

Mariusz Walczak, Daniel Pieniak, Jarosław Bieniaś

Zużycie i struktura powierzchni aluminiowych kompozytów zbrojonych cząsteczkami SiC w warunkach tarcia technicznie suchego

Artykuł przedstawia wyniki badań tribologicznych aluminiowego materiału kompozytowego F3S.20S (zawierającego 20% obj. cząsteczek SiC) i stopu AlSi9Mg stanowiącego osnowę. Kompozyt ten znajduje zastosowanie jako nowoczesny materiał konstrukcyjny w przemyśle samochodowym, szczególnie na tłoki i tarcze hamulcowe. Wprowadzenie cząstek wzmacniających znacząco może zmieniać właściwości tribologiczne tych materiałów. W tym celu wykonano testy zużycia metodą ball-on-disc. Mikrostruktura i odporność na zużycie stopu osnowy i kompozytu zostały poddane analizie porównawczej. Wykazano, że kompozyt zbrojony SiC charakteryzuje się większym współczynnikiem tarcia i mniejszym zużyciem w porównaniu do osnowy.

Keywords: stopy aluminium, aluminiowe materiały kompozytowe, zużycie

Wstęp

Ciągły rozwój techniki motoryzacyjnej wyznacza nowe kierunki w zakresie intensywnego poszukiwania nowych materiałów konstrukcyjnych, zapewniających osiągnięcie coraz wyższych właściwości. Nowoczesną i jedną z najbardziej perspektywicznych grup są metalowe materiały kompozytowe (MMK) [1, 11, 13]. Przyczyną tak wzmożonej uwagi jest bez wątpienia zjawisko znacznej modyfikacji charakterystyk mechanicznych i fizycznych pod wpływem wprowadzenia zbrojenia do metalu bazowego (osnowy) [14, 17]. Spośród MMK coraz większe znaczenie w pracach naukowo-badawczych i wdrożeniowych przypisuje się odlewającym kompozytom o osnowie stopów aluminium (Al-Si) zbrojonych dyspersyjnie cząsteczkami ceramicznymi grafitu, fly ash'u, SiC oraz Al_2O_3 [1, 4, 5, 20].

Materiały kompozytowe w zależności od przeznaczenia posiadają kompleks właściwości m.in. podwyższoną wytrzymałość, odporność na zużycie, odpowiednie charakterystyki ślizgowe, odporność na szoki cieplne i procesy zmęczeniowe z uwzględnieniem tendencji do zmniejszania masy właściwej gotowego wyrobu kompozytowego [13, 17].

Aktualnie pierwszoplanowym zastosowaniem materiałów kompozytowych jest przemysł transportowy [2, 6, 15]. Aplikacja kompozytów zbrojonych dyspersyjnie cząsteczkami ceramicznymi zależy głównie od właściwości technologicznych wyrobu kompozytowego. Specyfika zastosowania materiałów kompozytowych powinna uwzględniać nie tylko właściwości kompozytu ale także koszty jego wytworzenia.

Prace badawczo-wdrożeniowe Sobczaka i współ. [23] potwierdzają, że kompozyty o osnowie aluminium zbrojone cząsteczkami ceramicznymi (20% obj. SiC) mogą być optymalnym materiałem na tarcze hamulcowe. Stwierdzili oni, że wprowadzenie ceramicznej fazy zbrojącej powoduje wzrost charakterystyk eksploatacyjnych badanych kompozytów, wzrost odporności na zużycie i szoki cieplne w porównaniu do stosowanych obecnie żeliwnych tarcz hamulcowych.

Interesującym również zastosowaniem kompozytów są tłoki silników spalinowych [12]. Materiały osnowy stanowią powszechnie stosowane na tłoki stopy Al-Si, a zbrojeniem są tlenek aluminium, węgiel krzemu, grafit i fly ash. Zastosowanie tłoków kompozytowych ma na celu wzrost właściwości materiału tłoka, zwłaszcza stref które pracują w ekstremalnych warunkach: denko i płaszcz tłoka. Kompozytowe tłoki pozwalają na redukcję masy tłoka jako całości, lepsze uszczelnienie pary tłok-cylinder, wzrost wytrzymałości zmęczeniowej, wysoką odporność na szoki cieplne, zmniejszenie współczynnika rozszerzalności cieplnej, odporność na zużycie ściernie, korzystne zmiany właściwości mechanicznych (w temperaturze otoczenia i podwyższonych temperaturach). Wpływa to na wzrost właściwości eksploatacyjnych i podniesienie wydajności pracy silnika jako całości.

Wprowadzenie do osnowy aluminiowej twardej cząsteczek ceramicznych typu SiC, Al_2O_3 pozwala na uzyskanie materiału posiadającego niską gęstość, wyższe właściwości mechaniczne od materiału osnowy (również w podwyższonej temperaturze), a w szczególności większą odporność na zużycie ściernie [9, 18, 20, 23]. Właściwo-

ści tribologiczne (odporność na ścieranie, współczynnik tarcia) są zależne nie tylko od udziału cząsteczek, ale również od materiału cząsteczek, ich wielkości i rozmieszczenia w osnowie, jak i od samego rodzaju materiału osnowy i użytej techniki wytwarzania. Według Hoskinga [17] dużą odporność na ścieranie kompozytów zapewniają cząsteczki tlenków i węglików o średnicy powyżej 100 μm . Badania prowadzone przez Slezionę [7,21] wykazały, że odporność na ścieranie kompozytów zbrojonych cząsteczkami zależy wprost proporcjonalnie od udziału objętościowego i odwrotnie proporcjonalnie od wielkości cząsteczek.

W pracy przedstawiono wyniki badań tribologicznych materiału kompozytowego o osnowie aluminium zbrojonego cząsteczkami SiC. Celem podjętych badań było określenie wpływu fazy zbrojącej SiC na zużycie w warunkach tarcia suchego w porównaniu do stopu osnowy.

1. Metodyka badań

Do badań użyto odlewniczego stopu aluminium AlSi9Mg oraz kompozytu o osnowie aluminium zbrojonego cząsteczkami 20% SiC. Badania wykonano na próbkach surowych (nieobrobionych cieplnie). Stop AlSi9Mg (AK9 wg. [10]) ma skład chemiczny zbliżony do osnowy kompozytu F3S.20S. Skład chemiczny badanych materiałów podano w tab. 1 i 2.

Do badań tribologicznych użyto próbek w kształcie płytek prostokątnych o wymiarach (wys. \times szer. \times grub.) 25 \times 25 \times 4 mm. Próbkę podano szlifowaniu na wodnych papierach ściernych o ziarnistości odpowiednio 220, 600 i 1200. Następnie próbki polerowano mechanicznie przy użyciu zawiesziny diamentowej 3 μm i zawiesziny tlenków 0,05 μm . Następnie przemywano je acetonem i suszono.

Testy zużycia wykonano na tribotesterze typu „ball-on-disc” firmy CSM Instruments. Jako przeciwpróbki (ball) użyto kulek o średnicy 6 mm wykonanych z Al₂O₃ o twardości 2000HV (firmy CSM Instruments). Badania realizowano pod obciążeniem 10N z prędkością liniową 12,5 mm/s na promieniu 1,99 mm. Całkowita droga testu wyno-

siła 100 m podczas, której rejestrowano zmianę współczynnika tarcia. Miarą zużycia był ubytek objętościowy próbki, powstały jako ślad wytarcia w wyniku współpracy próbki i przeciwpróbki. W tym celu za pomocą profilometru stykowego Dek-tak 150 firmy Veeco Instruments, po obwodzie próbki (w 12 miejscach) mierzono pole profilu wytarcia próbki. Promień zaokrąglenia igły pomiarowej wynosił 2 μm . Zużycie objętościowe wyznaczono jako iloczyn średniej wartości pola wytarcia próbki i obwodu koła śladu wytarcia powstałego w teście ball-on-disc. Dodatkowo mierzono masowy ubytek zużycia na laboratoryjnej wadze elektronicznej WAS-220X z dokładnością $\pm 0,1\text{mg}$.

Mikrostrukturę badanych materiałów analizowano na mikroskopie optycznym Nikon MA200, a powierzchnię po testach tribologicznych na mikroskopie skaningowym Phenom G2 pro.

2. Rezultaty badań

W strukturze stopu podeutektycznego AlSi9Mg obserwuje się charakterystyczną dendrytyczną mikrostrukturę odlewniczych stopów Al-Si. Pomędzy dendrytami roztworu stałego krzemu w aluminium $\alpha(\text{Al})$ występują drobnoziarniste wydzielienia eutektyki $\alpha(\text{Al})+\beta(\text{Si})$ (rys. 1a).

Mikrostrukturę kompozytu F3S.20S o osnowie podeutektycznego stopu Al-Si zawierający 20% obj. cząsteczek SiC o nominalnym rozmiarze 20 μm przedstawiono na rys. 1b. Widoczna jest iglasta eutektyka $\alpha(\text{Al})+\beta(\text{Si})$ oraz cząsteczki SiC na tle roztworu stałego krzemu w aluminium $\alpha(\text{Al})$. Kompozyt był odlewany grawitacyjnie. Cząsteczki SiC rozmieszczone są w przestrzeniach międzydendrytycznych, na granicach ziaren roztworu stałego. Obserwowane zjawisko jest znane w literaturze [14,16] specjalistycznej i nosi nazwę „wypychania” cząsteczek powyżej frontu krystalizacji przez rosnące z fazy ciekłej kryształy. Ilość „wypchniętych” cząsteczek zależy od szybkości chłodzenia. Stwierdzono jednak dobry stopień jednorodności rozkładu cząstek fazy ceramicznej SiC w całej objętości badanych próbek.

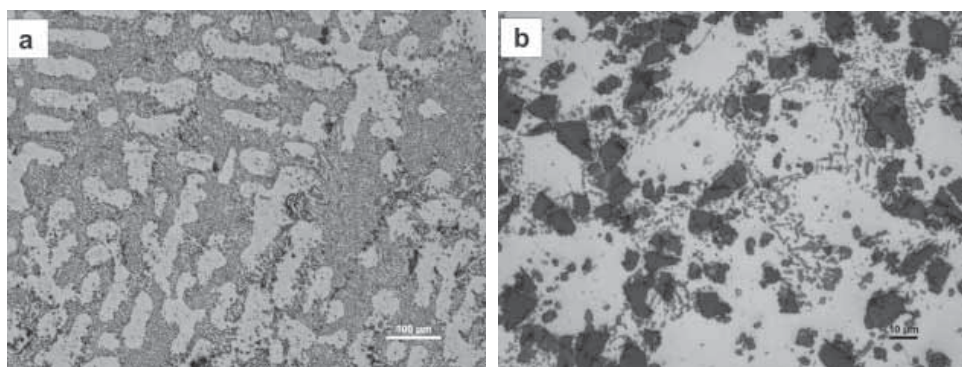
Wartości zarejestrowanych współczynników tarcia zamieszczono w tab. 3, a interpretację graficzną w funkcji drogi przedstawiono na rys. 2.

Tab. 1. Skład chemiczny osnowy kompozytu F3S.20S wg. [22]

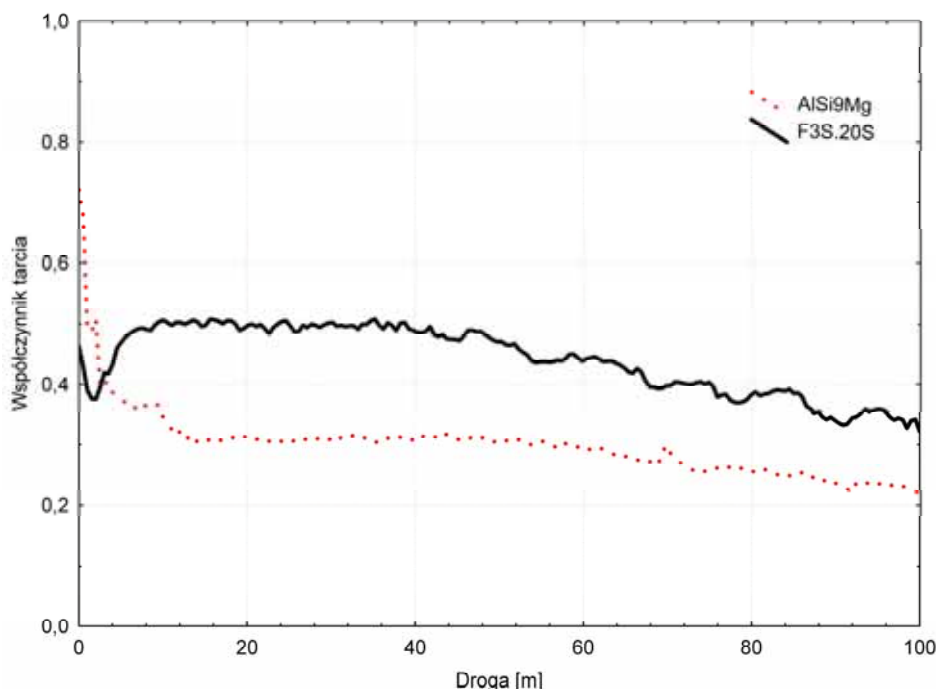
Zawartość pierwiastków, % wag.										
Si	Cu	Mg	Mn	Ti	Fe	Zn	Cr	Ni	Sr	Al
9,15	0,005	0,63	0,005	0,08	0,10	0,005	0,003	0,007	0,009	reszta

Tab. 2. Skład chemiczny odlewniczego stopu aluminium AlSi9Mg wg normy PN-76/H-88027 [10]

Zawartość pierwiastków, % wag.							
Si	Cu	Mg	Mn	Ti	Fe	Zn	Al
8,5-10,5	0,3	0,25-0,4	0,25-0,5	0,15	0,5-0,8	0,2	reszta



Rys. 1. Mikrostruktura: a) stopu AlSi9Mg, b) kompozytu F3S.20S



Rys. 2. Wykres zmian współczynnika tarcia w funkcji przebytej drogi przy obciążeniu 10N

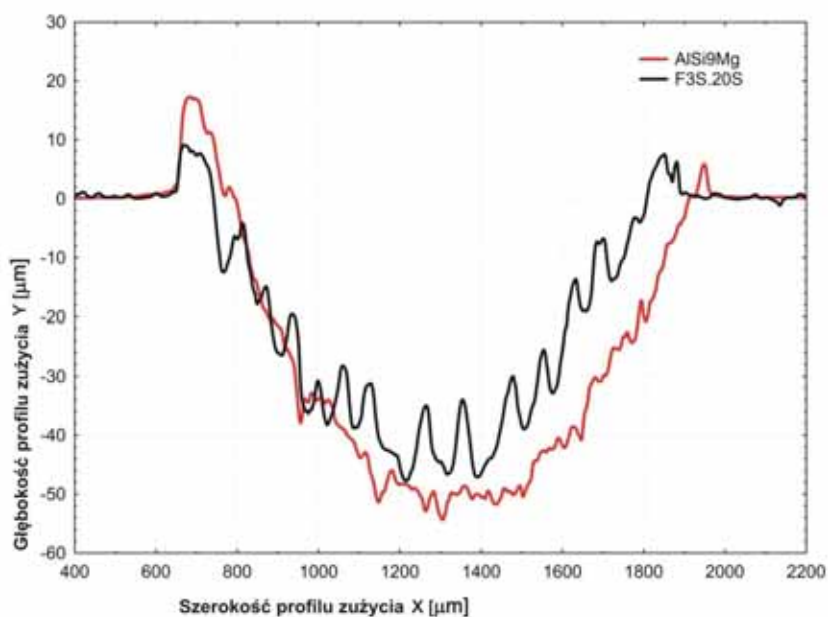
Tab. 3. Zestawienie wyznaczonych wartości współczynników tarcia badanych materiałów we współpracy z przeciwpróbką z Al_2O_3

Materiał próbki	Max	Min	Średnia	Odchylenie stand.
AlSi9Mg	0,781	0,200	0,299	0,058
F3S.20S	0,531	0,217	0,441	0,057

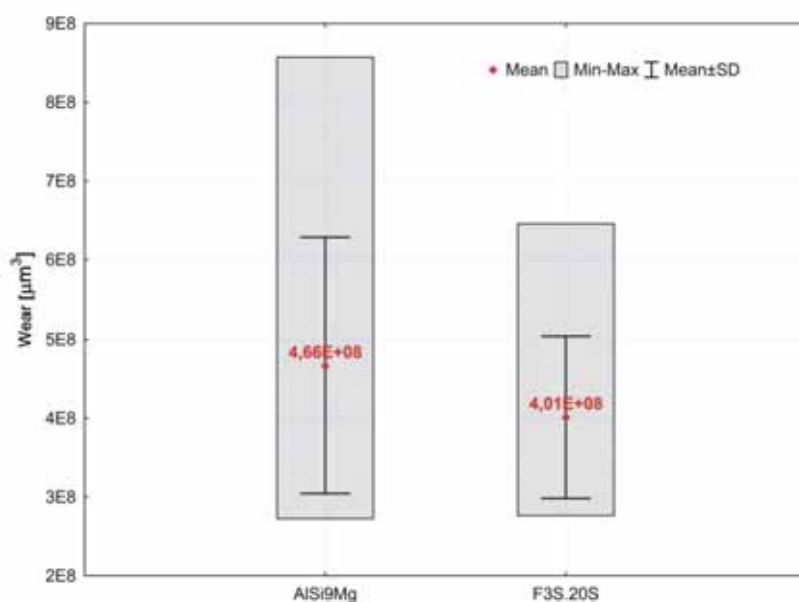
Analiza porównawcza współczynników tarcia wykazała, że materiał kompozytowy charakteryzuje się wyższą wartością średnią $\mu=0,441$, niż materiał osnowy $\mu=0,299$. Początkowe wyższe wartości współczynników tarcia wynikają z faktu, iż najpierw ulegają ścinaniu wierzchołki profilu chropowatości, a dopiero później następuje plastyczne odkształcenie osnowy. Po procesie docierania powierzchni tarcia zwiększa się pole kontaktu pomiędzy współpracującymi powierzchniami i następuje zmniejszenie i stabilizowanie

się współczynnika tarcia. Wyższy współczynnik tarcia w przypadku kompozytu związany jest z oporem jaki stawiają przemieszczaniu się twarde cząsteczki SiC. Natomiast w przypadku materiału AlSi9Mg mniejsza wartość współczynnika tarcia związana jest z plastyczną deformacją toru zużycia miękkiej osnowy i ślizganiem się po niej twardej przeciwpróbki z Al_2O_3 . Dodatkowo spiętrzeniu ulegają obrzeża krawędzi torów zużycia (rys. 3). Większe spiętrzenie obserwowane jest dla materiału AlSi9Mg. Poprzeczny profil śladu wytarcia próbek wskazuje na większe zużycie materiału stanowiącego osnowę.

Na rys. 4 przedstawiono wyniki zużycia objętościowego badanych materiałów. Zaobserwowano większą odporność na zużycie materiału kompozytowego F3S.20S o ok. 14% w stosunku do materiału stanowiącego w teście porównawczym osnowę.



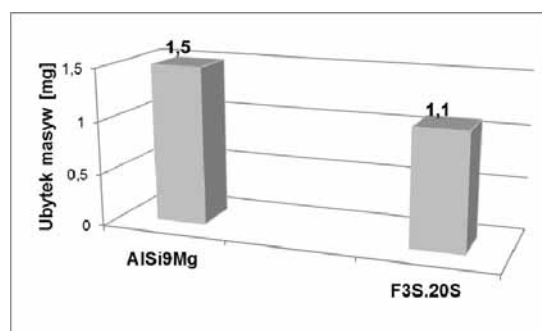
Rys. 3. Typowy profil śladu zużycia



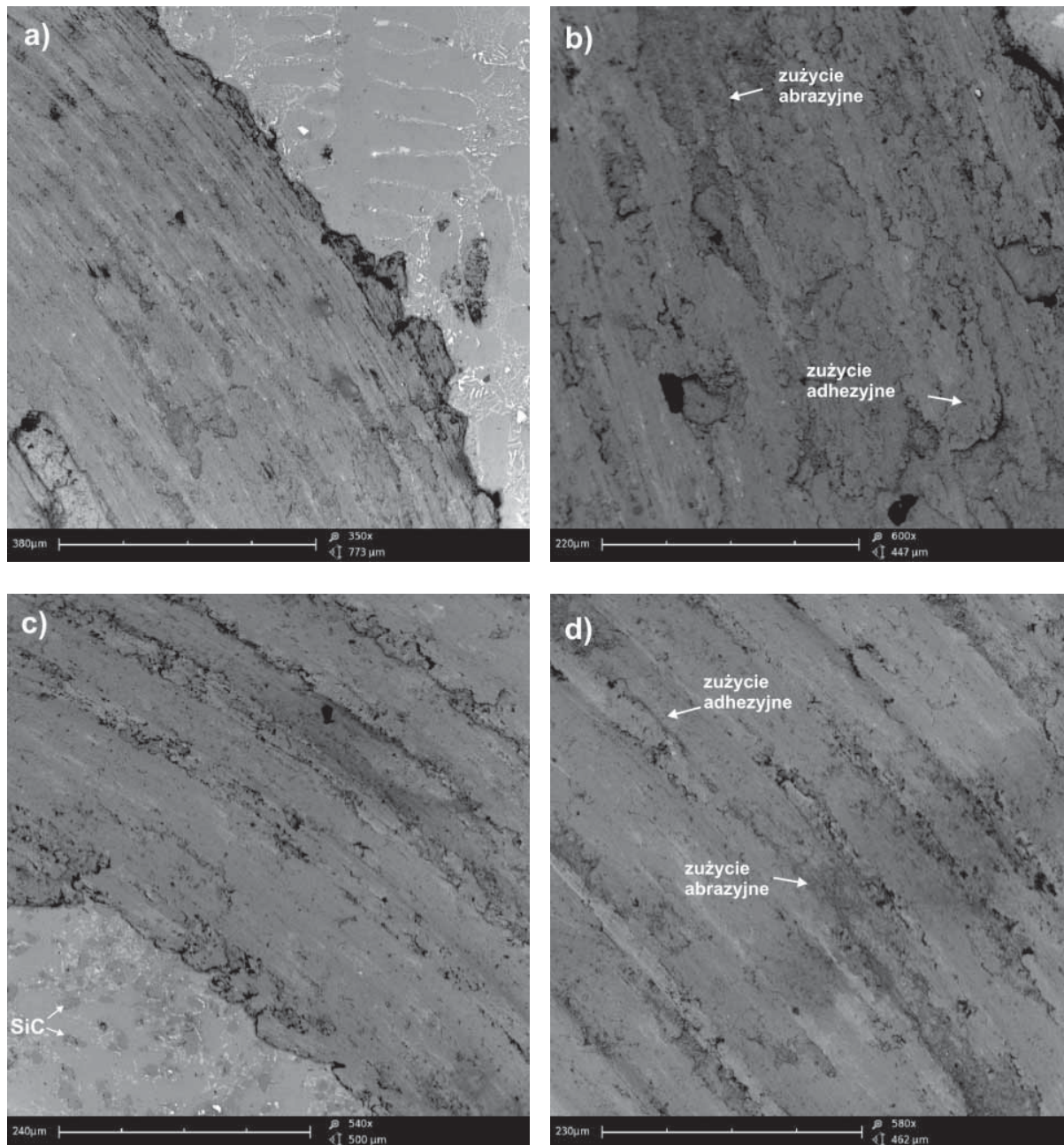
Rys. 4. Wykres zużycia objętościowego badanych materiałów uzyskany na dystansie 100 m

Na rys. 5 przedstawiono zmiany ubytku masowego badanych materiałów, które potwierdzają tendencję uzyskanych wyników w analizie ubytku objętościowego (rys. 3). Dane literaturowe [8,19,20] potwierdzają fakt, że materiały aluminiowe zbrojone twardymi cząsteczkami ceramicznymi wykazują wyższą odporność na zużycie w porównaniu do materiału osnowy.

Na rys. 6 przedstawiono wyniki analizy na mikroskopie skaningowym śladów zużycia badanych materiałów. W przypadku stopu AlSi9Mg zaobserwowano, że w wyniku testów tribologicznych występy i nierówności powierzchni są szcziplane,



Rys. 5. Wykres zmian ubytku masowego badanych materiałów po teście ball-on-disc



Rys. 6. Mikrostruktura SEM: (a) krawędź śladu zużycia stopu AlSi9Mg, (b) środek śladu zużycia stopu AlSi9Mg, (c) krawędź śladu zużycia kompozytu F3S.20S i (d) środek śladu zużycia kompozytu F3S.20S

a następnie ścinane co świadczy o występującym tu zużyciu adhezyjnym. Zużycie takie zachodzi najczęściej przy małych prędkościach i dużych naciskach szczególnie w warunkach tarcia suchego, gdy brak jest smarowania. W obszarach występowania eutektyki $\alpha(\text{Al})$ obserwowano plastyczne „rozmywanie” się materiału. W obszarach gdzie dominowały pierwotne wydzielania krzemu obserwowano zużycie abrazyjne.

Natomiast w przypadku kompozytu mamy do czynienia z wyrwaniem fazy zbrojącej SiC i intensyfikacją procesu zużycia przez jej dodatkowe oddziaływanie z powierzchniami trącymi. Takie

zachowanie skutkuje zwiększeniem efektu abrazyjnego zużycia kompozytu (rys. 6c i d) lub luźnym przetaczaniem się twardej fazy ceramicznej SiC między współpracującymi powierzchniami próbki i przeciwpróbki. Wówczas przetaczana cząstka może powodować powstawanie zarysowań na powierzchni współpracującej próbki lub plastyczną deformację niezbrojonych fragmentów osnowy pozostawiając charakterystyczne ślady w postaci bruzd, co dodatkowo obrazuje profil śladu zużycia na rys. 3. Z czasem cząstka ulega skruszeniu i usunięciu poza obszar śladu zużycia. Dodatkowo może dochodzić do wgnia-

tania cząstki zbrojącej w osnowę. W wyniku tego może dojść do adhezyjnego szepienia z fragmentem osnowy kompozytu, co w konsekwencji prowadzi do jego wyrwania lub plastycznego odkształcenia osnowy obserwowanego jako „rozmaływanie” osnowy na powierzchni tarcia, co potwierdzają badania prowadzone przez autorów publikacji [20].

Autorzy prac [3,8,18,20,21] potwierdzają, że dominującymi czynnikami wpływającymi na niszczenie warstwy wierzchniej wśród aluminiowych kompozytów zbrojonych twardymi cząsteczkami ceramicznymi jest zużycie abrazyjne i adhezyjne.

Podsumowanie

Dane literaturowe wskazują, że aluminiowe materiały kompozytowe zbrojone ceramiczną fazą SiC zajmują coraz bardziej stabilne i szersze zastosowanie pośród materiałów tradycyjnych, dotychczas stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym. Właściwości tribologiczne kompozytów zbrojonych SiC zależą głównie od osnowy, zawartości fazy zbrojącej, parametrów obróbki i sposobów otrzymywania. Stosowanie w kompozytach zbrojenia SiC zwiększa jego odporność na zużycie tribologiczne i podwyższa współczynnik tarcia w porównaniu do materiału osnowy. Dominującym zjawiskiem w warunkach tarcia technicznie suchego kompozytu F3S.20S i stopu AlSi9Mg jest zużycie abrazyjne i adhezyjne oraz plastyczna deformacja materiału osnowy.

Bibliografia

1. Bieniaś J., Walczak M., Surowska B., Sobczak J., *Microstructure and corrosion behavior of aluminium fly ash composites*. Journal of Optoelectronics and advanced Materials, Vol. 5, No. 2 2003.
2. Challen B., Barnescu R., *Diesel Engine Reference Book*. Butterworth-Heinemann, Oxford 1999.
3. Cree D., Pugh M., *Dry wear and friction properties of an A356/SiC foam interpenetrating phase composite*. Wear, No 272, 2011, pp. 88–96.
4. Ejirofor J.U., Reddy R.G., *Developments in the Processing and Properties of Particulate Al-Si Composites*. Journal of Metals, Vol. 47, No. 11, 1997.
5. Górny Z., Sobczak J., *Metal Matrix Composites Fabricated by the Squeeze Casting Process. Transactions of the Foundry Research Institute. Special Issue*, Vol. XLV, No. 42, Kraków 1995.
6. Huang S.X., Paxton K., *A Macrocomposite Al Brake Rotor for Reduced Weight and Improved Performance*. Journal of Metals, Vol. 50, No. 8, 1998.
7. Hyla I., Śleziona J., Myalski J., *Technologia wytwarzania i właściwości wybranych stopów aluminium zbrojonych cząsteczkami ceramicznymi*. Inżynieria Materiałowa, 1997, nr 6.
8. Mahdavi S., Akhlaghi F., *Effect of the Graphite Content on the Tribological Behavior of Al/Gr and Al/30SiC/Gr Composites Processed by In Situ Powder Metallurgy (IPM) Method*. Tribology Letters 2011, No 44.
9. Mindivan H., Kayali E. S., Cimenoglu H., *Tribological behavior of squeeze cast aluminum matrix composites*. Wear 2008, No 265
10. PN-76/H-88027: *Odlewnicze stopy aluminium. Gatunki*. Polski Komitet Normalizacji i Miar, UKD 669.715.018.28.
11. Rittner M.N., *Expanding World Markets for MMCs*. Journal of Metals 2000, Vol. 52, No. 11.
12. Rudnik D., Sobczak J., *Tłoki kompozytowe do silników spalinowych*. Wyd. Instytutu Transportu Samochodowego, Warszawa 2001.
13. Sobczak J., *Metalowe materiały kompozytowe*. Wyd. Instytutu Odlewnictwa i Instytutu Transportu Samochodowego, Kraków-Warszawa 2002.
14. Sobczak J., *Metalowe materiały kompozytowe. Stan aktualny i perspektywy rozwoju w świetle polityki naukowej, technologii i praktyki przemysłowej Stanów Zjednoczonych*. Wyd. Instytutu Odlewnictwa, Kraków 1996.
15. Sobczak J., *Perspektywy rozwoju metalowych kompozytów w przemyśle samochodowym*. Przegląd Odlewnictwa 1999, nr 4,
16. Sobczak J., Sobczak L., Przystaś G., *Zastosowanie materiałów odpadowych w odlewnictwie na przykładzie popiołów lotnych. Stan aktualny i perspektywy zastosowania*. Instytut Odlewnictwa, Kraków 1999.
17. Śleziona J., *Podstawy technologii kompozytów*. Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice, 1998.
18. Tandon K.N., Feng Z.C., Li X.Y., *Wear behavior of SiC particulate reinforced aluminum composites sliding against steel balls under dry and lubricated conditions*. Tribology Letters 1999, No 6.
19. Veeresh Kumar G.B., Rao C.S.P., Selvaraj N., *Studies on mechanical and dry sliding wear of Al6061-SiC composites*. Composites: Part B 2012, 43.
20. Vencla A., Bobicb I., Arosteguic S., Bobicb B., Marinkovi'ca A., Babi'ce M., *Structural, mechanical and tribological properties of A356 aluminium alloy reinforced with Al₂O₃, SiC and SiC + graphite particles*. Journal of Alloys and Compounds 2010, No 506.
21. Wieczorek J., Śleziona J., Myalski J., Dolata-Grosz A., Dyżia M., *Zużycie i struktura powierzchni po współpracy w warunkach tarcia technicznie suchego w kompozytach AK12-cząstki ceramiczne*. Kompozyty 2003, nr 3, .
22. Wojciechowski A., *Wpływ obecności fazy zbrojącej kompozytu na bazie stopu aluminium na wybrane właściwości użytkowe tarczy hamulcowej*. Rozprawa doktorska, ITS – PL, Lublin 11 lipca 2001.
23. Wojciechowski A., Sobczak J., *Kompozytowe tarcze hamulcowe pojazdów drogowych*. Wyd. Instytutu Transportu Samochodowego, Warszawa 2001.

Wear and surface structure of aluminium composites reinforced SiC particulate in dry sliding conditions

The paper presents results of tribology studies of aluminium matrix composites F3S.20S (contain 20 vol. % of SiC particles) and AlSi9Mg matrix alloy. This composite can be applied as modern construction material in automotive industry, particularly for brake discs and pistons. The addition of reinforcement particles could significantly influence of tribology properties of these materials. The wear tests were made using a ball on disc method. Microstructural and wear resistance of matrix alloy and composites were investigated and compared. Reinforced SiC composite characteristic higher values coefficient of friction and wear smaller than matrix alloy.

Key words: aluminium alloys, aluminium matrix composites, wear

Autorzy:

dr inż. **Mariusz Walczak** – Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Materiałowej

dr inż. **Daniel Pieniak** – Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego, Katedra Techniki Pożarniczej, Zakład Mechaniki Stosowanej

dr inż. **Jarosław Bieniaś** – Wyższa Szkoła Ekonomii i Innowacji w Lublinie, Wydział Transportu i Informatyki