

Robert CZECH*, **Andrzej POSMYK****

WPLYW KOROZJI NA EKSPLOATACJĘ KOMPOZYTOWYCH TARCZ HAMULCOWYCH

THE CORROSION INFLUENCE ON USING OF METAL MATRIX COMPOSITES BRAKE DISCS

Słowa kluczowe:

zużycie, tarcie ślizgowe, kompozyty na osnowie stopów aluminium, tarcze hamulcowe, korozja

Key words:

wear, sliding, aluminium matrix composites, disc brakes, corrosion

Streszczenie

W artykule omówiono wpływ korozji na właściwości tribologiczne materiału kompozytowego F3S.20S (AC-AlSi9Mg0,5+20%_mSiC) współpracującego z tradycyjnym materiałem stosowanym na okładziny cierne hamulców tarczowych (F701). W celu sprawdzenia zachowania kompozytu stosowanego do wytwarzania tarcz hamulcowych pojazdów samochodowych w warunkach korozji atmosferycznej wykonano badania tribologiczne na testerze laboratoryj-

* Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Katedra Mechaniki Konstrukcji, ul. Wiejska 45e, 15-351 Białystok.

** Politechnika Śląska, Wydział Transportu, Katedra Eksploatacji Pojazdów Samochodowych, ul. Z. Krzemińskiego 8, 40-019 Katowice.

nym, a następnie porównano je z wynikami badań przeprowadzonych w takich samych warunkach eksperymentalnych dla tarcz hamulcowych wykonanych z żeliwa szarego z grafitem płatkowym (GJL 350). Przyjęto czas ekspozycji próbek na środowisko korozyjne 0, 48 i 240 godzin. Wyniki badań pozwoliły określić wpływ korozji, obciążenia i prędkości współpracy na współczynnik tarcia oraz zużycie współpracujących części.

WPROWADZENIE

Podczas dłuższego postoju pojazdu, np. oczekiwania na naprawę, pod wpływem wody, pary wodnej, a szczególnie soli (warunki zimowe) część robocza żeliwnej tarczy hamulcowej lub bębna pokrywa się warstwą produktów procesu korozji. Jeżeli hamulec jest zaciśnięty, to dochodzi do dyfuzji produktów korozji do materiału ciernego i mocnego połączenia klocka z tarczą. Jeżeli hamulec nie jest zaciśnięty, to podczas hamowania powstała na tarczy warstwa powoduje zmianę wartości momentu hamującego, mimo stałej siły nacisku wywieranej na pedał hamulca, przez co wpływa na obniżenie skuteczności działania układu hamulcowego. Przy intensywnym skorodowaniu podczas hamowania duże ilości produktów korozji z powierzchni tarczy lub bębna osadzają się na okładzinie cierniej klocka hamulcowego, co dodatkowo powoduje czasowe obniżenie współczynnika tarcia, głośną pracę hamulców oraz przyspieszone zużywanie powierzchni cierniej tarczy hamulcowej. Czas zmniejszenia współczynnika tarcia zależy od głębokości wnikania produktów zużycia tarczy w materiał cierny klocka oraz od intensywności zużywania materiału ciernego.

Jednym ze sposobów niwelowania negatywnych skutków korozji może być zastosowanie do budowy układów hamulcowych nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych, jakimi są metalowe materiały kompozytowe (MMC). Do najbardziej perspektywicznych materiałów tego typu – stosowanych na elementy par ciernych, głównie układów hamulcowych – można zaliczyć zbrojone cząstkami kompozyty na osnowie odlewniczych stopów aluminium. Jako fazę umacniającą stosuje się najczęściej względnie niedrogie cząstki SiC lub Al_2O_3 o średniej średnicy 10÷50 μm . Jak zachowują się wytworzone z kompozytów AlMC tarcze hamulcowe pod wpływem korozji – zostało opisane w tym opracowaniu.

BADANIA TRIBOLOGICZNE

Celem badań było określenie wpływu czasu ekspozycji na korozję na współczynnik tarcia i zużycie przeznaczonego na tarcze hamulcowe materiału kompozytowego F3S.20S, współpracującego w warunkach tarcia technicznie suchego z tradycyjnym materiałem stosowanym na nakładki cierne hamulców tarczowych (F701). Badania przeprowadzono na stanowisku tribologicznym

T-11 w układzie trzpień–tarcza z użyciem próbek z materiału ciernego w postaci walców o średnicy 10 mm. Jako przeciwpróbki zastosowano tarcze o średnicy 25,4 mm wykonane z materiału kompozytowego F3S.20S (**Rys. 2**).

Tabela 1. Skład chemiczny stopu aluminium AC- AlSi9Mg0,5 [L. 2]

Table 1. Chemical composition of AC- AlSi9Mg0,5 aluminum alloy [L. 2]

Pierwiastek stopowy	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Ti	Zn	Pozostałe pierwiastki
	8,5÷9,5	Max. 0,20	Max. 0,20	0,5÷0,7	0,10	Max. 0,20	0,10	W sumie 0,2

Tabela 2. Właściwości mechaniczne materiałów użytych do badań [L. 1]

Table 2. Mechanical properties of used for investigations materials [L. 1]

Wyszczególnienie	Stop osnowy		
	F3S.20S	F3S.20S-T6	Żeliwo szare z grafitem płatkowym
Faza zbrojąca	SiC	SiC	–
Udział objętościowy fazy zbrojącej, %	20	20	–
Gęstość, kg/m^3	2770	2770	6900–7400
Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	220	359	100–400*
Moduł Younga, GPa	100	98,6	80-150
Współczynnik rozszerzalności cieplnej α , $\mu\text{m/mK}$ w temp. 20–100°C	17,5	17,5	9,0–11,0
Przewodność cieplna λ , W/mK	150	185	50
Ciepło właściwe, J/kgK	820	837	460–840
Maksymalna temperatura pracy, °C	300	300	800

*) do badań użyto GJL-350.

Kompozyt F3S.20S składa się z osnowy ze stopu aluminium AC- AlSi9Mg (A359) zawierającej fazę zbrojącą w postaci cząstek SiC o średniej średnicy 20 μm , stanowiącą ok. 20% objętości materiału. Skład chemiczny osnowy kompozytu podano w **Tabeli 1** [L. 1, 2]. Istotne z punktu widzenia eksploatacji tarcz hamulcowych właściwości metalowych materiałów kompozytowych zestawiono w **Tabeli 2**, natomiast widok mikrostruktury przedstawiono na **Rys. 1a**. Skład chemiczny materiału ciernego (F701) zamieszczono w **Tabeli 3**, natomiast widok jego powierzchni przedstawiono na **Rys. 1b**.

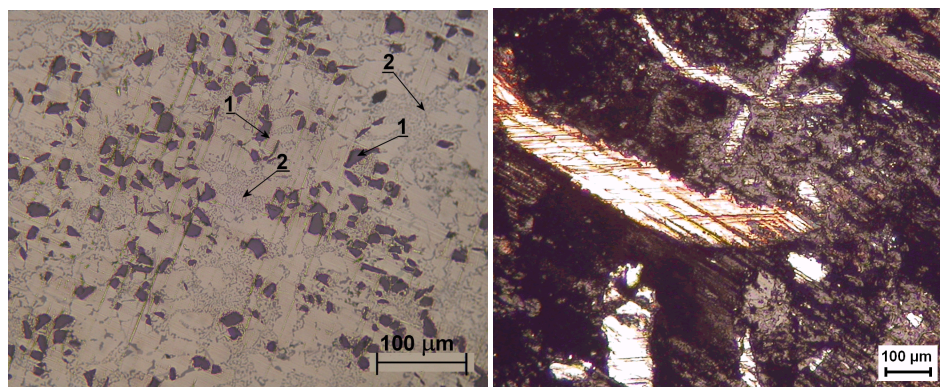
Badania stanowiskowe przeprowadzono zgodnie z poliselekcyjnym, D- optymalnym, cząstkowym planem eksperymentu. Plan ten zakłada trzy poziomy czynniki sterowanych (minimalny, centralny, maksymalny) i pozwala opisać badane zależności wielomianem drugiego stopnia oraz umożliwia optymalizację badanej cechy wg przyjętego kryterium.

Tabela 3. Skład chemiczny kompozytu ciernego F701 [L. 7]

Table 3. Chemical composition of F701 frictional composite [L. 7]

B	C	O	Na	Mg	S	Ar	Cu	Zn	Mo	Pd	Sn
3,17	71,6	15,6	0,6	3,1	1,16	0,7	0,88	0,92	0,82	0,14	1,35

Czynnikami sterowanymi są: nacisk (p), prędkość względna próbki i przeciwpróbki (v) oraz czas ekspozycji (τ_E) przeciwpróbek na działanie środowiska korozyjnego. Droga tarcia była stała i wynosiła 1000 m. Każda próba była powtarzana trzykrotnie [L. 3]. Czasy ekspozycji na korozję (0, 48 i 240 godzin) zostały wyznaczone na podstawie analizy czasów oczekiwania pojazdów na naprawę w punkcie serwisowym [L. 3, 4]. Czasy te w polskich punktach serwisowych są coraz dłuższe, co wynika z dużego przyrostu liczby użytkowanych pojazdów o względnie dużym przebiegu. Pojazdy oczekujące na naprawę są zazwyczaj przechowywane na zewnętrznych parkingach, gdzie są narażone na działanie korozji. Wartości zmian nacisków i prędkości dostosowano do zakresu możliwości wykonawczych aparatury badawczej. Przyjęte w badaniach wartości nacisków są mniejsze niż występują w układach hamulcowych, ale wystarczające do porównania właściwości tribologicznych badanych skojarzeń materiałowych.



a)

b)

Rys. 1. Powierzchnia zglądów badanych materiałów: a – kompozyt F3S.20S; widoczne ciemne cząstki SiC (1) na tle materiału osnowy z wydzieleniami Si (2), b – kompozyt F701 (widoczne opiłki metalu na tle żywicy)

Fig. 1. Polished microsection of investigated materials: a – F3S.20S composite material; dark SiC particles (1) on the matrix material with Si precipitates (2) are visible, b – F701 composite (metal fillings are visible)

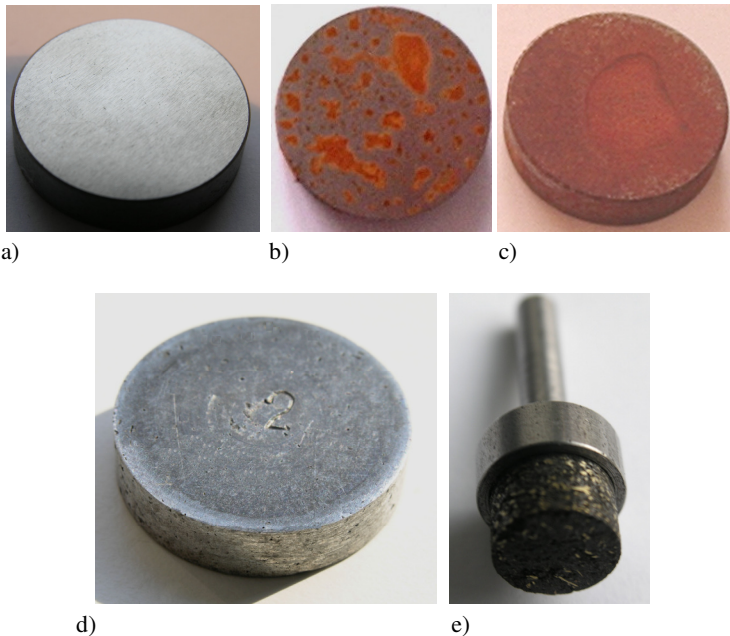
WYNIKI BADAŃ

Podczas badań mierzono współczynnik tarcia i zużycie elementów skojarzenia. Do pomiaru współczynnika tarcia wykorzystano tor pomiarowy składający się z tensometrycznego przetwornika siły i mostka pomiarowego Spider 8 rejestrującego siłę tarcia z niedokładnością 3%. Ubytki masy wyznaczono metodą wagową z niedokładnością 0,2 mg. Wyniki zmian ubytku masy kompozytu F3S.20S (Δm_{tar}) i współpracującego z nim materiału ciernego F701 (Δm_{trzp}) oraz współczynnika tarcia (μ) w funkcji czasu ekspozycji na korozję, prędkości ślizgania i nacisku opisano następującymi wielomianami drugiego stopnia:

$$\Delta m_{tar} = 6,35 - 7,96 \cdot v - 15,86 \cdot p - 15,86 \cdot t + 6,20 \cdot v^2 + 11,86 \cdot p^2 + 0,0001 \cdot t^2 + 5,89 \cdot v \cdot p + 0,04 \cdot p \cdot t \quad (1)$$

$$\Delta m_{trzp} = -0,813 + 2,519 \cdot v + 0,021 \cdot t - 2,66 \cdot v^2 + 4,32 \cdot p^2 - 0,0001 \cdot t^2 + 5,86 \cdot v \cdot p - 0,026 \cdot p \cdot t \quad (2)$$

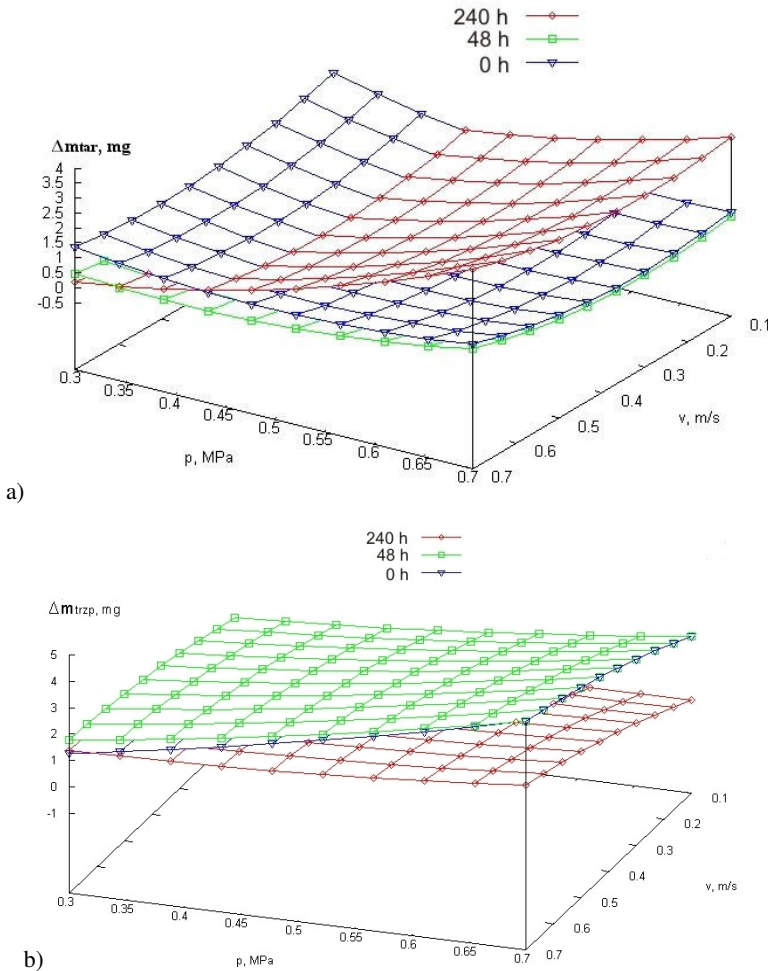
$$\mu = 0,25 + 0,36 \cdot v - 0,001 \cdot t - 0,313 \cdot v^2 + 0,000002 \cdot t^2 - 0,17 \cdot v \cdot p - 0,002 \cdot v \cdot t + 0,003 \cdot p \cdot t \quad (3)$$



Rys. 2. Próbki i przeciwpróbki użyte do badań: a) EN GJL-350 przed ekspozycją na korozję, b) po 48 h ekspozycji, c) po 240 h ekspozycji, d) kompozyt F3S.20S po ekspozycji 240 h, e) próbka z kompozytu F701 w uchwycie

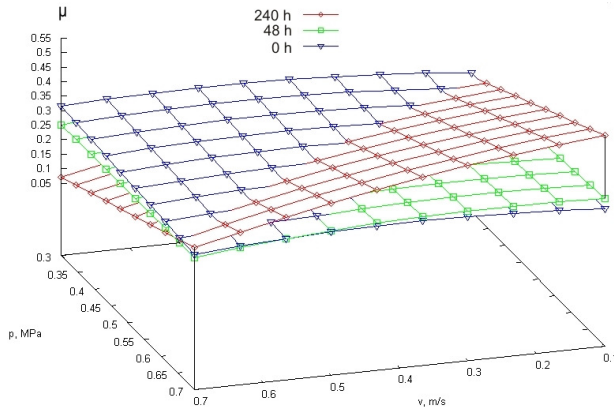
Fig. 2. Samples and countersamples used for investigations: a) EN GJL before corrosion exposure, b) after 48 h exposure, c) after 240 h exposure, d) F3S.20S composite after 240 h exposure, e) F701 composite specimen in its holder

Graficzną interpretację wyznaczonych funkcji przedstawiono na **Rys. 3** i **4**. Ubytek masy tarczy wystawionej przez 240 godzin na działanie czynników atmosferycznych jest największy, natomiast ubytek masy trzpienia jest wyraźnie mniejszy (**Rys. 3**). Przyczyną tego może być początkowa współpraca klocka hamulcowego z tlenkiem powstałym na powierzchni kompozytu.



Rys. 3. Zależności ubytku masy kompozytowej tarczy F3S.20S (a) oraz trzpienia z materiału F701 (b) od prędkości i nacisku: czas ekspozycji na korozję przeciwpróbek – 0, 48 i 240 godzin

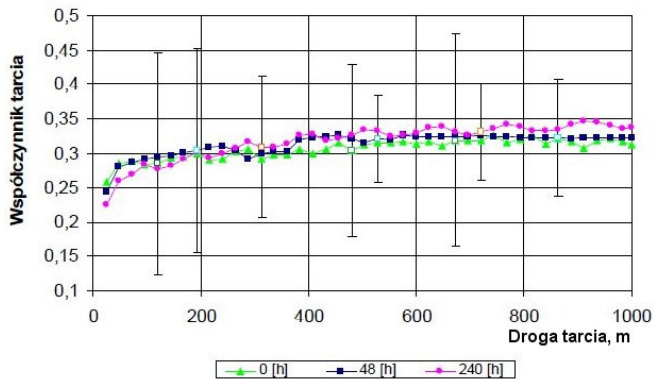
Fig. 3. Mass loss of F3S.20S composite disc (a) and F701 frictional material (b) pin vs. velocity and load. Exposition of the countersamples to the corrosion environment – 0, 48 and 240 hours



Rys. 4. Zależności współczynnika tarcia od prędkości i nacisku w skojarzeniu F701–F3S.20S: czas ekspozycji przeciwpórek – 0, 48 i 240 h

Fig. 4. Coefficient of friction vs. velocity and load of pairing F701–F3S.20S: exposition time of the countersample – 0, 48 and 240 hours

W trakcie współpracy tlenek ten jest stopniowo usuwany z powierzchni kompozytu, a produkty zużycia są częściowo nanoszone na materiał cierny. Proces ten ma miejsce dopiero pod wpływem odpowiednio dużego nacisku – przekraczającego 0,5 MPa i towarzyszy mu wyraźny wzrost wartości współczynnika tarcia (**Rys. 4**). Podobny przebieg współczynnika tarcia odpowiadający ekspozycji 0 i 48 godzinnej może świadczyć o tym, że wytworzona warstwa tlenkowa jest na tyle cienka, że zostaje szybko usunięta i nie wywiera większego wpływu na właściwości tribologiczne. Stabilizacja wartości współczynnika tarcia następuje na poziomie ok. 0,32.



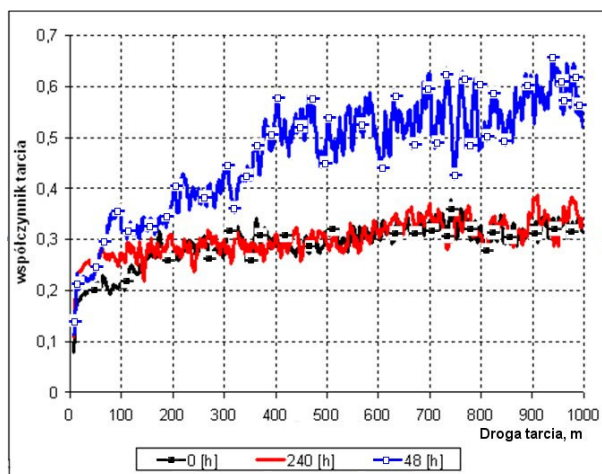
Rys. 5. Zmiany współczynnika tarcia w skojarzeniu F701/F3S.20S dla różnych czasów ekspozycji na korozję

Fig. 5. Changes of friction coefficient in F701/F3S.20S contact for different corrosion's exposition time

Analizując powierzchnie przeciwpróbek z materiału kompozytowego po współpracy z okładziną klocka hamulcowego (**Rys. 7**) zaobserwowano naniesiony podczas tarcia film ślizgowy utworzony z produktów zużycia pary cierniej. Intensywność koloru, świadcząca o grubości filmu wskazuje, że wraz z wydłużeniem czasu ekspozycji na korozję wyraźnie zwiększa się grubość filmu. Podstawową przyczyną tego procesu jest rozwinięta powierzchnia warstwy tlenkowej, na której formuje się film. Produkty zużycia zostają wtarte we wgłębienia nierówności warstwy tlenku. Na powierzchni tarczy po 48 i 240 godzinach ekspozycji na korozję pojawiły się drobne rysy wzdłuż kierunku tarcia (**Rys. 8b i c**). Przyczyną powstania rys mogą być produkty zużycia warstwy tlenkowej.

Produkty te zostały zainkludowane w materiale ciernym i powodują zużywanie ściernie siluminowej osnowy kompozytu podczas tarcia, czego nie zaobserwowano na tarczy bez korozji (**Rys. 8a**). Pomiar ubytku masy wykazał minimalne zużycie kompozytu na osnowie siluminu (0,4 mg/1000 m), co potwierdza podany powyżej mechanizm zużywania.

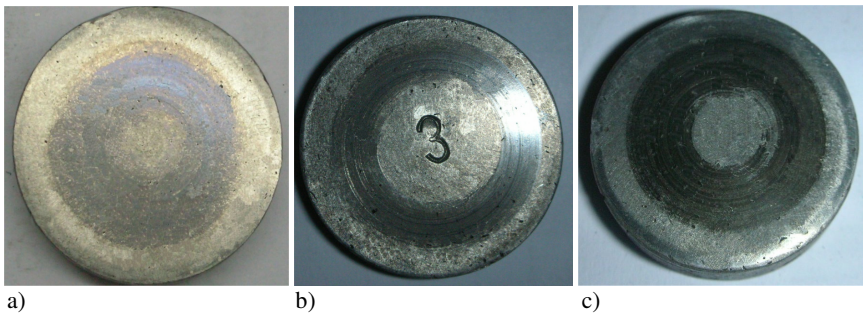
Z przedstawionych na **Rys. 5** wykresów współczynnika tarcia wynika, że korozja tarczy kompozytowej nie wywiera statystycznie istotnego wpływu na zjawiska tarcia w skojarzeniu, o czym świadczą zbliżone przebiegi krzywych. Duże szerokości przedziałów ufności wynikają z małej liczności próby. W badaniach wykonano trzy powtórzenia. Przedziały ufności obliczono z wykorzystaniem rozkładu T-Studenta dla liczby powtórzeń $n = 3$ i poziomu istotności $\alpha = 0,05$, dla których kwanty $t\alpha = 3,182$.



Rys. 6. Zmiany współczynnika tarcia w skojarzeniu F701/EN-GJL-350 dla różnych czasów ekspozycji [L. 4]

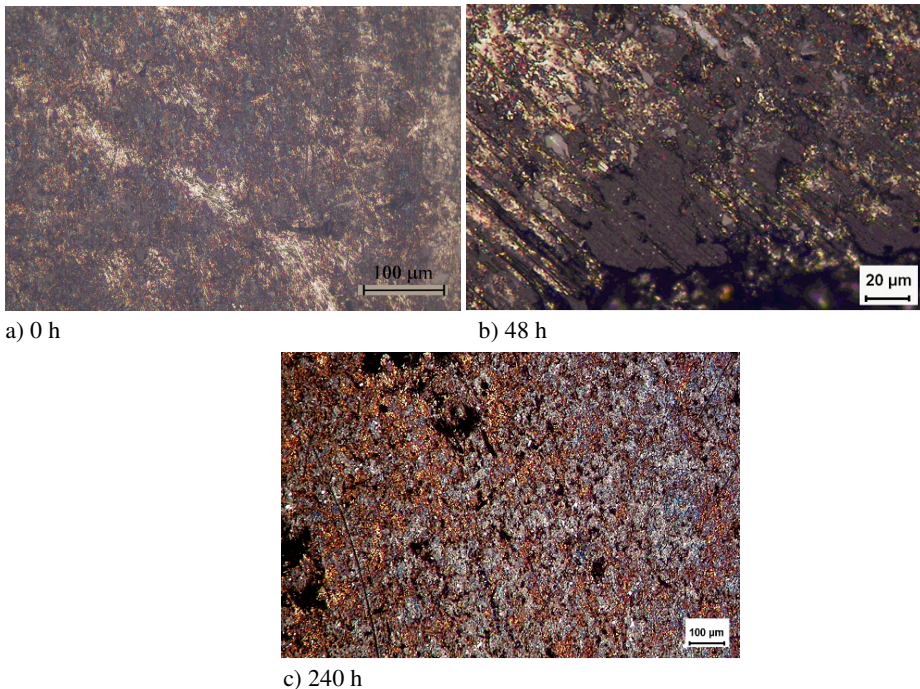
Fig. 6. Changes of friction coefficient in F701/EN-GJL-350 contact for different corrosion's exposition time [L. 4]

Na **Rys. 6** przedstawiono dla porównania przebiegi współczynników tarcia (linie trendów) w skojarzeniu z tarczą wykonaną z żeliwa GJL-350 stosowanego do wytwarzania tarcz hamulcowych po ekspozycji na korozję. Można zauważyć prawie dwukrotny wzrost współczynnika tarcia po ekspozycji 48-godzinnej na korozję.



Rys. 7. Makrofotografie powierzchni krążków kompozytowych po badaniach tribologicznych: a) bez ekspozycji na korozję, b) po 48 h ekspozycji, c) po 240 h ekspozycji

Fig. 7. Macrographs of composite discs after tribological tests: a) without corrosion exposition, b) after 48 hours of corrosion exposition, c) after 240 hours of corrosion exposition



Rys. 8. Powierzchnia kompozytu po współpracy z okładziną cierną

Fig. 8. Surface of composite disc after sliding against friction lining

W skojarzeniu z tarczą po 240 h ekspozycji współczynnik tarcia był niestabilny, przyjmując wartości chwilowe od 0,2 do 0,6, przy średniej 0,3. Takie zachowanie żeliwnych tarcz hamulcowych wynika z obecności tlenków żelaza na ich powierzchni i może być groźne w skutkach, ponieważ krótkotrwale zmniejsza o 30% i zwiększa o 50% siły hamowania.

PODSUMOWANIE

W przeprowadzonych badaniach próbki wykonane z kompozytu F3S.20S były wystawione na działanie wilgotnego powietrza, bez udziału używanej do posypywania drogi soli. Tak eksponowane próbki pokrywały się tylko cienką warstwą naturalnego tlenku glinu, który oddziaływał w istotny sposób na warunki tarcia tarczy z materiałem klocka hamulcowego.

Przeprowadzone badania wykazały, że materiał kompozytowy F3S.20S stosowany do wytwarzania tarcz hamulcowych przeznaczonych do pojazdów samochodowych nie zmienia swoich właściwości tribologicznych w istotny sposób. Przejawia się to w stabilności wartości współczynnika tarcia ($\mu = 0,3-0,4$) badanych skojarzeń ciernych dla wszystkich czasowych warunków korozyjnej ekspozycji. Natomiast stwierdzono zależność pomiędzy wartością zużycia (mierzonego wagowo) materiału tarczy kompozytowej a czasem ekspozycyjnego narażenia na działanie czynników atmosferycznych. Otrzymane wartości zużycia materiału kompozytowego są około 6 razy mniejsze niż dla tarcz wykonanych z żeliwa GJL-350.

LITERATURA

1. Sobczak J.: Kompozyty metalowe. Instytut Odlewnictwa. Instytut Transportu Samochodowego, Kraków – Warszawa 2001.
2. Li Y., Ramesh K.T., Chin E.S.C.: The compressive viscoplastic response of an A359/SiCp metal – matrix composite and of the A359 aluminum alloy matrix. *International Journal of Solids and Structures* 37 (2000), 7547–7562.
3. Czech R.: Wpływ materiałów kompozytowych na eksploatację hamulców tarczowych. Praca magisterska. Wydział Transportu Politechniki Śląskiej, Katowice 2006 (niepublikowana).
4. Posmyk A.: Materiały kompozytowe w budowie pojazdów. *Badania Katedry Eksploatacji Pojazdów* 255/RT1/2006-2011.
5. Adamiec P., Wawrzynek R., Kubacki J.: Wpływ ekspozycji korozji tarczy hamulcowej na zmiany powierzchni tarczy i klocka hamulcowego. *Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej, Gliwice* 2006, 7–14.

Summary

In this article an influence of corrosion on tribological properties of composite material F3S.20S (A359+20%_mSiC) mated with material used in production of brake pads (F701) has been studied. In order to define the influence of the used composite on utility features of brakes, the research results were compared with the ones received in the same experimental conditions for the brake discs made of grey cast iron with flake graphite. The time of the exposition of the counter-samples to the corrosion environment has been accepted as 0, 48 and 240 hours.

Tests have been performed on a pin-on-disc apparatus, according to the Hartley's plan of experiment. Their results have been used to determine the influence of pressure, sliding velocity and time of exposition on corrosion on friction coefficient and mass loss of the rubbing materials. Obtained dependences have been described with quadratic functions and presented on 3D graphs, Fig. 2 and 3. Composite was characterised with considerably lower susceptibility to changes of the value of friction factor ($0.25 \div 0.32$) in comparison to grey cast iron ($0.2 \div 0.6$). Its wear was also several times lower than of the traditional material.