Inżynieria Maszyn, R. 18, z. 4, 2013

toczenie, tytan, badania, metoda Taguchi, siły skrawania, chropowatość

Małgorzata KOWALCZYK<sup>1</sup>

## POMIAR SKŁADOWYCH SIŁ SKRAWANIA I CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI PODCZAS PRECYZYJNEGO TOCZENIA CZYSTEGO TYTANU

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów składowych sił skrawania oraz parametrów chropowatości podczas precyzyjnego toczenia czystego tytanu (GRADE 2) ostrzem z polikrystalicznego diamentu PCD. Toczenie przeprowadzono w atmosferze powietrza. W celu realizacji badań zestawiono aparaturę pomiarową: tory do pomiaru parametrów chropowatości powierzchni obrobionej i składowych sił skrawania. Badania doświadczalne przeprowadzono wykorzystując metodę Taguchi. Parametry obróbki (prędkość skrawania *badania doświadczalne przeprowadzono wykorzystując metodę Taguchi. Parametry obróbki (prędkość skrawania v<sub>c</sub> i głębokość skrawania stanowiły parametry wejściowe natomiast wybrane parametry chropowatości i składowe siły skrawania stanowiły parametry wyjściowe. W badaniach zastosowano następujący zakres parametrów skrawania: prędkość skrawania: 50-150m/min, głębokość skrawania: 0,01 – 0,1mm, natomiast posuw był stały, f = 0,036mm/obr. Rezultaty eksperymentu zostały przedstawione w postaci wykresów i ilustracji.* 

#### 1. WPROWADZENIE

Szybki rozwój techniki jest silnie związany z potrzebą powstawania coraz to nowych materiałów konstrukcyjnych, które będą charakteryzować się nowymi właściwościami. Jednak praktyczne wykorzystanie tych materiałów ściśle wiąże się ze sposobami ich wytwarzania i obróbki. Oczywistym staje się, więc potrzeba opracowywania nowych technologii wytwarzania oraz ulepszania technologii już istniejących. Współcześnie najczęściej stosowaną technologią kształtowania części, a tym samym konstruowania warstwy wierzchniej jest obróbka skrawaniem. Współczesne procesy obróbki ubytkowej, szczególnie materiałów trudnoobrabialnych, które znajdują bardzo szerokie zastosowanie w przemyśle, powinny zapewnić możliwie najlepszą, jakość wyrobów, dużą wydajność, ekonomiczność, niezawodność i ekologiczność. Wraz z wytwarzaniem nowych wyrobów z trudno obrabialnych materiałów, takich jak stopy tytanu, stopy niklu, ceramika specjalna potrzeba poszukiwania coraz to efektywniejszych dróg obróbki itp. zachodzi przekraczających bariery technologiczne. W ostatnich latach w wielu dziedzinach przemysłu takich jak lotniczy, motoryzacyjny, medyczny i elektroniczny obserwuje się

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska, E-mail: kowalczyk@mech.pk.edu.pl

wzrost zapotrzebowania na wyroby charakteryzujące się bardzo dużą dokładnością wykonania. Stymuluje to rozwój procesu obróbki precyzyjnej [11],[23],[24]. Ze względu na duże wymagania stawiane elementom wykonanym z materiałów trudnoobrabialnych, oraz jednoczesną potrzebę efektywnej obróbki skrawaniem tych materiałów, prowadzone są szeroko zakrojone badania nad polepszeniem procesów obróbkowych.

Stopy tytanu spełniają ważną rolę, szczególnie w przemyśle lotniczym i kosmicznym [2],[4],[5],[8]. Cechują się znakomitą odpornością na korozję, dużym stosunkiem wytrzymałości do gęstości i kompatybilnością ze strukturami kompozytowymi. Jednakże, aby utrzymać ich wysoką pozycję, jako materiału konstrukcyjnego, należy obniżyć koszty ich przetwarzania – materiały trudnoskrawalne. Problemy, związane z obróbką tytanu nie pozwalają osiągnąć wyższych parametrów skrawania, a przez to podnieść efektywność obróbki przy zachowaniu odpowiedniej, jakości warstwy wierzchniej. Podczas skrawania stopów tytanu następuje szybkie zużycie narzędzia. Jak dotychczas priorytetem w przemyśle było uzyskanie wysokich parametrów produktów wykonywanych z tytanu i jego stopów, w drugiej kolejności brano po uwagę koszt ich wytworzenia. Można się spodziewać, że w przyszłości z uwagi na konieczność ograniczania i optymalizację kosztów produkcji, wysiłki badawcze będą skierowane w stronę procesów kształtowania elementów z tytanu metodami zapewniającymi maksymalną efektywność przy zachowaniu dobrej jakości powierzchni obrobionej (np. obróbka HSC, HPC) [3],[7],[9],[13].

Tytan i jego stopy są stosunkowo lekkim metalem o gęstości ok. 4,5g/cm3 (w zależność od stopu), zapewniającym doskonałą odporność na korozję, dużą wartość stosunku wytrzymałości do gęstości, dobre właściwości w wysokich temperaturach i wysoką wytrzymałość w warunkach obciążeń długotrwałych [1],[10],[12,]. Możliwości zastosowania tytanu w technice kosmicznej, jak i w produkcji szeregu elementów konstrukcyjnych samolotów wojskowych i w branżach cywilnych jeszcze nie są w pełni wykorzystywane ze względu na bardzo duże trudności technologiczne wykonania części z tytanu.

Tytan i jego stopy są uznawane za materiał trudnoobrabialny [16],[18],[19]. Główne problemy w procesach obróbkowych stopów tytanu są związane z wysokimi temperaturami skrawania i szybkim zużywaniem się ostrzy narzędzi. Trudności w obróbce skrawaniem tytanu i jego stopów spowodowane są głównie jego właściwościami: niskim współczynnikiem przewodności cieplnej, dużą reaktywnością chemiczną z większością materiałów narzędziowych, głównie przy temperaturze skrawania 500°C, termoplastyczną niestabilnością podczas obróbki, niskim modułem sprężystości, w konsekwencji czego może zachodzić odkształcenie przedmiotu obrabianego pod wpływem siły skrawania oraz tendencją do tworzenia narostu podczas skrawania, co sprzyja wykruszaniu się ostrza narzędzia [20],[22].

Podczas obróbki tytanu i jego stopów występuje również skłonność przylepiania się tworzonego wióra do narzędzia [20],[22]. Niekorzystną cechą jest to, że w czasie procesu skrawania stopów tytanu występuje zjawisko ich umacniania się, powstającego w następstwie oddziaływania narzędzia na obrabiany materiał, co wywołuje problemy podczas kolejnych zabiegów obróbkowych. Ze względu na duże wymagania stawiane elementom wykonanym z tytanu i jego stopów, oraz jednoczesną potrzebę efektywnej obróbki skrawaniem tych materiałów, prowadzone są szeroko zakrojone badania nad polepszeniem procesów obróbkowych, których celem jest osiągnięcie wysokiej jakości gotowych wyrobów.

Obecnie, aby zminimalizować problemy związane ze skrawaniem tytanu i jego stopów stosuje się prędkości skrawania, dla ostrzy z węglików spiekanych, mniejsze niż 60m/min. Zaleca się jednocześnie stosowanie dużych posuwów (dla ostrzy z węglików spiekanych f = 0,2-0,5mm/obr). Stosuje się przy tym obfite chłodzenie i smarowanie ostrza w celu efektywnego przejmowania ciepła, zmniejszenia sił skrawania i spłukiwania wiórów, co znacznie wydłuża trwałość narzędzia.

W artykule dokonano oceny wybranych wskaźników skrawalności takich jak: parametry chropowatości (analiza SGP) i składowe siły skrawania, w procesie toczenia precyzyjnego (mały przekrój skrawania, dążenie do uzyskania małej chropowatości powierzchni obrobionej) czystego tytanu (Grade 2) ostrzem z polikrystalicznego diamentu.

### 2. METODYKA I ZAKRES BADAŃ

#### 2.1. PRZEDMIOT OBRABIANY I NARZĘDZIE

Badania doświadczalne przeprowadzono dla operacji toczenia precyzyjnego wałka  $\phi$ 27,5mm, wykonanego z czystego tytanu (Grade 2) o składzie chemicznym 0,1%C; 0,2%Fe; 0,015%H, 0,03%N; 0,25%O, 98,885%Ti, 0,3%inne. Właściwości fizyczne i mechaniczne zamieszczono w tabelach 1, 2. Toczenie prowadzono na sucho w atmosferze powietrza. Do obróbki zastosowano płytkę CNMA 120404 ID5 z polikrystalicznego diamentu PCD opisaną w tabeli 3. Do realizacji badań doświadczalnych wybrano metodykę badań Taguchi [6],[14],[15],[17],[21].

Materiał konstrukcyjny	Gęstość ρ g/cm3	Współczynnik przewodności cieplnej λ W/mK	Ciepło właściwe c J/gK
Ti – Grade 2	4,51	16,4	0,523

Tabela 1. Właściwości fizyczne i chemiczne Ti – Grade 2 Table 1. Physical and thermal properties of Ti – Grade 2 [10]

Tabela 2. Właściwości mechaniczne Ti – Grade 2 Table 2. Mechanical properties of Ti – Grade 2

Materiał konstrukcyjny	<i>R<sub>m</sub></i> MPa	Stosunek $R_m/\rho$	<i>R<sub>e</sub></i> MPa	Twardość	v Stała Poissona	<i>G</i> GPa
Ti – Grade 2	522	116	368	200HB	0,37	103

Rodzaj narzędzia	Symbol	Oprawka	Geometria
Polikrystaliczny diament (PCD)	CNMA 120404 ID5	DCLNR 2020 K12	$\alpha_{o} = 6^{o}; \gamma_{o} = 1^{o}; \kappa_{p} = 95^{0};$ $r_{\epsilon} = 0,4mm, r_{n} = 3\mu m$

Tabela 3. Opis narzędzi użytych podczas badań Table 3. Geometry of cutting edge

#### 2.2. STANOWISKO BADAWCZE

W celu zrealizowania zadania badawczego zbudowano stanowisko badawcze na bazie tokarki rys. 1. Zestawiono aparaturę pomiarową: tory do pomiaru parametrów jakości powierzchni obrobionej (chropowatości) i składowych całkowitej siły skrawania.



Rys. 1 Schemat kinematyczny stanowiska badawczego Fig. 1. Diagram of kinematic test stand

Pomiary chropowatości 2D i 3D powierzchni obrobionej z czystego tytanu Ti (Grade 2) przeprowadzono przy pomocy systemu pomiarowego firmy Taylor Hobson. Do wizualizacji pomiarów badanych powierzchni wykorzystano program Talymap. W ramach badań wykonano pomiary wybranych parametrów topografii powierzchni w następujących warunkach: długość odcinka elementarnego  $l_r = 0,8$ mm, liczba odcinków 5, długość odwzorowania  $l_t = 4$ mm, liczba zarejestrowanych punktów Nx = 1000, krok próbkowania  $\Delta x = 1$ µm, promień zaokrąglenia końcówki pomiarowej  $r_{tip} = 2$ µm, prędkość przesuwu

końcówki pomiarowej  $v_{os} = 1$ mm/s, rozmiary powierzchni, na których wykonano pomiary topografii 1x1, liczba przekrojów 100, odstęp wykonywanych pomiarów chropowatości 0,1mm, zastosowano filtr Gaussa. Pomiary powtórzono 3 razy dla celów statystycznych.

Tor pomiarowy składowych całkowitej siły skrawania  $F_f$ ,  $F_c$ ,  $F_p$  (podłączony do tokarki składał się z następujących elementów:

- siłomierza piezoelektrycznego firmy Kistler typu 9257B z imakiem 9403 (czułość:  $F_f$ : 7,70 pC/N;  $F_p$ : -7,82 pC/N;  $F_c$ : -3,71 pC/N; niedokładność pomiaru ±0,01N),
- wzmacniacza ładunku wraz z zespołem filtrów firmy Kistler typ 5019A (skala:  $F_{f,} F_{p}$ : 50 N/V,  $F_{c}$ : 200N/V),
- komputera PC z kartą analogowo-cyfrową.

#### 2.3. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Badania doświadczalne przeprowadzono na tokarce Masterturn 400 z różnymi prędkościami skrawania  $v_c$  i głębokościami skrawania  $a_p$ , posuw był stały f = 0,036mm/obr zgodnie z planem eksperymentu Taguchi podczas toczenia precyzyjnego (mały przekrój warstwy skrawanej) czystego tytanu (Grade 2).

Badania zostały wykonane według Planu Taguchi, który został wygenerowany przy pomocy programu MiniTab (tabela 4). Do badań zostały wyznaczone dwie zmienne, posuw  $a_p$  i prędkość  $v_c$  dla ostrza z polikrystalicznego diamentu, na trzech poziomach.

$$Vn^{(k)} = n^k = L^P = 3^2 \tag{1}$$

gdzie: L – poziom P – liczba zmiennych

L.p.	$a_p$ [mm]	<i>v<sub>c</sub></i> [m/min]
1	0,1	50
2	0,1	100
3	0,1	150
4	0,05	50
5	0,05	100
6	0,05	150
7	0,01	50
8	0,01	100
9	0,01	150

Tabela 4. Wygenerowany plan doświadczalny Table 4. Generated experimental plan

Etapy postępowania dla metodyki badawczej i optymalizacyjnej Taguchi zostały przedstawione na rys. 2.



Rys. 2 Etapy metodyki badawczej Taguchi [6],[14],[15],[17],[21] Fig. 2. Taguchi design procedure [6],[14],[15],[17],[21]

# 3. WYNIKI I ANALIZA BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

#### 3.1. WYMIAR PO OBRÓBCE POWIERZCHNI OBROBIONEJ

Po wykonaniu prób skrawnych toczenia precyzyjnego sprawdzono zmianę wymiaru po obróbce powierzchni obrobionej (tabela 5), co jest bardzo istotne podczas toczenia precyzyjnego z tak małymi głębokościami skrawania, minimalna wartość  $a_p = 0,01$ mm. Średnice zostały pomierzone mikrometrem z dokładnością do 0,01mm. Przed obróbką średnica wałka wynosiła 27,5mm.

L.p.	Średnica wałka przed obróbką d [mm]	Średnica wałka po obróbce d <sub>1</sub> [mm]	<i>a<sub>p</sub></i> [mm]	Uzyskanie wymiaru po obróbce
1		27,4	0,1	TAK
2		27,4	0,1	TAK
3		27,4	0,1	TAK
4		27,45	0,05	TAK
5	27,5	27,45	0,05	TAK
6		27,45	0,05	TAK
7		27,5	0,01	TAK
8		27,5	0,01	TAK
9		27,5	0,01	TAK

Tabela 5. Zmiana wymiaru powierzchni obrobionej po toczeniu precyzyjnym czystego tytanu Ti Table 5. The dimension of machined surface after precision turning of titanium Ti

#### 3.2. POMIARY SKŁADOWYCH CAŁKOWITEJ SIŁY SKRAWANIA

W trakcie toczenia precyzyjnego czystego tytanu zarejestrowano przebiegi wartości składowych  $F_c$ ,  $F_f$ ,  $F_p$  całkowitej siły skrawania z wykorzystaniem toru pomiarowego, zestawionego wg. rys. 1. Wyniki pomiarów minimalnych, maksymalnych oraz średnich wartości składowych  $F_c$ ,  $F_f$ ,  $F_p$  całkowitej siły skrawania dla parametrów przyjętych według planu badań przedstawiono w tabeli 6.

L.p.	$F_{f}$	$\operatorname{Min} F_f$	Max $F_f$	$F_p$	$\operatorname{Min} F_p$	$\operatorname{Max} F_p$	$F_{c}$	$\operatorname{Min} F_c$	$\operatorname{Max} F_c$
1	3,84	3,51	4,2	12,69	11,58	14,35	13,98	12,7	15,55
2	5,01	3,83	6,9	13,21	12,11	15,37	12,79	11,49	13,73
3	4,47	-2,92	5,5	14,02	12,45	15,55	14,48	13,09	16,63
4	2,09	1,27	3,44	9,55	8,36	10,68	10,31	8,84	13,49
5	1,63	1,3	1,98	9,19	8,36	10,39	7,63	6,93	8,61
6	1,5	0,22	2,33	7,75	6,38	8,94	7,25	6,22	8,43
7	0,07	-0,16	0,29	2,14	1,05	3,27	1,4	0,8	2,03
8	0,21	-0,12	0,51	0,61	0,13	1,06	0,4	-0,02	0,28
9	0,21	-0,75	1,25	0,71	-0,31	1,77	0,64	0	1,22

Tabela 6. Wyniki wartości składowych całkowitej siły skrawania podczas toczenia precyzyjnego diamentem Tabela 6. The results of the resultant cutting forces during precision diamond turning

Przeprowadzono dwuczynnikową analizę wariancji Anova dla wartości średnich składowych  $F_c$ ,  $F_f$ ,  $F_p$  całkowitej siły skrawania, w celu określenia w pływu czynników (zmiennych niezależnych) na zmienną zależną. Zmienną zależną były wartości poszczególnych składowych. Zmiennymi niezależnymi była głębokość skrawania  $a_p$  i prędkość skrawania  $v_c$ . Jednym z podstawowych zagadnień w analizie wariancji jest oszacowanie tzw. wartości średniokwadratowej (MS). Stosunek średnich kwadratów, obliczanych dla poszczególnych czynników w odniesieniu do średniego kwadratu błędu, pozwolił na oszacowanie wpływu każdego z czynników oddzielnie na poziom zmiennej zależnej. Na podstawie uzyskanych wartości statystyki F oraz odpowiadających im wartości prawdopodobieństwa testowego P można stwierdzić, że tylko głębokość skrawania  $a_p$  ma wpływ na składowe całkowitej siły skrawania (dla  $F_f$  : zmienna  $a_p$ : F = 74,12, P = 0,001; zmienna  $v_c$ : F = 0,35, P = 0,722; dla  $F_c$  : zmienna  $a_p$ : F = 145,32, P = 0,000; zmienna  $v_c$ : F = 2,37, P = 0,21; dla  $F_p$  : zmienna  $a_p$ : F = 128,16, P = 0,000; zmienna  $v_c$ : F = 0,36, P = 0,717).

Ustalono równania regresji dla wartości składowych  $F_c$ ,  $F_f$ ,  $F_p$  całkowitej siły skrawania.

$$F_f = -0.494 + 47.8 a_p + 0.00060 v_c \tag{2}$$

$$F_p = 1,29 + 133 a_p - 0,0063 v_c \tag{3}$$

$$F_c = 1,17 + 142 a_p - 0,0111 v_c \tag{4}$$

Na podstawie uzyskanych równań regresji (2-4) sporządzono przebiegi wpływu prędkości skrawania  $v_c$  (przy stałej głębokości skrawania  $a_p$ ) i głębokości skrawania  $a_p$  (przy stałej prędkości skrawania  $v_c$ ) na wartości składowych  $F_c$ ,  $F_f$ ,  $F_p$  całkowitej siły skrawania, które zaprezentowano na rys 3 ÷ 5.

















Rys. 5. Wpływ prędkości skrawania  $v_c$  i głębokości skrawania  $a_p$  na składową  $F_f$  całkowitej siły skrawania podczas obróbki precyzyjnej czystego tytanu ostrzem z PKD

Fig. 5. The Influence of cutting speed  $v_c$  and depth of cut  $a_p$  on the total cutting force  $F_f$  during precision turning of pure titanium with PKD tool

Na powyższych wykresach można zauważyć, że wzrost głębokości skrawania  $a_p$  powoduje wyraźny wzrost wartości poszczególnych składowych całkowitej siły skrawania  $F_c$ ,  $F_p$ ,  $F_f$ . Natomiast wpływ prędkości skrawania  $v_c$  na wartości poszczególnych składowych całkowitej siły skrawania  $F_c$ ,  $F_p$ ,  $F_f$  nie jest jednoznaczny.

#### 3.3. POMIARY WYBRANYCH PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI

W kolejnym etapie przeprowadzono pomiary wybranych parametrów chropowatości 2D i 3D powierzchni obrobionej. Wyniki pomiarów średnich wartości parametrów chropowatości 2D (*Ra, Rq, Rt, Rz, Rc, Rv, Rp, Rsk, Rku*) i 3D (*Sa, Sz*) przyjętych według planu badań Taguchi przedstawiono w tabeli 7. Na rys. 6÷8 przedstawiono widoki 3D powierzchni oraz profil w odniesieniu do wytworzonych wybranych powierzchni dla toczenia precyzyjnego czystego tytanu polikrystalicznym diamentem PKD.

Tabela 7. Wyniki pomiarów wybranych wartości parametrów chropowatości 2D i 3D dla parametrów przyjętych zgodnie z planem doświadczalnym

Table 7. The results of measurements of 2D and 3D roughness parameters in accordance with the experimental plan

L.p.	Ra	Rz	Sa	Sz
1	0,18	1,47	0,201	3
2	0,25	2,15	0,259	3,53
3	0,29	1,82	0,276	2,28
4	0,23	1,81	0,226	6,12
5	0,27	3,12	0,289	5,05
6	0,35	2,17	0,345	4,58
7	0,15	1,25	0,168	1,73
8	0,18	1,17	0,195	1,65
9	0,21	2,13	0,217	3,9

Przeprowadzono dwuczynnikową analizę wariancji Anova, dla wartości średnich parametrów chropowatości *Ra, Rz, Sa* i *Sz*, w celu określenia w pływu czynników (zmiennych niezależnych) na zmienną zależną. Zmienną zależną były wartości poszczególnych parametrów chropowatości. Zmiennymi niezależnymi była głębokość skrawania  $a_p$  i prędkość skrawania  $v_c$ . Jednym z podstawowych zagadnień w analizie wariancji jest oszacowanie tzw. wartości średniokwadratowej (MS). Stosunek średnich kwadratów obliczanych dla poszczególnych czynników w odniesieniu do średniego kwadratu błędu pozwolił na oszacowanie wpływu każdego z czynników oddzielnie na poziom zmiennej zależnej. Na podstawie uzyskanych wartości statystyki F oraz odpowiadających im wartości prawdopodobieństwa testowego P można stwierdzić, że zarówno głębokość skrawania  $a_p$ , jak i prędkość skrawania  $v_c$  wpływają na wartość parametrów chropowatości *Ra* i *Sa* (dla *Ra:* zmienna  $a_p$ : F = 19,46, P = 0,009; zmienna  $v_c$ : F = 17,75, P = 0,01; dla *Sa:* zmienna  $a_p$ : F = 18,90, P = 0,009; zmienna  $v_c$ : F = 14,40, P = 0,015).

Po przeprowadzeniu analizy Anova dla parametrów chropowatości  $R_z$  i  $S_z$  można stwierdzić, że główny wpływ na te parametry ma głębokość skrawania  $a_p$ .

65



Rys. 6. Profil oraz widok 3D powierzchni dla toczenia precyzyjnego czystego tytanu polikrystalicznym diamentem PKD z prędkością skrawania  $v_c = 50$ m/min i głębokością skrawania  $a_p = 0,1$ mm

Fig. 6. Profile and 3D view of the surface during precise turning of pure titanium by polycrystalline diamond PKD when cutting speed of  $v_c = 50$ m/min and depth of cut  $a_p = 0.1$ mm



Rys. 7. Profil oraz widok 3D powierzchni dla toczenia precyzyjnego czystego tytanu polikrystalicznym diamentem PKD z prędkością skrawania  $v_c = 50$ m/min i głębokością skrawania  $a_p = 0.05$ mm

Fig. 7. 3D Profile and 3D view of the surface during precise turning of pure titanium by polycrystalline diamond PKD when cutting speed of  $v_c = 50$ m/min and depth of cut  $a_p = 0.05$ mm



Rys. 8. Profil oraz widok 3D powierzchni dla toczenia precyzyjnego czystego tytanu polikrystalicznym diamentem PKD z prędkością skrawania  $v_c = 50$ m/min i głębokością skrawania  $a_p = 0,05$ mm Fig. 8. 3D Profile and 3D view of the surface during precise turning of pure titanium by polycrystalline diamond PKD when cutting speed of  $v_c = 50$ m/min and depth of cut  $a_p = 0.01$ mm

Ustalono równania regresji dla wartości parametrów chropowatości Ra, Rz, Sa i Sz.

$$Ra = 0,105 + 0,607 a_p + 0,000971 v_c \tag{5}$$

$$Rz = 1,22 + 2,72 a_p + 0,00531 v_c \tag{6}$$

$$Sa = 0,133 + 0,520 a_p + 0,000810 v_c \tag{7}$$

$$Sz = 3,38 + 3,5 a_p - 0,0003 v_c \tag{8}$$

Na podstawie uzyskanych równań regresji (5-8) porządzono przebiegi wpływu prędkości skrawania  $v_c$  i głębokości skrawania  $a_p$  na wartości parametrów chropowatości Ra, Rz, Sa i Sz, które zaprezentowano na rys 9 ÷ 12.





Rys. 9. Wpływ prędkości skrawania  $v_c$  i głębokości skrawania  $a_p$  na parametr Sz podczas obróbki precyzyjnej czystego tytanu ostrzem z PKD





Rys. 10. Wpływ prędkości skrawania  $v_c$  i głębokości skrawania  $a_p$  na parametr Sa podczas obróbki precyzyjnej czystego tytanu ostrzem z PKD

Fig. 10. The Influence of cutting speed  $v_c$  and depth of cut  $a_p$  on the surface roughness Sa during precision turning of pure titanium with PKD tool



Rys. 11. Wpływ prędkości skrawania  $v_c$  i głębokości skrawania  $a_p$  na parametr Ra podczas obróbki precyzyjnej czystego tytanu ostrzem z PKD

Fig. 11. The Influence of cutting speed  $v_c$  and depth of cut  $a_p$  on the surface roughness Ra during precision turning of pure titanium with PKD tool







Fig. 12. The Influence of cutting speed  $v_c$  and depth of cut  $a_p$  on the surface roughness  $R_z$  during precision turning of pure titanium with PKD tool

Na powyższych wykresach można zauważyć, że wzrost głębokości skrawania  $a_p$  i prędkości skrawania  $v_c$  powoduje wzrost wartości poszczególnych parametrów chropowatości Ra, Rz, Sa i Sz.

#### 4. WNIOSKI

- 1. Wszystkie próby toczenia precyzyjnego czystego tytanu ostrzem z polikrystalicznego diamentu, pod kątem uzyskania wymiaru obróbkowego, powiodły się.
- 2. Wzrost głębokości skrawania  $a_p$  powoduje wyraźny wzrost wartości poszczególnych składowych całkowitej siły skrawania  $F_c$ ,  $F_p$ ,  $F_f$ . Natomiast wpływ prędkości skrawania  $v_c$  na wartości poszczególnych składowych całkowitej siły skrawania  $F_c$ ,  $F_p$ ,  $F_f$  nie jest jednoznaczny.
- 3. Wzrost głębokości skrawania  $a_p$  i prędkości skrawania  $v_c$  powoduje wzrost wartości poszczególnych parametrów chropowatości Ra, Rz, Sa i Sz.
- 4. Najlepszą jakość powierzchni obrobionej podczas toczenia precyzyjnego czystego tytanu ostrzem z polikrystalicznego diamentu uzyskano dla  $v_c=100$ m/min, f = 0,036 mm/obr i  $a_p = 0,01$ mm.

#### LITERATURA

- [1] BYLICA A., SIENIAWSKI J., 1985, *Tytan i jego stopy*, PWN, Warszawa.
- BHAUMIK S. K., DIVAKAR C., SINGH A. K., 1995, Machining Ti-6Al-4V alloy with a wBN-cBN composite tool, Material& Design, 16/4, 221-226.
- [3] CISZEWSKI A., RADOMSKI A., 1968, Obróbka oraz łączenie tytanu i jego stopów, WNT, Warszawa.

- [4] CHE-HARON C.H., JAWAID A., 2005, *The effect of machining on surface integrity of titanium alloy Ti–6% Al–* 4% V, Journal of Materials Processing Technology, 166, 188–192.
- [5] CHE-HARON C.H., 2001, *Tool life and surface integrity in turning titanium alloy*, Journal of Materials Processing Technology, 118, 231-237.
- [6] CHOMSAMUTR K., JONGPRASITHPORN S., 2012, Optimization Parameters of tool life Model Using the Taguchi Approach and Response Surface Methodology, IJCSI International Journal of Computer Science Issues, 9, 1/3, 120-125.
- [7] EZUGWU E.O., RDA SILVA.B., BONNEY J., MACHADO A.R., 2005, Evaluation of the performance of CBN tools when turning Ti–6Al–4V alloy with high pressure coolant supplies, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 45, 1009–1014.
- [8] EZUGWU E.O., BONNEY J., YAMANE Y., 2003, An overview of the machinability of aeroengine alloys, Journal of Materials Processing Technology, 134, 233-253.
- [9] EZUGWU E.O., WANG Z.M., 1997, *Titanium alloys and their machinability a review*, V, Journal of Materials Processing Technology, 68, 262-274.
- [10] EZUGWU E.O., BONNEY J., ROSEMAR DA SILVAB B., CAKIR O., 2007, Surface integrity of finished turned Ti-6Al-4V alloy with PCD tools using conventional and high pressure coolant supplies, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 47, 884–891.
- [11] GAWLIK J., ZĘBALA W., 2005, Kształtowanie jakości wyrobów w obróbce precyzyjnej. Mechanik, 12/2011.
- [12] GRZESIK W., A survey of current knowladge on machining titanium and ist alloys, The 5th International Scientific Conference Development of Metal Cutting, 21-26.
- [13] KRUSZCZYŃSKI B., STACHURSKI W., ZGÓRNIAK P., 2010, Wpływ warunków obróbki podczas toczenia ostrzami typu Wiper na jakość powierzchni obrobionej i siły skrawania, Inżynieria Maszyn, 15/4, 7-20.
- [14] KURAM E., SIMSEK B. T., OZCELIK B., DEMIRBAS E., ASKIN S., 2010, Optimization of the Cutting Fluids and Parameters Using Taguchi and ANOVA in Milling, Proceedings S. of the World Congress on Engineering, II, WCE, June 30 - July 2, 2010, London, U.K.
- [15] KOLAHANI F., MANOOCHEHRI M., HOSSEINI A., 2011, Application of Taguchi Method and ANOVA Analysis for Simultaneous Optimization of Machining Parameters and Tool Geometry in Turning, World Academy of Science, Engineering and Technology, 74, 82-85.
- [16] MANTLE A.L., ASPINWALL D.K., 1997, Surface integrity and fatigue life of turned gamma titanium aluminide, Journal of Materials Processing Technology 72/3, 413-420.
- [17] MOTORCU A. R., 2010, The Optimization of Machining Parameters Using the Taguchi Method for Surface Roughness of AISI 8660 Hardened Alloy Steel, Journal of Mechanical Engineering, 56/6, 391-401.
- [18] NIKOS TSOURVELOUDIS C., 2010, Predictive Modeling of the Ti-6Al-4V alloy Surface Roughness, J Intell Robot Syst, 60, 513-530.
- [19] CHAUVY P.F., MADORE C., LANDOLT D., 1998, Variable length scale analysis of surface topography: characterization of titanium surfaces for biomedical applications, Surface and Coatings Technology, 110, 48–56.
- [20] RIBEIRO M.V., MOREIRA M.R.V, FERREIRA J.R., 2002, Optimization of titanium alloy (6Al-4V) machining, Journal of Materials Processing Technology, 1430144, 458-463.
- [21] RAMA R.S., PADMANABHAN G., 2012, Application of Taguchi methods and ANOVA in optimization of process parameters for metal removal rate in electrochemical machining of Al/5%SiC composites. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), 2/3, 192-197.
- [22] RAMESH S., KARUNAMOORTHY L., PALANIKUMAR K., 2012, Measurement and analysis of surface roughness in turning of aerospace titanium alloy (gr5), Measurement, 45, 1266-1276.
- [23] RUSZAJ A., SKOCZYPIEC S., WYSZYŃSKI D., LIPIEC P., 2011, Wybrane aspekty stosowania mikro i nanotechnologii w procesach wytwarzania, Inżynieria Maszyn, 16/4, 7-18.
- [24] ZAREENA A.R., VELDHUIS S.C., 2012, Tool wear mechanisms and tool life enhancement in ultra-precision machining of titanium, Journal of Materials Processing Technology, 212, 560-570.

# MEASUREMENTS OF CUTTING FORCES AND SURFACE ROUGHNESS WHEN PRECISION TURNING OF PURE TITANIUM

The article presents the results measurements of cutting forces and roughness parameters when precision turning pure titanium (GRADE 2) of polycrystalline diamond PCD. Turning carried out in an air atmosphere. The following testing equipments were prepared: cutting force dynamometer with amplifier and measuring device for machined surface quality parameters (roughness) determination. Experimental studies were carried out using the Taguchi method. The

machining parameters (cutting speed  $\underline{v}_c$  and depth of cut  $\underline{a}_p$ ) were considered as input parameters. The surface roughness and cutting forces were selected as process output measure of performance. During the real cutting tests the following ranges of cutting parameters were applied: cutting speed: 50 - 150m/min depth of cut: 0.01 - 0.1mm and feed was constant f = 0.036mm/rev. The results of the researches are presented in the form of charts and contour maps.