https://doi.org/10.62753/ctp.2003.26.6.6 KOMPOZYTY (COMPOSITES) 3(2003)6

Jakub Wieczorek[1], Józef Śleziona[2], Jerzy Myalski[3], Anna Dolata-Grosz[4], Maciej Dyzia[5]
Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej Metalurgii i Transportu, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice

ZUŻYCIE I STRUKTURA POWIERZCHNI PO WSPÓŁPRACY W WARUNKACH TARCIA TECHNICZNIE SUCHEGO W KOMPOZYTACH AK12-CZĄSTKI CERAMICZNE

Przedstawiono korelacje pomiędzy strukturalnymi elementami budowy kompozytów a geometrią warstwy wierzchniej tworzonej w warunkach tarcia technicznie suchego. Na podstawie przeprowadzonych badań mikroskopowych i profilografometrycznych struktury powierzchni kompozytów AK12-Al_2O_3 po współpracy opisano zależność pomiędzy wielkością cząstek zbrojących a geometrią warstwy wierzchniej kompozytu. Badania dowiodły możliwość sterowania geometrią powierzchni trących poprzez właściwy dobór geometrii komponentów.

Słowa kluczowe: kompozyty Al-cząstki ceramiczne, tarcie technicznie suche, zużycie, struktura

SURFACE WEAR AND STRUCTURE AFTER COLLABORATION IN DRY SLIDING CONDICTIONS IN MMCs AK12 AND CERAMIC PARTICLES Al_2O_3

Aluminium-based metal matrix composites are well-known for their high specific strength, stiffness and hardness. They are gaining further importance as their potential for wear resistance becomes established. In general, for sliding against metal and abrasives, many studies have reported that composites exhibit better wear resistance than the unreinforced alloys.

Aluminium-based metal-matrix composites have found application in the manufacture of various automotive engine components such as cylinder blocks, pistons and piston insert rings where adhesive wear (or dry sliding wear) is a predominant process. Materials possessing high wear resistance (under dry sliding conditions) are associated with a stable tribolayer on the wearing surface and the formation of fine equiaxed wear debris. For adhesive wear, the influence of applied load, sliding speed, wearing surface hardness, reinforcement fracture toughness and morphology are critical parameters in relation to the wear regime encountered by the material.

Article presents the results of the researches on the surface of composites MMCs reinforced Al_2O_3 particles after mating in technically dry friction conditions are presented. Investigations were made with the use of Taylor-Hobson profilograph. Tested materials were matrix alloy composites AK12 reinforced Al_2O_3 particles (10, 25.50 μm) (Tab. 1), after collaboration with cast iron. For all samples sliding distance was 5000 m, load 35 N and sliding velocity 0.5 m/s. Abrasion was carried out with the use of tribological tester T-01 pin-on-disc.

On the bowies of the investigations it can be stated that: In MMCs reinforced different diameter particles there is proportional dependence between geometry surface parameters and reinforced particles diameter.

Friction coefficient value and wear resistance in investigated MMCs layers depend on particle size used as reinforcement. Together with reduction of particles diameter friction coefficient and wear value decrease.

In tribological systems working in dry sliding conditions there is a possibility that tribological properties controlled by particle size change surface geometry and particle size decide wear character.

Key words: composites Al-ceramic particles, wear, dry sliding, structure

WSTĘP

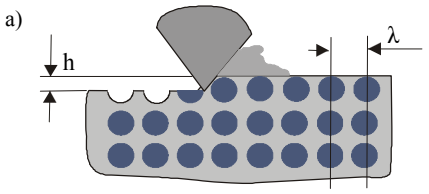
W procesie projektowania składu i budowy materiału kompozytowego przeznaczonego do współpracy trybologicznej brane są pod uwagę zarówno czynniki zewnętrzne wymuszające określony zespół reakcji materiału, w tym: obciążenie, temperatura pracy, rodzaj smarowania lub jego brak, prędkości pracy czy też obecność drgań, jak również szeroki zespół właściwości strukturalnych materiału: rodzaj osnowy, rodzaj fazy czy faz (w przypadku zbrojenia heterofazowego) zbrojących, udział i wielkość fazy zbrojącej oraz jej morfologia. Każdy z tych czynników oddziałuje w sposób bezpośredni na trwałość i niezawodność węzła trybologicznego. Na odporność na zużycie wpływ mają między innymi: rozmiar i rodzaj cząstek fazy zbrojącej kompozyt, twardość osnowy, stan powierzchni (chropowatość) partnera tarcia.

Stosunek średniej szerokości poszczególnych rowków zużycia do średniej odległości pomiędzy cząstkami zbrojenia został przyjęty jako decydujący czynnik wpływający na mechanizm zużycia. Na rysunku 1 przedstawiono zależność pomiędzy głębokością wnikania cząstki ściernej h i średniej odległości pomiędzy cząstkami fazy zbrojącej w kompozycie λ [1]. Przy stałej objętości

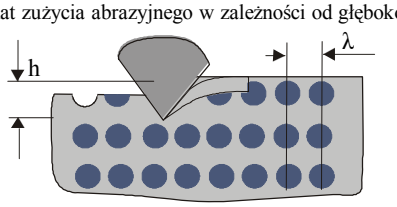
[1,4,5] mgr inż., [2] dr hab. inż., prof. PŚ, [3] dr inż.

fazy zbrojącej stosunek h do λ jest wartością kryterialną, która stanowi miarę względnej odporności na zużycie abrazyjne kompozytów zbrojonych SiC.

Odporność na zużycie wzrasta, jeżeli stosunek h do λ zmniejsza się poniżej jedności. Powyżej tej wartości odporność na zużycie generalnie nie zależy już od głębokości wnikania. Twardość cząstek ściernych odniesiona do twardości cząstek fazy zbrojącej wpływa na głębokość penetracji i pomaga określić, czy zbrojenie zachowywać się będzie jak przeszkoda dla ruchu ścierniwa czy będzie wyrywane lub kruszone. Kształt cząstek ściernych także wpływa na intensywność zużycia, np. cząstki kanciaste, ostre wzmagają zużycie.



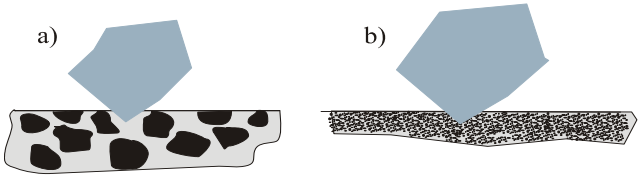
Rys. 1. Schemat zużycia abrazyjnego w zależności od głębokości wnikania



cząstki ściernej h i średniej odległości pomiędzy cząstkami fazy zbrojącej w kompozycie λ kompozytów zbrojonych cząstkami: a) $h < \lambda$; b) $h > \lambda$ [1]

Fig. 1. Schematic diagrams displaying between an abrasive particle and a reinforced composite at penetration depths

Pojęcie rozmiaru obszaru kontaktu zostało wprowadzone przez Hutchingsa i związane jest ściśle ze stosunkiem rozmiaru cząstek zbrojących a wielkością cząstek ścierniwa. Rozmiar cząstek abrazyjnych względem średnicy cząstek zbrojących określa to, czy zużywane kompozyty zachowywać się będą jak materiał heterogeniczny czy homogeniczny w czasie kontaktu ze ścierniwem [2]. Na rysunku 2 przedstawiono model proporcji wymiarów obszaru kontaktu ściernisko abrazyjne-kompozyt.



Rys. 2. Model proporcji wymiarów obszaru kontaktu: a) kompozyt zachowujący cechy materiału heterogenicznego, b) kompozyt zachowujący cechy materiału homogenicznego [2]

Fig. 2. Drawing illustrating the concept of dimensions of contact area: a) the composite simulates heterogeneous material, b) the wearing material acta as a homogeneous material [2]

Zależności pomiędzy elementami struktury kompozytów a ich właściwościami trybologicznymi wymagają potwierdzenia i weryfikacji, co wynika z rozwoju nowych technik wytwarzania i kształtowania struktury materiałów kompozytowych. Inaczej mówiąc, każda nowa technologia pociąga za sobą konieczność weryfikacji jej wpływu na zespół własności eksploatacyjnych. Szczególnie w przypadku materiałów kompozytowych, gdzie siła wzajemnych oddziaływań technologia-struk-tura-właściwości jest tym większa, im bardziej złożony jest charakter budowy tej grupy materiałów, co za tym idzie wielokrotności wzajemnych relacji między jej elementami.

ZAKRES I CEL BADAŃ

Celem podjętych badań było określenie zależności pomiędzy wielkością cząstek użytych do zbrojenia kompozytu a właściwościami trybologicznymi w warunkach tarcia bez smarowania.

Badaniami objęto materiały kompozytowe o osnowie odlewniczego stopu aluminium AK12, zbrojone cząstkami ceramiki Al_2O_3 o różnej wielkości ziaren. Kompozyty wytworzono metodą mechanicznego mieszania i ukształtowano do postaci tulei, stosując technikę odlewania odśrodkowego [3, 4]. Skład badanych materiałów, wielkość cząstek zbrojących i ich powierzchniowy udział w badanym fragmencie przekroju przedstawiono w tabeli 1. Z odlanych tulei wycięto pierścienie, które po szlifowaniu i polerowaniu na papierze ściernym o ziarnistości 500 stanowiły próbki poddane ścieraniu na testerze trybologicznym T-01 tarcza - trzpień.

Jako materiał przeciwpróbki zastosowano żeliwo EN-GJ200 ferrytyczno-perlityczne z równomiernie rozłożonym grafitem płytkowym, z seryjnie produkowanych pierścieni tłokowych w FT „Prima" Łódź, z których wycięto trzpienie o przekroju kołowym $\phi = 3$ mm i długości 20 mm. Ścieranie prowadzono przy stałym obciążeniu równym 5 MPa, stałej prędkości obrotowej równej 5 m/s, na drodze tarcia 5000 m.

TABELA 1. **Skład fazowy kompozytów AK12+Al_2O_3 użytych w badaniach**

TABLE 1. **Phase composition AK12+Al_2O_3 used in test**

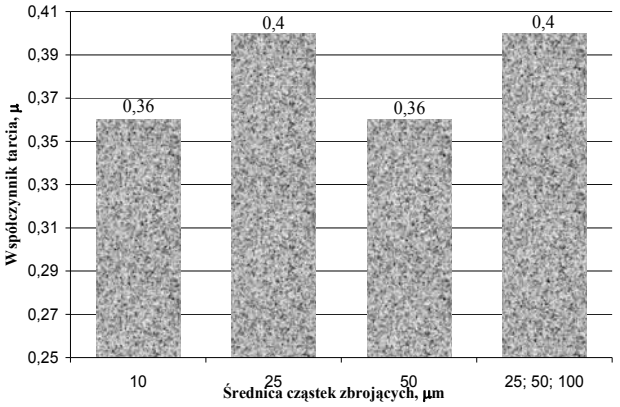
Oznaczenie	Stop osnowy	Rodzaj cząstek zbrojących	Średnica cząstek zbrojących □m	Udział objętościowy cząstek zbrojących %	Udział powierzchniowy cząstek zbrojących %
A10	AK12	Al_2O_3	10	15	38
A25	AK12	Al_2O_3	30	15	35
A50	AK12	Al_2O_3	50	15	36
AM	AK12	Al_2O_3	25; 50; 100	5+5+5	38

REZULTATY BADAŃ I ANALIZA WYNIKÓW

Wpływ wielkości cząstek zbrojących na wartość współczynnika tarcia suchego wyznaczono w badaniu na dystansie 5000 m przy stałych parametrach prędkości i nacisku jednostkowego (prędkości 0,5 m/s; nacisku 5 MPa). Wyniki przedstawiono na rysunku 3.

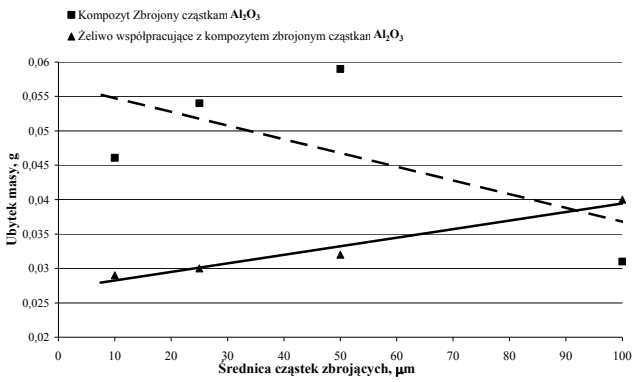
Dzięki uzyskanym wynikom badań geometrycznych cech struktury kompozytów po tarciu oraz ich skojarzeniu z wynikami badań zużycia w warunkach tarcia technicznie suchego przyjęto na potrzeby analizy, że wpływ wielkości cząstek zbrojących na charakterystyki trybologiczne układu żeliwo-kompozyt wynika z kształtowania przez cząstki geometrii powierzchni kontaktu w trakcie współpracy.

W przypadku cząstek Al_2O_3 przebieg zmian wartości współczynnika tarcia w funkcji rosnącej średnicy cząstek jest podobny. W zakresie średnicy cząstek zbrojących od 10 do 25 μm, zwiększeniu wielkości cząstek towarzyszy wzrost wartości współczynnika tarcia μ. Po czym następuje zmiana trendu i w drugim zakresie od 25 do 50 μm średnicy cząstek następuje zmniejszenie wartości współczynnika tarcia.



Rys. 3. Wykres współczynnika tarcia w funkcji wielkości cząstek zbrojących w warunkach tarcia technicznie suchego

Fig. 3. Histogram of friction coefficient dependent on reinforcement particles size in dry sliding condition

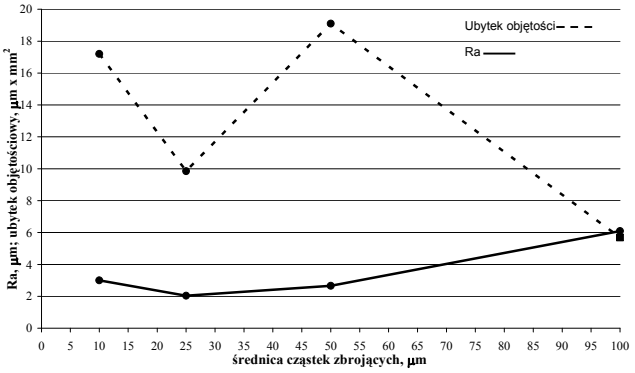


Rys. 4. Ubytek masy kompozytu i żeliwa w funkcji wielkości cząstek zbrojących

Fig. 4. Composite and cast iron bulk loss dependent on reinforcement particles size

Średnica cząstek zbrojących ma wyraźny wpływ na wielkość zużycia zarówno materiału kompozytowego, jak również współpracującego z nim żeliwa. Wykres ubytku masy w funkcji wielkości cząstek przedstawiono na rysunku 4. W przypadku stosowania zbrojenia w postaci Al_2O_3 wraz ze zwiększeniem średnicy rośnie ubytek kompozytu i współpracującego z nim żeliwa.

Badania profilografometryczne pozwoliły na określenie zależności między rozmiarem zbrojenia a geometrycznymi cechami powierzchni trących. Wykorzystano w tym celu profilografometr firmy Taylor-Hobson z indukcyjną głowicą o rozdzielczości: pionowej = 0,6 nm, poprzecznej = 3 nm i wzdłużnej = 16 nm. Wizualizacji danych pomiarowych dokonano w programach Tamlap i MountainsMap 3.0 z wykorzystaniem metod kartograficznych. Wynikiem jest uzyskanie mapy konturowej albo izometrycznego obrazu kartograficznego [5]. Na podstawie wyników przeprowadzonych badań sporządzono wykres zależności chropowatości (opisanej wielkością *Ra*) i ubytku objętościowego od rozmiaru cząstek zbrojących. Na rysunku 5 przedstawiono zmianę chropowatości i ubytek objętości w funkcji rozmiaru cząstek zbrojących. Zarówno chropowatość, jak i zużycie objętościowe rosną wraz ze zwiększeniem średnicy zbrojenia.



Rys. 5. Ubytek objętościowy i chropowatość w funkcji rozmiaru cząstek zbrojących

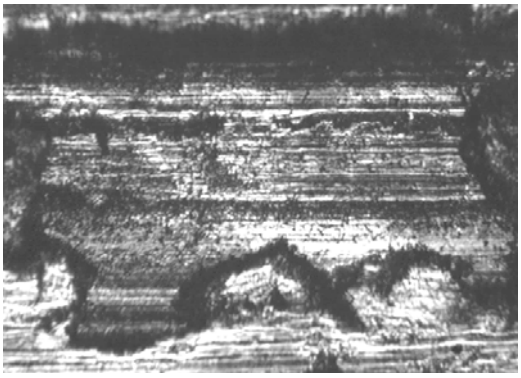
Fig. 5. Volume loss and roughness dependent on reinforcement particles size

Wyniki badań profilografomerycznych i uzyskane dzięki nim trójwymiarowe obrazy powierzchni kompozytów po tarciu oraz przeprowadzone badania mikroskopowe powierzchni wytarcia pozwalają na przedstawienie modelu zużycia kompozytu. Model ujmuje kolejne etapy zużycia począwszy od docierania aż do warunków ustalonej współpracy. Przedstawiono w nim charakterystyczne zjawiska wywołane tarciem: wyrywanie cząstek zbrojących, odkształcenie plastyczne osno-

wy, abrazyjne zużycie żeliwnej próbki i kompozytu, kruszenie cząstek w trakcie współpracy. Wykazano również różnice w charakterze zużycia wynikające z wielkości zastosowanych cząstek zbrojących.
Dla cząstek o średnicy do 50 μm przyjęto model obejmujący kolejne cztery etapy.

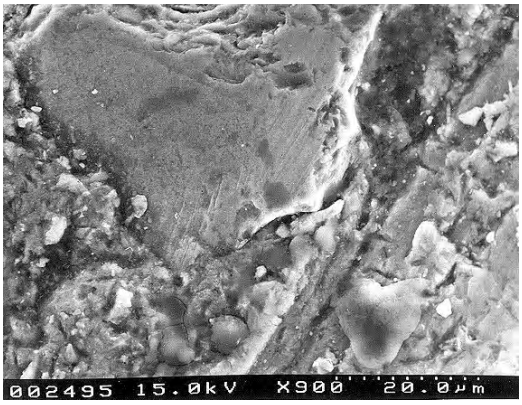
Etap I - początek współpracy, w którym powierzchnia żeliwa opiera się na wystających po polerowaniu cząstkach zbrojących. Rozpoczynający się proces zużycia wywołuje początkowe bruzdowanie żeliwnej powierzchni (docieranie).

Etap II - dzięki „dopasowaniu" w procesie docierania powierzchni tarcia zwiększa się pole kontaktu pomiędzy współpracującymi powierzchniami. W tym czasie następuje zmniejszenie i ustabilizowanie współczynnika tarcia. Powstałe nierówności na powierzchni żeliwa oddziaływają ze zbrojeniem i osnową, wywołując ich stopniowe abrazyjne zużycie, głównie przez zarysowanie (rys. rys. 6 i 7).



Rys. 6. Zarysowania i spękanie osnowy wokół cząstek Al_2O_3, 100 μm, kompozyt AM, pow. 250x

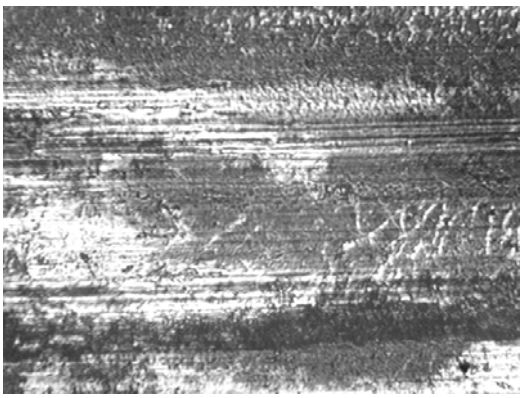
Fig. 6. Matrix scratching and fracturing around Al_2O_3 (100 μm) particles, mag. 250x



Rys. 7. Cząstki Al_2O_3 z wyraźnie dotartą powierzchnią i rysami wzdłuż kierunku tarcia, kompozyt A50, SEM, pow. 900x

Fig. 7. Al_2O_3 (50 μm) particles of clearly grinned surface and scratching along friction direction, SEM mag. 900x

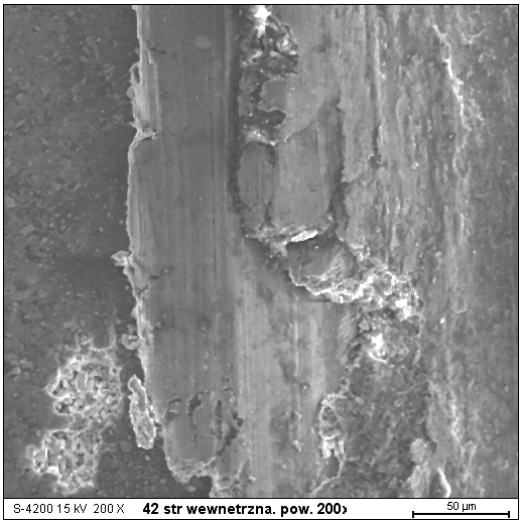
Etap III - etap ten należy podzielić na przynamniej dwie odmiany A i B. W przypadku A mamy do czynienia z wyrwaniem cząstki zbrojącej i intensyfikacją procesu zużycia przez jej dodatkowe oddziaływanie z powierzchniami trącymi. Może to skutkować osadzeniem cząstki w warstwie powierzchniowej żeliwa i zwiększeniem efektu abrazyjnego zużycia kompozytu lub jej luźnym przetaczaniem między współpracującymi powierzchniami. Przetaczana cząstka wywoływać może zarysowanie każdej z powierzchni współpracującej lub plastyczną deformację niezbrojonych fragmentów osnowy (pozostawiając charakterystyczne ślady - rys. 8).



Rys. 8. Widok zniszczenia powierzchni tarcia wywołanego przetaczaniem wykruszonych cząstek zbrojących, kompozyt A50, mikroskopia świetlna, pow. 200x

Fig. 8. View of the friction surface damage censed by pulled out reinforcement particles turning, mag. 200x

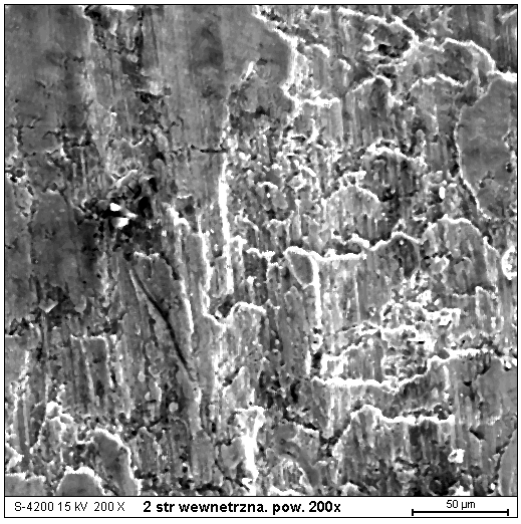
Z czasem cząstka ulega skruszeniu i usunięciu. W drugim przypadku, oznaczonym na rysunku jako B, dochodzi do wgniatania cząstki zbrojącej w osnowę. W wyniku tego może dojść do adhezyjnego sczepienia fragmentu osno-wy kompozytu z żeliwem, co w konsekwencji prowadzi do jego wyrwania lub plastycznego odkształcenia osnowy obserwowanego jako „rozmazywanie" osnowy na powierzchni tarcia (rys. rys. 9 i 10).
Na wykresach tarcia ten etap zużycia obserwuje się jako okresowe zmiany wartości współczynnika tarcia. Piki takie zarejestrowano szczególnie przy małych prędkościach i dużych naciskach [6].



Rys. 9. Widok odkształcenia plastycznego „rozmazania" osnowy powstałego w wyniku tarcia na brzegu toru tarcia, próbka A10, SEM, pow. 200x

Fig. 9. View of the matrix plastic deformation, mag. 200x

Dla kompozytów zbrojonych cząstkami o średnicach większych niż 50 µm i mieszaniną cząstek o różnych wielkościach przyjęto nieco inny model zużycia. W modelu tym obok opisanych wcześniej zjawisk można wskazać jeszcze jeden mechanizm zużycia nierejestrowany w przypadku cząstek o mniejszej średnicy, polega on na kruszeniu dużych cząstek i przebiega wg następujących etapów:



Rys. 10. Widok odkształcenia plastycznego „rozmazania" osnowy powstałego w wyniku tarcia, próbka A10, SEM, pow. 500x

Fig. 10. View of the matrix plastic deformation, SEM, mag. 500x

Etap I - dotarcie współpracujących powierzchni na drodze abrazyjnego zużycia żeliwa i kompozytu.

Etap II - pękanie cząstek zbrojących. Popękana cząstka pozostaje osadzona w osnowie tak długo aż nie zostanie uwolniona przez zużycie osnowy wokół niej (rys. 11).

Etap III - uwolnienie fragmentów rozkruszonej cząstki, które teraz mogą zachowywać się jak pojedyncze wyrwane cząstki. Ich oddziaływanie w układzie trybologicznym przedstawiono w modelu wcześniejszym na etapie III.

Etap IV - wyrównywanie obszaru po wyrwanej cząstce poprzez plastyczne odkształcenie i stopniowe abrazyjne zużycie osnowy, prowadzące do odsłonięcia kolejnych cząstek zbrojących.

Rys. 11. Widok rozkruszonej w procesie tarcia cząstki zbrojącej Al_2O_3 (100 µm) w kompozycie AM, pow. 250x

Fig. 11. View of the crumbled during the friction process Al_2O_3 reinforcement composite, mag. 250x

Opisany w tym modelu proces zużycia kompozytu zbrojonego cząstkami dużymi można ograniczyć, stosując mieszaninę cząstek o różnej średnicy. Naciski wywołujące pękanie dużych cząstek rozkładają się wówczas na sąsiadujące z nimi cząstki o mniejszych rozmiarach, co spowalnia proces zużycia. Znajduje to potwierdzenie w wynikach badania zużycia przedstawionych na rysunkach 4 i 5, gdzie zarejestrowano najmniejsze zużycie kompozytów zbrojonych mieszaniną cząstek różnej wielkości i jednocześnie najmniejsze zużycie sumaryczne całego układu trybologicznego.

WNIOSKI

1. Technologia odlewania odśrodkowego pozwala na wytwarzanie warstw kompozytowych o właściwościach trybologicznych zależnych od wielkości zastosowanego zbrojenia.
2. Wartość współczynnika tarcia układu żeliwo-kompozyt zależy od wymiarów cząstek zbrojących. W zakresie od 10 do 25 µm współczynnik tarcia zmniejsza się, po czym rośnie ze zwiększeniem wymiarów cząstek do 50 µm.
3. Wielkość cząstek zbrojących kształtuje geometrię powierzchni kontaktu podczas pracy układu żeliwo-kom-pozyt. Wartość chropowatości i falistości powierzchni kompozytu po tarciu maleje wraz ze zwiększeniem średnicy cząstek zbrojących do 25 µm, po

czym po przekroczeniu tej wartości rośnie, bez względu na rodzaj cząstek zbrojących.

4. Wielkość cząstek zbrojących decyduje o zużyciu ukła-du żeliwo-kompozyt. Zwiększenie wymiarów cząstek Al_2O_3 prowadzi do zwiększenia zużycia zarówno kompozytu, jak i żeliwa.

LITERATURA

[1] Deuis R.L., Subramanianian C., Yellup J.M., Dry sliding wear of aluminium composites - a review, Composites Science and Technology 57, Elsevier 1997, 415-435.

[2] Hutchings I.M., Wang A., Proc. Conf. Metal and Ceramic Matrix Composites, Processing, Modeling and Mechanical Behavior, Anaheim 1990, TMS 1990, 499.

[3] Śleziona J., Grosz A., Wieczorek J., Centrifugal casting of the aluminium alloy - Al_2O_3 particle composites, II Cast Composites Conference'98, Polanica Zdrój 1998.

[4] Śleziona J., Hyla I., Dolata-Grosz A., Urantówka G., Wieczorek J., Odlewy kompozytowe o warstwowym rozmieszczeniu zbrojenia, Inżynieria Materiałowa 1999, 3-4, 158.

[5] Cybo J., Gołąb A., Służałek G., Badania struktury geometrycznej warstwy wierzchniej metodą 3D.

[6] Wieczorek J., Dolata-Grosz A., Dynia M., Śleziona J., Właści-wości tribologiczne kompozytowych materiałów o osnowie stopu aluminium AK12 zbrojonych cząstkami ceramicznymi, Kompozyty 2001, 1, 2, 207-210.

Recenzent
Edward Fraś