

Jerzy Myalski¹, Jakub Wieczorek², Anna Dolata-Grosz³, Józef Ślężona⁴
 Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice

WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNE KOMPOZYTÓW O HETEROFAZOWYM ZBROJENIU MIESZANINĄ CZĄSTEK CERAMICZNYCH I WĘGLA SZKLISTEGO

Przedstawiono wyniki badań właściwości tribologicznych (współczynnik tarcia, zużycie) par ciernych żeliwo-kompozyt. Badaniom poddano kompozyty homofazowe i heterofazowe zbrojone cząstkami SiC lub Al₂O₃ z dodatkiem węgla szklanego (tab. 1). Badania przeprowadzono, wykorzystując tester tribologiczny T-01, a partnerem tarcia dla kompozytów było żeliwo (rys. 1). Zastosowanie zbrojenia heterofazowego jest rozwiązaniem pozwalającym w znacznym stopniu rozszerzyć możliwości projektowania właściwości tribologicznych skojarzeń ciernych. Możliwe staje się bowiem dobieranie takich układów zbrojenia, dzięki którym przy zachowaniu wysokiej wartości, a także stabilizacji współczynnika tarcia (rys. rys. 3 i 4) można ograniczyć zużycie elementów pary ciernej (tab. 2), ma to miejsce w przypadku kompozytów zbrojonych cząstkami jednakowej wielkości z dodatkiem węgla szklanego A50Cs i S50Cs. Jest też możliwe zmniejszanie wartości współczynnika tarcia w zależności od potrzeb konstrukcyjnych. Efekt ten można osiągnąć poprzez zastosowanie do zbrojenia kompozytów mieszaniny cząstek o różnej średnicy (materiały zbrojone: Al₂O₃ 25, 50, 100 μm, SiC 25, 50, 100 μm) lub przez zastosowanie cząstek różnej średnicy i dodatkowo węgla szklanego (materiały zbrojone: Al₂O₃ 25, 50, 100 μm + Cs 100 μm, SiC 25, 50, 100 μm + Cs 100 μm). Przedstawione w artykule wyniki badań dowodzą, że dodatek węgla szklanego bez względu na rodzaj ceramicznego zbrojenia poprawia właściwości tribologiczne układu. Wpływa on na stabilizację wartości współczynnika tarcia w funkcji drogi tarcia i znacznie obniża zużycie współpracujących elementów.

Słowa kluczowe: stop aluminium, cząstki ceramiczne, węgiel szklany, właściwości tribologiczne

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF HETEROPHASE COMPOSITES WITH CERAMIC AND AMORPHOUS CARBON PARTICLES COMPOSITION

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. The subject of the article are heterophase composites (ceramic particles, class carbon type) and production and evaluation of their tribological properties. The reduction of the results of the hard reinforcement particles influence on the collaborative element is possible thanks to the application of heterophase reinforcement (composed of several kind of reinforcement particles) (Tab. 1). The solution presented in the article assumes the wear reduction in the dry sliding conditions through the application of the Al₂O₃ and glass carbon mixture and SiC and glass carbon mixture as the reinforcement. For all samples sliding distance was 5000 m, load 35N and sliding velocity 0.5 m/s. Abrasion was carried out with the use of tribological tester T-01 pin-on-disc (Fig. 2). Composite materials for the investigation composed of AK12+30% (Al₂O₃) were produced with the use of the suspension method. Generated material was formed in the shape of sleeve with the application of centrifugal casting. It permitted to produce composite layer which structure was composed of glass carbon particles surrounded by smaller diameter Al₂O₃ or SiC particles (Fig. 1). The investigation of the frictional composite-cast iron couple association conducted in the dry sliding conditions proved that addition of 5% glass carbon reduces 30% of cast iron wear and 20% of the friction coefficient (Figs 3 and 4). Microscopic examination of the erosion trace showed that heterophase reinforcement reduces composite abrasive wear (Tab. 2). Conducted researches gave expected results and further investigation will focus on the optimization of the phase composition proportion.

Key words: aluminium alloy, ceramic particles, glass carbon, tribological properties

WSTĘP

Stopy aluminium zbrojone cząstkami SiC i Al₂O₃ są od wielu lat intensywnie badane i coraz szerzej stosowane w przemysłowej praktyce. Znajdują one zastosowanie w budowie maszyn na elementy narażone na intensywne zużycie w ekstremalnych warunkach eksploatacyjnych [1, 2].

Mimo poznania i opisu wielu zjawisk oraz zależności pomiędzy budową a właściwościami trybologicznymi kompozytów każda nowa czy udoskonalona forma ich wykorzystania w konstrukcjach części maszyn, co za tym idzie każda zmiana warunków eksploatacji, w tym zużycia materiału kompozytowego, pociąga za sobą konieczność weryfikacji istniejących zależności

^{1,2,3} dr inż., ⁴ prof. dr hab. inż.

i ich potwierdzenia lub modyfikacji. Stwarza to także możliwość pełniejszego opisu zjawisk rządzących tymi relacjami i odnajdywania nowych czynników mających na nie wpływ [3, 4]. Do czynników odpowiedzialnych za przebieg eksploatacji w warunkach tarcia (poziom i intensywność zużycia, stabilność współczynnika tarcia w zmiennych warunkach pracy) elementów części maszyn zaliczyć należy: rodzaj, ilość, wielkość i rozmieszczenie fazy zbrojącej, rodzaj i właściwości osnowy oraz rodzaj i właściwości elementów współpracujących z materiałem kompozytowym (okładziny cierne, pierścienie tłokowe, cylindry, trzpienie łożysk) [5-7].

Zastosowanie zbrojenia heterofazowego stanowi alternatywę dla opisywanych w literaturze rozwiązań, gdzie prace badawcze skoncentrowane są nad zbrojeniem heterofazowym na bazie mieszaniny włókien i cząstek zbrojących. W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczące zastosowania mieszaniny cząstek, z których jedne (Al_2O_3 , SiC) odpowiadają za zwiększenie odporności na zużycie, a drugie (Cs - amorficzny węgiel) wpływają na obniżenie wartości współczynnika tarcia. Zaletą tak zaprojektowanego układu cząstek zbrojących jest także osiągnięcie zmniejszenia zużycia partnera tarcia.

CEL I ZAKRES BADAŃ

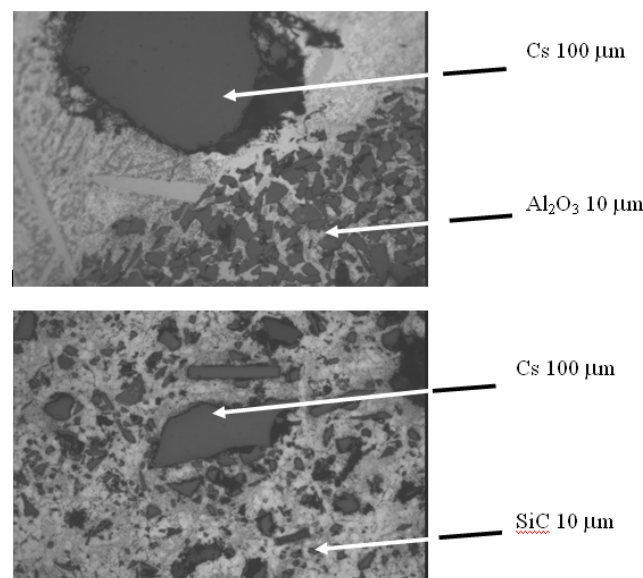
Celem podjętych badań było określenie właściwości tribologicznych kompozytów o heterofazowym zbrojeniu w warunkach tarcia bez smarowania. Poznanie zjawisk i procesów zachodzących podczas tarcia przy wykorzystaniu układu heterofazowego zbrojenia determinuje późniejsze aplikacje tego rodzaju kompozytów i stwarza możliwość zmiany współczynnika tarcia i zużycia na etapie projektowania właściwości użytkowych.

Badaniami objęto materiały kompozytowe o osnowie odlewniczego stopu aluminium AK12, zbrojone mieszaniną cząstek ceramicznych Al_2O_3 lub SiC z dodatkiem cząstek węgla szklстого, o tym samym udziale cząstek zbrojących równym 30%. Kompozyty wytworzono metodą mechanicznego mieszania i ukształtowano do postaci tulei, stosując technikę odlewania odśrodkowego [8-10]. Skład badanych materiałów przedstawiono w tabeli 1. Do badań wykorzystano trzy rodzaje kompozytów: pierwsze to materiał heterofazowy zbrojony dwoma rodzajami cząstek (Al_2O_3+Cs ; SiC+Cs) o tym samym rozmiarach, drugi to kompozyt heterofazowy, będący mieszaniną cząstek o różnej średnicy jednego rodzaju fazy, trzeci to kompozyt heterofazowy, w którym zastosowano nie tylko różną wielkość zbrojenia, ale dodatkowo wprowadzono węgiel szklсты. Na rysunku 1 przedstawiono charakterystyczną cechę struktury otrzymanych kompozytów heterofazowych, jest nią rozkład cząstek zbrojących, taki że duże cząstki węgla szklстого zostają otoczone znacznie mniejszymi cząst-

kami węgla krzemu lub tlenku aluminium. Z odlanych tulei wycięto pierścienie, które po szlifowaniu i polerowaniu na papierze ściernym o ziarnistości 500 stanowiły próbki poddane ścieraniu na testerze tribologicznym T-01 tarcza - trzpień (rys. 2).

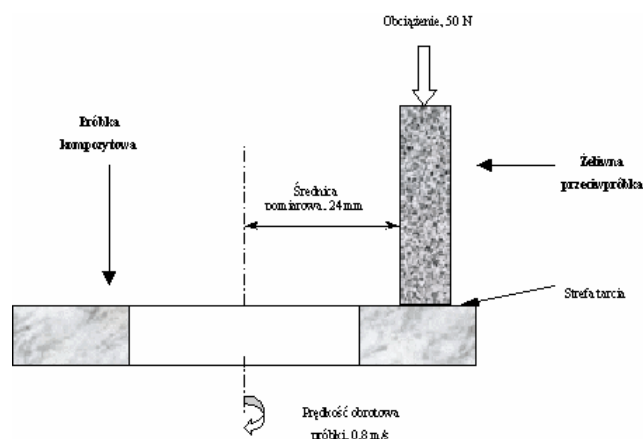
TABELA 1. Skład fazowy kompozytów użytych w badaniach
TABLE 1. Phase composition used in test

Oznaczenie	Stop osnowy	Rodzaj cząstek zbrojących	Średnica cząstek zbrojących μm	Udział masowy cząstek zbrojących %
A50	AK12	Al_2O_3	50	30%
A50Cs	AK12	Cs/ Al_2O_3	50/100	15%/15%
AM	AK12	Al_2O_3	25; 50; 100	10% + 10% + 10%
AMCs	AK12	Cs/ Al_2O_3	50/25; 50; 100	6%/8% + 8% + 8%
S50	AK12	SiC	50	30%
S50Cs	AK12	Cs/SiC	50/100	15%/15 %
SM	AK12	SiC	25; 50; 100	10% + 10% + 10%
SMCs	AK12	Cs/SiC	50/25; 50; 100	6%/8% + 8% + 8%



Rys. 1. Struktura kompozytów zbrojonych heterofazowo, pow. 250x

Fig. 1. Structure of the heterophase composite layer, magn. 250x



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego T-01 wykorzystanego w badaniach

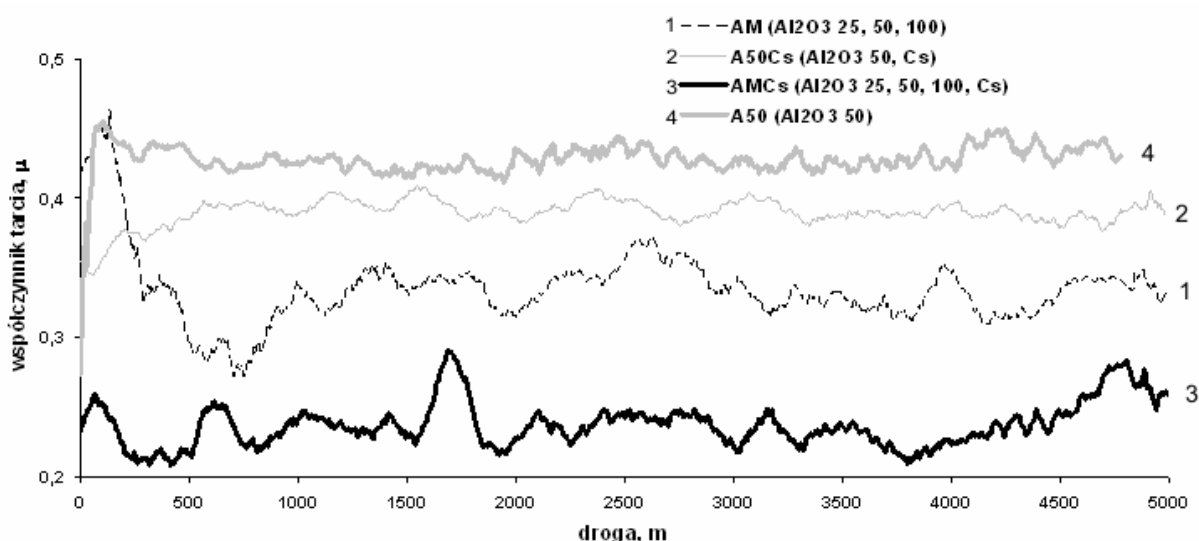
Fig. 2. The schema of measurements system T-01 used in the investigation. Jako materiał przeciwpróbki zastosowano żeliwo ŻI 300, seryjnie stosowane na tarczach hamulcowe w samochodach osobowych marki „Polonez”. Z fragmentów żeliwnej tarczy wytoczono trzpienie o średnicy 6 mm, których czołowe powierzchnie szlifowano jak powierzchnie ślizgowe próbek. Ścieranie prowadzono przy stałym obciążeniu równym 1,3 MPa, stałej prędkości obrotowej równej 8 m/s, na drodze tarcia 5000 m.

REZULTATY BADAŃ I ANALIZA WYNIKÓW

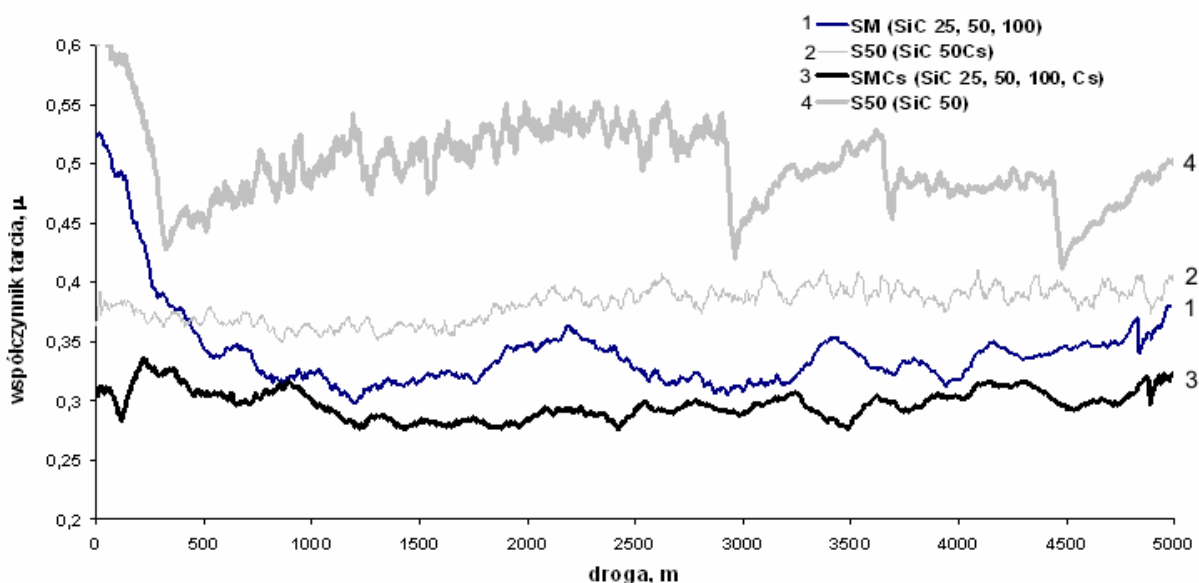
Rezultaty badań tribologicznych przeprowadzonych przy użyciu testera T-01 przedstawiono na rysunkach 3 i 4 w postaci wykresów zmian współczynnika tarcia

w funkcji drogi tarcia.

Wśród kompozytów zbrojonych cząstkami Al_2O_3 (rys. 3) największą wartość współczynnika tarcia zanotowano dla kompozytu homofazowego zbrojonego cząstkami o wielkości 50 μm , średnia wartość wynosi 0,45. Dodatek węgla szklistego zastosowany w kompozycie A50Cs zmniejsza wartość współczynnika tarcia do poziomu 0,37. Kolejne zmniejszenie, o blisko 0,1, wartości współczynnika tarcia, zarejestrowano, badając kompozyt zbrojony mieszaniną cząstek Al_2O_3 (25, 50, 100 μm). Wyniósł on 0,31. Podobnie jak wcześniej, dodatek węgla szklistego w materiale AMC_s doprowadził do zmniejszenia wartości μ do poziomu 0,25. Wartość $\mu = 0,25$ jest najmniejszą wartością współczynnika tarcia zarejestrowaną dla materiałów zbrojonych cząstkami



Rys. 3. Wykres zmian współczynnika tarcia w funkcji drogi dla kompozytów zbrojonych cząstkami Al_2O_3 i kompozytów heterofazowych
Fig. 3. The diagram of friction coefficient shifts in track function for composites reinforced Al_2O_3 particles and heterophase composites



Rys. 4. Wykres zmian współczynnika tarcia w funkcji drogi dla kompozytów zbrojonych cząstkami SiC i kompozytów heterofazowych
Fig. 4. The diagram of friction coefficient shifts in track function for composites reinforced SiC particles and heterophase composites

tlenku aluminium. Poza zmianą wartości współczynnika tarcia należy jeszcze zwrócić uwagę na przebieg jego zmian w funkcji drogi, okazuje się, że dodatek węgla szklistego praktycznie eliminuje etap docierania, charakterystyczny dla pierwszego etapu tarcia kompozytów A50

i AM. Etap taki wystąpił tylko w przypadku kompozytów, gdzie nie zastosowano dodatku węgla szklistego. Charakteryzuje go spadek wartości współczynnika tarcia od 0,45 do 0,31 dla materiału AM i wzrost współczynnika tarcia od 0,3 do 0,45 dla materiału A50.

W przypadku kompozytów zbrojonych cząstkami SiC (rys. 4) największą wartość współczynnika tarcia, wynoszącą 0,5, zarejestrowano dla materiału o zbrojeniu homofazowym cząstkami o wielkości 50 μm . Wynik ten jest podobny jak w przypadku kompozytów ze zbrojeniem Al_2O_3 , różni się jednak wartością współczynnika tarcia. Zastosowanie mieszaniny cząstek SiC i węgla szklistego w materiale S50Cs pozwoliło na obniżenie wartości współczynnika tarcia, podobnie jak w przypadku kompozytów zbrojonych Al_2O_3 o blisko 0,1, wynosiła ona $\mu = 0,4$. Analizując zmianę współczynnika tarcia dla kompozytów bez dodatku węgla szklistego, S50 i SM, stwierdzono także okres docierania współpracujących elementów. Tym razem jednak wartość współczynnika tarcia malała w obu przypadkach na dystansie około 500 m. Najmniejszą wartość współczynnika tarcia w tej grupie zarejestrowano dla kompozytu zbrojonego mieszaniną cząstek SiC o różnej średnicy z dodatkiem węgla szklistego. Wartość współczynnika tarcia wyniosła w tym przypadku 0,22 i nie obserwowano okresu docierania układu, podobnie jak dla tego typu materiału zbrojonego układem $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Cs}$. W trakcie badania współczynnika tarcia układu kompozyt-żeliwo wyznaczono także zużycie każdego z elementów, określone jako ubytek masy przed i po tarcu. Wyniki badania zużycia przedstawiono w tabeli 2.

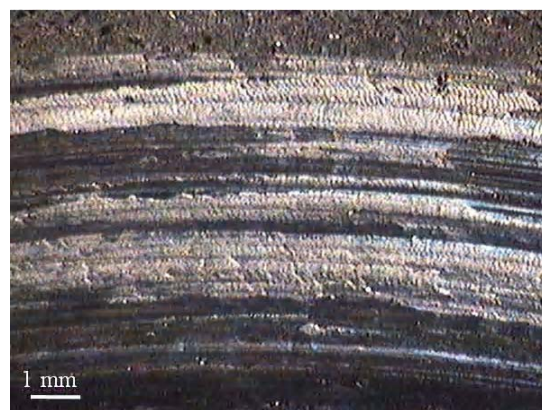
TABELA 2. Wyniki zużycia kompozytów i żeliwnej przeciwpróbki

TABLE 2. Composite and cast iron wear

Rodzaj materiału	Ubytek masy kompozytu g	Ubytek masy żeliwa g
A50	0,09	0,011
A50Cs	0,055	0,009
AM	0,194	0,002
AMCs	0,087	0,002
S50	0,05	0,010
S50Cs	0,021	0,004
SM	0,205	0,003
SMCs	0,02	0,003

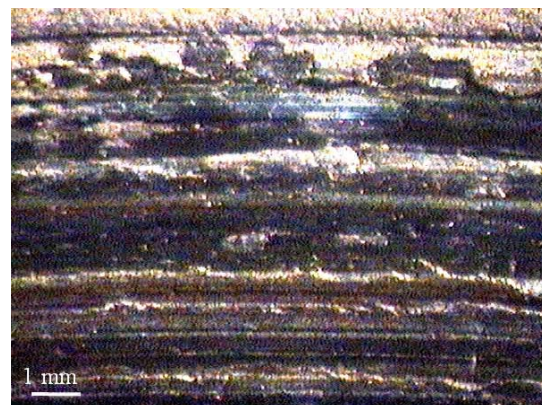
Porównując uzyskane wyniki zużycia kompozytów, można stwierdzić jednoznacznie, że zastosowanie dodat-

ku węgla szklistego ogranicza zużycie. Zarówno w grupie kompozytów zbrojonych cząstkami Al_2O_3 , jak i SiC widoczny jest wyraźny spadek zużycia po dodaniu węgla szklistego. Jest tak zarówno w przypadku zbrojenia cząstkami jednej wielkości, jak i wtedy, gdy stosowano mieszaninę cząstek różnej średnicy. Podobny, lecz mniej wyraźny skutek dodania węgla szklistego pokazują wyniki zużycia żeliwnej przeciwpróbki. W tym przypadku najlepsze okazuje się stosowanie zbrojenia cząstkami o różnej średnicy, a dodatek węgla nie wpływa znacząco na zmniejszenie zużycia partnera tarcia. Wyraźnie natomiast widoczny jest wpływ dodatku węgla szklistego na zużycie żeliwnego partnera tarcia kompozytów zbrojonych cząstkami jednej wielkości, dzieje się tak w przypadku kompozytów AM i AMCs oraz SM i SMCs.



Rys. 5. Ślad wytarcia na powierzchni kompozytu SMCs (AK12+SiC 25, 50, 100 μm Cs 100 μm) z naniesionym na powierzchni węglem szklistym

Fig. 5. Erosion rack on the SMCs (AK12+SiC 25, 50, 100 μm Cs 100 μm) composite layer with alluvial carbon glass on the surface

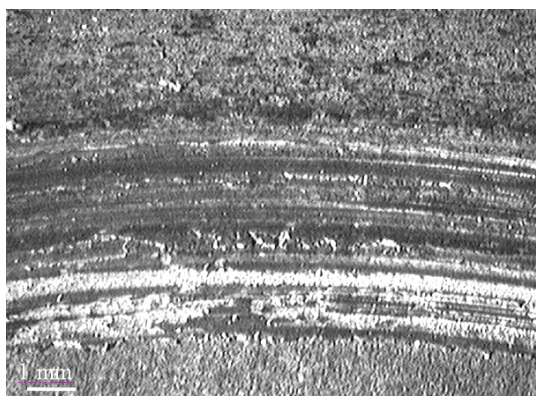


Rys. 6. Ślad wytarcia na powierzchni kompozytu AMCs (AK12+ Al_2O_3 25, 50, 100 μm Cs 100 μm) z naniesionym na powierzchni węglem szklistym

Fig. 6. Erosion rack on the AMCs (AK12+ Al_2O_3 25, 50, 100 μm Cs 100 μm) composite layer with alluvial carbon glass on the surface

Przeprowadzone badania mikroskopowe powierzchni kompozytów po tarcu pozwoliły prześledzić w sposób jakościowy mechanizmy odpowiadające za efekty trybologiczne wywołane obecnością cząstek zbrojących

Al_2O_3 i SiC z dodatkiem węgla szklanego. Zarówno osiągnięte zmniejszenie współczynnika tarcia, jak i zmniejszenie zużycia kompozytów z dodatkiem węgla szklanego wiązać można z efektem kruszenia cząstek węgla szklanego i osadzania się drobnych fragmentów rozkruszonych cząstek na powierzchni kompozytu. Efekt rozpraszania rozdrobnionego węgla szklanego widoczny jest na rysunkach 4 i 5. Dzięki temu na powierzchni kompozytu tworzy się warstwa węgla szklanego stanowiąca pewnego rodzaju stały środek smarujący (rys. 6). Warstwa taka nie powstaje w przypadku tarcia kompozytów bez dodatku węgla szklanego, gdzie widoczne są ślady zużycia w postaci bruzdowania i mikroskrawania w obszarze tarcia (rys. 7).



Rys. 7. Ślad zużycia na powierzchni kompozytu A50 ($\text{AK12}+\text{Al}_2\text{O}_3$ 50 μm) z widocznym bruzdowaniem

Fig. 7. Wear track on the A50 ($\text{AK12}+\text{Al}_2\text{O}_3$ 50 μm) composite layer with marked ridging

PODSUMOWANIE

Zastosowanie zbrojenia heterofazowego jest rozwiązaniem pozwalającym w znacznym stopniu rozszerzyć możliwości projektowania właściwości tribologicznych skojarzeń ciernych. Możliwe staje się bowiem dobieranie takich układów zbrojenia, dzięki którym przy zachowaniu wysokiej wartości, a także stabilizacji współczynnika tarcia ograniczyć zużycie elementów pary ciernej, tak jak to ma miejsce w przypadku kompozytów zbrojonych cząstkami jednakowej wielkości z dodatkiem węgla szklanego A50Cs i S50Cs.

Jest też możliwe zmniejszanie wartości współczynnika tarcia w zależności od potrzeb konstrukcyjnych. Efekt ten można osiągnąć poprzez zastosowanie do zbrojenia kompozytów mieszaniny cząstek o różnej średnicy (materiały zbrojone: Al_2O_3 25, 50, 100 μm , SiC 25, 50, 100 μm) lub przez zastosowanie cząstek różnej średnicy i dodatkowo węgla szklanego (materiały zbrojone: Al_2O_3 25, 50, 100 μm + Cs 100 μm , SiC 25, 50, 100 μm + Cs 100 μm).

Przedstawione w artykule wyniki badań dowodzą, że dodatek węgla szklanego, bez względu na rodzaj ceramicznego zbrojenia, poprawia właściwości tribologicz-

ne układu. Wpływa on na stabilizację wartości współczynnika tarcia w funkcji drogi tarcia i prawie całkowicie eliminuje etap docierania współpracujących powierzchni. W każdym ze zbadanych skojarzeń z udziałem węgla szklanego zanotowano spadek wartości współczynnika tarcia w porównaniu do materiałów bez tego dodatku. Uzyskane wyniki badań pozwalają również na stwierdzenie, że wielkością cząstek zbrojących tego samego rodzaju można wpłynąć na charakterystykę tribologiczną kompozytów. Wysoki poziom współczynnika tarcia i zwiększone zużycie uzyskuje się przy wykorzystaniu cząstek o tej samej wielkości (50 μm). Natomiast w przypadku mieszaniny cząstek różniących się granulacją (cząstki małe 25 μ i bardzo duże 100 μm) można osiągnąć obniżenie μ podobnie jak przez stosowanie dodatku węgla szklanego. Zastosowanie kompozytu zbrojonego różną granulacją cząstek nie skutkuje niestety zmniejszeniem zużycia się kompozytu podczas tarcia w podobny sposób jak przy wykorzystaniu zbrojenia heterofazowego z udziałem węgla szklanego.

Rozwiązaniem alternatywnym w stosunku do stosowania węgla szklanego jest zbrojenie mieszaniną cząstek o różnej średnicy. W materiałach tego typu (SM, AM) obserwowano zmniejszenie wartości współczynnika tarcia i jego stabilny przebieg. Wadą takiego rozwiązania jest duże zużycie kompozytu w trakcie eksploatacji.

LITERATURA

- [1] Sobczak J., Perspektywy rozwoju metalowych kompozytów w przemyśle samochodowym, Przegląd Odlewnictwa 1999, 4.
- [2] Allison J.E., Cole G.S., Metal matrix composites in the auto-motive industry, Opportunities and Challenges, Journal of Metals 1993, Jan.
- [3] Jolly M.R., Opportunities for aluminium based fibre reinforced MMC (FRMMc) in automotive castings, The Foundryman 1990, November.
- [4] Ames W., Alpas A.T., Wear mechanism in hybrid composites of graphite-20 pct SiC in A356 aluminium alloy (Al-7pct Si 0,3 pct Mg), Metallurgical and Materials Transactions A 1995, 26A, 1, 85-98.
- [5] Deuis R.L., Subramanian C., Yellup J.M., Abrasive wear of aluminium composites - a review, Wear 1996, 201, 132-134.
- [6] Deuis R.L., Subramanian C., Yellup J.M., Dry sliding wear of aluminium composites - a review, Composites Science and Technology 1997, 57, 415-435.
- [7] Posmyk A., Ślężona J., Dolata-Grosz A., Wieczorek J., Reibungs- und Schmierungsverhalten von Aluminium - legierungen mit einem verstärkten Oberflächenbereich, Technische Akademie Esslingen, 12th International Colloquium, January 11-13 2000, Tribology 2000 - Plus.
- [8] Wieczorek J., Dolata-Grosz A., Dyzia M., Ślężona J., Służalek G., Tribological properties of AK12-metal matrix composites reinforced with ceramic particles, Junior Euro-mat 02, Lozanna, Szwajcaria, do wglądu na stronie internetowej: www.junior.euomat.fems.org.

- [9] Dolata-Grosz A., Śleżiona J., Wieczorek J., Dyzia M., Structure and functional quality properties of composites sleeves obtaining by centrifugal casting, *Acta Metallurgica Slovaca* 2002, 8, 2, 283-288.
- [10] Wieczorek J., Właściwości trybologiczne warstw kompozytowych w odlewach z kompozytu AK12 - cząstki ceramiczne, *Rozprawa doktorska*, Katowice 2003.
- [11] Noguchi M., Present and future of composite materials for automotive application in Japan, *Proceedings IX International Conference on Composite Materials*, Woodhead Publishing Ltd, Madrid 1993, 1355-1362.
- [12] Alternate Materials Reduce Weight in Automobiles, *Advanced Material & Processes*, June 1993.
- [13] Ted Guo M.L., Tsao C.-Y.A., Tribological behavior of self-lubricating aluminium /SiC/ graphite hybrid composites synthesized by the semi-solid powder-desiccations method, *Composites Science and Technology* 2000, 60.
- [14] Beffort O., *Metal Matrix Composites (MMCs) from Space to Earth*. www.empsthun.ch

Recenzent
Zbigniew Górny