



Możliwości wykorzystania zjawiska anomального tarcia stopu aluminium 2017 o strukturze nanometrycznej

Anomalous friction behavior of 2017 nanostructured aluminium alloy and prospects of its utilization

(1) Hanna Wiśniewska-Weinert^{1*}, (2) Volf Leshchynsky¹, (3) Jacek Borowski¹, (4) Małgorzata Lewandowska², (5) Tomasz Wiśniewski¹

¹ Instytut Obróbki Plastycznej, ul. Jana Pawła II 14, 61-139 Poznań, Poland

² Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej, ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa, Poland

Informacje o artykule

Data przyjęcia: 1.09.2015

Data recenzji: 23.09.2015

Data akceptacji: 30.12.2015

Wkład autorów

- (1) Autor założeń i koncepcji, opracowanie metodyki i wniosków
- (2) Dokonanie obliczeń, opracowanie wykresów zależności, analiza wcześniejszych wyników, wnioski
- (3) Wykonanie badań plastyczności stopu, wyznaczenie naprężenia uplastyczniającego
- (4) Interpretacja związana ze strukturą stopów i zmianami wielkości ziaren
- (5) Opracowanie metodyki i badań tribologicznych, przedstawienie graficzne

Streszczenie

Materiały łożyskowe na bazie aluminium są szeroko stosowane w przemyśle samochodowym. Jedną ze szczególnych zalet tych materiałów jest oszczędność na masie przy użyciu stopów aluminium m. Jednakże wpływ submikro- i nanostruktury na tribologiczne zachowanie tych materiałów nie jest szczegółowo zbadane. Wpływ normalnego obciążenia i prędkości poślizgu na tarciove zachowanie nanostrukturalnego stopu aluminium na stali nie zostało jeszcze zbadane. Artykuł zawiera wyniki tribologicznego badania nanokrystalicznego stopu aluminium NC A2017. Możliwości stosowania tych materiałów, uzyskanych metodą wyciskania hydrostatycznego, w różnych zespołach ciernych, wyglądają bardzo obiecująco. Okazuje się, że stop aluminium 2017 o strukturze nanometrycznej wykazuje niskie współczynniki tarcia przy niskich obciążeniach normalnych. Z drugiej strony, stop aluminium NC A2017 można z powodzeniem kształtować w temperaturze 200°C i wyższej. Odształcenie plastyczne tego materiału powyżej 200°C powoduje zauważalny rozrost ziaren. Jednakże określone średnice ziaren są w zakresie submikronowym, nawet dla temperatury ściskania wynoszącej 300°C. Zachowanie tarciove stopu aluminium NC 2017 charakteryzuje się trzykrotnym anomalnym spadkiem współczynnika tarcia do $f=0,15$ w porównaniu z $f=0,45$ dla gruboziarnistego stopu aluminium 2017. Odporność na zużycie stopu NC 2017 jest trzykrotnie większe w porównaniu z gruboziarnistym stopem 2017. Przypuszczalną przyczyną takiego zachowania są szczególne cechy nanostruktury i zawartość wydzieleni fazowych w stopie NC 2017.

Słowa kluczowe: tarcie, stop aluminium, stop nanostrukturalny, odształcenie plastyczne

Article info

Received: 1.09.2015

Reviewed: 23.09.2015

Accepted: 30.12.2015

Authors' contribution

- (1) Author of assumptions, concept, methods and conclusions
- (2) Calculations, author of dependence charts, analysis of the previous results, conclusions
- (3) Alloy plasticity research, determination of the flow stress

Abstract

Aluminum-based bearing materials are widely used for automotive applications. One special advantage is the weight savings associated with using aluminum alloys. However, the effect of submicro- and nanostructure on the tribology behavior of these materials is not studied in detail. The effects of normal load and sliding velocity on the frictional behavior of nanostructured aluminum alloy against steel is not studied yet. The paper contains the results of tribology examination of nanocrystalline (NC) aluminum alloy NC A2017. The possibilities of use of these materials obtained by the method of hydrostatic extrusion, in various friction units look very promising. It is found the 2017 aluminum alloy with nanometric structure exhibits low friction coefficients at low normal loads. From other side the NCA2017 aluminum alloy can be successfully formed 200°C and above. Plastic deformation of the material above 200°C causes noticeable grain growth. However, the determined average grain diameters are

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 61 657 05 55; fax: +48 61 657 07 21; e-mail: weinert@inop.poznan.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 61 657 05 55; fax: +48 61 657 07 21; e-mail: weinert@inop.poznan.pl

- (4) Interpretation of alloy structure and changes in grain size
 (5) Development of method and tribological research, graphical representation of results

in the submicron range, even for compression temperature of 300°C. The friction behavior of NC 2017 Al alloy is characterized by three times anomalous fall of friction coefficient up to $f=0.15$ as compared with $f=0.45$ for coarse grained 2017 Al alloy. The wear rate of NC 2017 Al alloy is diminished by three times as compared to that of coarse grained 2017 Al alloy. The possible reason of such a behavior is the specific features of nanostructure and precipitates of NC 2017 Al alloy.

Keywords: friction, aluminum alloy, nanostructural alloy, plastic deformation

1. WPROWADZENIE

Aluminium jest atrakcyjnym materiałem stosowanym w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym i w innych gałęziach nowoczesnej gospodarki ze względu na swój niewielki ciężar, wysoką przewodność oraz dobrą odporność na korozję. Aluminium oraz stopy aluminium wykazują jednak słabe właściwości tribologiczne [1]. Podejmowano wiele prób poprawy ich właściwości tribologicznych oraz zużycia [2] poprzez m.in. wytworzenie kompozytów o strukturze nanometrycznej na bazie Al. Badania te koncentrują się przede wszystkim na umocnieniu twardymi cząstkami (Al_2O_3 , SiC lub cząstki fazy międzymetalicznej) i rozdrobnieniu ziarna [3, 4].

Materiały o strukturze nanometrycznej stanowiły w ostatnich latach przedmiot intensywnych badań ze względu na lepsze właściwości strukturalne w porównaniu z tradycyjnymi materiałami gruboziarnistymi [3]. Autorzy [1] zwracają uwagę na zużycie stopu Al_{2024} o strukturze nanometrycznej wytwarzanego metodami mechanicznego wprowadzania składników stopowych (MA) i prasowania na gorąco (HP). Wskazano, że stopień zużycia stopu Al_{2024} o strukturze nanometrycznej jest o 92,5% i 85,4% niższy od uzyskanego dla stopów, odpowiednio $Al_{2024}-O$ i $Al_{2024}-T6$.

Wiele znanych materiałów łożyskowych zawiera co najmniej dwie fazy, przy czym jedna faza jest miękka i ciągliwa, natomiast druga faza jest znacznie twardsza. Powszechnie przyjmuje się, że współdziałają one ze sobą, ponieważ miękka faza stanowi łatwo odrywaną warstwę powierzchniową, natomiast twardsza faza, wraz z twardym materiałem podkładowym, wytrzymuje normalne obciążenie. Jest to zgodne ze znanymi modelami tarcia [1], które wskazują, że tarcie można oszacować w przybliżeniu na

1. INTRODUCTION

Aluminium is an attractive material for automotive, aircraft and other applications because of its light weight, high conductivity, and good corrosion resistance. However, aluminum and aluminium alloys have poor tribological behavior [1]. Numerous efforts have been made to improve their tribological and wear behavior [2]. From this viewpoint application of Al based nanostructured composites is of prime importance. These studies mainly focused on reinforcing with hard (Al_2O_3 , SiC or intrmetallic) particles and grain refinement [3, 4].

Nanostructured materials have been the subject of intensive study over the past years because of their improved properties compared with conventional coarse-grained materials [3]. Authors [1] inform about the wear behavior of bulk nanostructured Al_{2024} alloy produced by mechanical alloying (MA) and hot pressing (HP) methods. They indicated that the wear rate of nanostructured Al_{2024} alloy is 92.5% and 85.4% lower than that obtained for $Al_{2024}-O$ and $Al_{2024}-T6$ alloys, respectively.

Many familiar bearing materials contain two or more phases, with one phase soft and ductile and another phase considerably harder. It is widely assumed that they work well because the softer phase provides an easily sheared surface layer while the harder phase, together with a hard backing material, supports the normal load. This would be consistent with familiar friction models [1] which indicate that friction can be roughly estimated by the ratio of a shear stress to a hardness or yield pressure. The continuity and distribution of the phases in

podstawie stosunku naprężenia ścinającego do twardości lub naprężenia uplastyczniającego. Istotne znaczenie mają ciągłość i rozkład faz w materiale łożyskowym [1]. Jedne z ważniejszych parametrów tribologicznych materiałów łożyskowych to: dobra współpraca przylegających powierzchni, osadzanie się zanieczyszczeń w materiale łożyskowym, wytrzymałość zmęczeniowa, odporność na korozję. Trudno spełnić jednocześnie wszystkie powyższe parametry: przykładowo, faza miękka może być odpowiednio dobrana pod względem zdolności do osadzania, ale niedostateczna pod względem odporności zmęczeniowej [1].

Materiały łożyskowe na bazie aluminium wykorzystuje się powszechnie w przemyśle motoryzacyjnym. Szczególną ich zaletą jest mała masa. Autorzy [2] przyjmują, że przydatność w zastosowaniu materiału łożyskowego zależy przede wszystkim od dostępności wystarczającej ilości fazy miękkiej na powierzchni. Alternatywę stanowi stop z krzemem, który zapewnia odpowiednią wytrzymałość oraz obróbkę wykańczającą powierzchni. Nie badano natomiast szczegółowo wpływu struktury submikro- i nanometrycznej na właściwości tribologiczne tych materiałów. W ciągu ostatnich kilku lat przeprowadzone wiele badań i zaobserwowano, że tarcie i zużycie zależą od kilku parametrów, takich, jak normalne obciążenie, chropowatość powierzchni, prędkość ślizgania, wilgotność względna, smarowanie itp. Zbadano wpływ rodzaju materiału, temperatury, drgań ciernych, geometrii styku oraz wibracji na parametry tarcia i zużycia, takie jak normalne obciążenie i prędkość ślizgania [4, 5]. Okazuje się, że odporność na zużycie stopów aluminiowo-krzemowych jest większa niż w przypadku innych stopów aluminium [5]. Uważa się, że ze względu na dużą ilość zanieczyszczeń i większą chropowatość powierzchni, maleje siła tarcia. Przy obciążeniach w zakresie od mikro- do nanonewtonów współczynnik tarcia może być bardzo niski, gdy powierzchnie styku są bardzo gładkie [5]. Dotychczas nie badano wpływu normalnego obciążenia i prędkości ślizgania na właściwości cierne stopu aluminium o strukturze nanometrycznej w porównaniu ze stałą.

the bearing material are important [1]. The important tribological parameters of the bearing materials are followings: compatibility with the counterpart, ability of a wear debris to be embedded into bearing material, fatigue strength, corrosion resistance and others. Some of these characteristics are conflicting. For example, a soft phase might be good for embeddability and conformability but poor for fatigue resistance [1].

Aluminum-based bearing materials are widely used for automotive applications. One special advantage is the weight savings associated with using aluminum alloys. Authors [2] assume that the effectiveness of the bearing material depends mainly on the availability of adequate amounts of a soft phase at the surface. An alternate approach is to alloy with silicon, which provides strength and may help conformability and maintenance of an appropriate surface finish. However, the effect of submicro- and nanostructure on the tribology behavior of these materials is not studied in detail. In the past few years, numerous investigations have been carried out, and it was observed that friction and wear depend on several parameters such as normal load, surface roughness, sliding velocity, relative humidity, lubrication etc. The influence of type of material, temperature, stick-slip, contact geometry and vibration on the friction and wear parameters such as a normal load and sliding velocity were studied [4, 5]. It is found the wear resistance of Si aluminum alloys is higher than that of the other aluminum alloys [5]. It is believed that due to a large amount of wear debris and increased surface roughening, friction force decreases. At loads from micro to nanonewton range, friction coefficient may be very low when the contacting surfaces are very smooth [5]. However, the effects of normal load and sliding velocity on the frictional behavior of nanostructured aluminum alloy against steel is not studied yet.

Utwardzanie wydzieleniowe stopów Al daje możliwości osiągnięcia nie tylko wysokiej wytrzymałości i ciągliwości dzięki tworzeniu nanostruktur pod wpływem silnych odkształceń plastycznych (SPD) i odpowiedniej metody obróbki cieplnej [6]. Można przyjąć, że zastosowanie tych stopów korzystnie wpłynie na parametry tarcia i zużycia ze względu na ich większą stabilnością temperaturową. Ostatnie badania wskazują, że obróbka SPD w temperaturze pokojowej (RT) utwardzanego wydzieleniowo stopu Al-Mg-Si (w stanie przesyconym) spowodowała wydzielenie się w wyniku naprężenia cząstek drugiej fazy ze względu na dużą ilość defektów powstałych w trakcie odkształcania i w rezultacie większą gęstość miejsc zarodkowania [7]. Głównym celem optymalizacji technologii jest wyeliminowanie dynamicznego i statycznego odprężenia elastycznego i rekrytalizacji w celu zachowania wysokich właściwości mechanicznych elementów wykonanych z tych stopów. Celem niniejszego opracowania jest zbadanie wpływu nanostruktury stopu aluminium A2017 na tarcie suche.

2. WYKONANIE BADAŃ

Poddany badaniom stop 2017 otrzymywano w postaci walcowanych sztab i wyciskanych hydrostatycznie walcówek (stop Al 2017 o strukturze nanometrycznej), których skład chemiczny przedstawiono w tab. 1. Materiał wyciskano hydrostatycznie w 4 przejściach przy rzeczywistym odkształceniu skumulowanym 3,79, počawszy od kęsa o średnicy zewnętrznej równej 20 mm, formując okrągły drut o średnicy 3 mm. Wyciskanie prowadzono na prasie do wyciskania hydrostatycznego Unipress do maksymalnego ciśnienia 1,7 GPa. Szybkość odkształcania przy wyciskaniu wzrosła od 1,87 s⁻¹ w pierwszym przejściu aż do 1,42 x 10² s⁻¹ w ostatnim przejściu. Ponadto użyto wyciskanej walcówki z czystego Al (Al o strukturze nanometrycznej) dla porównania wyników badań.

The precipitation hardening Al alloys offer possibilities for achieving not only high strength and ductility through SPD nanostructuring and subsequent heat treatment approach [6]. It is reasonable to assume that tribological application of these alloys will allow to increase friction and wear parameters due to their higher temperature stability. Recent studies indicate that the SPD processing at room temperature (RT) of precipitation hardening Al-Mg-Si alloy (in supersaturated condition) resulted in strain-induced precipitation of second phase particles due to the large number of defects generated during deformation and consequently higher density of nucleation sites [7]. The main goal of the technology optimization is suppression of dynamic and static recovery and recrystallization to preserve the high mechanical properties of the components made of these alloys. So, the aim of this paper is to study the influence of the nanostructure of A2017 aluminum alloy on its dry friction behavior.

2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

The experimental 2017 alloy was received as rolled bars and hydrostatic extruded rods (nanostructured 2017 Al alloy), which chemical composition is shown in the Tab. 1. The material was hydrostatically extruded in 4 passes with cumulative true strain 3.79 from starting billet with OD=20 mm to form a round wire of 3 mm in diameter. Extrusion was performed at Unipress hydroextrusion press operating to maximum pressure 1.7 GPa. The extrusion strain rate increased from 1.87 s⁻¹ in the first pass up to 1.42 x 10² s⁻¹ in the last one. Additionally the pure Al extruded rod (nanostructured Al) was used for comparison of the test results.

Tab. 1. Skład chemiczny stopu aluminium 2017 o strukturze nanometrycznej

Tab. 1. Chemical composition of nanostructured 2017 aluminium alloy

% wagowych / Weight %	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
2017	Reszta / Rem	0,22	0,7	4,1	0,40	0,45	0,10	0,22	0,14

Cylindryczne próbki do prób jednoosiowego ściskania obrobiono z materiałów w stanie otrzymanym w kierunku wyciskania/walcowania. Wymiary próbek są następujące: średnica – 3 mm, a wysokość – 5 mm. Próby ściskania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Instron wyposażonej w elektryczny piec oporowy w temperaturach 20, 100, 150, 200, 250, 300°C. Zastosowano szybkości odkształcenia wynoszące 0,01, 0,001, 0,0001 s⁻¹. Rzeczywiste wartości naprężenia rejestrowano czujnikiem obciążenia wysokiej dokładności (model HBM), zaś przemieszczenia rejestrowano precyzyjnym indukcyjnym czujnikiem przemieszczeń. Wykres przemieszczenia od obciążenia rejestrowano komputerem. Mikrostrukturę próbek zbadano za pomocą transmisyjnego mikroskopu elektronowego (TEM – Jeol 1200).

Właściwości tarcia i zużycia próbek zbadano przy użyciu przyrządu do badań typu „trzcienie-tarcza” T10 zgodnie z normą ASTM G99. Użyto stalowej tarczy SW7 o średnicy 70 mm (twardość 780 HV). Próbkę trzcienia o średnicy 6 mm były wykonane ze stopu 2017 obrabianego zgodnie z powyższym procesem obróbkowym. Zwykle w próbie zużycia typu „trzcienie-tarcza” badany materiał był zwykle używany jako trzcienie. Próbkę stopu A2017 miały mniejszą twardość w porównaniu ze stalową częścią współpracującą. Dlatego, gdy trzcienie jest wykonane ze stopu A2017, zużyty materiał gromadzi się w postaci zadziórów na powierzchni trzcienia ze stopu A2017 o małym polu powierzchni. Zjawisko to skutkuje znacznymi błędami przy pomiarze ciężaru trzcienia. W takim przypadku współczynnik tarcia wyznacza się natomiast z większą dokładnością w pierwszych etapach próby tarcia. W związku z tym ta konfiguracja testowa wydaje się być bardziej odpowiednia. Próby zużycia przeprowadzono w temperaturze pokojowej na powietrzu, przy wilgotności względnej 30–40%. Stosowane obciążenia wynosiły 20-25-30N, pręd-

The cylindrical specimens for uniaxial compression testing were machined from as-received materials in extrusion/rolling direction. The sample dimensions are the followings: diameter – 3 mm and height – 5 mm. The compression tests were carried out with Instron testing machine equipped with electrical resistance furnace at the temperatures 20, 100, 150, 200, 250, 300°C. The strain rates of 0.01, 0.001, 0.0001 sec⁻¹ were employed. True stress values were recorded with high accuracy load cell (Model HBM) and displacements were recorded with precise displacement inductive indicator. The load-displacement diagram was recorded by computer. The microstructure of the samples was examined by means of transmission electron microscopy (TEM – Jeol 1200).

Friction and wear properties of the samples were investigated using a T10 pin-on-disk tester according to the ASTM G99. SW7N steel disc of 70 mm diameter (hardness of 780 HV) was used. Pin specimens of 5 mm diameter were made of A2017 alloy processed in accordance with above route. Usually in the pin-on-disk wear test, the material under examination is generally used as the pin. A2017 alloy samples have less hardness compared to the steel counterpart. So while pin is made of A2017 alloy, worn material is accumulated as a burr on the surface of A2017 alloy pin, which have small surface area. This effect results in significant errors of pin weight determination. However in this case the friction coefficient in determined with higher accuracy at the first stages of the friction test. Thus, this test configuration looks more applicable. Friction and wear tests were conducted at room temperature in air, under relative humidity of 30–40%. The main parameters of pin-on-disc tests are followings: applied loads – 20-25-30N, the sliding speed – 0.11 m/s and the total sliding dis-

kość ślizgania – 0.11 m/s a całkowita droga tarcia 3000 m. Współczynniki tarcia rejestrowano w sposób ciągły na drodze tarcia.

3. WYNIKI BADAŃ

3.1. Krzywe naprężenie-odkształcenie

Autorzy [8] opisują krzywe naprężenie-odkształcenie Al 2017 przy ściskaniu w temperaturze 20°C w taki sposób, że naprężenie uplastyczniające wzrasta gwałtownie do punktu maksymalnego, a następnie utrzymuje stałą wartość bez utwardzania, co objawia się wystąpieniem dynamicznego zmiękczenia.

Naprężenie uplastyczniające przy odkształceniu $\epsilon=0,05$ oraz naprężenie maksymalne przedstawiono w zależności od temperatury odkształcania na rys. 1. Poziom naprężenia uplastyczniającego i naprężenia maksymalnego maleją wraz ze wzrostem temperatury i spadkiem szybkości odkształcania. Maksymalne naprężenie uplastyczniające nanokrystalicznego stopu 2017 maleje wraz ze wzrostem temperatury, mimo że naprężenia uplastyczniające zarówno nanokrystalicznego stopu, jak i walcowanego stopu 2017 są znacznie wyższe niż w przypadku nanokrystalicznego Al. Gdy temperatura wzrasta, różnica między maksymalnymi naprężeniami uplastyczniającymi nanokrystalicznego stopu i zwykłego stopu 2017 maleje; natomiast odporność na ściskanie nanokrystalicznego stopu pozostaje wyższa w porównaniu z odpornością na ściskanie zwykłego stopu 2017 w podwyższonych temperaturach do temperatury 200°C. Obecność większej ilości fazy wydzielonej w niższych temperaturach odkształcania stopu Al 2017 przyczynia się również do wzrostu naprężenia uplastyczniającego. Porównanie naprężeń $\sigma_{0,05}$ wyraźnie wskazuje, że nanostruktura utworzona w nanokrystalicznym stopie Al 2017 ze względu na obecność fazy wydzielonej jest bardziej stabilna niż w przypadku nanokrystalicznego Al.

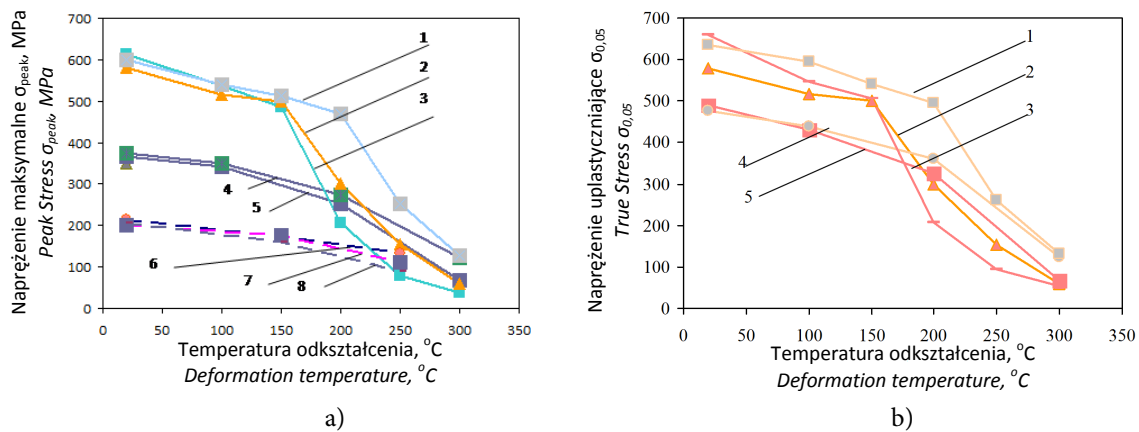
tance – 3000 m. Friction coefficients were continuously recorded with sliding distance.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Stress-strain curves

The stress-strain curves of 2017Al in compression at 20°C are described by authors [8] and show that the flow stress rises rapidly to maximum point and then maintains a steady state value without hardening that reveals about occurrence of dynamic softening.

The flow stress at the strain of $\epsilon=0.05$ and the peak stress are shown as a function of deformation temperature in Fig. 1. The flow stress level and the peak stress are decreased with the temperature increase and strain rate decrease. Although the peak flow stress of the NC 2017 alloy decreases as temperature increases, the peak flow stresses of both NC and rolled 2017 alloys are much higher than that of the NC Al. When the temperature increases, the difference of peak flow stress between NC and regular 2017 alloys becomes small; however, the compressive resistance of the NC alloy remains superior to that of regular 2017 alloy at elevated temperatures till 200°C. The presence of more precipitates at lower deformation temperatures of 2017 Al alloy also contributes to the increase of flow stress. The comparison of stress $\sigma_{0.05}$ clearly show that the nanostructure formed in NC 2017 Al alloy due to presence of precipitates is more stable as those of NC Al.

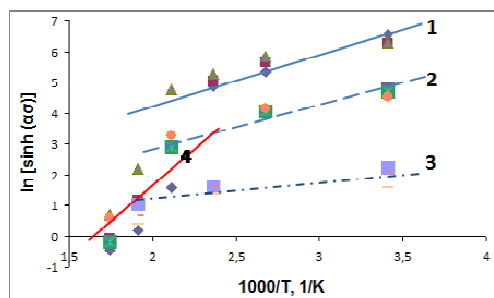


Rys. 1. Wpływ temperatury na naprężenie uplastyczniające $\sigma_{0,05}$ (a) i naprężenie maksymalne (B) dla stopu Al 2017 o strukturze nanometrycznej (1, 2, 3), zwykłego Al (4, 5) oraz Al o strukturze nanometrycznej (6, 7, 8). 1, 4, 6 — $0,01 \text{ s}^{-1}$; 2, 7 — $0,001 \text{ s}^{-1}$; 3, 5, 8 — $0,0001 \text{ s}^{-1}$

Fig. 1. Temperature dependence of flow stress $\sigma_{0,05}$ (a) and peak stress (b) for nanostructured 2017 Al alloy (1,2,3), regular Al (4,5) and nanostructured Al (6,7,8). 1,4,6- 0.01 sec^{-1} , 2,7- 0.001 sec^{-1} , 3,5,8 - 0.0001 sec^{-1}

Najbardziej interesujące jest odkształcanie materiałów o strukturze nanometrycznej w zakresie niskich temperatur, w którym pracują elementy ślizgowe. Wyniki przedstawione na rys. 2 pokazują, że nachylenie krzywej aproksymacyjnej w zakresie niskich temperatur (20–150°C) dla nanokrystalicznego stopu Al 2017 wynosi około $Q/n=15,5$. Nachylenie to jest takie same jak w przypadku walcowanego stopu Al 2017. Różne są natomiast stałe n . W związku z tym sposób energie aktywacji odkształcenia są następujące: $Q = 58,1 \text{ kJ/mol}$ dla nanokrystalicznego stopu Al 2017 oraz $Q=69,75 \text{ kJ/mol}$. Niskie wartości energii aktywacji odkształcenia objawiają się opóźnioną dyfuzją atomów substancji rozpuszczonej do rdzeni dyslokacji oraz unieruchomieniem dyslokacji [9]. W związku z tym stabilność termiczna właściwości mechanicznych nanokrystalicznych stopów w zakresie temperatur 20–150°C jest lepsza niż w przypadku zwykłych stopów. Energia aktywacji odkształcenia nanokrystalicznego Al jest dosyć niższa — $28,23 \text{ kJ/mol}$ ze względu na zjawisko słabego utwardzania struktury czystego Al.

The most of interest is the deformation behavior of nanostructured materials in low temperature region at which the real sliding components are working. The results shown on Fig. 2 reveal that the low temperature (20–150°C) approximation line slope NC 2017Al alloy is about $Q/n=15.5$. The slope is the same as for rolled 2017Al alloy. However, the constants n are different. Thus the deformation activation energies are the followings: $Q=58.1 \text{ kJ/mol}$ for NC 2017 Al alloy, and $Q=69.75 \text{ kJ/mol}$. Low values of the deformation activation energy reveal about retarded diffusion of solute atoms to the dislocation cores and pinning the dislocations [9]. Thus the thermal stability of mechanical properties of the NC alloys in the temperature range of 20–150°C is better than those of regular ones. The deformation activation energy for NC Al is quite lower – 28.23 kJ/mol because of low hardening effects of the pure Al structure.



Rys. 2. Wyznaczanie energii aktywacji dla nanokrystalicznego stopu Al 2017 (1), walcowanego stopu Al 2017 (2) i nanokrystalicznego Al (3) w zakresie niskich temperatur oraz aproksymacja liniowa w zakresie wysokich temperatur (4) [8]

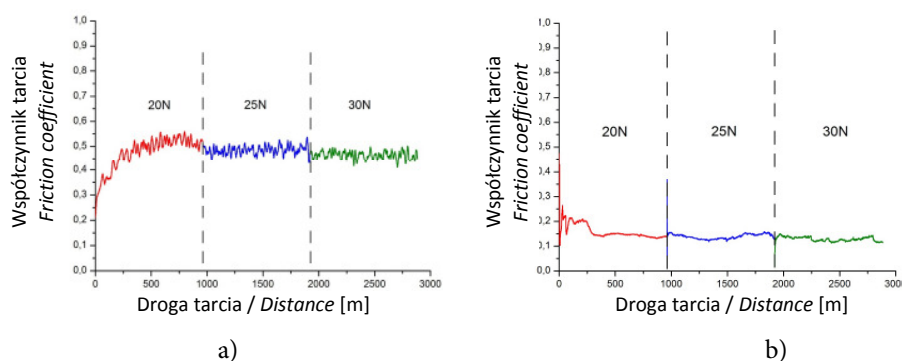
Fig. 2. Activation energy determination for NC 2017 Al alloy (1), rolled 2017 Al alloy (2) and NC Al (3) for low temperature region, and line approximation for high temperature region (4) [8]

3.2. Wyniki badań tarciovo-zużyciowych

Na rys. 3 przedstawiono wartość współczynnika tarcia (WT) w funkcji drogi tarcia przy zastosowaniu różnych obciążeń normalnych (20, 25 i 30 N) dla próbek ze stopu aluminium 2017 (rys. 3a) i nanokrystalicznego (NC) stopu 2017 (rys. 3b). Porównanie wykresów wykazuje, że współczynnik tarcia dla stopu 2017NC na początku testu wynosi około $f=0,2-0,3$ a po okresie dotarcia (droga tarcia około 200 m) obniża się do wartości $f=0,15$. Dla próbki odniesienia 2017 WT zamyka się w zakresie od $f=0,45-0,55$. Wzrost normalnego obciążenia nie wpływa na WT w obu przypadkach. Można zauważyć, że WT stopu odniesienia 2017 wynoszący $f=0,45-0,55$ charakteryzuje się podobnymi wartościami współczynnika tarcia jak dla stopów Al, przedstawionych w [3].

3.2. Friction and wear tests results

Fig. 3 shows the variation of the coefficient of friction (COF) of the samples as a function of the sliding distance at different applied normal loads (20, 25 and 30 N) for reference A2017 alloy (Fig. 3a) and nanocrystalline (NC) A2017 alloy (Fig. 3b). A comparison of the diagrams demonstrates that the friction coefficient at a start of the test is about $f=0.2-0.3$. However, the COF of A2017 NC alloy after running period (sliding distance about 200 m) falls up to $f=0.15$ whilst reference sample exhibit the COF in the range of $f=0.45-0.55$. An increase of normal load does not influence on the COF in both cases. One can note that the COF of reference A2017 alloy of $f=0.45-0.55$ is similar to that for the Al alloys presented in [3].



Rys 3. Wykresy współczynnika tarcia w funkcji drogi tarcia: (a) stop odniesienia gruboziarnisty Al2017;(b) nanokrystaliczny stop Al2017

Fig. 3. Friction diagrams of pin-on-disc tests at ambient temperature (a) – reference coarse grained Al 2017 alloy; (b) – nanocrystalline Al 2017 alloy

Autorzy [3] badali zachowanie nanostrukturalnego czystego Al i stopów $\text{Al}-\text{Al}_{12}(\text{Fe},\text{V})_3\text{Si}$ zawierających 27% obj. FVS0812 i 37% fazy $\text{Al}-\text{Al}_{12}(\text{Fe},\text{V})_3\text{Si}$. Badania tarciovo-zużyciowe przeprowadzono w temperaturze pokojowej z wykorzystaniem testera typu „trzcina-tarcza”. Wyniki wykazały, że obecność fazy $\text{Al}_{12}(\text{Fe},\text{V})_3\text{Si}$ zwiększa odporność na zużycie nanostrukturalnego Al i odporność na zużycie wzrasta wraz z zawartością $\text{Al}_{12}(\text{Fe},\text{V})_3\text{Si}$. Obrazy zużytych powierzchni i produktów zużycia wykonane metodą elektronowej mikroskopii skaningowej wykazały, że tarcie ścierane i adhezja są głównymi mechanizmami zużycia nanostrukturalnego stopu FVS0812 przy obciążeniach normalnych 2 i 5 N, natomiast dla nanostrukturalnego stopu FVS1212 dominującym mechanizmem zużycia jest tarcie ścierne przy zastosowaniu tych samych obciążeń. Jednakże WT dla tych nanostrukturalnych stopów pozostaje podobny do współczynnika materiału gruboziarnistego. Dane te, wraz z wynikami doświadczalnymi pokazane są na rys. 4. Na wykresach można zaobserwować że próbka FVS1212, która zawiera 37% obj. wtrąceń $\text{Al}_{12}(\text{Fe},\text{V})_3\text{Si}$ ma najniższy WT na wszystkich obciążeniach; próbka nanokrystalicznego Al ma wartość najwyższą. Mniejszy WT próbki FVS1212 można przypisać większej twardości tej próbki, co jest zgodne z wcześniejszymi ustaleniami zmniejszania współczynnika tarcia wraz ze wzrostem twardości [3]. Na podstawie powyższego można wnioskować, że obecność wtrąceń $\text{Al}_{12}(\text{Fe},\text{V})_3\text{Si}$ obniża współczynnik tarcia stopów Al. Warto wspomnieć, że współczynnik tarcia ulegał zmianie w zależności od zastosowanego obciążenia, prawdopodobnie wskutek zmian w mechanizmie zużycia. Współczynniki tarcia uzyskane przez [3] dla nanokrystalicznych stopów $\text{Al}_{12}(\text{Fe},\text{V})_3\text{Si}$ (0,3–0,5) mieszczą się w zakresie podawanych w literaturze WT dla nanostrukturalnych stopów Al i kompozytów.

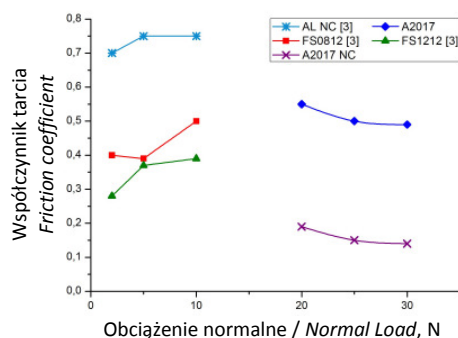
Jafari i inni [5] wyznaczyli dla nanostrukturalnego stopu 2024 współczynnik tarcia wynoszący na poziomie 0,3. Uzyskane wyniki pokazują, że współczynnik tarcia zależy od składu chemicznego i fazowego nanostrukturalnych stopów Al, a maksymalny efekt obserwuje się

Authors [3] studied a tribological behavior of nanostructured pure Al and $\text{Al}-\text{Al}_{12}(\text{Fe},\text{V})_3\text{Si}$ alloys containing 27 (FVS0812) and 37 (FVS1212) vol% of $\text{Al}_{12}(\text{Fe},\text{V})_3\text{Si}$ precipitates. Wear tests were performed at room temperature using a pin-on-disk machine. Results showed that the presence of $\text{Al}_{12}(\text{Fe},\text{V})_3\text{Si}$ precipitates increases the wear resistance of nanostructured Al, and the wear resistance is increased with $\text{Al}_{12}(\text{Fe},\text{V})_3\text{Si}$ content. Scanning electron microscopy images of worn surfaces and wear debris [3] demonstrated that abrasion and adhesion are the governing wear mechanisms for the nanostructured FVS0812 alloy at 2 and 5 N normal loads, whereas for the nanostructured FVS1212 alloy, the dominant wear mechanism is abrasion at these loads. However, the COF for these nanostructured alloys remains similar to that of coarse grained material. These data together with our experimental results are shown on Fig. 4. The graphs demonstrated that the FVS1212 sample, which contains 37 vol% of the $\text{Al}_{12}(\text{Fe},\text{V})_3\text{Si}$ precipitates, has the lowest COF at all loads, whereas the nanocrystalline Al sample has the highest value. The lower COF of FVS1212 sample can be attributed to the higher hardness value of this sample, which is in line with the previous reports of decrease in COF with increase in hardness [3]. Based on the above, it may be concluded that the presence of $\text{Al}_{12}(\text{Fe},\text{V})_3\text{Si}$ precipitates reduces the COF of Al alloys. It is worth mentioning that the COF changed slightly with changing the applied load probably because of the changes in wear mechanism. The friction coefficients obtained by [3] for the nanocrystalline $\text{Al}/\text{Al}_{12}(\text{Fe},\text{V})_3\text{Si}$ alloys (0.3–0.5) are in the range of those reported in the literature for nanostructured Al alloys and composites.

Jafari et al. [5] observed a COF of 0.3 for nanostructured A2024 alloy. Obtained results reveal that COF depend on chemical and phase composition of nanostructured Al alloys, and the maximal effect is observed for Al 2017 alloy. From our viewpoint, perhaps, differences of chemical composition of Al 2017 and Al 2024 (Si...0.50; Mg...1.2-1.8 wt%) result in change of

dla stopu 2017. Wnioskować można, że różnice składu chemicznego Al 2017 i A12024 (Si...0.50; Mg...1.2 – 1.8 % wag) skutkują zmianą zawartości wtrąceń na bazie Si i Mg i nanostrukturą stopu, która zmienia adhezyjne mechanizmy tarcia.

content of Si and Mg based precipitates and alloy nanostructure that modifies the adhesion mechanisms of friction.

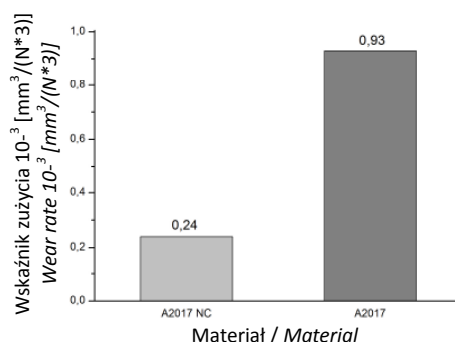


Rys. 4. Wpływ normalnych obciążeń na współczynnik tarcia gruboziarnistego i nanostrukturalnego aluminium i stopów aluminium

Fig. 4. Effect of normal loads on the friction coefficient of coarse grained and nanostructured Aluminum and Al alloys

Te szczególne cechy modyfikacji mechanizmów tarcia przez tworzenie stopów i techniki nanostrukturacji skutkują wzrostem odporności na zużycie nanokrystalicznego stopu Al2017 (rys. 5). Efekty te będą szczegółowo badane w trwających pracach.

These specific features of friction mechanisms modification by alloying and nanostructuring techniques result in increase of wear resistance of Al2017 nanocrystalline alloy (Fig. 5). These effects will be studied in detail in ongoing work.



Rys. 5. Odporność na zużycie stopu 2017 i nanokrystalicznego stopu 2017

Fig. 5. Wear rate of Al2017 alloy and Al2017 nanocrystalline alloy

4. WNIOSKI

Proces wyciskania hydrostatycznego z odkształceniem względnym 3,79 zastosowany do stopu aluminium 2017 prowadzi do znacznego rozdrobnienia ziaren do skali manometrycznej.

4. CONCLUSION

Hydrostatic extrusion process with cumulative true strain 3.79 applied to 2017 aluminum alloy leads to significant grains size refinement to the nanometric scale.

1. Zachowanie odkształceniowe stopu aluminium NC 2017 charakteryzuje się wyższą w porównaniu ze stopem regularnym stabilnością termiczną nanostrukturą w zakresie temperatur 20–150°C wskutek procesów dynamicznego starzenia odkształceniowego i wydzielenia.
2. Wartość współczynnika tarcia dla stopu aluminium NC 2017 charakteryzuje się trzykrotnym anomalnym spadkiem do wartości $f=0,15$ w porównaniu do $f=0,45$ dla gruboziarnistego stopu aluminium 2017.
3. Odporność na zużycie stopu NC 2017 jest trzykrotnie większe w porównaniu z gruboziarnistym stopem 2017.
4. Przypuszczalną przyczyną takiego zachowania są szczególne cechy nanostruktury i zawartość wydzieleni fazowych w stopie NC 2017.

1. The deformation behavior of NC 2017 Al alloy is characterized by higher thermal stability of nanostructure at the temperature range of 20-150°C due to dynamic strain aging and precipitation processes as compared with regular alloy.
2. The friction behavior of NC 2017 Al alloy is characterized by three times anomalous fall of friction coefficient up to $f=0.15$ as compared with $f=0.45$ for coarse grained 2017 Al alloy.
3. The wear rate of NC 2017 Al alloy is diminished by three times as compared to that of coarse grained 2017 Al alloy.
4. The possible reason of such a behavior is the specific features of nanostructure and precipitate content of NC 2017 Al alloy.

PODZIĘKOWANIA

Praca niniejsza została wykonana w ramach projektu NANOMET finansowanego przez Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego (Umowa nr POIG.01.03.01-00-015/08).

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was carried out within a NANOMET Project financed under the European Funds for Regional Development (Contract No. POIG.01.03.01-00-015/08).

LITERATURA

- [1] Lepper, K., James, M., Chashechkina, J., Rigney, D.A. 1997. "Sliding behavior of selected aluminum alloys." *Wear* 203–204: 4656.
- [2] Deuis, R.L., Subramanian, C., Yellup, J.M. 1997. "Dry sliding wear of aluminium composites – a review." *Composites Science and Technology* 57: 415-435.
- [3] Ashrafi, H., Enayati, M.H., Emadi, R. 2015. "Tribological Properties of Nanostructured Al/Al₁₂(Fe,V)₃Si Alloys." *Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.)* 28 (1): 83–92.
- [4] Culliton, D., Betts, A.J., Kennedy, D. 2013. "Impact of intermetallic precipitates on the tribological and/or corrosion performance of cast aluminium alloys: a short review." *International Journal of Cast Metals Research* 26 (2): 65–75.
- [5] Nuruzzaman, D.M., Chowdhury, M.A. 2013. „Friction Coefficient and Wear Rate of Copper and Aluminum Sliding against Mild Steel." *International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies* 4 (1): 28-40.

REFERENCES

- [1] Lepper, K., James, M., Chashechkina, J., Rigney, D.A. 1997. "Sliding behavior of selected aluminum alloys." *Wear* 203–204: 4656.
- [2] Deuis, R.L., Subramanian, C., Yellup, J.M. 1997. "Dry sliding wear of aluminium composites – a review." *Composites Science and Technology* 57: 415-435.
- [3] Ashrafi, H., Enayati, M.H., Emadi, R. 2015. "Tribological Properties of Nanostructured Al/Al₁₂(Fe,V)₃Si Alloys." *Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.)* 28 (1): 83–92.
- [4] Culliton, D., Betts, A.J., Kennedy, D. 2013. "Impact of intermetallic precipitates on the tribological and/or corrosion performance of cast aluminium alloys: a short review." *International Journal of Cast Metals Research* 26 (2): 65–75.
- [5] Nuruzzaman, D.M., Chowdhury, M.A. 2013. „Friction Coefficient and Wear Rate of Copper and Aluminum Sliding against Mild Steel." *International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies* 4 (1): 28-40.

- [6] Subramanya, Sarma V., Jian, W.W, Wang, J., Conrad, H., Zhu, Y.T. 2010. "Effect of rolling temperature on the evolution of defects and properties of an Al-Cu alloy." *J. Mat. Sci.* 45: 4846–4850.
- [7] Roven, H.J., Liu, M., Werenskiold, J.C. 2008. "Dynamic precipitation during severe plastic deformation of an Al–Mg–Si aluminium alloy." *Mat. Sci. and Eng. A* 483–484: 54–58.
- [8] Wiśniewska-Weinert, H., Leshchynsky, V., Borowski, J., Lewandowska, M., Kulczyk, M., Pachla W. 2012. „Deformation behavior of 2017 nanostructured aluminium alloy.” *Inżynieria Materiałowa* 33 (6): 530–534.
- [9] Rokhi, M.R., Zarei-Hanzaki, A., Roostaei, A.A., Abolhasani, A. 2011. "Constitutive base analysis of a 7075 aluminum alloy during hot compression testing." *Materials and Design* 32: 4955–4960.
- [6] Subramanya, Sarma V., Jian, W.W, Wang, J., Conrad, H., Zhu, Y.T. 2010. "Effect of rolling temperature on the evolution of defects and properties of an Al-Cu alloy." *J. Mat. Sci.* 45: 4846–4850.
- [7] Roven, H.J., Liu, M., Werenskiold, J.C. 2008. "Dynamic precipitation during severe plastic deformation of an Al–Mg–Si aluminium alloy." *Mat. Sci. and Eng. A* 483–484: 54–58.
- [8] Wiśniewska-Weinert, H., Leshchynsky, V., Borowski, J., Lewandowska, M., Kulczyk, M., Pachla W. 2012. „Deformation behavior of 2017 nanostructured aluminium alloy.” *Inżynieria Materiałowa* 33 (6): 530–534.
- [9] Rokhi, M.R., Zarei-Hanzaki, A., Roostaei, A.A., Abolhasani, A. 2011. "Constitutive base analysis of a 7075 aluminum alloy during hot compression testing." *Materials and Design* 32: 4955–4960.