

mgr inż. Wojciech ŻEGLICKI

Uniwersytet Rzeszowski, Centrum Innowacyjnych Technologii
University of Rzeszów, Center of Innovation Technologies

OBRÓBKA PRZETŁOCZNO-ŚCIERNA STOPU ALUMINIUM 2017A

Streszczenie

Wstęp i cel: W pracy przedstawiono zasadę obróbki przetłoczno-ścierniej oraz wyniki badań stereometrii powierzchni ukształtowanej po tej obróbce. Celem pracy było rozeznanie możliwości zastosowania tej metody do obróbki wykańczającej stopu aluminium 2017A.

Materiał i metody: Badania wykonano na próbkach w kształcie tulejek $\varnothing 30/20$ i długości 30 mm, których otwory obrabiano przetłoczno-ściernie stosując jako medium pastę o składzie: elektrokorund + kauczuk metylowinylosilikonowy. Jako stan odniesienia przyjęto powierzchnie toczone wykańczająco. Stan powierzchni po obydwu rodzajach obróbki oceniano poprzez pomiar wybranych parametrów stereometrii powierzchni.

Wyniki: Porównując wyniki toczenia wykańczającego i obróbki przetłoczno-ścierniej stwierdzono, że wysokości nierówności po obróbce przetłoczno-ścierniej są nieco mniejsze niż po toczeniu. Stwierdzono także, że za pomocą tej metody obróbki możliwe jest uzyskanie chropowatości powierzchni $Sa < 0,9 \mu\text{m}$. Uzyskano również lepszy ogólny stan stereometrii powierzchni - wartości tych parametrów stereometrii, które mogą mieć wpływ na właściwości tribologiczne części pracujących w warunkach tarcia ślizgowego ze smarowaniem.

Wniosek: Rezultaty przeprowadzonych badań wykazały możliwości efektywnego wykorzystania metody przetłoczno-ścierniej do obróbki wykańczającej oraz uzyskiwania dobrej jakości powierzchni stopu aluminium 2017A.

Słowa kluczowe: Obróbka przetłoczno-ścierna, AFM.

(Otrzymano: 26.09.2016; Zrecenzowano: 28.09.2016; Zaakceptowano: 30.09.2016)

ABRASIVE FLOW MACHINING OF ALUMINIUM ALLOY 2017A

Abstract

Introduction and aim: The paper presents the principle of treating abrasive flow machining and investigation results of surface stereometry after this treatment. The aim of the study was to understand the possibility of applying this method for the finishing of aluminum alloy 2017A.

Material and methods: The tests were performed on samples in the form of sleeves $\varnothing 30/20$ mm and 30 mm length, which holes were treated by abrasive flow machining using medium composition: aluminium oxide + methylvinyl silicone rubber. As a reference state the turned surfaces were adopted. The surface condition after both kinds of treatment was evaluated through measurement surface stereometry.

Results: Comparing the results of finish - turning and abrasive flow machining, it was found that the surface irregularities after AFM, are smaller than after turning. It was also found that by this method, it is possible to obtain a surface roughness $Sa < 0.9 \mu\text{m}$. Also achieved better overall surface stereometry - the better values of these parameters that may have an influence on the tribological properties of parts working in conditions of sliding friction with lubrication.

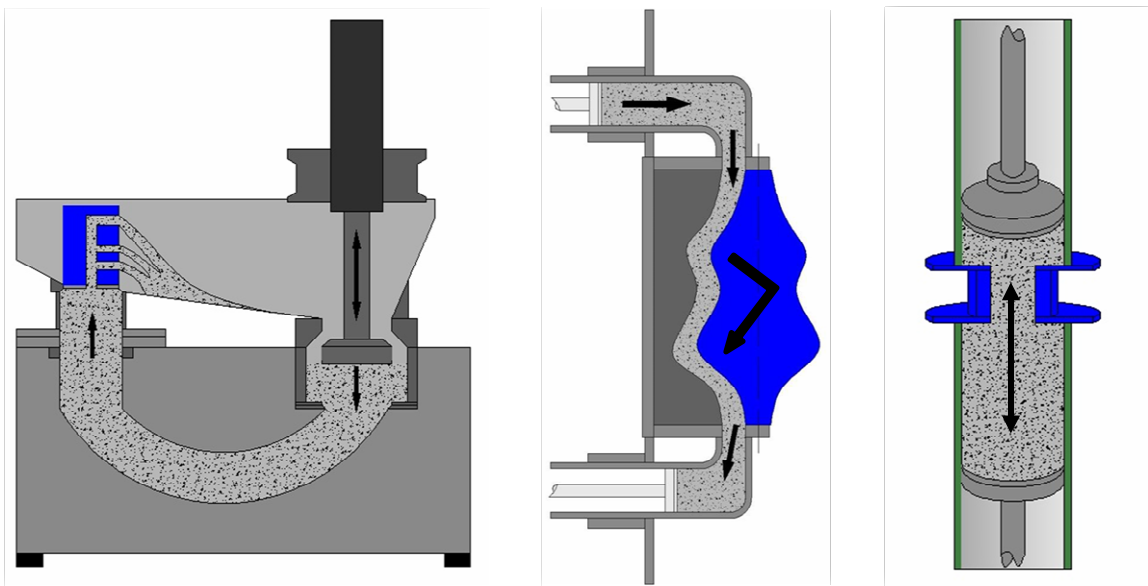
Conclusion: The results of the study showed the possibility of effective use abrasive flow machining and obtaining a good surface quality aluminum alloy 2017.

Keywords: Abrasive Flow Machining, AFM.

(Received: 26.09.2016; Revised: 28.09.2016; Accepted: 30.09.2016)

1. Wstęp i cele

W przemyśle elektromaszynowym wytwarzanych jest wiele wyrobów (silniki, urządzenia zasilające, urządzenia do transportu mediów płynnych i gazowych), w których stosuje się różnego rodzaju dysze (kanały, otwory) dolotowe, przez które przepływa medium. Te dysze to często są to otwory o osiach zakrzywionych lub otwory o zmiennym przekroju. Opory przepływu, więc i parametry użytkowe takich urządzeń, zależą od stanu ich warstwy wierzchniej, głównie od chropowatości powierzchni po obróbce wykańczającej, która to chropowatość powinna być jak najmniejsza. O ile obróbka gładkościowa otworów prostych jest stosunkowo łatwa, o tyle obróbka otworów o osiach zakrzywionych stanowi poważny problem technologiczny. Jak na razie, jedyną metodą gładkościowej obróbki takich otworów jest obróbka przetłoczno-ścierna, znana jako *Abrasive Flow Machining* (AFM) [7], [14]. Obróbka, której zasadę przedstawia rysunku 1, polega na przeciskaniu medium podobnego do pasty polerskiej przez obrabiany otwór co powoduje usuwanie materiału i wygładzanie powierzchni obrabianej. Medium to najczęściej polimer styrenowo-butadienowy z dodatkiem ziaren ściernych z węgla krzemu lub elektrokorundu w ilości od 45 do 75% [12], [14]. Obróbka ta może być (Rys. 1) jedno- lub dwukierunkowa bądź orbitalna. W praktyce nie stosuje się obróbki jednokierunkowej natomiast ponad 60% zastosowań to obróbka dwukierunkowa a około 40% orbitalna [13], [14].



Rys. 1. Zasada i odmiany obróbki przetłoczno-ścierniej: od lewej: jednokierunkowa, orbitalna i dwukierunkowa. Strzałkami zaznaczono kierunek przepływu (ruchu) medium ściernego
Źródło: Opracowanie własne

Fig. 1. Principle and kinds of abrasive flow machining: from left: one - way, orbital and two - way AFM. Arrows indicate the direction of flow (movement) abrasive medium
Source: Elaboration of the Author

Metodą obróbki przetłoczno-ścierniej można obrabiać jednocześnie dużą ilość pojedynczych elementów. Technologia ta daje dużą powtarzalność, oraz przewidywalne wyniki operacji przy rezultatach podobnych a wydajności znacznie lepszej niż przy polerowaniu. Wyniki badań nad AFM pokazały, że składowe sił skrawających oraz zagęszczenie ziaren aktywnych mają wpływ na chropowatość powierzchni obrobionej. Grubość zdejmowanej warstwy materiału waha się w granicach 1-10 μm , (najmniejszą zmierzoną ilością było 50 nm), a uzyski-

wana dokładność wynosi $\pm 0,5 \mu\text{m}$. W obróbce AFM wygładzanie, zaokrąglanie krawędzi, oraz polerowanie odbywają się w tym samym czasie, w miejscach na przedmiocie, których nie można by obrócić w inny sposób. AFM redukuje chropowatość nawet o 75-90% [3], [9], [10].

Zaletą AFM jest to, że obróbka przebiega w stosunkowo niskiej temperaturze, dzięki czemu materiał obrabiany nie ulega osłabieniu wskutek przegrzania [5] a także, że oprócz usuwania mikronierówności, dzięki naciskowi ścierniwa na powierzchnię materiału, tworzona jest utwardzona warstwa wierzchnia, co pozytywnie wpływa na właściwości mechaniczne powierzchni np. na wytrzymałość zmęczeniową [8]. Kolejną jej zaletą jest to, że można sterować wieloma parametrami procesu (natężeniem przepływu ścierniwa, prędkością przepływu, rodzajem i wymiarami ziaren ścierniwa), co daje duże możliwości wpływania na końcowy stan obrabianej powierzchni [1], [6], [8].

Pomimo wymienionych zalet, w literaturze przedmiotowej niewiele jest publikacji na temat tej obróbki brak jest także wzmianek o zastosowaniu tej obróbki w przemyśle krajowym. Jej niezbyt szerokie zastosowanie (głównie do poprawy gładkości powierzchni matryc oraz form wtryskowych); wiąże się to z faktem, iż na samą jakość obróbki ma wpływ stosunkowo wiele czynników wejściowych takich jak np. ciśnienie tłoczenia, ilość ziarna ściernego, wielkość ziarna ściernego, temperatura obróbki, ilość cykli przejścia [1], [2], [4]. Ich właściwy dobór jest pracochłonny, a kolejną wadą metody jest mała wydajność obróbki. Obrabiany element musi być poddany tłoczeniu medium roboczego kilkanaście, a czasem nawet kilkadziesiąt razy, aby uzyskać pożądany efekt.

Niniejsza praca przedstawia wyniki wstępnych badań możliwości i efekty zastosowania obróbki przetłoczno-ścierniej stopu aluminium 2017A.

2. Metodyka badań

Badania przeprowadzono na próbkach w kształcie tulejek o średnicach 30/20 mm i długości 30 mm wykonanych ze stopu aluminium 2017A o właściwościach przedstawionych w tab. 1 oraz w tablicy 2. Ich otwory wiercono a następnie roztaczano do chropowatości $Sa \sim 1 \mu\text{m}$. Próbkę toczoną przyjęto jako stan odniesienia gdyż jest to standardowa metoda obróbki wykańczającej stopów aluminium. Dalszą obróbkę otworów w próbkach wykonywano na specjalnie wykonanym (w Centrum Innowacyjnych Technologii Wydziału Matematyczno-Przyrodniczego Uniwersytetu Rzeszowskiego) stanowisku do dwukierunkowej obróbki przetłoczno-ścierniej, umożliwiającym kontrolę i sterowanie podstawowymi parametrami wejściowymi (ciśnienie w komorze roboczej, liczba cykli roboczych, prędkość przesuwu tłoków) procesu oraz obróbkę w cyklu półautomatycznym. Jako medium obróbkowe stosowano pastę – kauczuk metylowinylsilikonowy z zawartością 50% ziaren elektrokorundu o granulacji 700 μm . Parametry tej obróbki (Tab. 3) dobrano na podstawie badań wstępnych i wcześniej nabytych doświadczeń tak aby uzyskać chropowatość powierzchni Sa taką jak po toczeniu natomiast wyjąć ewentualne różnice pomiędzy innymi określonymi normą ISO 25178 parametrami struktury stereometrycznej powierzchni. Badania powierzchni wykonywano metodą stykową za pomocą profilometru konfokalnego Altisurf 520 na obszarze 2 mm \times 2 mm z krokiem próbkowania 2 μm . Dokonywano obserwacji obrazów topograficznych oraz wykonywano pomiary 37-miu standardowych i niestandardowych parametrów stereometrii powierzchni. Mierzono wartości najczęściej stosowanych w technice tych parametrów (wysokościowych) oraz tych, które mogą mieć wpływ na właściwości użytkowe części maszyn, szczególnie na właściwości tribologiczne i zmęczeniowe [11]. Zestaw i oznaczenia poszczególnych parametrów są zgodne z PN-EN ISO 4287:1999/A1:2010. Wszystkie badania wykonywano z trzykrotną powtarzalnością.

Tab. 1. Skład chemiczny badanego stopu 2017A
 Tab. 1. The chemical composition of the tested alloy 2017A

Składnik stopowy	Al	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ti	Cr	Inne razem
Zawartość zmierzona [%]	93,82	4,1	0,56	0,52	0,58	0,2	0,12	0,05	0,01	0,04
Zawartość wg PN EN 573-3 [%]	91,35 –	3,5 –	0,4 –	0,4 –	0,2 –	< 0,7	< 0,25	< 0,15	< 0,1	< 0,05
	95,5	4,5	1	1	0,8					

Źródło: Opracowanie własne
 Source: Elaboration of the Author

Tab. 2. Wybrane właściwości badanego stopu 2017A
 Tab. 2. Selected properties of the tested alloy 2017

Minimalna wytrzymałość na rozciąganie	350 MPa
Minimalna granica plastyczności Rp0,2	240 MPa
Twardość	100 – 110 HB
Wydłużenie A5	13 – 15%
Przewodność cieplna	130 – 170 W/mK
Gęstość	2,8 g/cm ³

Źródło: Opracowanie własne
 Source: Elaboration of the Author

Tab. 3. Wartości przyjęte parametrów procesu AFM
 Tab. 3. Values of parameters of the AFM process

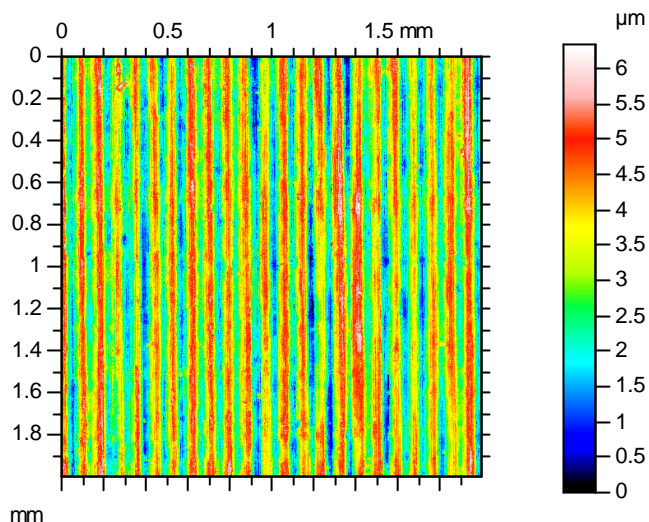
Nazwa parametru:	Przyjęta wartość:
Wielkość ziarna ściernego	600 – 800 μm
Rodzaj ścierniwa	Elektrokorund zwykły
Rodzaj medium	Kauczuk metylowinylosilikonowy
Udział ziaren ściernych w paście	50%
Ciśnienie w komorze obróbkowej	4 MPa
Ilość cykli obróbkowych	50

Źródło: Opracowanie własne
 Source: Elaboration of the Author

3. Wyniki badań

Wyniki badań parametrów stereometrii powierzchni (w postaci map warstwicznych, widoków 3D powierzchni, krzywych nośności, oraz wartości wybranych standardowych i niestandardowych parametrów stereometrii powierzchni) zamieszczono w tablicach 4 i 5. W tablicy 4 zestawiono wyniki badań próbek toczonych, a w tablicy 5 próbek po obróbce przetłoczno-ścierniej.

Tab. 4. Wyniki badań stereometrii powierzchni próbek toczonych
 Tab. 4. Results of the turned surface stereometry investigation



Mapa warstwowa

Parametry wysokościowe:

$Sa = 0,9611 \mu\text{m}$
 $Sq = 1,135 \mu\text{m}$
 $Sz = 6,299 \mu\text{m}$
 $Ssk = -0,01967$
 $Sku = 2,176$
 $Sp = 3,150 \mu\text{m}$
 $Sv = 3,149 \mu\text{m}$

Parametry funkcyjne:

$Smr = 1,555 \%$
 $Smc = 1,502 \mu\text{m}$
 $Sxp = 2,041 \mu\text{m}$

Parametry przestrzenne:

$Sal = 0,02011 \text{ mm}$
 $Str = 0,0201$
 $Std = 90,24^\circ$

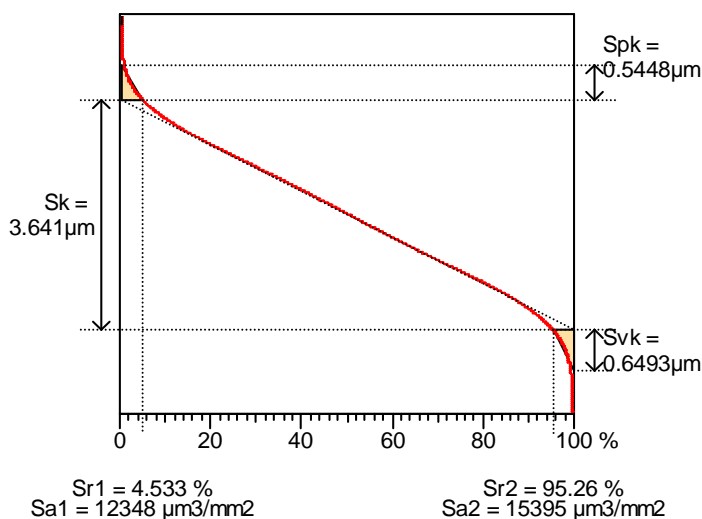
Parametry hybrydowe:

$Sdq = 0,2305$
 $Sdr = 2,554 \%$

Parametry funkcyjne

(objętościowe):

$Vm = 3,527e-005 \text{ mm}^3/\text{mm}^2$
 $Vv = 0,001538 \text{ mm}^3/\text{mm}^2$
 $Vmp = 3,527e-005 \text{ mm}^3/\text{mm}^2$
 $Vmc = 0,001144 \text{ mm}^3/\text{mm}^2$
 $Vvc = 0,001438 \text{ mm}^3/\text{mm}^2$
 $Vvv = 9,961e-005 \text{ mm}^3/\text{mm}^2$

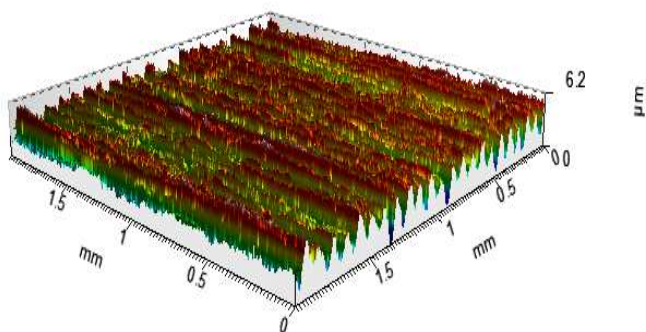


Krzywa nośności powierzchni

$Sr1 = 4.533 \%$
 $Sa1 = 12348 \mu\text{m}^3/\text{mm}^2$
 $Sr2 = 95.26 \%$
 $Sa2 = 15395 \mu\text{m}^3/\text{mm}^2$

Parametry cech:

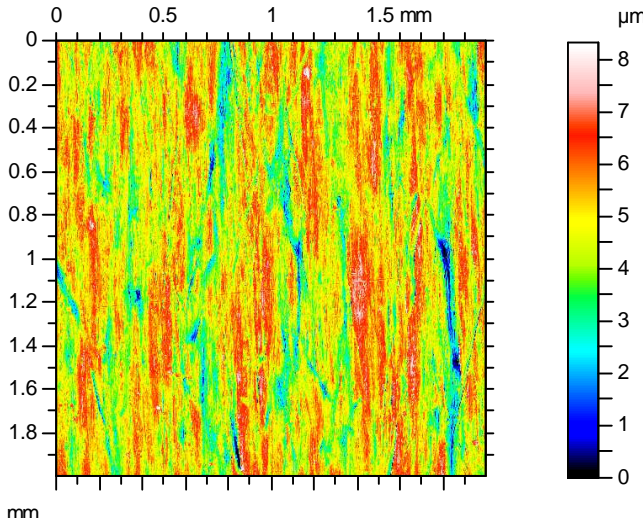
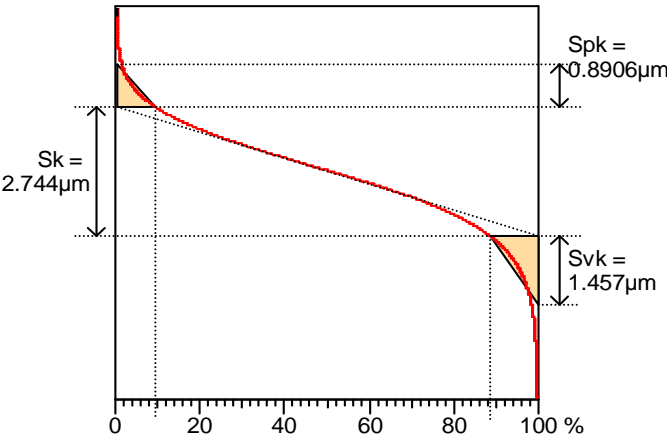
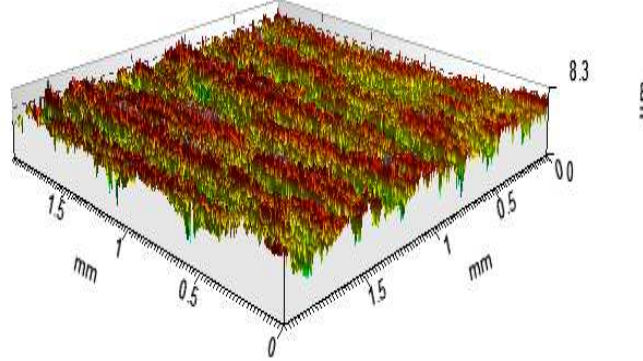
$Spd = 2610 \text{ 1}/\text{mm}^2$
 $Spc = 233,3 \text{ 1}/\text{mm}$
 $S10z = 4,877 \mu\text{m}$
 $S5p = 2,720 \mu\text{m}$
 $S5v = 2,158 \mu\text{m}$
 $Sda = 0,0002902 \text{ mm}^2$
 $Sha = 0,0003825 \text{ mm}^2$
 $Sdv = 9,425e-009 \text{ mm}^3$
 $Shv = 1,005e-008 \text{ mm}^3$



Widok powierzchni 3D

Źródło: Opracowanie własne
 Source: Elaboration of the Author

Tab. 5. Wyniki badań stereometrii powierzchni po obróbce przetłoczno-ściernej
 Tab. 5. Results of the surface stereometry investigation after Abrasive Flow Machining

 <p style="text-align: center;">Mapa warstwicowa</p>	<p><i>Parametry wysokościowe:</i></p> <p>$Sa = 0,8749 \mu\text{m}$ $Sq = 1,122 \mu\text{m}$ $Sz = 8,314 \mu\text{m}$ $Ssk = -0,4235$ $Sku = 3,717$ $Sp = 3,531 \mu\text{m}$ $Sv = 4,783 \mu\text{m}$</p> <p><i>Parametry funkcyjne:</i></p> <p>$Smr = 0,6789 \%$ $Smc = 1,364 \mu\text{m}$ $Sxp = 2,489 \mu\text{m}$</p> <p><i>Parametry przestrzenne:</i></p> <p>$Sal = 0,03593 \text{ mm}$ $Str = 0,09358$ $Std = 92,75^\circ$</p> <p><i>Parametry hybrydowe:</i></p> <p>$Sdq = 0,413$ $Sdr = 7,553 \%$</p> <p><i>Parametry funkcyjne (objętościowe):</i></p> <p>$Vm = 4,627e-005 \text{ mm}^3/\text{mm}^2$ $Vv = 0,00141 \text{ mm}^3/\text{mm}^2$ $Vmp = 4,627e-005 \text{ mm}^3/\text{mm}^2$ $Vmc = 0,0009742 \text{ mm}^3/\text{mm}^2$ $Vvc = 0,001257 \text{ mm}^3/\text{mm}^2$ $Vvv = 0,0001529 \text{ mm}^3/\text{mm}^2$</p>
 <p style="text-align: center;">Krzywa nośności powierzchni</p> <p>$Sr1 = 8.784 \%$ $Sr2 = 88.38 \%$ $Sa1 = 39113 \mu\text{m}^3/\text{mm}^2$ $Sa2 = 84600 \mu\text{m}^3/\text{mm}^2$</p>	<p><i>Parametry cech:</i></p> <p>$Spd = 3790 \text{ 1}/\text{mm}^2$ $Spc = 354,4 \text{ 1}/\text{mm}$ $S10z = 6,956 \mu\text{m}$ $S5p = 3,361 \mu\text{m}$ $S5v = 3,595 \mu\text{m}$ $Sda = 0,0002331 \text{ mm}^2$ $Sha = 0,0002605 \text{ mm}^2$ $Sdv = 1,831e-008 \text{ mm}^3$ $Shv = 1,726e-008 \text{ mm}^3$</p>
 <p style="text-align: center;">Widok powierzchni 3</p>	

Źródło: Opracowanie własne
 Source: Elaboration of the Author

Obrazy (mapa warstwowa i widok 3D) powierzchni wykazały, że powierzchnie po obróbce przetłoczno-ścierniej są nieco bardziej gładkie i równe, mają nieco mniejszą wartość parametru Sa . Z pokazanych w tablicach 4 i 5 obrazów widać, że powierzchnie obrabiane metodą przetłoczno-ścierną wykazują różnice topograficzne w stosunku do powierzchni toczonej. W tych ostatnich widać nieco większe nierówności, charakterystyczne dla toczenia. Aczkolwiek analizując wyniki pomiarów parametrów amplitudowych Sa i Sz nie obserwuje się zbyt dużych ich różnic, to jednak widać, że po obróbce przetłoczno-ścierniej nastąpiła pewna poprawa stanu powierzchni. Stąd wniosek, że proces AFM może być stosowany jako metoda wygładzania, (wyrównywania powierzchni) elementów wykonywanych ze stopu 2017A.

Wiadomo jest, że w początkowym okresie eksploatacji współpracujących elementów maszyn i urządzeń pojedyncze wniesienia mają niekorzystny wpływ na proces docierania. Z tego punktu widzenia korzystna jest jak największa gęstość i skupienie wzniesień nierówności. Gęstość wierzchołków nierówności powierzchni obrabianej przetłoczno-ściernie jest większa ($Spd = 3790$ 1/mm²) niż toczonej ($Spd = 2610$ 1/mm²). Średnia arytmetyczna krzywizna wierzchołków również jest większa ($Spc = 3790$ 1/mm). Powierzchnia po obróbce przetłoczno-ścierniej charakteryzuje się rozkładem wzniesień, o ok. 40% większym współczynniku skupienia ($Sku = 3,717$) niż powierzchnia toczone ($Sku = 2,176$). To należy uznać za cechy korzystne dla pracy powierzchni w warunkach tarcia ślizgowego ze smarowaniem.

O charakterze rozkładu rzędnych obydwu porównywanych powierzchni świadczy wartość parametru Ssk . Odzwierciedla ona zmiany stosunku materiału i pustek w funkcji wysokości [11]. Jeżeli wartość Ssk jest ujemna to odpowiada to powierzchniom o wzniesieniach płaskowierzchołkowych. W badanym przypadku powierzchnia po obróbce przetłoczno-ścierniej jest znacznie bardziej płaskowierzchołkowa. Udział nośny wierzchołków nierówności ($Smr1$) jest większy a wgłębien ($Smr2$) mniejszy w przypadku powierzchni obrabianych przetłoczno-ściernie co także należy uznać za korzystną cechę tej powierzchni.

Także krzywa nośności, posiada korzystniejszy przebieg po obróbce przetłoczno-ścierniej. Powierzchnia tak obrabiona posiada potencjalnie większą odporność na ścieranie.

Analiza zamieszczonych w tablicach 4 i 5 wyników pomiarów parametrów powierzchniowych i objętościowych oraz przestrzennych i funkcjonalnych wykazuje, że różnice między tymi parametrami dla próbek toczonej i obrabianej przetłoczno-ściernie są raczej na korzyść tych ostatnich, to jednak oczywiście zależy od charakteru przyszłej pracy tych powierzchni.

4. Wnioski

- Obróbka przetłoczno-ścierna może być stosowana do obróbki stopu aluminium 2017A i za pomocą tej metody możliwe jest osiągnięcie stereometrii powierzchni obrabianej podobnej do otrzymywanej po toczeniu wykańczającym tego stopu.
- Przy podobnych wartościach parametrów amplitudowych chropowatości powierzchni, po obróbce przetłoczno-ścierniej uzyskuje się niektóre niestandardowe parametry stereometrii powierzchni lepsze niż po toczeniu wykańczającym

Literatura

- [1] Bremerstein T., Annegret Potthoff A., Michaelis A., Schmiedel Ch., Uhlmann E., Blug B., Amann T.: *Wear of abrasive media and its effect on abrasive flow machining results*, *Wear*, 2015, No. 342-343, pp. 44-51.
- [2] Dash R., Maity K.: *Simulation of abrasive flow machining process for 2D and 3D mixture models*, *Frontiers of Mechanical Engineering*, Springer, 2015, No 10, Z. 4, pp. 424-432.
- [3] Davies P.J., Fletcher A.J.: *The assessment of the rheological characteristics of various polyborosilixane/grit mixtures as utilized in the abrasive flow machining*, *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers* 1995, 209, pp. 409-418.
- [4] Gorana V.K., Jain V.K., Lal G.K.: *Experimental investigations into cutting forces and active grain density during abrasive flow machining*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Elsevier, 2004, pp. 201-211.
- [5] Jain R.K., Jain V.K., *Specific energy and temperature determination in abrasive flow machining process*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Elsevier, 2001, Nr 41, pp. 1689-1704.
- [6] Jain V.K., Adsul S.G.: *Experimental investigations into abrasive flow machining*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Elsevier, 2002, No. 40, pp. 1003 – 1021.
- [7] Jung D., Wang W.L., Knafl A., Jacobs T.J., Hu S.J., Assanis D.N.: *Experimental investigation of abrasive flow machining effects on injector nozzle geometries, engine performance, and emissions in a diesel engine*, *International Journal of Automotive Technology* 2008, Vol. 9, No. 1, pp. 9-15.
- [8] Kenda J., Pušavec F., Kopac J.: *Modeling and Energy of Abrasive Flow Machining on Tooling Industry Case Study*, *Procedia CIRP*, Elsevier, 2014, Nr 13, pp. 13-18.
- [9] Loveless T.R., Willams R.E., Rajurkar K.P.: *A study of the effects of abrasive flow finishing on various machined surfaces*, *Journal Material Processing Technology* 1994, 47, pp.133-151.
- [10] Mali H.S., Manna A.: *Optimum selection of abrasive flow machining conditions during fine finishing of Al/15 wt% SiC-MMC using Taguchi method*, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2010, 50, pp.1013-1024.
- [11] Oczóś K.E., Liubimov V.: *Struktura geometryczna powierzchni. Podstawy klasyfikacji z atlasem charakterystycznych powierzchni kształtowych*. Rzeszów: Oficyna Wyd. Politechniki Rzeszowskiej, 2003, s. 65, 74-75.
- [12] Uhlmann E., Doits M., Schmiedel C.: *Development of a material model for visco-elastic abrasive medium in abrasive flow machining*. *Procedia CIRP* 8 (2013) 351 – 356.
- [13] Wan S., Ang Y.J., Sato T., Lim G.C.: *Process modeling and CFD simulation of two-way abrasive flow machining*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2014, 71, pp. 1077-1086.
- [14] Żeglicki W., Korzyńska K., Palczak A.: *Abrasive flow machining*, [in:] Korzyński M.: *Non-conventional finishing technologies*. Warsaw: Polish Scientific Publishers - PWN 2013, pp. 141-158.