

MAŁGORZATA KOWALCZYK*

ANALIZA WSPÓŁCZYNNIKA SPĘCZANIA WIÓRA
W ASPEKCIE TOCZENIA STOPU TI-6AL-4V
Z PODWYŻSZONYMI PRĘDKOŚCIAMI SKRAWANIA

THEN CHIP COMPRESSION RATIO ANALYSIS IN
THE ASPECT OF TI-6AL-4V ALLOY TURNING WITH
ELEVATED CUTTING SPEEDS

Streszczenie

Artykuł zawiera badania wpływu współczynnika spęczania wióra Λ_h na wybrane parametry chropowatości 3D (Sa, Sq, Sz, Sp, Sv) stopu tytanu Ti-6Al-4V podczas toczenia ostrzem o określonej geometrii z polikrystalicznego diamentu i węglików spiekanych z podwyższonymi prędkościami w warunkach obróbki na sucho.

Słowa kluczowe: chropowatość powierzchni, stopy tytanu, współczynnik spęczania wióra

Abstract

This paper contains results of researches in which identify of influence of chip compression ratio Λ_h on surface roughness (Sa, Sq, Sz, Sp, Sv) of titanium alloy Ti-6Al-4V for the specific geometry of the cutting edge of polycrystalline diamond and carbide insert. The objective of the research and analysis was to for high speed cutting and dry machined.

Keywords: surface roughness 3D, titanium alloys, chip compression ratio

* Dr inż. Małgorzata Kowalczyk, Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

Oznaczenia

a_p	–	głębokość skrawania [mm]
c	–	ciepło właściwe [J/(kg · K)]
h	–	grubość warstwy skrawanej [mm]
E	–	moduł Younga [MPa]
f	–	posuw [mm/obr.]
G	–	moduł sprężystości postaciowej [GPa]
h_{ch}	–	grubość wióra [mm]
R_m	–	wytrzymałość doraźna na rozciąganie [MPa]
R_e	–	granica plastyczności na rozciąganie [MPa]
r_e	–	promień naroża [mm]
Sa	–	średnia arytmetyczna rzędnych powierzchni [μm]
Sq	–	średnie kwadratowe odchylenie powierzchni [μm]
Sz	–	wysokość nierówności powierzchni wg 10 wzniesień (szczytów) [μm]
Sp	–	maksymalna wysokość wzniesienia powierzchni [μm]
Sv	–	maksymalna głębokość wgłębienia powierzchni [μm]
Ssk	–	współczynnik asymetrii (skośności)
Sku	–	współczynnik skupienia
t_t	–	temperatura topnienia [$^{\circ}\text{C}$, K]
v_c	–	prędkość skrawania [m/s, m/min]
v_{ch}	–	prędkość spływającego wióra [m/s, m/min]
λ	–	współczynnik przewodzenia ciepła [W/(m · K)]
Λ_h	–	współczynnik spęczenia (zgrubienia) wióra
α_n	–	kąt przyłożenia normalny [deg]
β_n	–	kąt ostrza normalny [deg]
λ_s	–	kąt pochylenia krawędzi skrawającej [deg]
γ_n	–	kąt natarcia normalny [deg]
κ_r	–	kąt przystawienia [deg]
κ_r'	–	pomocniczy kąt przystawienia [deg]
Φ	–	kąt ścinania [deg]
ρ	–	gęstość [g/cm^3]
ν	–	stała Poissona

1. Wstęp

Współcześnie najczęściej stosowaną technologią kształtowania części, a tym samym konstruowania struktury geometrycznej powierzchni (SGP), jest obróbka skrawaniem. Współczesne procesy obróbki ubytkowej, a zwłaszcza 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 trudnoobrabialnych materiałów, takich jak stopy tytanu, stopy niklu, ceramika specjalna itp., zachodzi potrzeba poszukiwania coraz to efektywniejszych metod obróbki przekraczających bariery technologiczne [6–10, 12, 17, 25].

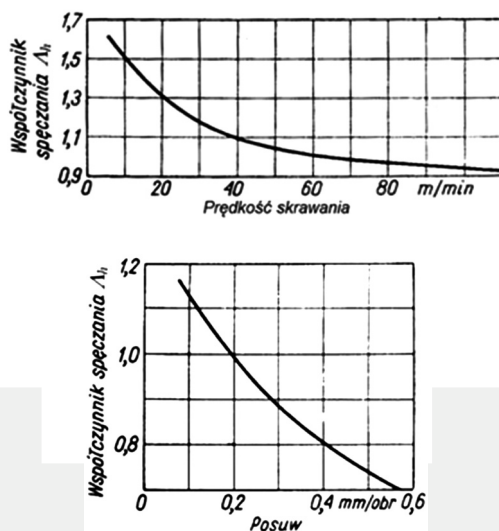
Tytan i jego stopy spełniają ważną rolę przede wszystkim w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym, medycznym i kosmicznym [1, 8–10, 12, 19, 22]. Cechują się znakomitą odpornością na korozję, dużym stosunkiem wytrzymałości do gęstości i kompatybilnością ze strukturami kompozytowymi [2, 4, 5, 15, 19]. Jednak możliwości zastosowania tytanu w technice medycznej, jak i w produkcji wielu 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. 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: dużą reaktywnością chemiczną z większością materiałów narzędziowych, termoplastyczną niestabilnością podczas obróbki, niskim modułem sprężystości oraz tendencją do tworzenia narostu podczas skrawania, co sprzyja wykruszaniu się ostrza narzędzia. Podczas obróbki tytanu i jego stopów występuje również skłonność przylepiania się tworzonego wióra do narzędzia. Niekorzystną cechą jest to, że w czasie procesu skrawania stopów tytanu występuje zjawisko ich umacniania się, powstające w następstwie oddziaływania narzędzia na obrabiany materiał, co wywołuje problemy podczas kolejnych zabiegów obróbkowych [2, 11, 13, 19, 22].

Obecnie, aby zminimalizować problemy związane ze skrawaniem tytanu i jego stopów, stosuje się prędkości skrawania dla ostrzy z węglików spiekanych mniejsze niż 60 m/min. Zaleca się jednocześnie stosowanie dużych posuwów dla ostrzy z węglików spiekanych w granicach $f = 0,2\text{--}0,5$ mm/obr. Stosuje się przy tym obfite chłodzenie i smarowanie ostrza w celu efektywnego przejmowania ciepła, zmniejszenia sił skrawania i splukiwania wiórów, co znacznie wydłuża trwałość narzędzia [2, 11, 13, 19, 22].

Z uwagi na konieczność ograniczenia i optymalizację kosztów produkcji wysiłki badawcze są skierowane w stronę procesów kształtowania części z tytanu metodami zapewniającymi maksymalną efektywność przy zachowaniu żądanej SGP (np. obróbka HSC, HPC) [22, 25].

Cechą charakterystyczną wyróżniającą skrawalność tytanu w porównaniu ze skrawaniem znanych metali i stopów jest bardzo mały współczynnik spęczania warstwy skrawanej. W przypadku obróbki stali, kiedy spęczanie materiału warstwy skrawanej jest duże, współczynnik spęczania jest znacznie większy od jedności, a więc długość wióra jest znacznie mniejsza od długości warstwy skrawanej. W rezultacie prędkość spływania wióra po powierzchni natarcia narzędzia jest znacznie mniejsza od prędkości skrawania. Natomiast w czasie obróbki tytanu i jego stopów stwierdzono, że spęczanie wióra zachodzi tu w niewielkim stopniu, a nawet w pewnych warunkach skrawania (rys. 1) występuje zjawisko odwrotne – ścienianie wióra ($\Lambda_h < 1$). Prędkość spływania wióra po powierzchni natarcia będzie więc większa od prędkości skrawania [2, 4].

Analiza literatury oraz prac badawczych wykazuje, że zmiany współczynnika spęczania wióra Λ_h podczas skrawania określonych materiałów są podobne do zmian siły i mocy skrawania, współczynników tarcia, chropowatości powierzchni obrobionej, zgniotu oraz naprężeń w warstwie wierzchniej. Zgodnie z tym, w miarę wzrostu współczynnika spęczania wióra, chropowatość powierzchni obrobionej również rośnie.



Rys. 1. Wpływ prędkości skrawania v_c i posuwu f na wielkość współczynnika śpęczenia wióra przy toczeniu stopu tytanu nożami z węglików spiekanych BK4 (geometria ostrza: $\alpha = 12^\circ$, $\gamma = 0^\circ$, $\kappa_r = 45^\circ$, $\kappa_r' = 10^\circ$, $f = 0,2$ mm/obr., $a_p = 1,5$ mm) [4]

Fig. 1. Influence of cutting speed and feed on chip compression ratio Λ_h when titanium alloy machining with sintered carbides tools (cutting geometry: $\alpha = 12^\circ$, $\gamma = 0^\circ$, $\kappa_r = 45^\circ$, $\kappa_r' = 10^\circ$, $f = 0.2$ mm/obr., $a_p = 1.5$ mm) [4]

W artykule określono wpływ współczynnika śpęczenia wióra Λ_h na wybrane parametry chropowatości 3D topografii powierzchni podczas toczenia stopu tytanu Ti-6Al-4V ostrzem o określonej geometrii z polikrystalicznego diamentu i węglików spiekanych z podwyższonymi prędkościami skrawania w warunkach obróbki na sucho.

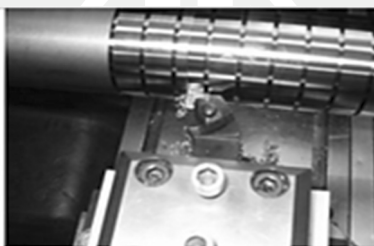
2. Metodyka i zakres badań

Badania doświadczalne przeprowadzono dla operacji toczenia wałka $\phi 58$ mm, wykonanego ze stopu tytanu Ti6Al4V (rys. 2) o składzie chemicznym: 95,62% Ti, 3,97% V, 0,01% Mn, 0,23% Fe, 0,04% Co, 0,01% Ni, 0,01% W, 0,06% Ag, 0,04% Sb. Właściwości fizyczne i mechaniczne zamieszczono w tabeli 1. Toczenie prowadzono na sucho w atmosferze powietrza. Do obróbki zastosowano narzędzia, które opisano w tabeli 2. Do realizacji badań doświadczalnych wybrano plan doświadczalny Hartleya PS/DS.-P:Ha3(hK), $i = 3$, $\alpha = 1,73205$ [26]. O wyborze tego planu doświadczalnego zdecydowały czynniki ekonomiczne.

Tabela 1

Właściwości fizykochemiczne i mechaniczne stopu Ti-6Al-4V

ρ [g/cm ³]	4,43
λ [W/mK]	6,7
t_f [°C]	1650–1660
c [J/gK]	0,5263
ρ [$\mu\Omega$ m]	1,86
R_m [MPa]	950
R_m/ρ	214
R_e [MPa]	880
Twardość	35HRC
Stała Poissona ν	0,342
E [MPa]	113,8
G [GPa]	44



Rys. 2. Fotografie elementów stanowiska badawczego

Fig. 2. Photos of the test

Tabela 2

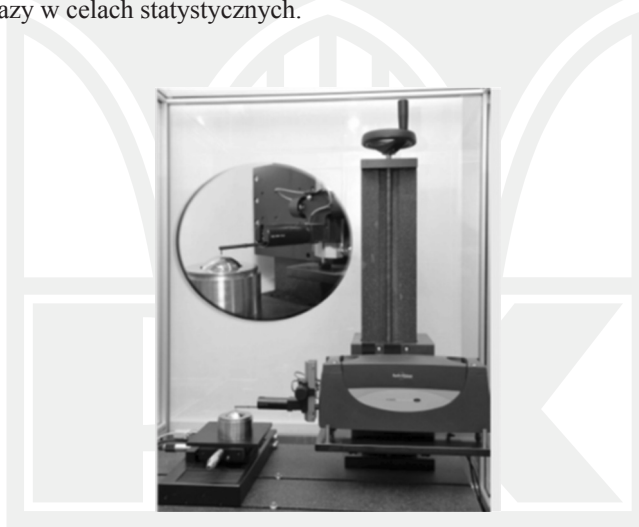
Charakterystyka narzędzi użytych podczas badań

Rodzaj narzędzia	Symbol i geometria	Opis	Zalecane parametry skrawania
Polikrystaliczny diament	PB10 $\alpha_n = 12^\circ$ $\gamma_n = -6^\circ$ $\kappa_r = 95^\circ$	Płytko zamocowana została w oprawce tokarskiej o trzonku kwadratowym. Typ narzędzia: PB10	$v_c = (70-160)$ m/min $f = (0,03-0,21)$ mm/obr. $a_p = (0,1-1,1)$ mm
Płytko skrawające z węglików spiekanych	CNGP 120408 H13A $r_\epsilon = 0,8$ mm $\alpha_n = 11^\circ$ $\gamma_n = 3^\circ$ $\kappa_r = 95^\circ$	Płytko zamocowana została w oprawce tokarskiej o symbolu DCLNR 2525M12.	$v_c = (35-40)$ m/min $f = (0,1-0,25)$ mm/obr. $a_p = (0,2-1,3)$ mm

Parametry skrawania płytką z polikrystalicznego diamentu PB10, które wybrano do badań: $v_c = (70-150)$ m/min; $f_n = (0,1-0,15)$ mm/obr.; $a_p = (0,5-1)$ mm, natomiast płytką z węglików spiekanych CNGP 120408 H13: $v_c = (100-200)$ m/min; $f_n = (0,1-0,15)$ mm/obr.; $a_p = 0,5$ mm.

W celu wykonania badań doświadczalnych zbudowano stanowisko badawcze na bazie tokarki. Zestawiono aparaturę pomiarową: tory do pomiaru parametrów topografii powierzchni obrobionej (chropowatości 3D) oraz współczynnika spęcznienia wióra Λ_h .

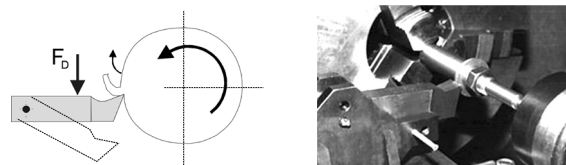
Pomiary chropowatości 3D powierzchni obrobionej ze stopu Ti-6Al-4V przeprowadzono za pomocą systemu pomiarowego firmy Taylor Hobson (rys. 3). Do wizualizacji pomiarów badanych powierzchni wykorzystano program Talymap. W ramach badań wykonano pomiary wybranych parametrów topografii powierzchni w następujących warunkach: długość odcinka elementarnego $l_r = 0,8$ mm, liczba docinków 5, długość odwzorowania $l_i = 4$ mm, liczba zarejestrowanych punktów $N_x = 1000$, krok próbkowania $\Delta x = 1$ μ m, promień zaokrąglenia końcówki pomiarowej $r_{tip} = 2$ μ m, prędkość przesuwu końcówki pomiarowej $v_{os} = 1$ mm/s, rozmiary powierzchni, na których wykonano pomiary topografii 1×1 , liczba przekrojów 100, odstęp wykonywanych pomiarów chropowatości 0,1 mm, zastosowano filtr Gaussa. Pomiary powtórzono 3 razy w celach statystycznych.



Rys. 3. Fotografie stanowiska pomiarowego

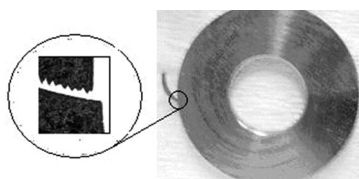
Fig. 3. Photos of measurement set

W celu wyznaczenia współczynnika spęcznienia wióra zastosowano oprzyrządowanie umożliwiające nagłe przerwanie procesu skrawania („zamrożenie” stanu strefy obróbki). Uzyskano próbki materiału obrabianego z zapoczątkowanym wiórem. Ostrze odsunięto od swojego położenia (za pomocą mocnej sprężyny lub ładunku wybuchowego), pozostawiając strefę skrawania z zapoczątkowanym wiórem. Na rys. 4 zaprezentowano widok oprzyrządowania do nagłego wycofania ostrza ze strefy obróbki. Stanowisko to umożliwiała nagłe wycofanie noża ze strefy obróbki i otrzymanie próbek z częściowo uformowanym wiórem – rys. 5. Próbkę do badań wykonano w postaci krążków. Następnie wykonano zgłady metalograficzne, które umożliwiły pomiar wielu parametrów, np.: kątów ścinania, rozmieszczenia stref odkształceń plastycznych oraz grubości wióra.



Rys. 4. Oprzyrządowanie umożliwiające nagłe przerwanie procesu skrawania [16]

Fig. 4. Instrumented to a sudden interruption of the cutting process [16]



Rys. 5. Próbką z uformowanym kształtem wióra

Fig. 5. The sample of the molded shape of the chip

Fotografie wiórów oraz struktury materiału obrabianego w strefie skrawania wykonano za pomocą mikroskopu skaningowego JEOL JSM-5510LV z przystawką EDS.

4. Wyniki badań doświadczalnych

Wyniki pomiarów wartości średnich parametrów chropowatości 3D (Sa , Sq , Sz , Sp , Sv) przedstawiono w tabeli 3 dla obróbki ostrzem z polikrystalicznego diamentu i w tabeli 4 dla płytki z węglików spiekanych.

Tabela 3

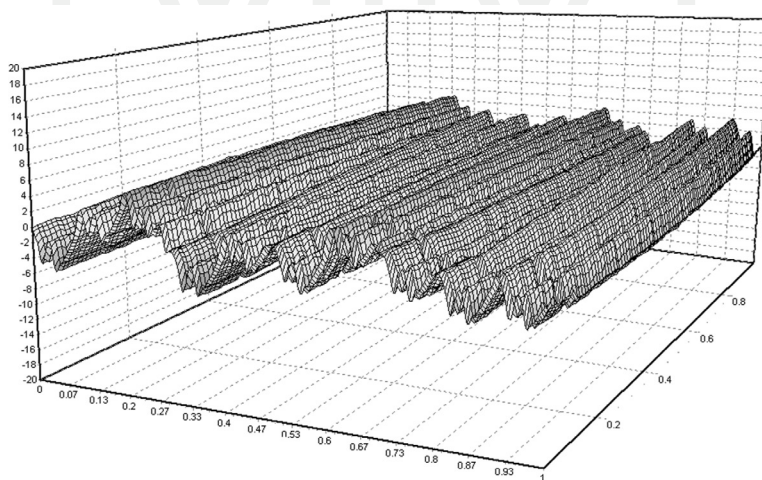
Parametry chropowatości 3D dla obróbki stopu Ti-6Al-4V ostrzem z PKD

Nr	v_c [m/min]	f [mm/obr.]	a_p [mm]	Sa [μm]	Sq [μm]	Sz [μm]	Sv [μm]	Sp [μm]
1	110	0,125	1	1,870	2,283	2,377	5,59	5,66
2	87	0,11	0,89	1,793	2,977	10,59	7,58	7,75
3	133	0,14	0,89	2,470	2,867	12,08	6,37	6,00
4	110	0,125	0,75	2,377	2,800	14,01	7,04	6,97
5	70	0,125	0,75	2,080	2,480	11,61	5,69	5,92
6	150	0,125	0,75	2,270	2,750	12,21	5,26	6,95
7	110	0,1	0,75	1,817	2,213	11,89	5,86	6,03
8	110	0,15	0,75	2,537	3,043	12,23	5,72	6,52
9	133	0,11	0,61	2,040	2,453	11,50	6,73	4,77
10	87	0,14	0,61	2,690	3,173	14,91	7,72	7,20
11	110	0,125	0,5	2,377	2,850	13,65	7,03	6,62

Parametry chropowości 3D dla obróbki stopu Ti-6Al-4V ostrzem z węglików spiekanych

Nr	v_c [m/min]	f [mm/obr.]	a_p [mm]	Sa [μm]	Sq [μm]	Sz [μm]	Sv [μm]	Sp [μm]
1	150	0,08	0,5	0,293	0,348	2,63	0,979	1,65
2	150	0,115	0,5	0,572	0,68	3,52	1,41	2,11
3	150	0,15	0,5	1,02	1,18	4,84	2,21	2,62
4	100	0,08	0,5	0,534	0,609	2,98	1,21	1,78
5	100	0,115	0,5	0,78	0,889	3,7	1,56	2,14
6	100	0,15	0,5	0,771	0,929	2,99	1,46	2,52
7	200	0,08	0,5	0,679	0,759	4,46	1,57	2,89
8	200	0,115	0,5	0,877	1,01	5,25	1,82	3,44
9	200	0,15	0,5	1,09	1,32	9,57	2,99	6,57

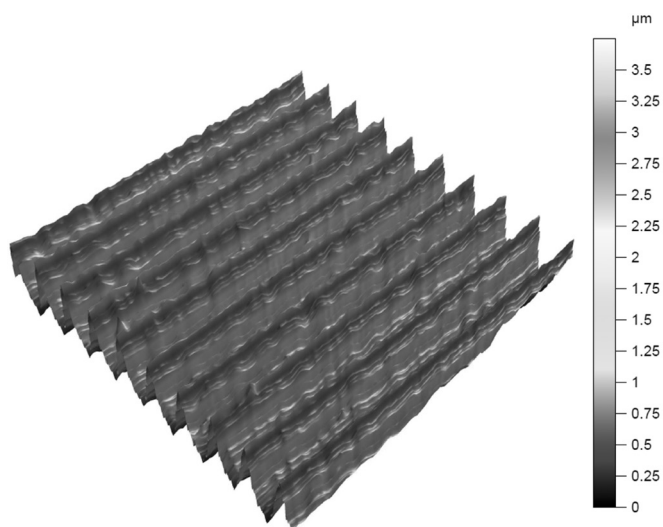
Na rys. 6 przedstawiono topografię powierzchni dla przypadku toczenia z prędkością skrawania $v_c = 110$ m/min, posuwem $f = 0,125$ mm/obr. i głębokością skrawania $a_p = 0,5$ mm ostrzem z polikrystalicznego diamentu PKD.



Rys. 6. Topografia powierzchni: $v_c = 110$ m/min, $f = 0,125$ mm/obr, $a_p = 0,5$ mm, materiał narzędzia: polikrystaliczny diament

Fig. 6. 3D topography: $v_c = 110$ m/min, $f = 0.125$ mm/rev, $a_p = 0.5$ mm, material of tool: polycrystalline diamond

Na rys. 7 przedstawiono topografię powierzchni dla przypadku toczenia z prędkością skrawania $v_c = 100$ m/min, posuwem $f = 0,115$ mm/obr. i głębokością skrawania $a_p = 0,5$ mm ostrzem z węglików spiekanych.



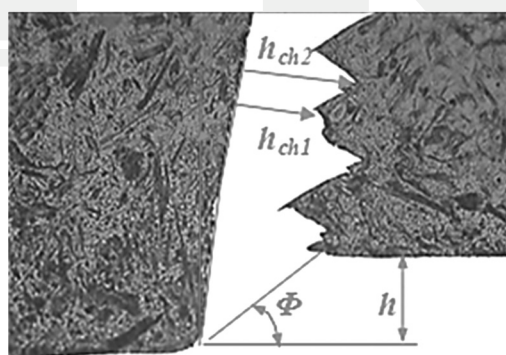
Rys. 7. Topografia powierzchni: $v_c = 100$ m/min, $f = 0,115$ mm/obr., $a_p = 0,5$ mm, materiał narzędzia: węgliki spiekane

Fig. 7. 3D topography: $v_c = 100$ m/min, $f = 0.115$ mm/rev, $a_p = 0.5$ mm, material of tool: carbide insert

Analiza i obserwacja SEM pozwoliła również na uzyskanie danych niezbędnych do określenia wartości wybranych parametrów dekohezji: kąta ścinania Φ , grubości wióra h_{ch} itp. (rys. 8). W tabeli 5 i 6 przedstawiono wybrane dane analityczne uzyskane w wyniku pomiarów i obliczeń.

Współczynnik spęczania (zgrubienia) wióra obliczono, korzystając z zależności:

$$\Lambda_h = \frac{h_{ch}}{h} \quad (1)$$



Rys. 8. Strefa tworzenia się wióra – materiał trawiony – Ti-6Al-4V, $v_c = 70$ m/min; $f = 0,125$ mm/obr.

Fig. 8. Chip formation zone – material ist not digested – Ti-6Al-4V, $v_c = 70$ m/min; $f = 0.125$ mm/rev

Tabela 5

Zestawienie uzyskanych wartości opisujących w sposób geometryczny strefę skrawania dla obróbki stopu Ti-6Al-4V ostrzem z polikrystalicznego diamentu

Nr	h_{ch} [mm]	h [mm]	Λ_h
1	0,221	0,125	1,768
2	0,169	0,11	1,536
3	0,159	0,14	1,136
4	0,198	0,125	1,584
5	0,204	0,125	1,632
6	0,193	0,125	1,544
7	0,321	0,1	3,210
8	0,218	0,15	1,453
9	0,157	0,11	1,427
10	0,209	0,14	1,493
11	0,207	0,125	1,656

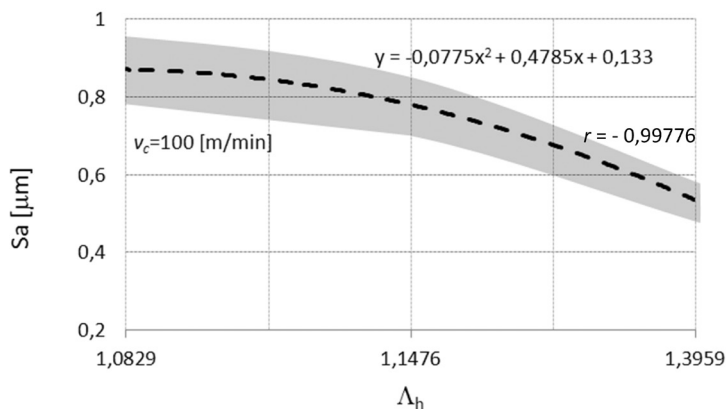
Tabela 6

Zestawienie uzyskanych wartości opisujących w sposób geometryczny strefę skrawania dla obróbki stopu Ti-6Al-4V ostrzem z węglików spiekanych

Nr	h_{ch} [mm]	h [mm]	Λ_h
1	0,11	0,0788	1,3959
2	0,13	0,113275	1,1476
3	0,16	0,14775	1,0829
4	0,11	0,0788	1,3959
5	0,13	0,113275	1,1476
6	0,16	0,14775	1,0829
7	0,11	0,0788	1,3959
8	0,13	0,113275	1,1476
9	0,16	0,14775	1,0829

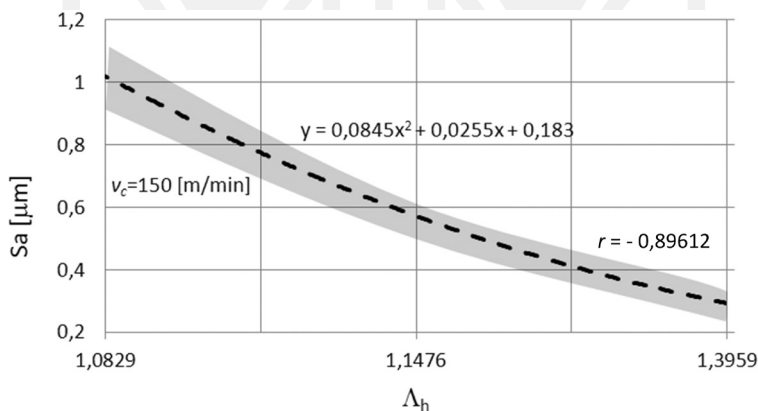
4. Analiza wyników badań doświadczalnych

Na rys. 9–12 przedstawiono wpływ współczynnika spęczenia wióra Λ_h na wartość parametru chropowatości Sa przy zachowaniu stałych wartości poszczególnych parametrów skrawania v_c , a_p dla toczenia stopu Ti-6Al-4V ostrzem z polikrystalicznego diamentu i płytki z węglików spiekanych. Na rys. 13 i 14 pokazano wpływ współczynnika spęczenia wióra Λ_h na wartość innych parametrów chropowatości (Sq , Sz , Sp , Sv) w postaci linii trendów.



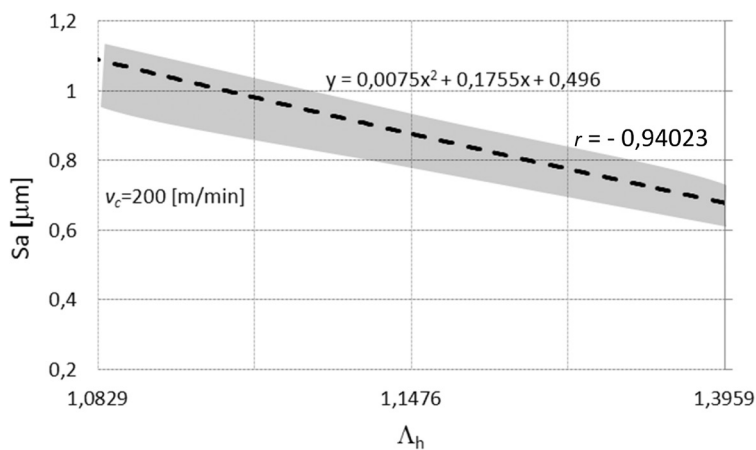
Rys. 9. Wpływ współczynnika spęcznienia wióra Λ_h na parametr chropowatości Sa dla zmiennej wartości posuwu ($v_c = \text{const} = 100$ m/min; $a_p = \text{const} = 0,5$ mm) dla płytki z węglików spiekanych

Fig. 9. Influence of chip compression ratio Λ_h on surface roughness Sa for the variable feed rates ($v_c = \text{const} = 100$ m/min; $a_p = \text{const} = 0.5$ mm) for carbide insert



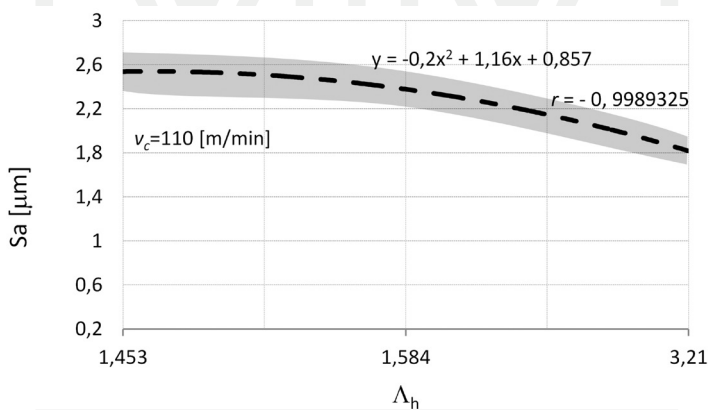
Rys. 10. Wpływ współczynnika spęcznienia wióra Λ_h na parametr chropowatości Sa dla zmiennej wartości posuwu ($v_c = \text{const} = 150$ m/min; $a_p = \text{const} = 0,5$ mm) dla płytki z węglików spiekanych

Fig. 10. Influence of chip compression ratio Λ_h on surface roughness Sa for the variable feed rates ($v_c = \text{const} = 150$ m/min; $a_p = \text{const} = 0.5$ mm) for carbide insert



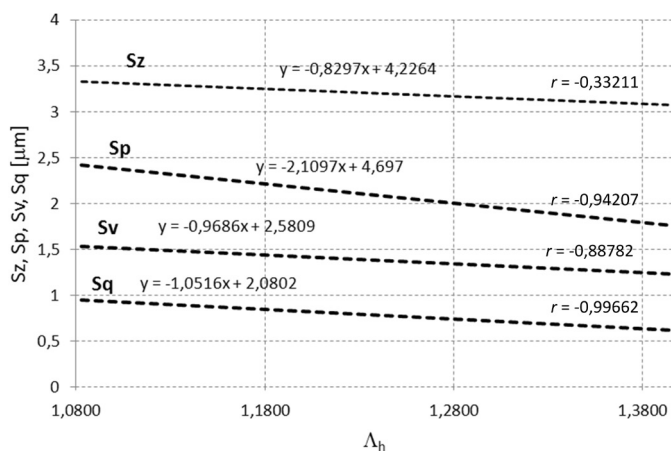
Rys. 11. Wpływ współczynnika spęczania wióra Λ_h na parametr chropowatości Sa dla zmiennej wartości posuwu ($v_c = \text{const} = 200$ m/min; $a_p = \text{const} = 0,5$ mm) dla płytki z węglików spiekanych

Fig. 11. Influence of chip compression ratio Λ_h on surface roughness Sa for the variable feed rates ($v_c = \text{const} = 200$ m/min; $a_p = \text{const} = 0.5$ mm) for carbide insert



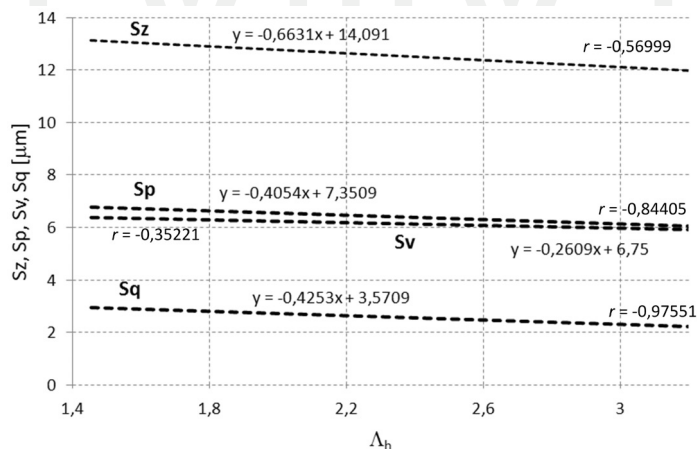
Rys. 12. Wpływ współczynnika spęczania wióra Λ_h na parametr chropowatości Sa dla zmiennej wartości posuwu ($v_c = \text{const} = 110$ m/min; $a_p = \text{const} = 0,75$ mm) dla ostrza z PKD

Fig. 12. Influence of chip compression ratio Λ_h on surface roughness Sa for the variable feed rates ($v_c = \text{const} = 110$ m/min; $a_p = \text{const} = 0.75$ mm) for PCD



Rys. 13. Wpływ współczynnika spęczenia wióra Λ_h na parametry chropowatości Sq , Sz , Sp , Sv dla zmiennej wartości posuwu ($v_c = \text{const} = 100 \text{ m/min}$; $a_p = \text{const} = 0,5 \text{ mm}$) dla płytki z węglików spiekanych

Fig. 13. Influence of chip compression ratio Λ_h on surface roughness Sq , Sz , Sp , Sv for the variable feed rates ($v_c = \text{const} = 100 \text{ m/min}$; $a_p = \text{const} = 0.5 \text{ mm}$) for carbide insert



Rys. 14. Wpływ współczynnika spęczenia wióra Λ_h na parametr chropowatości Sq , Sz , Sp , Sv dla zmiennej wartości posuwu ($v_c = \text{const} = 110 \text{ m/min}$; $a_p = \text{const} = 0,75 \text{ mm}$) dla ostrza z PKD

Fig. 14. Influence of chip compression ratio Λ_h on surface roughness Sq , Sz , Sp , Sv for the variable feed rates ($v_c = \text{const} = 110 \text{ m/min}$; $a_p = \text{const} = 0,75 \text{ mm}$) for PCD

6. Wnioski

Przeprowadzone badania wykazały, że podczas toczenia wykończeniowego stopu tytanu Ti-6Al-4V przy podwyższonych prędkościach skrawania podczas obróbki na sucho:

– ostrzem z polikrystalicznego diamentu w następującym zakresie zmienności parametrów obróbki: prędkość skrawania: $v_c \in (70-150)$ m/min, posuw: $f \in (0,1-0,15)$ mm/obr., głębokość skrawania: $a_p \in (0,5-1)$ mm w miarę wzrostu współczynnika spęczania wióra chropowatość powierzchni obrobionej maleje,

– płytką z węglików spiekanych w następującym zakresie zmienności parametrów obróbki: prędkość skrawania: $v_c \in (100-200)$ m/min, posuw: $f \in (0,1-0,15)$ mm/obr., głębokość skrawania: $a_p = \text{const} = 0,5$ mm w miarę wzrostu współczynnika spęczania wióra chropowatość powierzchni obrobionej maleje.

Literatura

- [1] Aspinwall D. i in., *HSM takes of in the aerospace sector*, Metalwork. Express, 1999, 4-5, 8-9.
- [2] Bylica A., Sieniawski J., *Tytan i jego stopy*, PWN, Warszawa 1985.
- [3] Byrn G., Dornfeld D., Denkena B., *Advancing Cutting Technology*, Annals of the CIRP, vol. 52/2/2003.
- [4] Ciszewski A., Radomski A., *Obróbka oraz łączenie tytanu i jego stopów*, WNT, Warszawa 1968.
- [5] Chauvy P.F., Madore C., Landolt D., *Variable length scale analysis of surface topography: characterization of titanium surfaces for biomedical applications*, Surface and Coatings Technology 110, 1998, 48-56.
- [6] Che-Haron C.H., Jawaid A., *The effect of machining on surface integrity of titanium alloy Ti-6%Al-4%V*, Journal of Materials Processing Technology, 166, 2005, 188-192.
- [7] Che-Haron C.H., *Tool life and surface integrity in turning titanium alloy*, Journal of Materials Processing Technology, 118, 2001, 231-237.
- [8] Esslinger J., *Titanium in Aero Engines MTU Aero Engines*, Munich, Germany.
- [9] Ezugwu E.O., *Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 45, 2005, 1353-1367.
- [10] Ezugwu E.O., Bonney J., Yamane Y., *An overview of the machinability of aeroengine alloys*, Journal of Materials Processing Technology, 134, 2003, 233-253.
- [11] Ezugwu E.O., Wang Z.M., *Titanium alloys and their machinability – a review*, V, Journal of Materials Processing Technology, 68, 1997, 262-274.
- [12] Ezugwu E.O., *Improvements in the machining of aero-engine alloys using self-propelled rotary tooling technique*, Journal of Materials Processing Technology, 185, 2007, 60-71.
- [13] Grzesik W., *A survey of current knowledge on machining titanium and its alloys*, The 5th International Scientific Conference Development of metal cutting, 2005, 21-26.
- [14] Grzesik W., *Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych*, WNT, Warszawa 2010.

- [15] Kaczyński J., *Tytan*, WNT, Warszawa 1976.
- [16] Kadłuczka A., Zębala W., *Some Aspects of the Cutting Zone Areas Identification*, Inżynieria Materiałowa, nr 5, 2011, 419-422.
- [17] Kishawy H.A., Becze C.E., McIntosh D.G., *Tool performance and attainable surface quality during the machining of aerospace alloys using self-propelled rotary tools*, Journal of Materials Processing Technology, 152, 2004, 266–271.
- [18] Kowalczyk M., *Wpływ parametrów skrawania na stan warstwy wierzchniej po toczeniu wykończeniowym stopu Ti-6Al-4V*, praca doktorska, Kraków 2009.
- [19] Melechow R., Tubielewicz K., Błaszczuk W., *Tytan i jego stopy*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004.
- [20] Narutaki N., Yamane Y., *Machining of difficult-to-cut materials*, Int. J. of Japan Soc. Prec. Eng., 1993, t. 27, nr 4, 307-310.
- [21] Oczóś K.E., Lubimov V., *Struktura geometryczna powierzchni*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2003.
- [22] Oczóś K.E., *Zwiększenie efektywności procesów skrawania stopów tytanu*, Mechanik, nr 10/03, 543-550.
- [23] Oczóś K., *Postęp w obróbce skrawaniem. II. Obróbka na sucho i ze zminimalizowanym smarowaniem*, Mechanik nr 5-6/98, 307.
- [24] Oczóś K.E., *Postęp w obróbce skrawaniem. I. Obróbka z dużymi prędkościami (High Speed Machining)*, Mechanik, z. 3, 109-124, 1998.
- [25] Oczóś K., *Rozwój innowacyjnych technologii ubytkowego kształtowania materiałów. Cz. I. Obróbka skrawaniem*, Mechanik, nr 8-9/02, 537.
- [26] Polański Z., *Planowanie doświadczeń w technice*, PWN, Warszawa 1984.

