

	Organizatorzy: Politechnika Łódzka Wydział Mechaniczny	XXXVIII NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKI ŚCIERNEJ Łódź - Uniejów 09-11.09.2015	
	• Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn • Katedra Technologii Maszyn		

Badania porównawcze stanu energetycznego warstwy wierzchniej stopu AZ91HP po obróbce ściernej i frezowaniu

Comparative research of energetic properties after abrasive machining and face milling of AZ91HP magnesium alloy

MARIUSZ KLONICA
JÓZEF KUCZMASZEWSKI *

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.372

Stan energetyczny warstwy wierzchniej materiałów konstrukcyjnych takich jak stop magnezu AZ91HP jest ważną miarą podatności danej powierzchni, a w zasadzie warstwy wierzchniej na możliwość stosowania technologii, w których adhezja odgrywa istotną rolę. W artykule zaprezentowano wyniki badań stanu energetycznego warstwy wierzchniej stopu magnezu po obróbce ściernej oraz frezowaniu. Pracę zakończono wnioskami.

SŁOWA KLUCZOWE: swobodna energia powierzchniowa SEP, stop magnezu, warstwa wierzchnia

Energetic properties of the surface layer of AZ91HP magnesium alloy have to be taken into consideration during preparation of elements to operations such as joint, caulking, painting and others surface engineering technologies. Many factors such as geometrical and physicochemical have influence on energetic properties. One of the most important factors is surface roughness after cutting processes, chemical and thermal treatment. Abrasive machining and face milling are one of the technologies currently used in the automotive, aerospace industry and many other branches of industry. The purpose of the article was to present results of energetic properties of the surface layer of magnesium alloy after abrasive machining and face milling. The paper ends with conclusions.

KEYWORDS: surface free energy (SFE), magnesium alloys, surface layer

Wstęp

Stan energetyczny warstwy wierzchniej materiałów jest

* dr inż. Mariusz Klonica (m.klonica@pollub.pl),
prof. dr hab. inż. Józef Kuczmaszewski (j.kuczmaszewski@pollub.pl)

ważny w sytuacjach, kiedy przewidujemy w procesie wytwarzania operacje nakładania powłok, względnie operacje klejenia czy hermetyzacji konstrukcji. Wartość swobodnej energii powierzchniowej, a także jej składowych – polarnej i dyspersyjnej, jest ważną miarą „podatności” tej powierzchni na technologie, w których zjawisko adhezji odgrywa istotną rolę [2, 3]. Stopy Mg nie należą do łatwych w kontekście technologii przygotowywania ich powierzchni do łączenia adhezyjnego. Najlepsze efekty uzyskuje się w procesie trawienia, jednak te technologie są z oczywistych względów kłopotliwe. Tam, gdzie wymagania dotyczące wytrzymałości połączeń adhezyjnych nie są nadmiernie wysokie, staramy się upraszczać technologię, najczęściej sprowadzając ją do odpowiedniej obróbki mechanicznej [1, 4] i ewentualnego czyszczenia w środkach emulgujących tłuszcze.

Najbardziej typowa obróbka powierzchni do operacji klejenia, uszczelniania i nakładania powłok, to najczęściej obróbka ścierna. Topografia powierzchni po takiej obróbce jest dostatecznie rozwinięta w znaczeniu geometrycznym, cechuje się ponadto korzystnymi z punktu widzenia technologii adhezyjnych parametrami horyzontalnymi. Niekiedy jednak, dla niektórych materiałów, zwłaszcza charakteryzujących się znaczną plastycznością, obserwuje się efekt rozmazywania produktów obróbki po powierzchni, często wraz z wgniataniem w warstwę wierzchnią fragmentów ziaren ściernych. To istotnie pogarsza efekty z punktu widzenia celów takich operacji.

W pracy przeanalizowano wpływ obróbki ściernej i frezowania, zwłaszcza w warunkach wysokich prędkości skrawania, na cechy topograficzne powierzchni i wartość swobodnej energii powierzchniowej dla ważnego stopu, zwłaszcza dla przemysłu lotniczego, jakim jest stop AZ91HP.

Metodyka badań

We współczesnej gospodarce stopy magnezu znalazły bardzo szerokie zastosowanie. Zwłaszcza ze względu na swoje właściwości, stosuje się je w przemyśle maszynowym, samochodowym oraz lotniczym. Coraz częściej po stopy magnezu sięgają producenci wyrobów codziennego użytku (RTV, AGD, sprzęt komputerowy i inne). Przede wszystkim niewielka gęstość (około $\rho=1,8\text{g/cm}^3$) powoduje tak szerokie zastosowanie tych materiałów. W badaniach wykorzystano jeden z bardziej powszechnie stosowanych stopów Mg, to jest AZ91HP. W tabeli 1 przedstawiono skład chemiczny wykorzystanego stopu.

Tab. 1. Skład chemiczny stopu magnezu [12, 13]

Skład chemiczny [%] AZ91HP							
Cu	Mn	Mg	Zn	Si	Fe	Al	Inne
0,002	0,22	reszta	0,66	0,016	0,002	8,91	Ni 0,001

Podstawowe parametry wytrzymałościowe stopu magnezu AZ91HP są następujące: $R_m = (200-240)$ MPa oraz moduł Younga E wynosi ok. 45 GPa.

Pomiar parametrów chropowatości powierzchni 2D wykonano w kierunku prostopadłym do śladów obróbki, minimum 8 razy na każdej z badanych powierzchni, a następnie wartości parametru R_a oraz R_z uśredniono i przedstawiono w tabeli 3. Długość odcinka elementarnego przyjęto wg tabel [5, 7] na poziomie $L_c = 0,8\text{mm}$. Zrealizowano również pomiar wybranych parametrów chropowatości powierzchni 3D. Pomiar kąta zwilżania badanych próbek odbywał się na płycie pomiarowej, której poziom był sprawdzany poziomą optyczną, w temperaturze otoczenia wynoszącej (19-21) $^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej (35 – 42)%. Na badanych powierzchniach wykonano minimum po 10 pomiarów kąta zwilżania zarówno wodą destylowaną jak i diiodometanem. Pomiar te posłużyły do wyznaczenia wartości swobodnej energii powierzchniowej próbek po różnych sposobach obróbki stopu magnezu AZ91HP.

W pracy przeprowadzono analizę porównawczą właściwości energetycznych warstwy wierzchniej stopu magnezu AZ91HP po różnych metodach obróbki ścierniej w stosunku do obróbki frezowaniem. Nowoczesna obróbka stopów Mg, często w warunkach HSC, umożliwia uzyskanie powierzchni o relatywnie małej chropowatości, zbyt małej dla potrzeb technologii "adhezyjnych". Ponadto struktura geometryczna nierówności po obróbce ścierniej jest nieukierunkowana, co jest korzystne dla procesów związanych z adhezją. Wzrost wartości parametru R_a , uzyskany po obróbce ścierniej, w stosunku do wartości tego parametru po obróbce frezowaniem jest korzystny. Ponadto obróbka ścierna włókniną ma tę zaletę, że produkty obróbki są skutecznie usuwane z powierzchni materiału a nie "wgniatane" jak ma to czasem miejsce podczas obróbki klasycznymi narzędziami nasypowymi.

Stanowisko badawcze

Obróbkę ścierną płótnem o ziarnistości P 320 przeprowadzono za pomocą szlifierki oscylacyjnej Hilti WFO 280 w czasie 30 sekund. Szlifowanie włókniną ścierną 180 i włókniną 240 realizowano ręcznie w czasie jednej minuty. Próbkę frezowano na pionowym centrum obróbkowym VMC 800 HS. Podczas obróbki użyto frez pełnowęglkowy [6] (gat. węglika H10) firmy Mapal. Proces frezowania zrealizowano bez użycia chłodziwa. W tabeli 2 przedstawiono cha-

rakterystykę narzędzi oraz parametry obróbki, z jakimi zostało przeprowadzone frezowanie.

Tab. 2. Narzędzie oraz parametry technologiczne obróbki

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

Pomiar chropowatości powierzchni 2D wykonano za pomocą profilografometru firmy Taylor-Hobson Surtronic 3+, natomiast do pomiarów parametrów chropowatości powierzchni 3D użyto urządzenia do pomiaru konturu, chropowatości i topografii T8000 RC-12-40 firmy Hommel-ETamic z końcówką pomiarową o promieniu 2 μm . Pomiar wykonano na powierzchni (1 mm x 1 mm) przy 200 wierszowaniach. Do analizy wykorzystano oprogramowanie TURBO WAVE oraz TalyProfile Lite.

Do pomiarów kąta zwilżania oraz wyznaczenia swobodnej energii powierzchniowej użyto goniometru PGX. Ciecze pomiarowe charakteryzowały się następującymi wartościami energii powierzchniowej: woda destylowana (składowa polarna $\gamma_w^p=51$ [mJ/m²], składowa dyspersyjna $\gamma_w^d=21,8$ [mJ/m²]), swobodna energia powierzchniowa $\gamma_w=72,8$ [mJ/m²]) oraz diiodometan (składowa polarna $\gamma_d^p=2,3$ [mJ/m²], składowa dyspersyjna $\gamma_d^d=48,5$ [mJ/m²], swobodna energia powierzchniowa $\gamma_d=50,8$ [mJ/m²]) [8-10]. Krople cieczy o stałej objętości 4 μl , służące do pomiaru kątów zwilżania na badanych powierzchniach, наносono w sposób automatyczny przez mechanizm goniometru PGX.

Opracowanie statystyczne

Pierwszym etapem eksperymentu były badania wstępne. Na podstawie analizy rozrzutu i przyjętego poziomu istotności określono niezbędną liczbę pomiarów w badaniach zasadniczych według równania (1) [11]:

$$n = \frac{t_{\alpha}^2 \cdot s^2}{d^2} \leq n_0 \quad (1)$$

gdzie: n_0 - liczebność próby wstępnej, t_{α} - wartość zmiennej t-Studenta, s^2 - wariancja z próby wstępnej, d - maksymalny błąd szacunku, równy maksymalnemu błędowi pomiarowemu.

Odchylenie standardowe obliczono z zależności (2), natomiast wariancję z równania (3):

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (2)$$

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1} \quad (3)$$

gdzie: y_i - wartość czynnika wynikowego w i-tym pomiarze, \bar{y} - średnia arytmetyczna, n - całkowita liczba pomiarów.

W przeprowadzonych badaniach doświadczalnych często wykonujemy analizę porównawczą, to znaczy dla przyjętego poziomu istotności stwierdzamy, czy uzyskane

wartości średnie zmiennej zależnej w dwóch populacjach istotnie się różnią. Pierwszym etapem, oczywiście przy założeniu, lub ewentualnym sprawdzeniu, że zmienna zależna ma rozkład normalny, jest sprawdzenie hipotezy o jednorodności wariancji. Hipoteza zerowa ma postać (4):

$$H_0: \sigma_I^2 = \sigma_{II}^2 \quad (4)$$

Hipoteza alternatywna na postać (5):

$$H_1: \sigma_{II}^2 < \sigma_I^2 \quad (5)$$

Do weryfikacji hipotezy wykorzystano statystykę opartą na rozkładzie Fischera-Snedecora (6):

$$F = \frac{S_I^2}{S_{II}^2} \quad (6)$$

gdzie: S_I^2 - wariancja o większej wartości, S_{II}^2 - wariancja o mniejszej wartości.

Po sprawdzeniu hipotezy o jednorodności wariancji przechodzimy do weryfikacji hipotezy o równości średnich. Hipoteza zerowa ma postać (7), natomiast hipotezę alternatywną przedstawia zależność (8):

$$H_0: m_1 = m_2 \quad (7)$$

$$H_1: m_1 > m_2 \quad \text{lub} \quad m_1 < m_2 \quad (8)$$

Jeżeli rozpatrywane wariancje są równe do weryfikacji wykorzystujemy test oparty na rozkładzie t-Studenta (9).

$$t = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2}{\sqrt{\frac{(n_1-1)S_1^2 + (n_2-1)S_2^2}{n_1+n_2-2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} \quad (9)$$

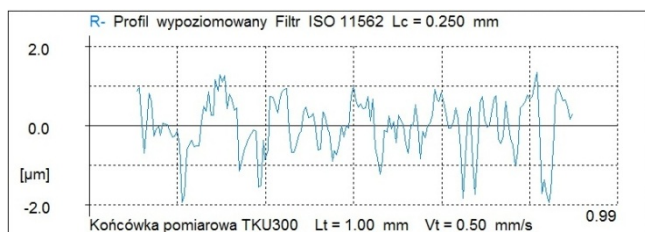
Natomiast, gdy test hipotezy o równości wariancji wykazał, że wariancje są różne do weryfikacji stosujemy test oparty na rozkładzie Cochran-Coxa (10).

$$c = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (10)$$

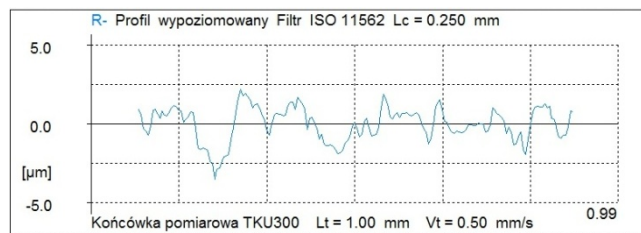
Przeprowadzona analiza statystyczna pozwala formułować jednoznaczne wnioski o równości średniej.

Wyniki badań

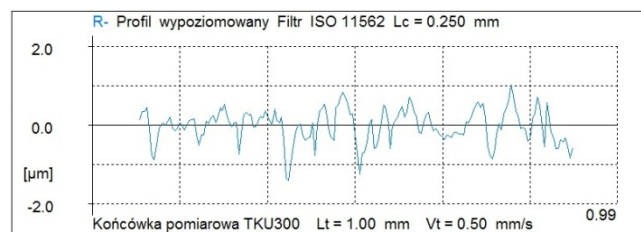
Na rysunkach od 1 do 4 przedstawiono zarejestrowane profile chropowatości powierzchni stopu magnezu AZ91HP po różnych sposobach obróbki.



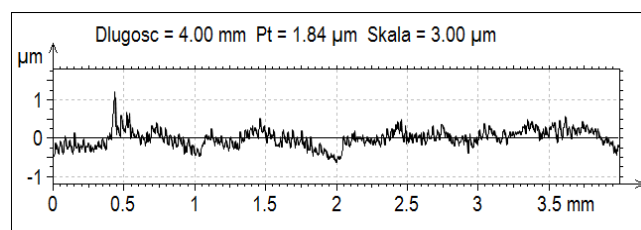
Rys. 1. Profil chropowatości powierzchni po obróbce ścierną płótnem o ziarnistości P320



Rys. 2. Profil chropowatości powierzchni po obróbce włókniną ścierną 180



Rys. 3. Profil chropowatości powierzchni po obróbce włókniną ścierną 240



Rys. 4. Profil chropowatości powierzchni po obróbce frezowaniem

Na przedstawionych profilach chropowatości powierzchni zaobserwowano charakterystyczne zagłębienia przedstawiające kinematyczno-geometryczne odwzorowanie narzędzia. Pierwsze trzy rysunki (rys. 1-3) przedstawiają profile chropowatości powierzchni po obróbce ścierną. Profile charakteryzują się losowym i nieprzewidywalnym rozmieszczeniem wzniesień i zagłębień. Natomiast profil przedstawiony na rysunku 4 jest charakterystyczny dla obróbki frezowaniem na, którym można zaobserwować wartość zastosowanego posuw. Profil charakteryzuje się systematycznym występowaniem charakterystycznych dla frezowania zagłębień. Najwyższymi parametrami wysokościowymi charakteryzuje się profil po obróbce włókniną ścierną 180.

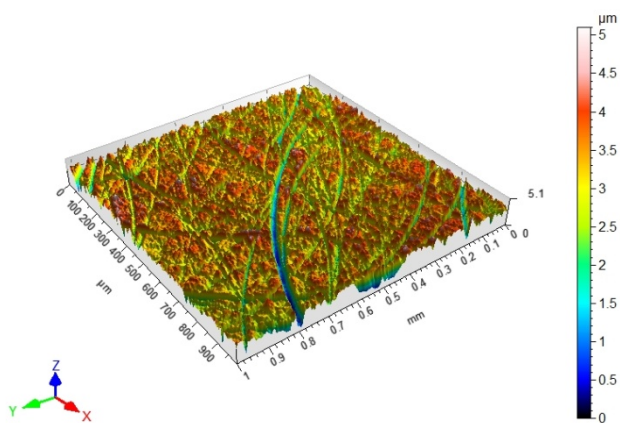
W tabeli 3 przedstawiono wartości średnie wybranych parametrów chropowatości powierzchni 2D.

Tab. 3. Parametry Ra oraz Rz chropowatości powierzchni po różnych sposobach obróbki

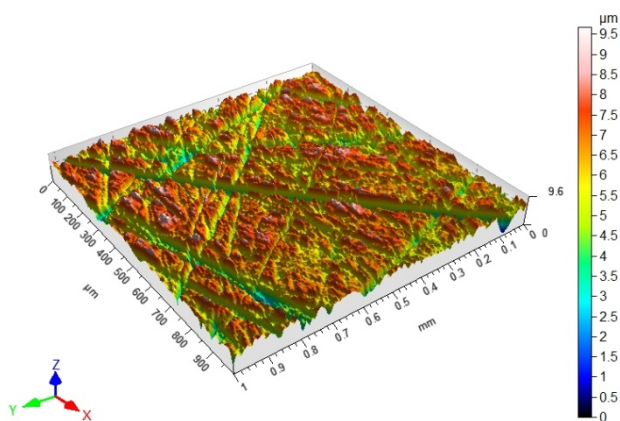
	P320	Włóknina 180	Włóknina 240	Frezowanie
Ra [µm]	0,45	0,81	0,34	0,124
Rz [µm]	2,60	3,82	1,62	0,952

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że najniższe wartości wysokościowych parametrów chropowatości powierzchni stopu magnezu AZ91HP zarejestrowano dla próbek po obróbce frezowaniem. Średnia wartość parametru Ra wynosiła 0,124 µm, natomiast największą wartość parametru Ra zanotowano dla próbek po obróbce włókniną ścierną 180 i wynosiła 0,81 µm.

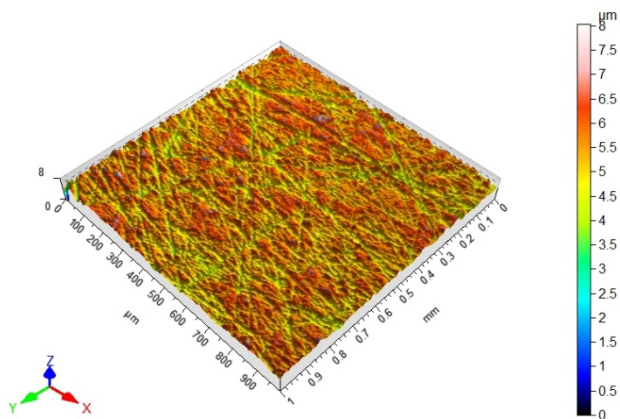
Na rysunkach od 5 do 7 przedstawiono topografię powierzchni 3D próbek magnezu po obróbce ścierną (porównano próbki tylko po obróbce ścierną).



Rys. 5. Topografia 3D powierzchni próbki po obróbce ścierniej płótnem o ziarnistości P320



Rys. 6. Topografia 3D powierzchni próbki po obróbce włókniną ścierną 180



Rys. 7. Topografia 3D powierzchni próbki po obróbce włókniną ścierną 240

Obszar skanowania powierzchni próbek stopu magnezu AZ91HP wynosił 1 mm x 1 mm z krokiem wierszowania, co 5 μm . Rysunek 5 przedstawia powierzchnię próbki po obróbce ścierniej płótnem o ziarnistości P320. Na rysunku można zauważyć rysy i bruzdy o zarysie łukowym charakterystycznym dla sposobu obróbki za pomocą szlifierki oscylacyjnej. Na rysunku 6 oraz 7 przedstawiono powierzchnie próbek po obróbce włókniną ścierną odpowiednio 180 i 240.

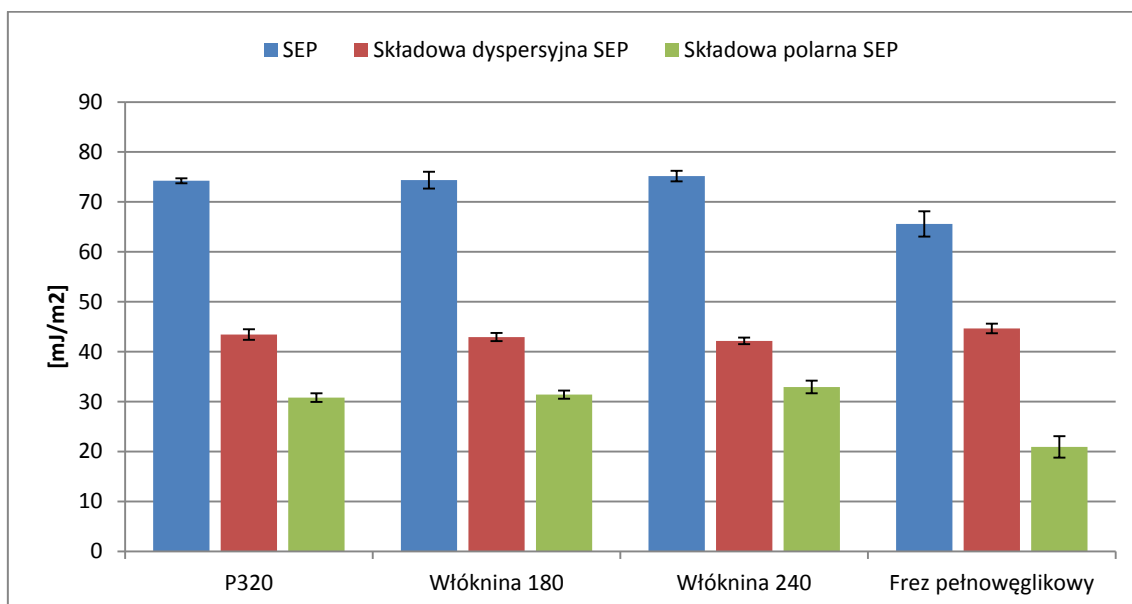
W tabeli 4 przedstawiono wartości wybranych parametrów chropowatości powierzchni 3D dla próbek stopu magnezu AZ91HP po obróbce ścierniej.

Tab. 4. Wybrane parametry chropowatości powierzchni 3D

	P320	Włóknina 180	Włóknina 240
Sa [μm]	0,488	1,03	0,443
Sz [μm]	5,10	9,67	8,03
Sq [μm]	0,644	1,33	0,573

Dla trzech parametrów (Sa, Sz, Sq) chropowatości powierzchni 3D próbek po obróbce ścierniej, podobnie jak dla profili 2D, powierzchnia obrabiana włókniną ścierną 180 charakteryzowała się najwyższymi parametrami chropowatości.

Na rysunku 8 przedstawiono wpływ sposobu obróbki ścierniej oraz frezowania na wartość swobodnej energii powierzchniowej oraz jej składowych (polarnej i dyspersyjnej). Na podstawie przeprowadzonej analizy statystycznej jednoznacznie stwierdzono, że obróbka ścierna realizowana za pomocą różnych narzędzi nie powoduje istotnych zmian w wartościach swobodnej energii powierzchniowej oraz jej składowych: polarnej i dyspersyjnej. Uzyskane wartości SEP są na poziomie 75 mJ/m^2 , składowa dyspersyjna SEP wynosi około 43 mJ/m^2 , natomiast składowa polarna SEP jest na poziomie 32 mJ/m^2 . Stwierdzono natomiast istotną różnicę statystyczną w wartościach swobodnej energii powierzchniowej oraz składowej polarnej SEP stopu AZ91HP pomiędzy obróbką ścierną a obróbką frezowaniem. Różnice w wartościach SEP pomiędzy powierzchnią frezowaną i obrabianą ściernie mają istotne znaczenie, zarówno ilościowe jak i jakościowe. Uzyskany stan energetyczny zależy od struktury geometrycznej powierzchni, ale nie tylko. Obróbka szlifowaniem może także tworzyć aktywne centra energetyczne na powierzchni, jako skutek zmian mechanochemicznych zachodzących w warstwie wierzchniej pod wpływem obróbki mechanicznej.



Rys. 8. Wpływ sposobu obróbki na wartość swobodnej energii powierzchniowej oraz jej składowych (polarną i dyspersyjną)

Należy podkreślić, że uzyskane wartości swobodnej energii powierzchniowej stopu Mg po przeprowadzonej obróbce ścierną są relatywnie do innych technologii stosunkowo wysokie. Po obróbce frezowaniem wartość swobodnej energii powierzchniowej wynosiła 65 mJ/m² i była o około 12% niższa od uzyskanej wartości SEP po obróbce ścierną. Zaobserwowano również spadek wartości składowej polarnej SEP w stosunku do próbek po obróbce ścierną, spadek ten wynosił około 35%. Składowa dyspersyjna SEP po obróbce frezowaniem była na podobnym poziomie jak dla próbek po obróbce szlifowaniem.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy wyników można sformułować następujące wnioski:

1. Dla próbek wykonanych ze stopu magnezu AZ91HP po obróbce włókniną ścierną 180 zaobserwowano znaczny wzrost wartości parametrów chropowatości powierzchni w stosunku do próbek po obróbce włókniną ścierną 240 oraz płótnem o ziarnistości P320.
2. Wartość parametrów chropowatości powierzchni próbek stopu magnezu AZ91HP po obróbce płótnem o ziarnistości P320 oraz włókniną ścierną 240 była na tym samym poziomie, fakt ten wskazuje na możliwość zastąpienia płótna ściernego włókniną ścierną, co jest korzystne, brak pozostałości materiału ściernego (ziaren korundu) w materiale obrabianym.
3. Najniższe parametry chropowatości powierzchni stopu magnezu AZ91HP uzyskano po frezowaniu frezem pełnowęglkowym.
4. Po obróbce ścierną z wykorzystaniem różnych narzędzi nie stwierdzono istotnych zmian w wartościach swobodnej energii powierzchniowej oraz jej składowych.
5. Dla próbek po obróbce frezowaniem uzyskano o około 12% niższą wartość swobodnej energii powierzchniowej w stosunku do próbek po obróbce ścierną.

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. Arai M., Sato S., Ogawa M., Shikata H., Chip control in finish cutting of magnesium alloy. *Journal of Materials Processing Technology* 62, 1996, 341-344.
2. Blicharski M., *Inżynieria powierzchni*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa 2009.
3. Chibowski E., Gonzalez-Caballero F., Interpretation of contact angle hysteresis. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 11, 1195-1209, 1993.
4. Grzesik W., Stan fizyczny warstwy wierzchniej przy toczeniu nożem jednokrawędziowym, *Mechanik*, 4, 227-230, 1983.
5. Humienny Z.(red.), *Specyfikacje Geometrii Wyrobów (GPS) - wykład dla uczelni technicznych*. Oficyna Wydawnicza PW, 2001.
6. Jemielniak K., *Obróbka skrawaniem*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004.
7. Kamieńska-Krzowska B., Kłonica M., Rola strategii pomiarów topografii powierzchni w ocenie wybranych parametrów chropowatości. *Mechanik*, 8-9, 138-145/595, 2014.
8. Kłonica M., Kuczmaszewski J., Badania stanu energetycznego warstwy wierzchniej stopów magnezu po frezowaniu. *Mechanik*, 8-9, 477-484/736, 2014.
9. 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, 341-348, 2010.
10. Kłonica M., Kuczmaszewski J., Kwiatkowski M., Satoh S., Analysis of energetic properties of AZ 91 HP magnesium alloy after ozonization. *Proceedings of the 21st Annual Conference on Ozone Science and Technology in Japan*, Hiroshima, 136-136, 2012.
11. Korzyński M., *Metodyka eksperymentu. Planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne. Warszawa, 2006.
12. PN-EN 1753:2001: *Magnez i stopy magnezu – Gąski i odlewy ze stopów magnezu*.
13. Stanchem Sp.J., *Świadectwo kontroli jakości: Stop magnezu AZ91HP*, z dnia 14.12.2009.