

Andrzej Wojciechowski¹

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

Jerzy Sobczak²

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

BADANIE ODPORNOŚCI NA ZUŻYCIE ALUMINIOWYCH MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH PRZEZNACZONYCH NA TARCZE HAMULCOWE

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 dwóch metod badań trybologicznych, najbardziej odwzorowujących, zdaniem autorów, rzeczywiste zjawiska zachodzące w parze ciernej tarcza hamulcowa-okładzina cierna w warunkach eksploatacyjnych. Porównawcze badania trybologiczne różnych materiałów kompozytowych o osnowie stopów aluminium, które mogłyby być zastosowane na tarcze hamulcowe, oraz żeliwa oceniano przez określenie wskaźników zużycia trybologicznego (współczynnika tarcia i stopnia zużycia) w dwóch niezależnych testach. Uzyskane wyniki wskazują, że w danych warunkach eksperymentalnych, zarówno żeliwo, jak i kompozyty cechują się zbliżoną odpornością na zużycie trybologiczne. Zużycie AIMC zależy głównie od temperatury pracy pary ciernej. Z badań jednoznacznie wynika, że kompozyty aluminiowe mogą bezpiecznie pracować do temperatury nieprzekraczającej 300°C. Wartość współczynnika tarcia w parze ciernej z AIMC jest równomierna i stabilna dla wszystkich temperatur pracy pary ciernej. Wszystkie testowane materiały spełniały wymagania dotyczące dopuszczalnych wielkości współczynnika tarcia.

TESTING OF WEAR RESISTANCE OF ALUMINUM MATRIX COMPOSITES DESIGNED FOR BREAK ROTORS

Particulates reinforced aluminum matrix composites (AIMCs) are generally used on frictional couples working in the conditions of technically dry friction. Variety of research methodology and lack of commonly used standards concerning calculation 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 various composite aluminum based materials, 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. 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. 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.

WSTĘP

Jednym z podstawowych podzespołów samochodowych z punktu widzenia zarówno bezpieczeństwa użytkownika, jak i ogólnego poziomu technicznego pojazdu jest układ hamulcowy. Służy on do zmniejszania prędkości jazdy oraz do zatrzymania go w określonym miejscu. Ogólnie oczekuje się, że droga hamowania i czas reakcji układu hamulcowego będą jak najkrótsze, a zdolność hamowania pozostanie stała nawet podczas długotrwałego hamowania i że towarzyszyć temu będzie jak największa stateczność całego pojazdu [1].

Wymóg dużego stopnia niezawodności poszczególnych części składowych układu hamulcowego wymusza m.in. konieczność zapewnienia ustabilizowanego proce-

su zużywania, niezmienną się w czasie użytkowania pojazdu. Do tradycyjnych materiałów tarcz (bębnów) hamulcowych należą różne gatunki żeliwa. Ostatnie dziesięciolecie przyniosło nowe rozwiązanie materiałowe w postaci metalowych materiałów kompozytowych na bazie aluminium (AIMC) [2, 3].

Elementy węzłów hamulcowych pracują w warunkach intensywnego zużycia ciernego i związanej z tym podwyższonej temperatury pracy. Zastosowanie kompozytów AIMC w produkcji tarcz i bębnow hamulcowych z założenia powinno przyczynić się do:

- zmniejszenia masy pojazdu, w tym masy nieresorowanej,

¹ inż., ² dr hab. inż., prof. I. Odl.

- zmniejszenia sił bezwładności, pozwalającego zwiększyć przyspieszenie i skrócić drogę hamowania,
- obniżenia poziomu hałasu,
- zwiększenia odporności na zużycie,
- wyeliminowania operacji wyważania,
- ujednorodnienia mechanizmu tarcia,
- zlikwidowania zagrożenia spękania i rozpadu tarczy hamulcowej w wyniku szybkiego chłodzenia rozgrzanej tarczy przez kontakt z wodą spowodowany dużym gradientem temperatury,
- polepszenia bezpieczeństwa jazdy, komfortu i dynamiki pojazdu, jak również zmniejszenia zużycia paliwa i opon.

Dodatkową zaletą metalowych materiałów kompozytowych jest możliwość sterowania przewodnością cieplną na drodze doboru udziału objętościowego i rozkładu zbrojenia [4].

Porównanie właściwości różnych materiałów kompozytowych mogących znaleźć zastosowanie do produkcji tarcz hamulcowych przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1. Wybrane właściwości tradycyjnych i potencjalnych materiałów na tarczy hamulcowe (bez obróbki cieplnej)

TABLE 1. Selected properties of traditional and potential materials for brake disc and rotors (as cast)

| Stop osnowy Wyszczególnienie | 4040 (Al-Si) | 7033 (Al-Zn) | 7027 (Al-Zn) | F3S.20S (Al-Si) | Żeliwo szare |
|--|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------|------------------------------|
| Faza zbrojąca | SiC | Al ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ | SiC | - |
| Udział objętościowy fazy zbrojącej, % | 30 | 25 | 38 | 20 | - |
| Metoda wytwarzania | Odlewanie do form piaskowych | Odlewanie do form piaskowych | Technologia preform (infiltracja) | Odlewanie kokilowe | Odlewanie do form piaskowych |
| Gęstość, g/cm ³ | 2,89 | 2,80 | 2,88 | 2,77 | 6,9÷7,4 |
| Wytrzymałość na rozciąganie, MPa | 225 | 180 | 220 | 220 | 100÷400 |
| Moduł Younga GPa | 127 | 100 | 137 | 100 | 80÷150 |
| Współczynnik rozszerzalności cieplnej, μm/mK | 14,8 | 18,0 | 14,5 | 17,5 | 9,0÷11,0 |
| Przewodność cieplna, W/mK | 156 | 130 | 95 | 150 | 50 |
| Ciepło właściwe J/kgK | 820 | 830 | 830 | 820 | 460÷840 |
| Maksymalna temperatura pracy, °C | 480 | 480 | 540 | 300 | 800 |

Tabelę sporządzono na podstawie dostępnych danych literaturowych i badań własnych.

BADANIA WŁASNE

Porównawcze badania trybologiczne różnych materiałów kompozytowych o osnowie ze stopu aluminium, które mogłyby być zastosowane na tarczy hamulcowe oraz żeliwa, oceniano przez określenie wskaźników zużycia trybologicznego (współczynnika tarcia i stopnia zużycia) w testach:

A. W zależności od obciążenia i rodzaju materiału metodą *pin-on-disc* [5].

B. W zależności od zastosowanego materiału w 4 cyklach zmiennych narastających temperatur (0÷360°C) „metoda na małych próbkach”, wg WT-074/PIMOT/93 [6].

Obiektem badań w „teście A” były próbki wykonane z następujących materiałów:

1. Żeliwo wermikularne (odlewane do form piaskowych)
2. Żeliwo szare z osnową ferrytyczno-perlityczną (odlewane do form piaskowych)
3. Żeliwo sferoidalne (odlewane do form piaskowych)
4. F3N.20S_{ac} LF (stop AlSi10,18Mg0,61Mn0,64Fe0,98 modyfikowany Sr, zbrojony 21,9% obj. SiC o nominalnym rozmiarze cząsteczek 20 μm, odlewany metodą *lost foam*, w stanie lanym)
5. F3N.20S_{ht} LF (odlewany metodą *lost foam*, po obróbce cieplnej)
6. F3N.20S_{ht} SQ (prasowany w stanie ciekłym, po obróbce cieplnej)
7. ALFA[®] GR_{ac} (stop Al zawierający 6,23% wag. popiołu lotnego, materiał odlewany kokilowo, w stanie lanym)
8. ALFA[®] GR_{ht} (stop Al zawierający 6,23% wag. popiołu lotnego, materiał odlewany kokilowo, po obróbce cieplnej)
9. ALFA[®] SQ_{ac} (stop Al zawierający 6,23% wag. popiołu lotnego, materiał prasowany w stanie ciekłym, w stanie lanym)
10. ALFA[®] SQ_{ht} (stop Al zawierający 6,23% wag. popiołu lotnego, materiał prasowany w stanie ciekłym, po obróbce cieplnej).

Przygotowano próbki o średnicy $d = 15,9$ mm i wysokości $h = 25$ mm, które wstępnie poddano badaniom twardości (tab. 2), a następnie testom ścieralności, wykorzystując do tego celu urządzenie Rotopol-Rotoforce (automatyczna szlifierko-polerka) do wykonywania zgładów metalograficznych.

Obiektem badań w „teście B” były próbki wykonane z poniższych materiałów:

1. COMRAL 90FC_{ac} (stop Al-Si zbrojony sferoidami Al₂O₃ o nominalnym rozmiarze 20 μm, odlewany kokilowo, w stanie lanym)
2. F3S20S_{ac} GR (stop AlSi9,15Mg0,63Fe0,10, zbrojony 20,62% obj. SiC o nominalnym rozmiarze cząsteczek 20 μm, odlewany kokilowo, w stanie lanym)

3. F3N.20S_{ac} LF (odlewany metodą *lost foam*, w stanie lanym)
4. F3S20S_{ac} SQ (prasowany w stanie ciekłym, w stanie lanym)
5. Żeliwo szare perlityczne (odlewane do form piaskowych)

TABELA 2. Twardości HV badanych materiałów
TABLE 2. Hardness HV for tested materials

| Materiał | Twardość HV |
|------------------------------------|-------------|
| Żeliwo szare | 180 |
| Żeliwo sferoidalne | 191 |
| Żeliwo wermikularne | 171 |
| F3N.20S _{ac} LF | 107 |
| F3N.20S _{ht} LF | 116 |
| F3N.20S _{ht} SQ | 166 |
| ALFA [®] GR _{ac} | 89 |
| ALFA [®] GR _{ht} | 100 |
| ALFA [®] SQ _{ac} | 95 |
| ALFA [®] SQ _{ht} | 128 |

Testowano próbki w kształcie pierścienia z kołnierzem o wymiarach pierścienia roboczego o średnicy zewnętrznej 45 mm i wewnętrznej 17 mm oraz wysokości 12 mm. Pomiar przeprowadzono na aparacie bezwładnościowym Ranzi LRC. Stosowano materiał cierny DB 857 produkcji firmy Fomar-Roulunds z Marek k. Warszawy. Materiał cierny DB 857 stosowany jest w nakładkach ciernych hamulców tarczowych w samochodach DAEWOO.

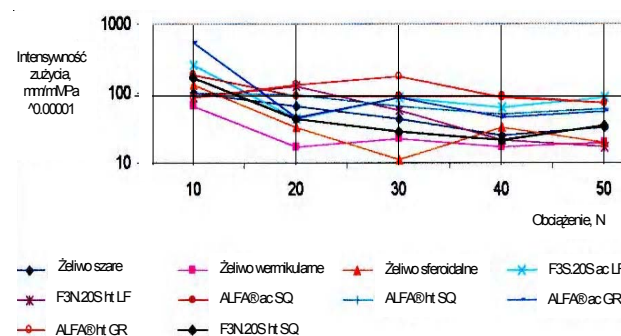
ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Zużycie w metodzie A (*pin-on-disc*)

Rysunek 1 przedstawia przykładową zależność normalizowanej intensywności zużycia, będącej intensywnym wskaźnikiem zużycia od obciążenia i rodzaju materiału. Ogólnie można stwierdzić, że materiały żeliwne cechują się porównywalnymi lub nieznacznie mniejszymi wartościami normalizowanej intensywności zużycia w porównaniu do materiałów kompozytowych, przy czym największe wartości normalizowanej intensywności zużycia spośród wszystkich badanych materiałów wykazał kompozyt ALFA[®] SQ_{ht}. Najtwardszy kompozyt F3N.20S_{ht} SQ cechował się najmniejszą wartością normalizowanej intensywności zużycia spośród kompozytów, a więc najlepszą odpornością na zużycie w danej grupie materiałowej.

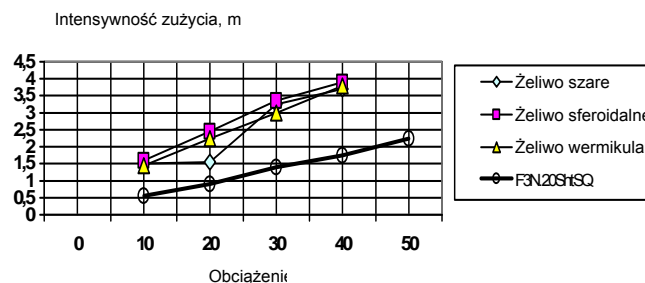
Wyniki testów prowadzonych na tarczach ściernych (papier ścierny #220) wykazały, że mniejszą normalizowaną intensywność zużycia niż żeliwa, a co za tym idzie lepszą odporność na zużycie trybologiczne od tych materiałów wykazały następujące kompozyty:

F3N.20S_{ht} SQ (rys. 2) oraz F3N.20S LF, zarówno w stanie lanym, jak i obrobionym cieplnie. Niemal taką samą wartość normalizowanej intensywności zużycia jak żeliwo wykazał kompozyt ALFA[®] SQ_{ac}. Pozostałe kompozyty ALFA[®] posiadały wyższe wartości normalizowanej intensywności zużycia w porównaniu z żeliwem. Po krótkotrwałym okresie docierania związanym z szybszym wzrostem normalizowanej intensywności zużycia wraz z obciążeniem następował okres ustabilizowany, świadczący o dużej jednorodności mechanizmu zużycia. Wspomniany przebieg prezentowanej zależności cechuje zarówno kompozyty, jak i żeliwo.



Rys. 1. Zależność normalizowanej intensywności zużycia od obciążenia i rodzaju materiału w testach „A” (*pin-on-disc*) na tarczy z okładzin hamulcowych typu F0701

Fig. 1. Relation between normalized wear intensity and applied load for tested materials using F0701 brake lining as a counter-sample („A” tests *pin-on-disc*)



Rys. 2. Zmiany intensywności zużycia próbek badanych materiałów wraz ze wzrostem obciążenia w testach A (*pin-on-disc*) na tarczach ściernych

Fig. 2. Relation between abrasion intensity and load for tested materials (test „A” *pin on disc* using abrasive discs as a counter sample)

Zużycie w metodzie B (wg WT-074/PIMOT/93)

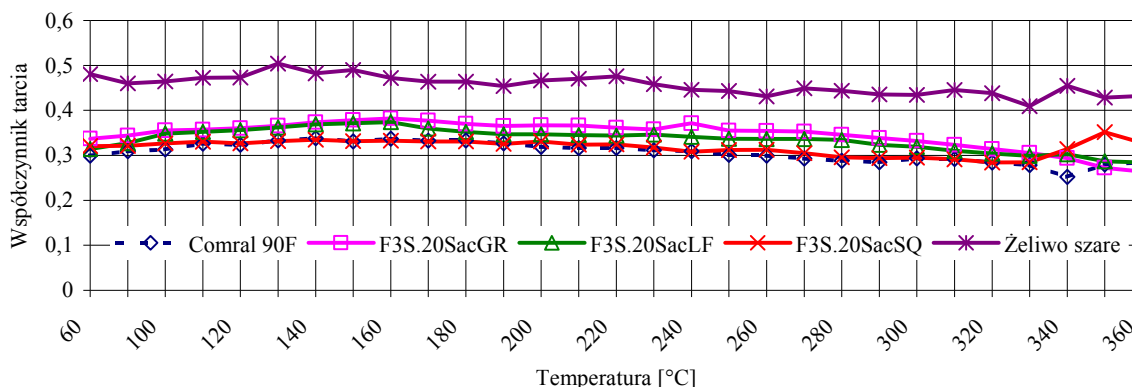
Wyniki pomiarów zużycia liniowego materiałów po badaniach współczynnika tarcia oraz pomiary utraty masy próbek przedstawiono w tabelach 3 i 4.

Współczynnik tarcia w metodzie A (*pin-on-disc*)

Wyniki badań zawarte w tabeli 4 świadczą o tym, że kompozyty cechują się generalnie wyższymi wartościami współczynników tarcia w parze trącej z suchą tarczą stalową niż badane w takich samych warunkach żeliwo. Jedynym wyjątkiem są kompozyty typu ALFA[®],

których współczynniki tarcia mają wartości zbliżone do wartości współczynnika tarcia żeliwa wermikularnego. Zauważalny jest niejednoznaczny wpływ obróbki cieplnej kompozytów na wartość współczynnika tarcia.

| | |
|------------------------------------|--------|
| F3N.20S _{ht} SQ | 0,4527 |
| ALFA [®] GR _{ac} | 0,3651 |
| ALFA [®] GR _{ht} | 0,6531 |
| ALFA [®] SQ _{ac} | 0,3207 |



Rys. 3. Przebieg zmian współczynnika tarcia wraz z temperaturą

Fig. 3. The change of friction coefficient with temperature

W przypadku kompozytu F3N.20S_{ht} LF obróbka cieplna obniża wartość współczynnika tarcia, natomiast w przypadku kompozytów ALFA[®] obróbka cieplna powoduje prawie dwukrotny wzrost tej wielkości fizycznej. Obróbka cieplna kompozytu ALFA[®] SQ nie wpływa w zasadniczy sposób na wartość współczynnika tarcia tego materiału. Wartości współczynnika tarcia kompozytów odpowiadały materiałom dla grupy III (wysoki współczynnik tarcia).

TABELA 3. Wyniki pomiarów zużycia liniowego oraz utraty masy próbek badanych materiałów

TABLE 3. The linear wear and mass lost for investigated materials

| Materiał | Zużycie liniowe próbki DB 857, mm | Zużycie liniowe materiału mm | Utrata masy próbki, g | Utrata masy próbek materiałów, g |
|--------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| COMRAL 90F | nie mierzono | 1,215 | 1,2203 | 1,7141 |
| F3S20S _{ac} GR | 0,50 | 0,081 | 0,9157 | 0,1819 |
| F3N.20S _{ac} LF | 0,49 | 0,074 | 0,7902 | 0,0990 |
| F3S20S _{ac} SQ | 0,46 | 0,068 | 0,7485 | 0,0898 |
| Żeliwo szare | 0,23 | 0,058 | nie mierzono | nie mierzono |

TABELA 4. Wyniki pomiarów współczynnika tarcia (w parze trącej z suchą tarczą stalową)

TABLE 4. The friction coefficients for tested materials (with dry steel disc)

| Materiał | Współczynnik tarcia |
|--------------------------|---------------------|
| Żeliwo szare | 0,2582 |
| Żeliwo wermikularne | 0,3338 |
| Żeliwo sferoidalne | 0,3084 |
| F3N.20S _{ac} LF | 0,4386 |
| F3N.20S _{ht} LF | 0,3804 |

| | |
|------------------------------------|--------|
| ALFA [®] SQ _{ht} | 0,3244 |
|------------------------------------|--------|

Współczynniki tarcia w metodzie B (wg WT-074/PIMOT/93)

Wykres przebiegu zmian współczynnika tarcia w zależności od końcowej temperatury badanych próbek po zahamowaniu przedstawiono na rysunku 3.

WNIOSKI

1. Aluminiowe materiały kompozytowe cechują się porównywalnymi wartościami normalizowanej intensywności zużycia w porównaniu do materiałów żeliwnych. Świadczy to o zbliżonej odporności na zużycie trybologiczne kompozytów i żeliwa w danych warunkach eksperymentalnych (na tarczach z okładzin ciernych).
2. Stabilny przebieg zmian normalizowanej intensywności zużycia wraz z obciążeniem potwierdza jednorodny charakter mechanizmu zużycia zarówno materiałów żeliwnych, jak i kompozytowych (na tarczach z okładzin ciernych).
3. Mniejszą normalizowaną intensywność zużycia w porównaniu z żeliwem, a co za tym idzie najwyższą odporność na zużycie trybologiczne (na papierze ściernym) wykazały kompozyty: F3N.20S LS oraz F3N.20S SQ (w stanie lanym i obrobionym cieplnie), co jednoznacznie potwierdza celowość stosowania zbrojenia aluminium w postaci cząsteczek węgla krzemu jako optymalnego materiału na tarcze hamulcowe. Powyższą konstatację potwierdza stabilność współczynnika tarcia i zużycia w podwyższonych temperaturach, stwierdzona w badaniach kompozytu F3S.20S.
4. Wartość współczynnika tarcia w parze ciernej „tarcza” AIMC/okładzina cierna jest równomierna i stabilna we wszystkich temperaturach pracy. Wszystkie

testowane materiały spełniały wymagania odnośnie do dopuszczalnych wielkości współczynnika tarcia.

5. Przyspieszone zużycie tarczy z AIMC zależy głównie od temperatury pracy pary ciernej. Z przeprowadzonego testu wynika, że tarcze kompozytowe mogą bezpiecznie pracować do temperatury nieprzekraczającej 300°C.
6. W celu ewentualnego zwiększenia wartości współczynnika tarcia należałoby opracować nowy skład materiału okładzin ciernych, przystosowany do współpracy z AIMC.
7. Dla bardzo obciążonych tarcz, w celu zwiększenia ich pojemności cieplnej, tam gdzie wystąpi taka konieczność, należy konstruować tarcze „przewymiarowane” o większych gabarytach, dodatkowo wentylowanych wzdłużnie i poprzecznie.

Niniejszą pracę wykonano w ramach realizacji projektu badawczego nr 7 T08B 027 18 finansowanego przez KBN. Mgr. inż. Pawłowi Kozakowi i mgr. inż. Ryszardowi Michalskiemu dziękujemy za przeprowadzenie części doświadczeń, ujętych w danym artykule, a panu prof. dr. hab. inż. Henrykowi Dybcowi z AGH wyrażamy wdzięczność za konsultacje w zakresie interpretacji uzyskanych wyników.

LITERATURA

- [1] Wojciechowski A., Rudnik D., Pietrzak K., Sobczak J., Nowak A., Nowa generacja tarcz hamulcowych z materiałów kompozytowych, IV Seminarium Kompozyty 2000 - Teoria i praktyka, Częstochowa 2000, 180-190.
- [2] Ślężiona J., Wieczorek J., Dolata-Grosz A., Posmyk A., Wpływ preparacji powierzchni i wielkości cząstek zbrojących Al₂O₃ na właściwości trybologiczne kompozytów AK12-Al₂O₃, IV Seminarium Kompozyty 2000 - Teoria i praktyka, Częstochowa 2000, 237-244.
- [3] Braszczyński J., Tomczyński S., Zyska A., Badania mechanizmu zużycia ściernego kompozytów z cząsteczkami SiC i C_{gr}, Krzepnięcie Metali i Stopów 1997, 33, 135-143.
- [4] Sobczak J., Wojciechowski A., Tendencje rozwojowe metalowych materiałów kompozytowych w budowie samochodu, Skrypt ITS, Warszawa 1999.
- [5] Dybiec H., Niemiec K., Trybologiczne zużycie nadeutektycznych siluminów po odkształceniu plastycznym (w druku).
- [6] WT-074/PIMOT/93: Pojazdy samochodowe, Nakładki cierne hamulców tarczowych, Wymagania i badania w zakresie bezpieczeństwa użytkowania.

Recenzent
Józef Ślężiona