

Andrzej Wojciechowski<sup>1</sup>, Krystyna Pietrzak<sup>4</sup>

Instytut Transportu Samochodowego, ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa

Jerzy Sobczak<sup>2</sup>

Instytut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków

Zbigniew Bojar<sup>3</sup>

Wojskowa Akademia Techniczna, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

## OCENA WŁASNOŚCI TRIBOLOGICZNYCH KOMPOZYTOWYCH TARCZ HAMULCOWYCH

Zbrojone dyspersyjnie metalowe materiały kompozytowe na bazie aluminium (AIMC) są używane głównie na skojarzenia cierne, pracujące w warunkach tarcia technicznie suchego. Różnorodność metodyk badawczych i brak powszechnie przyjętych standardów wyznaczania odporności na ścieranie spowodowały, że w pracy przedstawiono wyniki badań tribologicznych, najbardziej odzwierciedlających, zdaniem autorów, rzeczywiste zjawiska zachodzące w parze ciernej tarcza hamulcowa-okładzina cierna w warunkach eksploatacyjnych. Porównawcze badania tribologiczne różnych materiałów kompozytowych o osnowie stopów aluminium, które mogłyby być zastosowane na tarczy hamulcowej, oraz żeliwa szarego z grafitem płatkowym oceniano przez określenie wskaźników zużycia tribologicznego, tj. współczynnika tarcia i stopnia zużycia. Uzyskane wyniki wskazują, że w danych warunkach eksperymentalnych zarówno żeliwo, jak i kompozyty cechują się zbliżoną odpornością na zużycie tribologiczne. Zużycie AIMC zależy głównie od temperatury pracy pary ciernej. Z badań jednoznacznie wynika, że kompozyty aluminiowe mogą bezpiecznie pracować do temperatury 300°C. Wartość współczynnika tarcia w parze ciernej z AIMC jest w miarę równomierna i stabilna dla wszystkich badanych temperatur pracy pary ciernej. Wszystkie testowane materiały spełniały wymagania dotyczące dopuszczalnych wielkości współczynnika tarcia.

## THE WEAR RESISTIVITY EVALUATION OF COMPOSITE BREAK ROTORS

Particulates reinforced aluminum matrix composites (AIMCs) are generally used on frictional couples working under technically dry friction conditions. Variety of research methodology and lack of commonly used standards concerning estimation of wear resistance contributed to the fact that this paper presents two techniques of tribology testing, according to the authors, the real effects occurring in the frictional couple: break rotor-friction lining in service conditions. The comparative tribology investigations of the different aluminum based composite materials (such as F3S.20S - AlSi9Mn/22 vol.% SiC, F3N.20S - AlSi10FeMnMg/22 vol.% SiC and AlSi12CuNiMg/9 vol.% fly ash precipitator obtained by gravity casting in permanent mold (GR), lost foam method (LF) and squeeze cast (SQ), in as cast and heat treated conditions), which could be used for break rotors and cast iron, have been estimated through defining the tribology wear indexes (friction coefficient and wear resistance) in two independent tests. The obtained findings show that in the given experimental conditions both the irons as well as composites are characterized by similar wear resistance (Tables 1 and 2). The wear of AIMCs depends mostly on the temperature of the active frictional couple. Furthermore, as a result of the research it can be synonymously inferred that the aluminum composites can safely work in the temperature up to 300°C (Figs 3 and 4). The value of the friction coefficient in the frictional couple is equal and stable for all temperatures at which the active friction couple has been examined. All tested materials have fulfilled the requirements concerning the acceptable quantities of friction factor. Additionally, initial fractography investigation were done, showing formation of the „film” on the tribosurface, containing elements preferably coming from the pad's material (Fig. 5).

## WPROWADZENIE

Metalowe materiały kompozytowe na bazie stopów metali lekkich stanowią obecnie jedną z najbardziej obiecujących i rozwijających się grup materiałów konstrukcyjnych. Podstawową korzyścią płynącą z zastosowania ich jako materiałów nowej generacji może być znaczne obniżenie masy konstrukcji, przy jednoczesnym zachowaniu wymaganych właściwości mechanicznych i bezpieczeństwa eksploatacji. Dobre właściwości materiałów kompozytowych w konsekwencji umożliwiają optymalizację konstrukcji projektowanych części, czyli

dalszą poprawę niezawodności i cech użytkowych wyrobu finalnego.

Obecny rozwój konstrukcji układów hamulcowych charakteryzuje się poszukiwaniem możliwości szybkiego odprowadzania znacznych ilości ciepła, powstającego podczas pracy skojarzenia ciernego oraz zmniejszenia zmian wartości współczynnika tarcia pomiędzy współpracującymi elementami ciernymi w zmiennych warunkach pracy.

<sup>1</sup> dr inż., <sup>2</sup> dr hab. inż., <sup>3</sup> dr hab. inż., <sup>4</sup> dr inż.

Tarcze hamulcowe są najbardziej obciążonymi elementami układu hamulcowego. Ich jakość i konstrukcja decydują zatem w sposób zasadniczy o skuteczności działania hamulców.

Niezależnie od typu skojarzenia, wszystkie materiały stosowane na elementy cierne układów hamulcowych powinny charakteryzować się:

- a) odpowiednio wysoką wartością współczynnika tarcia  $\mu$  oraz dużą jego stabilnością i małą czułością na zmianę: prędkości poślizgu, nacisków jednostkowych, liczby dokonanych zahamowań, czasu pracy, stopnia zwilżenia wodą i stopnia zanieczyszczeń, np. piaskiem (w praktyce zaleca się  $\mu = 0,3 \div 0,4$ ),
- b) dużą odpornością na zużycie w przewidywanych warunkach eksploatacyjnych pracy,
- c) dużą stabilnością właściwości w wysokiej temperaturze i odpornością na szoki cieplne oraz dobrym przewodnictwem cieplnym,
- d) wystarczającą wytrzymałością mechaniczną,
- e) małą skłonnością do zacierania powierzchni ślizgowych oraz łatwością docierania się,
- f) małą higroskopijnością i zwilżalnością,
- g) technologicznością i łatwością wykonania.

Do najbardziej perspektywicznych materiałów kompozytowych na elementy par ciernych (głównie układów hamulcowych) można zaliczyć zbrojone dyspersyjnie kompozyty o osnowie stopów aluminium, zawierające fazę zbrojącą w postaci cząsteczek węgla krzemu SiC, tlenku glinu  $Al_2O_3$  lub popiołów lotnych (ang. *fly ash*) [1].

Zastosowanie kompozytów aluminiowych w produkcji tarcz (bębnów) hamulcowych z założenia powinno przyczynić się do:

- zmniejszenia masy pojazdu, w tym głównie masy nieresorowanej,
- zmniejszenia sił bezwładności w ruchu postępowym w efekcie zwiększenia dynamiki pojazdu przy rozpędzaniu i skrócenia drogi hamowania,
- obniżenia poziomu hałasu,
- zwiększenia trwałości elementów układu hamulcowego,
- uproszczenia operacji wyważania elementów wirujących,
- stabilizacji parametrów charakteryzujących proces tarcia,
- wyeliminowania niebezpieczeństwa powstawania mikropęknięć w efekcie zmęczenia cieplnego, a nawet gwałtownego zniszczenia (rozpadu) tarczy hamulcowej pod wpływem powtarzających się szoków cieplnych (przypadki gwałtownego chłodzenia tarczy nagrzonej do wysokiej temperatury w wyniku kontaktu z wodą),
- poprawy bezpieczeństwa i komfortu jazdy, jak również zmniejszenia zużycia paliwa i opon.

Dodatkową zaletą kompozytów aluminiowych (jak każdego innych kompozytów metalowych) jest możliwość sterowania ich przewodnością cieplną w wyniku optymalizacji udziału objętościowego, kształtu, rozmiarów i rozmieszczenia fazy zbrojącej.

Przewiduje się, że można będzie osiągnąć ponad 50% zmniejszenie masy w porównaniu z żeliwnymi tarczami hamulcowymi przy jednoczesnym 3-krotnym wzroście efektywności odprowadzenia ciepła.

Celem pracy było porównanie stosowanych na tarcze (bębny) hamulcowe wybranych materiałów tradycyjnych i kompozytowych oraz sprawdzenie ich przydatności użytkowej [2]. Ponadto przedstawiono wpływ temperatury pracy skojarzenia cierne jako podstawowego czynnika wpływającego na wielkość zużycia metalowych materiałów kompozytowych przeznaczonych na tarcze hamulcowe i wybrane wyniki badań fraktograficznych tribopowierzchni.

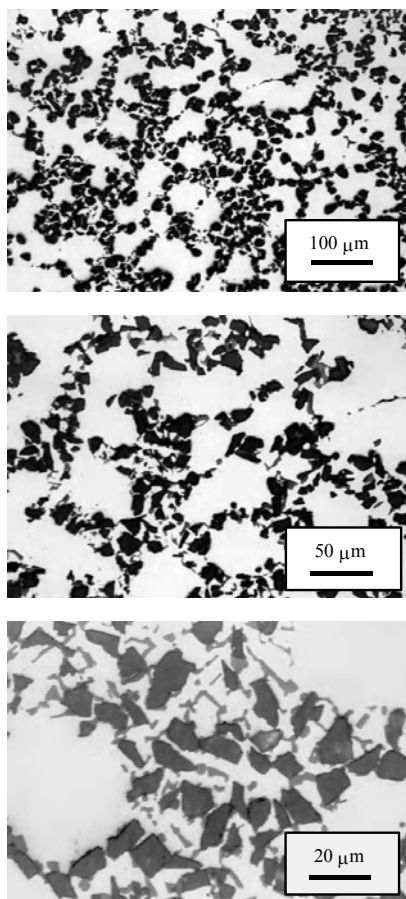
## MATERIAŁ BADAWCZY

W celu porównania odporności na zużycie ściernie materiałów tradycyjnych, stosowanych powszechnie w układach hamulcowych i nowoczesnych materiałów kompozytowych zawierających fazę zbrojącą, wytypowano do badań następujące materiały:

- 1) żeliwo szare z grafitem płatkowym - jako materiał odniesienia (tradycyjny),
- 2) kompozyty o osnowie stopu aluminium, zbrojone dyspersyjnie cząsteczkami SiC lub popiołów lotnych, otrzymane w wyniku odlewania grawitacyjnego (GR), odlewania metodą pełnej formy (lost foam - LF) oraz prasowania w stanie ciekłym (SQ), oznaczone umownie jako:
  - F3S.20S<sub>ac</sub>(GR) i F3N.20S<sub>ac</sub>(LF), stopy AlSi9Mg i AlSi10FeMnMg odpowiednio, zawierające 22% obj. SiC - kompozyty w stanie lanym (bez obróbki cieplnej - ac),
  - ALFA<sup>®</sup><sub>ac</sub>(GR) stop AlSi12CuMg, zawierający 9% obj. mikrogranulek popiołu lotnego - kompozyt w stanie lanym (ac),
  - ALFA<sup>®</sup><sub>ht</sub>(SQ) - kompozyt po obróbce cieplnej (ht).

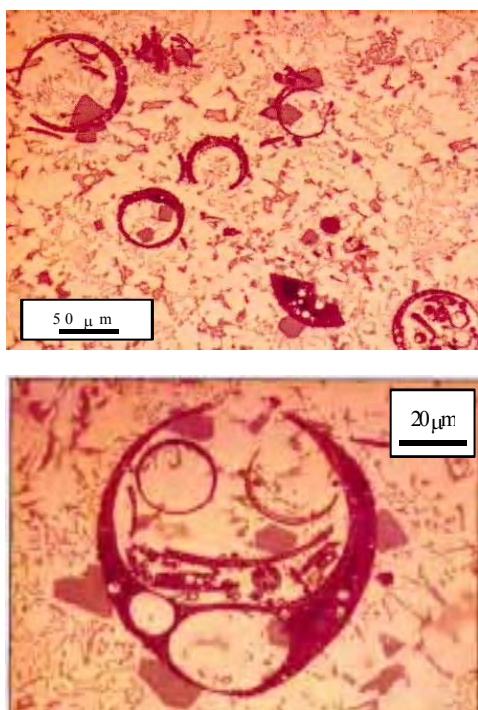
Prawidłowość wybrania materiału badawczego, z punktu widzenia technologii otrzymania, oceniono wstępnie na podstawie jakościowych badań metalograficznych w zakresie mikroskopii optycznej. Przykłady mikrostruktur typowych dla badanych materiałów przedstawiono na rysunkach 1 i 2.

Przeprowadzone obserwacje mikroskopowe potwierdziły fakt zastosowania właściwej technologii odlewania. Świadczy o tym równomierność rozmieszczenia niezaglomerowanej fazy zbrojącej. Badania metalograficzne i ich wyniki przedstawiono wcześniej w pracach [2, 3].



Rys. 1. Mikrostruktura kompozytu F3N.20S<sub>ac</sub>(LF) przy różnych powiększeniach

Fig. 1. Microstructure of F3N.20S<sub>ac</sub>(LF) composite in different magnifications



Rys. 2. Mikrostruktura kompozytu ALFA® (aluminium AK12 z popiołami lotnymi)

Fig. 2. Microstructure of ALFA® composite (AK12 with fly ash)

## BADANIA TRIBOLOGICZNE

Do badań tribologicznych przygotowano próbki w kształcie pierścienia z kołnierzem. Część robocza pierścienia posiada średnicę zewnętrzną 45 mm, wewnętrzną 17 mm oraz wysokość 12 mm. Pomiary przeprowadzono na aparacie bezwładnościowym Ranzi LRC.

Przeciwpółki wykonano z materiału ciernego o symbolu DB 857, stosowanego na nakładki cierne hamulców tarczowych w samochodach Daewoo.

Biorąc pod uwagę fakt, że w zakresie badań tribologicznych materiałów ciernych występuje duża różnorodność stosowanych metodyk badawczych i brak jest powszechnie przyjętych standardów określania odporności na ścieranie, badania wykonano trzema metodami. Zastosowano metody umożliwiające w miarę wierne odwzorowanie rzeczywistych zjawisk zachodzących w skojarzeniu ciernym (tarcza hamulcowa - okładzina cierna), pracującym w warunkach tarcia technicznie suchego [2, 4-7], a mianowicie:

- metodę „pin on disk” (badania prowadzono w zależności od obciążenia i rodzaju materiału) [4],
- metodę według PN-82/H-04332 (badania zużycia metali w procesie tarcia ślizgowego przy stałym nacisku na maszynie Amsler) [5],
- metodę „na małych próbkach” wg WT-074/PIMOT/93, umożliwiającą odwzorowanie ekstremalnych warunków eksploatacyjnych pary cierniej (ostre i/lub częste hamowanie) [6].

Opis standardowych badań tribologicznych i ich wyniki zostały przedstawione w pracach [2, 7].

Metodę „na małych próbkach” można traktować jako próbę symulacji dynamicznej układu hamulcowego użytkowanego w zmiennych stanach cieplnych. Badania zrealizowano w 4 cyklach zmiennej narastającej temperatury. Zastosowano dwa podstawowe zakresy temperatury 0÷360°C i 0÷300°C.

Podczas prób dla zakresu temperatury 0÷360°C, traktowanych jako standardowe, przetestowano próbki dwóch materiałów kompozytowych oraz dla porównania próbkę żeliwną współpracującą w parze z materiałem ciernym okładziny DB 857.

Drugi zawężony zakres temperatury 0÷300°C zastosowano w związku z posiadaną informacją, iż w samochodzie Lotus Elise, w którym zastosowano kompozytowe tarcze hamulcowe, uzyskano maksymalną temperaturę ich pracy wynoszącą 210°C. Badaniom w warunkach 4 cykli zmiennej narastającej temperatury w zmniejszonym do 0÷300°C zakresie temperatur poddano próbki czterech materiałów kompozytowych współpracujących w parze z materiałem ciernym okładziny DB 857.

Tak przyjęte metodyki pomiarowe miały przede wszystkim umożliwić porównanie przebiegów współczynnika tarcia i zużycia liniowego materiałów kompozytowych oraz żeliwa szarego z grafitem płatkowym, standardowo stosowanego jako materiał na tarczy hamulcowe.

Przyjęte metodyki stanowiły również podstawę do zilustrowania mechanizmów zużycia, jakiemu podlegają materiały kompozytowe w różnych wariantach obciążenia, odwzorowujących warunki eksploatacji tarcz hamulcowych.

## WYNIKI BADAŃ

### Badania tribologiczne

Wyniki pomiarów w cyklu standardowym (4 cykle zmiennej narastającej temperatury 0÷360°C) zużycia liniowego materiałów oraz pomiary utraty masy próbek, po badaniach współczynnika tarcia, przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1. Wyniki pomiarów zużycia liniowego oraz utraty masy próbek badanych materiałów w cyklu standardowym

TABLE 1. The linear wear and mass lost for investigated materials in standard cycle

Materiał	Zużycie liniowe przeciwpróbkę DB 857 <sup>*/</sup> mm	Zużycie liniowe badanej próbki <sup>**/</sup> mm	Utrata masy przeciwpróbkę <sup>***/</sup> g	Utrata masy badanej próbki <sup>***/</sup> g
F3S.20S <sub>ac</sub> (GR)	0,50	0,081	0,9157	0,1819
F3N.20S <sub>ac</sub> (LF)	0,49	0,074	0,7902	0,0990
Żeliwo szare z grafitem płatkowym	0,23	0,058	nie mierzone	nie mierzone

TABELA 2. Wyniki pomiarów zużycia liniowego oraz utraty masy próbek badanych materiałów w cyklu niestandardowym

TABLE 2. The linear wear and mass lost for investigated materials in nonstandard cycle

Materiał	Zużycie liniowe przeciwpróbkę DB 857 <sup>*/</sup> mm	Zużycie liniowe badanej próbki <sup>**/</sup> mm	Utrata masy przeciwpróbkę <sup>***/</sup> g	Utrata masy badanej próbki <sup>***/</sup> g
F3S20S <sub>ac</sub> (GR)	0,22	0,0102	0,3296	0,0035
F3N.20S <sub>ac</sub> (LF)	0,21	0,0118	0,2701	0,0056
ALFA <sup>®</sup> <sub>ac</sub> (GR)	0,80	0,0796	1,3988	0,2903
ALFA <sup>®</sup> <sub>ht</sub> (SQ)	0,10	0,0126	0,1974	0,0192

<sup>\*/</sup> Zużycie liniowe materiału zmierzono za pomocą śruby mikrometrycznej z dokładnością ±0,01 mm

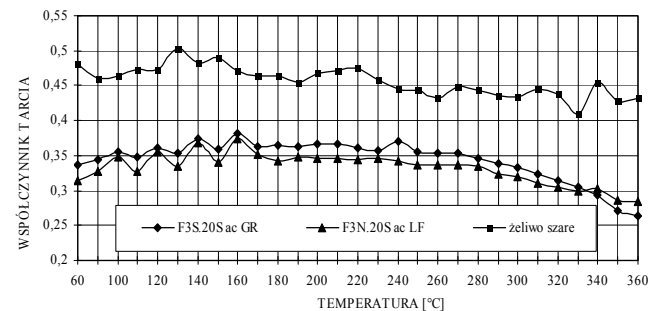
<sup>\*\*/</sup> Zużycie liniowe materiału zmierzono za pomocą elektronicznego czujnika z dokładnością ±0,001 mm

<sup>\*\*\*/</sup> Pomiary utraty masy próbek wykonano na wadze laboratoryjnej z dokładnością ±0,0001 g

Wyniki pomiarów w cyklu niestandardowym (4 cykle zmiennej narastającej temperatury 0÷300°C) zużycia liniowego (głębokość powstałych bruzd) materiałów oraz pomiary utraty masy próbek, po badaniach współczynnika tarcia, przedstawiono w tabeli 2.

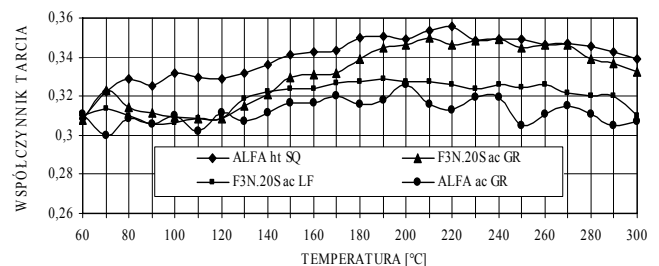
Z uwagi na minimalne zużycie materiałów kompozytowych za miarę zużycia liniowego przyjęto głębokość powstałych bruzd w postaci średniej wartości z 10 pomiarów. Jako że właściwie większość zużyć jest nierównomierna w postaci różnej głębokości bruzd na całym obwodzie, wyniki zużycia liniowego należy traktować tylko poglądowo, natomiast bardziej rzeczywistą miarą zużycia ściernego jest utrata masy próbek i przeciwpróbek (tab. 2, kol. 4, 5).

Wykresy przebiegu zmian współczynnika tarcia w zależności od cyklu badawczego, tj. od końcowej temperatury przy zahamowaniu i ilości obrotów do zahamowania przedstawiono na rysunkach 3 i 4.



Rys. 3. Przebieg zmian współczynnika tarcia badanych materiałów wraz z temperaturą do 360°C

Fig. 3. The change of friction coefficient of tested materials with temperature up to 360°C



Rys. 4. Przebieg zmian współczynnika tarcia badanych materiałów wraz z temperaturą do 300°C

Fig. 4. The change of friction coefficient of tested materials with temperature up to 300°C

Uzyskane wyniki wskazują, że w danych warunkach eksperymentalnych zarówno żeliwo, jak i kompozyty cechują się zbliżoną (w dwóch testach „pin-on-disc” i „na małych próbkach”) odpornością na zużycie tribologiczne. W trzecim teście (Amsler) żeliwo zużywa się ponad 100 razy szybciej niż materiał kompozytowy na bazie stopu aluminium zbrojony 22% obj. węgla krzemu (F3N.20S (LF)). Zużycie kompozytu zależy

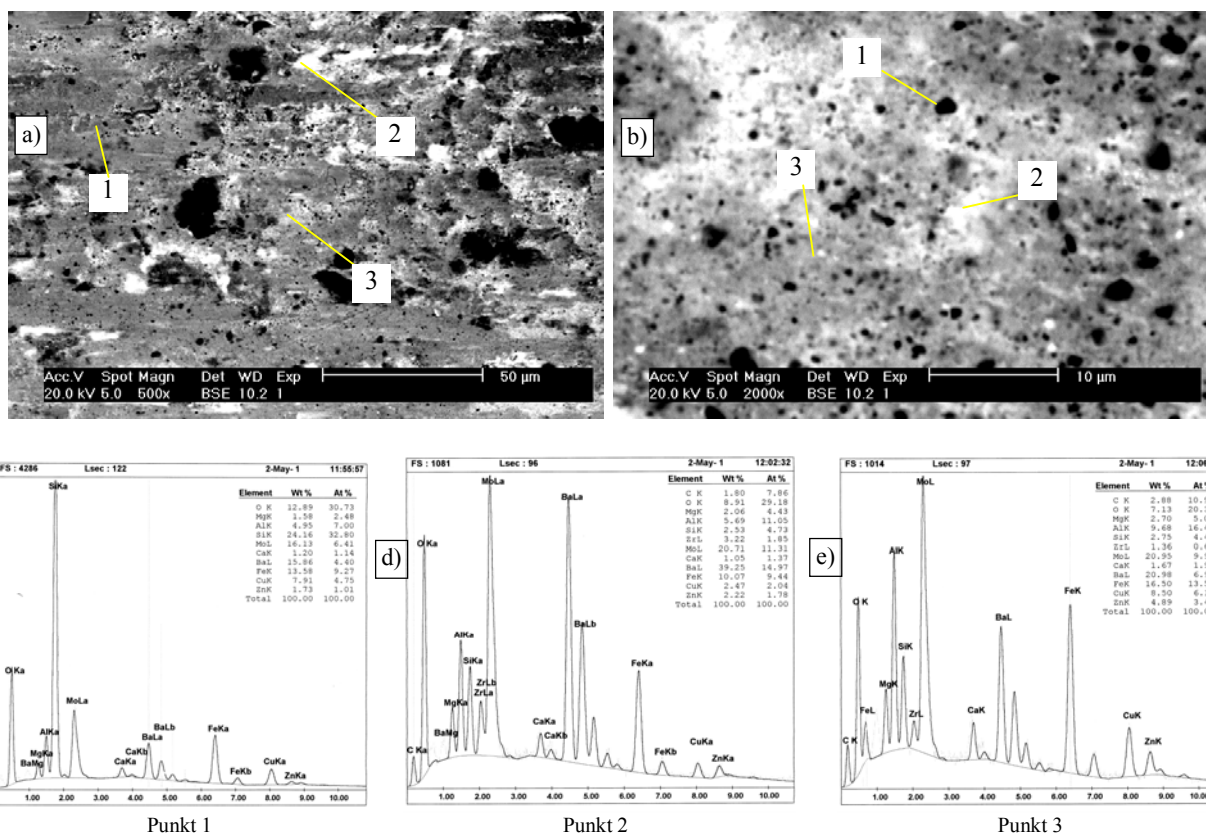
głównie od temperatury pracy pary ciernej. Z badań jednoznacznie wynika, że materiały kompozytowe na osnowie aluminium mogą niezawodnie pracować w bardzo odpowiedzialnych parach ciernych do temperatury nieprzekraczającej 300°C (mierzonej na głębokości ok. 2 mm od powierzchni roboczej). Wartości współczynników tarcia w parze ciernej kompozyt-okładzina cierna są w miarę równomierne i stabilne. Wyższa wartość temperatury lokalnej nie wpływa istotnie na parametry zużycia tribologicznego.

### Fraktografia

Obserwacje mikroskopowe powierzchni próbek z kompozytu (dla przykładu przedstawiono kompozyt F3S.20S<sub>ac</sub>(GR)) po próbach tribologicznych (test „na małych próbkach”) wykonano z użyciem elektronowego mikroskopu skaningowego typu XL30 firmy PHILIPS wyposażonego w spektrometr rentgenowski EDAX (rys. 5).

W obrazie z detektora elektronów odbitych BSE (rys. 5a, b) uwidoczni się silne zróżnicowanie składu chemicznego warstwy wierzchniej wytworzonej podczas próby zużyciowej, przede wszystkim w wyniku mechanicznego przenoszenia materiału okładziny ciernej. Punktowa mikroanaliza rentgenowska (rys. 5c, d, e) wykazała obecność w śladach tarcia znacznej ilości tlenu, krzemu, molibdenu, baru i żelaza, mechanicznie przenoszonych z materiału okładziny ciernej i adhezyjnie przyłączanych do powierzchni tarczy kompozytowej. Budowa utworzonej tym sposobem warstwy powierzchniowej wskazuje też, iż występują w niej składniki z ochronnego pokrycia zbrojenia kompozytu i materiału osnowy, a także, że proces ścierania i zużycia odsłania nieliczne, względnie duże cząsteczki fazy bogatej w krzem.

### PODSUMOWANIE



Rys. 5. Widok stanu warstwy wierzchniej tarczy wykonanej z kompozytu F3S.20S<sub>ac</sub>(GR), po współpracy z przeciwpróbką DB 857, z oznaczeniem stref punktowej mikroanalizy (a, b) i wyniki analizy składu chemicznego (c, d, e)

Fig. 5. The tribosurfaces of F3S.20S<sub>ac</sub>(GR) aluminum composite after friction test with DB 857 counter-sample with indicated measured points (a, b) and the results of their microanalysis (c, d, e)

W celu bardziej precyzyjnego określenia mechanizmu zużywania się próbek przeprowadzono również mikroanalizę składu chemicznego wybranych obszarów na powierzchni próbek.

Przeprowadzone badania strukturalne potwierdziły występowanie pożądanego wysokiego poziomu jednorodności strukturalnej i względną równomierność roz-

mieszczania fazy zbrojącej; nie stwierdzono występowania zjawiska jej aglomeracji.

Wartość współczynnika tarcia w parze ciernej „tarcza” kompozytowa-okładzina cierna jest w miarę równomierna i stabilna we wszystkich badanych temperaturach pracy. Wszystkie testowane materiały spełniały wymagania dotyczące dopuszczalnych wielkości współczynnika tarcia.

Przyspieszone zużycie „tarczy” kompozytowej zależy głównie od temperatury pracy pary ciernej. Z przeprowadzonego testu wynika, że tarcze kompozytowe mogą bezpiecznie pracować w temperaturze do 300°C (mierzonej ok. 2 mm od powierzchni trącej).

Porównywalne wartości odporności na zużycie (w teście do 300°C) wykazują wszystkie badane materiały kompozytowe: zbrojone SiC - F3S.20S<sub>ac</sub>(GR), F3N.20S<sub>ac</sub>(LF) (w stanie lanym), oraz zbrojone popiołami lotnymi kompozyty ALFA<sup>®</sup><sub>hi</sub>(SQ) (po obróbce cieplnej). Ze względu na trudności z obróbką skrawaniem materiałów zawierających węgiel krzemu, kompozyty ALFA<sup>®</sup> mogą stać się alternatywnym rozwiązaniem materiałowym do zastosowania na tarczach hamulcowych.

Na powierzchni tarczy po próbach hamowania tworzy się „film”, w skład którego wchodzi pierwiastki należące do rodzimej warstwy wierzchniej kompozytu, w tym z ochronnego pokrycia zbrojenia, jak też pierwiastki przenoszone z materiału okładziny ciernej.

W celu ewentualnego zwiększenia wartości współczynnika tarcia należałoby opracować nowy skład materiału okładzin ciernych, przystosowany do współpracy z

tarczą hamulcową wykonaną z materiału kompozytowego na osnowie stopu aluminium i do każdego z rodzajów użytej fazy wzmacniającej.

## LITERATURA

- [1] Sobczak J., Wojciechowski A., Tendencje rozwojowe metalowych materiałów kompozytowych w budowie samochodu, Skrypt ITS, Warszawa 1999, 29.
- [2] Wojciechowski A., Wpływ obecności fazy zbrojącej kompozytu na bazie stopu aluminium na wybrane właściwości użytkowe tarczy hamulcowej, Praca doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin 2001, 165.
- [3] Wojciechowski A., Sobczak J., Rudnik D., Pietrzak K., Nowak A., Stachańczyk J., Nowa generacja tarcz hamulcowych z materiałów kompozytowych, IV Seminarium Kompozyty 2000, Teoria i praktyka, Częstochowa 2000, 180-190.
- [4] Dybiec H., Niemiec K., Trybologiczne zużycie nadeutektycznych siluminów po odkształceniu plastycznym (w druku).
- [5] PN-82/H-04332 Badanie zużycia metali lub ich warstw dyfuzyjnych w procesie tarcia ślizgowego przy stałym nacisku na maszynie Amslera.
- [6] WT-074/PIMOT/93 Pojazdy samochodowe, Nakładki cierne hamulców tarczowych, Wymagania i badania w zakresie bezpieczeństwa użytkowania.
- [7] Wojciechowski A., Sobczak J., Badanie odporności na zużycie aluminiowych materiałów kompozytowych przeznaczonych na tarczach hamulcowych, Kompozyty (Composites) 2001, 1, 2, 191-195.

Recenzent  
Józef Ślężiona