

ILDIKO KERTESZ BRINAS  
NARCIS IONEL REBEDEA  
ILIE LUCIAN OLTEAN

## Analiza naprężeń i odkształceń zębów tnących koparki wielonaczyniowej w trakcie pracy z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES)

W przypadku koparek wielonaczyniowych na proces urabiania mają wpływ siły przeciwstawne elementów roboczych i narzędzi urabiających. Siły te determinują wybór maszyn i ich parametrów oraz metody działania [1, 2]. Badania nad przyczynami awarii części mechanicznych pokazują, że systemy urabiania i ładowania powodują najwięcej awarii, około 32% wszystkich odnotowanych awarii mechanicznych [3]. W niniejszej pracy będziemy używać metody elementów skończonych (MES) do analizy odkształceń i naprężeń działających na ząb tnący, zamocowany na kole czerpakowym koparek wielonaczyniowych. W tym celu wykorzystano oprogramowanie SolidWorks® – zarówno jako narzędzie CAD do projektowania zęba, jak i do modelowania oraz symulacji zjawisk.

Słowa kluczowe: koparka wielonaczyniowa, koło czerpakowe, zęby tnące, uchwyt zębów tnących, MES, siła, naprężenie, odkształcenie

### 1. KROKI W ANALIZIE METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

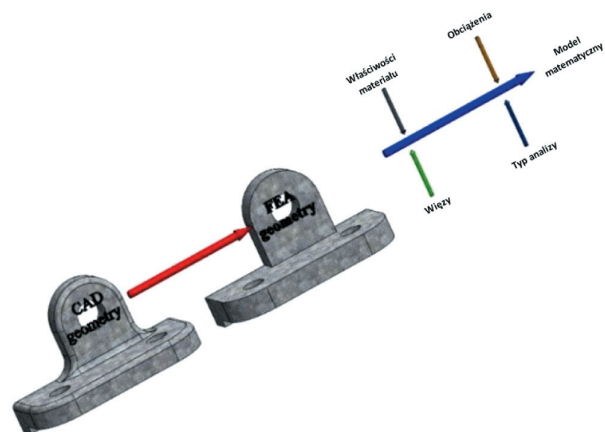
Punktem wyjścia jakiegokolwiek projektu z wykorzystaniem metody elementów skończonych i symulacji jest model, który może stanowić element układu części. Najpierw określa się cechy charakterystyczne materiału (materiałów) części, zadania oraz ograniczenia, którym model jest poddawany [4]. Następnie, wykorzystując dowolne narzędzie oparte na metodzie elementów skończonych, geometrię modelu dzieli się na stosunkowo małe jednostki nazywane elementami skończonymi. Tworzenie elementów jest powszechnie nazywane generowaniem siatki elementów [5].

Stopnie swobody węzła w siatce elementów skończonych określają zdolność węzła do wykonywania translacji i rotacji. Liczba stopni swobody w węźle zależy od typu elementu. W programie SolidWorks® Simulation węzły elementów bryły mają trzy stopnie swobody, natomiast węzły elementów skorupy mają sześć stopni swobody.

Tworzenie siatki elementów często wymaga zmian w geometrii CAD:

- kasowanie jest to proces usuwania części geometrii, które są nieistotne podczas analizy, takie jak zaokrąglenia lub skosy;

- idealizacja jest bardziej agresywnym procesem zmiany geometrii, na przykład cienkie ściany są zastępowane przez powierzchnie lub belki zastępowane są przez linie;
- czyszczenie jest niezbędne, aby geometria spełniała wymagania narzucone przez proces generowania siatki.

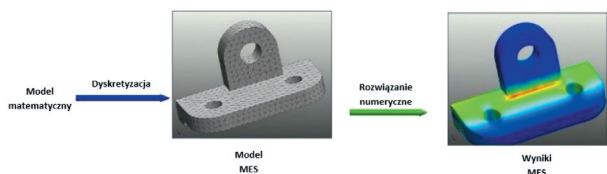


Rys. 1. Tworzenie modelu matematycznego

Na tworzenie modelu matematycznego składa się: modyfikowanie geometrii CAD (tj. usunięto zaokrąglenia – rys. 1), określenie obciążeń i naprężeń, narzucenie ograniczeń, określenie właściwości materiału

i rodzaju analizy (statyczna, dynamiczna itd.), jaką należy przeprowadzić [6]. Właściwości materiału, zadania i ograniczenia narzucone na model stanowią dane wyjściowe dla określonego typu analizy.

Model matematyczny oparty na geometrii metody elementów skończonych, informacje o materiałach i ich właściwości, wymagania, jakim poddany jest model oraz narzucone ograniczenia, można podzielić na skończone elementy przy użyciu procesu generowania siatki elementów (rys. 2). W odniesieniu do węzłów siatki elementów stosuje się dyskretne obciążenia i ograniczenia [7].

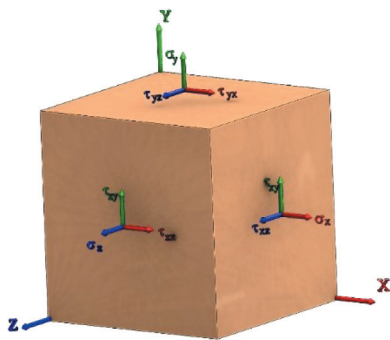


Rys. 2. Budowanie modelu dla metody elementów skończonych

Często najtrudniejszym krokiem badania metody elementów skończonych jest ocena wyników. Poprawna interpretacja wyników oznacza zrozumienie wszystkich uproszczeń i błędów, jakie one wywołują w pierwszych trzech etapach: określeniu modelu matematycznego, generowaniu siatki i rozwiązaniu jej.

## 2. KRYTERIUM JAKOŚCI VON MISESA

Kryterium testu naprężeń von Misesa, znane również jako kryterium Hubera, to test naprężeń, który reprezentuje wszystkie sześć elementów ogólnego stanu 3D (rys. 3).



Rys. 3. Geometryczny stan naprężeń

Na naprężenie ogólne składają się trzy naprężenia normalne:  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  i sześć naprężeń stycznych. Z uwagi na symetrię naprężeń stycznych ogólny stan naprężenia 3D charakteryzuje sześć elementów:

$\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  i  $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ,  $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ ,  $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ . Naprężenie von Misesa można wyrazić następującym równaniem:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{0,5 \cdot \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right] + 3 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (1)$$

Naprężenie von Misesa używane jest do analizy bezpieczeństwa strukturalnego materiałów o właściwościach elastoplastycznych (takich jak stopy stali lub aluminium). Teoretycznie materiał ciągliwy poddaje się, kiedy naprężenie von Misesa jest równe granicy dozwolonego naprężenia. W większości przypadków jako granicę naprężeń wykorzystuje się granicę płynięcia. Zgodnie z kryterium von Misesa, w przypadku awarii współczynnik bezpieczeństwa (*FOS*) wyrażony jest jako:

$$FOS = \frac{\sigma_{limit}}{\sigma_{vm}} \quad (2)$$

gdzie  $\sigma_{limit}$  to granica płynięcia.

## 3. GEOMETRYCZNE PARAMETRY ZĘBÓW KOPAREK WIELONACZYNIOWYCH

Na geometrię zębów tnących koparek wielonaczyniowych mają wpływ:

- parametry funkcjonalne koparki,
- parametry konstrukcyjne czepaków (rys. 4) i koła czepakowego (rys. 5),
- kształt i rodzaj używanych zębów tnących,
- rodzaj urabianego materiału,
- koszt.

Są dwa rodzaje zębów tnących: zęby tnące w kształcie przecinaka używane w koparkach wielonaczyniowych oraz zęby tnące w kształcie stożka wykorzystywane zarówno w koparkach wielonaczyniowych, jak i kombajnach [10].



Rys. 4. Czepak z zębami tnącymi koparki wielonaczyniowej [8]





Rys. 8. Warunki mocowania zęba tnącego

Rozważono maksymalne styczne i normalne siły urabiania na trajektorii zęba, jak również jego siłę boczną generowaną przez ruch obrotowy [13].

Siły te przyjmują następujące wartości:

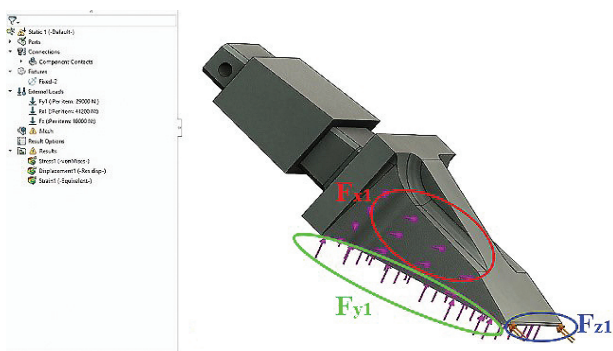
$F_x = 60 \text{ kN}$ ;  $F_y = 18 \text{ kN}$ ;  $F_z = 10 \text{ kN}$ . W odniesieniu do powierzchni zęba będziemy mieć następujące siły składowe:

$$F_{y1} = F_x \cos \alpha - F_y \cos \gamma = 25,857 \cdot 10^3 \text{ N} \quad (3)$$

$$F_{x1} = F_x \sin \alpha - F_y \sin \gamma = 36,198 \cdot 10^3 \text{ N} \quad (4)$$

$$F_{z1} = 10 \cdot 10^3 \text{ N} \quad (5)$$

W przypadku tych sił określono stan naprężeń dla zęba tnącego o kącie ostrza  $28^\circ$ , który ma węższą konstrukcję. Siły te to wypadkowe sił obciążeń właściwych o przypadkowym rozmieszczeniu na aktywnych czołach zęba tnącego, które ze względu na obliczenia uznano za zastosowane na ostrzu zęba tnącego (rys. 9).

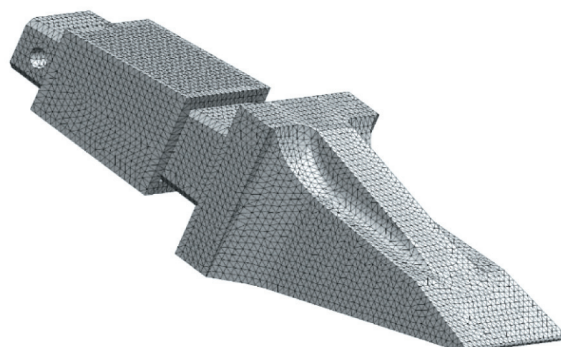


Rys. 9. Siły działające na ząb

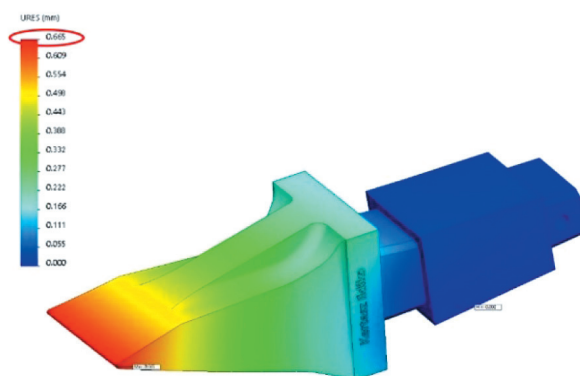
Materiał zastosowany do symulacji to stop 41MoCr11 lub jego odpowiednik o parametrach  $\sigma_{02} = 750 \text{ N/mm}^2$ ,  $\sigma_r = 950 \text{ N/mm}^2$  (średnio utwardzony stop stali, zalecany do części obrabianych na gorąco).

Rysunek 10 przedstawia topologię węzłów siatki zęba tnącego, a rysunek 11 odkształcenia zęba tnącego

go wynikające z analizy przeprowadzonej metodą elementów skończonych. Można zauważyć, że maksymalne odkształcenie wynosi  $0,665 \text{ mm}$  i występuje na ostrzu zęba tnącego.

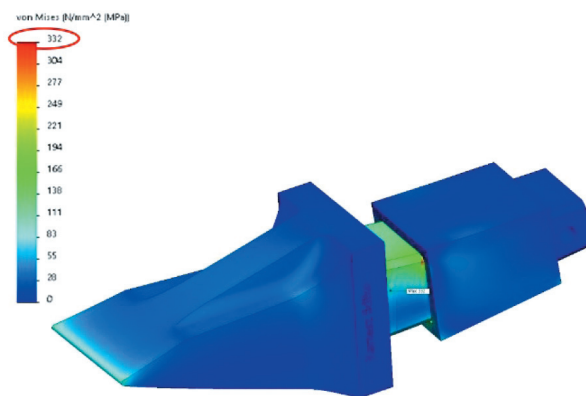


Rys. 10. Topologia węzłów siatki



Rys. 11. Odkształcenie zespołu zęba tnącego i wspornika jego uchwytu

Na podstawie rysunku 12 można zauważyć, że największe naprężenie występuje w części chwytowej zęba tnącego pomiędzy jego uchwytem a łączeniem. Maksymalne naprężenie von Misesa wynosi  $332 \text{ N/mm}^2$ .



Rys. 12. Naprężenie zespołu zęba tnącego i wspornika jego uchwytu



## 5. WNIOSKI

Metoda elementów skończonych to analiza numeryczna stosowana do rozwiązywania problemów w różnych dziedzinach inżynierii. W inżynierii mechanicznej jest ona powszechnie używana do rozwiązywania problemów konstrukcyjnych, termicznych i związanych z wibracjami, a z uwagi na swoją numeryczną wszechstronność i skuteczność, metoda ta zdobywa popularność na rynku oprogramowania analizy inżynierskiej, podczas gdy inne metody znalazły tylko niszowe zastosowania.

Metoda analiza elementów skończonych jest stosowana głównie w fazie opracowywania produktu w celu przeanalizowania projektu. Ostatecznym celem jej stosowania jako narzędzia projektowego jest zmiana standardowego powtarzającego się cyklu „projekt → prototyp → test” na proces uproszczony, w którym prototypy używane są do weryfikacji ostatecznego projektu, a nie jako narzędzia do projektowania.

Dzięki metodzie elementów skończonych wersje projektu przesuwają się z przestrzeni fizycznej prototypów i testowania do wirtualnej przestrzeni symulacji komputerowej.

Symulacja zachowania się zęba tnącego, mocowanego na czerpakach koparek wielonaczyniowych, za pomocą analizy elementów skończonych została oparta na wynikach wieloletnich badań przeprowadzonych w Katedrze Inżynierii Mechanicznej, Przemysłowej i Transportu, których celem była poprawa wydajności koparek wielonaczyniowych używanych w górnictwie odkrywkowym na terenie zagłębia Oltenia. Wyniki uzyskane z wykorzystaniem tej metody są zgodne z rezultatami otrzymanymi przy zastosowaniu metod analitycznych w badaniach naukowych tam prowadzonych:

- mocowanie zęba tnącego w uchwycie powoduje, że naprężenie von Misesa jest maksymalne w obszarze części chwytowej zęba, uchwytu i łączenia;
- maksymalne odkształcenie występuje na ostrzu zęba tnącego;
- należy zaprojektować nowy uchwyt, który zapewni lepszą obudowę zęba tnącego, oraz przeprowadzić badania odkształceń i naprężeń w tej nowej konfiguracji, z wykorzystaniem symulacji i modelowania.

## Literatura

- [1] Dimirache G., Zamfir V.: *Ingineria sistemelor mecanice*, Editura Focus, Petroșani 2002.
- [2] Iliș N.: *Mașini miniere, exemple de calcul*, Editura Tehnică: București 1993.
- [3] Andraș A., Andraș I., Tomuș O.B.: *Optimization of geometric and strength parameters of teeth for bucket wheel excavator in view to increasing the cutting efficiency*, 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM 2017.
- [4] Akin J.E.: *Finite Element Analysis Concepts via SolidWorks*, World Scientific, 2009.
- [5] Kurowski P.M.: *Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation*, SDC Publications, Mission, USA 2015.
- [6] Popescu F.D.: *Aplicații industriale ale tehnicii de calcul*, Editura AGIR, București 2009.
- [7] Pop I.A., Itu R.B., Radu S.M.: *Applications of forces reduction in the calculation of technological mechanical loads transmitted to the tower of a winding engine trough extraction pulley bearings*, 16<sup>th</sup> GeoConference on Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining SGEM 2016.
- [8] Ladányi G., Virág Z.: *Examining the Bucket Wheel Excavator's Bucket After Renewal*, "Annals of The University of Petroșani, Mechanical Engineering" 2016, 18: 93–98.
- [9] Nan M.S., Kovacs J., Popescu F.D.: *Balance control by weighting and tensiometric measurements of bucket wheel excavators*, "WSEAS Transactions On Systems And Control" 2008, 11, 3: 927–936.
- [10] Marian I.: *Utilaje de încărcare și transport minier*, Editura Tehnică, București 1991.
- [11] Radu S.M., Chmielarz W., Andraș A.: *Mining Technological System's Performance Analysis*, "Annals of the University of Craiova for Journalism, Communication and Management" 2016, 2: 56–64.
- [12] Kovacs I., Iliș N., Nan M.S.: *Regimul de lucru al combinelor miniere*, Editura Universitas, Petroșani, 2000.
- [13] Nan M.S.: *Parametrii procesului de excavare la excavatoarele cu rotor*, Editura Universitas, Petroșani 2007.

*mgr inż. ILDIKO KERTESZ BRINAS*

*mgr inż. NARCIS IONEL REBEDEA*

*mgr inż. ILIE LUCIAN OLTEAN*

*Katedra Inżynierii Mechaniczej,*

*Przemysłowej i Transportu*

*Uniwersytet w Petroszanach*

*20 Universităţii,*

*332006 Petroszany, HD, Rumunia*

*kerteszildiko@gmail.com*