

Dr inż. Mariusz KLONICA,  
prof. dr hab. inż. Józef KUCZMASZEWSKI (Politechnika Lubelska):

## **BADANIA PORÓWNAWCZE STANU ENERGETYCZNEGO WARSTWY WIERZCHNIEJ STOPÓW ALUMINIUM PO OBRÓBCE FREZOWANIEM**

### Streszczenie

W pracy porównano wartości swobodnej energii powierzchniowej (SEP) stopów aluminium po obróbce konwencjonalnej, w której przyjęto prędkość skrawania na poziomie 200 m/min, oraz po obróbce HSC, dla której przyjęto wartość prędkości skrawania na poziomie 1200 m/min. Na stan energetyczny wpływa wiele czynników – zarówno geometrycznych, jak i fizykochemicznych. Jednym z ważniejszych jest topografia powierzchni, konstytuowana w operacjach obróbki mechanicznej. Pracę zakończono wnioskami.

**Słowa kluczowe:** *frezowanie, swobodna energia powierzchniowa SEP, stopy aluminium, warstwa wierzchnia*

## **A COMPARATIVE STUDY OF THE ENERGY STATE OF THE SURFACE LAYER OF ALUMINIUM ALLOYS AFTER MILLING TREATMENT**

### Abstract

The study compares the values of surface free energy (SFE) of aluminium alloys after conventional treatment in which cutting speed was assumed at the level of 200 m/min, and after HSC machining for which the cutting speed value was assumed at the level of 1200 m/min. The energy state is impacted by many factors – both geometrical and physico-chemical. The major ones include surface topography, constituted in the machining operations. The study has been completed with conclusions.

**Keywords:** *milling, surface free energy SFE, aluminium alloys, surface layer*

# **BADANIA PORÓWNAWCZE STANU ENERGETYCZNEGO WARSTWY WIERZCHNIEJ STOPÓW ALUMINIUM PO OBRÓBCE FREZOWANIEM**

Mariusz KLONICA<sup>1</sup>, Józef KUCZMASZEWSKI<sup>1</sup>

## **1. WPROWADZENIE**

Obróbka frezowaniem coraz częściej jest obróbką ostateczną, o charakterze także wykończeniowym. Jest to efektem przede wszystkim rozwoju nowoczesnych maszyn technologicznych i narzędzi. Możliwość obróbki z relatywnie wysokimi prędkościami skrawania oraz niewielkimi posuwami na ostrze sprawia, że jakość powierzchni po obróbce frezowaniem niektórych materiałów jest porównywalna z jakością powierzchni po obróbce ścierniej [1, 3-6, 10]. Nie znaczy to, że także stan energetyczny powierzchni, a właściwie warstwy wierzchniej po frezowaniu, jest taki sam jak po obróbce ścierniej [2, 7-9]. Taki wniosek jest nieuprawniony, specyficzne cechy nierówności, na poziomie mikrogeometrycznym, ważne z punktu widzenia kształtowania stanu energetycznego, istotnie się różnią dla tych sposobów obróbki. Także sam proces frezowania [11-15], w zależności od warunków w jakich jest prowadzony, może istotnie zmieniać stan energetyczny warstwy wierzchniej obrabianych elementów.

W pracy podjęto problem oceny stanu energetycznego powierzchni dwóch, istotnie różniących się właściwościami stopów aluminium, to jest stopu odlewniczego Al-Si10Mg oraz stopu do obróbki plastycznej AW 7075 T651, po obróbce z prędkością skrawania 200 m/min, a więc z prędkością uważaną za typową dla obróbki konwencjonalnej, oraz dla prędkości skrawania 1200 m/min, czyli już dla zakresu HSC. Z fizyko-chemicznego punktu widzenia energia powierzchniowa dotyczy raczej warstwy wierzchniej a nie powierzchni, gdyż na jej wartość składa się oddziaływanie co najmniej kilka warstw atomowych. Struktura geometryczna

---

<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: m.klonica@pollub.pl, j.kuczmaszewski@pollub.pl

ma istotny związek z wartością swobodnej energii powierzchniowej. Dotyczy to takich parametrów chropowatości powierzchni jak:  $S_q$ ,  $S_p$ ,  $S_v$ ,  $S_z$ ,  $S_a$ ,  $S_t$  oraz innych. Ma to praktyczne zastosowanie dla takich technologii jak klejenie, lakierowanie, malowanie, drukowanie, nanoszenie powłok ochronnych oraz inne. Celem pracy jest analiza istotności różnicy stanu energetycznego warstwy wierzchniej różnych stopów Al, dla porównywalnych wartości technologicznych parametrów skrawania, a także istotności zmian wartości swobodnej energii powierzchniowej tych stopów dla wartości prędkości skrawania typowych dla obróbki konwencjonalnej i HSC.

## 2. STANOWISKO ORAZ METODYKA BADAŃ

Próbki ze stopów aluminium AlSi10Mg oraz AW 7075 T651 wykonano na pionowym centrum obróbkowym VMC 800 HS wyposażonym w sterowanie Heidenhain iTNC 530. W tabeli 1 przedstawiono charakterystykę narzędzia oraz parametry obróbki, z jakimi zostało przeprowadzone frezowanie. Podczas obróbki użyto frez pełnowęglkowy (gat. węgla H10) firmy Mapal.

Tabela 1. Narzędzie oraz parametry technologiczne obróbki

Narzędzie	Frez walcowo – czołowy	
Średnica $D_c$ , mm	16	
Liczba ostrzy z	3	
Prędkość obrotowa n, obr/min	3979	23873
Prędkość skrawania $v_c$ , m/min	200	1200
Głębokość skrawania $a_p$ , mm	1	
Posuw na ostrze $f_z$ , mm/ostrze	0,01	
Prędkość posuwu $v_f$ , mm/min	119	716
Szerokość frezowania $a_e$ mm	15	

Wszystkie próbki wykonane ze stopów aluminium były poddane obróbce frezowaniem bez użycia chłodziwa oraz z użyciem chłodziwa MobilCut 222.

Pomiary parametrów chropowatości powierzchni 3D przeprowadzono na urządzeniu do pomiaru konturu, chropowatości i topografii 3D T8000 RC-12-40 firmy Hommel-Etamic z końcówką pomiarową o promieniu 2  $\mu\text{m}$ . Pomiary wykonano na powierzchni (2 mm x 2 mm) przy 200 wierszowaniach. Do analizy wykorzystano oprogramowanie TURBO WAVE.

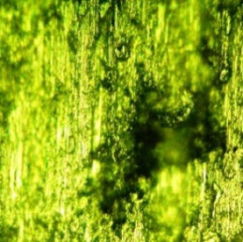
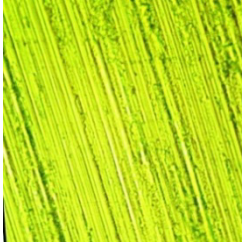

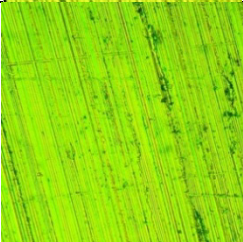
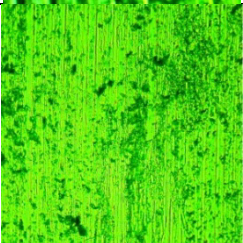
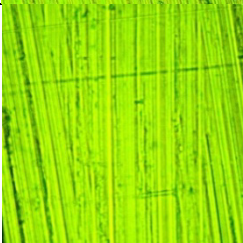
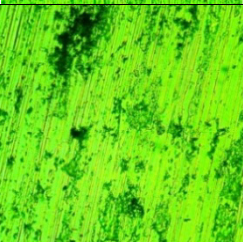
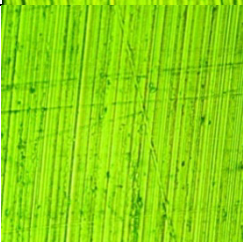
Ciecze pomiarowe, o stałej objętości 4  $\mu\text{l}$ , służące do pomiaru kątów zwilżania na badanych powierzchniach próbek wykonanych ze stopów aluminium były nanoszone w sposób automatyczny przez mechanizm goniometru PGX. Temperatura otoczenia wynosiła (19-21) $^{\circ}\text{C}$  a wilgotność względna powietrza (35 – 42)%. Na badanych po-

wierzchniach wykonano minimum po 10 pomiarów kąta zwilżania zarówno wodą destylowaną jak i diiodometanem. Pomiary te posłużyły do wyznaczenia wartości swobodnej energii powierzchniowej oraz jej składowych (dyspersyjnej i polarnej).

### 3. WYNIKI BADAŃ

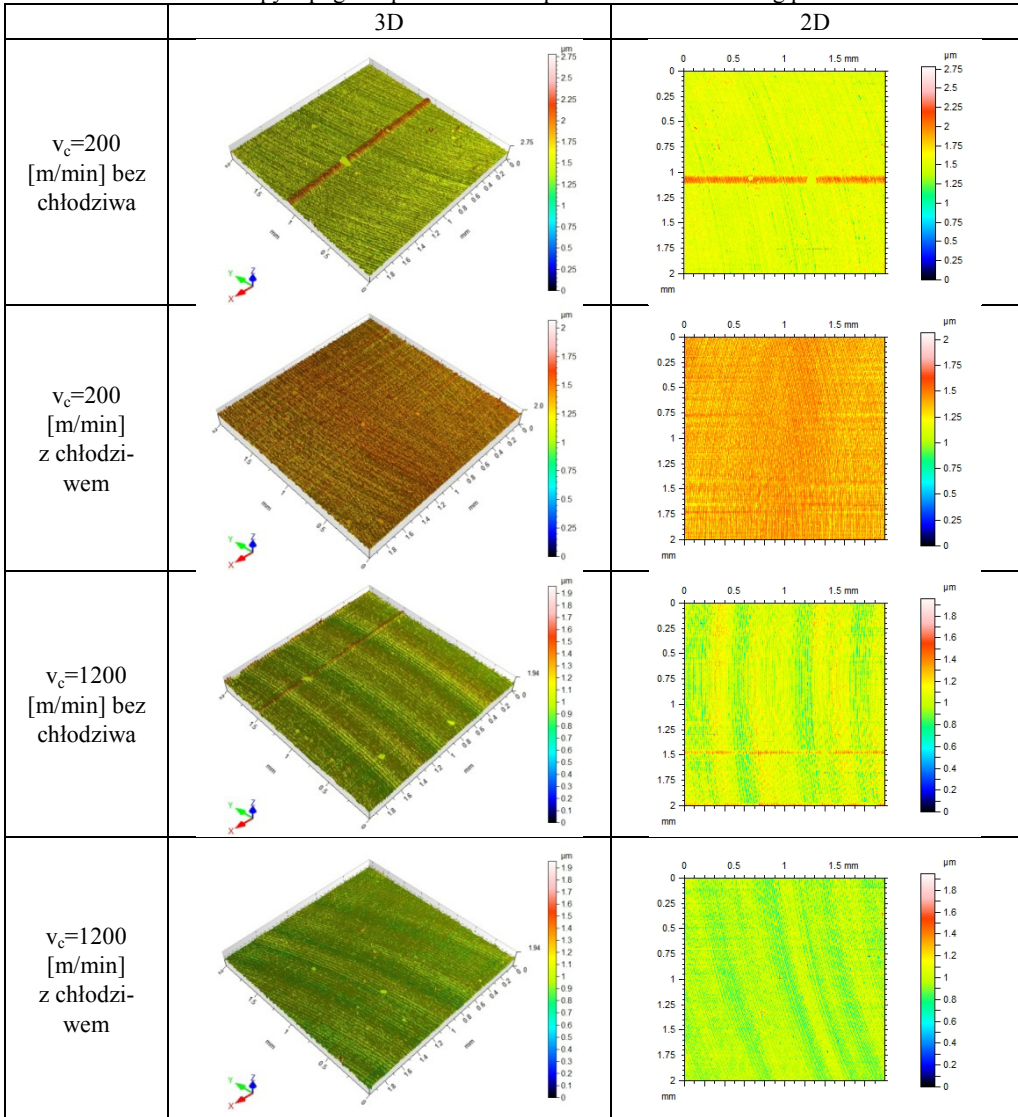
W tabeli 2 przedstawiono fotografie powierzchni po frezowaniu stopów aluminium ze zmiennymi prędkościami skrawania (konwencjonalne  $v_c=200$  m/min oraz HSC  $v_c=1200$  m/min) oraz z użyciem i bez użycia chłodziwa.

Tabela 2. Fotografie powierzchni stopów aluminium po obróbce frezowaniem w różnych warunkach

	AlSi10Mg	AW 7075 T651
$v_c=200$ [m/min] bez chłodziwa		
$v_c=200$ [m/min] z chłodziwem		
$v_c=1200$ [m/min] bez chłodziwa		
$v_c=1200$ [m/min] z chłodziwem		

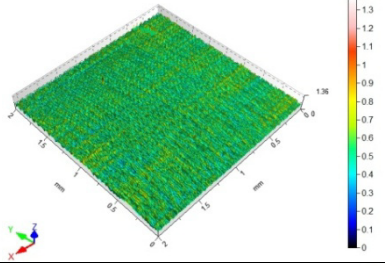
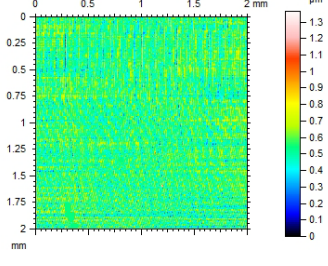
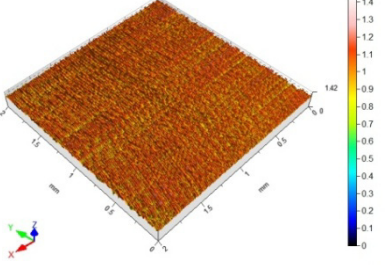
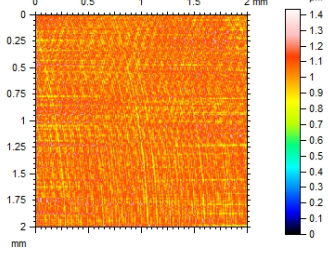
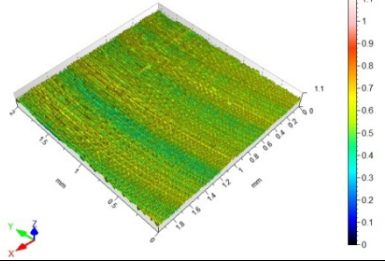
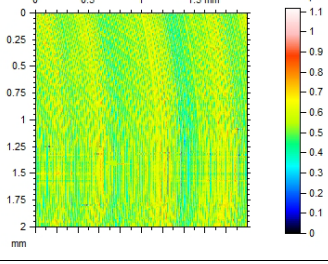
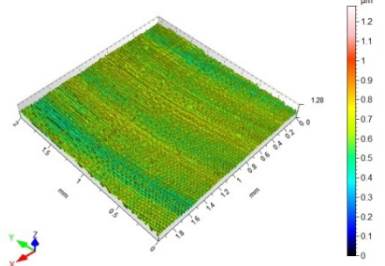
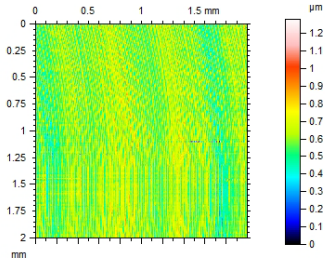
Fotografie topografii powierzchni wykonano przy powiększeniu 500 razy. Dla stopu AlSi10Mg zaobserwowano znaczną poprawę jakości powierzchni (co ma również odzwierciedlenie w wartości parametru chropowatości 3D:  $S_p$ ,  $S_v$ ,  $S_z$ ) po zastosowaniu do obróbki chłodziwa. Na fotografii powierzchni próbki wykonanej ze stopu aluminium AlSi10Mg po frezowaniu konwencjonalnym ( $v_c=200$  [m/min]) bez użycia chłodziwa zaobserwowano „pory”, które mogą powstać wskutek wyrywania ziaren krzemu z materiału.

Tabela 3. Mapy topografii powierzchni stopu aluminium AlSi10Mg po frezowaniu



W tabeli 3 przedstawiono mapy topografii powierzchni próbek wykonanych ze stopu aluminium AISi10Mg po obróbce frezowaniem w różnych warunkach. Na przedstawionych mapach topografii powierzchni zaobserwowano charakterystyczne zagłębienia (bruzdy) przedstawiające kinematyczno–geometryczne odwzorowanie narzędzia.

Tabela 4. Mapy topografii powierzchni stopu aluminium AW 7075 T651 po frezowaniu

	3D	2D
$v_c=200$ [m/min] bez chłodziwa		
$v_c=200$ [m/min] z chłodziwem		
$v_c=1200$ [m/min] bez chłodziwa		
$v_c=1200$ [m/min] z chłodziwem		

W mniejszym stopniu, ale również widoczne zagłębienia zaobserwowano dla map topografii powierzchni próbek wykonanych ze stopu aluminium AW 7075 T651 przedstawionych w tabeli 4.

W tabeli 5 oraz 6 zestawiono wybrane parametry chropowatości powierzchni 3D próbek wykonanych ze stopów aluminium (AlSi10Mg oraz AW 7075 T651) po obróbce frezowaniem w różnych warunkach.

Tabela 5. Parametry chropowatości powierzchni 3D stopu aluminium AlSi10Mg po frezowaniu

	Sq [ $\mu\text{m}$ ]	Sp [ $\mu\text{m}$ ]	Sv [ $\mu\text{m}$ ]	Sz [ $\mu\text{m}$ ]	Sa [ $\mu\text{m}$ ]	St [ $\mu\text{m}$ ]
$v_c=200$ [m/min] bez chłodziwa	0,112	1,24	1,54	2,78	0,0774	2,78
$v_c=200$ [m/min] z chłodziwem	0,0747	0,675	1,39	2,07	0,0591	2,07
$v_c=1200$ [m/min] bez chłodziwa	0,109	0,911	1,05	1,96	0,0859	1,96
$v_c=1200$ [m/min] z chłodziwem	0,0866	0,985	0,967	1,95	0,0688	1,95

Pomiary parametrów chropowatości powierzchni 3D potwierdziły, że dla stopu AlSi10Mg zastosowanie cieczy chłodząco smarującej przy skrawaniu konwencjonalnym ( $v_c=200$  [m/min]) powoduje spadek wartości parametrów chropowatości powierzchni.

Tabela 6. Parametry chropowatości powierzchni 3D stopu aluminium 7075 T651 po frezowaniu

	Sq [ $\mu\text{m}$ ]	Sp [ $\mu\text{m}$ ]	Sv [ $\mu\text{m}$ ]	Sz [ $\mu\text{m}$ ]	Sa [ $\mu\text{m}$ ]	St [ $\mu\text{m}$ ]
$v_c=200$ [m/min] bez chłodziwa	0,0924	0,830	0,535	1,37	0,0736	1,37
$v_c=200$ [m/min] z chłodziwem	0,0789	0,388	1,05	1,43	0,0629	1,43
$v_c=1200$ [m/min] bez chłodziwa	0,0895	0,572	0,544	1,12	0,0719	1,12
$v_c=1200$ [m/min] z chłodziwem	0,0936	0,674	0,607	1,28	0,0753	1,28

Analizując uzyskane parametry chropowatości powierzchni 3D dla próbek wykonanych ze stopów aluminium po obróbce można zauważyć lepszą skrawalność stopu AW 7075 T651 w stosunku do próbek wykonanych ze stopu AlSi10Mg.

W tabeli 7 przedstawiono wpływ prędkości skrawania na wartość swobodnej energii powierzchniowej oraz jej składowych: dyspersyjnej i polarnej, po obróbce frezowaniem stopów aluminium AlSi10Mg oraz 7075 T651. W tabeli przedstawiono również wartość odchylenia standardowego, jako miarę rozrzutu wyniku od wartości średniej.

Tabela 7. Wpływ sposobu obróbki na wartość swobodnej energii powierzchniowej oraz jej składowych (dyspersyjnej i polarnej)

		AlSi10Mg			7075 T651		
		SEP [mJ/m <sup>2</sup> ]	Składowa dyspersyjna SEP [mJ/m <sup>2</sup> ]	Składowa polarna SEP [mJ/m <sup>2</sup> ]	SEP [mJ/m <sup>2</sup> ]	Składowa dyspersyj- na SEP [mJ/m <sup>2</sup> ]	Składowa polarna SEP [mJ/m <sup>2</sup> ]
v <sub>c</sub> =200 [m/min] bez chłodziwa	Wartość średnia	46,2	42,1	4,1	58,1	46,2	11,9
	Odchylenie standardowe	1,24	1,21	0,15	1,11	1,18	0,45
v <sub>c</sub> =200 [m/min] z chłodziwem	Wartość średnia	56,7	44,2	12,5	59,6	44,5	15,1
	Odchylenie standardowe	1,32	1,11	0,18	1,18	1,22	0,36
v <sub>c</sub> =1200 [m/min] bez chłodziwa	Wartość średnia	59,3	45,0	14,3	58,8	43,1	15,7
	Odchylenie standardowe	1,48	1,43	0,21	1,27	1,34	0,44
v <sub>c</sub> =1200 [m/min] z chłodziwem	Wartość średnia	60,1	45,1	15	61,1	44,5	16,6
	Odchylenie standardowe	1,26	1,25	0,24	1,31	1,22	0,23

Na uwagę zasługuje znaczący spadek wartości swobodnej energii powierzchniowej, w tym także składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej po obróbce na sucho stopu aluminium AlSi10Mg. Spadek wartości SEP oraz jej składowej polarnej może być spowodowany wrywaniem ziaren krzemu podczas obróbki z małymi prędkościami skrawania bez udziału chłodziwa. Wymaga to przeprowadzenia dalszych badań i zaawansowanej analizy.

#### 4. WNIOSKI

Przeprowadzone badania wpływu prędkości skrawania, dla przyjętych wartości, jako typowych dla obróbki konwencjonalnej i HSM, przyniosły interesujące spostrzeżenia i uwagi. Ważniejsze z nich można sformułować następująco:

1. Dla stopu AlSi10Mg zaobserwowano istotną poprawę chropowatości powierzchni po użyciu cieczy chodząco-smarującej w stosunku do obróbki próbek na sucho, fakt ten dotyczy obróbki konwencjonalnej
2. Analizując topografię powierzchni po obróbce frezowaniem można zauważyć lepszą skrawalność stopu AW 7075 T651 w stosunku do próbek wykonanych ze stopu AlSi10Mg, przejawia się to mniej ostrymi śladami obróbki oraz mniejszymi zadziorami na krawędziach.



3. Analizując wartości swobodnej energii powierzchniowej oraz jej składowe (polarną i dyspersyjną) po obróbce frezowaniem różnych gatunków stopów aluminium można stwierdzić, że nie występuje istotna różnica w ich stanie energetycznym po obróbce konwencjonalnej w stosunku do obróbki HSM. Jedynie obróbka na sucho stopu AlSi10Mg w warunkach obróbki konwencjonalnej wykazuje zmniejszenie wartości swobodnej energii powierzchniowej, jest to związane ze specyfiką topografii tej powierzchni.

*Badania realizowane w ramach Projektu "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", Nr POIG.01.01.02-00-015/08 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.*

#### LITERATURA

- [1] ADAMSKI W., *Wybrane kierunki zwiększania wydajności skrawania*. Mechanik, 5-6, 2009.
- [2] Blicharski M., *Inżynieria powierzchni*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa 2009.
- [3] FELD M., *Obróbka skrawaniem stopów aluminium*, Warszawa, WNT, 1984.
- [4] GRZESIK W., *Stan fizyczny warstwy wierzchniej przy toczeniu nożem jednokrawędziowym*, Mechanik 4, 1983, 227–230.
- [5] JEMIELNIAK K., *Obróbka skrawaniem*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004.
- [6] KAMIENSKA-KRZOWSKA B., KŁONICA M., *Rola strategii pomiarów topografii powierzchni w ocenie wybranych parametrów chropowatości*. Mechanik, 8-9, 2014, 138-145/595.
- [7] KŁONICA M., KUCZMASZEWSKI J., *Badania właściwości energetycznych warstwy wierzchniej wybranych stopów Al i Mg po obróbce frezowaniem*. Obróbka skrawaniem współczesne problemy, Szkoła Obróbki Skrawaniem, pod redakcją Bogdana Kruszyńskiego, Łódź 2010, 341-348.
- [8] KŁONICA M. KUCZMASZEWSKI J. OZONEK J., *Ocena porównawcza właściwości energetycznych warstwy wierzchniej stopu tytanu*. Inżynieria materiałowa 5, 2009.
- [9] KWIATKOWSKI M. P., KŁONICA M., KUCZMASZEWSKI J., SATOH S.: Comparative Analysis of Energetic Properties of Ti6Al4V Titanium and EN-AW-2017A(PA6) Aluminum Alloy Surface Layers for an Adhesive Bonding Application, Ozone: Science & Engineering: The Journal of the International Ozone Association, 35, 2013, 220-228.
- [10] OCZOŚ K. E., *Kierunki zwiększania produktywności procesów skrawania*, Mechanik 5–6, 2007.
- [11] OCZOŚ K.E., *Doskonalenie procesów kształtowania ubytkowego stopów aluminium*. Mechanik 3-4, 2009.
- [12] ROY P., SARANGI S.K., GHOSH A., CHATTOPADHYAY A.K., *Machinability study of pure aluminium and Al–12% Si alloys against uncoated and coated carbide inserts*. Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 27, 2009, 535–544.
- [13] SIENIAWSKI J., *Stopy aluminium stosowane w technice lotniczej*, Mechanik 7, 2009, 649–654.
- [14] YOUSEFI R., ICHIDA Y., *A study on ultra–high-speed cutting of aluminium alloy: Formation of welded metal on the secondary cutting edge of the tool and its effects on the quality of finished surface*. Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology 24, 2000, 371–376.
- [15] ZALEWSKI A., *Efektywne wytwarzanie dzięki optymalnej strategii obróbki HSM*. Projektowanie i konstrukcje inżynierskie, XII, 2007.