



## Modelowanie i symulacja procesu toczenia stali niestopowej

ZDZISŁAW ZATORSKI

Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Mechaniczno-Elektryczny,  
Instytut Budowy i Eksploatacji Okrętów,  
81-103 Gdynia, ul. J. Śmidowicza 69, z.zatorski@awm.gdynia.pl

**Streszczenie.** W pracy pokazano możliwości wykorzystania technik komputerowych w zakresie techniki skrawania, zwłaszcza analitycznego i numerycznego modelowania procesu skrawania stali niestopowej i jego weryfikacji doświadczalnej. Komputerowe wspomaganie wytwarzania realizowano w programie EdgeCAM. Dobór parametrów i warunków skrawania przeprowadzono w programie CoroGuide dla narzędzi firmy AB Sandvik Coromant. Eksperymentalną walidację procesu skrawania prototypu z tworzyw sztucznych oraz wyrobów ze stali przeprowadzono na tokarce CNC.

**Słowa kluczowe:** symulacja, modelowanie, walidacja, proces toczenia, stal niestopowa

### 1. Wprowadzenie

Prezentacja na TKI 2011[1] możliwości technik komputerowych w aplikacjach inżynierskich zaowocowała niniejszą publikacją. Jej celem było pokazanie możliwości wykorzystania technik komputerowych w zakresie techniki skrawania, zwłaszcza analitycznego i numerycznego modelowania procesu skrawania stali niestopowej AISI 1045 i jego weryfikacji doświadczalnej w kierowanych przez autora pracach dyplomowych. Następnie pokazano przygotowanie modelu wyrobu w ramach CAD o określonym dla badań mechatronicznych kształcie i geometrii. Trzecią grupę stanowią problemy CAM związane z symulacją procesu toczenia wyrobu ze stali niestopowej w programie EdgeCAM. Dobór parametrów i efektów skrawania przeprowadzono w programie CoroGuide dla narzędzi firmy AB Sandvik Coromant według wcześniej przyjętych kryteriów. Na tokarce CNC wytworzono prototypy z tworzyw sztucznych

oraz wyroby ze stali. Walidację procesu skrawania przeprowadzono dla metodycznie dobranych parametrów skrawania, zwłaszcza dokładności wykonania i chropowatości powierzchni wyrobu zgodnie z dołączonym oprogramowaniem.

## 2. Modelowanie procesu skrawania stali niestopowej

Dla pełniejszego zrozumienia mechanizmów deformacji w strefie ścinania wióra należy odnieść modelowanie procesu skrawania do podstaw fizycznych [2, 3]. Modele gęstości dyslokacji mogą być użyte zwłaszcza do opisu zachowania umocnienia i zmiękczenia jednofazowej stali austenitycznej. Równanie naprężeń płynięcia składa się z atermicznej części dalekozasięgowego oddziaływania z podstrukturą dyslokacji nieruchomych oraz krótkozasięgowego oddziaływania przeszkód z dyslokacjami ruchomymi:

$$\sigma_y = m\alpha Gb\sqrt{\rho_i} + \tau_0 \cdot \left(1 - \left(\frac{kT}{\Delta f_0 Gb^3} \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_{ref}}{\dot{\epsilon}^p}\right)\right)^{1/q}\right)^{1/p}. \quad (2.1)$$

Prędkość odkształceń plastycznych wpływa na umocnienie izotropowe materiału oraz ewolucję dyslokacji podczas procesu zdrowienia

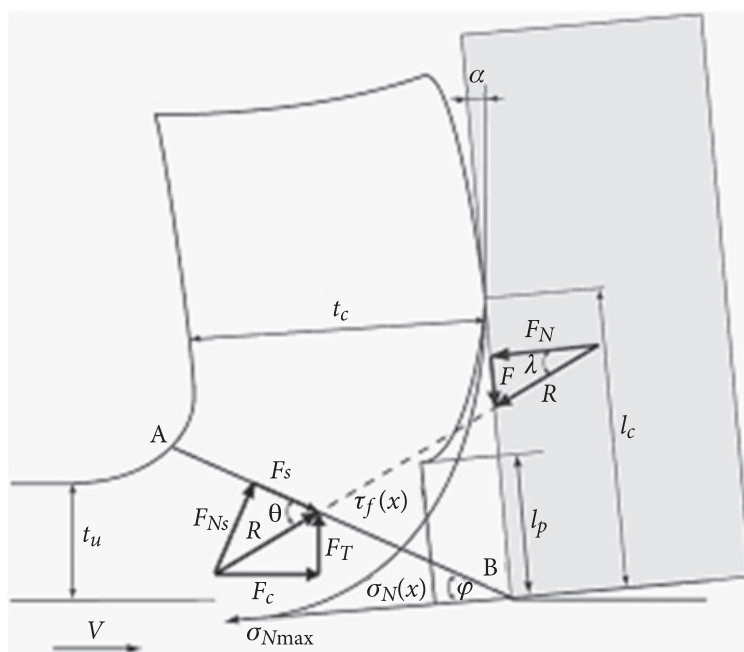
$$\dot{\rho}_i = \left(\frac{m}{b \cdot \lambda} + \Omega \rho_i\right) \dot{\epsilon}^p, \quad (2.2)$$

gdzie:  $m$  — współczynnik orientacji naprężeń ścinających w różnych systemach poślizgu;  
 $\alpha$  — współczynnik proporcjonalności;  
 $\rho_i$  — gęstość dyslokacji nieruchomych;  
 $G$  — moduł ścinania zależny od temperatury;  
 $b$  — wektor Burgersa;  
 $\Delta f_0$  — energia swobodna do pokonania oporu sieci bez udziału naprężeń zewnętrznych;  
 $\tau_0$  — atermiczna składowa naprężeń płynięcia wymaganych dla ruchu dyslokacji bez udziału energii cieplnej;  
 $\dot{\epsilon}_{ref}$  — prędkość odkształceń odniesienia;  
 $\dot{\epsilon}^p$  — prędkość odkształceń plastycznych;  
 $\Omega$  — funkcja zdrowienia zależna od temperatury i prędkości odkształceń;  
 $\lambda$  — średnia droga swobodna, która jest funkcją rozmiaru ziarna.

Wykładniki w równaniu (1) spełniają warunki  $0 \leq p \leq 1$  oraz  $0 \leq q \leq 2$ . W pracy [2] pokazano przykład sprzężenia rozkładu naprężeń płynięcia oraz gęstości

dyslokacji w strefie pierwotnej tworzenia się wióra podczas skrawania stali AISI 316L. Obliczenia wykonano przy użyciu programu AdvantEdge. Ponieważ modele fizyczne materiału nie są dostępne w AdvantEdge, do obliczeń wykorzystano program dla materiału termo-sprężysto-plastycznego z mieszanym izotropowym i kinematycznym umocnieniem.

Obszary zlokalizowanego ścinania towarzyszące tworzeniu się wióra oraz tarcia wióra o powierzchnię natarcia ostrza noża przy skrawaniu ortogonalnym pokazano na rysunku 1 jako strefę pierwotną i wtórną.



Rys. 1. Rozkład sił i naprężeń w strefie pierwotnej i wtórnej zgodnie z modelem Oxleya tworzenia wióra [4]

Model tworzenia wióra według Merchanta (1945) został rozwinięty przez Oxleya (1989) z zachowaniem układu dwóch stref przy skrawaniu ortogonalnym [5]. Pierwotną strefę ścinania zlokalizowaną wokół płaszczyzny AB charakteryzuje kąt ścinania  $\varphi$  (rys. 1). Wtórna strefa deformacji jest generowana przez intensywne oddziaływanie naprężeń normalnych  $\sigma_N$  i naprężeń tarcia  $\tau_f$ , gdzie rejon przywierania  $l_p$  łączy się z zakresem odkształceń plastycznych. Natomiast rejon poślizgu ( $l_c - l_p$ ) opisuje model tarcia Coulomba z współczynnikiem tarcia  $\mu$ .

W efekcie powstaje rozkład naprężeń na powierzchni natarcia ostrza noża tokarskiego w rejonie przywierania

$$\begin{aligned} \tau_f(x) &= \tau_p = k_{ch} \text{ oraz gdy } \mu \cdot \sigma_N(x) \geq \tau_p, \\ 0 < x &\leq l_p \end{aligned} \quad (2.3)$$

oraz w rejonie poślizgu

$$\begin{aligned} \tau_f(x) &= \mu \cdot \sigma_N \text{ oraz gdy } \mu \cdot \sigma_N(x) < \tau_p, \\ l_p < x &\leq l_c. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Siła tarcia  $F$  w strefie wtórnej jest wyznaczona z zależności

$$F = \int_0^{l_p} w k_{ch} dx + \int_{l_p}^{l_c} w \sigma_N(x) dx. \quad (2.5)$$

Relacja między średnim współczynnikiem tarcia  $\mu$  w rejonie poślizgu oraz  $k_{ch}$  — naprężeniem ścinania materiału wióra przy powierzchni natarcia ostrza noża

$$\mu = \frac{k_{ch}}{\sigma_N(l_p)} \quad (2.6)$$

prowadzi do wyznaczenia naprężenia  $k_{ch}$  oraz jego weryfikacji eksperymentalnej z zależności

$$F = F_C \sin \alpha + F_T \cos \alpha, \quad (2.7)$$

gdzie:  $\alpha$  — kąt natarcia;

$w$  — szerokość wióra;

$F_C$  — główna składowa siły skrawającej;

$F_T$  — oporowa składowa siły skrawającej.

Podobnie można wyznaczyć średnią wartość naprężeń ścinających  $k_{AB}$  w płaszczyźnie AB strefy pierwotnej tworzenia wióra

$$k_{AB} = \frac{F_S \sin \varphi}{t_u w}, \quad (2.8)$$

gdzie siła ścinania  $F_S$  obliczona jest z zależności

$$F_S = F_C \cos \varphi - F_T \sin \varphi. \quad (2.9)$$

Powstało szereg analitycznych modeli temperaturowych dla strefy pierwotnej.

W modelu Oxleya przyrost temperatury w tej strefie wyznaczono z zależności

$$\Delta T_{AB} = \frac{(1 - \beta)F_s \cos \alpha}{\rho C_p t_u w \cos(\varphi - \alpha)}, \quad (2.10)$$

gdzie:  $\rho$  – gęstość materiału skrawanego;  
 $C_p$  – ciepło właściwe materiału;  
 $t_u$  – grubość warstwy skrawanej;  
 $\beta$  – udział ciepła przenoszonego do materiału obrabianego.

Podobnie wyznaczono przyrost średniej temperatury wióra

$$\Delta T_C = \frac{F \sin \varphi}{\rho C_p t_u w \cos(\varphi - \alpha)}. \quad (2.11)$$

Średnia temperatura na powierzchni granicznej wiór–ostrze noża jest sumą średniej temperatury w strefie pierwotnej i maksymalnej temperatury wióra [4]. Szeroko stosowana i prezentowana w literaturze jest stal niestopowa AISI 1045. Dla określenia naprężeń płynięcia materiału przy skrawaniu i oszacowaniu charakterystyk tarcia na powierzchni granicznej wiór–ostrze noża wykorzystuje się metody elementów skończonych z użyciem odpowiednich modeli konstytutywnych materiałów. Naprężenie płynięcia w modelu Oxleya wyraża umocnienie materiału przez zgniot, przy czym współczynniki równania są zależne od temperatury i prędkości odkształceń.

Naprężenia płynięcia dla stali niestopowej AISI 1045 wyznaczono z równania

$$\bar{\sigma} = C_0 + C_1 \exp(-C_3 T + C_4 T \ln(\dot{\bar{\epsilon}})) + C_5 (\bar{\epsilon})^n \quad (2.12)$$

dla modelu Zerilli-Armstronga [6] ze współczynnikami wyznaczonymi doświadczalnie [8] i podanymi w tabeli 2.1.

TABELA 2.1

Współczynniki równania Zerilli-Armstronga dla stali AISI 1045 [8]

$C_0$ [MPa]	$C_1$ [MPa]	$C_3$ [1/K]	$C_4$ [1/K]	$C_5$ [MPa]	$n$
159,2	1533,7	609E-5	189E-6	742,6	0,171

Naprężenia płynięcia dla stali AISI 1045 wyznaczono zgodnie z równaniem

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon})^n] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (2.13)$$

według modelu Johnsona-Cooka [7] o współczynnikach podanych w tabeli 2.2 [8].

Identyfikację parametrów modeli konstytutywnych materiałów Zerilli-Armstronga [6] oraz Johnsona-Cooka [7] wyznaczonych metodami empirycznymi przeprowadzono przy użyciu pręta Kolskiego-Hopkinsona oraz skrawania ortogonalnego [4, 9].

TABELA 2.2

Współczynniki równania Johnsona-Cooka (1987) dla stali AISI 1045 [8]

A [MPa]	B [MPa]	$n$	C	$m$	$T_m$ [K]
553,1	600,8	0,234	0,0134	1,00	1733

W symulacji procesu skrawania uwzględniono charakterystyki cieplne i mechaniczne obrabianej stali i węglików spiekanych ostrza noża (tab. 2.3 i 2.4) [10]. Symulację przeprowadzono metodą elementów skończonych z wykorzystaniem programów: ABAQUS, AdvantEdge i SIMPLe. Wszystkie przeprowadzone symulacje przewidują największą akumulację odkształceń plastycznych we wtórnej strefie deformacji na powierzchni granicznej wiór-ostrze noża. Odkształcenia wewnątrz pierwotnej strefy deformacji pozostały w zakresie 100-200% ze średnią temperaturą generowaną w tej strefie około 300°C, podczas gdy w strefie wtórnej temperatura wynosiła około 550°C i powyżej odpowiednio do wartości współczynnika tarcia.

TABELA 2.3

Właściwości mechaniczne i cieplne stali AISI 1045 [10]

Temperatura $T$ [K]	293	473	673	873	1073
Granica plastyczności $R_{0,2}$ [MPa]	400	340	300	160	42
Granica wytrzymałości $R_m$ [MPa]	650	660	560	255	93
Moduł Younga $E$ [GPa]	215	210	165	160	90
Liczba Poissona $\nu$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Gęstość $\rho$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	7,93	7,88	7,82	7,75	7,72
Rozszerzalność cieplna $\Lambda$ [1/K] [ $10^{-6}$ ]	10,1	12,0	14,0	16,6	18,0
Ciepło właściwe $C_p$ [J/K/kg]	470	535	635	800	

TABELA 2.4

Właściwości mechaniczne i cieplne węgliką SANDVIK Coromant H10F [10]

Temperatura $T$ [K]	293	473	673	873
Granica wytrzymałości $R_m$ [MPa]	2600	2550	2350	2000
Moduł Younga $E$ [GPa]	580	570	560	540
Liczba Poissona $\nu$	0,22	0,22	0,22	0,22
Gęstość $\rho$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	14,5			
Rozszerzalność cieplna $\Lambda$ [1/K] [ $10^{-6}$ ]	5,4	5,3	5,4	5,6
Ciepło właściwe $C_p$ [J/K/kg]	220			

Badano składowe siły skrawania w układzie ortogonalnym oraz morfologię wióra. Składowe symulowanej siły skrawania, zwłaszcza oporowe, były znacznie niższe od pomierzonych dla współczynnika tarcia  $\mu = 0,3$  i wzrastały z wartością  $\mu$ . Towarzyszyły temu problemy stagnacji i wyboczenia wióra, zwłaszcza przy wcześniej zdefiniowanej drodze pękania. Przy ciągłej przebudowie generowanej sieci elementów skończonych ten problem nie występował [10].

Modelowanie MES procesów deformacji wykorzystuje analizę Eulera, Lagrange'a lub ALE (*Arbitrary Lagrangian Eulerian*) z połączenia cech obydwu dla opisu ośrodków ciągłych. Sformułowanie Lagrange'a wymaga podania kryterium dla oddzielenia wióra od przedmiotu obrabianego, na przykład odkształceń efektywnych lub gęstości energii odkształceń [11]. Zmodernizowanego sformułowania Lagrange'a użyto z automatyczną generacją sieci elementów skończonych bez kryterium oddzielenia wióra. Zaokrąglony wierzchołek ostrza noża i wysoce zdeformowany obszar poniżej wierzchołka mają dominujący wpływ na pole temperatur i pole naprężeń, a zwłaszcza na naprężenia resztkowe powierzchni obrobionej. Wzrost temperatury w strefie kontaktu wiór-ostrze noża ma szczególne znaczenie przy uzasadnieniu fragmentacji wiórów przy wysokich szybkościach skrawania [12-16]. Dla modelowania numerycznego skrawania z wysokimi szybkościami naturalnym sposobem jest wykorzystanie modelu opartego na wygładzonych punktach hydrodynamicznych SPH Lagrange'a. Obliczenia wykonane przy użyciu modelu SPH zrealizowane w Ls-Dyna umożliwiły przewidywanie ciągłego i zlokalizowanego ścinania wiórów. Pozwoliły dokładnie oszacować składowe siły skrawania bez wprowadzania dodatkowych parametrów, jak współczynnik tarcia Coulomba czy parametr kontroli pękania [17]. Zespół profesora Grzesika uściślił modelowanie MES oddziaływania cieplnego w strefie skrawania stali AISI 1045 narzędziami węglowymi WC-6%Co z powłokami ochronnymi CVD-TiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN. Eksperymentalnie wyznaczono właściwości cieplne badanych materiałów obrabianych i narzędziowych, wprowadzając, oprócz standardowych, zależne od temperatury ciepło właściwe oraz przewodność i rozszerzalność cieplną PL-TD. Ponadto trójwarstwową powłokę zastąpiono równoważną jednowarstwową. Wywołało to istotne zmiany w rozkładzie i wielkości naprężeń i temperatury na powierzchni natarcia ostrza noża oraz grubości wióra. Zredukowane naprężenia  $\sigma_{\text{HMH}}$  wzdłuż powierzchni natarcia wzrosły dwukrotnie (4,5 GPa/9 GPa) i podobnie wzrosła grubość wióra. Temperatura maksymalna zmniejszyła się z 880°C do 600°C. Efekt przenikania ciepła przez warstwę ochronną, zwłaszcza Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> był czterokrotnie mniejszy niż w przypadku węgla ostrza noża [18-20].

Zaprezentowane wyniki wskazują nie tylko na możliwości wykorzystania technik komputerowych do zmniejszenia kosztów badań eksperymentalnych, lecz także na konieczność ich użycia do rozwoju technologii skrawania i narzędzi skrawających.

### 3. Weryfikacja doświadczalna modelowania procesu skrawania

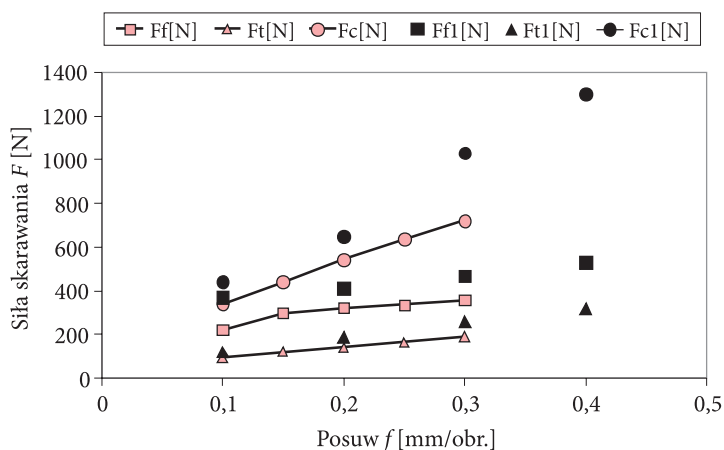
Składowe siły skrawania oraz temperatura wióra czy ostrza noża są podstawowymi parametrami weryfikowanymi podczas procesu skrawania.

Najczęściej spotykane układy do pomiaru siły skrawania, zwłaszcza podczas toczenia, wykorzystują czujniki piezoelektryczne zainstalowane między płytą podstawy mocowaną śrubami do wyszlifowanej powierzchni suportu i płytą górną dynamometru, do której mocowany jest śrubami specjalny uchwyt z nożem tokarskim. Obciążenie czujników następuje wskutek wzajemnego przemieszczenia płyty podstawy i płyty górnej poprzez złożony system oddziaływań.

Wykorzystany w kierowanych przez autora pracach dyplomowych [21, 23] oryginalny układ do pomiaru trzech składowych siły skrawania zawierał trzy niezależne dynamometry oporowe jako czujniki pomiarowe.

Stanowisko badawcze do pomiaru siły skrawania i temperatury ostrza noża podczas toczenia składało się z zamocowanego w imaku nożowym tokarki TUM-25a układu pomiarowego z wyciętym rowkiem na nóż tokarski boczny odsadzony S30.

Wybraną z wielu pomiarów zależność siły skrawania stali niestopowej AISI 1045 od posuwu  $f$  dla prędkości skrawania  $V_c = 70$  m/min ( $F_{f1}$ ,  $F_{t1}$ ,  $F_{c1}$ ) oraz głębokości skrawania  $a_p = 1$  mm [20] pokazano na rysunku 2. Dla porównania zestawiono na tym rysunku wartości sił z pomiarów dynamometrem piezoelektrycznym Kistlera typu 9257B dla prędkości skrawania  $V_c = 250$  m/min ( $F_f$ ,  $F_p$ ,  $F_c$ ) [22], które wskazały na poprawny trend uzyskanych wyników.

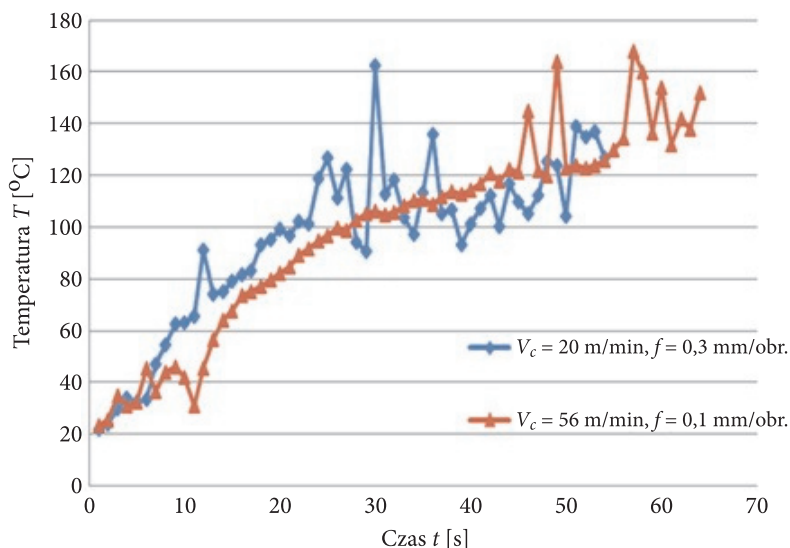


Rys. 2. Zależność siły skrawania stali niestopowej AISI 1045 od posuwu  $f$  dla prędkości skrawania  $V_c = 70$  m/min ( $F_{f1}$ ,  $F_{t1}$ ,  $F_{c1}$ ) [21] i  $V_c = 250$  m/min ( $F_f$ ,  $F_p$ ,  $F_c$ ) [22] oraz głębokości skrawania  $a_p = 1$  mm

Termopara typu K (NiCr-Ni) została zaprasowana w wyfrezowanym w płytce zagłębieniu na powierzchni przyłożenia ostrza noża, 2 mm od wierzchołka. Za pomocą



przewodu kompensacyjnego połączono ją z miernikiem cyfrowym C307. Wybrane wyniki pomiarów temperatury termoparą K (NiCr-Ni) pokazano na rysunku 3 [23].



Rys. 3. Przykłady pomiaru termoparą typu K (NiCr-Ni) temperatur ostrza noża przy głębokości skrawania  $a_p = 0,7$  mm i różnych wartościach prędkości skrawania  $V_c$  i posuwu  $f$  [23]

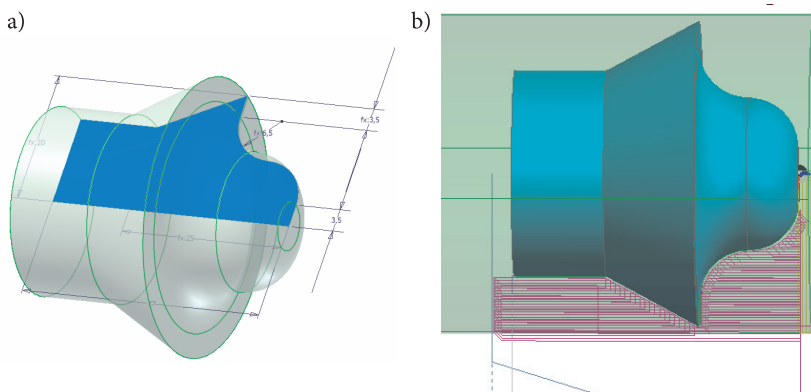
Pomiary punktowe pirometrem pomimo poprawnej kalibracji układu termopara-pirometr okazały się dość trudne. Niemniej jednak w literaturze spotyka się szereg poprawnych pomiarów temperatur wióra i powierzchni noża z wykorzystaniem kamer termowizyjnych.

#### 4. Projektowanie wyrobu i symulacja procesu toczenia stali niestopowej AISI 1045

Symulacja procesu skrawania w kierowanej przez autora pracy dyplomowej [24] obejmowała zamodelowanie wyrobu w programie CAD firmy Autodesk Inventor Professional 2010 (AIP 2010). Dobór geometrii wyrobu podyktowany był przeznaczeniem do diagnozowania układów mechatronicznych tokarki CNC (rys. 4a).

W celu doboru parametrów skrawania użyto oprogramowania Sandvik CoroGuide 2000.1 (rys. 5), z możliwością doboru i regulacji parametrów według wybranych kryteriów, oraz Sandvik CoroGuide 2010 do dalszego eksportu narzędzi do programów typu CAM.

Na jego podstawie dobrano parametry skrawania do poszczególnych sekcji elementu podane w tabeli 4.1.

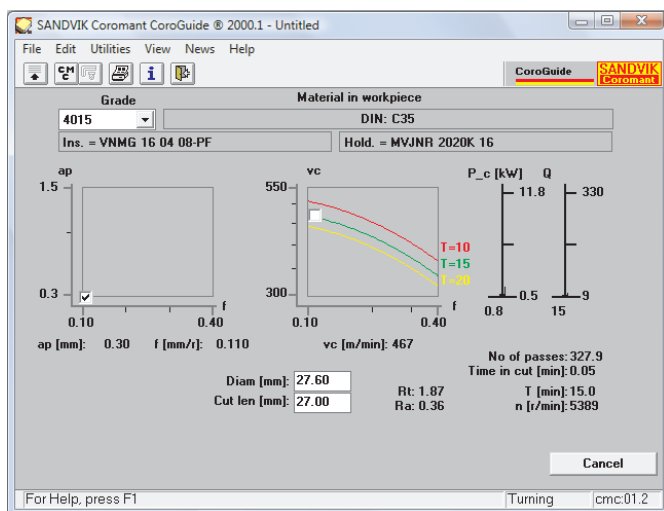


Rys. 4. Element zamodelowany w programie AIP 2010 (a) oraz ścieżki ruchowe narzędzia podczas skrawania w programie EdgeCAM 2009 R1 (b) [24]

TABELA 4.1

Dobór parametrów i efekty skrawania według CoroGuide 2000.1 [25]

Parametry skrawania	I	II	III
Prędkość $V_c$ [m/min]	460	460	415
Posuw $f$ [mm/obr.]	0,11	0,05	0,20
Głębokość $a_p$ [mm]	0,3	0,3	0,3
Chropowatość $R_a$ [ $\mu$ m]	0,77	0,3	2,72
Wydajność $Q$ [cm <sup>3</sup> /min]	15	8	26



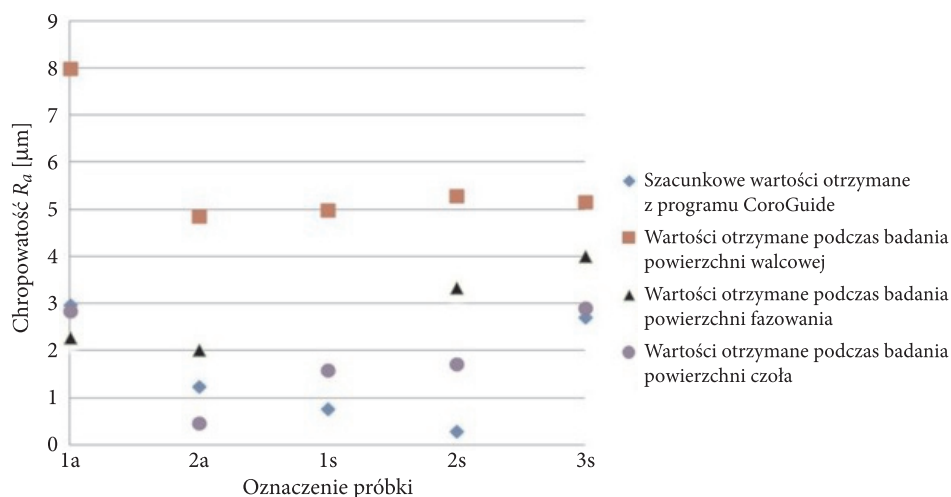
Rys. 5. Dobór parametrów toczenia według SANDVIK Coromant CoroGuide 2000.1 [25]

Po dobraniu parametrów skrawania dla różnych kryteriów i wyeksportowaniu użytych narzędzi przystąpiono do projektowania procesu obróbki z użyciem oprogramowania EdgeCAM 2009 R1.

Proces projektowania odbywał się poprzez wybór odpowiedniego noża do danego cyklu, deklaracji zakresu cyklu i parametrów skrawania dla tego cyklu oraz odejście do zmiany narzędzia (rys. 4b). Po dojściu do końca obróbki można sprawdzić poprawność zaprojektowanego procesu poprzez symulację przebiegu procesu obróbki. Jeżeli przebiegnie bez komplikacji, można przejść do trybu generowania kodu automatycznej obróbki na podstawie utworzonego procesu. Przed umieszczeniem w maszynie należy przeanalizować wygenerowany kod przy użyciu postprocesora dostarczonego z obrabiarką, aby nie spowodować niedokładności wymiarowej przedmiotu bądź uszkodzenia maszyny. W prezentowanej pracy [24] program wykonania prototypu ze szkła akrylowego i wyrobów stalowych realizowano na tokarce CNC-CKE 6136.

## 5. Walidacja doboru parametrów procesu toczenia stali niestopowej

Walidację procesu skrawania przeprowadzono dla metodycznie dobranych parametrów skrawania, zwłaszcza dokładności wykonania i chropowatości powierzchni wyrobu. Do oceny wpływu parametrów obróbki użyto chropowatościomierza firmy Mitotoyo „Surftest” SJ-301. Pomiary dokonywano w wyznaczonych trzech miejscach badanego elementu, ze względu na złożoność profilu. Wyniki otrzymane podczas obróbki wykańczającej dla stali wskazują (rys. 6) na poprawną chropowatość,



Rys. 6. Pomiar chropowatości powierzchni prototypu ze szkła akrylowego (1a, 2a) i wyrobów ze stali AISI 45 (1 s, 2 s, 3 s) [23]

zwłaszcza dla prototypów akrylowych i powierzchni czołowych wyrobu ze stali AISI 45 otrzymanych dla zaproponowanych w programie CoroGuide 2000.1 optymalnych parametrów skrawania.

## 6. Podsumowanie

Przegląd zagadnień modelowania i symulacji procesu toczenia stali niestopowej został zaprezentowany podczas XII Konferencji naukowo-technicznej „Techniki Komputerowe w Inżynierii 2011TKI”. Celem było zasygnalizowanie wielorakich możliwości wykorzystania technik komputerowych w zakresie analitycznego i numerycznego modelowania procesu skrawania stali niestopowej AISI 1045 i jego weryfikacji, zwłaszcza doświadczeń w wymiarze dydaktycznym.

Do numerycznego modelowania procesu skrawania MES wykorzystuje się analizę Eulera, Lagrange’a lub ALE z połączenia cech obydwu dla opisu ośrodków ciągłych.

Dla modelowania numerycznego z wysokimi szybkościami skrawania wykorzystuje się modele oparte na wygładzonych punktach hydrodynamicznych SPH Lagrange’a, bez wprowadzania dodatkowych parametrów jak współczynnik tarcia Coulomba czy parametr kontroli pęknięcia.

Modelowanie MES oddziaływania cieplnego w strefie skrawania stali AISI 1045 narzędziami węglowymi z powłokami ochronnymi jest szczególnie wrażliwe na charakterystyki cieplne zależne od temperatury i wielowarstwowej powłoki. Wywołuje to istotne zmiany w rozkładzie i wielkości naprężeń i temperatury na powierzchni natarcia ostrza noża oraz grubości wióra.

Weryfikacja doświadczalna modelowania procesu skrawania dotyczy głównie składowych siły skrawania oraz temperatury wióra czy ostrza noża.

Oryginalny układ do pomiaru trzech składowych siły skrawania zawierał oporowe czujniki pomiarowe zamiast czujników piezoelektrycznych i był skutecznie wykorzystany w kierowanych przez autora pracach dyplomowych. Pomiar temperatury termoparą przyłożoną w pobliżu wierzchołka ostrza noża jest obarczony różnymi trudnościami i poszukuje się rozwiązań z wykorzystaniem kamer termowizyjnych.

Do zaprojektowanego wyrobu w programie CAD firmy Autodesk Inventor Professional 2010 dobrano parametry skrawania według oprogramowania Sandvik CoroGuide oraz projektowano proces obróbki z użyciem oprogramowania EdgeCAM 2009 R1. Przed umieszczeniem w maszynie przeanalizowano wygenerowany kod przy użyciu postprocesora dostarczonego z obrabiarką. Na tokarce CNC wytworzono prototypy ze szkła akrylowego oraz wyroby ze stali AISI 1045. Walidację procesu skrawania przeprowadzono dla metodycznie dobranych parametrów skrawania, zwłaszcza dokładności wykonania i chropowatości powierzchni wyrobu.

W pracy pokazano możliwości wykorzystania technik komputerowych na każdym etapie przygotowania i realizacji procesu skrawania, zwłaszcza toczenia stali niestopowej AISI 1045.

## LITERATURA

- [1] *Techniki Komputerowe w Inżynierii 2011TKI*, XII Konferencja naukowo-techniczna, Słok k. Bełchatowa, 18-21 października 2011, streszczenia.
- [2] V. KALHORI et al., *Simulation of mechanical cutting a physical based material model*, Int. J. Mater. Form., 3, 1, 2010, 511-514.
- [3] L-E. LINDGREN, K. DOMKIN, S. HANSSON, *Dislocations, vacancies and solute diffusion in physical based plasticity model for AISI316L*, Mechanics of Materials, 40, 2008, 907-919.
- [4] T. ÖZEL, E. ZEREN, *A methodology to determine work material flow stress and tool-chip interfacial friction properties by using analysis of machining*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 128, 2, 2006, 119-129.
- [5] P.L.B. OXLEY, *Mechanics of machining, an analytical approach to assessing machinability*, Ellis Horwood Limited, 1989.
- [6] E.J. ZERILLI, R.W. ARMSTRONG, *Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations*, J. Appl. Phys., 61, 5, 1987, 1816-1825.
- [7] G.R. JOHNSON, W.H. COOK, *A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures*, Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Symposium on Ballistics, The Hague, The Netherlands, 1983, 541-547.
- [8] S.P.E.C. JASPERS, J.H. DAUTZENBERG, *Material behavior in conditions similar to Metal cutting: Flow stress in the primary shear zone*, Journal Materials Processes Technology, 122, 2002, 322-330.
- [9] T. ÖZEL, Y. KARPAT, *Identification of constitutive material model parameters for high-strain rate metal cutting conditions using evolutionary computational algorithms*, Materials and Manufacturing Processes, 22, 2007, 659-667.
- [10] V. KALHORI, *Modelling and simulation of mechanical cutting*, Doctoral thesis, 2001, 1402-1544.
- [11] J.T. BLACK, J.M. HUANG, *An evaluation of chip separation criteria for the FEM simulation of machining*, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 118, 1996, 545-553.
- [12] T. ÖZEL, E. ZEREN, *Finite element modeling the influence of edge roundness on the stress and temperature fields induced by high-speed machining*, International Journal Advanced Manufacturing Technology, 35, 2007, 255-267.
- [13] T. ÖZEL, E. ZEREN, *Numerical modeling of meso-scale finish machining with finite edge radius tools*, International Journal Machining and Machinability of Materials, 2, 3/4, 2007, 451-468.
- [14] Y. KARPAT, T. ÖZEL, *Predictive analytical and thermal modeling of orthogonal cutting process, Part I. Prediction of tool forces, stresses, and temperature distributions*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 128, 5, 2006, 435-444.
- [15] M. BÄKER, *Finite element simulation of high-speed cutting forces*, Journal of Materials Processing Technology, 176, 2006, 117-126.
- [16] S.A. IQBAL, P.T. MATIVENGA, M.A. SHEIKH, *Contact length prediction: mathematical models and effect of friction schemes on FEM simulator for conventional to HSM of AISI 1045 steel*, Int. J. Machining and Machinability of Materials, 3, 1/2, 2008, 18-33.
- [17] J. LIMIDO, C. ESPINOSA et al., *SPH method applied to high speed cutting modeling*, International Journal of Mechanical Sciences, 49, 2007, 898-908.

- [18] W. GRZESIK, P. NIEŚŁONY, *FEM-based thermal modeling of the cutting processes using power low-temperature dependent concept*, Archives of Materials Science and Engineering, 29, 2, 2008, 105-108.
- [19] W. GRZESIK, M. BARTOSZUK, *Investigation on temperature distribution at the tool-chip interface under variable heat transfer conditions*, Advances in Manufacturing Science and Technology, 32, 3, 2008, 3-13.
- [20] W. GRZESIK, P. NIEŚŁONY M. BARTOSZUK, *Modelling of cutting process analytical and simulation method*, Advances in Manufacturing Science and Technology, 33, 1, 2009, 5-29.
- [21] A. ROBALEWSKI, *Opracowanie metod pomiaru siły skrawania podczas toczenia*, AMW, Gdynia, 2010 (niepublikowane).
- [22] M.T. KAGNAYA, *Contribution a l'identification des mecanismes d'usure d'un WC-6%Co en usinage et par une approche tribologique et thermique*, MINES Paris Tech, 2009.
- [23] T. DOROSZ, *Opracowanie metod pomiaru temperatury ostrza noża podczas toczenia*, AMW, Gdynia, 2010 (niepublikowane).
- [24] M. BRZOSKOWSKI, *Ocena parametrów obróbki na przykładzie obrabiarki CNC*, AMW, Gdynia, 2011 (niepublikowane).
- [25] L. PRZYBYLSKI, *Strategia doboru warunków obróbki współczesnymi narzędziami*, Kraków, 2000.

Z. ZATORSKI

### **Modelling and simulation of turning process of unalloyed steel**

**Abstract.** The presented work shows the use of computer technique in a range of machining, especially analytical and numerical modelling of machining process of unalloyed steel as well as its experimental verification. Computer aided manufacturing was realized with EdgeCAM code. Selection of parameters and conditions of turning has relied on AB Sandvik Coromant tools according to CoroGuide code. Experimental validation of machining of plastic prototype and steel workpiece has been made using CNC machine.

**Keywords:** simulation, modelling, validation, turning process, unalloyed steel