

WPLYW STANU ENERGETYCZNEGO WARSTWY WIERZCHNIEJ NA ZACIERANIE ADHEZYJNE WYBRANYCH SKOJARZEŃ

Łukasz Wojciechowski

Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, Politechnika Poznańska,
ul. Piotrowo 3, 60-965, Poznań, e-mail: lukasz.wojciechowski@put.poznan.pl

Streszczenie. Artykuł prezentuje wpływ nagniatania naporowego na stan energetyczny warstwy wierzchniej oraz będącą tego konsekwencją odporność na zacieranie. Oceny stanu energetycznego warstwy wierzchniej dokonano wykorzystując spektroskopie elektronów Augera – na podstawie pomiaru czasu trawienia jonami argonu, potrzebnego do otrzymania fizycznie czystej powierzchni. Badania przeprowadzono na maszynie tarciowej Amsler A135, dla skojarzeń materiałowych: stal 45-stal 45, stal 45-mosiądz MO59 i stal 45-żeliwo Z1 300. Stwierdzono spadek odporności na zacieranie skojarzenia stalowego oraz stalowo-mosiężnego, smarowanych olejem parafinowym, w którym próbka była nagniatana siłą o znacznej wartości. W przypadku smarowania olejem z dodatkami EP tych samych skojarzeń następował wzrost odporności na zacieranie. Dla skojarzenia stalowo-żeliwnego nagniatanie prowadziło do wzrostu odporności na zacieranie, niezależnie od rodzaju substancji smarującej.

Słowa kluczowe: warstwa wierzchnia, stan energetyczny, zacieranie adhezyjne, odporność na zacieranie, nagniatanie, spektroskopia elektronów Augera.

WPROWADZENIE

Zacieranie zdefiniować można jako grupę zjawisk, które występując w węźle ślizgowym, wywołują zwiększone i niestabilne tarcie oraz gwałtowny wzrost intensywności zużywania. Konsekwencją takiego stanu rzeczy może być zatarcie, tj. gwałtowne uszkodzenie i zatrzymanie pracy takiego węzła [1÷3]. Zjawiskiem, które należy do najczęstszych implikatorów procesu zacierania jest adhezja. Przebieg tego zjawiska w warunkach tarcia metali jest bardzo skomplikowany, a jego wyjaśnienie jest przedmiotem wielu hipotez. Pomimo tego dominującym jest pogląd wiążący owo zjawisko z tworzeniem i niszczeniem szczepliń adhezyjnych. Szczepianie ciał stałych charakteryzuje się jako zjawisko ich wzajemnego łączenia przez pierwotną granicę rozdziału, które wymuszone jest czynnikami fizycznymi. Współcześnie wyróżnić można co najmniej kilka hipotez wyjaśniających mechanizm szczepiania adhezyjnego metali. Spośród nich na szczególną uwagę zasługują hipotezy: wzajemnej rozpuszczalności metali, wiązań metalicznych oraz energetyczna.

Głównym założeniem hipotezy wzajemnej rozpuszczalności metali są założenia, że skłonność czystych metali do szczepiania zależy od ich powinowactwa chemicznego oraz modułów sprężystości. Uwzględniając te założenia L.F. Coffin [4] badał tarcie metali w atmosferze tlenu i powietrza, a na podstawie otrzymanych rezultatów zbudowano klasyfikację par trących według ich

skłonności do szepiania. W klasyfikacji tej wyróżniono trzy grupy par trących wykazujących: pełną zdolność szepiania (np. Al - Cu, Cu - Fe, Zn - Cu), częściową zdolność szepiania (np. Zn - Fe, Zn - Al, Al - Ni) oraz ograniczoną zdolność szepiania (np. Pt - Fe, Ag - Fe, Mg - Fe).

Według hipotezy wiązań metalicznych charakterystyczne dla zjawiska adhezji metali w warunkach tarcia szepianie może być także wyjaśnione powstawaniem wiązań metalicznych pomiędzy atomami stykających się materiałów. Na tej podstawie skłonność do szepiania wiązana jest często ze strukturą elektronową metali. Pogląd taki zaprezentował H. Czichos, według którego siła więzi adhezyjnej zależna jest od struktury elektronowej oraz gęstości swobodnych elektronów powierzchniowych [5]. Powstawanie wiązań metalicznych jako mechanizm adhezji uwzględnił w swoich rozważaniach także D. Buckley [6]. Na podstawie rezultatów badań eksperymentalnych przedstawił on zależność współczynnika tarcia niektórych metali w zależności od udziału elektronów z podpowłoki d w wiązaniu metalicznym. Na podstawie tych rezultatów stwierdzono m. in., że zwiększenie wkładu elektronów z podpowłoki d w wiązanie metaliczne powoduje spadek współczynnika tarcia. Prawdliwość ta występowała zarówno dla skojarzeń jedno- jak i różnoimiennych. Stąd, oddziaływanie na granicy rozdziału będzie tym słabsze im większy poziom związania atomów wewnątrz metalu. Logiczną konsekwencją jest fakt, że silniejsze oddziaływania adhezyjne wykazują metale o większej aktywności chemicznej.

Do najpopularniejszych hipotez wyjaśniających przebieg procesu szepiania adhezyjnego należy zaproponowana przez A.P. Semenova [7] hipoteza energetyczna. Jest ona oparta na założeniu, że warunkiem koniecznym do powstania wiązania metalicznego jest przekroczenie pewnego progu energetycznego, na skutek czego następuje specyficzna reakcja łańcuchowa, swoim przebiegiem zbliżona do wybuchów cieplnych. Autor zaznacza jednocześnie, że samo zbliżenie na odległości atomowe czystych powierzchni jest konieczne, ale nie wystarcza do powstania szepiania, które wymaga dodatkowej aktywacji wskutek m. in. wzrostu temperatury i okształcenia plastycznego. Inicjacja powstawania wiązań metalicznych zaczyna się w tzw. centrach aktywnych, czyli wszelkiego rodzaju defektach struktury krystalicznej odznaczających się podwyższoną energią powierzchniową. Jeżeli cały proces zachodzi poniżej temperatury rekrystalizacji, szepienie adhezyjne powstaje przede wszystkim wskutek aktywacji mechanicznej, a rolę centrów aktywnych odgrywają głównie dyslokacje. W momencie wyjścia dyslokacji na powierzchnię, stanowią one jej najbardziej aktywne miejsca i łatwo wchodzą w reakcje chemiczne i tworzenie wiązań metalicznych.

Hipoteza energetyczna w przeciwieństwie do hipotez wzajemnej rozpuszczalności oraz wiązań metalicznych nie wiąże inicjacji szepiania z rodzajem materiałów zastosowanych w węzle tarcia, ale ze stanem energetycznym warstwy wierzchniej. Jest to o tyle istotne, że stan ten może wynikać z wykorzystanej metody konstituowania warstwy wierzchniej, a nie z aspektów materiałowych.

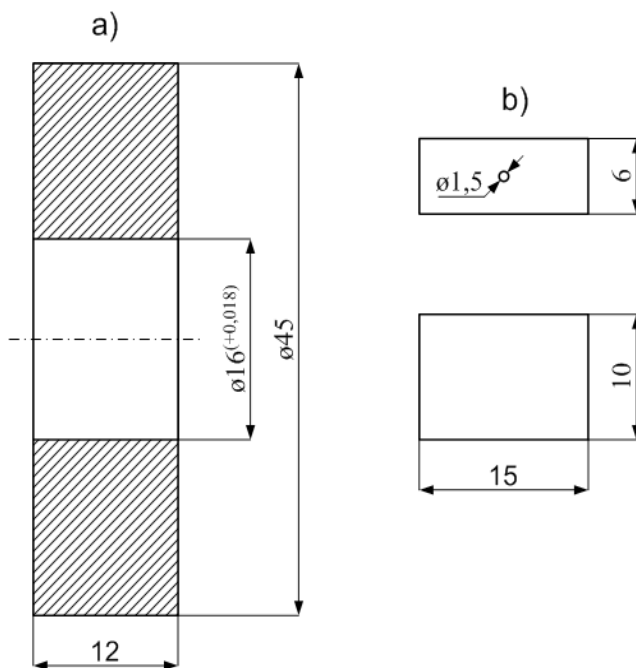
Celem wyjaśnienia tego zagadnienia podjęto badania, mające określić odporność na zacieranie adhezyjne zimne skojarzeń ze stalowym elementem nagniatanym naporowo. Taką metodę obróbki wybrano ze względu na fakt, że powoduje ona znaczącą akumulację energii w warstwie wierzchniej, a przez to może powodować podwyższenie jej stanu energetycznego. Oceny stanu energetycznego warstwy wierzchniej dokonano metodą pośrednią, wykorzystującą spektroskopię elektronów Augera.

PRZYGOTOWANIE PRÓBEK

Próbki wykorzystane w badaniach wykonano ze stali 45 w stanie normalizowanym. Powierzchnie cylindryczne wszystkich próbek poddano szlifowaniu, aż do osiągnięcia na nich para-

metru chropowatości powierzchni $R_a = \text{ok. } 0,5 \mu\text{m}$. Następnie próbki dzielono wstępnie na cztery partie. W pierwszej pozostawiono próbki szlifowane, mające stanowić obiekty odniesienia w stosunku do próbek, które poddano nagniataniu.

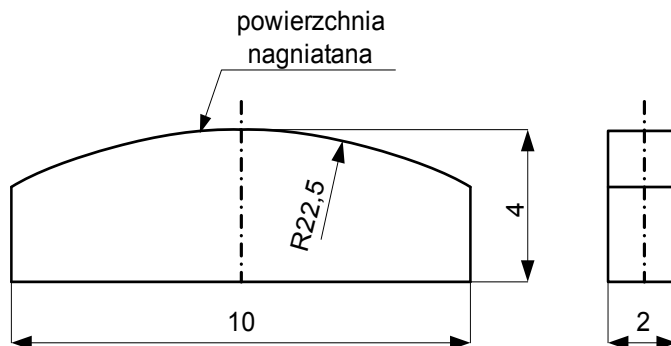
Nagniatanie prowadzono na stanowisku hydraulicznym, wyposażonym w narzędzie nagniatające w postaci dwóch symetrycznie usytuowanych rolek o średnicy 60 mm i efektywnej szerokości styku z obrabianą powierzchnią równej 18 mm. Próbkę nagniatano z trzema różnymi wartościami siły, równymi odpowiednio: 1,6, 3,2 i 4,8 kN, tworząc w ten sposób trzy kolejne partie próbek. Pozostałe parametry miały następujące wartości: prędkość nagniatania - 100 m/min, posuw nagniatania - 0,08 mm/obr., liczba przejść narzędzia - 2. Obróbkę prowadzono stosując smarowanie mieszaniną oleju maszynowego oraz nafty w stosunku 1:1. Przeciwpróbki wykonano z trzech różnych materiałów: stali 45, mosiądzu MO59 i żeliwa ZI 300. Obróbka przeciwpróbek polegała na szlifowaniu ich największej powierzchni (o wymiarach 15 x 10 mm), aż do osiągnięcia żądanej chropowatości powierzchni $R_a = \text{ok. } 0,5 \mu\text{m}$. Powierzchnie te w badaniach tribologicznych współpracowały z cylindrycznymi powierzchniami próbek. Kształt i wymiary próbek oraz przeciwpróbek pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Kształt i wymiary próbki (a) i przeciwpróbki (b) stosowanych w badaniach odporności na zacieranie

Fig. 1. Shape and dimensions of specimen (a) and counter specimen (b) used in scuffing resistance test

Próbki stosowane do pośredniej oceny stanu energetycznego warstwy wierzchniej metodą spektroskopii elektronów Augera wykonano na bazie próbek wykorzystanych w badaniach odporności na zacieranie. Ich kształt i wymiary (rys. 2) ograniczone zostały wielkością komory próżniowej, do której wkładano je podczas prowadzenia eksperymentu.



Rys. 2. Kształt i wymiary próbek przeznaczonych do spektroskopii elektronów Augera

Fig. 2. Shape and dimensions of specimen assigned to Auger electron spectroscopy

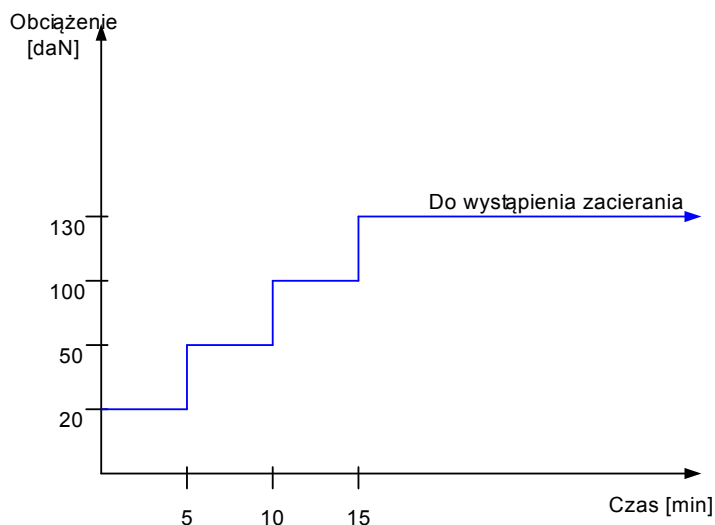
METODYKA BADAŃ

Do oceny stanu energetycznego warstwy wierzchniej zastosowano pośrednią metodę wykorzystującą spektroskopię elektronów Augera. Na potrzeby tej oceny opracowano następującą procedurę. Przygotowane próbki umieszcza się w komorze próżniowej poddając następnie trawieniu wiązką przyspieszonych jonów argonu. Podczas całego procesu trawienia analizie poddawane jest powstające widmo elektronów Augera, przez pomiar wysokości jego poszczególnych pików. Ustabilizowanie się wartości tej wielkości (brak zmian w trzech kolejnych pomiarach) świadczy o otrzymaniu powierzchni fizycznie czystej, z której usunięto wszelkie tlenki i różnego rodzaju zanieczyszczenia. Oceny stanu energetycznego powierzchni dokonuje się na podstawie pomiaru czasu trawienia potrzebnego do otrzymania czystej powierzchni. Im dłuższy ten czas, tym wyższy stan energetyczny objawiający się występowaniem grubszych warstwek tlenków i zanieczyszczeń. Do analizy metali żelaznych najlepiej nadaje się wyznaczenie widm trzech pierwiastków: tlenu, węgla oraz żelaza. Żelazo i węgiel stanowią główne składniki stopowe tych materiałów, natomiast tlen tworzy warstwę tlenków w strefie przypowierzchniowej warstwy wierzchniej.

Badania prowadzono na spektroskopie elektronów Augera francuskiej firmy Riber. Oczyszczone i wysuszone próbki umieszczano w specjalnej komorze próżniowej o ciśnieniu rzędu $1 \cdot 10^{-9}$ Tr. Stosowana do trawienia wiązka jonów argonu charakteryzowała się energią 1500 eV oraz natężeniem prądu emisji wynoszącym 50 μ A. Natomiast niezbędną do zdejmowania kolejnych widm elektronów Augera pierwotną wiązkę elektronów charakteryzowała energia 3 eV oraz natężenie prądu emisji 54 μ A. Dla tak dobranych parametrów wiązki jonów argonu szybkość trawienia wynosiła ok. 0,2 Å/s. Zdejmowanie kolejnych widm oraz pomiar wysokości pików analizowanych pierwiastków odbywało się co 10 min.

Do badań odporności na zacieranie adhezyjne zimne wykorzystano zmodernizowaną maszynę tarciovą Amsler A 135, wyposażoną w zespół napędowy składający się z przetwornicy częstotliwości Hitachi SJ 1000 oraz silnika klatkowego z wymuszonym chłodzeniem. Próby zacierania prowadzono w układzie krążek (próbka) - klocek (przeciwpróbka), których kształt i wymiary pokazano na rys. 1. W badaniach tych prędkość poślizgu między obracającą się próbką, a nieruchomą przeciwpróbką wynosiła 0,5 m/s. W eksperymencie zastosowano jednokropłowe smarowanie za pomocą dwóch środków smarowych: obojętnego w stosunku do powierzchni oleju

parafinowego oraz oleju z aktywnymi dodatkami przeciwtarciowymi - Tranself EP. Sposób obciążania pary trącej przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Procedura przykładania obciążenia w badaniach odporności na zacieranie

Fig. 3. Procedure of load application in the scuffing test

Koniec próby następował, kiedy zaobserwowano pierwsze symptomy procesu zacierania. Jako kryterium jego wystąpienia przyjęto wzrost i niestabilność momentu tarcia wraz z pojawieniem się śladów szczepiania na próbce. Dla każdego skojarzenia materiałów próbki i przeciwpróbki oraz zastosowanego środka smarowego wykonano pięć powtórzeń próby zacierania.

Podczas każdej z prób rejestrowano czas, temperaturę oraz moment tarcia do chwili wystąpienia zacierania. Na podstawie informacji na temat ostatniej z wymienionych wielkości obliczono pracę tarcia do chwili wystąpienia zacierania. Dodatkowo po zakończeniu każdej próby mierzono szerokość śladu zużycia na przeciwpróbce, co w połączeniu ze znajomością zastosowanego obciążenia pozwalało na obliczenie nacisków powierzchniowych pomiędzy próbką a przeciwpróbką w chwili wystąpienia zacierania.

Spośród wszystkich wymienionych wielkości, jako najistotniejszą uznano czas do wystąpienia zacierania, który dla jednokropłowego smarowania odpowiada sytuacji, w której następuje przerwanie smarowania węzła tarcia. Ta miara została wykorzystana do dalszej analizy odporności na zacieranie.

WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

Rezultaty pośredniej oceny stanu energetycznego warstwy wierzchniej otrzymane metodą spektroskopii elektronów Augera przedstawiono w tab. 1.

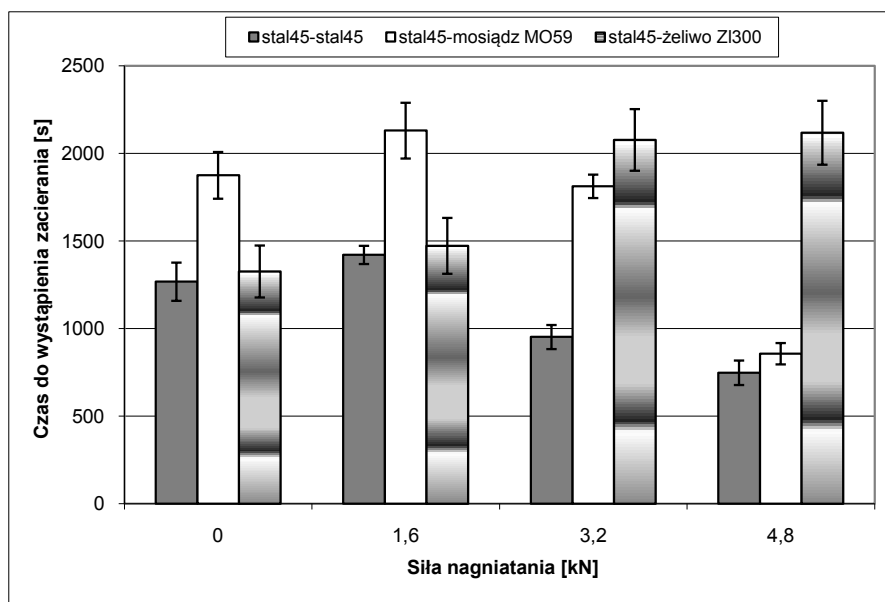
Jak widać z poniższej tabeli próbki szlifowane i nagniatane z najmniejszą siłą, tj. 1,6 kN wymagały krótszego czasu trawienia jonami argonu - ok. 100 min. - niezbędnego do uzyskania czystej powierzchni. Czas ten wzrasta dla próbek nagniatanych siłą 3,2 kN i osiąga wartość ok. 130 min. Dla próbek nagniatanych z siłą 4,8 kN czas trawienia wzrasta już bardzo wyraźnie, osiągając wartość ok. 200 min. Wytlumaczeniem takiego stanu rzeczy jest tutaj energia zgromadzona w warstwie wierzchniej analizowanych próbek. Dla największej siły nagniatania kumulacja energii powierzchniowej jest najwyższa, co w efekcie przekładać będzie się na największą grubość warstwek zalegających na powierzchni (zawierających wybrane do analizy pierwiastki).

Tab. 1. Czas trawienia jonami argonu do uzyskania fizycznie czystej powierzchni

Tab. 1. Argon ion etching time needed to obtain a physically pure surface

Rodzaj obróbki	Czas trawienia
Szlifowanie	100
Nagniatanie siłą 1,6 kN	100
Nagniatanie siłą 3,2 kN	130
Nagniatanie siłą 4,8 kN	200

Na rys. 4 zaprezentowano średnie wartości otrzymanych rezultatów prób zacierania wraz z odchyleniami standardowymi dla smarowania olejem parafinowym.



Rys. 4. Przebieg zmian czasu do wystąpienia zacierania skojarzeń smarowanych olejem parafinowym w zależności od siły nagniatania (0 - próbki szlifowane)

Fig. 4. Changes course of time to scuffing occurring in associations lubricated by paraffin oil in dependence on burnishing force (0 – grinded specimens)

Dla skojarzeń materiałowych: stal 45 - stal 45 i stal 45 - mosiądz MO59 smarowanych olejem parafinowym można zauważyć tę samą tendencję zmiany czasu do chwili wystąpienia zacierania w zależności od siły nagniatania. I tak, nagniatanie próbek z siłą równą 1,6 kN nie zmieniło ich odporności na zacieranie w stosunku do próbek szlifowanych. Jednak nagniatanie z większymi siłami, tj. 3,2 oraz 4,8 kN spowodowało skrócenie czasu do wystąpienia zacierania.

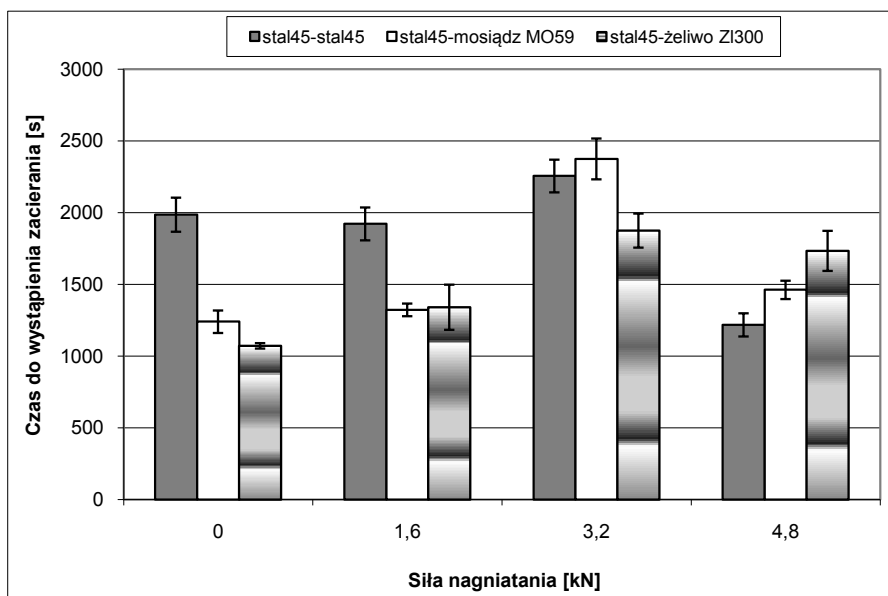
Dla pary trącej stal 45 - stal 45 nagniatanie z siłą 3,2 kN skraca już wyraźnie czas jej pracy w stosunku do próbek szlifowanych. Wzrost siły nagniatania do 4,8 kN dla tego samego skojarzenia skraca ten czas jeszcze wyraźniej. Nieco łagodniej zmiany te zachodzą dla skojarzenia stal 45 - mosiądz MO59. Nagniatanie z siłą 3,2 kN nie wpływa jeszcze negatywnie na odporność na zacieranie, jednak jej wzrost do wartości 4,8 kN obniża ją już bardzo wyraźnie. Ponieważ nagniatanie przyczynia się do poprawy zarówno parametrów profilu chropowatości jak i utwardzenia warstwy wierzchniej, a środek smarowy nie oddziałuje z powierzchnią, przyczyną takiego stanu rzeczy musi być podwyższenie stanu energetycznego. Jak potwierdzono eksperymentalnie metodą spektroskopii elektronów Augera, odkształcenia plastyczne towarzyszące nagniataniu powodują kumulację energii w warstwie wierzchniej, która to z kolei przyczynia się do łatwiejszego osiągnięcia i przekroczenia krytycznego progu energetycznego pozwalającego na tworzenie szepień adhezyjnych. Zjawisko to stanowi asumpt do inicjacji zużywania adhezyjnego i zacierania. Istotną sprawą będzie tu także wzajemne powinowactwo współpracujących metali. Zgodnie z założeniami omówionych hipotezy wzajemnej rozpuszczalności metali oraz hipotezy wiązań metalicznych najbardziej skłonne do wzajemnego szepiania są materiały jednoimienne. W ten sposób można tłumaczyć tak duży spadek odporności na zacieranie skojarzenia stal 45 - stal 45. Podobny, lecz nieco słabszy wpływ nagniatanie ma również na skojarzenie stal 45 - mosiądz MO59. Pomimo, że nie współpracują tutaj materiały jednoimienne, to według zbudowanej przez L.F. Coffina klasyfikacji par tarciovych uwzględniającej ich skłonność do szepiania zauważyć można, że do grupy pierwiastków wykazujących pełną zdolność do tworzenia wiązań metalicznych należy para: miedź (główny składnik mosiądzu) - żelazo (główny składnik stali). Zatem ta skłonność w połączeniu ze zwiększoną energią zakumulowaną w warstwie wierzchniej stali decydować będą o pogorszeniu odporności na zacieranie skojarzenia stalowo - mosiężnego.

Warto zwrócić uwagę również na fakt, że czas do wystąpienia zacierania skojarzenia stal 45 - mosiądz MO59, pomimo takiego samego charakteru przebiegu jest znacznie dłuższy niż dla skojarzenia stal 45 - stal 45. Może być to spowodowane rozkładem mosiądzu podczas tarcia ślizgowego takiego skojarzenia i wydzielaniem się z niego miedzi korzystnie oddziałującej na jego opory.

Czas do wystąpienia zacierania dla ostatniego ze skojarzeń smarowanych olejem parafinowym: stal 45 - żeliwo ZI 300 wskazuje zupełnie innych charakter. Podobnie jak dla poprzednio rozpatrywanych par nagniatanie z siłą 1,6 kN nie ma wpływu na czas do wystąpienia zacierania tego skojarzenia. Jednak dla większych sił nagniatania, równych 3,2 oraz 4,8 kN odporność ta wyraźnie wzrasta. W tym miejscu należałoby zastanowić się, jakie są powody zaistniałej sytuacji skoro ze względu na to, że oba materiały są stopami żelaza, ich wzajemna skłonność do szepiania powinna być wysoka. Fakt ten może być związany ze strukturą żeliwa, charakteryzującą się występowaniem równomiernie rozmieszczonego grafitu. W warunkach tarcia i w miarę postępującego zużywania następuje proces wydzielania grafitu z warstwy wierzchniej. Ów proces wydzielania grafitu jest zjawiskiem jak najbardziej korzystnym, gdyż w ten sposób powstaje swoiste „naturalne” smarowanie węzła tarcia, dodatkowo stabilizujące jego pracę. Dodatkową korzyścią jest fakt, że smarowanie grafitem odbywa się w sposób ciągły podczas zużywania warstwy wierzchniej.

Podwyższony stan energetyczny warstwy wierzchniej po nagniataniu może wpływać także na zwiększenie czasu do wystąpienia zacierania. W wyjaśnieniu tego faktu pomocna jest analiza rys. 5, na którym przedstawiono czas do wystąpienia zacierania badanych skojarzeń smarowanych olejem Tranself EP.

Z dalszych rozważań wyłączono skojarzenie stal 45 - żeliwo ZI 300, ponieważ czas do zacierania dla niego ma ten sam charakter jak dla smarowania olejem parafinowym, a więc i tutaj determinującym czynnikiem - decydującym o odporności na zacieranie - będzie wydzielający się podczas tarcia grafit.



Rys. 5. Przebieg zmian czasu do wystąpienia zacierania skojarzeń smarowanych olejem Tranself EP w zależności od siły nagniatania (0 - próbki szlifowane)

Fig. 5. Changes course of time to scuffing occurring in associations lubricated by Tranself EP oil in dependence on burnishing force (0 – grinded specimens)

Dla obu pozostałych skojarzeń tendencje zmian czasu, jako miary odporności na zacieranie są jednakowe. Nagniatanie z siłą równą 1,6 kN nie wpływa na zmianę odporności na zacieranie rozpatrywanych skojarzeń w stosunku do próbek szlifowanych. Jednak nagniatanie, ale z siłą równą 3,2 kN wpływa na wyraźną poprawę odporności na zacieranie obu par tarcia. Największa z zastosowanych sił nagniatania - równa 4,8 kN powoduje już jednak duży spadek czasu do wystąpienia zacierania, który dla skojarzenia stal 45 - stal 45 jest mniejszy nawet niż dla próbek szlifowanych. Główną przyczyną zmian jakie zaszły w odporności na zacieranie skojarzeń stal 45 - stal 45 oraz stal 45 - mosiądz MO59 smarowanych olejem Tranself EP w stosunku do smarowania olejem parafinowym należy upatrywać w aktywnych dodatkach zastosowanych w pierwszym z wymienionych środków smarowych. Dodatki typu EP w oleju miały postać związków fosforo-wo-siarkowych, które chemicznie reagują z trącymi się powierzchniami i utrudniają ich wzajemne szczypanie. Dodatki te komponowane są w taki sposób, aby uaktywniały się podczas pracy w wyjątkowo trudnych warunkach - przy dużych naciskach jednostkowych. Dużym naciskom towarzyszą duże odkształcenia plastyczne, które prowadzą do energetycznego uaktywnienia powierzchni i łatwiejszego wiązania z nią związków fosforo-wo-siarkowych. Prawdopodobnie ten sam mechanizm zachodzi na powierzchni aktywowanej na drodze obróbki nagniataniem. Przy użyciu stosunkowo dużej siły nagniatania - w tym przypadku równej 3,2 kN - osiągnięto odpowiedni poziom energii powierzchniowej pozwalającej na skuteczne reagowanie tak ukonstytuowanej

warstwy wierzchniej z dodatkami typu EP. Duży spadek odporności na zacieranie dla skojarzeń z próbką nagniataną siłą 4,8 kN można hipotetycznie wyjaśnić dominacją powstawania szczepień adhezyjnych nad powstawaniem warstwek reakcyjnych (granicznych) tworzonych przez dodatki EP na powierzchniach trących się elementów.

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

1. nagniatanie podwyższa stan energetyczny warstwy wierzchniej wraz ze wzrostem zastosowanych wartości siły nagniatania, co stwierdzono metodą pośrednią wykorzystującą spektroskopię elektronów Augera,
2. odporność na zacieranie adhezyjne zimne skojarzeń stal 45 - stal 45 oraz stal 45 - mosiądz MO59 z nagniatanym elementem stalowym,
 - malała dla większych wartości sił nagniatania, gdy skojarzenie było smarowane olejem parafinowym,
 - wzrastała (dla siły nagniatania 3,2 kN), gdy skojarzenie smarowano olejem Tranself EP,
 - odporność na zacieranie skojarzenia stal 45 - żeliwo ZI 300 zwiększała się wraz ze wzrostem siły nagniatania dla obu substancji smarujących.

Uwzględniając interpretację otrzymanych wyników można sformułować następujące wnioski:

1. kształtowanie się odporności na zacieranie adhezyjne skojarzeń stal 45 - stal 45 i stal 45 - mosiądz MO59 w zależności od rodzaju środka smarowego (olej parafinowy lub Tranself EP) można wyjaśnić stwierdzonym eksperymentalnie podwyższeniem stanu energetycznego warstwy wierzchniej,
2. opis stanu warstwy wierzchniej ukształtowanej nagniataniem naporowym, powinien uwzględniać - biorąc pod uwagę odporność na zacieranie - jej stan energetyczny,
3. sterowanie zmianami jakie nagniatanie naporowe wprowadza do warstwy wierzchniej, w tym przede wszystkim stanem energetycznym, pozwala na przygotowanie jej do współpracy z aktywnymi środkami smarowymi i tym sposobem na zwiększenie jej odporności na zacieranie adhezyjne zimne - co powinno stanowić kierunek dalszych badań.

LITERATURA

1. Nosal S.: Tribologiczne aspekty zacierania się węzłów ślizgowych, Rozprawy nr 328, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1998.
2. Hershberger J., Ajayi O.O., Bello Y.A., Fenske G.R.: Scuffing resistance after tribosynthesis of modified surface layer. Thin Solid Films vol. 469-470, 2004, s. 263-267.
3. Markov D., Kelly D.: Mechanism of adhesion-initiated catastrophic wear: pure sliding, Wear vol. 239, 2000, s. 189-210.
4. Kragelskij I.V., Ljubarskij I.M. i in.: Trienie i iznos v vakuumie, Mašinostroenie, Moskva, 1973.
5. Czichos H.: Tribology - a system approach to the science and technology of friction, lubrication and wear, Elsevier, Amsterdam, 1978.
6. Buckley D.: Surface effects in adhesion, friction, wear and lubrication, Elsevier, Amsterdam, 1981.
7. Semenov A.P.: Schvatyvanie metallov i metody ego predotvraščeniya pri trenii, Trienie i Iznos 2/1980, s. 236-246.

THE INFLUENCE OF ENERGY CONDITIONS OF SURFACE LAYER ON ADHESIVE SCUFFING RESISTANCE OF SELECTED ASSOCIATIONS

Summary. The influence of pressure burnishing on energy conditions of surface layer and its scuffing resistance was presented in this article. The energy conditions evaluation was achieved by Auger electron spectroscopy – on the basis of argon ion etching time measurement needed to obtain a physically pure surface. Scuffing resistance tests were made on the Amsler A135 frictional machine, for material associations: 45 steel-45 steel, 45 steel-MO59 brass, 45 steel-Zl 300 cast iron. It was found that the scuffing resistance decreased for steel and steel brass associations lubricated by paraffin oil in which the specimen was burnished by burnishing force of substantial value. In the case of lubrication of the same associations by oil with EP additives, the increase of scuffing resistance happened. For steel-cast iron association, burnishing led to scuffing resistance increase, independently of the lubricating medium type.

Key words: surface layer, energy conditions, adhesive scuffing, scuffing resistance, burnishing, Auger electron spectroscopy.