

# Zastosowanie modelowania rozmytego TSK do oceny zużycia narzędzia w procesie wiercenia stopu Ti6Al4V – cz. I

Proces wiercenia materiałów ciągliwych, do których zalicza się Ti6Al4V, często wiąże się z niewystarczającym odprowadzeniem wiórów, co prowadzi do wystąpienia zakłóceń procesu obróbki.

TEKST: DR INŻ. **Krzysztof Sz wajka**

Wydział Mechaniczno-Technologiczny  
Politechnika Rzeszowska

zdjęcia: autor

**S**tan narzędzia ma duży wpływ na ostateczne wykończenie obrabianej powierzchni i integralność wymiarową obrabianego przedmiotu, a także poziom drgań obrabiarki. Informacje uzyskane z monitorowania zużycia narzędzi mogą być wykorzystane do kilku celów, które obejmują ustalanie czasu wymiany narzędzi, optymalizację ekonomiczną operacji obróbkowych, kompensację zużycia narzędzi online oraz do pewnego stopnia unikanie katastroficznego stopienia narzędzia [19]. Skuteczne monitorowanie procesu produkcyjnego jest niezbędne do zapewnienia jakości produktu końcowego i obniżenia kosztów produkcji. Analiza, wdrażanie

i ocena procesów obróbki to duże wyzwania dla przemysłu wytwórczego.

reklama

## Modelowanie rozmyte Takagi-Sugeno-Kang

Modelowanie rozmyte Takagi-Sugeno-Kang (TSK) [23] zaproponowano w celu opracowania systematycznego podejścia do generowania reguł rozmytych z danego zbioru danych wejściowych i wyjściowych. Model ten składa się z reguł z rozmytymi poprzednikami i funkcją matematyczną w części następczej. Poprzedniki dzielą przestrzeń wejściową na zbiór obszarów rozmytych, podczas gdy następniki opisują zachowanie systemu w tych obszarach. Prowadzone są prace w zakresie modelowania procesu produkcyjnego z wykorzystaniem modelu rozmytego TSK, na przykład przewidywanie chropowatości powierzchni za pomocą algorytmu genetycznego (GA) [21], wydajności wiercenia [22], szacowanie czasów przetwarzania w oparciu o programowanie genetyczne [20] itp.

Stopy tytanu mają coraz większe spektrum zastosowań zarówno w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym, biomedycznym, jak i chemicznym dzięki doskonałej kombinacji wysokiej wytrzymałości właściwej (stosunek wytrzymałości do gęstości), odporności na pękanie i ogólnej odporności na korozję. Jednak te stopy są uważane za materiały trudnoobrabialne ze względu na ich wysoką wytrzymałość w podwyższonej temperaturze, stosunkowo niski moduł sprężystości, niskie przewodnictwo cieplne, wysoką aktywność chemiczną i mały współczynnik odkształcenia [2-6]. Natomiast proces wiercenia jest uważany za jeden z najczęstszych procesów obróbki, ze względu na fakt, że ma on zastosowanie do większości stosowanych stopów tytanu [1]. Przeprowadzono szereg badań dotyczących wiercenia stopu tytanu Ti6Al4V w odniesieniu do siły posuwowej, zużycia narzędzia skrawającego i jakości powierzchni otworu. Cantero i in. [7] przeprowadzili eksperyment polegający na obserwacji ewolucji zużycia narzędzi, jakości obrabianych otworów w procesie wiercenia stopu tytanu Ti6Al4V. Wiele eksperymentów dotyczących wiercenia stopu tytanu Ti6Al4V prowadzili Li i Albert [8]. Miały one na celu ocenę wpływu materiału ostrza skrawającego, geometrii i parametrów procesu wiercenia na trwałość wiertła, siłę posuwową, moment skrawania i tworzenie zadziórów. Dornfeld i in. [9] wykazali, że zarówno posuw, jak i prędkość skrawania miały ograni-

5. Budowa i działanie jednowirnikowych kruszarek łańcuchowych: a) z dwoma wlotami nadawy, b) z jednym wlotem nadawy, c) z napędem wirnika od dołu, 1 - wirnik, 2 - łańcuch,

3. - wykładzina, 4 - wlot nadawy, 5 - wylot produktu kruszenia, 6 - przekładnia pasowa

czony wpływ na rozmiar zadziórów podczas wiercenia Ti6Al4V, chociaż można to przypisać ograniczonemu zakresowi prędkości skrawania (6-10 m/min) i wartości posuwu (0,04-0,20 mm) zastosowanych w tych badaniach. Abdelhafeez i in. [10] prowadzili badania dotyczące analizy powierzchni otworu w celu identyfikacji wpływu prędkości skrawania i prędkości posuwu na wielkości zadziórów, średnicę otworu, a także na zużycie ostrza narzędzia skrawającego przy wierceniu stopów tytanu. Soo i in. [11] przeprowadzili badania dotyczące oceny jakości otworu po wierceniu oparte na pomiarze średnicy otworu, okrągłości, wysokości zadziórów, średniej chropowatości powierzchni, mikrotwardości i morfologii wiórów. Pawar i in. [13] porównywali zużycie wiertel z węglików spiekanych przy wierceniu pakietów Ti, CFRP i CFRP/Ti osobno i analizowali wpływ przepływu wióra na jakość powierzchni otworu. Bono i Ni [14] opracowali model z zastosowaniem elementów skończonych i przeprowadzili eksperymentalne badanie wpływu odkształceń termicznych na średnicę i walcowość wywierconych otworów. Okazało się, że dominującym efektem była termiczna ekspansja wiertła, która prowadziła do zwiększenia średnicy otworu wraz ze wzrostem głębokości wiercenia. Prasanna i in. [18] przeprowadzili eksperyment polegający na optymalizacji parametrów procesowych wiercenia na sucho dla małych otworów w Ti6Al4V za pomocą metody Taguchiego i teorii szarych systemów. Wyniki tych badań wykazały, że prędkość obrotowa wrzeczona ma największy wpływ na dokładność wymiarową otworu. Poza tym niektórzy badacze skupili się na analizie powstawania zadziórów w procesie wiercenia [15-17].

### Modelowanie rozmyte TSK oparte na klastrowaniu subtraktywnym

Identyfikacja systemu z wykorzystaniem klastrowania obejmuje tworzenie klastrów w przestrzeni danych i translację tych klastrów na reguły TSK tak, aby uzyskany model był zbliżony do identyfikowanego systemu. Celem algorytmu identyfikacji grupowania subtraktywnego jest oszacowanie zarówno liczby, jak i początkowej lokalizacji centrów skupień oraz wyodrębnienie reguł

rozmytych TSK z danych wejściowych/wyjściowych. Grupowanie subtraktywne działa poprzez znalezienie optymalnego punktu danych w celu zdefiniowania centrum klastra na podstawie gęstości otaczających punktów danych. Ta metoda jest szybką metodą grupowania przeznaczoną do rozwiązywania problemów o dużych wymiarach z umiarkowaną liczbą punktów danych. Dzieje się tak, ponieważ jego obliczenia rosną liniowo wraz z wymiarem danych i kwadratem liczby punktów danych. Klasyczna logika nie zapewnia odpowiednich narzędzi do analizy złożonych systemów, w których cele oraz zależności wejścia - wyjście są często nieprecyzyjne określone, a co za tym idzie, trudne do ilościowego ujęcia. Stąd też nastąpił znaczny postęp w zakresie zastosowań metod opartych na logice rozmytej. Jej techniki bazują bowiem na wnioskowaniu zbliżonym do rozumowania ludzkiego, w związku z czym mają szerokie spektrum praktycznych zastosowań, zwłaszcza w zagadnieniach modelowania i sterowania. Idea subtraktywnej metody potencjału (*mountain clustering*) polega na wyznaczeniu dla każdego punktu  $x_i$  funkcji  $P$  reprezentującej potencjał tego punktu. Rozważmy zbiór  $N$  punktów danych  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  określonych przez  $m$ -wymiarowe  $x_j$ . Aby nie utracić wartości danych, należy przyjąć tę funkcję jako przestrzeń znormalizowaną, więc wszystkie dane są znormalizowane do przedziału  $[0,1]$ . Przyjmuje się zatem, że potencjał w  $i$ -tym punkcie zbioru wyraża się następującym wzorem:

$$P(i) = \sum_{j=1}^N e_i^{-\alpha \|x_i - x_j\|^2}$$

dla  $i = 1, \dots, N$ , oraz  $\alpha = 4/(r_a)^2$  dla pewnej stałej  $r_a > 0$ . Z postaci funkcji potencjału wiadać wyraźnie, że potencjał punktu zbioru jest tym wyższy, im więcej innych punktów znajduje się w jego bezpośrednim otoczeniu. Własność ta sprawia, że subtraktywna metoda potencjału jest dużo bardziej odporna na zakłócenia spowodowane pojawieniem się przypadkowych punktów niż takie algorytmy klasteryzacji, jak C-means. Po przypisaniu potencjału  $P(i)$  każdemu punktowi zbioru następuje wybór pierwszego środka klastra, którym zawsze jest punkt o naj-

	Ti	Al	V	Fe	C	N	H	O
%	baza	5,5-6,75	3,5-4,5	< 0,25	< 0,08	< 0,05	< 0,01	< 0,2

Tab. 1. Skład chemiczny stopu Ti6Al4V

większym potencjale. W związku z tym  $c_1 = x_u$ , gdzie  $u = \arg \max P(i)$ , a  $P(u)$  oznaczamy przez  $P^*$  i uznajemy za potencjał odniesienia dla procedury wyborów pozostałych środków klastrów. Ponadto za każdym razem gdy dokonamy wyboru kolejnego środka kolejnego klastra  $c_k = x_u$  (dla właściwego  $u$ ), modyfikujemy wartość funkcji potencjału przypisanej do poszczególnych punktów zbioru w sposób następujący:

$$P(i) = P(i) - P(u) e^{-\beta \|x_i - x_u\|^2}$$

gdzie:  $\beta = 4/(r_b)^2$  dla pewnego  $r_b > 0$  jest pewną stałą definiującą zasięg działania funkcji potencjału. Ze względów praktycznych przyjmuje się, że  $r_b > r_a$  i najczęściej wartość ta wynosi  $r_b = 1,25r_a$ . Wyboru kolejnych środków klastrów dokonujemy dopóki potencjał wszystkich punktów przekracza pewną ustaloną wartość  $\varepsilon_d P^*$  dla  $\varepsilon_d$  wybranego z przedziału  $(0, 1)$ .

Działanie subtraktywnej metody potencjału opisuje poniższy algorytm:

1. Wybierz  $r_a$ ,  $r_b$ ,  $\varepsilon_u$  i  $\varepsilon_d$ .
2. Wyznacz wartości funkcji potencjału  $P(i)$  dla wszystkich punktów zbioru ( $i = 1, \dots, N$ ).
3. Wybierz punkt  $x_u$  o największym potencjale  $P_u = P^*$  i przyjmij, że jest pierwszym środkiem klastra  $c_1$ .
4. Przyjmij  $k = 2$ .
5. W pętli wykonuj następujące kroki:
  - a) Wybierz punkt  $x_u$  o największym potencjale  $P_u$ ,
  - b) Jeśli  $P_u > \varepsilon_u P^*$  to  $x_u$  staje się środkiem  $k$ -tego klastra. Jeśli  $\varepsilon_u P^* > P_u > \varepsilon_d P^*$ , to  $x_u$  sta-

je się środkiem  $c_k$   $k$ -tego klastra, jeżeli spełnia dodatkowe warunki (zależne od sposobu implementacji algorytmu),

- c) Przyjmij  $k = k+1$ ,
- d) Jeśli  $P_u > \varepsilon_d P^*$ , zakończ działanie pętli – nie ma więcej środków klastrów.

Centrum klastra znalezione w danych uczących to punkty w przestrzeni cech, których sąsiedztwo mapuje do danej klasy. Każde centrum klastra można przetłumaczyć na rozmytą regułę identyfikacji klasy. Uogólniony model TSK typu 1 można opisać za pomocą rozmytych reguł IF-THEN, które reprezentują relacje wejścia – wyjścia systemu. W przypadku modelu TSK typu 1 z wieloma wejściami i jednym wyjściem (MISO) pierwszego rzędu, jego  $k$ -ta reguła może być wyrażona jako:

IF  $x_1$  is  $Q_{1k}$  and  $x_2$  is  $Q_{2k}$  and

... and  $x_n$  is  $Q_{nk}$ , THEN  $Z$  is

$$w^k = p_0^k + p_1^k x_1 + p_2^k x_2 + \dots + p_n^k x_n$$

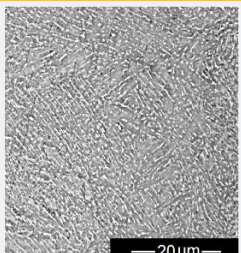
gdzie  $x_1, x_2, \dots, x_n$  i  $Z$  są zmiennymi lingwistycznymi;  $Q_{1k}, Q_{2k}, \dots, Q_{nk}$  są zbiorami rozmytymi  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , a  $p_0^k, p_1^k, p_2^k, \dots, p_n^k$  są parametrami regresji.

W metodzie grupowania subtraktywnego  $x_j$  jest  $j$ -tą cechą wejściową  $x_j$  ( $j \in [1, n]$ ), a  $Q_{jk}$  jest MF w  $k$ -tej regule związanej z  $j$ -tą wejściową cechą. MF  $Q_{jk}$  można uzyskać jako:

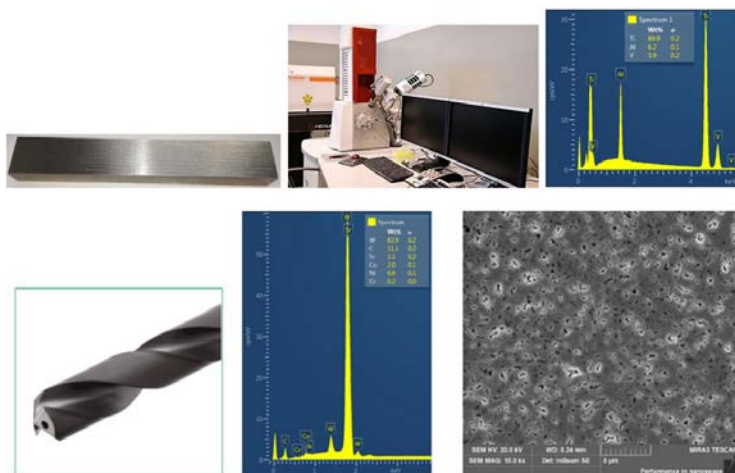
$$Q_{jk} = \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x_j - x_{jk}^c}{\sigma} \right)^2 \right]$$

gdzie  $x_{jk}^*$  jest  $j$ -tą cechą wejściową  $x_k^*$ , odchylenie standardowe Gaussa MF podane jako:

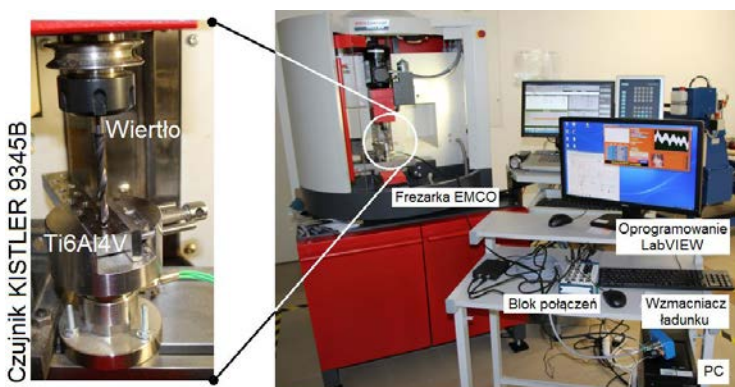
$$\sigma = \sqrt{1/2}$$

<b>Gęstość</b>	(kg/m <sup>3</sup> )	4430	
<b>Temperatura topienia</b>	(°C)	1668	
<b>Przewodność cieplna</b>	(W/m°C)	7,3	
<b>Granica plastyczności</b>	(MPa)	820	
<b>Moduł Younga</b>	(GPa)	113,8	
<b>Współczynnik Poissona</b>	-	0,342	
<b>Ciepło właściwe</b>	(J/(kg/°C))	526	

Tab. 2. Własności fizyczne stopu i mikrostruktura materiału Ti6Al4V



Rys. 1.



Rys. 2.

1. Analiza spektralna materiału obrabianego i materiału narzędzia skrawającego

2. Stanowisko badawcze

### ❖ Konfiguracja eksperymentalna i akwizycja danych – materiał obrabiany i narzędzie skrawające

W badaniach jako materiał obrabiany zastosowano stop tytanu Ti6Al4V o składzie chemicznym (wg ASTM F1108) przedstawionym w tab. 1.

Natomiast w tab. 2 przedstawiono właściwości fizyczne (wg ASTM F1108) oraz mikrostrukturę stopu Ti6Al4V.

Za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego TESCAN® przeprowadzono analizę spektralną pierwiastków wchodzących w skład materiału obrabianego, jak i ma-

teriału narzędzia skrawającego. Stanowisko pomiarowe zostało przedstawione na rys. 1.

W ramach przeprowadzonych prób wierzono otwory w płaskowniku Ti6Al4V o wymiarach 130 x 22 x 12 mm. Jako narzędzie skrawające zastosowano (na podstawie literatury, zastosowań przemysłowych i zaleceń producenta narzędzia) wiertło spiralne o średnicy  $\phi = 6,1$  mm wykonane z węgliku spiekanego o kącie wierzchołkowym  $2\kappa_r = 140^\circ$  i kącie pochylenia linii śrubowej rowka  $\lambda = 35^\circ$  pokrywane TiAlN metodą PVD. W tab. 3 pokazano podstawowe wymiary zastosowanego narzędzia skrawającego firmy ISCAR (SCD 061-043-080 ACP5N) oraz parametry skrawania stosowane w badaniach.

### Stanowisko badawcze i tor pomiarowy

Proces wiercenia przeprowadzono na frezarce pionowej CNC firmy EMCO®. W ramach badań rejestrowano sygnał siły osiowej ( $F_f$ ) oraz momentu skrawania ( $M_c$ ) pochodzący ze strefy skrawania w trakcie obróbki stopu tytanu Ti6Al4V. Badania prowadzono bez użycia chłodziwa, z uwagi na możliwość uzyskania widocznego obrazu procesu tworzenia się wióra w trakcie prowadzonej obróbki. Schematyczny diagram konfiguracji toru pomiarowego i systemu archiwizacji danych pomiarowych przedstawiono na rys. 2.

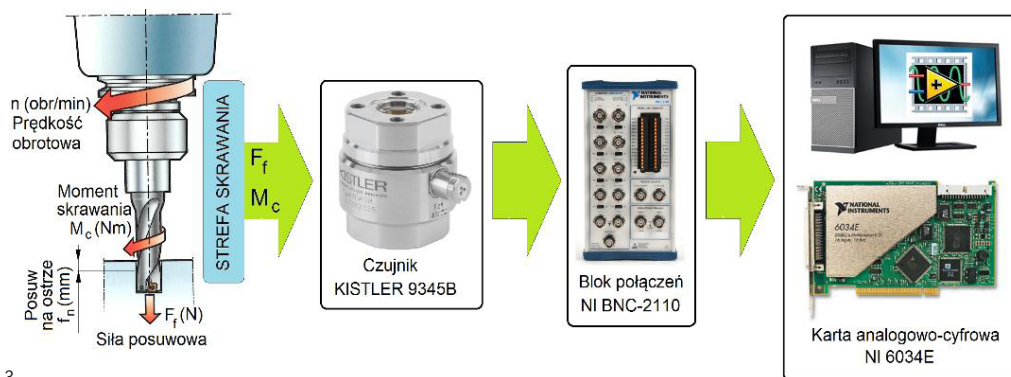
Schematyczny diagram konfiguracji systemu archiwizacji danych pomiarowych przedstawiono na rys. 3.

Wielkości fizyczne ( $F_f$  i  $M_c$ ) mierzone były za pomocą piezoelektrycznego czujnika przemysłowego KISTLER 9345B2. Sygnały napięciowe pochodzące z czujnika rejestrowane były na dysku komputera osobistego (PC) w postaci cyfrowej za pośrednictwem umieszczonej wewnątrz PC karty analogowo-cyfrowej NI 6034E. Częstotliwość próbkowania sygnałów pochodzących ze strefy skrawania podczas prowadzonych ekspe-

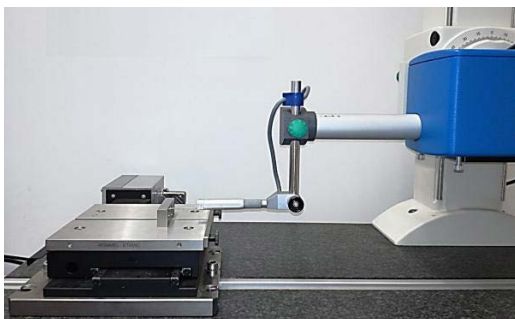
Prędkość skrawania (m/min)	Prędkość posuwu (mm/min)	Narzędzie skrawające ISCAR (SCD 061-043-080 ACP5N)
28	278	
	148	
	56	
21	278	
	148	
	56	
7	278	
	148	
	56	

Tab. 3. Narzędzie skrawające i parametry skrawania

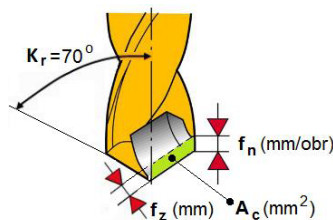
3. Tor pomiarowy wraz z systemem akwizycji danych
4. Pomiar kształtu i chropowatości powierzchni
5. Wielkości geometryczne warstwy skrawanej przy wierceniu, gdzie:  
 $f_z$  – posuw na ostrze (mm)  
 $A_c$  – pole przekroju warstwy skrawanej (mm<sup>2</sup>)
6. Przebieg siły posuwowej i momentu skrawania podczas wiercenia



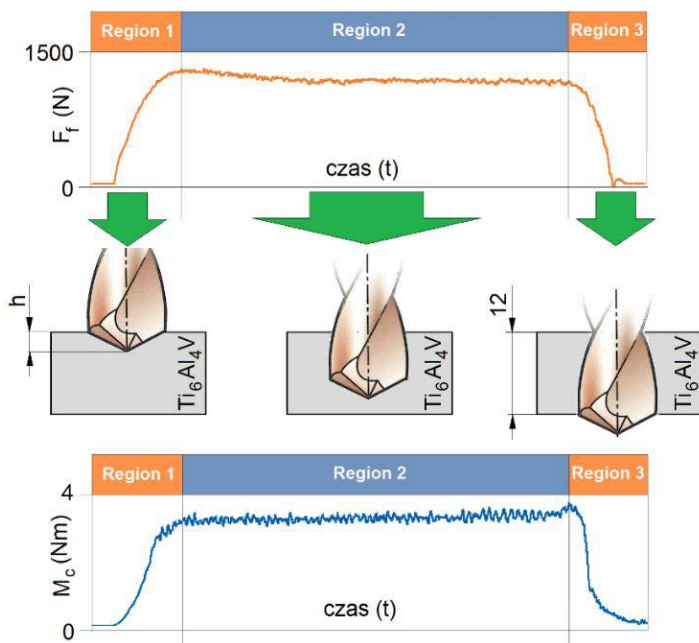
Rys. 3.



Rys. 4.



Rys. 5.



Rys. 6.

- rymentów wynosiła 50 kHz na kanał, a rozdzielczość pomiarowa karty 16 bitów.

### Cel i zakres badań

Pomiar siły skrawania, obecnie najbardziej niezawodna i dokładna metoda wykrywania dostępna w obróbce skrawaniem metali, jest jedną z najczęściej stosowanych metod monitorowania zużycia narzędzi online.

Aby zasymulować warunki hali produkcyjnej, wybrano dziewięć zestawów para-

metrów skrawania i zastosowano je kolejno, jak pokazano w tab. 3. Podczas obróbki rejestrowano siłę posuwową ( $F_f$ ) i moment skrawania ( $M_c$ ), a zużycie narzędzia mierzono ręcznie po każdym teście dla danej prędkości posuwu ( $v_f$ ). Eksperymenty prowadzono aż do wystąpienia katastroficznego stępienia ostrza. Przeprowadzono dwa eksperymenty. W pierwszym teście (oznaczonym jako K1) wykonano 30 cykli, aż do wystąpienia gwałtownego wzrostu zużycia przyłożenia VB, sięgającego wartości około 0,5 mm. W drugim teście (oznaczonym K2) uszkodzenie powłoki skutkowało wykruszaniem się krawędzi skrawającej pod koniec 9. cyklu. K1 został opracowany do identyfikacji reguł rozmytych TSK, podczas gdy K2 został wykorzystany do weryfikacji działania różnych systemów monitorowania.

Ponadto przeprowadzone badania zostały zaprojektowane w celu zbadania wpływu prędkości skrawania ( $v_c$ ), prędkości posuwu ( $v_f$ ) na: wartość siły posuwowej i momentu skrawania, dokładność kształtową i jakość powierzchni wykonanych otworów oraz proces tworzenia się i kształt powstałych wiórów. Średnicę otworu i związane z tym błędy okrągłości zostały zmierzone za pomocą mikroskopu pomiarowego MITUTOYO TM505B (rys. 4) oraz sensora krawędziowego 3D o rozdzielczości 0,005 mm i średnicy kulki pomiarowej 2 mm.

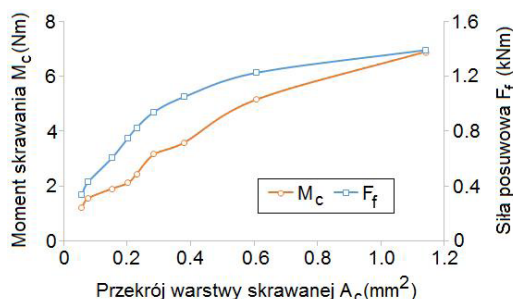
Chropowatości powierzchni mierzono

za pomocą profilometru Hommel-TESTER T1000 (rys. 4).

W trakcie przeprowadzonych badań wykonano serię otworów z parametrami skrawania przedstawionymi w tab. 3. Na rys. 5 przedstawiono wielkości geometryczne skrawania wraz z ich oznaczeniem stosowane w trakcie badań.

## Wyniki badań – siła posuwowa i moment skrawania

Podczas wiercenia wiertłem spiralnym z węglika, gdy narzędzie wnika w materiał, zamiast skrawania, ostrze wiertła dociska materiał. Rys. 6 ilustruje zmienności siły posuwowej i momentu skrawania w funkcji głębokości wiercenia (czasu skrawania) w trakcie wiercenia stopu tytanu Ti6Al4V przy prędkości skrawania 21 m/min i prędkości posuwu 14,8 mm/min. Zauważono, że podczas wiercenia występują trzy główne obszary zmienności wartości siły posuwowej. Region 1 określa okres, w którym wiertło przebyło odległość  $h$ , która jest równa wysokości ostrzy skrawających wiertła. Dla wiertła użytego w tym badaniu  $h = 1$  mm (tab. 1). Gdy tylko krawędź ostrza wejdzie w materiał, siła posuwowa rośnie gwałtownie i osiąga wartość szczytową (1020 N) na końcu regionu 1. Stała siła posuwowa pojawiła się, gdy krawędzie tnące wiertła zagłębiły się w materiale obrabianym, jak pokazano w regionie 2. Siła posuwowa spada do zera w regionie 3, gdy krawędzie skrawają-



Rys. 7.

ce wiertła opuściły element obrabiany. Można zaobserwować dodatkowo dodatnią (niewielką co do wartości) siłę posuwową po wyjęciu wiertła z obrabianego przedmiotu, w wyniku zakleszczenia się wiórów w otworze.

Na rys. 7 pokazano przebieg wartości siły posuwowej i momentu skrawania zarejestrowanej w trakcie wiercenia stopu tytanu Ti6Al4V w funkcji pola powierzchni nominalnego przekroju warstwy skrawanej ( $A_c$ ).

Można tu zauważyć, że zarówno wartość siły posuwowej i momentu skrawania podczas wiercenia stopu tytanu Ti6Al4V rośnie w stosunku do pola przekroju warstwy skrawanej. W przypadku siły posuwowej wzrost ten wynosi powyżej 400%, natomiast dla momentu skrawania wynosi on około 500% przy przeszło 10-krotnym wzroście przekroju warstwy skrawanej, z czym wiąże się większą objętość usuwanego (skrawanego) materiału. Zaobserwowano, że prędkość skrawania nie ma wpływu na wartość siły posuwowej, jak i również na moment skrawania. □

### Piśmiennictwo

- Shetty P.K., Shetty R., Shetty D., Rehaman N.F., Jose T.K.: *Machinability study on dry drilling of titanium alloy Ti-6Al-4V using L9 orthogonal array.* „Procedia Materials Science”, 2014, 5, 2605-2614.
- Sun J., Guo Y.B.: *A new multi-view approach to characterize 3D chip morphology and properties in end milling titanium Ti-6Al-4V.* „Int. J. Tools Manuf.”, 2008, 48, 1486-1494.
- Lei S., Liu W.J.: *High-speed machining of titanium alloys using the driven rotary tool.* „Int. J. Tools Manuf.”, 2002, 42, 653-661.
- Hsu I., Tsao C.C.: *Study on the effect of frequency tracing in ultrasonic-assisted drilling of titanium alloy.* „Int Journal AdvManuf Technol”, 2008, 43 (1-2), 127-135.
- Bi S., Liang J.: *Experimental studies and optimization of process parameters for burrs in dry drilling of stacked metal materials.* „Int Journal AdvManuf Technol”, 2010, 53 (9-12), 867-876.
- Ren N., Jiang L., Liu D., Lv L., Wang Q.: *Comparison of the simulation and experimental of hole characteristics during nano-second-pulsed laser drilling of thin titanium sheets.* „Int Journal AdvManuf Technol”, 2014, 76 (5-8), 735-743.
- Cantero J.L., Tardío M.M., Canteli J.A., Marcos M., Miguélez M.H.: *Dry drilling of alloy Ti-6Al-4V.* „Int. J. Tools Manuf.”, 2005, 45, 1246-1255.
- Li R., Hegde P., Shih A.J.: *High-through-*
- put drilling of titanium alloys. „Int. J. Tools Manuf.”, 2007, 47, 63-74.
- Dornfeld D.A., Kim J.S., Dechow H., Hewson J., Chen L.J.: *Drilling burr formation in titanium alloy, Ti-6Al-4V.* „CIRP Ann-Manuf Technol”, 1999, 48, 73-76.
- Abdelhafeez A.M., Soo S.L., Aspinwall D.K., Dowson A., Arnold D.: *Burr formation and hole quality when drilling titanium and aluminium alloys.* „Procedia CIRP”, 2015, 37, 230-235.
- Shyha I.S., Soo S.L., Aspinwall D.K., Bradley S., Perry R., Harden P., Dawson S.: *Hole quality assessment following drilling of metallic-composite stacks.* „Int. J. Tools Manuf.”, 2011, 51, 569-578.
- Denkena B., Boehnke D., Dege J.H.: *Helical milling of CFRP-titanium layer compounds.* „CIRP J. Manuf Sci Technol”, 2008, 1, 64-69.
- Pawar O.A., Gaikhe Y.S., Tewari A., Sundaram R., Joshi S.S.: *Analysis of hole quality in drilling GLARE fiber metal laminates.* „Compos Struct”, 2015, 123, 350-365.
- Bono M., Ni J.: *The effects of thermal distortions on the diameter and cylindricity of dry drilled holes.* „Int. J. Tools Manuf.”, 2001, 41, 2261-2270.
- Ko S., Lee J.: *Analysis of burr formation in drilling with a new-concept drill.* „J Mater Process Technol”, 2001, 113, 392-398.
- Ko S., Chang J., Yang G.: *Burr minimizing scheme in drilling.* „Mater Process Technol”, 2003, 140, 237-242.
- Nouari M., List G., Girod F., Géhin D.: *Effect of machining parameters and coating on wear mechanisms in dry drilling of aluminium alloys.* „Int J Tools Manuf”, 2005, 45, 1436-1442.
- Prasanna J., Karunamoorthy L., Venkat Raman M., Prashanth S., Raj Chordia D.: *Optimization of process parameters of small hole dry drilling in Ti-6Al-4V using Taguchi and grey relational analysis.* „Measurement”, 2014, 48, 346-354.
- El Gomayel J.I., Bregger K.D.: *On-line tool. Transactions of ASME.* „Journal of Engineering for Industry”, 1998, 108 (1), p. 4447.
- Mucientes M., Vidal J.C., Bugarín A., Lama M.: *Processing time estimations by variable structure TSK rules learned through genetic programming.* „Soft Computing”, 2009, 13 (5), pp. 497-509.
- Nandi A.K.: *TSK-type FLC using a combined LR and GA: surface roughness prediction in ultraprecision turning.* „Journal of Materials Processing Technology”, 2006, 178 (1-3), pp. 200-210.
- Nandi A.K., Davim J.P.: *A study of drilling performances with minimum quantity of lubricant using fuzzy logic rules.* „Mechatronics”, 2009, 19 (2), pp. 218-232.
- Takagi T., Sugeno M.: *Fuzzy identification of systems and its applications to modelling and control.* „IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics”, 1985, 15 (1), pp. 116-132.