

# Symulacja procesu formowania wióra z użyciem metody elementów skończonych

## Simulation of chip formation process with the use of the Finite Element Method

KRZYSZTOF JAROSZ  
PIOTR LÖSCHNER  
PIOTR NIESŁONY \*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.10.408

W pracy przedstawiono modelowanie procesu toczenia metodą elementów skończonych. Symulację prowadzono dla modelu Johnsona-Cooke'a wraz z uwzględnieniem modelu dekohezji. Wyniki symulacji w obszarze formowania wióra porównano z danymi eksperymentalnymi.

**SŁOWA KLUCZOWE:** symulacja, skrawanie, MES, formowanie wióra

*In this paper, a method of modeling the turning process with the use of Finite Element Method was presented. Simulation was conducted for Johnson-Cook constitutive material model, taking into account the decohesion model. The results of simulation were compared with experimental data.*

**KEYWORDS:** Simulation, cutting, FEM, chip formation

Stosowanie metod symulacyjnych pozwala na przewidywanie i badanie zachowania szerokiego spektrum materiałów obrabianych w zależności od zmian geometrii narzędzi skrawających i parametrów procesu. Możliwe są m.in. symulacje: wartości siły skrawania, temperatury w strefie skrawania, zużycia narzędzia, formowania i łamania wióra czy chropowatości powierzchni obrobionej [1].

W ostatnich latach opublikowano szereg prac dotyczących różnych aspektów symulacji komputerowej procesów skrawania. Zhang i in. w swojej pracy [1] badali wpływ doboru parametrów modelu Johnsona-Cooka oraz różnych metod sieciowania na wyniki symulacji procesu toczenia stopu Ti-6Al-4V. Strategie sieciowania oraz ich wpływ na wyniki symulacji przedstawiono w pracy [2]. Analiza naprężeń własnych powstających podczas skrawania stopu Ti-6Al-4V w oparciu o badania eksperymentalne i symulacje z wykorzystaniem różnych modeli materiałowych została przeprowadzona w pracy [3], a dwa odmienne podejścia do symulacji procesu wiercenia przedstawiono w pracach [4, 5].

### Modelowanie procesu formowania wióra

Do przeprowadzenia symulacji procesu skrawania niezbędne jest zaimplementowanie odpowiedniego modelu konstytutywnego. Model materiałowy ma za zadanie opisywać związki między naprężeniami i odkształceniami występującymi w materiale w obszarze odkształceń plastycznych, aż do zniszczenia materiału [4]. We współczesnych badaniach wykorzystuje się szereg modeli materiałowych, jednakże najczęściej do modelowania stopów metali wykorzystywany jest model Johnsona-Cooka. Uwzględnia on wpływ umocnienia materiału, prędkości odkształcenia,

a także zmiękczenia cieplnego na zmianę stanu naprężeń materiału [1]. Do celów symulacji przyjęty został dostępny w programie ABAQUS model Johnsona-Cooka w następującej postaci [3, 4]:

$$\sigma_p = [A + B(\bar{\epsilon}^p)^n] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}^p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_{ot}}{T_t - T_{ot}} \right)^m \right] \quad (1)$$

gdzie:  $\sigma_p$  – naprężenia uplastyczniające,  $\epsilon^p$  – odkształcenia plastyczne,  $\dot{\epsilon}^p$  – prędkość odkształceń plastycznych,  $\dot{\epsilon}_0$  – prędkość odkształcenia odniesienia,  $T$  – temperatura,  $T_t$  – temperatura topnienia materiału,  $T_{ot}$  – temperatura otoczenia,  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $m$ ,  $n$  – stałe zależne od modelowanego materiału obrabianego.

Dodatkowo konieczne jest zdefiniowanie warunków zniszczenia materiału – dekohezji będącej efektem oddziaływania ostrza na materiał obrabiany. W tym celu posłużono się wzorem określającym odkształcenia krytyczne inicjujące zniszczenie [4]:

$$\bar{\epsilon}_D^p = [d_1 + d_2 \exp(-d_3 \eta)] \left[ 1 + d_4 \ln \left( \frac{\bar{\epsilon}^p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] (1 + d_5 \hat{\Theta}) \quad (2)$$

gdzie:  $\bar{\epsilon}_D^p$  – odkształcenie zastępcze przy inicjacji zniszczenia,  $\dot{\epsilon}_0$  – prędkość odkształcenia odniesienia,  $\hat{\Theta}$  – temperatura względna,  $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5$  – stałe, zależne od materiału parametry inicjacji zniszczenia,  $\eta$  – stosunek naprężeń normalnych do naprężenia zastępczego Hubera.

### Parametry procesu skrawania i własności materiału

Przyjęte własności fizyczne materiału obrabianego podane zostały w tabl. I. Zaczepnięte z [1] wielkości parametrów modelu Johnsona-Cooka oraz parametrów dekohezji przedstawiono w tabl. II. Badania symulacyjne w układzie płaskim prowadzono dla parametrów skrawania: posuwu  $f = 0,2$  mm/obr, prędkości skrawania  $v_c = 1$  m/s, kąta natarcia  $\gamma = 0^\circ$ , promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej  $r_n = 0,01$  mm.

### Symulacja i wyniki

Na potrzeby symulacji przyjęto narzędzie jako ciało nieodkształcalne. Wyznaczane numerycznie były jedynie odkształcenia i rozkład naprężeń w materiale obrabianym. Ustalono stałą wielkość pojedynczego węzła siatki na 0,01 całkowitej długości modelu przedmiotu obrabianego.

**TABLICA I. Własności fizyczne stopu Ti-6Al-4V [1]**

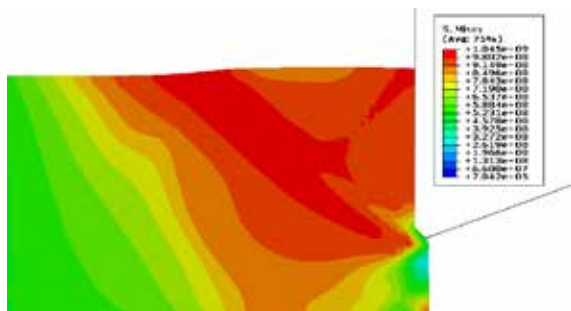
Gęstość $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	Moduł Younga $E$ , Pa	Liczba Poissona $\nu$
4430	11·10 <sup>9</sup>	0,33

\* Mgr inż. Krzysztof Jarosz (jarosz.krzysztof@gmail.com), mgr inż. Piotr Löschner (pleszner@op.pl), dr hab. inż. Piotr Niesłony prof. PO (p.nieslony@po.opole.pl) – Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska

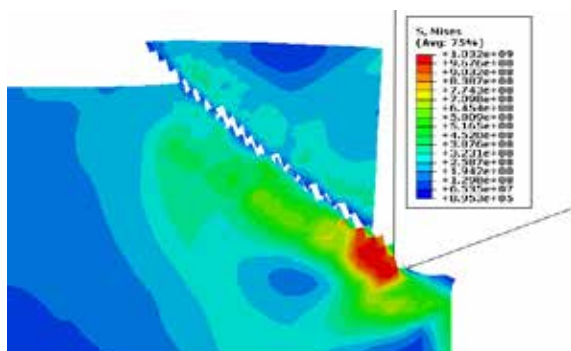
TABLICA II. Parametry modelu Johnsona-Cooka oraz stałe dla modelu dekohezji stopu tytanu Ti-6Al-4V [1]

A, Pa	B, Pa	C	n	m	$\dot{\epsilon}^0, s^{-1}$
$862 \cdot 10^6$	$331 \cdot 10^6$	0,012	0,34	0,8	1
$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	
-0,09	0,25	-0,5	0,0014	3,87	

Wyniki symulacji z obszarem dekohezji materiału obrabianego przedstawiono w trzech sekwencjach na rys. 1÷2.



Rys. 1. Początek procesu skrawania. Widok stanu naprężenia przed rozdzieleniem materiału po czasie 0,02 s



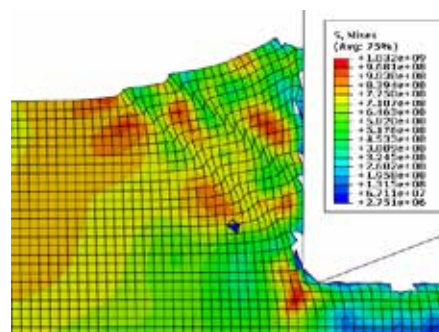
Rys. 2. Dekohezja materiału obrabianego z przemieszczeniem się wióra względem płaszczyzny poślizgu. Czas symulacji 0,07 s

Początkowy etap skrawania z rozkładem naprężeń w strefie obróbki przedstawiono na rys. 1. Wyraźnie widoczny jest obszar występowania naprężeń o wysokich wartościach, które można uznać za naprężenia krytyczne. Kształtują się one wzdłuż linii płaszczyzny poślizgu. Efektem przekroczenia wartości wytrzymałości na rozerwanie materiału jest uzyskanie dekohezji materiału wzdłuż płaszczyzny poślizgu (rys. 2) i uformowanie segmentu wióra.

Badając poprawność modelu konstytutywnego wraz z wprowadzonym do systemu MES modelem dekohezji, zaobserwowano zjawisko spękania wióra (rys. 3). Model symulacyjny pozwolił na uwidocznienie efektu kształtowania wióra wraz z pokazaniem obszarów odkształcenia siatki MES w obrębie płaszczyzn poślizgu. Ten efekt symulacji potwierdził jakościową poprawność zastosowanych modeli materiałowych.

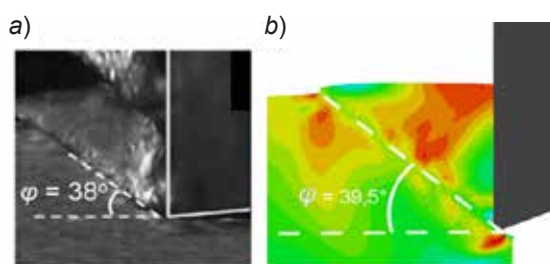
Z symulacji wynika, że wartości naprężeń krytycznych w obszarze dekohezji kształtują się na poziomie nieco ponad 1000 MPa, co jest zgodne z granicą wytrzymałości stopu tytanu Ti-6Al-4V [3]. Powstający wiór ma strukturę segmentową (rys. 3), co potwierdzają wyniki eksperymentu przedstawione na rys. 4a.

Weryfikację eksperymentalną wyników symulacji odnośnie do procesu formowania wióra przeprowadzono w oparciu o dane eksperymentalne wyznaczone w pracy [6]. Porównanie wartości kąta poślizgu przy skrawaniu stopu Ti-6Al-4V wyznaczonego eksperymentalnie oraz symulacyjnie przedstawiono odpowiednio na rys. 4a i 4b.



Rys. 3. Obraz spękania wióra wraz z widocznymi odkształceniami siatki MES w obrębie płaszczyzn poślizgu

Otrzymano dobrą zgodność eksperymentu z symulacją, co potwierdza poprawność zastosowanych modeli materiałowych odnośnie do toczenia tego stopu tytanu – dotyczy to zwłaszcza zastosowanego modelu dekohezji.



Rys. 4. Kąt poślizgu wyznaczony eksperymentalnie [6] (a) oraz na podstawie symulacji MES (b)

## Podsumowanie

- Uzyskanie dobrej zgodności wartości kąta poślizgu wyznaczonego z symulacji i eksperymentu potwierdza poprawność zastosowanego modelu dekohezji dla badanego stopu tytanu i ustalonych warunków obróbki.
- W trakcie symulacji zaobserwowano proces spękania wióra, w ramach którego system MES poprawnie modyfikował siatkę elementów skończonych. Determinuje to możliwość realizacji procesu symulacji w sposób ciągły.
- Potwierdzono, że wykorzystanie MES w oparciu o model Johnsona-Cooka wraz z zaproponowanym modelem dekohezji pozwala na numeryczną analizę procesu formowania wióra w strefie skrawania testowanego stopu tytanu.

## LITERATURA

1. Zhang Y., Outeiro, J.C., Mabrouki T. "On the selection of Johnson-Cook constitutive model parameters for Ti-6Al-4V using three types of numerical models of orthogonal cutting". *Procedia CIRP*. Vol. 31 (2015): pp. 112÷117.
2. Niesłony P., Grzesik W., Chudy R., Habrat W. "Meshing strategies in FEM simulation of the machining process". *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. Vol. 15 (2015): pp. 62÷70.
3. Niesłony P., Grzesik W., Laskowski P., Sienawski J. "Numerical and experimental analysis of residual stresses generated in the machining of Ti6Al4V titanium alloy". *Procedia CIRP*. Vol. 13 (2014): pp. 78÷83.
4. Kosmol J., Mieszczak W. „Zastosowanie metody elementów skończonych do modelowania procesu wiercenia”. *Modelowanie Inżynierskie*. Nr 6 (2009): s. 169÷176.
5. Matsumura T., Tamura S. "Cutting Simulation of Titanium Alloy Drilling with Energy Analysis and FEM". *Procedia CIRP*. Vol. 31 (2015): pp. 252÷257.
6. Sagapuram D., Yeung H., Guo Y., Mahato A., M'Saoubi R., Compton W.D., Chandrasekar S. "On control of flow instabilities in cutting of metals". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. Vol. 64 (2015): pp. 49÷52....