

Mgr inż. Hong Phong NGUYEN, dr inż. Agnieszka DEREWOŃKO,
prof. dr hab. inż. Tadeusz NIEZGODA (Wojskowa Akademia Techniczna):

SPRĘŻENIE TERMOMECHANICZNE W ANALIZACH NUMERYCZNYCH 3D PROCESU TOCZENIA CZĘŚCI KLASY WAŁEK

Streszczenie

Prezentowano analizę numeryczną 3D procesu toczenia części klasy wałek z wykorzystaniem oprogramowania inżynierskiego MSC.Marc oraz z uwzględnieniem sprzężenia między polami odkształcenia i temperatury. W modelu zastosowano zaktualizowane sformułowanie Lagrange'a wraz ze strategią globalnego remeshingu w celu zapobiegnięcia zniekształceniom elementów. Zestawienie uzyskanych wyników analiz numerycznych i wstępnych badań eksperymentalnych z użyciem kamery termowizyjnej potwierdziła przyjęte założenia i opracowany model numeryczny.

Słowa kluczowe: *sprężenie termomechaniczne, toczenie, remeshing*

THERMO-MECHANICAL COUPLING IN 3D NUMERICAL ANALYSES OF THE TURNING PROCESS

Abstract

The paper presents a 3D numerical analysis of the turning process with the use of MSC.Marc engineering software. The coupling between deformation and temperature fields was considered and the updated Lagrange formulation was used in the analysis. In order to prevent element distortion, the strategy of global remeshing was used. The results comparison of the numerical analysis and the preliminary experimental studies with the use of a thermal imaging camera confirmed the adopted assumption and the developed numerical model.

Keywords: *thermo-mechanical coupling, turning, remeshing*

SPRĘŻENIE TERMOMECHANICZNE W ANALIZACH NUMERYCZNYCH 3D PROCESU TOCZENIA CZĘŚCI KLASY WAŁEK

mgr inż. Hong Phong NGUYEN¹, dr inż. Agnieszka DEREWOŃKO¹,
prof. dr hab. inż. Tadeusz NIEZGODA¹

1. WPROWADZENIE

Wśród wielu dziedzin, metoda elementów skończonych jest obecnie wykorzystywana również do projektowania i symulacji procesów technologicznych. Jednak odwzorowanie wszystkich aspektów procesów skrawania wymaga odpowiedzialnego stosowania dostępnych algorytmów tj. metod dyskretyzacji, modeli konstytutywnych materiałów czy formalizmu rozwiązania np. opisu Lagrange'a i Eulera [2, 3, 5, 6, 7].

W pracy przedstawiono wstępne symulacje procesu toczenia wzdłużnego części klasy wałek z wykorzystaniem oprogramowania inżynierskiego MSC.Marc, w której uwzględniono sprzężenie między polami odkształceń i temperatur. Przedstawiono weryfikację jakościową modelu numerycznego przez porównanie pól temperatur uzyskanych w rezultacie analiz numerycznych i wstępnych badań eksperymentalnych z użyciem kamery termowizyjnej.

2. PODSTAWY TEORETYCZNE

Zależności podane w tym rozdziale podane są wg instrukcji do programu MSC.Marc [1]. Sprzężoną numeryczną analizę termomechaniczną 3D procesu toczenia części klasy wałek z przeprowadzono wykorzystując oprogramowanie inżynierskie MSC.Marc. W stosowanej procedurze warunki cieplne opisane są wzorem:

$$C^T(T)\dot{T} + K^T(T)T = Q + Q^I + Q^F \quad (1)$$

¹ Wojskowa Akademia Techniczna, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa.

gdzie Q' oznacza ilość ciepła generowanego przez pracę plastyczną, natomiast Q^f to przez tarcie. Zarówno macierze ciepła właściwego $C^T(T)$, przewodności cieplnej $K^T(T)$ jak wektor strumienia ciepła Q są funkcjami temperatury i są obliczane w aktualnej konfiguracji w opisie Lagrange'a. Temperatura wewnątrz elementu jest interpolowana na podstawie wartości temperatur węzłów elementu.

Przyjęty w analizach związek konstytutywny określa naprężenie plastycznego pływnięcia σ_y , jako funkcję odkształcenia $\bar{\epsilon}^p$, prędkości odkształcenia i temperatury T w postaci:

$$\sigma_y = \left(A + B \bar{\epsilon}^{p^n} \right) \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_{ot}}{T_m - T_{ot}} \right)^m \right) \quad (2)$$

gdzie: A jest granicą plastyczności dla parametrów odniesienia: temperatury T_{ot} i prędkości odkształcenia $\dot{\epsilon}_0$, B , m i n są współczynnikami umocnienia odkształceniowego, C to współczynnik umocnienia dynamicznego oraz T_m – temperatura topnienia.

Przedmiot obrabiany jest dyskretyzowany czworobocznymi elementami izoparametrycznymi typu 134. Ten element opisują liniowe funkcje kształtu. Macierz sztywności tego elementu jest obliczona dla jednego punktu całkowania, natomiast macierz masy jest tworzona dla czterech punktów Gaussa.

Podczas realizacji procedury obliczeniowej zagadnienia kontaktu, po wykryciu styku między odpowiadającymi węzłami dwóch stykających się obiektów, między nimi automatycznie są tworzone więzy. Równania tych więzów mają postać:

$$\Delta u_{normal} = v \cdot \mathbf{n} \quad (3a)$$

$$\Delta u_{styczne} = v \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (3b)$$

gdzie: \mathbf{n} , $\boldsymbol{\tau}$ – wektory normalny i styczny, v – prędkość względna.

Przy definiowaniu zagadnienia kontaktu w sprzężeniu termomechanicznym, na wszystkich granicach ciał odkształcalnych jest automatycznie tworzony strumień cieplny. W przypadku, gdy odległość między stykającymi się ciałami wynosi 0, strumień ciepła określany jest zgodnie z równaniem:

$$q = H_{TC} (T_2 - T_1) \quad (4)$$

gdzie T_1 jest temperaturą odkształcalnej powierzchni, T_2 oznacza temperaturę w miejscu styku, która została interpolowana z temperatury węzłów kontaktującego się ciała, H_{TC} to współczynnik konwekcji ciepła między dwoma powierzchniami.

W celu prawidłowego odwzorowania procesu tworzenia wióra wykorzystano, dostępną w programie MSC.Marc, funkcję „remeshing” czyli podział na mniejsze elementy skończone. W procedurze automatycznej globalnej adaptacji siatki metodą triangulacji Delaunay dostosowanie siatki elementów skończonych następuje przez określenie tak zwanego wskaźnika zmiany objętości r . Jest on obliczany na podstawie położenia każdego węzła narożnego elementu czworościennego. Dopasowanie elementów skończonych następuje, gdy wartość tego wskaźnika przekracza dopuszczalną, określoną przez Użytkownika. Domyślna wartość r wynosi 0,01.

W procesie adaptacyjnym, dane z poprzedniego kroku obliczeniowego, takie jak wartości naprężeń, odkształceń i temperatury są przenoszone do nowej siatki.

3. OBIEKT ANALIZ

Przedmiotem analizy jest walcowa próbka, o średnicy podstawy 40 mm i długości całkowitej 200 mm wykonana ze stali St45. Przyjęte parametry technologiczne obróbki przedstawiono w Tabeli 1.

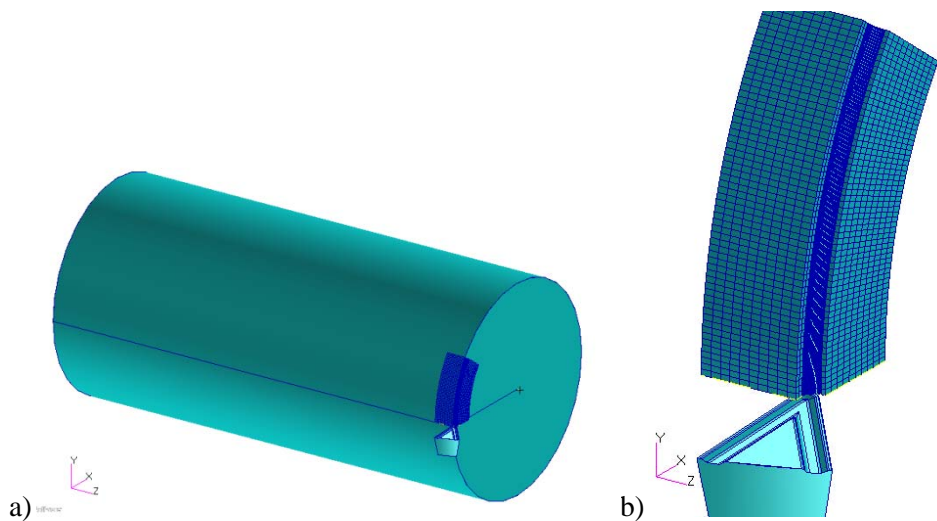
Tabela 1. Parametry technologiczne obróbki

Prędkość obrotowa próbki n [obr/min]	1250
Prędkość skrawania v_c [mm/s]	2486
Posuw narzędzia f_n [mm/obr]	0,14
Głębokość skrawania a_p [mm]	0,77

4. MODEL NUMERYCZNY

Sprężone numeryczne analizy termo-mechaniczne przeprowadzono przy użyciu programu MSC.Marc. Krótki opis matematyczny stosowanych algorytmów podano w pkt. 2. Proces tworzenia wióra odwzorowano, jako oddzielenie wióra sztywnym ostrzem wykorzystując adaptacyjność siatki MES w formalizmie Lagrange’a.

Z tego względu do utworzenia modelu 3D fragmentu próbki wykorzystano prostopadłościenne elementy skończone, które w efekcie adaptacji siatki zostały zamienione na czworościenne elementy skończone. Siły skrawania generowane były przez sztywny model narzędzia, w wykorzystaniu zagadnienia kontaktu. Podobnie jak ruch obrotowy próbki. Na Rys. 1 zaprezentowano model dyskretny.



Rys. 1. Model dyskretny skrawanej próbki
a) model toczenia; b) analizowany fragment

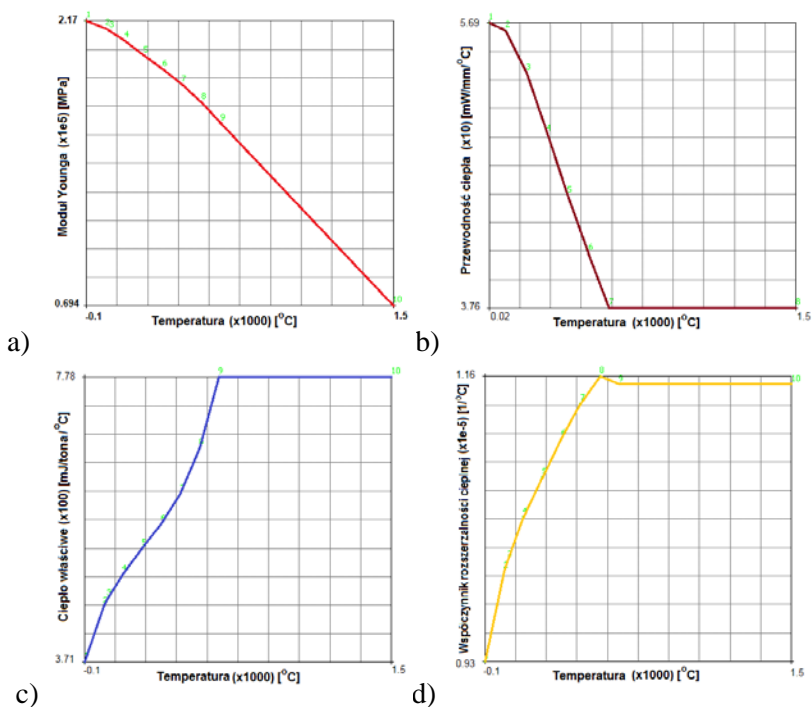
Model materiału zdefiniowano związkami konstytutywnymi Johnson-Cooke'a opisanym wzorem (3), którego współczynniki przyjęto z literatury [4] i przedstawiono w Tabeli 2.

Tabela 2. Właściwości mechaniczne stali St45

A [MPa]	B [MPa]	n	C	m	T_{ot} [°C]	T_{top} [°C]
350	275	0,36	0,022	1,0	20	1538

Wpływ temperatury na właściwości mechaniczno-ciepłone materiału skrawanego zdefiniowano przy użyciu krzywych w funkcji czasu przedstawionych na Rys. 2.

Założono termiczny typ kontaktu między obrabianym materiałem i narzędziem o współczynniku przewodzenia ciepła przez kontakt o wartości 40 W/m/°C. Przyjęto tarcie Coulomba typu stick-slip o współczynniku 0,3. Założono, że obróbka odbywa się w otoczeniu o temperaturze 20 °C a wartość współczynnika przewodzenia ciepła do otoczenia jest równy 0,04 W/m/°C.



Rys. 2. Zależność parametrów materiałowych w funkcji temperatury:

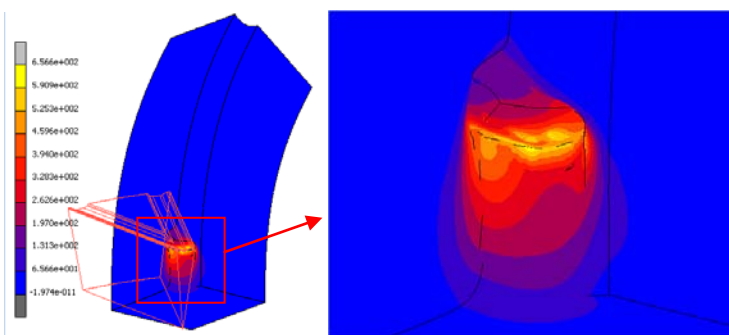
- a) moduł Younga;
- b) przewodność ciepła;
- c) ciepło właściwe;
- d) współczynnik rozszerzalności cieplnej;

Odwzorowanie procesu powstawania wióra możliwe było po przyjęciu następujących parametrów adaptacji siatki elementów skończonych: minimalna długość krawędzi elementów równa się 0,02 mm, liczba elementów na okręgu triangulacji Delanuy'a wynosi 60 i maksymalna zmiana skumulowanych odkształceń zredukowanych jest równa 0,4.

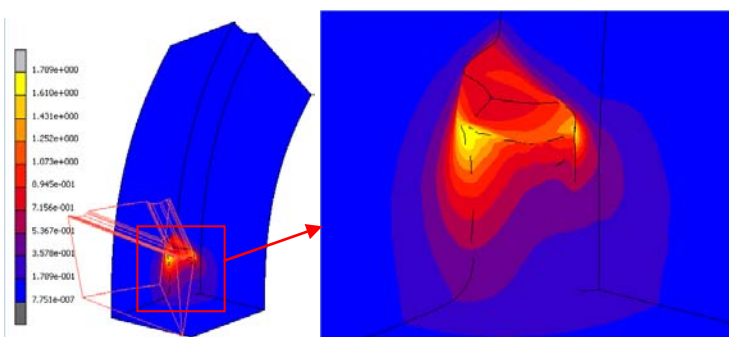
Dodatkową cechą triangulacji Delaunay'a jest maksymalizacja wartości minimalnego kąta w trójkącie. W analizach przyjęto, że maksymalne zniekształcenie kąta wynosi 40°. Założono również, że współczynnik konwersji energii ciepło tarcia i w wyniku przewodzenia ciepła wytwarzanego w połączeniu styku materiału i narzędzia jest równy 0,9.

5. WYNIKI ANALIZ NUMERYCZNYCH

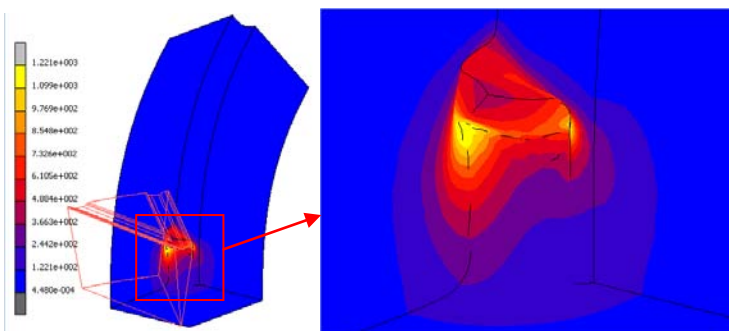
Rozkłady temperatur, odkształcenia plastycznego i gęstości energii odkształceń plastycznych w strefie skrawania otrzymane w wyniku analiz numerycznych przedstawiono na rysunkach 3 do 5.



Rys. 3. Rozkład temperatur w strefie skrawania



Rys. 4. Mapa całkowitego odkształcenia plastycznego w strefie skrawania

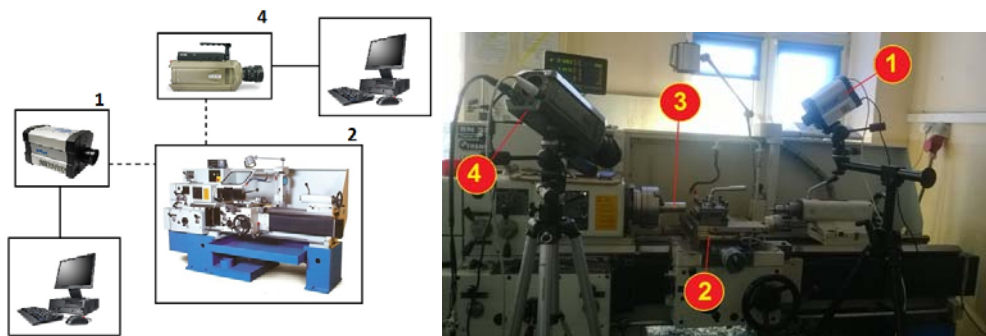


Rys. 5. Mapa gęstości energii odkształceń plastycznych

6. BADANIA EKSPERYMENTALNE

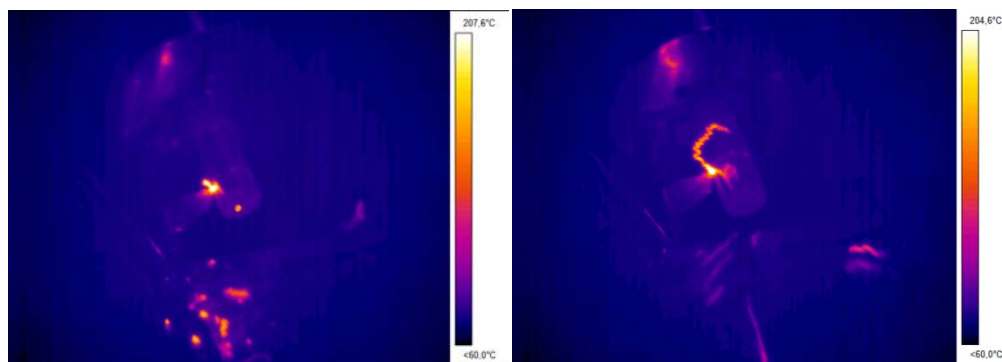
Stanowisko pomiarowe złożone jest z tokarki SN32 Słowackiej firmy TRENDS, odpowiednio zamontowanej kamery termowizyjnej FLIR SC 6000 połączonej przez łącze szeregowo typu FireWire z komputerem klasy PC z zainstalowanym oprogramowaniem.

mowaniem Therma CAM Researcher Pro 2.9 do akwizycji i przetwarzania obrazu z kamery (Rys. 6).



Rys. 6. Wstępnie skonfigurowane stanowisko do pomiaru temperatury skrawania
1: Kamera termowizyjna; 2: Tokarka; 3: Próba; 4: Kamera wysokiej rozdzielczości.

Na Rys. 7 przedstawiono kilka klatek z filmu rejestrującego zmianę pola temperatur w funkcji czasu w procesie skrawania próbki.



Rys. 7. Przykładowe pola temperatur z rejestracji eksperymentu

7. PODSUMOWANIE

W procesie skrawania, ciepło wygenerowane jest z pracy odkształceń plastycznych i pracy siły tarcia między próbką a narzędziem, które powoduje wzrost temperatury w strefie skrawania. W celu natychmiastowej oceny odkształceń plastycznych oraz temperatury na etapie projektowania obróbki, rozwinięto analizę numeryczną sprzężenia termomechanicznego w procesie toczenia wzdłużnego z zastosowaniem metody elementów skończonych. Szereg problemów numerycznych rozwiązano, zwłaszcza procedury remeshingu i poszukiwania kontaktu. Na podstawie porównania pól tempe-

ratur uzyskanych w rezultacie analiz numerycznych i wstępnych badań eksperymentalnych zweryfikowano jakościowo model numeryczny.

LITERATURA

- [1] Marc® 2011, *Volume A: Theory and User Information*, Copyright 2011 MSC.Software Corporation.
- [2] SVOBODA A., WEDBERG D., LINDGREN L.E., *Simulation of metal cutting using a physically based plasticity model*, Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2010.
- [3] HALIL B, ENGIN KILIC S., A. ERMAN TEKKAYA, *A comparison of orthogonal cutting data from experiments with three different finite element models*, International Journal of Machine Tool & Manufacture 44, 933-944, 2004.
- [4] GORDON R. JOHNSON, WILLIAM H. COOK, *A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures*, Proceedings of the Seventh Symposium on Ballistics, The Hague, The Netherlands, 1-7, 1983.
- [5] ZĘBALA W., *Modelowanie procesu skrawania*, Kraków, Politechnika Krakowska, 2011.
- [6] NIESŁONY P., GRZESIK W., *Modelowanie procesu i operacji skrawania metodą elementów skończonych cz. I i II*, MES, Mechanik, 10/2013 i 11/2013.
- [7] ARRAZOLA P.J., OZEL T., UMBRELLO D., DAVIES M., JAWAHIR I.S., *Recent advances in modelling of metal machining proces*, CIRP – Manufacturing Technology 62, 695-718, 2013.
- [8] Sandvik Coromant, *Poradnik Obróbki Skrawaniem*, www.sandvik.coromant.com, 2010.