

Łukasz WOJCIECHOWSKI*

**WYKORZYSTANIE PRACY ADHEZJI
I SKŁADOWYCH SWOBODNEJ ENERGII
POWIERZCHNIOWEJ DO TRIBOLOGICZNEJ
ANALIZY STANU WARSTWY WIERZCHNIEJ**

**THE WORK OF ADHESION AND FREE SURFACE ENERGY
COMPONENT UTILIZATION IN TRIBOLOGICAL ANALYSIS
OF SURFACE LAYER CONDITIONS**

Słowa kluczowe:

warstwa wierzchnia, stan energetyczny, swobodna energia powierzchniowa, praca adhezji

Key words:

surface layer, energy conditions, free surface energy, work of adhesion

Streszczenie

W pracy przedstawiono tribologiczne aspekty wykorzystania stanu energetycznego warstwy wierzchniej do opisu właściwości systemu tribo-

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

logicznego. Dla przykładu dokonano oceny stanu energetycznego warstwy wierzchniej stali 42CrMo4 po nagniataniu. Oceny tej dokonano w oparciu o wartości swobodnej energii powierzchniowej i jej składowych wyznaczonych metodą kwasowo-zasadową. Dodatkowo obliczono pracę adhezji w układzie stal 42CrMo4–olej parafinowy oraz zmierzono zwilżalność nim powierzchni badanej stali. Otrzymane wyniki skomentowano w kontekście mechanizmów odpowiedzialnych za zużywanie i zacieranie adhezyjne.

WPROWADZENIE

Zjawisko adhezji odgrywa ogromną rolę w wielu dziedzinach współczesnej nauki, w tym także w tribologii i w wielu pokrewnych jej obszarach wiedzy obejmujących np. inżynierię powierzchni czy też zagadnienia fizykochemii ciała stałego. Rola ta może mieć jednak zarówno pozytywny, jak i negatywny charakter – w zależności od tego jak wpływa na elementy systemu tribologicznego, w którym występuje. Z jednej strony występowanie adhezji jest bardzo pożądane przy wykonywaniu różnych rodzajów powłok lub stosowaniu środków smarowych (szczególnie smarów plastycznych) na powierzchniach metalicznych. Z drugiej strony może być też czynnikiem implikującym powstawanie szczepień adhezyjnych w skojarzeniach tarciovych, czego konsekwencją będzie rozwój zużywania adhezyjnego z jej najbardziej niebezpieczną postacią – zacierania.

W literaturze występuje znaczna ilość definicji określających istotę zjawiska adhezji. Kompleksowej syntezy na ten temat dokonali Autorzy pracy [L. 1], której konkluzją jest określenie adhezji jako zjawiska powierzchniowego polegającego na nawiązywaniu oddziaływania między atomami (cząsteczkami) dwóch różnych, stykających się ze sobą ciał. Zgodnie z tą definicją, efektem adhezji nie muszą być (choć mogą) istotne zmiany na powierzchniach stykających się ciał. Z tribologicznego punktu widzenia jest to dość wygodne spojrzenie, wykorzystywane chociażby przy charakterystyce zużywania i zacierania adhezyjnego.

Siła powstających szczepień adhezyjnych może być określana na dwa sposoby: przez bezpośredni pomiar siły adhezji lub pośrednio przez obliczenie tzw. pracy adhezji. W makroskopowym ujęciu granicy międzyfazowej rozdzielenie dwóch niemieszających się ze sobą faz wymaga określonego nakładu energii, która jest równa właśnie pracy adhezji. Praca ta jest potrzebna do rozdzielenia jednostki powierzchni jednofazowej

i utworzenia dwóch nowych powierzchni. Można zatem uznać, że wartość samej pracy adhezji jest miarą oddziaływań międzycząsteczkowych między fazami różnych substancji [L. 2]. Przykładowo w prostym układzie, w którym w warunkach atmosferycznych ciecz przywiera do powierzchni ciała stałego, praca adhezji definiowana jest jako [L. 3]:

$$W_a = \gamma_s + \gamma_L - \gamma_{SL} \quad (1)$$

gdzie:

γ_s – napięcie powierzchniowe ciała stałego, γ_L – napięcie powierzchniowe cieczy, γ_{SL} – napięcie międzyfazowe na granicy ciała stałego i cieczy.

W przypadku kiedy na powierzchni ciała stałego tworzy się kropla cieczy, należy uznać, że jej zwilżanie jest niecałkowite. Zjawisko to opisuje się za pomocą kąta zwilżania, wykorzystując tzw. równanie Younga [L. 3]:

$$\gamma_s \cos \Theta = \gamma_L - \gamma_{SL} \quad (2)$$

gdzie:

Θ – kąt zwilżania.

Podstawiając równanie Younga do zależności na obliczenie pracy adhezji, otrzyma się bardziej użyteczną zależność do obliczenia tej wielkości, zwaną równaniem Younga-Dupré [L. 3]:

$$W_a = \gamma_L(1 + \cos \Theta) \quad (3)$$

Dokładny opis napięcia międzyfazowego wymaga podejścia do napięcia powierzchni ciała stałego (czyli de facto swobodnej energii powierzchniowej) jako sumy składowych pochodzących od sił dyspersyjnych oraz polarnych. Za podejście, które najlepiej odzwierciedla chemiczny aspekt tego zagadnienia, przyjmuje się zwykle metodę van Ossa i jego współpracowników, którzy w swojej pracy [L. 4] zasugerowali, że charakterystyki części polarnej najlepiej dokonać w oparciu o teorię kwasów i zasad Lewisa. Składowa dyspersyjna natomiast charakteryzowana jest na podstawie oddziaływań Lifshitz, które stanowią część oddziały-

wań międzycząsteczkowych van der Waalsa (stąd oddziaływania Lifshitz- van der Waalsa w terminologii Autorów). Zgodnie z tymi założeniami i przy wykorzystaniu wzorów (1) i (3), równanie Younga-Dupré zapisuje się zwykle do następującej postaci:

$$\gamma_L (1 + \cos \Theta) = 2(\gamma_L^{LW} \gamma_S^{LW})^{1/2} + 2(\gamma_L^B \gamma_S^A)^{1/2} + 2(\gamma_L^A \gamma_S^B)^{1/2} \quad (4)$$

gdzie: indeks „LW” oznacza składową Lifshitz- van der Waalsa, indeks „A” oznacza część kwasową składowej polarnej, indeks „B” oznacza część zasadową składowej polarnej.

W tym miejscu należy zaznaczyć, że wyznaczanie swobodnej energii powierzchniowej zarówno metodą van Ossa, jak i innymi metodami opartymi na pomiarze kąta zwilżania (np. Owensa-Wendta) nie pozwala wyznaczyć całkowitej wartości swobodnej energii powierzchniowej metali. Metody te jednak można zastosować do oszacowania składowych dyspersyjnych oraz polarnych, które pozwalają na stosunkowo szczegółową analizę oddziaływań międzyfazowych oraz identyfikację zmian, jakie mogą zachodzić w warstwie wierzchniej na poziomie technologicznym oraz eksploatacyjnym. W literaturze przedmiotu znaleźć można co najmniej kilka przykładów takiego podejścia do zagadnienia analizy energii powierzchniowej metali (np. [L. 5, 6]).

Oddziaływania międzyfazowe mają ogromne znaczenie dla współczesnej tribologii, co przekłada się na dwa podstawowe aspekty: wyjaśnienia mechanizmów niektórych form zużywania tribologicznego oraz współpracy warstwy wierzchniej z substancją smarującą. Międzyfazowa natura mechanizmu zużywania tribologicznego ma szczególne znaczenie dla zużywania adhezyjnego, które może ewoluować do swojej szczególnie niebezpiecznej i patologicznej postaci – zacierania. Taka postać zużywania adhezyjnego odznacza się zwykle niestabilnymi warunkami tarcia i gwałtownym wzrostem intensywności zużywania, co prowadzi do nagłego, awaryjnego unieruchomienia węzła tarcowego. Jak wykazały wcześniejsze prace badawcze Autora (np. [L. 7, 8]), podwyższenie stanu energetycznego warstwy wierzchniej przekłada się bezpośrednio na spadek odporności na zacieranie adhezyjne w przypadku smarowania skojarzenia środkami smarowymi niereagującymi powierzchniowo. Fakt ten wynika z tego, że energia akumulowana w warstwie wierzchniej wskutek obróbki lub eksploatacji jest prawdopodobnym akceleratorem zjawiska

adhezji i przyczynia się do intensyfikacji powstawania szczepień adhezyjnych. Potwierdzeniem tego może być tzw. hipoteza energetyczna powstawania szczepień [L. 9], która wprost mówi o tym, że aby rozpoczął się proces szczepiania, musi zostać osiągnięty energetyczny próg szczepiania (innymi słowy na powierzchni metalu musi zgromadzić się odpowiednio duża „porcja” energii, aby rozpoczęło się szczepianie). Podwyższenie stanu energetycznego można jednak wykorzystać także do poprawy odporności na zacieranie. W cytowanych już wcześniej pracach Autora stwierdzono, że jeżeli do smarowania skojarzenia zastosowano środek smarowy z dodatkami EP, które wchodziły w reakcję chemiczną z powierzchnią metalu, to odporność na zacieranie w istotny sposób zwiększała się.

W świetle przedstawionych informacji wydaje się, że tribologiczna analiza warstwy wierzchniej, obok standardowo wykonywanych badań (dotyczących zwykle chropowatości, twardości, stanu naprężeń oraz struktury krystalograficznej) powinna uwzględniać także jej stan energetyczny.

W związku z powyższym wygenerowano cel pracy, którym była ocena stanu energetycznego warstwy wierzchniej stali 42CrMo4 po nagniataniu (obróbki zastosowanej jako czynnik pozwalający na stosunkowo łatwe i kontrolowane wprowadzanie energii mechanicznej do warstwy wierzchniej).

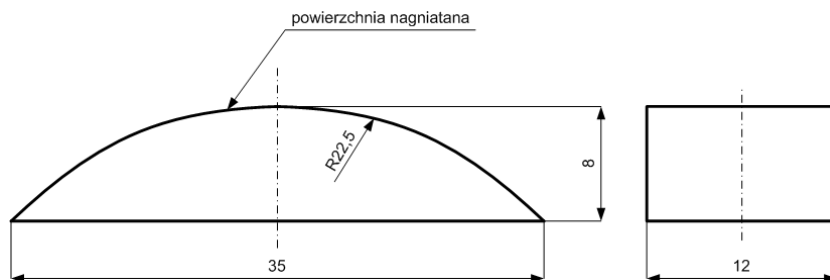
METODYKA BADAŃ

Próbki wykorzystane w eksperymencie wykonano ze stali 42CrMo4 w formie pierścieni o średnicy zewnętrznej 45 mm i szerokości 12 mm. Powierzchnie cylindryczne wszystkich próbek poddano szlifowaniu, aż do osiągnięcia na nich parametru chropowatości powierzchni $R_a = \text{ok. } 0,5 \mu\text{m}$. Następnie próbki dzielono wstępnie na sześć partii, z których każda przeznaczona była do nagniatania naporowego z inną siłą docisku. 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 równą 18 mm. Dobór parametrów nagniatania oparto na doniesieniach literaturowych [L. 10–11] oraz przeprowadzonych badaniach wstępnych. Próbki nagniatano z sześcioma różnymi wartościami siły, równymi odpowiednio: 0,8; 1,6; 2,4; 3,2; 4,0 i 4,8 kN. Pozostałe parametry

try 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.

Swobodną energię powierzchniową wyznaczano na podstawie pomiarów statycznego 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. Z uwagi na fakt ograniczonych wymiarów komory badawczej goniometru, z pierścieni nagniatanych wycinano próbki o wymiarach i kształcie pokazanych na **Rys. 1**.

Na powierzchni tak przygotowanych próbek osadzano krople wody o specjalnej czystości oraz diiodometanu i formamidu, o objętości 2 μl . Krople osadzono metodą tzw. kropli uwięzionej, polegającej 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).



Rys. 1. Kształt i wymiary próbek przeznaczonych do badania kąta zwilżania

Fig. 1. Shape and dimensions of specimens assigned to the wetting angle research

Procedurę pomiaru kąta zwilżania powtarzano 10-krotnie, po czym dla uzyskanej wartości średniej obliczano swobodną energię powierzchniową oraz jej elementy składowe. Do obliczeń swobodnej energii powierzchniowej wykorzystano metodę kwasowo-zasadową van Ossa. Całą procedurę, tj. pomiary kąta zwilżania i obliczanie swobodnej energii powierzchniowej powtarzano dla 3 losowo wybranych próbek z każdej partii.

Dodatkowo, w oparciu o wzór (3) wykonano obliczenia pracy adhezji pomiędzy powierzchni nagniatanych próbek a olejem parafinowym. Aby było to możliwe, zbadano zwilżalność powierzchni badanych próbek tym olejem wykorzystując to samo oprzyrządowanie (goniometr PG3) i metodykę (1,5 μl kropla oleju parafinowego osadzana metodą kropli uwięzionej), co w przypadku wyznaczania swobodnej energii powierzchniowej. Olej parafinowy wykorzystywany do pomiarów chłodzono do temperatury $10\pm 1^\circ\text{C}$ (dla ułatwienia obserwacji przez zwiększenie lepkości i w efekcie zmniejszenie szybkości rozplýwu). Obliczenia pracy adhezji wykonano w oparciu o średnie kąty zwilżania (10 powtórzeń) na trzech losowo wybranych próbkach dla każdej partii. Dla tak schłodzonego oleju parafinowego wykonano także pomiary napięcia powierzchniowego, których średnią wartość z 10 powtórzeń zastosowano do obliczenia pracy adhezji.

Przy okazji pomiarów kąta zwilżania oleju parafinowego na analizowanych powierzchniach wykonano także pomiary końcowych średnic podstaw kropli. Wartości tych średnic stanowią informację na temat dynamiki rozplýwu oleju po charakteryzowanych powierzchniach.

WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

W **Tab. 1** zestawiono wartości swobodnej energii powierzchniowej wraz z ich składowymi charakterystycznymi dla obliczeń wykonywanych metodą kwasowo-zasadową. Analiza przedstawionych danych wskazuje na wyraźny wzrost wartości swobodnej energii powierzchniowej wraz ze wzrostem siły nagniatania. Wzrost ten kształtował się na poziomie $36,2 \text{ mJ/m}^2$ (od $35,1 \text{ mJ/m}^2$ dla siły nagniatania $0,8 \text{ kN}$ do $71,3 \text{ mJ/m}^2$ dla siły nagniatania $4,0 \text{ kN}$). Można zauważyć, że optimum wartości swobodnej energii powierzchniowej przypada nie dla maksymalnej siły nagniatania, ale nieco mniejszej, równej $4,0 \text{ kN}$. Dla maksymalnej, zastosowanej siły nagniatania, tj. $4,8 \text{ kN}$ zaobserwowano niewielki spadek (rzędu 3 mJ/m^2) wartości swobodnej energii powierzchniowej. Fakt ten jest prawdopodobnie związany z osiągnięciem stanu tzw. nasycenia zgniotem, w którym stopień upakowania ziaren materiału jest już tak duży, że dalsze odkształcenia plastyczne nie powodują już umocnienia warstwy wierzchniej, ale rozpoczynają proces jej niszczenia. Zjawisko to jest obserwowalne także dla innych właściwości warstwy wierzchniej takich jak chropowatość czy też mikrotwardość.

Wzrost całkowitej wartości swobodnej energii powierzchniowej wydaje się być oczywisty, co wynika z faktu akumulacji części energii mechanicznej dostarczanej do warstwy wierzchniej podczas nagniatania. Taka aktywacja energetyczna warstwy wierzchniej może okazać się czynnikiem akcelerującym wiele zjawisk i procesów zachodzących w systemach tribologicznych, szczególnie w układzie ciało stałe–ciało stałe lub ciało stałe–ciecz. Dla przykładu, w mechanizmach niektórych procesów tribologicznych istotną rolę odgrywają takie zjawiska jak adhezja, chemisorpcja czy też dyfuzja, które w konsekwencji podwyższenia stanu energetycznego warstwy wierzchniej mogą ulegać znacznej intensyfikacji, a przez to przyczyniać się do pogorszenia odporności na zużycie.

Chemiczne niuanse związane ze zmianami w stanie energetycznym warstwy wierzchniej można rozpatrywać nieco dokładniej w oparciu o analizę składowych swobodnej energii powierzchniowej. Jak łatwo zauważyć w **Tab. 1**, składowa Lifshitz-van der Waalsa, po początkowym wzroście stabilizuje się na zbliżonym pułapie i nie zmienia swojej wartości wraz ze wzrostem siły nagniatania. Stosunkowo duży wzrost γ_s^{LW} pomiędzy nagniataniem siłami 0,8 kN i 1,6 kN należy tłumaczyć specyfiką technologii obróbki nagniataniem. Generowane nagniataniem odkształcenia plastyczne w swej początkowej fazie mają największy wpływ na ukształtowanie struktury krystalograficznej warstwy wierzchniej, co mogło przełożyć się na zmianę oddziaływań międzycząsteczkowych. Stosowanie kolejnych sił nagniatania w mniejszy sposób wpływało na ukierunkowanie krystalograficzne, a bardziej na gęstość upakowania krystalitów i akumulację energii mechanicznej. Oddziaływania Lifshitz-van der Waalsa obejmują siły dyspersyjne, orientacyjne oraz indukcyjne. Każda z wymienionych grup sił (szczególnie dyspersyjne) jest elementem oddziaływań odpowiedzialnych za implikację i przebieg zjawiska adhezji.

Można zatem z pewnym uogólnieniem stwierdzić, że powstanie i rozwój zużycia adhezyjnego w pewnym stopniu będzie zależny od swobodnej energii powierzchniowej, przy czym po osiągnięciu pewnego progu energetycznego (w tym przypadku ok. 42÷44 mJ/m²) nie obserwuje się wzrostu oddziaływań międzycząsteczkowych. Wynika z tego, że wzrost stanu energetycznego może być przyczynkiem do zainicjowania procesu szepiania (o czym mówi wspomniana hipoteza energetyczna), natomiast dalszy jego rozwój (w przypadku zacierania wręcz lawinowy)

ma bardziej spontaniczny charakter i wiąże się bardziej z powstawaniem wiązań metalicznych i zdolnością poszczególnych pierwiastków do łączenia.

Inaczej wygląda aspekt zmian składowej kwasowo-zasadowej, która jak widać w **Tab. 1** w bardzo wyraźny sposób zależy od siły nagniatania. Aby dokonać lepszej wizualizacji tych zmian, na **Rys. 2** zaprezentowano zależność γ_S^{AB} od siły nagniatania (w celach porównawczych pokazano także przebieg zmian składowej γ_S^{LW}).

Tabela 1. Swobodna energia powierzchniowa i jej składowe w zależności od siły nagniatania

Table 1. Surface free energy and its components in dependence on burnishing force

Rodzaj próbki	Swobodna energia powierzchniowa [mJ/m ²] ¹⁾				
	γ_S	γ_S^{LW}	γ_S^{AB}	γ_S^A	γ_S^B
Nagniatane siłą 0,8 kN	35,1	32,5	2,6	9,4	0,18
Nagniatane siłą 1,6 kN	47,9	44,4	3,5	3,2	1,0
Nagniatane siłą 2,4 kN	51,7	42,0	9,7	4,1	5,7
Nagniatane siłą 3,2 kN	54,7	42,4	12,2	0,9	42,6
Nagniatane siłą 4,0kN	71,3	44,5	26,7	3,8	46,5
Nagniatane siłą 4,8 kN	68,3	44,2	22,9	4,0	32,8

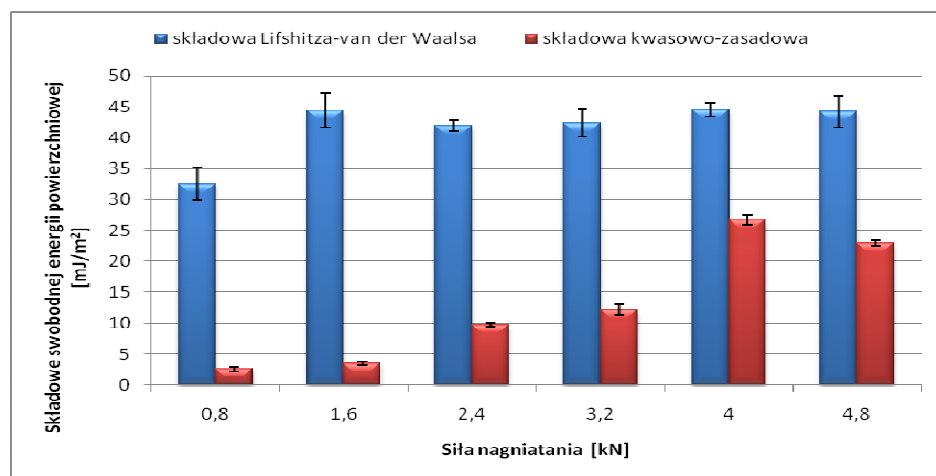
¹⁾ Oznaczenia swobodnej energii powierzchniowej i jej składowych: γ_S – wartość całkowita, γ_S^{LW} – składowa Lifshitz-van der Waalsa, γ_S^{AB} – składowa kwasowo-zasadowa, γ_S^A – składowa kwasowa, γ_S^B – składowa zasadowa.

Zarówno w **Tab. 1**, jak i na **Rys. 2** zaobserwować można stały wzrost składowej kwasowo-zasadowej γ_S^{AB} począwszy od siły nagniatania równej 0,8 kN aż do jej wartości równej 4 kN. Całkowite podwyższenie wartości tej składowej wyniosło 24,1 mJ/m² (z 2,6 mJ/m² dla nagniatania z siłą 0,8 kN do 26,7 mJ/m² dla nagniatania z siłą 0,8 kN). Dopiero dla najwyższej siły nagniatania – 4,8 kN zaobserwowano stosunkowo niewielki spadek wartości tej składowej (o 3,8 mJ/m²).

Składowa kwasowo-zasadowa γ_S^{AB} ma swoje źródło w teorii kwasów i zasad Lewisa. Do kwasów Lewisa zalicza się m.in. kationy metali, w tym trójwartościowego żelaza, dlatego też to ten pierwiastek stanowi

prawdopodobnie komponent kwasowy rozpatrywanej składowej kwasowo-zasadowej w analizowanym przypadku. Zasada w teorii Lewisa określona jest w sposób uogólniony i oznacza związek chemiczny, którego cząsteczka lub jon posiada wolne pary elektronowe i może stać się ich donorem w reakcji z kwasem Lewisa. Taki stan rzeczy można wykorzystać w komponowaniu środka smarowego w kontekście jego współpracy z powierzchnią metaliczną. W przypadkach, w których kationy metali w istocie będą zachowywać się jak akceptory, to wprowadzenie do układu węglowodorowego środka smarowego o zasadowym (zgodnie z teorią Lewisa) charakterze może prowadzić do tworzenia trwałych warstwek granicznych.

Rosnąca wraz siłą nagniatania wartość składowej kwasowo-zasadowej świadczy także o wzroście wiązań jonowych powstających na analizowanych powierzchniach. Z uwagi na fakt, że wiązania jonowe powstają najczęściej w konfiguracji metal–niemetal, może stanowić to dodatkowe potwierdzenie przypuszczenia, że rosnąca wartość γ_s^{AB} stanowi punkt wyjścia do tworzenia warstwek granicznych.



Rys. 2. Zmiany składowych swobodnej energii powierzchniowej w zależności od siły nagniatania

Fig. 2. Changes of free surface energy components in dependence of burnishing force

Aby ocenić konsekwencje wzrostu stanu energetycznego warstwy wierzchniej, wyznaczono wartości pracy adhezji w układzie analizowanej stali 42CrMo4 w kooperacji z nieaktywnym powierzchniowo olejem pa-

rafinowym. W **Tab. 2** zaprezentowano otrzymane średnie wyniki obliczeń W_a w zależności od wartości swobodnej energii powierzchniowej (wynikającej z zastosowanej siły nagniatania). Dodatkowo pokazano wyniki pomiarów średnicy podstawy kropelek oleju, świadczących o dynamice ich rozplywu na badanej powierzchni. Należy dodać, że średnia zmierzona wartość napięcia powierzchniowego oleju parafinowego stosowana w obliczeniach W_a wynosiła 14,84 mN/m.

Analiza wyników przedstawionych w **Tab. 2** wskazuje na niewielki wpływ swobodnej energii powierzchniowej na pracę adhezji pomiędzy powierzchnią nagniatanej stali 42CrMo4 a olejem parafinowym. Dopiero dla wyższych sił nagniatania, tj. powyżej 3,2 kN obserwuje się niewielki wzrost wartości pracy adhezji (maksymalnie wzrost ten wynosi 0,22 mJ). Taka sytuacja jest najprawdopodobniej związana z właściwościami samego oleju parafinowego, który nie jest substancją fizycznie czy też chemicznie czynną powierzchniowo. Dodatnia wartość pracy adhezji wskazuje oczywiście na to, że olej parafinowy nie zwilża całkowicie powierzchni stali i samo zjawisko adhezji ma miejsce, jednak w niewielkim stopniu jest ono zależne od aktywacji energetycznej powierzchni. W tym miejscu należałoby zwrócić uwagę na jeszcze jedną kwestię. Wartość pracy adhezji jest wielkością, która informuje bardziej o sile powstających wiązań a nie o ich ilości – w związku z tym możliwy jest przypadek, w którym wzrost swobodnej energii powierzchniowej powodować będzie intensyfikację liczby szpatek adhezyjnych, nie wpływając na siłę takiego szpatekowania.

Tabela 2. Praca adhezji oraz średnica podstawy kropli w zależności od swobodnej energii powierzchniowej i siły nagniatania

Table 2. Work of adhesion and base diameter of oil drop in dependence of free surface energy and burnishing force

Siła nagniatania [kN]	Swobodna energia powierzchniowa [mJ/m^2]	Praca adhezji [mJ]	Średnica podstawy kropli [mm]
0,8	35,1	29,01	3,27
1,6	47,9	28,96	3,26
2,4	51,7	28,99	3,18
3,2	54,7	29,12	3,38
4,0	71,3	29,16	3,60
4,8	68,3	29,18	3,66

Drugi z parametrów analizowanych w **Tab. 2** – średnica podstawy kropli oleju informuje o stopniu rozplywu oleju na powierzchni stalowej.

Wzrost siły nagniatania, a przez to i swobodnej energii powierzchniowej wpływa również na zwiększenie średnicy podstawy kropli, szczególnie dla wyższych sił nagniatania. Wzrost średnicy podstawy kropli oznacza poprawę zwilżalności, dzięki czemu olej dynamiczniej penetruje analizowaną powierzchnię, co jest procesem korzystnym z punktu widzenia odporności na zużywanie adhezyjne.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania wskazują na wyraźny wpływ zastosowanej obróbki nagniataniem na swobodną energię powierzchniową stali 42CrMo4. Analiza otrzymanych metodą kwasowo-zasadową rezultatów wskazuje, że wzrost ten jest spowodowany rosnącą wraz z siłą nagniatania składową kwasowo-zasadową. Opierając się na teorii kwasów i zasad Lewisa oraz polaryzacji wiązań jonowych stwierdzić można, że zmiany w takiej postaci mogą zostać wykorzystane do przygotowania warstwy wierzchniej pod kątem jej współpracy z substancją smarującą. Wniosek ten ma jednak tylko podłoże teoretyczne i należałoby eksperymentalnie potwierdzić jego słuszność.

Warto pamiętać także o tym, że przy nagniataniu z niższymi siłami obserwuje się wzrost składowej Lifshitz-a-van der Waalsa wskazującej na poziom oddziaływań międzycząsteczkowych. Ten tylko początkowy wzrost składowej γ_s^{LW} wyjaśniono naturą samego procesu nagniatania i kształtowaniem struktury krystalograficznej. Fakt ten jednak także powinien zostać potwierdzony lub zanegowany eksperymentalnie.

Jak już wspomniano we wstępie, wykonane badania stanowią uzupełnienie innych prac Autora, w których wykazano ścisły związek stanu energetycznego warstwy wierzchniej z odpornością na zacieranie adhezyjne. W przypadku konstrukcyjnych materiałów żelaznych (np. stali, żeliwa) wzrost określanego energią powierzchniową stanu energetycznego przekłada się na spadek odporności na zacieranie, jeżeli skojarzenie tarciove jest smarowane nieaktywną powierzchniowo substancją (taką jak np. wykorzystany do wyznaczenia pracy adhezji olej parafinowy). Aktywacja energetyczna powierzchni przyspiesza lub wręcz implikuje proces szepiania adhezyjnego odpowiedzialnego za przebieg procesu zacierania. Ten kierunek analizy wydaje się potwierdzać w zmianach obydwu składowych swobodnej energii powierzchniowej. W przypadku składowej Lifshitz-a-van der Waalsa początkowy wzrost wartości świad-

czy o wzmocnieniu oddziaływań międzycząsteczkowych mających wpływ na inicjację procesu szepiania. Wniosek taki jest w zgodzie z cytowaną już hipotezą energetyczną, która proces rozpoczęcia szepiania wiąże z osiągnięciem odpowiedniego poziomu energii na powierzchni metalu. Z drugiej strony obserwuje się wzrost składowej kwasowo-zasadowej, którą należałoby także rozpatrywać w aspekcie polaryzacji wiązań. Na tym etapie dokładności analizy trudno jednoznacznie powiedzieć czy wzrost tej składowej może świadczyć o powstawaniu wiązań jonowych czy też ma związek z postępującą polaryzacją metalicznych wiązań kowalencyjnych. Taki punkt widzenia mógłby być przynajmniej częściowym wytłumaczeniem pogorszenia odporności na zacieranie wraz ze wzrostem swobodnej energii powierzchniowej.

Wzrost stanu energetycznego warstwy wierzchniej można jednak wykorzystać także do kształtowania podwyższonej odporności na zacieranie. W cytowanych wcześniej pracach Autora wykazano m.in., że jeżeli skojarzenie tarciove smarowane jest substancją zawierającą czynne chemicznie dodatki EP, to wraz ze wzrostem siły nagniatania rośnie jej odporność na zacieranie. W tym przypadku również mamy do czynienia z aktywacją energetyczną powierzchni, ale wykorzystywaną do akceleracji procesu tworzenia warstewek granicznych w oparciu o związki przeciwtarciowe wykorzystane do komponowania środka smarowego.

Przeprowadzona dyskusja otrzymanych wyników wydaje się upoważniać do wykorzystania jako konkluzji użytego już wcześniej stwierdzenia o konieczności wykorzystywania analizy energetycznej warstwy wierzchniej w opisie stanu systemu tribologicznego. Informacja tego typu może stanowić istotny wkład w kwestię sterowania odpornością na niektóre formy zużywania tribologicznego, szczególnie te, w których istotną rolę ogrywa adhezja.

LITERATURA

1. Legutko S., Nosal S.: Kształtowanie technologicznej i eksploatacyjnej warstwy wierzchniej części maszyn, Ośrodek Wydawnictw Naukowych PAN, Poznań 2004.
2. Dutkiewicz E.T., Fizykochemia powierzchni, WNT, Warszawa 1998.
3. Clint J.H.: Adhesion and components of solid surface energies, Current Opinion in Colloid & Interface Science, vol. 6, 2001, p. 28–33.

4. van Oss C.J., Good R.J., Chaudhury M.K., Additive and nonadditive surface tension components and the interpretation of contact angle, *Langmuir*, vol. 4, 1988, s. 884–891.
5. Kaźmierczak A., Tarcie i zużycie zespołu tłok – pierścienie – cylinder, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.
6. Podgornik B., Zajec B., Strnad S., Stana-Kleinschek K., Influence of surface energy on interaction between hard coatings and lubricants, *Wear*, vol. 262, 2007, 1199–1204.
7. 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.
8. Wojciechowski Ł., Pawełczyk K.: Kształtowanie warstwy wierzchniej o podwyższonej odporności na zacieranie, *Inżynieria Materiałowa*, nr 6/2008, s. 1058÷1063.
9. Siemionov A.P.: Schvatyvanie metallov i metody ego predotvraščeniija pri trenii, *Trienie i Iznos*, 2/1980.
10. Black A.J., Kopalinsky E.M., Oxley P.L.B.: Analysis and experimental investigation of a simplified burnishing process, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 39, 1997, s. 629–641.
11. El-Axir M.H.: El-Khabeery: Influence of orthogonal burnishing parameters on surface characteristics for various materials, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 132, 2003, s. 82–89.

Recenzent:

Stanisław ADAMCZAK

Summary

Tribological aspects of the utilisation of surface layer energy conditions related to the description of tribological system properties are presented in this article. As an example, an estimation of the energy conditions of steel 42CrMo4 surface layer after burnishing was made. This estimation was made using values of surface free energy and its components determined by the acid-base method. Additionally, the work of adhesion in the system of 42CrMo4 steel–paraffin oil and the measured wetting of paraffin oil on the surface of the tested steel was evaluated. The obtained results are considered in the context of mechanisms responsible for adhesive wear and scuffing.