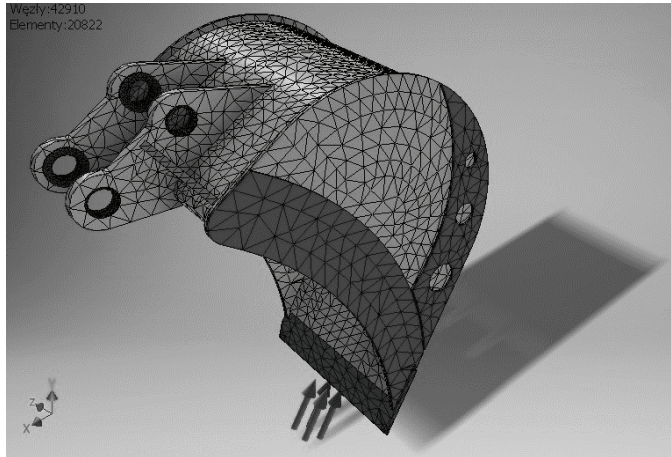


**Rys. 2.** Modele badanych łyżek koparki; a) konstrukcja standardowa,  
b) konstrukcja zmodyfikowana

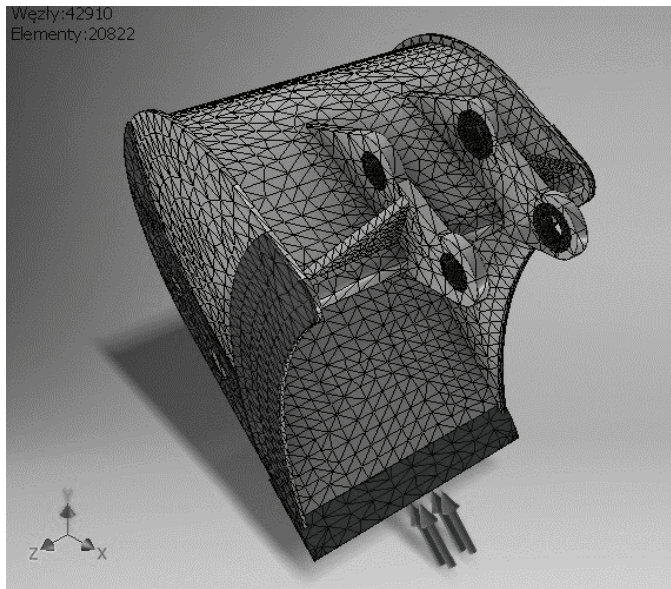
**Fig. 2.** The examined models of the excavator bucket; a) standard construction,  
b) modified construction

Na rysunku 3 zaprezentowano schemat geometryczny siatki przestrzennej modelu pierwszego wraz z naniesionymi wektorami sił obciążenia zewnętrznego.

a)



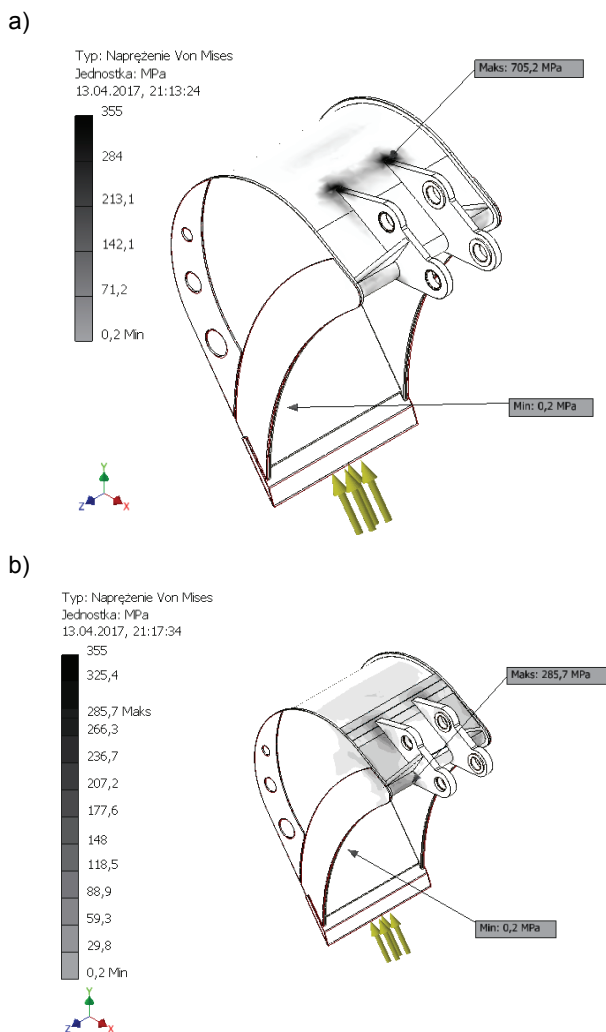
b)



**Rys. 3.** Budowa siatki modelu standardowego; a) widok z prawej strony,  
b) widok z lewej strony

**Fig. 3.** Construction of a standard model grid; a) right side view,  
b) left side view

Prezentowany model obciążony jest również siłami grawitacji oraz siłami reakcji, pochodzących od mocowania łyżki do konstrukcji koparki (otwory). Obciążenie powierzchni siłą pochodzącą od skrawania skierowane jest w stronę łyżki. Wartość przyjętego nacisku wynosi 37,5 MPa [Minikoparki hydrauliczne 2012] dla obu rozpatrywanych modeli. Jest to maksymalna dopuszczalna wartość obciążenia. Wszystkie rozpatrywane siły działające na łyżkę przyjęto zgodnie z danymi technicznymi podanymi przez producenta.

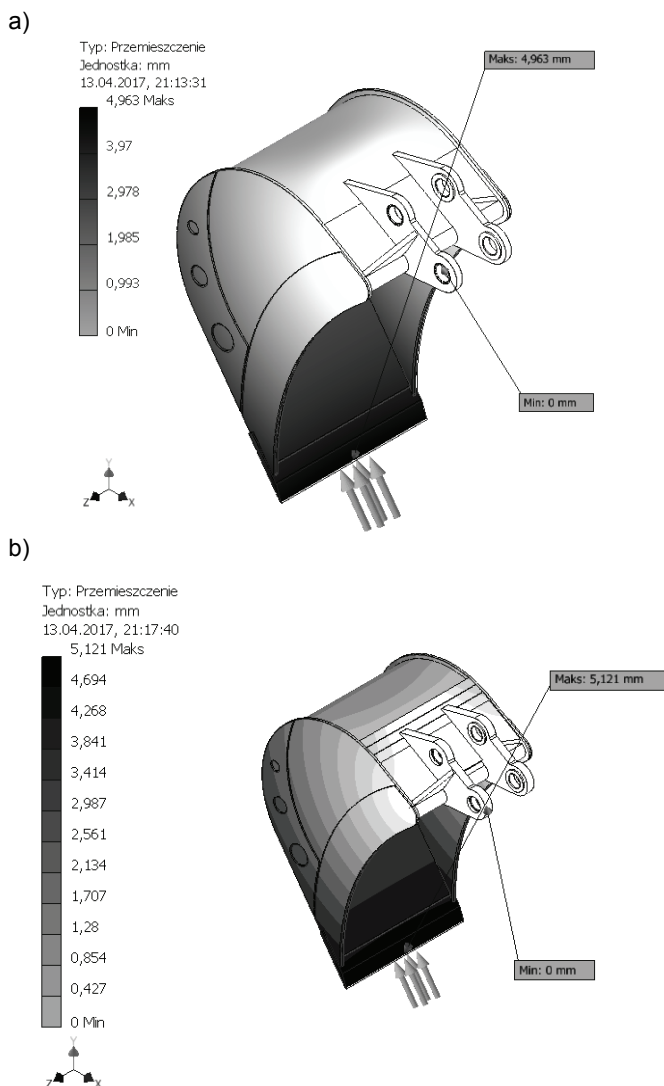


**Rys. 4.** Wyniki naprężeń Von Mises; a) konstrukcja standardowa, b) konstrukcja zmodyfikowana

**Fig. 4.** The results of Von Mises stress; a) standard construction, b) modified construction

### 3. WYNIKI OBLICZEŃ

Uzyskane siatki przestrzenne posłużyły do obliczeń wytrzymałości statycznej oraz odkształceń konstrukcji łyżki standardowej i zmodyfikowanej.



**Rys. 5.** Wyniki obliczeń odkształceń; a) konstrukcja standardowa, b) konstrukcja zmodyfikowana

**Fig. 5.** Results of deformation calculations; a) standard construction, b) modified construction

Na rysunku 4 zaprezentowano wizualizację rozkładu naprężeń zredukowanych von Mises, zwanymi też naprężeniami Hubera-Misesa, w obu rozpatrywanych konstrukcjach łyżki [Juvinall i Marshek 2003].

Zgodnie z prezentowanymi wynikami największe naprężenia w modelu o konstrukcji standardowej znajdują się w okolicach mocowania łyżki do konstrukcji koparki. Wzmocnienie konstrukcji w tym miejscu spowodowało rozłożenie naprężeń na większą objętość łyżki, przez co maksymalne naprężenia zostały zredukowane o prawie 60%.

Na rysunku 5 zaprezentowano wyniki odkształceń łyżki wraz z zaznaczonymi miejscami odkształceń maksymalnych. Zgodnie z omawianymi wynikami największe odkształcenia znajdują się w miejscu przyłożenia obciążenia skrawającego. Modyfikacja konstrukcji łyżki spowodowała w tym przypadku wzrost maksymalnego odkształcenia łyżki o około 3%. Należy zaznaczyć, że różnica odkształceń jest stosunkowo niewielka. Modyfikacja konstrukcji łyżki skutkowałą również wzrostem jej ciężaru oraz objętości.

W tabeli 2 przedstawiono zbiorcze wyniki obliczeń dla obu rozpatrywanych konstrukcji łyżek. Szczegółowe wyniki obliczeń zawarto w pracy inżynierskiej [Lesnau 2016].

**Tabela 2.** Zbiorcze wyniki obliczeń  
**Table 2.** Summary results of calculations

Parametry	Model pierwszy	Model drugi
Objętość [cm <sup>3</sup> ]	15706	17619
Masa [kg]	123,46	138,48
Maksymalne naprężenia [MPa]	705,2	285,7
Maksymalne odkształcenie [mm]	4,96	5,12

#### 4. WNIOSKI

W pracy przedstawiono analizę konstrukcji łyżki do koparki podsiębiernej. Analizy dokonano pod względem statycznych naprężeń złożonych oraz związanych z nimi odkształceń, wykorzystując metody elementów skończonych. W wyniku przeprowadzonych badań dokonano modyfikacji konstrukcji łyżki, która spowodowała obniżenie maksymalnego naprężenia zredukowanego o prawie 60%. Efektem ubocznym modyfikacji jest 3% wzrost maksymalnych odkształceń łyżki oraz wzrost jej masy o 15 kg. Dzięki doświadczeniu inżynierów oraz przeprowadzeniu analizy MES można szybko, bez potrzeby produkcji prototypu i przeprowadzania kosztownych badań sprawdzić wytrzymałość konstrukcji łyżki koparki.



## LITERATURA

- Bianco, F., Teti, L., Licitra, G., Cerchiai, M., 2017, *Loudspeaker FEM Modelling: Characterisation of Critical Aspects in Acoustic Impedance Measure Through Electrical Impedance*, Applied Acoustics, no. 124, s. 20–29.
- Ciechoń, C., Cecot, W., Krok, J., Pluciński, P., 2009, *Metody komputerowe w liniowej mechanice konstrukcji*, Politechnika Krakowska, Kraków.
- Dhondt, G., 2004, *The Finite Element Method for Three-dimensional Thermomechanical Applications*, John Wiley & Sons Ltd., England.
- Ferrari, A., Mittica, A., 2012, *FEM Modeling of the Piezoelectric Driving System in the Design of Direct-Acting Diesel Injectors*, Applied Energy, no. 99, s. 471–483.
- Goliński, J., 1974, *Metody optymalizacji w projektowaniu technicznym*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Hartmann, F., Katz, C., *Structural Analysis with Finite Elements*, Springer, 2007.
- Juinall, R.C., Marshek, K.M., 2003, *Fundamentals of Machine Component Design*, John Wiley, New York.
- Keprate, A., 2017, Chandima Ratnayake, R.M, Sankararaman, S., *Adaptive Gaussian Process Regression as an Alternative to FEM for Prediction of Stress Intensity Factor to Assess Fatigue Degradation in Offshore Pipeline*, International Journal of Pressure Vessels and Piping, no. 153, s. 45–58.
- Lesnau, A., 2016, *Rozkład naprężeń mechanicznych w łyżce o szerokości 500 mm, przeznaczonej do koparki podsiębiernej*, praca inżynierska.
- Minikoparki hydrauliczne 303.5E CR, 304E CR, 305E CR, 305.5E CR parametry techniczne*, 2012, Caterpillar Inc.
- Mukherjee, S., Mukherjee, Y.X., 2005, *Boundary Methods: Elements, Contours, and Nodes*, Taylor & Francis, New York.
- Samarskii, A.A., 2001, *The Theory of Difference Schemes*, Marcel Dekker, Inc. New York.
- Zhang, Y., Lu, T., 2017, *Unsteady-state Thermal Stress and Thermal Deformation Analysis for a Pressurizer Surge Line Subjected to Thermal Stratification Based on a Coupled CFD-FEM Method*, Annals of Nuclear Energy, no. 108, s. 253–267.