

Piotr ADAMIEC, Rafał WAWRZYNEK, Jerzy KUBACKI

WPLYW EKSPOZYCJI KOROZJI TARCZY HAMULCOWEJ NA ZMIANY POWIERZCHNI TARCZY I KLOCKA HAMULCOWEGO

Streszczenie. W artykule przedstawiono charakterystykę materiału ciernego z uwzględnieniem przeznaczenia poszczególnych składników stanowiących kompletny kompozyt. Na podstawie przeprowadzonych badań i dokumentacji fotograficznej dokonano analizy topografii powierzchni materiału ciernego w wyniku współpracy tribologicznej z uwzględnieniem zjawiska korozji.

INFLUENCE OF TIME EXPOSITION OF CORROSION ON SURFACE CHANGES OF BRAKE DISC AND PADS

Summary. The characteristics of brake pads with particular composition are presented in the paper. The analysis was performed by using SEM topography of surfaces and chemical analysis of tribological contact of brake pads and brake discs system. In particular we analyses the products and effects process of corrosion were analysed.

1. WSTĘP

Materiały cierne wykorzystuje się w układach tribologicznych, w których wymagane jest skojarzenie cierne lub konieczne jest wytracanie energii. Ze względu na stale rosnące obciążenia oraz prędkości występujące w maszynach i pojazdach istnieje ciągły rozwój tych materiałów, stymulowany koncentracją wytwarzania oraz możliwością badań wyspecjalizowanych wytwórni. Projektując materiał cierny na okładziny hamulcowe, należy wziąć pod uwagę kryteria bezpieczeństwa (skuteczność hamowania, palność, ściśliwość, wytrzymałość mechaniczną), komfortu jazdy (odgłosy, piszczenia, dymienie, zapach), ekonomiczne (zużycie materiału ciernego i bieżni, ciężar, koszty produkcji).

W artykule przedstawiono wpływ zjawiska korozji wybranych elementów układu hamulcowego w kontekście zachodzących zmian na powierzchni trącej skojarzenia ciernego. Czasy ekspozycji korozji 0 h, 48 h oraz 240 h zostały wyznaczone na podstawie analizy postoju pojazdów w punkcie serwisowym w związku z jego naprawą.

2. CHARAKTERYSTYKA KOMPOZYTOWYCH MATERIAŁÓW CIERNYCH

Materiały cierne dzielimy na metalowe oraz niemetalowe. Materiały metalowe stosuje się na ogół rzadko, przede wszystkim w tych węzłach, w których wywiązuje się bardzo duża ilość ciepła, np. hamulce pojazdów szynowych. Z innych metalowych materiałów ciernych można wymienić spieki, które stosuje się w niektórych sprzęgłach ciernych oraz w hamulcach specjalnych. Oprócz dużej odporności cieplnej i dobrego przewodnictwa cieplnego materiały te mają niezbyt duży współczynnik tarcia i dlatego nie są powszechnie używane.

W układach ciernych stosuje się powszechnie kompozytowe materiały niemetalowe, którym nadaje się przede wszystkim odpowiednie właściwości cierne, a ponadto polepsza przewodność cieplną i charakterystykę przeciwozryciową. [1]

Materiał stosowany na okładziny cierne klocków hamulcowych jest formowany poprzez spiekanie proszków zawierających wiele różnych kompozytów (zazwyczaj od 10 do 20 składni-

ków). Do podstawowych materiałów tej grupy zaliczamy: składniki włókniste, środki wiążące, wypełniacze oraz dodatki antyadhezyjne:

Materiały włókniste stanowiące szkielet kompozytu nadają mu odpowiednią wytrzymałość mechaniczną i cieplną. Ponadto mają za zadanie oczyszczenie powierzchni partnera tribologicznego, co wpływa na podwyższenie i stabilizację wartości współczynnika tarcia. Jako składników włóknistych używa się włókien szklanych, węglowych, kevlarowych, ceramicznych i mineralnych, a także wełny stalowej, nitok stalowych, aluminiowych i miedzianych [1].

Materiały wiążące służą do wiązania poszczególnych składników kompozytu oraz tworzą termicznie odporną mieszaninę służącą do zachowania stabilności współczynnika tarcia. Do najczęściej stosowanych środków wiążących należą żywice fenolowe z dodatkami kauczuku [1].

Wypełniacze mają polepszyć właściwości cierne kompozytu, przeciwdziałać nadmiernemu zużyciu, zwiększać odporność cieplną, a także poprawiać jego właściwości mechaniczne. Jako wypełniacze stosuje się różne związki mineralne, tlenki metali i metale. Do najczęściej stosowanych wypełniaczy należą: mączka cyrkonowa i mineralna, mika, siarczan baru, tlenki: Cr, Zn, Mg, Fe, trójsiarczek antymonu, wapno hydratyzowane, węglík krzemu, proszki metali (Cu), granulaty (brąz i mosiądz), opiłki żeliwa i stali oraz drutów miedzianych, mosiężnych i cyrkonowych [1].

Dodatki antyadhezyjne gwarantują stabilne właściwości tribologiczne okładziny, kontrolują stosunek zużycia powierzchni tarczy i klocka. Składniki kompozytu, takie jak grafit i siarczki metali, stabilizują współczynnik tarcia głównie w podwyższonych temperaturach. Częstki ściernie, zazwyczaj takie jak tlenek glinu, dwutlenek krzemu, zwiększają współczynnik tarcia oraz kontrolują proces zużycia, usuwając z powierzchni tarczy niepożądaną warstwę tlenków żelaza [2].

Z ww. opisu wynika, że niektóre składniki pełnią kilka funkcji. Łatwo zauważyć, że poprawienie niektórych właściwości odbywa się kosztem innych. Przykładem jest zastosowanie grafitu, który jako smar stały przeczy żądaniu możliwie dużego współczynnika tarcia. Przy wielu składnikach w kompozytach ciernych istotne jest także to, aby one nie obniżały właściwości kompozytu wskutek interakcji. Objętościowy udział składników jest tajemnicą producenta. W tabeli 1 pokazano przykładowy udział głównych składników.

Tabela 1
Udział objętościowy głównych składników kompozytu ciernego [3]

Grupa surowców	Materiały	Udział objętościowy [%]
Metale	Wata stalowa Proszek miedziany	14
Wypełniacze	Tlenek glinu Mika mielona Baryt Tlenek żelazowy	23
Środki antyadhezyjne	Siarczek antymonu Grafit Sproszkowany koks	35
Składniki organiczne	Włókna aramidowe Proszek wypełniający z żywicy Żywica wiążąca	28

3. WPLYW WARUNKÓW WSPÓŁPRACY NA WŁAŚCIWOŚCI CIERNE

Przy małych prędkościach ruchu występuje zjawisko ruchu skokowo-poślizgowe (zwane stick-slip). Jego negatywny wpływ na zespół cierny polega na zmniejszeniu skuteczności sprzężenia ciernego oraz wywołaniu drgań zespołu o częstotliwości akustycznej, co przejawia się,

np. puszczaniem hamulców. Jeżeli zespół cierny wpada w drgania i powoduje nadmierny hałas, to można temu przeciwdziałać następująco:

1. Zmienić częstość drgań władnych układu, np. przez zastosowanie międzywarstwy oddzielającej materiał cierny od elementu nośnego przez zmianę sposobu łączenia okładziny cierniej z tym elementem albo przez zmianę twardości kompozytu,
2. Obniżyć wartość statycznego współczynnika tarcia, np. przez dodanie grafitu lub MoS_2 ,
3. Zmienić kształt okładzin.

Skojarzenie cierne nagrzewa się podczas pracy wskutek tarcia. Mała przewodność cieplna kompozytów ciernych powoduje, że odprowadzają one 1÷6% ogólnej ilości ciepła wytworzonego podczas tarcia. Pozostała ilość ciepła przejmuje metalowy partner [1]. Ilość wydzielanego ciepła zależy od nacisku, prędkości i czasu trwania tarcia. Mała przewodność cieplna powoduje duży gradient temperatury w okładzinie, przy czym warstwa wierzchnia okładziny ma temperaturę zbliżoną do temperatury metalowego partnera. Wartość temperatury granicznej zależy od składu kompozytu, przede wszystkim od rodzaju środka wiążącego. Stwierdzono, że podczas powolnego nagrzewania się kompozytu występuje szybsze zużywanie materiału ciernego niż podczas gwałtownego nagrzewania, co jest prawdopodobnie spowodowane głębszym osłabieniem materiału wskutek ciepła [1].

Zjawisko częściowego zaniku skuteczności sprzężenia ciernego (fading) jest wywołany częściowo destrukcją termiczną składników kompozytu. Produkty rozkładu mogą występować w postaci gazowej lub ciekłej. Wówczas tarcie suche zmienia się w mieszane i maleje współczynnik tarcia. Przy umiarkowanym nagrzewaniu okładzin ciernych i niezbyt dużej intensywności hamowania podczas jazdy w mieście na powierzchni kompozytów ciernych tworzą się szkliste powłoki niskocierne. Powłoki takie zazwyczaj zużywają się ściernie po ochłodzeniu lub po intensywnym hamowaniu. Złożony mechanizm zużywania materiałów ciernych wskazuje na występowanie zużycia poprzez odkształcenie plastyczne polegające na nanoszeniu kompozytu na powierzchni partnera. Ma to miejsce szczególnie przy miękkich kompozytach z osnową kauczukową. W wysokiej temperaturze następuje zwęglenie warstwy wierzchniej kompozytu i intensywne zużywanie ściernie [1].

4. ZMIANY TRIBOLOGICZNE W WARSTWIE WIERZCHNIEJ OKŁADZIN CIERNYCH

Przeprowadzone badania warstwy wierzchniej za pomocą analizy rentgenowskiej materiałów kompozytowych po współpracy z metalowym partnerem pozwalają na stwierdzenie występowania zjawiska przenoszenia warstw metalicznych na powierzchnie materiałów ciernych. Badania zglądów warstw naniesionych na powierzchni kompozytu wykazały dużą koncentrację żelaza. Obserwacje mikrofraktograficzne powierzchni materiału ciernego pozwoliły na określenie zmian topografii powierzchni jako skutku tarcia i ocenę mechanizmu zachodzenia tych zmian. Naniesione osady miały budowę warstwową złożoną z cząstek ferrytu. Szczeliny, rysy i nierówności na powierzchni kompozytu są wynikiem oddziaływania, np. czynników mechanicznych, oddziaływań mikronierówności przeciwpółki, uderzeń termicznych o dużym gradiencie, destrukcji organicznego lepiscza połączonej z wydzielaniem płynnych i gazowych produktów i tworzeniem koksopodobnych pozostałości. W przypadku wysokich wartości iloczynu nacisku jednostkowego oraz prędkości metalowe wióry napęcznia mogą ulec adhezyjnemu szczerpieniu z tarczą i mogą być wyrwane z powierzchni kompozytu. W wyniku oddziaływań czynników mechanicznych termicznych konstrytuje się warstwa wierzchnia o właściwościach znacznie różniących się od właściwości rdzenia. W pierwszym etapie, do temperatury około 520 K, następuje umocnienie warstwy wierzchniej. W wyniku dalszego potehnologicznego usieciowania żywicy, powyżej temperatury 570 K, zachodzi destrukcja najpierw kauczuku, a potem żywicy. Prowadzi to do wydzielania ciekłych i gazowych produktów [4].

5. EKOLOGICZNE WYMAGANIA STAWIANE NOWOCZESNYM MATERIAŁOM CIERNYM

Pierwszym etapem zmian w materiałach ciernych było wyeliminowanie azbestu z produkcji. W tym zakresie zostało ujednolicone ustawodawstwo europejskie. Również obowiązujące w branży motoryzacyjnej regulaminy EKG ONZ wprowadziły zakaz stosowania azbestu: Regulamin 13 seria zmian 07 oraz Regulamin 90 EKG ONZ. Ze względu na szkodliwe właściwości azbestu zastąpiono go mieszaniną różnych włókien w połączeniu z napełniaczami.

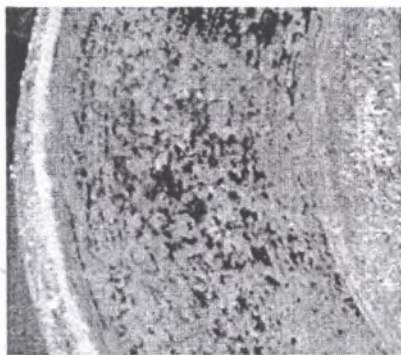
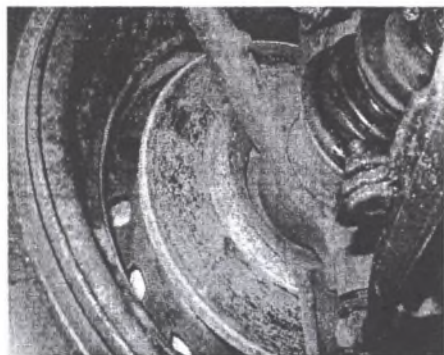
Włókna używane jako substytuty azbestu również nie są bezpieczne, np. włókna aramidowe rozszczepiają się, włókna szklane mają postać ułatwiającą przedostawanie się do płuc, standardowa wełna mineralna rozkłada się w organizmie przez rok, a jej wersja biodegradowalna przez 3 miesiące. W celu wyeliminowania zagrożeń będą powstawały materiały cierne bez włókien. Ze składu materiałów ciernych eliminowane są metale ciężkie, takie jak chrom, kadm, ołów. Narządami wyjątkowo narażonymi na zatrucie są mózg, nerki, wątroba, szpik kostny. Szczególnie niebezpieczne jest rakotwórcze działanie metali ciężkich. Dlatego eliminuje się z produkcji materiałów ciernych związki zawierające metale ciężkie.

Kolejnym czynnikiem, który należy uwzględnić podczas projektowania materiału ciernego i podczas doboru składników, jest ich zdolność do pylenia. Wiele krajów posiada w tym zakresie swoje regulacje prawne. W Polsce obowiązuje m.in. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r., w którym znajduje się wykaz wartości najwyższych dopuszczalnych stężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy oraz czynników pyłowych [5].

6. WPŁYW EKSPOZYCJI KOROZJI NA POWIERZCHNIĘ KOMPOZYTU CIERNEGO

Pojazd jako obiekt techniczny stanowi złożoną strukturę. W czasie realizacji funkcji użytkowych pojazdu ma miejsce starzenie się poszczególnych części w efekcie nieodwracalnych procesów fizycznych i chemicznych (korozja chemiczna, elektrochemiczna, zużycie ściernokorozyjne) stanowiących oddziaływanie mikro- i makrootoczenia. Zmiany te prowadzą do powstawania drgań dynamicznych, spadku sprawności mechanicznej, wzrostu temperatur itp., co w określonym czasie eksploatacji powoduje powstawanie zużycia granicznego poszczególnych części pojazdu [6].

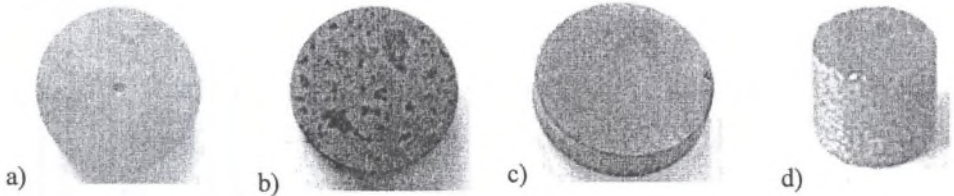
Również podczas przestoju pojazdu zachodzą procesy obniżające sprawność mechaniczną poszczególnych części. Jednym z nich jest przykład korozji elementów układu hamulcowego, a dokładnie skojarzenie tarczy z klockiem hamulcowym. Na rysunku 1 pokazano korozję na powierzchni tarczy hamulcowej.



Rys. 1. Korozja tarczy hamulcowej
Fig. 1. Corrosion of the brake disc

Zachodzący proces starzenia się elementów układu hamulcowego doprowadził do przeprowadzenia wstępnych badań skojarzenia na testerze typu trzpień-tarcza T-11. Do badań użyto próbek z materiału ciernego w postaci walców o średnicy 10 mm. Jako przeciwpróbki zastosowano tarcze o średnicy 25,4 mm wykonane z żeliwa do produkcji tarcz hamulcowych [7].

W celu symulacji warunków rzeczywistych krążki zostały poddane działaniu czynników atmosferycznych przez okres 48 h oraz 240 h.



Rys. 2. Materiał badawczy

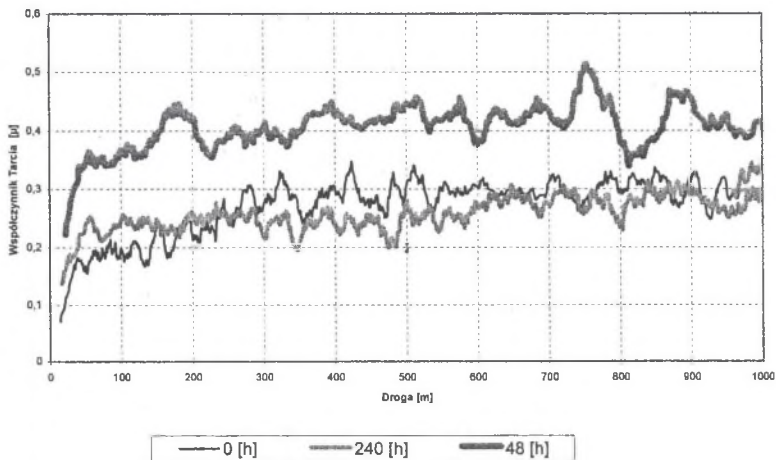
a) przeciwpróbka referencyjna, b) przeciwpróbka z ekspozycją korozji 48 h, c) przeciwpróbka z ekspozycją korozji 240 h, d) próbka z kompozytu ciernego.

Fig. 2. Material of investigation

a) reference sample, b) sample with corrosion exposition time up to 48 h, c) sample with corrosion exposition time up to 24 h, d) frictional composition sample

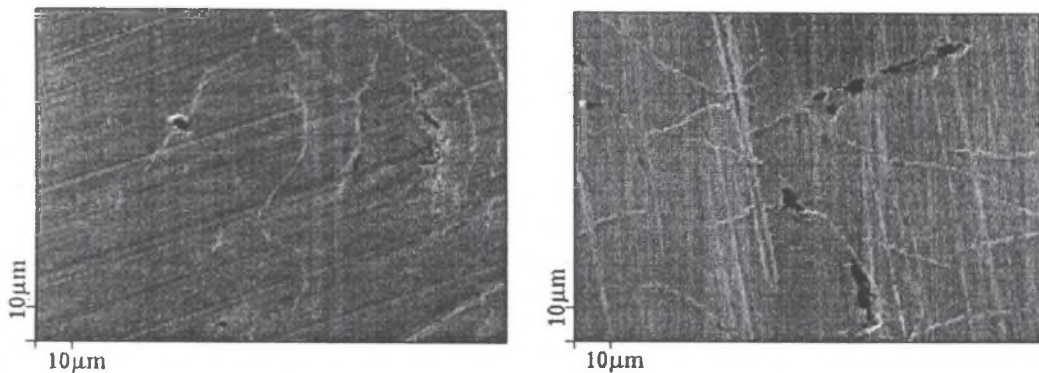
Powierzchnie tarczy hamulcowej poddanej działaniu czynników atmosferycznych zostały przedstawiony na rysunku 2. Na rysunku 2a została przedstawiona powierzchnia referencyjna tarczy, rysunek 2b przedstawia powierzchnie tarczy po upływie 48 h, natomiast rysunek 2c obrazuje zmiany po upływie 240 h. Na powyższych zdjęciach widać wyraźnie, że wpływ czynników atmosferycznych powoduje drastyczne zmiany na powierzchni. Po upływie 48 h pojawiły się wyraźne miejscowe obszary pokryte korozją. Prawdopodobnie zawierają one głównie tlenki żelaza. Po upływie 240 h cała powierzchnia uległa procesowi korozji.

Celem badań było zbadanie wpływu zjawiska korozji powierzchni tarczy hamulcowej na wartość współczynnika tarcia jak również na materiał kompozytu ciernego. Na rysunku 3 pokazano uzyskane charakterystyki współczynnika tarcia dla prędkości poślizgu $v=0,4$ [m/s] przy obciążeniu styku $p_H=0,50$ MPa, na drodze tarcia $S=1000$ m.



Rys. 3. Zmiany współczynnika tarcia dla różnych czasów ekspozycji korozji
Fig. 3. Evolution of the friction coefficient for corrosion exposition time

Uzyskana wartość średnia współczynnika tarcia w funkcji drogi tarcia pokazana jest na rysunku 3. W przypadku czasu ekspozycji 48 h wartość współczynnika tarcia wykazuje wyraźny wzrost. Jest to prawdopodobnie wynik współpracy kompozytu ciemnego z bardzo niejednorodnym obszarem korozji, który spowodował wyraźne zwiększenie jego wartości w stosunku do pomiarów przeprowadzonych dla próbki referencyjnej. Dla czasu ekspozycji równy 240 h przebieg współczynnika tarcia jest podobny do przebiegu dla próbki referencyjnej. Może to być spowodowane współpracą materiału ciemnego z jednorodnym obszarem korozji występującym na całej powierzchni.



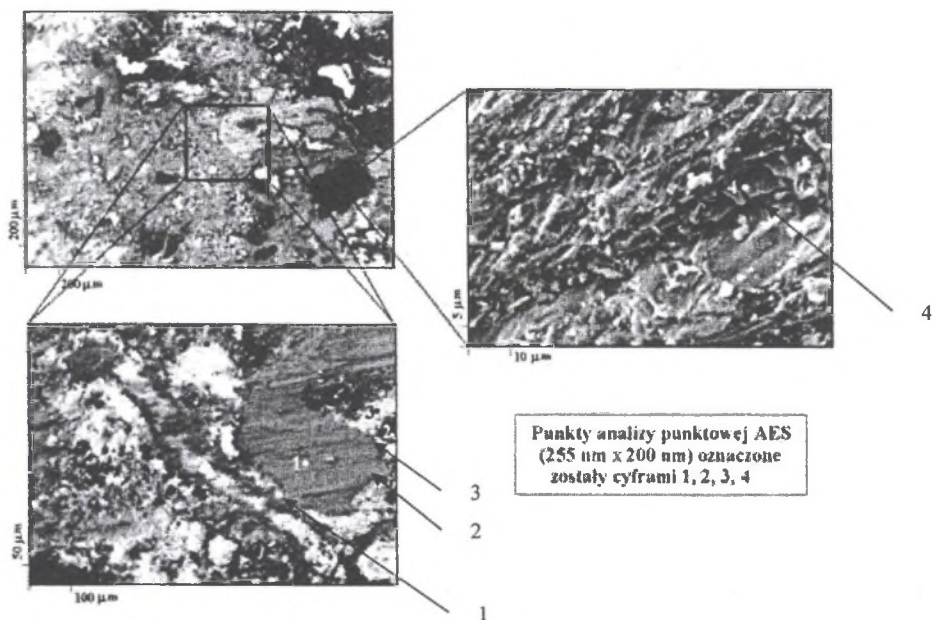
rys. 4. Widok powierzchni tarczy hamulcowej SEM
fig. 4. SEM image of the brake disc surface

Obraz powierzchni tarczy hamulcowej po badaniu przedstawiono na rysunku 4. Powierzchnia przeciwpróbek z ekspozycją korozji po współpracy z kompozytową próbką sugeruje, że dominującym procesem niszczenia warstwy wierzchniej żeliwa było typowe zużycie ściernie. Dowodem tego są widoczne rysy i bruzdy, a nawet dziury na powierzchni tarcia, widoczne nawet gołym okiem. Świadczy to o dodatkowym ścieraniu się warstwy z korozją, przez co powstaje większa liczba cząsteczek przetaczających się między powierzchniami trącymi. Proces niszczenia miał przebieg równomierny. Dłuższy czas ekspozycji wpływa w znacznym stopniu na powstawanie głębszych bruzd i rys, co powoduje większy ubytek masy trzpienia. Zużywanie powierzchni próbki kompozytowej ma charakter nierównomierny. Proces tarcia spowodował utworzenie licznych kraterów i wyrw na powierzchni trącej. Zużycie adhezyjne spowodowało również naniesienie na powierzchnię próbki cząsteczek należących do warstwy wierzchniej przeciwpróbki: żeliwa i korozji

Topografię powierzchni tarczy oraz klocka hamulcowego wykonano na mikroskopie skaningowym, wchodzącym w skład wielofunkcyjnego spektrometru PHI 5700/660 firmy Physical Electronics, który jest zainstalowany w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Śląskiego [8, 9]. Wyniki są prezentowane na rysunkach 4 i 5. W przypadku powierzchni tarczy hamulcowej widoczne są wyraźne cechy współpracy skojarzenia tarcza-kłoczek. Skład chemiczny tarczy hamulcowej, wyznaczony technikami XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy) oraz AES (Auger Electron Spectroscopy), wykazał obecność następujących pierwiastków: żelaza Fe, węgla C, krzemu Si, magnezu Mg, manganu Mn, Niklu Ni, siarki S, potasu P oraz chromu Cr. Topografia klocka hamulcowego, w odróżnieniu od tarczy, przedstawia zróżnicowaną powierzchnię kompozytu ciemnego. Poddając powierzchnie kompozytu ciemnego analizie punktowej AES stwierdzono brak jednorodności chemicznej powierzchni, czyli obecność różnych pierwiastków na badanych obszarach.

Rysunek 5 przedstawia topografię powierzchni kompozytu ciemnego. Powierzchnia klocka wykazuje bardzo zróżnicowany charakter zarówno pod względem składników powierzchni, jak i struktury. Widoczne są charakterystyczne obszary o różnym odcieniu, co sugeruje złożoną strukturę kompozytu ciemnego pod względem strukturalnym i chemicznym. Wykonana analiza składu

chemicznego przeprowadzona metodą AES umożliwiła jego identyfikację na wybranych obszarach. Analizowane miejsca miały wymiary 255 nm x 200 nm.



Rys. 5. Widok powierzchni klocka hamulcowego SEM
Fig. 5. SEM image the brake pad surface

Tabela 2
Analiza chemiczna poszczególnych obszarów klocka hamulcowego

Numer obszaru	Skład chemiczny
1	Fe, O, C, Cu
2	Al, S, C, O, Sn
3	S, Sn, O, Si, C, Cu, Mg
4	S, Si, W, Al, C, K, O

Z powyższej tabeli widać duże zróżnicowanie składu chemicznego kompozytu ciernego. Pierwiastki typu S, Sn, Si, Cu, Al, W stanowią naturalny skład kompozytu ciernego, natomiast pierwiastki typu C, O lub K stanowią zanieczyszczenie chemiczne lub wchodzą w skład określonych związków chemicznych, jak np. tlenków metali lub węglików. Powierzchnia tarczy hamulcowej przed dokonaniem prób była poddana na działanie czynników atmosferycznych. Analizie XPS poddana została część powierzchni tarczy, która współpracowała z kompozytem ciernym podczas trwania próby, obszar skorodowany tarczy, który pozostał bez kontaktu ciernego oraz kompozyt cierny użyty w badaniu. Wyniki prezentowane są w tabeli 3.

Tabela 3
Skład chemiczny materiału badawczego będącego w skojarzeniu ciernym

Rodzaj obszaru	Skład chemiczny
Obszar tarczy hamulcowej będący w kontakcie z kompozytem ciernym	C, N, O, Si, Fe, Zr, Mo, Sn
Obszar tarczy hamulcowej pokryty korozją	C, N, O, Si, Fe
Kompozyt cierny	C, N, O, Si, S, Fe, Sn, Mo

Obszar tarczy hamulcowej, który był w kontakcie z kompozytem ciernym oprócz pierwiastków występujących w materiałach używanych do produkcji tego typu elementów, tj. C, O, Si, Fe, Zr, zawiera trzy dodatkowe pierwiastki: N, Sn oraz Ca. Z kolei na obszarze skorodowanym dodatkowym pierwiastkiem w stosunku do nominalnego składu tarcz hamulcowych jest azot. Nie są widoczne inne pierwiastki, które w stopach używanych do produkcji tarcz hamulcowych występują w ilościach śladowych (Zr: z reguły do 1%). Wynika to głównie z obecności na skorodowanej powierzchni głównie tlenków żelaza, prawdopodobnie w postaci Fe_2O_3 oraz Fe_3O_4 , które mogą zakrywać inne produkty w procesie korozji. Obecność azotu na wszystkich powierzchniach poddanych analizie XPS wynika prawdopodobnie ze środowiska, w jakim była przeprowadzana próba tarcia. W trakcie trwania próby następuje proces wcierania cyny Sn oraz molibdenu Mo, wchodzących w skład kompozytu ciernego, w strukturę powierzchni tarczy. Podobnie jak w przypadku wyników prezentowanych w tabeli 3, tlen i węgiel wchodzi w skład tlenków oraz węglików, tworzących się podczas kontaktu trybologicznego.

7. PODSUMOWANIE

W wyniku działania zjawiska korozji na powierzchni tarczy hamulcowej zachodzi zjawisko utleniania się warstwy tarczy hamulcowej. Zachodzący proces korozji powoduje przyrost materiału, głównie w postaci tlenków żelaza. W wyniku tarcia na obszarach poddanych procesowi utleniania występuje wzrost koncentracji związków węgla. Badania topografii powierzchni współpracujących w węzle tarcia pozwalają na identyfikację pierwiastków chemicznych, które dyfundują na powierzchniach pary cierniej. Dalsza analiza zachodzących zjawisk w omawianym skojarzeniu będzie przedstawiana w kolejnych artykułach po wykonaniu następnych badań laboratoryjnych.

Literatura

1. Lawrowski Z.: Trybologia. PWN Warszawa 1993.
2. Eriksson M., Bergman F., Jacobson S.: On the nature of tribological contact in automotive brakes. *Wear* 252 (2002), 26-36.
3. Informator Techniczny Bosch. Konwencjonalne układy hamulcowe. WKŁ, Warszawa 2001.
4. Ścieszka F.: Hamulce cierne. Zagadnienia materiałowe, konstrukcyjne i trybologiczne. Wydawnictwo ITE, Gliwice-Radom 1998.
5. Orłowski T.: Tendencje w rozwoju materiałów ciernych. *Tribologia* 3-2004.
6. Adamiec Adamie., Dziubiński J., Filipczyk J.: Technologia napraw pojazdów samochodowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
7. Tester typu Trzpień-Tarcza T-11. Instrukcja obsługi, Radom 2001.
8. Moulder J. F., Stickle W. F., Sobol P. E., Bomben K. D.: Handbook of X-Ray Photoelectron Spectroscopy (Physical Electronics, Eden Prairie, MN, 1995).
9. Childs K. D., Carlson B. A., Vanier L. A., Moulder J. F., Paul D. F., Stickle W. F., Watson D G.: in C. L. Hedberg, Ed., Handbook of Auger Electron Spectroscopy (Physical Electronics, Eden Prairie, MN, 1995).

Recenzent: Dr hab.inż. Dionizy Czekaj