

ZASTOSOWANIE METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH DO MODELOWANIA PROCESU WIERCENIA

JAN KOSMOL, WOJCIECH MIESZCZAK

Katedra Budowy Maszyn

e-mail: jkosmol@polsl.pl, wojciech.mieszczak@polsl.pl

Streszczenie. W artykule przedstawiono próbę modelowania procesu tworzenia wióra metodą elementów skończonych. Przedstawiono przyjęty model materiałowy Johnsona-Cooke'a, kryteria zniszczenia materiału, przyjęty model tarcia oraz przyjęte związki pomiędzy parametrami materiałowymi a temperaturą. Przedstawiono przykładowe wyniki symulacji w postaci rozkładu naprężeń oraz czasowe przebiegi siły osiowej i momentu skrawania, na których podstawie przeprowadzona zostanie weryfikacja opracowanego modelu.

1. WSTĘP

Projektowanie narzędzi skrawających, zwłaszcza o złożonych kształtach, jak wiertła, gwintowniki, frezy kształtowe, itp., powinno być poprzedzone procesem optymalizacji. Ten wymóg optymalizacji wynika często z faktu, że dwa sprzeczne kryteria muszą być uwzględniane na etapie projektowania. Najlepiej można to zilustrować na przykładzie zwykłego wiertła (rys. 1), gdzie z jednej strony przekrój rowka wiórowego powinien być jak największy (ułatwia to odprowadzanie dużej ilości wiórów), a z drugiej strony, przekrój rdzenia powinien być również duży, aby powiększać wytrzymałość mechaniczną wiertła, a tym samym umożliwić stosowanie wyższych parametrów skrawania.

Oba kryteria są wzajemnie sprzeczne, ponieważ dla danej średnicy wiertła wzrost powierzchni przekroju rowka wiórowego przyczynia się do zmniejszenia powierzchni przekroju rdzenia wiertła i odwrotnie. Tak więc znalezienie rozwiązania kompromisowego wymaga działań optymalizacyjnych.

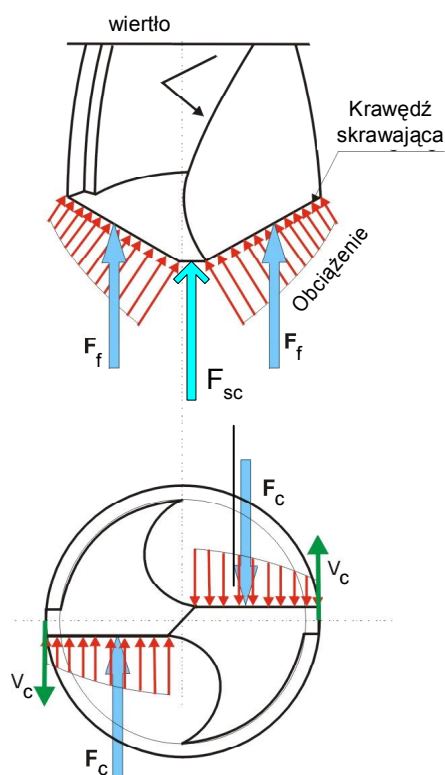
Podjęcie procedury optymalizacyjnej uwarunkowane jest wcześniejszym rozpoznaniem stanu obciążenia takiego narzędzia, tzn. rozkładem sił i momentów wynikających z procesu powstawania wióra i oddziałujących na krawędzie skrawające narzędzia. Otóż w tej materii w obróbce skrawaniem obserwujemy duże braki przejawiające się skromną informacją zarówno o wartościach liczbowych sił skrawania jak i rozkładu takiego obciążenia wzdłuż krawędzi skrawającej. Do tej pory dominują wzory empiryczne, statystyczne, które, jak w przykładzie wiertła (rys. 1), pozwalają na oszacowanie pewnych zastępczych (wypadkowych) sił, np. siły osiowej F_o , czy momentu skrawania M wg relacji [1]:

$$\begin{aligned} F_o &= C_F \cdot f^{x_F} \cdot d^{y_F} \\ M &= C_M \cdot f^{x_M} \cdot d^{y_M} \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

- F_o , M - siła osiowa i moment skrawania,
- f - posuw,
- d - średnica wiertła.

Na rysunku 1 F_f oznacza siłę posuwową działającą na krawędzie skrawające, F_c siłę obwodową działającą na krawędź skrawającą, natomiast v_c prędkość skrawania. Siły posuwowe wraz z siłą osiową działającą na ścin F_{sc} są równe sile F_o .



Rys.1. Widok typowego wiertła

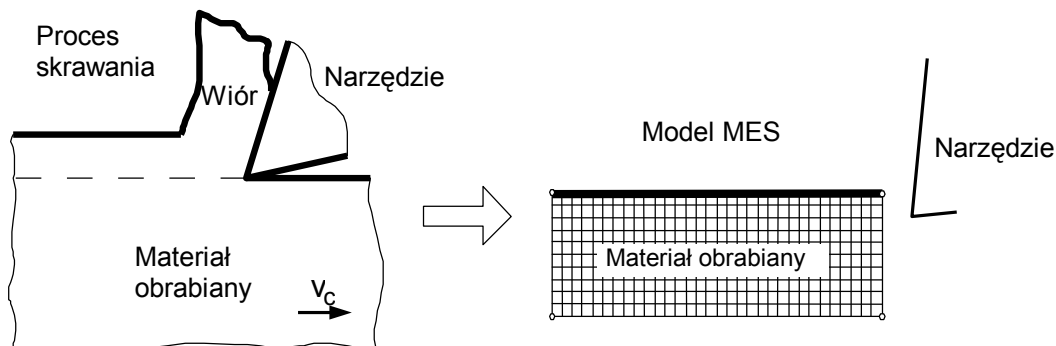
Tak więc obciążenie szacuje się na podstawie parametrów skrawania, posługując się klasycznymi wzorami empirycznymi. Te wzory nie mówią o rozkładzie obciążenia wzdłuż krawędzi skrawającej (nie jest to na ogół rozkład równomierny) ani o dynamicznych zmianach w czasie. Na ich podstawie przeprowadzenie procesu optymalizacji wydaje się być bardzo wątpliwe. Dlatego poszukuje się innych metod, które precyzyjniej pozwoliłyby ocenić wielkości obciążenia i ich rozkład, bazując na zjawiskach fizycznych zachodzących w trakcie procesu skrawania. W niniejszym artykule przedstawiono próbę zastosowania MES do oceny obciążeń w procesie wiercenia.

2. MODEL MES POWSTAWANIA WIÓRA

Proces skrawania to proces tworzenia wióra. Wobec tego model w konwencji metody elementów skończonych ma opisywać związki pomiędzy naprężeniami i odkształceniami w warstwie materiału, która zostanie zamieniona w wiór. Wymaga to wykorzystania specyficznych właściwości niektórych programów MES, którymi są: np. możliwość

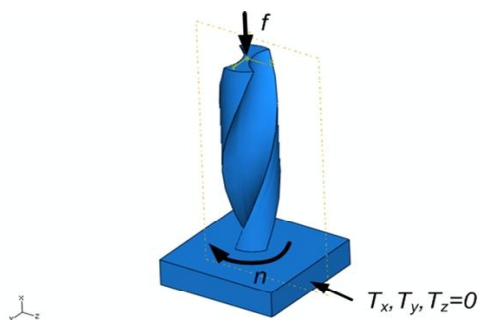
zamodelowania ruchu jednego z elementów procesu skrawania, tj. narzędzia skrawającego oraz zjawiska zderzenia poruszającego się elementu z drugim nieruchomym elementem, w tym przypadku z przedmiotem wierconym.

Na rys. 2, w sposób schematyczny, przedstawiono model powstawania wióra oraz model geometryczny MES takiego zjawiska. Ruch ciała (narzędzia) odbywa się z jednostajną prędkością v_c , która odpowiada prędkości skrawania podczas wiercenia.



Rys. 2. Model geometryczny MES dla symulacji procesu tworzenia wióra

Drugim, istotnym krokiem, niezbędnym do modelowania zjawiska zderzenia dwóch ciał metodą elementów skończonych, jest przyjęcie założenia o nieodkształcalności jednego z elementów, w tym przypadku wiertła. Obrazuje to rys. 3, na którym pokazano przyjęte założenia dotyczące parametrów skrawania, sposobu odbierania stopni swobody przedmiotowi wierconemu (translacje równe zero: $T_x, T_y, T_z=0$) i potraktowania wiertła jako bryły sztywnej. To założenie wynika z aktualnych możliwości programu MES, w którym prowadzono symulacje (ABAQUS). Oznacza to, że modelowane będą tylko odkształcenia przedmiotu skrawanego.



Rys. 3. Założenia do modelowania procesu wiercenia metodą elementów skończonych

3. MODEL MATERIAŁOWY PRZEDMIOTU SKRAWANEGO

Jednym z zasadniczych problemów modelowania MES zjawisk w procesie skrawania jest przyjęcie modelu materiałowego, tj. związków pomiędzy naprężeniami i odkształceniami i to w obszarze odkształceń plastycznych do zniszczenia włącznie. Model sprężysty, liniowy, jest w tym przypadku bezwartościowy, ponieważ proces tworzenia wióra odbywa się w obszarze bardzo dużych odkształceń plastycznych. W literaturze można znaleźć wiele modeli opisujących związki pomiędzy naprężeniami uplastyczniającymi i odkształceniami plastycznymi, z tym, że w rozpatrywanym wypadku procesu skrawania potrzebny jest model, który uwzględnia ponadto wpływ temperatury (w procesie wiercenia temperatura może

zmieniać się od temperatury otoczenia do ok. 600°C) na wartość naprężeń oraz wpływ szybkości odkształceń na wartość naprężeń (prędkości odkształceń w procesie tworzenia wióra są bardzo duże, bowiem prędkość skrawania v_c może sięgać od kilkunastu do kilkudziesięciu m/min). Dlatego do celów badań przyjęto model Johnsona-Cooke'a [2,3] w następującej postaci:

$$\sigma_p = \left[A + B(\bar{\varepsilon}^p)^n \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_o} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{ot}}{T_{top} - T_{ot}} \right)^m \right] \quad (2)$$

gdzie:

- σ_p - naprężenia uplastyczniające,
- ε^p - odkształcenia plastyczne,
- $\dot{\varepsilon}^p$ - prędkość odkształceń plastycznych,
- T - temperatura materiału skrawanego,
- T_{ot} - temperatura odniesienia,
- T_{top} - temperatura topnienia materiału skrawanego,
- A, B, C, m, n - współczynniki zależne od materiału skrawanego.

W celach symulacyjnych przyjęto wartości liczbowe współczynników A, B, C, m, n (tab. 1) dla stali 45 (taki materiał skrawany był modelowany), powołując się na dane zawarte w literaturze [4].

Tabela 1. Współczynniki w modelu Johnsona-Cooke'a

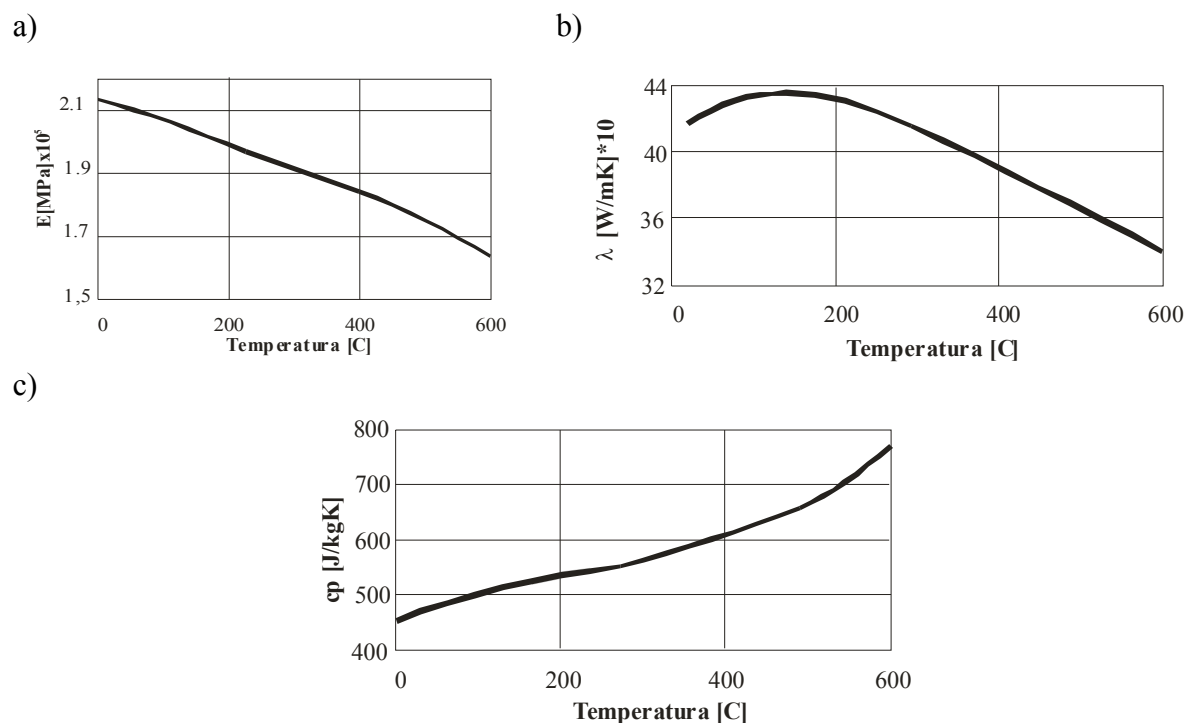
Współczynnik	Wartość
A [MPa]	528,7
B [MPa]	383,6
C	0,031
m	1,01
n	0,23

Kolejnym, istotnym problemem modelowania procesu tworzenia wióra, jest uwzględnienie wpływu temperatury na właściwości mechaniczno-ciepne materiału skrawanego i narzędzia. Chodzi o takie parametry jak moduł Younga, przewodność cieplna czy ciepło właściwe. Wiadomo, że wartości tych parametrów istotnie zależą od temperatury, dlatego w modelu MES powinny być odpowiednio korygowane wraz ze zmieniającą się temperaturą. W literaturze można znaleźć temperaturowe zależności uprzednio wymienionych parametrów. Na rys. 4 przedstawiono te charakterystyki, które zaaplikowano w programie Abaqus, definiując moduł Younga, przewodność cieplną i ciepło właściwe.

4. MODEL ZNISZCZENIA MATERIAŁU I MODEL TARCIA

Modelowanie powstawania wióra nieodłącznie związane jest z koniecznością zdefiniowania momentu i warunków zniszczenia materiału (oderwanie wióra od przedmiotu skrawanego). Model materiałowy Johnsona-Cooke'a pozwala określać zależność naprężeń

uplastyczniających od odkształceń plastycznych, ale nie definiuje momentu końcowego, tj. zniszczenia materiału. W literaturze [6] można znaleźć funkcjonały, które pozwalają na określenie odkształceń plastycznych, które uznajemy za krytyczne, tj. których osiągnięcie możemy interpretować jako początek zniszczenia.



Rys. 4. Zależność modułu Younga (a), przewodności cieplnej (b) i ciepła właściwego (c) w funkcji temperatury dla materiału odpowiadającego stali 45 [5]

Poniżej przedstawiono jeden z takich modeli:

$$\bar{\epsilon}_D^{pl} = [d_1 + d_2 \exp(-d_3 \eta)] \left[1 + d_4 \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{\dot{\epsilon}_o} \right) \right] (1 + d_5 \hat{\Theta}) \tag{3}$$

gdzie:

- $\bar{\epsilon}_D^{pl}$ - zastępcze odkształcenie na początku zniszczenia,
- $\dot{\epsilon}_o$ - prędkość odkształcenia odniesienia,
- $\hat{\Theta}$ - temperatura względna,
- $d_1 \div d_5$ - parametry inicjacji zniszczenia.

W tab. 2 przedstawiono wartości liczbowe parametrów inicjacji zniszczenia wiertła zaczerpnięte z literatury [7] dla materiału zbliżonego do stali 45.

Tabela 2. Parametry inicjacji zniszczenia d_i

Para.	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
Wart.	-0,8	2,1	-0,5	0,002	0,61

Johnson i Cook [1] sformułowali funkcjonał, który wykorzystuje się jako kryterium zniszczenia. Jest to kryterium całkowite, w postaci opisowej zależnością (4):

$$\omega_D = \int \frac{d\bar{\varepsilon}^{pl}}{\bar{\varepsilon}_D^{pl}(\eta, \dot{\varepsilon}^{pl})} = 1 \quad (4)$$

gdzie:

ω_D - funkcjonal zniszczenia,

$$\eta = -\frac{p}{q} \quad (5)$$

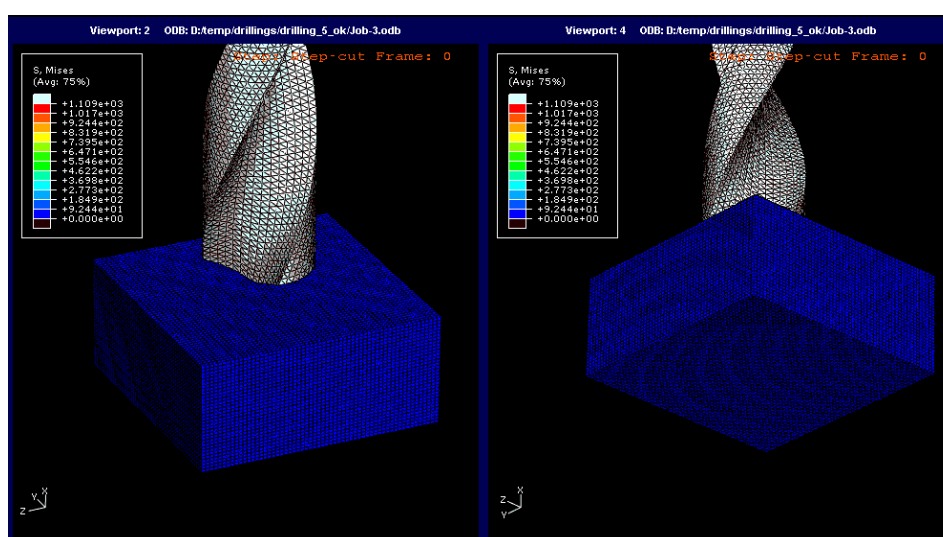
gdzie: p – naprężenie normalne; q – naprężenie zastępcze Hubera.

Zależność (4) została zaaplikowana w programie Abaqus do identyfikacji momentu zniszczenia, a tym samym do regeneracji siatki elementów skończonych (w programie Abaqus istnieje możliwość automatycznej regeneracji siatki, która w przypadku dużych odkształceń jest na tyle zdeformowana, że może prowadzić do błędów numerycznych).

Niezwykle istotnym zagadnieniem modelowania tworzenia wióra jest model tarcia. Wiadomo, że wiór, przemieszczając się po powierzchni narzędzia, wywiera bardzo duże naciski, a tym samym powstaje bardzo duża siła tarcia. Uwzględnienie tego zjawiska jest konieczne. Problemem pozostaje sam model tarcia. W rozpatrywanym przypadku przyjęto najprostszy model tarcia, tj. model Coulomba, z tą tylko modyfikacją, że współczynnik tarcia nie był wielkością stałą, lecz zmieniał się odpowiednio do zmian nacisków normalnych na styku wióra i narzędzia.

5. BADANIA SYMULACYJNE TWORZENIA WIÓRA METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

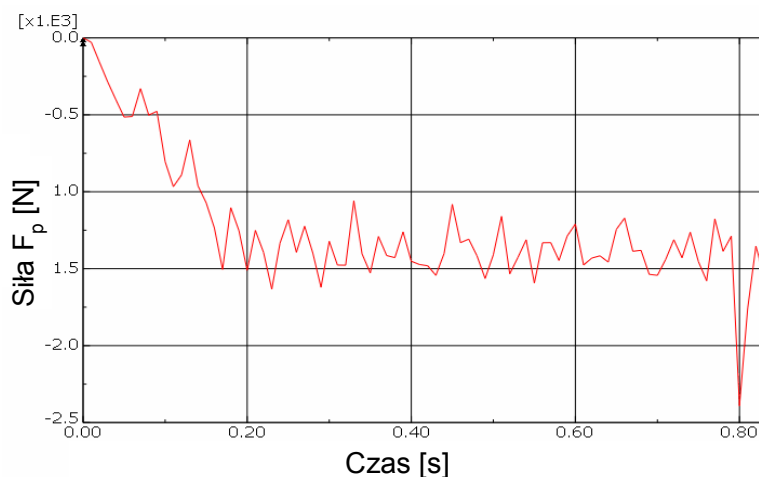
Przedstawione uprzednio założenia zostały praktycznie zastosowane w modelu MES, który utworzono w programie Abaqus. Program ten ma szerokie możliwości definiowania zarówno samych modeli materiałowych i modeli tarcia jak również definiowania funkcyjnych zależności parametrów modeli, np. od temperatury. Istnieje możliwość funkcyjnego opisu tych zależności jak i opisu tabelarycznego.



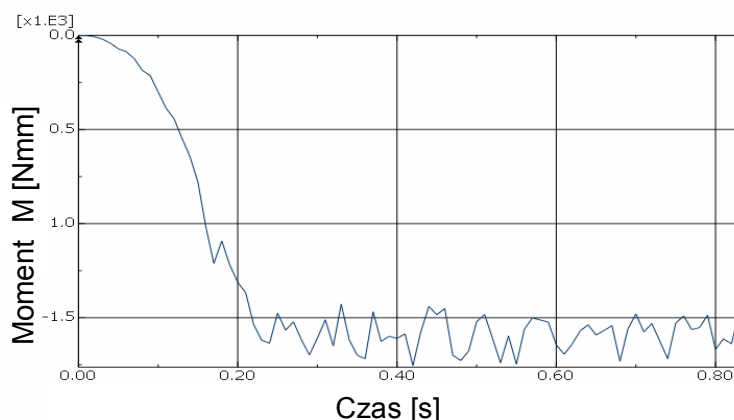
Rys. 5. Rozkład naprężeń w materiale skrawanym

Program Abaqus ma zaimplementowany mechanizm regeneracji siatki, co jest istotne w przypadku bardzo dużych odkształceń. Wykorzystano ten mechanizm do regeneracji siatki w momencie, w którym identyfikowano stan odkształcenia uznany za zniszczenie.

a)



b)



Rys. 6. Przebieg czasowy siły osiowej (a) i momentu skrawania (b) podczas procesu tworzenia wióra

Program Abaqus ma opcje obliczania wielkości reakcji w miejscach, w których zdefiniowano stopnie swobody. To pozwoliło na obliczenie reakcji w postaci siły osiowej i momentu skrawania działających na przedmiot skrawany, a tym samym i na narzędzie skrawające. Ten mechanizm umożliwił śledzenie zmian siły osiowej i momentu skrawania przez cały okres symulacji, tj. od zetknięcia się ruchomego narzędzia z przedmiotem aż do zakończenia procesu powstawania wióra. Na tej podstawie możliwa będzie ocena obciążenia narzędzia skrawającego, które to obciążenie jest niezbędne dla procesu optymalizacji samego narzędzia. Efektem symulacji procesu tworzenia wióra był rozkład naprężeń w materiale skrawanym, co obrazowo przedstawiono na rys. 5.

Rys. 5 przedstawia przykład rozkładu naprężeń w wybranej chwili czasu. Symulacja umożliwia zarejestrowanie czasowych zmian tych naprężeń w wybranych punktach przedmiotu.

Na rys. 6 przedstawiono przebiegi czasowe siły osiowej i momentu skrawania jako reakcji w miejscach mocowania przedmiotu w pierwszych chwilach rozpoczynania procesu skrawania. Te przebiegi czasowe stanowią podstawę do eksperymentalnej weryfikacji opracowanego modelu MES tworzenia wióra, autorzy mają bowiem techniczne możliwości pomiaru zmian

siły osiowej i momentu podczas wiercenia. Porównanie przebiegów symulacyjnych i eksperymentalnych pozwoli na wstępną ocenę poprawności przyjętych założeń i adekwatności opracowanego modelu MES. W zależności od wyników tej weryfikacji opracowany model będzie musiał być udoskonalony lub może stanowić narzędzie wspomagające działanie projektanta narzędzi skrawających.

6. PODSUMOWANIE

- Przedstawiony w artykule model MES wiercenia ujmuje większość głównych zjawisk towarzyszących procesowi tworzenia wióra.
- Model MES wiercenia umożliwia badanie naprężeń, ciepła, rozkładu temperatur oraz innych zjawisk występujących w wiórze.
- Możliwym jest wyznaczenie obciążeń działających na wiertło (momentu, siły osiowej), co ma istotne znaczenie na etapie weryfikacji eksperymentalnej modelu.
- Model MES wiercenia może być użyteczny na etapie projektowania narzędzia.

LITERATURA

1. Dmochowski J.: Podstawy obróbki skrawaniem. Warszawa : WNT, 1978
2. Jaspers S. P. F. C., Dautzenberg J. H.: Material behavior similar to metal cutting: flow stress in the primary shear zone. "Journal of Material Processing Technology" 2002, 122.
3. Zhao H.: : A constitutive model for metals over a large range of strain rates. Identification for mild-steel and aluminum sheets. "Materials Science and Engineering" 1997, A230.
4. Mieszczak: W.: Model predykcyjny siły i momentu skrawania w procesie wiercenia. Praca doktorska. Politechnika Śląska Gliwice, 2005.
5. Baza materiałowa programu MSC.Software Corporation.
6. Pantale O., Bacaria J_L., Dalverny O., Rakotomalala R., Caperaa S.: 2D and 3D numerical models of metal cutting with damage effects. "Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering" 2004, 193 , p. 4383–4399
7. W.Mieszczak: Trójwymiarowe wiercenia otworu metodą elementów skończonych. Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn. Gliwice 2008.

MODELING OF DRILLING PROCESS USING FINITE ELEMENT METHOD

Summary. An attempt of chip formation process modeling using finite element method is shown in the paper. The material model of Johnson-Cook is presented. The criterion of material damage, model of friction and used relationships between material's parameters and temperature are shown too. Some examples of simulation like axial force and cutting torque as function of time are presented. The axial and cutting torque will be used while verification of proposed model of chip formation.