

Dr inż. Wojciech STACHURSKI, dr inż. Stanisław MIDERA,
dr inż. Dariusz OSTROWSKI (Politechnika Łódzka):

WPLYW PARAMETRÓW SKRAWANIA PODCZAS TOCZENIA LOTNICZEGO STOPU TYTANU Ti-6Al-4V ELI (GRADE 23) NA SIŁY SKRAWANIA ORAZ CHROPOWATOŚĆ POWIERZCHNI OBROBIONEJ

Streszczenie

W artykule zaprezentowano badania dotyczące toczenia stopu tytanu GRADE 23, powszechnie wykorzystywanego m.in. w przemyśle lotniczym. Celem badań było określenie wpływu zmian poszczególnych parametrów skrawania na składowe siły skrawania oraz chropowatość powierzchni obrobionej. Badania przeprowadzono na tokarce numerycznej z wykorzystaniem trzyskładowego siłomierza piezoelektrycznego. Pomiary chropowatości wykonywano za pomocą profilometru stacjonarnego metodą stykową. Na podstawie analizy wyników opisano wpływ zastosowanych parametrów skrawania na parametry mierzone.

Słowa kluczowe: toczenie, stopy tytanu, siły skrawania, chropowatość

INFLUENCE OF CUTTING PARAMETERS DURING TURNING PROCESS OF AEROSPACE INDUSTRY ALLOY Ti-6Al-4V ELI (GRADE 23) ON CUTTING FORCES AND SURFACE ROUGHNESS OF THE WORKPIECE.

Abstract

In the paper investigation concerning turning of titanium alloy GRADE 23 is presented. This type of alloy is commonly used in aviation industry. The main aim of investigation was to determine influence of cutting parameters on component cutting forces and surface roughness of machined surface of the workpiece. Experimental tests have been conducted on CNC lathe with utilization of three component piezoelectric dynamometer. Measurements of surface roughness parameters have been done on stationary profilometer with utilization of contact method. On the base of experimental data analysis the influence of cutting parameters on measured parameters has been described.

Keywords: turning, titanium alloys, cutting forces, surface roughness

WPLYW PARAMETRÓW SKRAWANIA PODCZAS TOCZENIA LOTNICZEGO STOPU TYTANU Ti-6Al-4V ELI (GRADE 23) NA SIŁY SKRAWANIA ORAZ CHROPOWATOŚĆ POWIERZCHNI OBROBIONEJ

Wojciech STACHURSKI¹, Stanisław MIDERA¹, Dariusz OSTROWSKI¹

1. WSTĘP

Obróbka skrawaniem jest najczęściej stosowaną technologią kształtowania materiałów konstrukcyjnych, w tym materiałów trudnoobrabialnych. Do tej grupy materiałowej należy m.in. tytan i stopy tytanu, stosowane głównie w przemyśle lotniczym, medycznym, motoryzacyjnym, morskim i chemicznym [5, 7, 12, 14, 16]. Ten obszar zastosowań wynika z właściwości jakimi charakteryzują się te materiały. Są to: bardzo wysoka odporność na korozję, duża wartość stosunku wytrzymałości do gęstości, odporność na wysoką temperaturę, wysoka wytrzymałość w warunkach obciążeń długotrwałych oraz biogodność [4, 8, 9, 11, 13].

Dużym utrudnieniem w szerokim stosowaniu stopów tytanu są trudności w ich obróbce. Problemy te mają związek z występowaniem wysokich temperatur skrawania i szybkim zużyciem narzędzi skrawających. Dostępne prace z tego zakresu [4, 6, 7, 12, 14] wskazują na główne przyczyny tych trudności, w tym m.in.: mały współczynnik przewodnictwa cieplnego, dużą reaktywność chemiczną z większością materiałów narzędziowych, termoplastyczną niestabilność podczas obróbki, skłonność do przylepiania się wiórów do narzędzia, czy w końcu tendencję do tworzenia narostu, co sprzyja wykruszaniu się ostrza skrawającego.

Poprawę skrawalności stopów tytanu można uzyskać poprzez obniżenie temperatury skrawania. Zalecenia do prowadzenia obróbki stopów tytanu wskazują na konieczność skrawania z małą prędkością skrawania, dużym posuwem i głębokością skrawania (w porównaniu do obróbki stali) przy użyciu bardzo ostrych narzędzi [4]. Dla

¹ Politechnika Łódzka, Instytut Obrabiarek i TBM, 90-924 Łódź, ul. Stefanowskiego 1/15

ostrzy wykonanych z węglików spiekanych zaleca się stosowanie prędkości skrawania poniżej 60 m/min przy posuwach w zakresie 0,2–0,5 mm/obr [12]. Innym zaleceniem, obniżającym niekorzystnie wysoką temperaturę skrawania, jest stosowanie obfitego podawania cieczy obróbkowej. Dostarczanie cieczy obróbkowej z dużym wydatkiem ma za zadanie wydłużenie trwałości narzędzia poprzez zwiększenie ilości przejmowanego ciepła oraz zmniejszenie sił skrawania i poprawę usuwania wiórów ze strefy obróbki [12], [18].

W niniejszym artykule opisano badania mające na celu ustalenie wpływu zmian poszczególnych parametrów skrawania na składowe całkowitej siły skrawania podczas toczenia stopu tytanu Ti-6Al-4V ELI w stanie normalizowanym. Opisano również wpływ parametrów skrawania na chropowatość powierzchni obrobionej.

2. STOP TYTANU Ti-6Al-4V ELI (GRADE 23)

Punktem wyjścia do omówienia stopu Ti-6Al-4V ELI (Grade 23) jest stop Ti-6Al-4V (Grade 5). Jest on najczęściej stosowanym stopem tytanu z grupy stopów dwufazowych $\alpha+\beta$ [3, 8]. Wprowadzenie do stopu aluminium powoduje umocnienie fazy α , zwiększenie stabilności cieplnej fazy β oraz zmniejszenie gęstości stopu [4, 16]. Stop Grade 5 znajduje zastosowanie głównie w przemyśle lotniczym i medycznym. Skład chemiczny Grade 5 przedstawiono w tabeli 1.

Stop Ti-6Al-4V ELI jest stopem tytanu o najwyższej czystości (ELI – extra low interstitial). W porównaniu do Grade 5 posiada niższą zawartość pierwiastków międzywęzłowych żelaza, wodoru i tlenu i wynikającą z tego lepszą odporność korozyjną kosztem wytrzymałości. Warto także pamiętać, że obniżenie udziału procentowego tlenu w stopie powoduje zwiększenie jego plastyczności, a w rezultacie zwiększenie poprzecznego przekroju wióra na skutek polepszenia spęczania. W efekcie tego maleje ciśnienie i temperatura na ostrzu narzędzia, co wydłuża jego trwałość [4].

Właściwości stopu Ti-6Al-4V ELI sprawiają, że jest on powszechnie używany w zastosowaniach lotniczych, kosmicznych i medycznych (np. implanty).

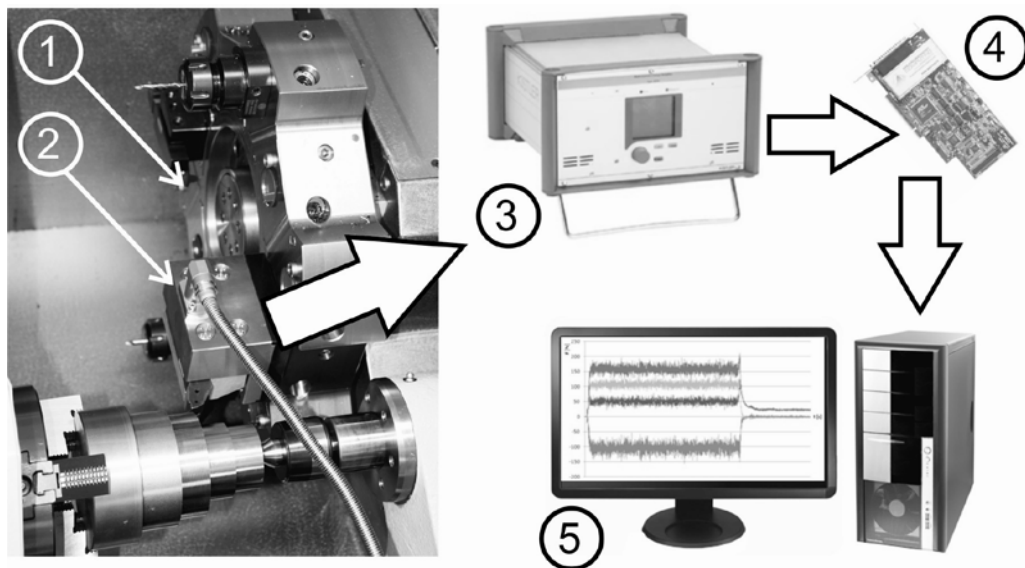
Tabela 1. Składy chemiczne wybranych stopów tytanu [17]

Materiał	Pierwiastek [%]							
	Fe	O	N	C	H	Al	V	Ti
Ti-6Al-4V	max. 0,40	max. 0,20	max. 0,05	max. 0,08	max. 0,015	5,5–6,7	3,5–4,5	reszta
Ti-6Al-4V ELI	max. 0,25	max. 0,13	max. 0,05	max. 0,08	max. 0,012	5,5–6,5	3,5–4,5	reszta

3. WARUNKI BADAŃ

W trakcie badań toczono wzdłużnie próbki wykonane ze stopu tytanu Ti-6Al-4V ELI (Grade 23) w stanie normalizowanym (twardość 25 ± 2 HRC). Jako narzędzia użyto składany nóż tokarski do toczenia zewnętrznego firmy Sandvik, oznaczony wg norm ISO – DCLNR 2020K 12. W układzie narzędzia kąt przystawienia wynosi $\kappa_r = 95^\circ$, kąt przyłożenia $\alpha_o = 5^\circ$, kąt natarcia $\gamma_o = 6^\circ$, kąt pochylenia krawędzi skrawającej $\lambda_s = -6^\circ$. W oprawce mocowano płytki skrawające do obróbki zgrubnej - CNMG 12 04 08–SM. Są one wykonane z węglików spiekanych H13A z obszaru zastosowania S10–S30. Według danych firmy Sandvik [18] gatunek ten posiada wysoką odporność na zużycie ściernie i udatność, zwłaszcza przy toczeniu średnim i zgrubnym stali żaroodpornych i stopów tytanu. Płytki nie posiadają pokryć przeciwzużyciowych.

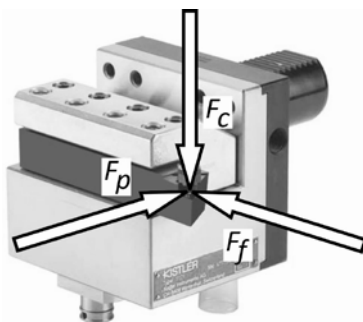
W skład stanowiska do toczenia przedstawionego na rys. 1 wchodzi tokarka numeryczna SL-10 firmy Haas z narzędziową głowicą rewolwerową (1), trójskładowy siłomierz piezoelektryczny Kistler 9121 (2), wzmacniacz Kistler 5070 (3), karta pomiarowa Kistler 2855A4 (4) wraz z komputerem (5) i oprogramowaniem [19].



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego przy toczeniu tytanu: 1) tokarka Haas SL-10 - głowica rewolwerowa, 2) siłomierz trójskładowy Kistler 9121, 3) wzmacniacz Kistler 5070, 4) karta pomiarowa Kistler 2855A4, 5) komputer z oprogramowaniem.

W trakcie obróbki układ pomiarowy rejestrował wartości trzech składowych całkowitej siły skrawania F powstających podczas toczenia: siły skrawania F_c , siły odporowej F_p i siły posuwowej F_f (rys. 2).

Badania realizowano dla zestawów parametrów skrawania przedstawionych w tabeli 2. Parametry zostały wybrane na podstawie danych producenta [18]. Jako ciecz obróbkową zastosowano emulsję Blasocut firmy Blaser Swisslube dostarczaną w strefę skrawania z wydatkiem 5 l/min.



Rys. 2. Składowe całkowitej siły skrawania F działające na nóż tokarski mocowany w trójskładowym siłomierzu piezoelektrycznym Kistler 9121

Tabela 2. Parametry skrawania użyte w badaniach toczenia stopu tytanu Ti-6Al-4V ELI

Prędkość skrawania: $v_{c1} = 25$ m/min; $v_{c2} = 35$ m/min; $v_{c3} = 40$ m/min
Posuw: $f_1 = 0,1$ mm/obr; $f_2 = 0,25$ mm/obr; $f_3 = 0,35$ mm/obr
Głębokość skrawania: $a_p = 0,5$ mm

Nr próby	Parametry	Nr próby	Parametry	Nr próby	Parametry
1	v_{c1} f_1 a_p	4	v_{c2} f_1 a_p	7	v_{c3} f_1 a_p
2	v_{c1} f_2 a_p	5	v_{c2} f_2 a_p	8	v_{c3} f_2 a_p
3	v_{c1} f_3 a_p	6	v_{c2} f_3 a_p	9	v_{c3} f_3 a_p

Do pomiaru chropowatości powierzchni zastosowano profilografometr T8000 firmy Hommel Werke (rys. 3). Jako wartość chropowatości dla każdej próbki brano uśrednioną wartość z trzech pomiarów. Do analizy chropowatości wybrano parametr Ra , powszechnie stosowany do opisu chropowatości w warunkach przemysłowych [1].



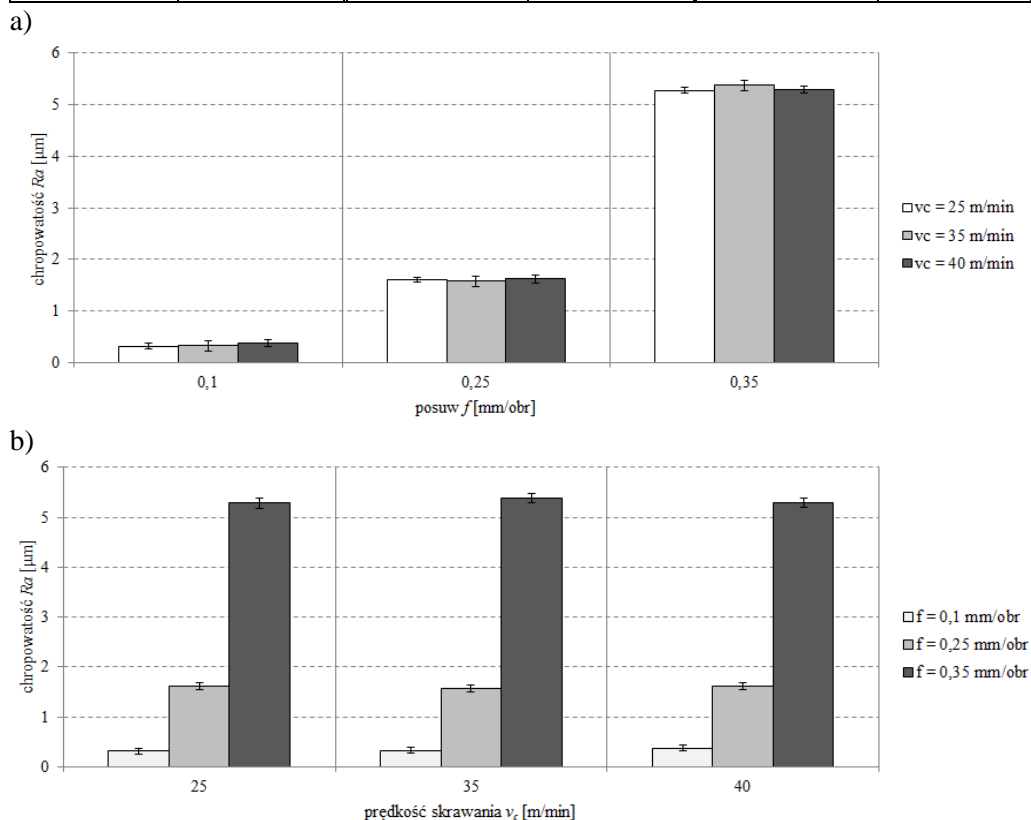
Rys. 3. Profilografometr T8000 firmy Hommel Werke.

4. WYNIKI POMIARÓW CHROPOWATOŚCI

Wyniki pomiarów chropowatości Ra zestawiono w tabeli 3 i pokazano na rys. 4.

Tabela 3. Wyniki pomiarów chropowatości – parametr Ra

Nr próby	Ra [μm]	Nr próby	Ra [μm]	Nr próby	Ra [μm]
1	0,32	4	0,33	7	0,38
2	1,61	5	1,58	8	1,62
3	5,28	6	5,38	9	5,29



Rys. 4. Zmiany chropowatości Ra : a) dla stałych posuwów, b) dla stałych prędkości skrawania.

Na podstawie prezentowanych powyżej wyników można stwierdzić, że dla badanego zakresu parametrów skrawania zmiana prędkości skrawania v_c , przy stałym posuwie f , nie powodowała znaczących zmian wartości chropowatości Ra (rys. 4a). Dla prób 1, 4 i 7 ($f=0,1$ mm/obr) różnica pomiędzy skrajnymi wartościami Ra wynosi ok.

19%. Analogicznie dla prób 2, 5 i 8 ($f=0,25$ mm/obr) różnica ta wynosi 2,5%, zaś dla prób 3, 6 i 9 ($f=0,35$ mm/obr) jest to ok. 2%.

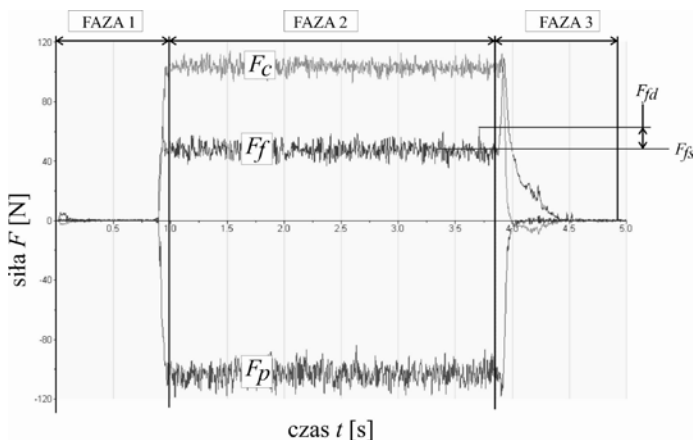
Zwiększanie posuwu f , przy stałej prędkości skrawania v_c , powoduje natomiast znaczący wzrost wartości chropowatości Ra dla wszystkich przypadków (rys. 4b). Różnice te są dla poszczególnych prędkości podobne. I tak, wartości parametru Ra dla $f=0,25$ mm/obr są ok. 5-krotnie większe od wartości parametru Ra dla posuwu 0,1 mm/obr, zaś wartości parametru Ra dla $f=0,35$ mm/obr są ok. 3-krotnie większe od wartości parametru Ra dla posuwu 0,25 mm/obr. Należy zwrócić uwagę na bardzo dużą różnicę pomiędzy wartościami Ra dla skrajnych posuwów, wynoszącą ok. 1400–1650%.

Powyższe obserwacje potwierdzają także inne badania [2].

5. WYNIKI POMIARÓW SIŁ SKRAWANIA

Na rys. 5 przedstawiono przykładowy wykres składowych całkowitej siły skrawania F podczas toczenia. W przebiegu sił można wyróżnić trzy fazy: FAZA 1 – narastanie sił podczas wchodzenia w materiał, FAZA 2 – stabilizacja sił (średnia wartość w przybliżeniu stała) podczas skrawania w pełnym materiale i FAZA 3 – opadanie sił w czasie zatrzymania posuwu i wychodzenia narzędzia.

Na przykładzie przebiegu składowej F_f można zaobserwować, że obok stałej w przybliżeniu składowej F_{fs} zawsze występuje większa lub mniejsza składowa przypadkowo zmienna (szum) F_{fd} . Wynika ona z nieciągłego charakteru odkształceń w strefie ścinania oraz tworzenia się wióra. Jej amplituda może osiągać kilkadziesiąt procent składowej stałej [10].



Rys. 5. Przykładowy przebieg składowych sił skrawania.

Wyniki pomiarów sił skrawania zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Wyniki pomiarów składowych sił skrawania

Siła [N]	Nr próby								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
F_p	73	105	163	85	107	151	81	107	143
F_f	51	68	88	59	69	84	55	69	83
F_c	117	235	412	123	236	402	122	237	398
F	147	266	451	160	268	438	156	269	431

Na podstawie powyższych wyników badań można stwierdzić, że dla badanego zakresu parametrów skrawania, zwiększanie posuwu f przy stałej prędkości skrawania v_c powoduje wzrost całkowitej siły skrawania F i jej składowych F_f , F_p i F_c . Różnice te są dla poszczególnych prędkości podobne. I tak, wartości siły skrawania F dla $f=0,25$ mm/obr są większe o ok. 74% od wartości F dla posuwu 0,1 mm/obr, zaś wartości F dla $f=0,35$ mm/obr są większe o ok. 64% od wartości F dla posuwu 0,25 mm/obr. Różnica między wartościami F dla skrajnych posuwów wynosi 86%.

Powyższe obserwacje potwierdzają także inne badania [15].

5. WNIOSKI

Na podstawie prezentowanych powyżej wyników można stwierdzić, że w zakresie parametrów skrawania zalecanych przez producenta płytki skrawającej:

- 1) Zmiana prędkości skrawania v_c , przy stałym posuwie f , nie powoduje znaczących zmian wartości chropowatości Ra .
- 2) Zwiększenie posuwu f , przy stałej prędkości skrawania v_c , powoduje znaczący (nawet ok. 16-krotny) wzrost wartości chropowatości Ra dla wszystkich warunków obróbki.
- 3) Najmniejsze wartości Ra uzyskano przy zastosowaniu najmniejszej prędkości skrawania i najmniejszego posuwu (próba 1). Warto zauważyć jednak, że dla pozostałych dwóch prędkości skrawania zastosowanie najmniejszego posuwu również zapewnia uzyskanie podobnej wartości Ra (próba 4 i 7).
- 4) Zastosowanie głębokości skrawania a_p z dolnego zakresu zalecanego przez producenta płytki skrawającej zapewnia uzyskanie chropowatości powierzchni Ra w granicach 0,32–038 μm (próba 1, 4, 7). Fakt ten, umożliwia zastosowanie płytek do obróbki zgrubnej jako płytek do obróbki wykończeniowej.
- 5) Powyższy wniosek powinien być zweryfikowany badaniami umożliwiającymi określenie chropowatości powierzchni obrobionej w całym okresie trwałości płytki ostrzowej.

LITERATURA

- [1] ADAMCZAK S., *Pomiary geometryczne powierzchni. Zarysy kształtu, falistość i chropowatość*, Warszawa, WNT, 2008.
- [2] ANDRZEJCZAK M., *Influence of cutting parameters on surface roughness in turning aerospace titanium alloys*. Praca magisterska w Instytucie Obrabiarek i TBM, kierujący pracą: prof. dr hab. inż. Bogdan Kruszyński i dr inż. Wojciech Stachurski, Łódź, 2014.
- [3] ARRAZOLA P.-J., GARAY A., IRIARTE L.-M., ARMENDIA M., *Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555.3)*. W: Journal of materials processing technology, 209, 2009, 2223-2230.
- [4] BYLICA A., SIENIAWSKI J., *Tytan i jego stopy*, Warszawa, PWN, 1987.
- [5] EZUGWU E.O., BONNEY J., YAMANE Y., *An overview of the machinability of aeroengine alloys*. W: Journal of materials processing technology, vol. 134, issue 2, 2003, 233-253.
- [6] EZUGWU E.O., BONNEY J., DA SILVA R.B., CAKIR O., *Surface integrity of finished turned Ti-6Al-4V alloy with PCD tools using conventional and high pressure coolant supplies*. W: International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47, 2007, 884-891.
- [7] EZUGWU E.O., WANG Z.M.Y., *Titanium alloys and their machinability-a review*. W: Journal of materials processing technology, 68, 1997, 262-274.
- [8] GRZESIK W., *Advanced machining processes of metallic materials-Theory, modelling and applications*, Elsevier, 2008.
- [9] JASTRZĘBSKI T., *Stopy tytanu w konstrukcjach oceanotechnicznych*. W: Zeszyty Naukowe – Mechanika, Wydawnictwo Politechniki Opolskiej, z. 58, 1999, 43-54.
- [10] JEMIELNIAK K., *Obróbka skrawaniem*, Warszawa, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 1998.
- [11] KADŁUCZKA A., MAZUR M., *Mechanika korozji dwufazowego stopu tytanu w środowisku HCl*. W: Czasopismo techniczne – Mechanika, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, zeszyt 6, rok 106, 2009, 59-66.
- [12] KOWALCZYK M., *Analiza współczynnika śpękania wióra w aspekcie toczenia stopu Ti-6Al-4V z podwyższonymi prędkościami skrawania*. W: Czasopismo techniczne – Mechanika, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, zeszyt 22, rok 109, 2012, 55-69.
- [13] KOWALCZYK M., *Pomiar składowych sił skrawania i chropowatości powierzchni podczas precyzyjnego toczenia czystego tytanu*. W: Inżynieria Maszyn, R. 18, z. 4, 2013, 55-71.
- [14] NAROJCZYK J., MOROZ D., SIEMIĄTKOWSKI Z., *Obróbka stopu tytanu Ti-6Al-4V narzędziami implantowanymi*. W: Mechanik, nr 3, 2015, 359-362.
- [15] TARKOWSKI M., *Investigations of cutting forces in turning of difficult to machine aerospace alloys*. Praca magisterska w Instytucie Obrabiarek i TBM, kierujący pracą: prof. dr hab. inż. Bogdan Kruszyński i dr inż. Wojciech Stachurski, Łódź, 2014.
- [16] WALCZAK M., WAŚKOWICZ M., BIENIAŚ J., *Charakterystyka mikrostrukturalna wybranych materiałów tytanowych stosowanych w protetyce stomatologicznej*. W: Eksploatacja i Niezawodność, nr 2, 2003, 70-74.
- [17] www.bibusmetals.ch (20.05.2015)
- [18] www.sandvik.pl (20.05.2015)
- [19] www.kistler.com (20.05.2015)