

Łukasz WOJCIECHOWSKI*, **Stanisław NOSAL***

ZMIANY SWOBODNEJ ENERGII POWIERZCHNIOWEJ A ODPORNOŚĆ NA ZACIERANIE METALI NIEŻELAZNYCH

CHANGES OF FREE SURFACE ENERGY AND SCUFFING RESISTANCE OF NON-FERROUS METAL

Słowa kluczowe:

warstwa wierzchnia, stan energetyczny, swobodna energia powierzchniowa, adhezja

Key-words:

surface layer, energy conditions, free surface energy, adhesion

Streszczenie

W artykule przedstawiono wpływ obróbki plastycznej na zimno na stan energetyczny warstwy wierzchniej aluminium i miedzi, oceniany za pomocą wyznaczania swobodnej energii powierzchniowej. Próbkę poddanej takiej metodzie obróbkowej badano także pod kątem odporności na zacieranie w skojarzeniu ze stalowymi przeciwpróbkami.

* Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań.

Eksperyment realizowano wykorzystując substancje smarujące o różnych mechanizmach oddziaływania powierzchniowego. Ustalono, że wzrost swobodnej energii powierzchniowej wpływa na spadek odporności na zacieranie dla skojarzeń smarowanych substancją nieaktywną powierzchniowo (olej parafinowy). Odporność ta wzrastała natomiast dla skojarzeń smarowanych substancjami z dodatkami chemicznie reagującymi z powierzchnią (szczególnie dwusiarczkiem dwubenzylu).

WPROWADZENIE

Badania prowadzone nad wpływem stanu warstwy wierzchniej na odporność na zacieranie [L. 1÷3] wskazują na konieczność uwzględnienia zmian energetycznych, jakie mogą zachodzić zarówno podczas konstituowania warstwy wierzchniej, jak i jej przechodzenia od stanu technologicznego do eksploatacyjnego. Realizacja niektórych p obróbkowych (np. obróbki plastycznej na zimno) warstwy wierzchniej prowadzi do akumulacji w niej energii, która może następnie przyczyniać się do implikacji i akceleracji takich zjawisk jak adsorpcja, dyfuzja czy też adhezja. Szczególnie zjawisko adhezji ma tutaj istotne znaczenie, ponieważ jego przebieg determinuje mechanizm zużywania i zacierania adhezyjnego.

Uwzględniając termodynamiczny i elektronowy opis warstwy wierzchniej można zdefiniować stan energetyczny warstwy wierzchniej jako ilościową charakterystykę jej potencjału termodynamicznego, będącego efektem poziomu energii, jaki zmagazynowany został w elementarnych składnikach jej struktury (atomach, cząsteczkach i łączących je wiązaniach) oraz wynikającego z ukształtowania jej sieci krystalicznej [L. 4].

W badaniach tribologicznych coraz większą uwagę zwraca się na energetyczne aspekty konstituowania warstwy wierzchniej, w których to upatruje się źródła implikacji wspomnianych już zjawisk oraz procesów. Konsekwencją takiego stanu rzeczy jest poszukiwanie optymalnego parametru charakteryzującego stan energetyczny warstwy wierzchniej, którego obserwacje i pomiary umożliwiłyby sterowanie własnościami tej warstwy pod kątem jej odporności na zużywanie. Wydaje się, że parametrem, który obecnie najlepiej nadaje się do tego celu, jest swobodna energia powierzchniowa. Wielkość ta określana jest co prawda bezpośrednio na powierzchni ciała stałego, ale jej wartość wynika m.in. ze struktury elektronowej warstwy wierzchniej – co pozwala na obserwację zmian jej stanu energetycznego. Stwierdzenie takie jest możliwe w oparciu o za-

leżność, jaką sformułował A.R. Miedema i jego współpracownicy, a która ustala związek pomiędzy swobodną energią powierzchniową a wielkościami charakterystycznymi dla struktury elektronowej, tj. gęstości elektronowej oraz pracy wyjścia elektronu z metalu [L. 5]:

$$\gamma_0^S = \frac{n_{ws}^{5/3}}{(\varphi^* - 0,6)^2} \quad (1)$$

gdzie:

γ_0^S – energia powierzchniowa metalu w OK, n_{ws} – gęstość elektronowa na granicy komórki Wignera-Seitza, φ^* – parametr w przybliżeniu równy pracy wyjścia elektronu z metalu – powiązany z jego elektroujemnością.

Wykorzystane w zależności (1) wielkości są charakterystyczne dla czystych metali i mają związek z wytrzymałością wiązań metalicznych. Kiedy dwa metale doprowadzi się do kontaktu, następuje przepływ elektronów z jednego metalu do drugiego z niższą energią Fermiego jako rezultatu podwójnej warstwy elektrycznej pojawiającej się na powierzchni międzyfazowej. Zakłóca to ciągłość powierzchni Fermiego między fazami, która może być zrekonstruowana tylko wtedy, gdy gęstość elektronowa na granicy odpowiadających sobie komórek Wignera-Seitza również będzie ciągła [L. 6].

Reasumując, interakcja pomiędzy metalami związana jest z różnicą pomiędzy ich pracą wyjścia elektronu oraz gęstością elektronową. W pracy [L. 5] udowodniono, że w warunkach próżni energia powierzchniowa metalu zależy tylko od tych dwóch czynników.

Współczesna nauka pozwala na ocenę stanu energetycznego warstwy wierzchniej także innymi metodami niż wyznaczanie swobodnej energii powierzchniowej. Wśród metod tych na szczególną uwagę zasługują te, które w sposób ilościowy umożliwiają charakterystykę energetyczną warstwy wierzchniej. Najciekawsze propozycje w tym aspekcie opierają się o następujące założenia:

- metoda dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych EBSD (ang. *electron back-scattered diffraction*), wykorzystywana pierwotnie do wyjaśniania mechanizmów zmian struktury krystalicznej stali poddanych obróbce plastycznej na zimno, a następnie poddanych procesom

rekrytalizacyjnym [L. 7]. W metodzie tej energia zakumulowana w warstwie wierzchniej szacowana jest na podstawie energii granicznej sąsiednich bloków jej ziaren oraz średnicy dyslokacji,

- metoda elementów skończonych [L. 8], stosowana do określania energii zakumulowanej w składnikach sieci krystalicznej metali odkształcanych plastycznie. W tym przypadku akumulowana podczas deformacji energia obliczana jest w oparciu o wyznaczenie w każdym elemencie wartości naprężeń stycznych. Do wyznaczenia tej wartości konieczna była znajomość m.in. gęstości dyslokacji, modułu Kirchhoffa oraz wartości bezwzględnej wektora Burgera,
- metoda pomiaru zdolności magazynowania energii [L. 9], której autorzy do określania energii akumulowanej w warstwie wierzchniej wskutek odkształcenia plastycznego wykorzystywali statyczną próbę rozciągania. Podczas prowadzenia próby mierzono odkształcenie i siłę rozciągania w funkcji czasu (na tej podstawie obliczano energię dostarczoną do próbki) oraz rejestrowano zmiany pola temperatur w badanej części próbki. Na podstawie zebranych informacji obliczano wartość energii zakumulowanej w próbce w oparciu o zaproponowaną procedurę obliczeniową;
- metoda promieniowania rentgenowskiego [L. 10], zastosowana do szacowania energii zakumulowanej w warstwie wierzchniej metali odkształcanych plastycznie. Procedurę obliczania energii zakumulowanej w strukturze oparto na tzw. regule Stibitza, korelującej jej wartość ze względną zmianą stałej sieciowej siatki krystalicznej (zależną m.in. od modułu Younga, liczby Poissona i kąta Bragga),
- metoda dyfrakcji wiązki neutronów [L. 11], oparta także na regule Stibitza i tych samych procedurach obliczeniowych co w przypadku metody promieniowania rentgenowskiego.

Analiza powyższych metod skłania do refleksji nad aspektem możliwości realizacyjnych wyznaczania energii zakumulowanej w warstwie wierzchniej zgodnie z przedstawionymi założeniami. Propozycje te odznaczają się stosunkowo skomplikowaną metodyką oraz wymagają zaawansowanej i kosztownej aparatury, przez co ich wykorzystanie ogranicza się przede wszystkim do działalności naukowej. W praktyce inżynierskiej zdecydowanie większe zastosowanie znajduje łatwiej wyznaczalna, swobodna energia powierzchniowa.

Wyznaczanie swobodnej energii powierzchniowej zostało wykorzystane także w prezentowanej pracy, której celem była ocena stanu energe-

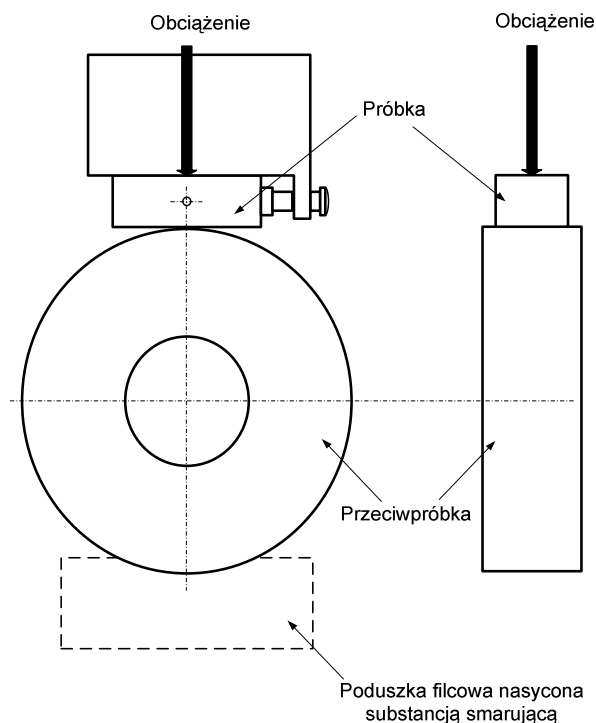
tycznego warstwy wierzchniej aluminium PA2 i miedzi M3 po zgniocie powierzchniowym oraz jego wpływu na odporność na zacieranie.

PRZYGOTOWANIE PRÓBEK I METODYKA BADAŃ

Do badań wykorzystano próbki wykonane z materiałów przeznaczonych do obróbki plastycznej: aluminium PA2 i miedzi M3, dla których stopnie zgniotu dobrano na podstawie wykresów umocnienia. Materiał wyjściowy nie był poddany obróbce plastycznej, a zastosowane stopnie zgniotu dla aluminium odpowiadały w przybliżeniu połowie odcinka proporcjonalnego wzrostu umocnienia (ok. 20%) oraz w pobliżu „nasycenia” zgniotem (ok. 40%). W przypadku miedzi zastosowano trzy stopnie zgniotu: 15%, 30% i 45%. Próbki poddawano zgniotowi na prasie o dużym nacisku, po czym – celem nadania im jednakowej chropowatości, szlifowano je ręcznie papierem ściernym o ziarnistości 500.

Swobodną energię powierzchniową wyznaczano na podstawie pomiarów kąta zwilżania na powierzchni próbek. Do tego celu zastosowano goniometr PG3 firmy Fibro System AB, w którym próbki umieszczano po uprzednim czyszczeniu w acetonie i suszeniu. Na powierzchni tak przygotowanych próbek osadzano krople wody o specjalnej czystości i objętości 2 μ l. Krople osadzono metodą tzw. kropli uwolnionej, polegającą na tym, że jest ona uwalniana z aplikatora natychmiast po tym, jak nastąpi kontakt z podłożem. Kąt zwilżania pomiędzy powierzchnią próbki a płaszczyzną styczną do powierzchni kropli mierzono po ustaleniu warunków równowagi. Za stan równowagi przyjmowano warunki, w których wartość kąta zwilżania stabilizowała się (tj. przestawała zmniejszać się w wyniku rozplywu kropli po powierzchni). Procedurę pomiaru kąta zwilżania powtarzano 10-krotnie, po czym dla uzyskanej wartości średniej wyznaczano (za pomocą oprogramowania goniometru opartego o metodę zawartą w normie ASTM D5946) swobodną energię powierzchniową. Dla każdego rodzaju próbek wykonano 12 powtórzeń wyznaczania wartości swobodnej energii powierzchniowej.

Próby odporności na zacieranie przeprowadzono na maszynie tarciowej Amsler A135, a charakterystyczną dla niej geometrię pary trącej pokazano na **Rys. 1**.



Rys. 1. Geometria pary trącej wykorzystanej w próbie odporności na zacieranie na maszynie tarcowej Amsler A135

Fig. 1. Geometry of friction pair used in scuffing test performed on the friction machine Amsler A135

Przeciwpróbki zastosowane w próbie wykonano ze stali 45 i poddano hartowaniu w oleju i odpuszczaniu – w efekcie uzyskano twardość 45 ± 2 HRC.

Badania realizowano przy prędkości ślizgowej $v = 0,4$ m/s, oraz obciążeniu przykładanym według procedury polegającej na stopniowym zwiększaniu siły docisku próbki do przeciwpróbki. Przez pierwsze 5 minut trwania próby siła docisku wynosiła 20 daN. Następnie co 1,5 minuty zwiększano tę siłę o 10 daN, aż do osiągnięcia wartości 200 daN, po czym przerywano smarowanie (czyli łącznie po 32 minutach).

Parę trącą smarowano za pomocą poduszki filcowej nasączonej substancją smarującą. Do każdej próby stosowano nową poduszkę filcową. Substancje smarujące dobrano uwzględniając mechanizm ich oddziaływania z powierzchnią metalu podczas tarcia. W związku z tym do smarowania zastosowano:

- olej parafinowy jako substancję nieaktywną, oddziałującą jedynie swoją lepkością,
- 0,05-molowy roztwór alkoholu n-cetylowego w oleju parafinowym jako substancji zdolnej do adsorpcji fizycznej na smarowanej powierzchni,
- 0,05-molowy roztwór dwusiarczku dibenzylu (substancja zdolna do chemisorpcji oraz tworzenia polimerycznych starzenia) w oleju parafinowym,
- 0,05-molowy roztwór siarki elementarnej, zdolnej do reakcji chemicznej, w oleju parafinowym.

Koniec próby zacierania następował, kiedy zaobserwowano pierwsze symptomy procesu zacierania. Jako kryterium jego wystąpienia przyjęto nagły wzrost i niestabilność momentu tarcia wraz z pojawieniem się śladów szepiania na próbce. Jeżeli inicjacja zacierania nie nastąpiła przed przyłożeniem największego obciążenia, tj. 200 daN, przerywano smarowanie prowadząc próbę do chwili jego wystąpienia.

Zastosowano dwie miary odporności na zacieranie: czas mierzony od początku próby do momentu jego wystąpienia oraz nacisk jednostkowy odpowiadający początkowi zacierania. W niektórych przypadkach wartości tych miar nie były zgodne, tj. najkrótszemu czasowi do wystąpienia zacierania nie zawsze odpowiadał najmniejszy nacisk. Uwzględniając ten fakt wprowadzono uogólniony wskaźnik odporności na zacieranie W_{OZ} , będący iloczynem czasu do wystąpienia zacierania i odpowiadającego mu nacisku powierzchniowego. Wskaźnik W_{OZ} wykorzystano do oceny odporności na zacieranie.

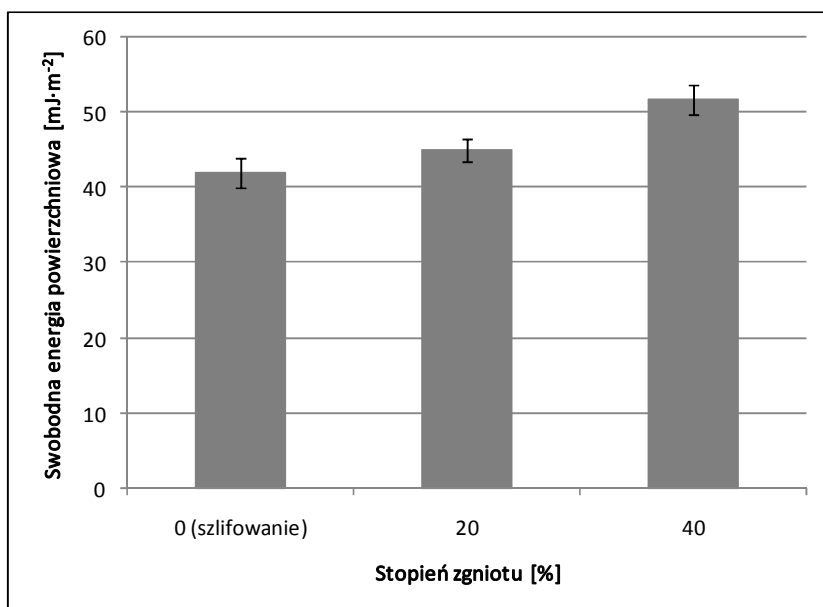
Dla każdej kombinacji zastosowanych substancji smarujących i stopni zgniotu wykonywano trzy próby odporności na zacieranie. Jako punkt odniesienia w stosunku do próbek zgniatanych stosowano próbki szlifowane, niepoddawane obróbce plastycznej na zimno.

WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

Na **Rys. 2** zestawiono wartości wyznaczonych według omówionej wcześniej procedury, średnich wielkości swobodnej energii powierzchniowej dla poszczególnych rodzajów próbek z aluminium PA2. Dla każdej z nich obliczono przedziały ufności wartości średniej dla przyjętego poziomu istotności równego 0,1.

Rys. 2 obrazuje wyraźny wzrost swobodnej energii powierzchniowej, jaki charakteryzuje próbki zgniatane w stosunku do próbek szlifowanych. Jest on szczególnie widoczny przy porównaniu wartości swobodnej energii powierzchniowej dla próbek szlifowanych i poddanych maksymalnemu, przyjętemu zgniotowi (tj. 40%). Różnica, jaka charakteryzuje wartości średnie dla obu tych metod obróbkowych, wynosi ok. $10 \text{ mJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (dla próbek szlifowanych średnia wartość swobodnej energii powierzchniowej wynosiła $41,98 \text{ mJ}\cdot\text{m}^{-2}$, a dla próbek poddanych 40% zgniotowi – $51,73 \text{ mJ}\cdot\text{m}^{-2}$).

Na **Rys. 3** zestawiono wartości wyznaczonych, według procedury takiej jak dla aluminium PA2, średnich wielkości swobodnej energii powierzchniowej dla poszczególnych rodzajów próbek z miedzi M3.

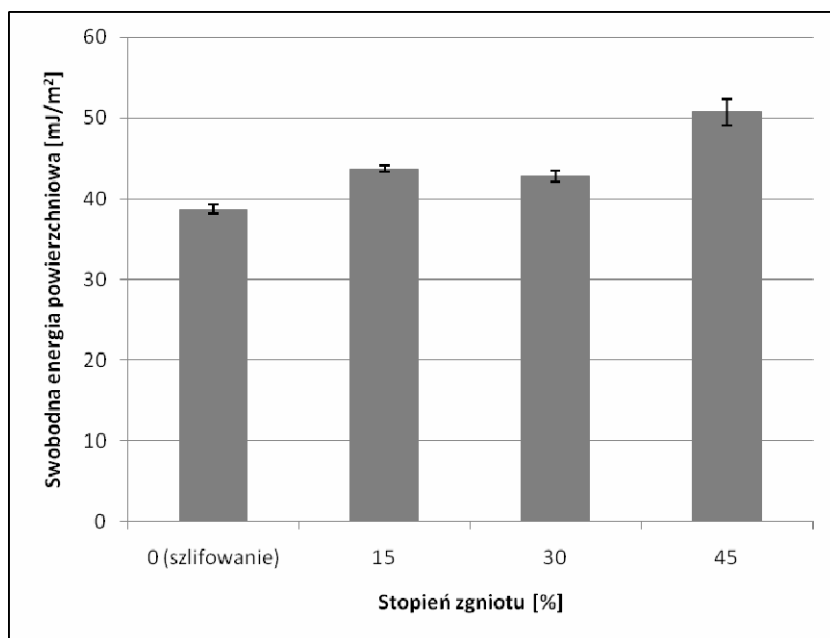


Rys. 2. Średnie wielkości swobodnej energii powierzchniowej aluminium PA2 w zależności od zastosowanej metody obróbki

Fig. 2. Mean values of free surface energy of PA2 aluminum in depending on used treatment method

W tym przypadku także można zaobserwować wzrost wielkości swobodnej energii powierzchniowej wskutek zgniotu. Największa różnica wartości charakteryzuje próbki szlifowane i poddane największemu zgniotowi. Różnica ta kształtuje się na poziomie $12,10 \text{ mJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (dla pró-

bek szlifowanych średnia wartość swobodnej energii powierzchniowej wynosiła $38,68 \text{ mJ}\cdot\text{m}^{-2}$, a dla próbek poddanych 45% zgniotowi – $50,71 \text{ mJ}\cdot\text{m}^{-2}$). Warto zauważyć także, że pomiędzy próbkami poddanymi zgniotowi 15% i 30% nie ma istotnych różnic w przyroście wielkości swobodnej energii powierzchniowej. Wskazuje to na skokowy charakter zmian, jaki charakteryzuje zmiany swobodnej energii powierzchniowej miedzi.



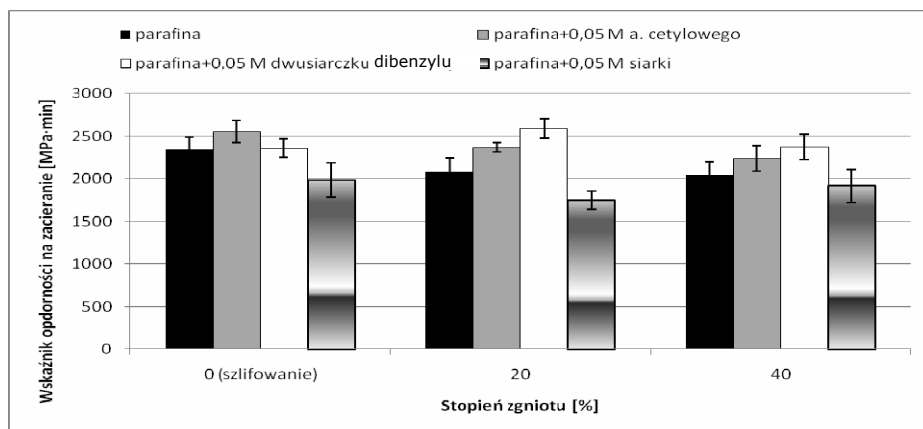
Rys. 3. Średnie wielkości swobodnej energii powierzchniowej miedzi M3 w zależności od zastosowanej metody obróbki

Fig. 3. Mean values of free surface energy of M3copper in depending on used treatment method

Na **Rys. 4** zaprezentowano zależność uogólnionego wskaźnika odporności na zacieranie aluminium PA2 od stopnia zgniotu oraz zastosowanej substancji smarującej.

Analiza zaprezentowanych na **Rys. 4** wyników wskazuje na pewne tendencje zarysowujące się w zależności od kombinacji rodzaju obróbki próbek i substancji smarującej. W przypadku smarowania skojarzenia substancją smarującą nieoddziałującą chemicznie z powierzchnią (olej parafinowy, 0,05-molowy roztwór alkoholu n-cetylowego w oleju parafi-

nowym) zauważyć można spadek odporności na zacieranie dla próbek poddanych zgniotowi powierzchniowemu. Fakt ten jest spowodowany prawdopodobnie wzrostem stanu energetycznego warstwy wierzchniej wskutek obróbki plastycznej na zimno (co pokazano na **Rys. 2**). Przekłada się to na szybsze osiągnięcie przez warstwy wierzchnie badanych materiałów energetycznego progu szepiania, co implikuje powstawanie szepień adhezyjnych a w konsekwencji zacieranie.



Rys. 4. Zależność wskaźnika odporności na zacieranie aluminium PA2 od stopnia zgniotu i rodzaju substancji smarującej

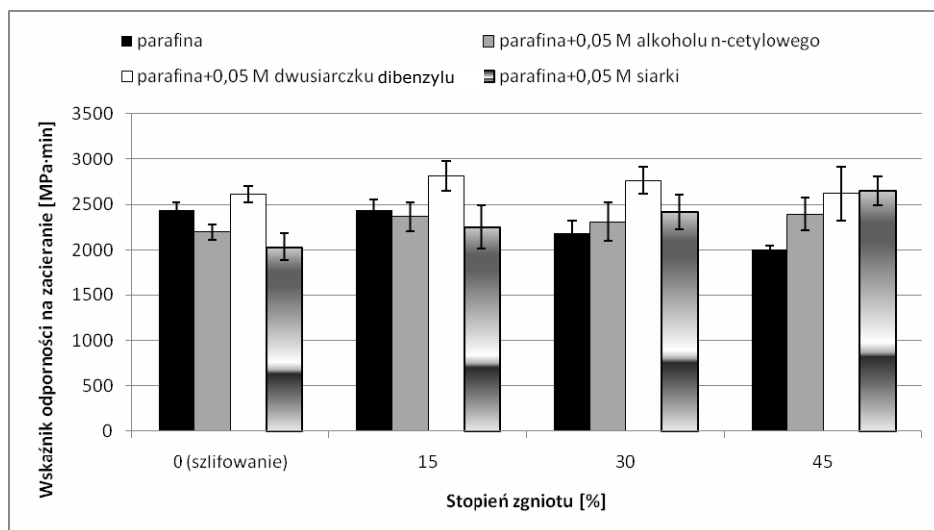
Fig. 4. Dependence of scuffing resistance index of PA2 aluminum on cold work degree and type of lubricating medium

Nieco inaczej układa się odporność na zacieranie skojarzeń smarowanych substancjami czynnymi chemicznie w stosunku do współpracujących powierzchni. W przypadku skojarzenia smarowanego 0,05-molowym roztworem dwusiarczku dibenzylu w oleju parafinowym zauważalny jest niewielki wzrost odporności na zacieranie dla próbek o zgnioście 20% i brak pogorszenia tej odporności (w stosunku do próbek szlifowanych) dla próbek o zgnioście 40%. W tym przypadku podwyższony stan energetyczny wykorzystywany jest jako akcelerator reakcji chemicznej pomiędzy pobudzoną energetycznie powierzchnią a aktywnymi składnikami substancji smarującej. Prowadzi to do szybszego powstawania warstewek granicznych zabezpieczających powierzchnię przed powstawaniem szepień adhezyjnych. Dopiero przy największym z zastosowanych stopni zgniotu zaobserwować można, że odporność na zacieranie kształtuje się na poziomie próbek szlifowanych. Wskazuje to na taką sytuację,

w której powstawanie szczepień zaczyna odgrywać dominującą rolę w styku tarciovym, nie pozwalając na odbudowę warstewek granicznych. Zastosowanie jeszcze większego zgniotu prawdopodobnie prowadziłyby do wyraźnego spadku odporności na zacieranie.

Na **Rys. 5** zaprezentowano zależność uogólnionego wskaźnika odporności na zacieranie miedzi M3 od stopnia zgniotu oraz zastosowanej substancji smarującej.

Analiza zaprezentowanych na **Rys. 5** wyników pozwala zaobserwować nieco inne tendencje jak w przypadku próby odporności na zacieranie aluminium PA2 przy smarowaniu olejem parafinowym. Odporność na zacieranie kształtuje się na podobnym poziomie dla próbek szlifowanych (2440 MPa·min) i poddanych najmniejszemu zgniotowi – 15% (2442 MPa·min). Dopiero wzrost stopnia zgniotu spowodował wyraźny spadek odporności na zacieranie (2003 MPa·min – dla zgniotu 45%). W przypadku smarowania zdolnym do adsorpcji fizycznej roztworem alkoholu n-cetylowego w parafinie stwierdzono niewielki (rzędu 100 MPa·min) wzrost odporności na zacieranie próbek zgniatanych. Interesującym jest fakt, że odporność ta utrzymywała się na podobnym poziomie bez względu na stopień zgniotu.



Rys. 5. Zależność wskaźnika odporności na zacieranie miedzi M3 od stopnia zgniotu i rodzaju substancji smarującej

Fig. 5. Dependence of scuffing resistance index of M3 copper on cold work degree and type of lubricating medium

Smarowanie dwoma zastosowanymi substancjami reagującymi chemicznie z powierzchnią wskazuje na nieco odmienną tendencję, jaką kształtuje się optymalna dla nich odporność na zacieranie. W przypadku zastosowania oleju parafinowego z dodatkiem dwusiarczku dibenzylu odporność na zacieranie wzrastała dla próbek poddanych zgmiotowi i kształtowała się na podobnym poziomie dla wszystkich jego stopni (optymalnie ok. 2800 MPa·min dla zgmiotu 15 i 30%). Z kolei w sytuacji smarowania olejem parafinowym z dodatkiem siarki elementarnej obserwuje się wzrost odporności na zacieranie wraz ze wzrostem stopnia zgmiotu. Dla próbek szlifowanych wartość wskaźnika odporności na zacieranie wynosiła 2030 MPa·min i wzrosła do wartości 2644 MPa·min dla zgmiotu 45% (wzrost odporności na zacieranie wyniósł zatem ok. 600 MPa·min). W obu przypadkach poprawa odporności na zacieranie może być wiązana z podwyższeniem stanu energetycznego, co zaprezentowano wcześniej na **Rys. 3**. Podobne założenie można sformułować dla przypadku smarowania skojarzenia olejem parafinowym, kiedy to wzrost stopnia zgmiotu przekładał się na spadek odporności na zacieranie. Podwyższony stan energetyczny jest tutaj prawdopodobnie odpowiedzialny za akcelerację sczepiania adhezyjnego, które bezpośrednio wiąże się z procesem zacierania.

PODSUMOWANIE

Otrzymane wyniki badań upoważniają do sformułowania, że podwyższenie stanu energetycznego warstwy wierzchniej może przekładać się na odporność na zacieranie. Wniosek taki dotyczy zwłaszcza skojarzenia, do smarowania którego zastosowano substancję smarującą nieoddziałującą z powierzchnią (olej parafinowy). Podwyższenie stanu energetycznego warstwy wierzchniej wskutek obróbki plastycznej na zimno (w tym przypadku zgmiotu powierzchniowego) powoduje prawdopodobny wzrost aktywności elementów jej struktury atomowej i tym sposobem staje się akceleratorem różnych procesów, w tym m.in. adhezji. W efekcie przyspieszony zostaje proces powstawania szczepień adhezyjnych, co ma z kolei bezpośrednie przełożenie na intensywność zużywania adhezyjnego warstwy wierzchniej i jego patologicznej postaci – zacierania.

Energetyczną aktywację warstwy wierzchniej można jednak wykorzystać do zwiększenia odporności na zacieranie. W tym celu skojarzenie musi być smarowane aktywną chemicznie substancją smarującą, która

wykorzysta pobudzenie energetyczne powierzchni do przyspieszenia kształtowania się warstewek granicznych (powstających w wyniku reakcji dodatków przeciwzatarciowych smarowanej powierzchni). W prezentowanej pracy efekt ten był szczególnie widoczny dla smarowania olejem z dodatkiem dwusiarczku dwubenzylu.

Podsumowując przeprowadzony eksperyment należy stwierdzić, że może on stanowić punkt wyjścia dla znacznie większego projektu badawczego korelującego wpływ stanu energetycznego warstwy wierzchniej z jej odpornością na zużycie i zacieranie adhezyjne. Badania takie byłyby szczególnie istotne dla materiałów jednoimiennych (np. stalowych), których podatność na szczepianie adhezyjne jest znacznie wyższa niż w przypadku skojarzeń różnoimiennych.

LITERATURA

1. Wojciechowski Ł., Nosal S.: Wpływ nagniatania naporowego na odporność na zacieranie, *Tribologia*, nr 3/2007, s. 411÷420.
2. Wojciechowski Ł., Pawełczyk K.: Kształtowanie warstwy wierzchniej o podwyższonej odporności na zacieranie, *Inżynieria Materiałowa*, nr 6/2008, s. 1058÷1063.
3. Wojciechowski Ł., Nosal S.: The preparation of surface layer of non-alloyed steel to cooperation with lubricating medium, *Journal of KONES*, nr 1/2009, s. 523÷532.
4. Wojciechowski Ł.: Rozważania nad wykorzystaniem swobodnej energii powierzchniowej do charakterystyki stanu energetycznego warstwy wierzchniej, *Tribologia* nr 1/2009, s. 177÷197.
5. Miedema A.R.: Surface energies of solid metals, *Zeitschrift für Metallkunde*, vol. 69, 1978, p. 287–292.
6. Li Y., Li D.Y.: Electron work function, adhesion and friction between 3d transition metals under light loads, *Wear*, vol. 259, 2005, p. 1432–1436.
7. Choi S.H., Jin Y.S.: Evaluation of stored energy in cold-rolled steels from EBSD data, *Materials Science & Engineering*, A371, 2004, s. 149–159.
8. Choi S.H.: Simulation of stored energy and orientation gradients in cold-rolled interstitial free steels, *Acta Materialia*, vol. 51, 2003, s. 1775–1788.
9. Gadaj S.P., Kaczmarek J., Ollifieruk W.: Proces magazynowania energii podczas rozciągania metalu, *Prace IPPT PAN* nr 28, 1983, s. 3–13.
10. Borbely A., Driver J.H., Ungar T.: An X-ray method for the determination of stored energies in texture components of deformed metals. Application to cold worked ultra high purity iron, *Acta Materialia*, vol. 48, 2000, s. 2005–2016.

11. Rajmohan N., Hayakawa Y., Szpunar J.A., Root J.H.: Neutron diffraction method for stored energy measurement in interstitial free steel, *Acta Materialia*, vol. 45, 1997, s. 2485–2494.

Recenzent:
Jacek PRZEPIÓRKA

Summary

The influence of cold working on energy conditions (evaluating by free surface energy) of aluminium and copper surface layers are presented in this article. Specimens, put to this kind of treatment, were tested also from the scuffing resistance point-of-view in association with steel counter-specimens. Research was realised with the utilisation of lubricating mediums with different mechanism of surface reaction. It was established that an increase of free surface energy influences the decrease of scuffing resistance for lubricating by surface inactive medium. This resistance was increased for associations lubricated by medium with surface active additives (especially for dibenzyl disulphide).