

Dionizy Biało¹

Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, Instytut Inżynierii Precyzyjnej i Biomedycznej, ul. św. A. Boboli 8, 02-525 Warszawa

ROLA PRZECIWPÓRBEK W PROCESIE ZUŻYWANIA WĘZŁÓW TARCIA Z KOMPOZYTAMI ALUMINIOWYMI

Przedstawiono wyniki badań nad wpływem materiału przeciwpórbek na przebieg zużywania obu partnerów pary trącej w węzłach tarcia, tj. kompozytowych próbek i przeciwpórbek. Do badań użyto kompozytów na osnowie Al-20%Si-3%Cu-1%Mg umocnionych cząstkami Al₂O₃ w ilości 10%. Kompozyty wytworzono w procesie metalurgii proszków, wykorzystując wyciskanie na gorąco. Zastosowano przeciwpórbki z żeliwa szarego i ze stali stopowej o twardości 28, 40 i 58 HRC. Próby tarcia w układzie trzpień-tarcza przeprowadzono w następujących warunkach: $p = 0,5 \pm 3,0$ MPa, $v = 1$ m/s, tarcie technicznie suche. Wykazano, że twardość przeciwpórbek odgrywa istotną rolę w procesie zużywania kompozytowych próbek. Powierzchnie przeciwpórbek o mniejszej twardości ulegają „zbrojeniu” twardymi produktami zużycia i oddziałują ściernie na kompozytowe próbki, co prowadzi do kilkukrotnego wzrostu zużycia. Wraz ze wzrostem twardości przeciwpórbek zmienia się mechanizm zużywania kompozytu - występują łagodniejsze formy zużycia: adhezyjne i delaminacyjne. Podczas tarcia z kompozytem najmocniej zużywają się przeciwpórbki żeliwne i stalowe o małej twardości. Dla tych przeciwpórbek odnotowano najmniejsze wartości współczynnika tarcia.

Słowa kluczowe: kompozyty aluminiowe, zużycie, twardość przeciwpórbek, współczynnik tarcia

INFLUENCE OF COUNTERSAMPLES ON WEAR PROCESS OF FRICTION COUPLES WITH ALUMINIUM MATRIX COMPOSITES

The paper shows the results of investigation on influence of countersample material on wear of both partners of friction pair i.e. composite samples and countersamples. This problem is usually over-looked in scientific publications. Results of research work presented by different authors are controversial, especially with regard to the effect of countersample material, its state and processing, hardness and surface roughness. A very important problem in wear process of composite is effect of the type and hardness of the countersample on that process. This paper is going to focus on this subject. Composite material manufactured by powder metallurgy route contains Al-20%Si-3%Cu-1%Mg matrix and reinforcing phase - Al₂O₃ particles with 10% vol. fraction. Figure 1 shows the microstructure of the composite, with the visible dark particles Al₂O₃ and the grey silicon crystals in the matrix. Countersamples made of grey cast iron (210 HB) and steel with hardness of 28, 40 and 58 HRC were used. It had shape of disc with surface roughness $R_a \approx 0.32$ μ m. Tribological experiments were carried-out on the pin-on-disk apparatus at dry conditions at the following parameters: contact pressure of 0.5 ± 3.0 MPa, friction velocity of 1 m/s, friction distance of 6000 ± 12000 m. It was noticed that material and hardness of countersamples play significant role in wear process of composites. Figures 2 and 3 show the wear rate of composite samples versus sliding distance. The wear steadily increases with increasing sliding distance and is higher at higher contact pressure between the sample and countersample. With decreasing in the hardness of countersample the wear of composite is growing (Fig. 4). The highest wear rate was observed for grey cast iron countersample. On the soft countersample friction surface, local adhesive accretions areas of material transferred from the sample matrix were found (Fig. 5). Moreover the surface of the softest countersamples undergo to „reinforcing” with Al₂O₃ particles transferred from the composite during friction and act as abrasives to composite leading to few times higher wear rate (Fig. 6). For the hardest countersample build-ups on the friction surface are hardly found and only when the highest contact pressure is applied some material transfer is observed. There is not shielding of the surface by the hard particles. This results in less wear. The role of abrasion is less important and the sample surface is smoother. As a result the delamination mechanism of wear occurred. We may confirm that changing in countersamples hardness involves of several wear mechanisms: abrasive, adhesive and delamination. In Figures 6 and 7 SEM of composite worn surface undergone abrasive and delamination mechanisms of wear are shown. During friction with composite the highest wear of countersamples is occurring for countersamples made of cast iron and steel with lowest hardness (Fig. 8). For these countersamples lowest value of friction coefficient was noticed (Fig. 9).

Keywords: aluminium matrix composites, wear, countersample hardness, friction coefficient

WPROWADZENIE

W publikacjach dotyczących problemów zużywania kompozytów aluminiowych zazwyczaj pomijana jest rola przeciwpórbek - materiału, z którego je wykonano, twardości, stanu powierzchni [1, 2]. Na ogół prezentowane bywają zalety kompozytów, a szczególnie ich

większa odporność na zużycie w stosunku do osnów

[3-8]. Pomijana jest kwestia oddziaływania próbki na przeciwpórbkę. Jest to sprawa o tyle istotna, że o trwałości węzła tarcia (na którą wpływa zmiana stanu powierzchni trących, wzrost luzów w układzie czop-pa-

¹ dr hab. inż., prof nadzw.

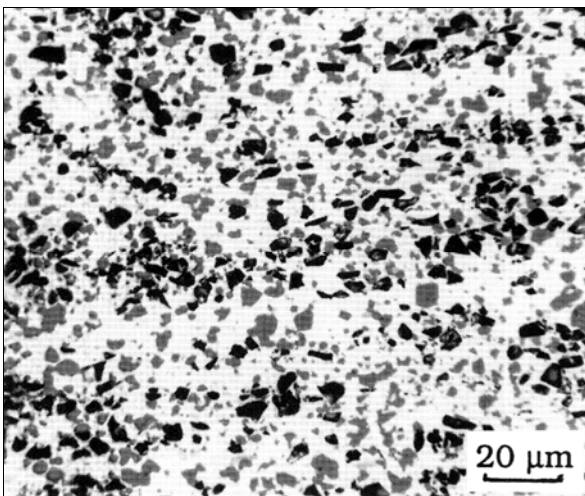
newka itp.) decyduje zużycie eksploatacyjne obu partnerów pary trącej w węźle.

W pracy [9] wykazano, że przy pewnych skojarzeniach materiałów w węźle tarcia może występować zwiększone zużywanie przeciwpórek w stopniu przekraczającym zużycie próbek z kompozytów. Ma to np. miejsce w przypadku ruchu oscylacyjnego o małej amplitudzie przemieszczeń. Produkty zużycia pozostają wtedy dłużej pomiędzy trącymi powierzchniami, co prowadzi do intensyfikacji zużycia o charakterze ściernym. W efekcie węzeł tarcia pomimo zastosowania w nim materiału kompozytowego o podwyższonej odporności na zużycie może charakteryzować obniżona trwałość.

W prezentowanej pracy badaniom tribologicznym poddano próbki z kompozytu na osnowie Al-20%Si-3%Cu-1%Mg z fazą umacniającą w postaci cząstek Al_2O_3 . Na przeciwpórkę zastosowano żeliwo szare i stal o zróżnicowanej twardości. Określono wpływ użytych materiałów przeciwpórek na przebieg zużycia kompozytu i występujące mechanizmy zużycia.

MATERIAŁ PRÓBEK

Materiał kompozytowy wytworzono w procesie metalurgii proszków. Zastosowano proszek stopowy o składzie Al-20%Si-3%Cu-1%Mg (jako materiał osnowy) i proszek tlenku glinu o przeciętnej ziarnistości 6 μm (jako fazę umacniającą) w ilości 10%. Scalanie proszków osnowy z cząstkami Al_2O_3 w kompozyt następowało w procesie wyciskania na gorąco. W tym procesie wstępnie sprasowany wsad po podgrzaniu do 450°C jest wyciskany przez otwór w matrycy w formie kompozytowego pręta. Proces przebiega w warunkach dużych ciśnień i dużych odkształceń wsadu, co prowadzi do niemal 100% zagęszczenia materiału.



Rys. 1. Mikrostruktura kompozytu Al-20%Si-3%Cu-1%Mg/10% Al_2O_3 w płaszczyźnie równoległej do kierunku wyciskania

Fig. 1. Microstructure of the composite Al-20%Si-3%Cu-1%Mg/ 10% Al_2O_3 in the plane parallel to the extrusion direction

Materiał kompozytowy poddano następnie obróbce cieplnej, obejmującej przesycaanie w temperaturze 470°C przez 1,5 godz., studzenie w wodzie i starzenie przez 4 doby w temperaturze otoczenia, a następnie w 120°C przez 24 godz. Obróbka cieplna spowodowała poprawę właściwości mechanicznych kompozytu. Twardość wzrosła z 75,0 do 88,1 HRB.

Na rysunku 1 przedstawiono mikrostrukturę kompozytu, na której widać ciemne cząstki fazy umacniającej Al_2O_3 i szare kryształy krzemu w osnowie. Struktura kompozytu charakteryzuje się pasmowym ułożeniem cząstek umacniających w kierunku wyciskania.

Podczas wykonywania próbek do badań tribologicznych przestrzegano zasady, aby powierzchnia tarcia próbek przebiegała prostopadle do kierunku wyciskania.

BADANIA TRIBOLOGICZNE

Próby tarcia i zużycia przeprowadzono na stanowisku własnej konstrukcji [10] w układzie trzpień-tarcza. Stosowano następujące warunki badań:

- nacisk p - 0,5÷3,0 MPa
- prędkość ślizgania v - 1 m/s
- droga tarcia L - 6000÷12 000 m
- środowisko - warunki otoczenia, ok. 20°C
- rodzaj tarcia - na sucho
- wymiary próbek - $\phi 5 \times 15$

Przeciwpórkę wykonano z żeliwa szarego o twardości 210 ± 5 HB i ze stali NC10. Próbki ze stali hartowano i odpuszczano do następującej twardości: 28 ± 1 HRC, 40 ± 1 HRC i 58 ± 1 HRC. Przeciwpórkę miały formę tarcz o średnicy 75 mm. Powierzchnie tarcia szlifowano do $Ra \approx 0,32 \mu m$. Tarcie próbek po przeciwpórkach odbywało się po okręgu o średnicy 60 mm.

WYNIKI BADAŃ

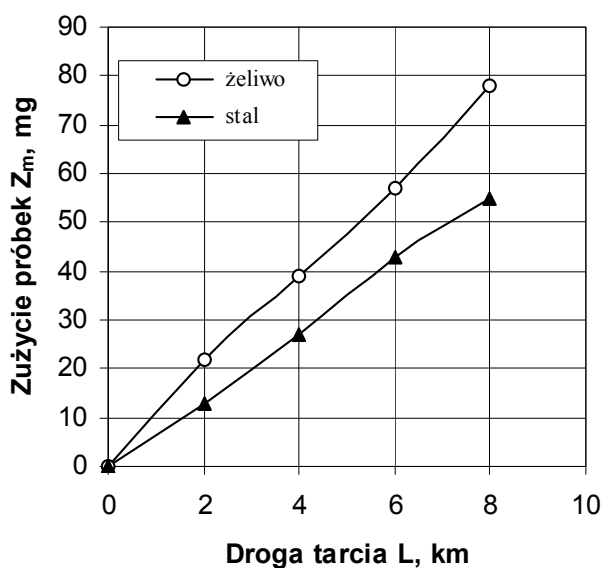
Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono wybrane wyniki badań zużycia próbek kompozytowych.

Zużycie w funkcji drogi tarcia ma charakter w przybliżeniu liniowy i rośnie ze wzrostem nacisków kontaktowych pomiędzy próbkami i przeciwpórkami.

Zależność pokazana na rysunku 4 dotyczy intensywności zużycia próbek kompozytowych przy różnych naciskach kontaktowych w próbach tribologicznych z przeciwpórkami żeliwnymi i przeciwpórkami stalowymi o twardości 28; 40 i 58 HRC.

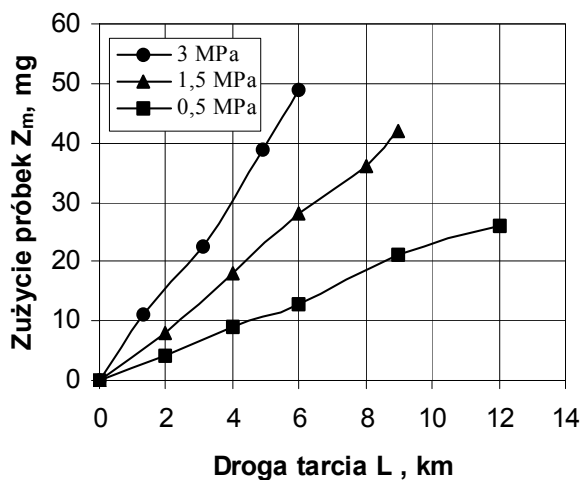
Przedstawiona zależność umożliwia sformułowanie dwóch podstawowych wniosków. Po pierwsze, im mniejsza jest twardość przeciwpórek, tym intensywniej ulegają zużyciu próbki kompozytowe. Po drugie, największa intensywność zużycia kompozytu wystąpiła dla przeciwpórek żeliwnych. Jest to rezultat o tyle zaskakujący, gdyż oczekiwano mniejszych wartości

zużycia z uwagi na obecność płatkowego grafitu w żeliwie i jego roli smarnej przy tarcu.



Rys. 2. Zużycie próbek kompozytowych po tarcu o przeciwpórkę: żeliwną (210 HB) i stalową (28 HRC), przy $p = 1,5$ MPa i $v = 1$ m/s

Fig. 2. Wear of composite samples after friction with cast iron (210 HB) and steel (28 HRC) countersamples, at $p = 1,5$ MPa i $v = 1$ m/s



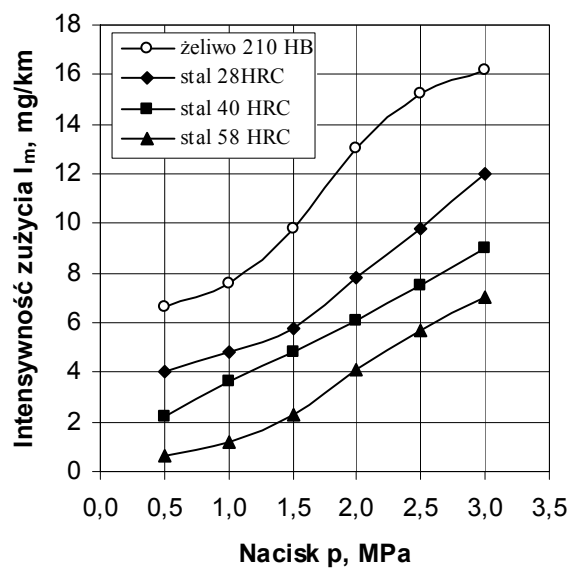
Rys. 3. Zużycie próbek kompozytowych po tarcu o przeciwpórkę stalową o twardości 40 HRC przy naciskach kontaktowych 0,5; 1,5 i 3,0 MPa

Fig. 3. Wear of composite samples after friction with steel countersamples with hardness of 40 HRC, at contact pressure of 0.5; 1.5 and 3.0 MPa

Powierzchnie próbek i przeciwpórek po próbach tarcia obserwowano na mikroskopie skaningowym. Wykonano także zglądy metalograficzne warstw położonych pod powierzchniami tarcia próbek. Pozwoliły one na opis mechanizmów (rodzajów) zużycia badanych materiałów. Zawarto je w pracy [10].

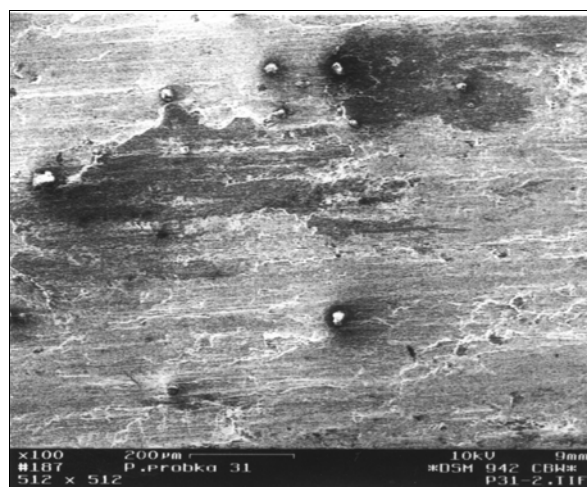
Stwierdzono równoczesne występowanie kilku rodzajów zużycia: ściernego, adhezyjnego i delaminacyjnego (warstewkowego). W zależności od warunków przeprowadzanych prób tribologicznych, a także w zależności od zastosowanej przeciwpórkę ujawnia się

dominująca rola określonego rodzaju zużywania próbek kompozytowych.



Rys. 4. Zależność intensywności zużycia kompozytu od nacisków kontaktowych przy tarcu z przeciwpórkami z żeliwa i ze stali o twardości 28; 40 i 58 HRC

Fig. 4. Wear rate of the composite vs. contact pressure during friction with countersamples made of cast iron and steel with hardness of 28; 40 and 58 HRC

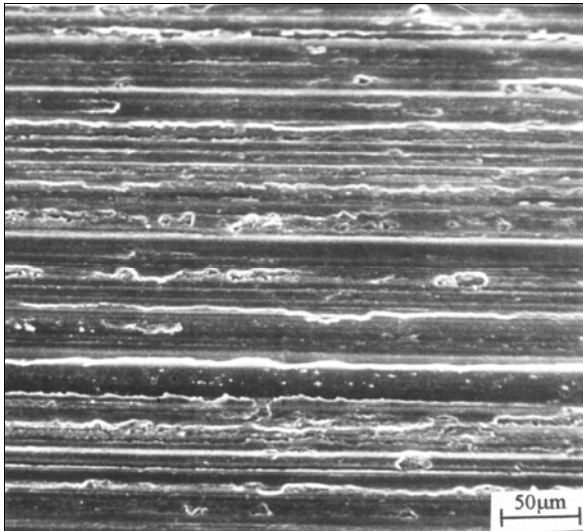


Rys. 5. Obraz powierzchni tarcia przeciwpórkę stalowej o twardości 28 HRC po tarcu z kompozytem przy $p = 3$ MPa i $v = 1$ m/s

Fig. 5. SEM of worn surface of steel countersample with hardness of 28 HRC after friction with composite at $p = 3$ MPa and $v = 1$ m/s

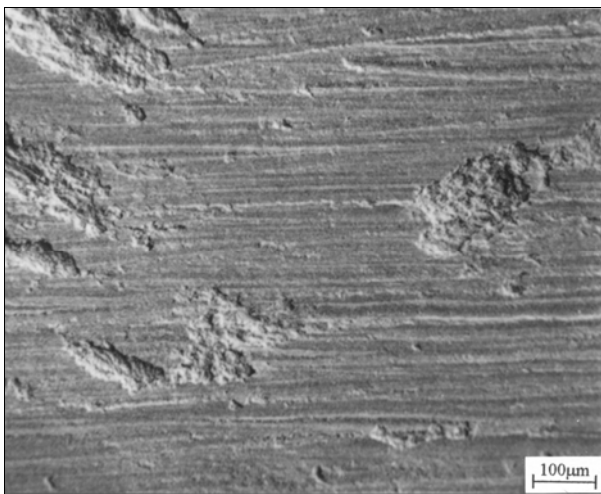
W przypadku zastosowania przeciwpórek o małej twardości stwierdzono występowanie zjawiska tworzenia lokalnych narostów z materiału osnowy próbek na powierzchni tarcia przeciwpórek, a także zjawisko „zbrojenia” przeciwpórek cząstkami twardej fazy umacniającej, uwalnianych podczas zużywania kompozytu. Obraz takiej powierzchni przeciwpórkę przedstawiono na rysunku 5, a widok powierzchni próbki kompozytowej na rysunku 6. Dominuje wtedy mechanizm ściernego zużywania próbek, któremu towarzyszy występowanie licznych bruzd na powierzchni tarcia.

Ze wzrostem twardości przeciwpórek powierzchni próbek podlegają łagodniejszemu zużyciu, a bruzdy na próbkach są płytsze i szersze. Przy zastosowaniu najtwardszych przeciwpórek narosty na ich powierzchniach tarcia występują sporadycznie i tylko w zakresie największych nacisków kontaktowych. Nie występuje zjawisko zbrojenia powierzchni twardymi cząstkami. W efekcie zużycie jest mniejsze. Zmniejsza się rola ścierania, a powierzchnie próbek są bardziej wygładzone. W tych warunkach na powierzchni tarcia próbek pojawiają się płatkowe ubytki jako skutek zużycia delaminacyjnego (rys. 7). Jest to obserwowane, gdy droga tarcia osiąga znaczne wartości.



Rys. 6. Obraz powierzchni kompozytu przy dominującym ściernym rodzaju zużycia po próbach tarcia przy $p = 3$ MPa, $v = 1$ m/s, $L = 6000$ m, przeciwpórebka stalowa o twardości 28 HRC

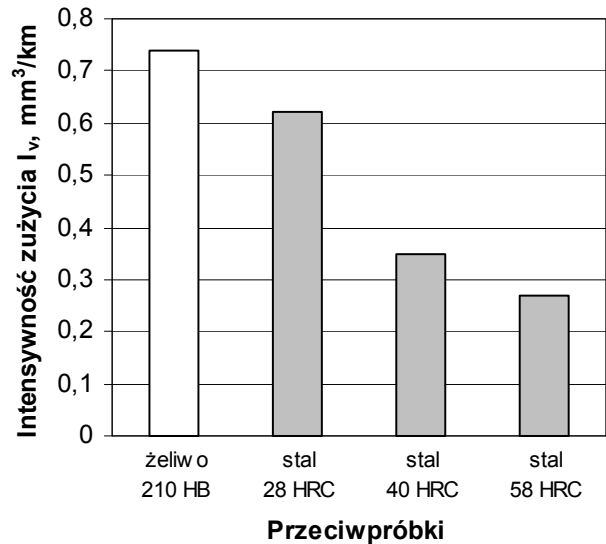
Fig. 6. SEM of composite worn surface undergone abrasive wear after friction at $p = 3$ MPa, $v = 1$ m/s, $L = 6000$ m, steel countersample with hardness of 28 HRC



Rys. 7. Powierzchnia kompozytu z delaminacyjnymi ubytkami po tarcu ze stalową przeciwpórbką o twardości 58 HRC przy $p = 3$ MPa, $L = 6000$ m

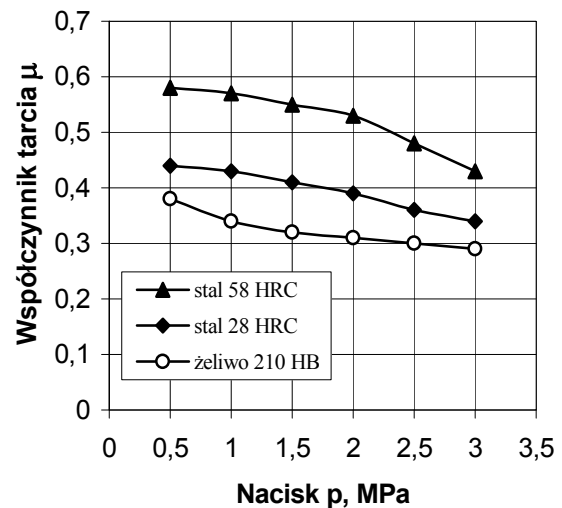
Fig. 7. SEM of composite sample with delamination loss after friction with steel countersample with hardness of 58 HRC, at $p = 3$ MPa, $L = 6000$ m

Na rysunku 8 przedstawiono wyniki zużycia badanych przeciwpórek. Jak widać, intensywność zużycia przeciwpórek stalowych maleje ze wzrostem ich twardości, ponadto przy określonej twardości rośnie ze wzrostem nacisków kontaktowych. Największe zużycie przeciwpórek wystąpiło w przypadku wykonania ich z żeliwa, które miało najmniejszą twardość wśród zastosowanych materiałów na przeciwpórebki.



Rys. 8. Intensywność zużycia przeciwpórek z żeliwa i ze stali o różnej twardości podczas tarcia z próbką kompozytową przy $p = 1,5$ MPa i $v = 1$ m/s

Fig. 8. Wear rate of countersamples made of cast iron and steel with different hardness during friction with composite samples at $p = 1.5$ MPa and $v = 1$ m/s



Rys. 9. Zależność współczynnika tarcia kompozytu od nacisków kontaktowych przy przeciwpórbkach żeliwnych i stalowych o twardości 28 i 58 HRC, $v = 1$ m/s

Fig. 9. Dependence of friction coefficient on contact pressure at cast iron and steel countersamples with hardness of 28 and 58 HRC, $v = 1$ m/s

Jest to skutek ściernego oddziaływania cząstek fazy umacniającej na powierzchnie przeciwpórek. Cząstki te są odsłaniane przy tarcu z powierzchni kompozytu

w wyniku łatwiejszego usuwania materiału osnowy. Wystają one z powierzchni tarcia [8] i swymi krawędziami oraz narożami rysują lub mikroskrawają powierzchnie przeciwpróbek tym łatwiej, im bardziej miękkie są przeciwpróbki. Ma to także wpływ na wartość współczynnika tarcia (rys. 9).

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania wykazały, że rodzaj i własności materiału przeciwpróbek wpływają znacząco na proces tarcia i zużywania kompozytu Al-20%Si-3%Cu-1%Mg/10%Al₂O₃.

1. Im mniejsza jest twardość przeciwpróbek, tym intensywniej ulegają zużyciu próbki kompozytowe.
2. Rodzaj i twardość przeciwpróbek oraz zastosowane parametry tarcia wpływają na dominację określonego mechanizmu zużywania: ściernego, adhezyjnego lub delaminacyjnego.
3. Zużycie przeciwpróbek o mniejszej twardości przebiega szybciej niż przeciwpróbek o większej twardości.
4. Współczynnik tarcia ma najmniejsze wartości dla żeliwa i stali o małej twardości.

LITERATURA

[1] Hutchings I.M., Tribological properties of metal matrix composites, *Material Science and Technology* 1994, 10, 513-517.

[2] Wang A., Rack H.J., Dry sliding wear in 2124Al-SiCw/17-4PH stainless steel, *Wear* 1991, 147, 355-374.

[3] Sato A., Mehrabian R., Aluminium matrix composites: Fabrication and Properties, *Metallurgical Transactions B* 1976, 7B, 443-541.

[4] Hosking F.M., Portillo F.F., Wunderlin R., Mehrabian R., Composites of aluminium alloys: fabrication and wear behaviour, *Journal of Materials Science* 1982, 17, 477-498.

[5] Wang A., Rack H.J., Dry sliding wear in 2124Al-SiCw/17-4PH stainless steel, *Wear* 1991, 147, 355-374.

[6] Roy M., Venkataraman B., Bhanuprasad V.V., Mahajan Y.R., Sundararajan G., The effect of particulate reinforcement on the sliding wear behavior of aluminium matrix composites, *Metallurgical Transactions A* 1992, 23A, 2883-2847.

[7] Lee C.S., Kim Y.H., Han K.S., Wear behaviour of aluminium matrix composite materials, *Journal of Materials Science* 1992, 27, 793-800.

[8] Ma Z.Y., Liang Y.N., Zhang Y.Z., Lu Y.X., Bi J., Sliding wear behaviour of SiC particle reinforced 2024 aluminium alloy composites, *Materials Science and Technology* 1996, 12, 751-756.

[9] Duszczyk J., Biało D., Friction and wear of PM Al-20Si-Al₂O₃ composites in kerosene, *Journal of Materials Science* 1993, 28, 193-202.

[10] Biało D., Zużycie tribologiczne kompozytów na osnowie stopów aluminium otrzymanych z proszków, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa 2002, 137.

Recenzent
Jan Ryszard Dąbrowski