



Właściwości tribologiczne warstwy wierzchniej po obróbkach wykończeniowych stopu aluminium

Tribological properties of aluminium alloy surface layer after finishing treatments

JANUSZ KALISZ*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.7.63>

Przedstawiono wyniki badań struktury geometrycznej powierzchni i właściwości tribologicznych stopu aluminium EN AW-AlCu4MgSi(A) po różnych obróbkach wykończeniowych: szlifowaniu, polerowaniu i nagniataniu tocznym. Do badania odporności na zużycie ściernie oraz wyznaczenia współczynnika tarcia użyto testera T-01M. Testy przeprowadzono w warunkach tarcia suchego, metodą *ball-on-disc*. Jako przeciwpróbkę zastosowano polerowaną kulkę z ceramiki Al_2O_3 o średnicy $\varnothing 6$ mm. Po nagniataniu uzyskano w badaniach tribologicznych około dwukrotne zmniejszenie wskaźnika zużycia objętościowego w porównaniu ze szlifowaniem i polerowaniem. W zależności od rodzaju obróbki powierzchniowej współczynniki tarcia wynoszą: 0,45 po szlifowaniu, 0,34 po polerowaniu i 0,32 po nagniataniu tocznym.

SŁOWA KLUCZOWE: nagniatanie toczne, szlifowanie, polerowanie, właściwości tribologiczne, chropowatość powierzchni

Investigation's results of the surface geometric structure and tribological properties of the aluminum alloy EN AW-AlCu4MgSi(A) processed by various finishing treatments: grinding, polishing and ball burnishing are presented in the paper. The test of abrasive resistance and friction coefficient determination was carried out by usage of the T-01M tester. The tests were carried out under dry friction conditions using the ball-on-disc method. As a counter-sample, a polished Al_2O_3 ceramic ball with a diameter of 6 mm was used. After burnishing, comparing to grinding and polishing, an approximate twice reduction of the volume wear rate was obtained. Depending on the type of surface treatment mean friction coefficients are 0.45 after grinding, 0.34 after polishing and 0.32 after ball burnishing.

KEYWORDS: ball burnishing, grinding, polishing, tribological properties, surface roughness

Jedną z głównych cech jakości technologicznej części maszyn jest ich odporność na zużywanie się, najczęściej determinowana właściwościami ich warstwy wierzchniej, a zwłaszcza strukturą geometryczną powierzchni, twardością materiału i stanem naprężeń własnych pozostałych po obróbkach. Odpowiednie właściwości warstwy wierzchniej części maszyn kształtowane są najczęściej w procesach obróbki mechanicznej, nierzadko poprzedzonej obróbką cieplną, a niekiedy – ciepłno-chemiczną. Istotny wpływ na zużywanie się części maszyn mają

m.in. chropowatość powierzchni oraz twardość warstwy wierzchniej [1, 8].

Właściwości warstwy wierzchniej części maszyn mogą być kształtowane m.in. za pomocą obróbki wykończeniowej nagniataniem. Polega ona na miejscowym odkształcaniu plastycznym na zimno przedmiotu poprzez siłowe i kinetyczne współdziałanie gładkiego narzędzia z powierzchnią obrabianą. Uzyskane w tym procesie przemieszczenie nierówności i zgniot powierzchni powodują zmniejszenie chropowatości powierzchni i zwiększenie udziału materiałowego jej profilu, a także umocnienie warstwy wierzchniej materiału i uzyskanie w niej korzystnego stanu naprężeń (naprężeń ściskających). To z kolei przekłada się na zwiększenie odporności powierzchni na ścieranie i trwałości pasowania współpracujących części, umożliwienie przenoszenia większych nacisków powierzchniowych oraz poprawę wytrzymałości zmęczeniowej [2–6, 9].

Mając na uwadze zastosowanie stopów aluminium w branży motoryzacyjnej i lotniczej, jedną z ważnych cech użytkowych są właściwości tribologiczne tych stopów. Znajomość charakterystyk tribologicznych jest istotna podczas projektowania, doboru materiału i technologii produkcji części maszyn [3, 6, 7]. Dlatego celem opisywanych badań była charakterystyka tribologiczna wybranego gatunku stopu aluminium EN AW-AlCu4MgSi(A), wykorzystywanego w tych gałęziach przemysłu.

Badania stopu przeprowadzono w stanie po wykończeniowej obróbce powierzchniowej zgniotem oraz – dla porównania – po szlifowaniu i polerowaniu. Badano odporność na zużycie ściernie i dynamiczny współczynnik tarcia. Należy zaznaczyć, że nagniatanie jest obróbką bez wiórów i pyłów, o małej emisji hałasu i niskiej energochłonności, a zatem – ekologiczną.

Metodyka badań

Celem badań było wyznaczenie podstawowych właściwości tribologicznych stopu EN AW-AlCu4MgSi(A) w stanie utwardzenia T451 (z atestem hutniczym 3.1). Z tego stopu produkuje się elementy konstrukcyjne samolotów, maszyn, sprzętu wojskowego oraz podzespoły dla przemysłu motoryzacyjnego. Charakteryzuje się on wysoką wytrzymałością na rozciąganie oraz wysoką wytrzymałością zmęczeniową.

W tabl. I przedstawiono skład chemiczny, a w tabl. II podano właściwości mechaniczne badanego stopu aluminium.

* Dr inż. Janusz Kalisz (janusz.kalisz@ios.krakow.pl) – Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania

TABLICA I. Skład chemiczny stopu EN AW-AlCu4MgSi(A) według danych producenta

Ti %	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Zn %	Ti+Zr %	Inne %
0,06	0,64	0,04	4,2	0,95	0,76	0,04	0,17	0,06	0,03

TABLICA II. Właściwości stopu EN AW-AlCu4MgSi(A) według danych producenta

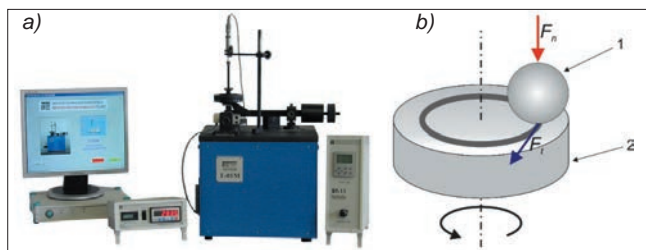
Wytrzymałość na rozciąganie R_m MPa	Granica plastyczności $R_{p0.2}$ MPa	Wydłużenie A_5 %	Twardość HB	Gęstość g/cm^3
445	292	17	110	2,80

W ramach badań tribologicznych określano odporność na zużycie ścierne i dynamiczny współczynnik tarcia dla stopu. Użyto próbki po nagniataniu tocznym narzędziem z dociskiem sprężystym z elementem nagniatającym z ceramiki azotkowej oraz – dla porównania – próbki po szlifowaniu i polerowaniu. Obróbkom wykończeniowym i badaniom poddano powierzchnie czołowe próbek.

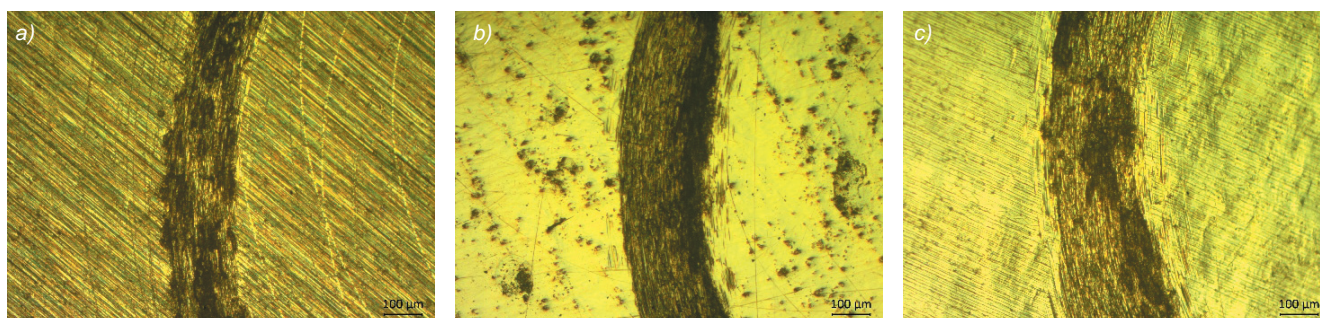
Proces nagniatania realizowano w jednym przejściu z zastosowaniem wykonanego w IZTW nagniataka tocznego z ceramicznym elementem nagniatającym (Si_3N_4) w kształcie kulki o promieniu 4 mm. Próby nagniatania przeprowadzono ze stałym dosunięciem 0,3 mm (ugięciem sprężyny nagniataka po zetknięciu się jego elementu roboczego z powierzchnią obrabianą), posuwem roboczym $f_t = 8000$ mm/min, siłą nagniatania $F_n = 50$ N i posuwem wierszowania $f_{wn} = 0,02$ mm [3, 4].

Szlifowanie wykonano na szlifierce do płaszczyzn, ściernicą z regularnego azotku boru o wielkości ziarna B46. Natomiast polerowanie przeprowadzono w zawieszinie diamentowej DiaPro Mol R 3 μ m na szlifierko-polerce Roto-Pol 21 firmy Struers, z prędkością obrotową 150 obr/min.

Badania tarciovo-zużyciowe w ruchu obrotowym próbki wykonano na sucho w styku kula–tarcza, na triboteście T-01M (rys. 1). Przestrzegano wymagań określonych w normach ASTM G 99-05, ISO 20808:2004. Jako przeciwpróbkę zastosowano polerowaną kulkę z ceramiki Al_2O_3 o średnicy $\varnothing 6$ mm. W każdym teście próbka współpracowała z nową powierzchnią kulki. Kulkę każdorazowo myto w acetonie i po wysuszeniu umieszczano w uchwycie mocującym. Powierzchnie próbek myto w alkoholu i pozostawiano do całkowitego wysuszenia.



Rys. 1. Stanowisko badawcze (a) oraz skojarzenie testowe w próbie ball-on-disc (b): 1 – przeciwpróbka (kulka Al_2O_3), 2 – próbka



Rys. 2. Przykładowe powierzchnie po teście zużycia próbek: a) szlifowanej, b) polerowanej, c) nagniatanej

Pozostałe parametry badań: obciążenie $F_n = 0,25$ N, prędkość obrotowa $n = 120$ obr/min, liczba cykli $N = 2000$, promień toru tarcia $r = 3$ mm. Testy wykonano w temperaturze otoczenia $22 \pm 2^\circ C$, przy wilgotności względnej 60%.

Dynamiczny współczynnik tarcia μ obliczono ze wzoru:

$$\mu = \frac{F_t}{F_n}$$

gdzie: F_t – wyznaczona siła tarcia, F_n – siła normalna.

Odporność na zużycie wyznaczono na podstawie pomiarów wielkości profilu bruzdy (wytarcia) powstałej po tarcu kulką. Geometria bruzdy została zmierzona w czterech miejscach obwodu toru tarcia (co 90°), poprzecznie do kierunku ruchu (ślizgania). Wskaźnik zużycia objętościowego wyznaczono według zależności:

$$W_s = \frac{V}{F_n \cdot L}$$

gdzie: V – objętość zużytego materiału, L – droga tarcia.

Pomiary profilu toru tarcia wykazały obecność znacznej wielkości wypiętrzeń materiału próbki, zlokalizowanych po obu stronach bruzdy. Ponieważ wielkość tych wypiętrzeń dla wszystkich próbek stanowi $15 \pm 20\%$ wielkości bruzdy, uwzględniono ich udział przy obliczaniu wskaźnika zużycia. Objętość zużytego materiału V stanowi objętość bruzdy pomniejszoną o objętość wypiętrzeń.

Chropowatość powierzchni po szlifowaniu, polerowaniu i nagniataniu tocznym mierzono za pomocą stykowego profilometru TOPO 01P (konstrukcji IZTW). Przyrząd był wyposażony w głowicę pomiarową o zakresie 1 mm, z końcówką diamentową o promieniu 2 μ m oraz kącie stożka 60° . Stan geometryczny warstwy wierzchniej określono przez pomiar parametrów chropowatości powierzchni w układzie 3D według norm ISO 25178 i EUR 1517 EN.

Wyniki badań

Na rys. 2 przedstawiono przykładowe powierzchnie badanych próbek po testach zużyciowych.

W tabl. III zestawiono średnie wartości wybranych parametrów chropowatości otrzymanych w trakcie badań, natomiast na rys. 3–5 przedstawiono widok izometryczny i rozkład rzędnych powierzchni badanych próbek.

Najniższe wartości parametrów chropowatości: średniej arytmetycznej wysokości powierzchni S_a , średniej kwadratowej wysokości powierzchni S_q oraz największą wysokość powierzchni S_z uzyskano po nagniataniu.

Właściwości nośne powierzchni mogą być oceniane za pomocą rozkładu parametrów przestrzennych, czyli:

TABLICA III. Średnie wartości wybranych parametrów chropowatości po szlifowaniu, polerowaniu i nagniataniu

Rodzaj obróbki	Parametry						
	Sa μm	Sq μm	Sz μm	Sk μm	Spk μm	Svk μm	Sku
Szlifowanie	0,270	0,342	3,922	0,801	0,249	0,439	3,96
Polerowanie	0,112	0,208	3,529	0,288	0,263	0,132	4,40
Nagniatanie	0,029	0,039	0,486	0,104	0,038	0,032	3,01

zredukowanej wysokości wzniesień Spk , zredukowanej wysokości rdzenia Sk i zredukowanej głębokości wgłębień Svk . Im mniejsza wartość parametru Spk , tym mniejszy naddatek na docieranie powinien być przewidziany w eksploatacji. Świadczy to także o lepszych właściwościach tribologicznych powierzchni.

Większa głębokość wgłębień Svk niż wysokość wzniesień Spk oznacza z kolei polepszenie retencji i zdolności gromadzenia płynu w pustkach wgłębień w strefie poniżej rdzenia.

Niskie wartości parametrów Sk , Spk i Svk po nagniataniu świadczą o uzyskaniu korzystnego rozkładu udziału materiałowego profilu chropowatości i o dobrych właściwościach nośnych powierzchni.

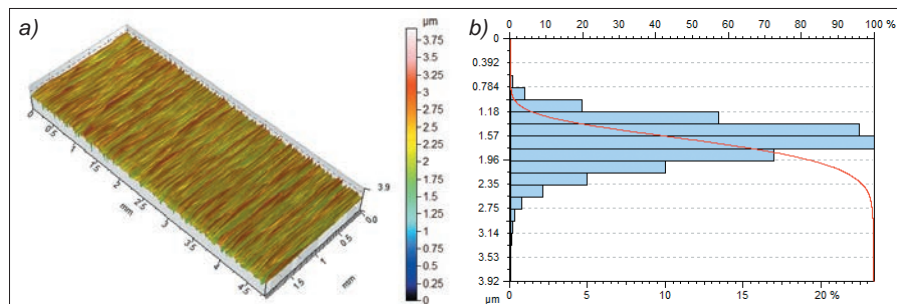
Współczynnik nachylenia powierzchni (kurtoza) Sku informuje o rozkładzie nierówności na analizowanych powierzchniach. Wartość parametru $Sku = 3$ (uzyskana po nagniataniu) wskazuje na równomierny (normalny) rozkład nierówności, w tym defektów, na powierzchni.

Im większa wartość parametru Sku , tym więcej defektów (głębokich wgłębień, wysokich wzniesień) na powierzchni. Na rys. 6 porównano przykładowe profile chropowatości po szlifowaniu, polerowaniu i nagniataniu. Po szlifowaniu otrzymano powierzchnie o specyficznych cechach geometrycznych – bardzo ostrych wierzchołkach i wgłębieniach. Nagniatanie spowodowało zmniejszenie nierówności powierzchni, ze znacznym zaokrągleniem wierzchołków i wgłębień.

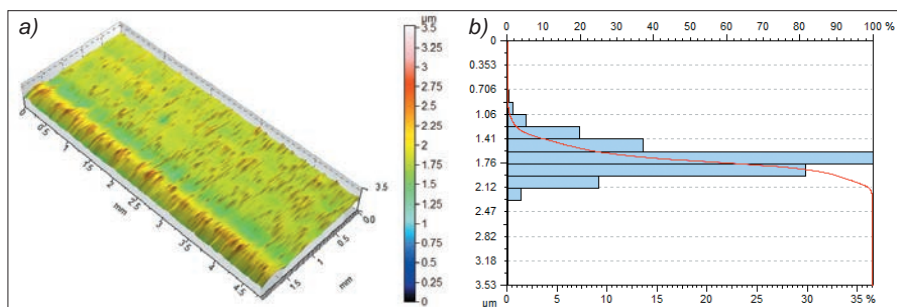
Na rys. 7 porównano dynamiczny współczynnik tarcia zarejestrowany w trakcie prób zużyciowych. Średnia wartość współczynnika tarcia po nagniataniu tocznym wyniosła 0,32 i jest niższa od wartości tego współczynnika dla powierzchni polerowanej (0,34) oraz znacznie niższa niż dla powierzchni szlifowanej (0,45). Świadczy to o korzystnym wpływie procesu nagniatania na tę właściwość tribologiczną badanego stopu aluminium.

Na rys. 8 porównano wskaźnik zużycia objętościowego po przeprowadzonym teście zużycia.

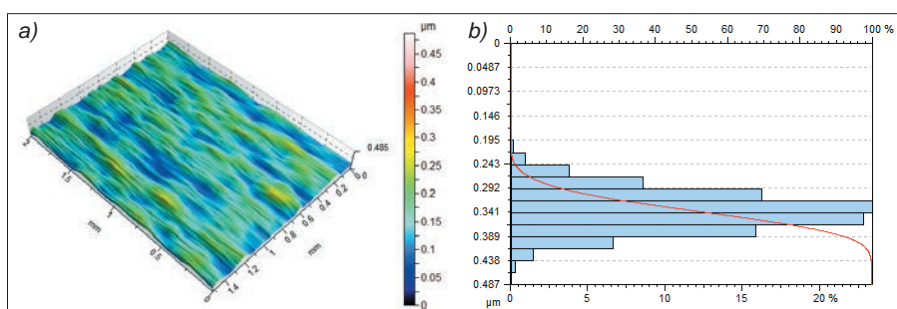
W porównaniu ze szlifowaniem i polerowaniem po nagniataniu uzyskano około dwukrotne zmniejszenie wskaźnika zużycia objętościowego. Potwierdza to korzystny wpływ nagniatania na zwiększenie odporności na zużycie elementów z badanego stopu aluminium.



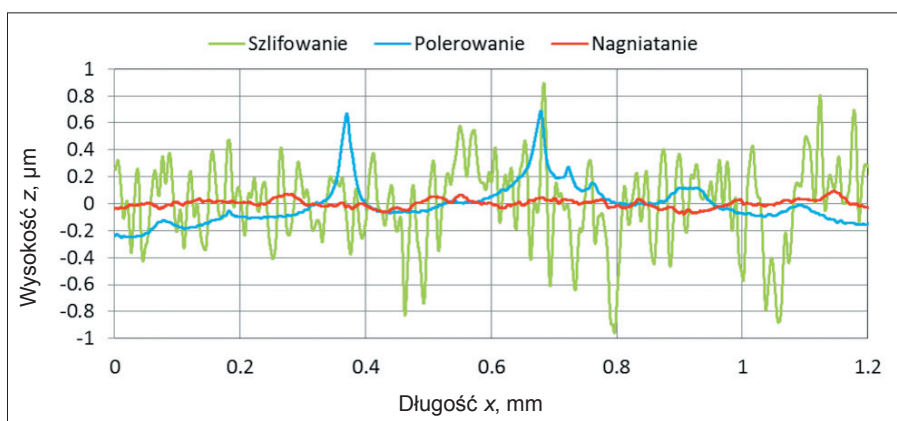
Rys. 3. Charakterystyka powierzchni po szlifowaniu: a) widok izometryczny, b) rozkład rzędnych powierzchni



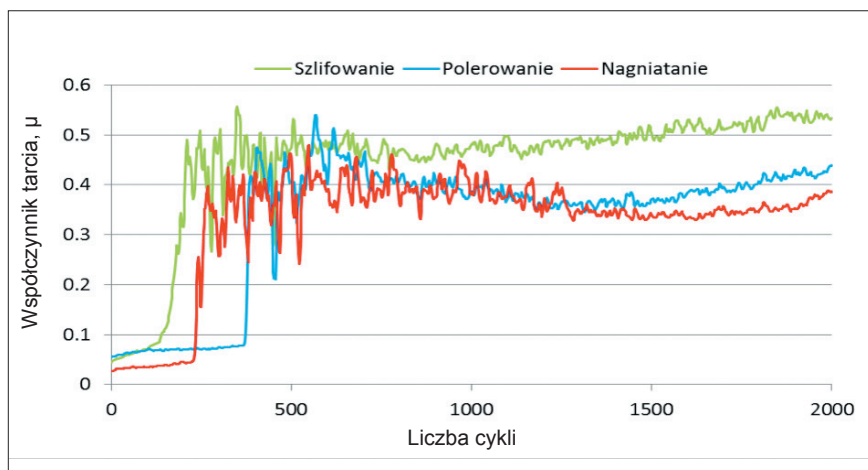
Rys. 4. Charakterystyka powierzchni po polerowaniu: a) widok izometryczny, b) rozkład rzędnych powierzchni



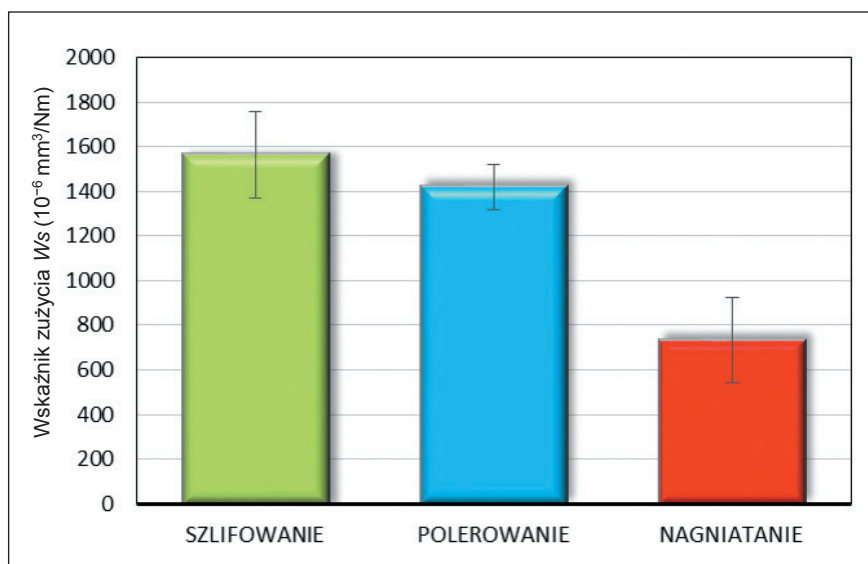
Rys. 5. Charakterystyka powierzchni po nagniataniu: a) widok izometryczny, b) rozkład rzędnych powierzchni



Rys. 6. Przykładowe profile chropowatości po szlifowaniu, polerowaniu i nagniataniu



Rys. 7. Zmiany współczynnika tarcia w trakcie próby zużyciowej przy obciążeniu 0,25 N dla powierzchni po szlifowaniu, polerowaniu i nagiataniu



Rys. 8. Porównanie wskaźnika zużycia objętościowego po szlifowaniu, polerowaniu i nagiataniu

Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały, że zastosowanie nagiatania jako obróbki wykończeniowej pozwala uzyskać powierzchnię o niskiej chropowatości i zwiększonej odporności na zużycie.

Po nagiataniu stopu aluminium EN AW-ALCu4MgSi(A) możliwe jest uzyskanie bardzo gładkiej powierzchni, o wysokiej jakości optycznej ze względu na wartość parametru S_a poniżej $0,03 \mu\text{m}$. W zależności od rodzaju obróbki powierzchniowej współczynniki tarcia wynoszą 0,45 po szlifowaniu, 0,34 po polerowaniu i 0,32 po nagiataniu tocznym. W porównaniu ze szlifowaniem i polerowa-

niem po nagiataniu uzyskano około dwukrotne zmniejszenie uzyskanego w badaniach tribologicznych wskaźnika zużycia objętościowego.

Znajomość podstawowej charakterystyki tribologicznej badanego stopu aluminium po procesie nagiatania tocznego – a zwłaszcza uzyskane korzystne wyniki w tym zakresie – stwarza możliwość poprawy właściwości użytkowych części stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym poprzez wykonanie obróbki wykończeniowej nagiataniem.

Prace badawcze zrealizowano w ramach działalności statutowej Instytutu Zaawansowanych Technologii Wytwarzania (praca DS.14-1.1).

LITERATURA

1. Przybylski W. „Technologia obróbki nagiataniem”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1987.
2. Brostow W., Cygan S., Czechowski K., Kalisz J., Laszkiewicz-Łukasik J., Łętocha A. „Tribological properties of (EN AW-ALCu4MgSi(A)) aluminium alloy surface layer after ball burnishing”. *BALTTRIB' 2015 VIII International Scientific Conference Proceedings*. 26–27 listopada 2015. Aleksandras Stulginskis University, Kaunas, Lithuania, s. 64–67.
3. El-Tayeb N.S.M., Low K.O., Brevern P.V. “Influence of roller burnishing contact width and burnishing orientation on surface quality and tribological behaviour of Aluminium 6061”. *Journal of Materials Processing Technology*. 186, 1–3 (2007): s. 272–278.
4. Kalisz J., Żak K., Grzesik W., Czechowski K. “Properties of the subsurface layer after rolling burnishing of an initially milled aluminium alloy”. *Journal of Machine Engineering*. 17, 3 (2017): s. 66–74.
5. Kalisz J., Żak K., Grzesik W., Czechowski K. “Characteristics of surface topography after rolling burnishing of EN AW-ALCu4MgSi(A) aluminium alloy”. *Journal of Machine Engineering*. 15, 1 (2015): s. 71–80.
6. Kalmegh A.P., Khodke P.M. “Review on low plasticity burnishing process: A potential for improving mechanical properties of material”. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 8, 5 (2017): s. 791–810.
7. Więckowski W., Adamus J. “Friction and wear testing of titanium and aluminium alloys”. *Obróbka Plastyczna Metali*. 24 (2013): s. 169.
8. Burakowski T. „Areologia. Podstawy teoretyczne”. Radom: Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji, 2013.
9. Hemanth S., Harish A., Nithin Bharadwaj R., Abhishek B. Bhat, Chetan Sriharsha. “Design of roller burnishing tool and its effect on the surface integrity of Al 6061”. *Materials Today: Proceedings*. 5, 5, 2 (2018): s. 12848–12854. ■

Acknowledgements

The work described in the article “Selected properties of ZrB₂ composites obtained by SPS method for parts of electro-erosion shaping machines” (MECHANIK No. 2/2018, pp.155–158) was financed by the POWROTY/2016–1/3 project carried out within the Powroty/Reintegration programme of the Foundation for Polish Science co-financed by the European Union under the European Regional Development Fund.