

Alicja LABER\*

## WARSTWA GRANICZNA W PROCESIE TARCIA

### SURFACE LAYER IN THE PROCESS OF FRICTION

#### Słowa kluczowe:

smarowanie, własności smarne, warstwa graniczna, zużycie

#### Key-words:

lubrication, lubricant properties, boundary layer, wear

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia dotyczące problematyki warstwy granicznej, która odgrywa istotną rolę w procesie tarcia decydując o oporach ruchu oraz zużyciu elementów węzłów tarcia w procesach im towarzyszących. Wykazano, że o warstwie granicznej decyduje wiele czynników zachodzących podczas pracy węzła tarcia.

#### WPROWADZENIE

Zwiększają się względne prędkości współpracujących elementów maszyn i przenoszone przez nie obciążenia, przy wyraźnej tendencji do zmniejszania ich ciężaru. Wobec tego coraz większego znaczenia nabierają problemy jakości stosowanych materiałów, problemy nowych metod

---

\* Uniwersytet Zielonogórski, Wydział Mechaniczny, Instytut Budowy i Eksploatacji Maszyn, ul. prof Z. Szafrana 2, 65-016 Zielona Góra.

obróbczych kształtujących własności warstwy wierzchniej (WW) oraz problemy związane z techniką smarowniczą, mającą wpływ na jakość i warunki pracy systemów tribologicznych, które decydują o przydatności do określonych zadań eksploatacyjnych.

Przez długie lata jednym z głównych kierunków walki ze zużyciem np. w przypadku elementów stalowych było zwiększenie twardości powierzchni trących. Na obecnym etapie użytkowania maszyn i urządzeń stosuje się takie metody umacniania lub utwardzania jak: obróbkę cieplną i cieplno-chemiczną (hartowanie, nawęglanie, chromowanie, azotowanie, siarkoazotowanie, węgloazotowanie i inne), implantowanie jonowe, napawanie zwykłe i plazmowe twardymi materiałami bądź nagniatanie i inne. Problematyka ta przedstawiona jest między innymi przez J. Kaczmarka, T. Burakowskiego T. Wierzchonia, S. Labera i innych.

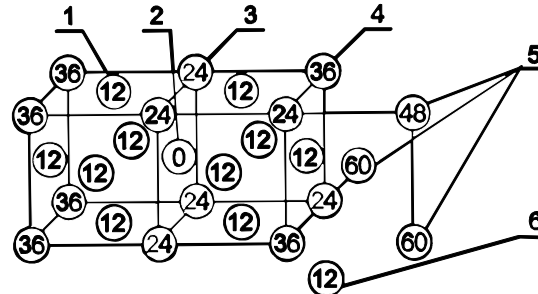
Szczególną rolę w eksploatacji systemów tribologicznych spełniają ciecze chłodząco-smarujące, decydują one bowiem o rodzaju tarcia a tym samym o oporach ruchu i zużyciu. Mając powyższe na uwadze, od lat 60. prowadzone są badania zmierzające do polepszenia jakości środków smarowych, ze szczególnym uwzględnieniem stosowania nowych dodatków uszlachetniających, będących ich integralną częścią. Badania te doprowadziły do zwiększenia trwałości i niezawodności maszyn i urządzeń, do zmniejszenia ich energochłonności, przy jednoczesnym zwiększeniu żywotności środków smarowych (okresu do ich wymiany).

## WARSTWA GRANICZNA

Warstwa graniczna (WG) według S. Płazy [L. 1, 2] jest przypowierzchniową uporządkowaną jedno- do kilkudziesięciu cząsteczkową warstwą cieczy lub stałych produktów reakcji chemicznych znajdujących się w zasięgu oddziaływania sił powierzchni ciała stałego. Według Marcza [L. 3] budowa warstwy granicznej ma charakter uporządkowany przypominający krystaliczną budowę ciała stałego. Z tego względu nazywa się ją quasi-krystaliczną.

Płaza w pracy [L. 1, 2] zebrał rezultaty badań, z których wynika, że w czasie tarcia granicznego na styku wierzchołków nierówności w krótkim czasie temperatura osiąga wartość 1000°C, a nacisk powierzchniowy 5GPa. W tych warunkach w skali atomowej występują zmiany w stanach elektronów, wiązań chemicznych i upakowania atomów, materia przechodzi w stan plazmy. Thiesenn [L. 4] stwierdził, że w wyniku dużej koncen-

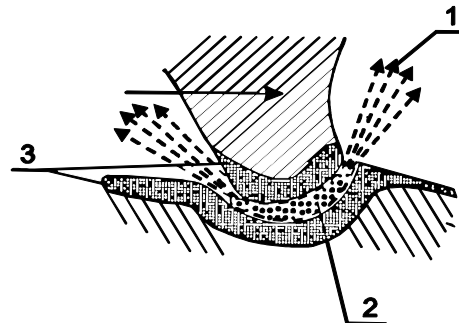
tracji energii w strefie tarcia materiał przechodzi w stan plazmy, dla którego zasady termodynamiki nie obowiązują. Powstałe pod wpływem mechanicznego oddziaływania deformacje plastyczne powodują naruszenie struktury warstwy wierzchniej elementów trących. Energia elementów sieci krystalicznej osiąga wysoki poziom i jest zróżnicowana – **Rys. 1**.



**Rys. 1.** Poziom energii (kcal/mol) różnych atomów kryształu miedzi w porównaniu z energią atomów wewnętrznych; 1 – atom powierzchniowy, 2 – atom wewnętrzny, 3 – atom krawędziowy, 4 – atom narożny, 5 – atomy „kontaktujące się”, 6 – atom „odparowany” [L. 4]

Fig. 1. The level of energy (the kcal/the mole) the various atoms of the crystal of copper in comparison with the energy of internal atoms; 1 – superficial atom, 2 – internal atom, 3 – edge atom, 4 – corner atom, 5 – atoms „contacting”, 6 – the atom „vaporized” [L. 4]

Materiał przechodzi do stanu, który Thiesenn przyrównuje do magmy – **Rys. 2**. Grubość filmu granicznego i gęstość cząsteczek nie jest jednaka we wszystkich punktach powierzchni, lecz zależy od stanu energetycznego i kształtu wierzchołków nierówności.

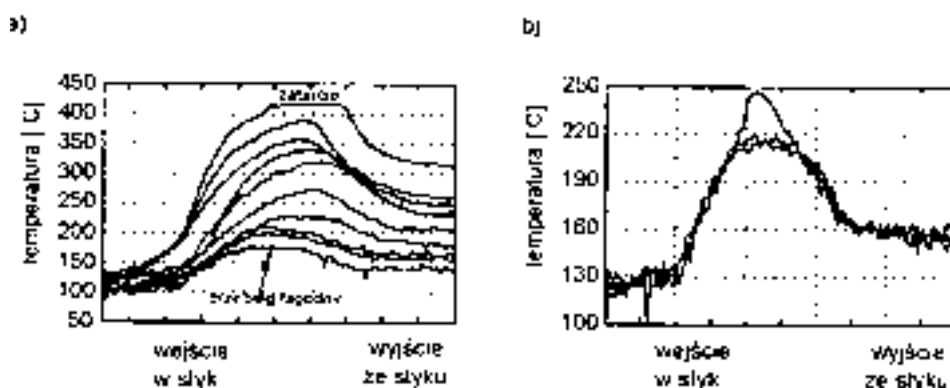


**Rys. 2.** Magmowo-plazmowy model elementarnych procesów zachodzących podczas tarcia według P.A. Thiessena; 1 – atomy, elektrony i fotony, 2 – plazma, 3 – twarda powłoka po zestaleniu [L. 4]

Fig. 2. The Magma-plasmic model elementary processes draw ahead during rubs according to P.A. Thiessena; 1 – atoms, electrons and photons, 2 – plasma, 3 – the hard sheath after cementing [L. 4]

Enthowen oraz Spikes [L. 5] przedstawili krzywe wzrostu temperatury w styku tarciovym w zależności od obciążenia i rodzaju środka smarowego. Tym środkiem był czysty heksadekan i heksadekan zawierający 0,1% kwasu stearynowego. Rodzaj kompozycji smarowej wpłynął na temperaturę podczas zatarcia:

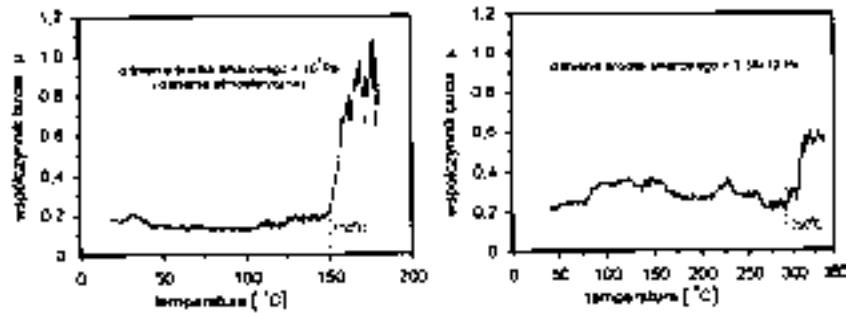
- czysty heksadekan – węzeł tarcia zatarł się w temperaturze 420°C i ciśnieniu 1,77 GPa,
- w obecności heksadekanu modyfikowanego 0,1% kwasem stearynowym węzeł tarcia nie zatarł się, a najwyższa temperatura podczas zatarcia wynosiła 245°C przy ciśnieniu 2,39 GPa.



Rys. 3. Wzrost temperatury powierzchni w styku tarciovym z udziałem: a) warstwy n-heksadekanu, b) 0,1% roztwór kwasu stearynowego w n-heksadekanie [L. 5]

Fig. 3. The growth of the temperature of the surface in the frictional point of the contact with the part: a) the layer n-hexadecans, b) 0,1% the solution the stearic acid in hexadecans [L. 5]

Lee i Cheng [L. 6] (Rys. 4) wyznaczyli temperaturę krytyczną procesu zacierania dla dwóch ciśnień  $10^5$  Pa i  $3,38 \cdot 10^7$  Pa przy zmiennej temperaturze od 0÷350°C. Z Rys. 4 wynika, że wzrost ciśnienia o 338 razy spowodował przerwanie warstwy granicznej przy wyższej temperaturze wynoszącej 290°C a przy ciśnieniu  $10^5$  Pa przerwanie warstwy granicznej wystąpiło przy 150°C.



Rys. 4. Zmiany współczynnika tarcia w funkcji temperatury dla dwóch ciśnień [L. 6]  
 Fig. 4. Alteration of ratio of friction in function of temperature for two pressures [6]

### ADSORPCJA A TARCIE GRANICZNE

Adsorpcja ma istotny wpływ na kinetykę reakcji tribochemicznych gdyż w jej wyniku zachodzi transport substratu na powierzchnię tarcia. Adsorpcja wpływa na:

- współczynnik tarcia,
- zużycie,
- temperaturę w momencie zatarcia.

Jakość tarcia granicznego natomiast zależy od:

- ilości zaadsorbowanej substancji,
- trwałości warstwy adsorpcyjnej.

Współpracujące powierzchnie mogą być pokryte trzema rodzajami warstw granicznych:

- warstwą składników środka smarowego utworzonego w wyniku sorpcji fizycznej,
- warstwą utworzoną w wyniku sorpcji fizycznej i chemisorpcji,
- warstwą utworzoną w wyniku chemisorpcji i produktów reakcji tribochemicznych dodatków uszlachetniających środków smarowych.

Według Marcza można wykazać pewne prawidłowości rozdziału poszczególnych rodzajów sorpcji w budowie warstwy granicznej.

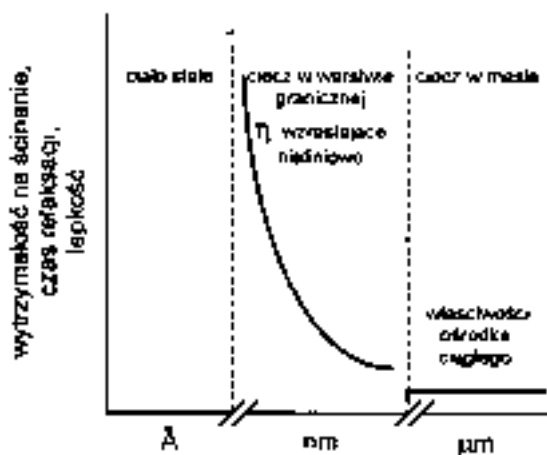
Chemisorpcja jest poprzedzona sorpcją fizyczną. Obecność lub powstawanie związków chemicznie aktywnych prowadzi do ich chemisorpcyjnego wiązania wyłącznie w wybranych miejscach powierzchni metalu. Dlatego nie należy oczekiwać utworzenia na powierzchni metalu warstwy granicznej zbudowanej z więcej niż jednej monowarstwy cząsteczek związanych chemisorpcyjnie z podłożem. Raczej nie wszystkie miejsca powierzchni zostaną wykorzystane.

Inaczej przedstawia się udział sorpcji fizycznej. Cząsteczki polarne adsorbentu mogą być wiązane w pustych miejscach powierzchni uzupełniając upakowanie pierwszej monowarstwy, mogą także wchodzić w skład następnych monowarstewek.

Grubość warstwy granicznej we wszelkich zagłębieniach jest większa niż na wierzchołkach nierówności. Wytrzymałość powstających warstw granicznych zależy od ich grubości. Według Hardy'ego najbardziej wytrzymałe są warstwy graniczne złożone z jednej warstwy cząsteczek. Grubość warstwy granicznej, przy której warstwa graniczna zachowuje jeszcze własności sprężyste według Achmatowa wynosi od  $400 \div 1000 \text{ \AA}$ .

Badania prowadzone przez Granicka i współpracowników [L. 7] potwierdziły zależność lepkości, sprężystości i czasów relaksacji warstw cieczy od jej grubości (Rys. 5):

- warstwa cieczy o grubości  $\mu\text{m}$  spełnia prawa dla cieczy o ciągłych właściwościach w objętości;
- warstwa cieczy o grubości  $\text{nm}$  – efektywna lepkość i sprężystość rosną a czas relaksacji się wydłuża;
- warstwa cieczy o grubości  $\text{\AA}$  staje się stałopodobna w rozumieniu, że ślizganie nie zachodzi aż do przekroczenia pewnego naprężenia ścinającego.

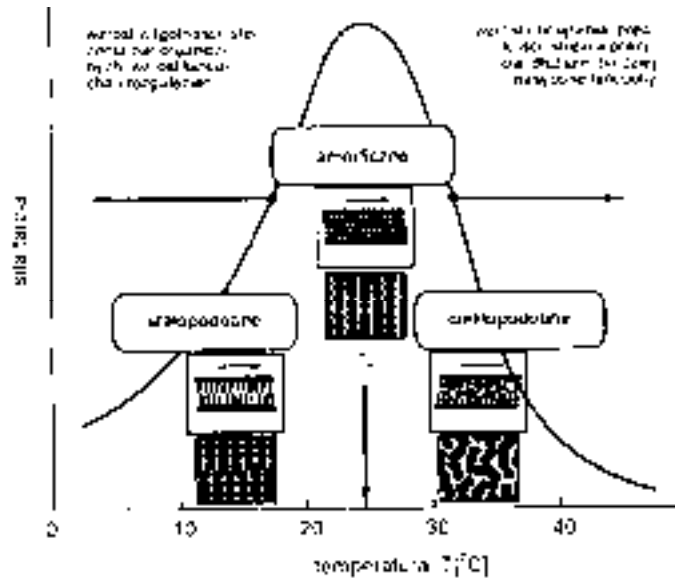


Rys. 5. Schemat zależności właściwości warstwy ciekłego środka smarowego od grubości warstwy [L. 7]

Fig. 5. The pattern of the dependence of the propriety of the layer of liquid lubricative centre from the thickness of coset [L. 7]

Według Israelachvili i współpracowników [L. 8] istnieją trzy zakresy temperaturowe mające wpływ na strukturę warstw granicznych (**Rys. 6**):

- poniżej tzw. temperatury topnienia  $T < T_m$  (struktura stałopodobna),
- w temperaturze topnienia  $T_m$  (struktura amorficzna),
- powyżej temperatury topnienia  $T > T_m$  (struktura ciekłopodobna).



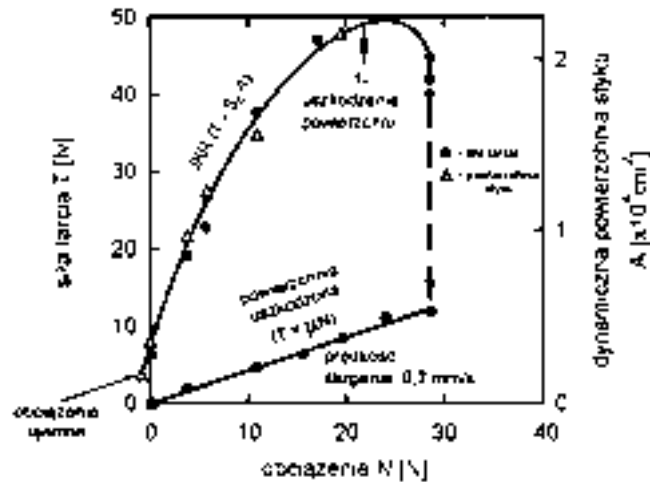
**Rys. 6. Tarcziwo-temperaturowy diagram faz:  $T_m$  – temperatura topnienia łańcucha [L. 8]**

**Fig. 6. The friction-temperature diagram of phase:  $T_m$  – the temperature of melting the chain [L. 8]**

### WPLYW OBCIĄŻENIA NA WŁASNOŚCI TWORZĄCEJ SIĘ WARSTWY GRANICZNEJ

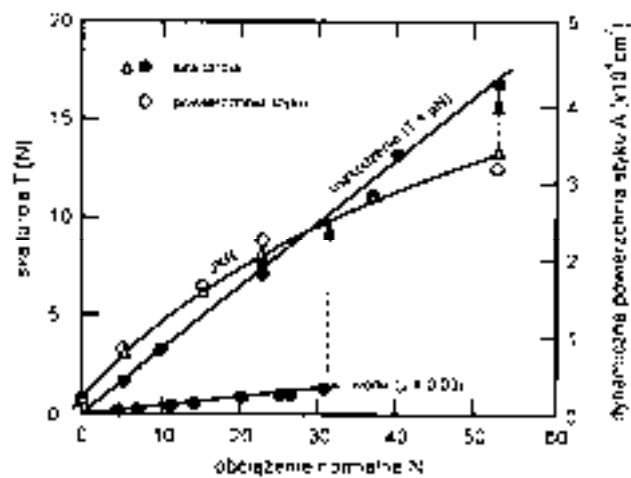
Homola i współpracownicy [L. 9] przeprowadzili badania na dwóch niesmarowanych gładkich powierzchniach miki w styku adhezyjnym w suchej atmosferze azotu (**Rys. 7**) i stwierdzili, że wraz ze wzrostem obciążenia:

- następuje gwałtowna zmiana tarcia adhezyjnego – model Johnsona, Kendalla, Robertsa – w tarcie opisane prawem Amontonsa;
- w tarcu bez uszkodzenia spełniony jest model J. K. R przy uszkodzeniu powierzchni spełnione jest prawo Amontonsa.



**Rys. 7. Zależność siły tarcia i zmieniającej się powierzchni styku od obciążenia [L. 9]**  
 Fig. 7. The dependence of the strength of the friction and the changing surface of point of the contact from the burden [L. 9]

Wprowadzając pomiędzy współpracujące gładkie powierzchnie inne ciało np. stearynian wapnia o grubości 2,5 nm lub cienkiej warstwy cieczy, można zmniejszyć siły tarcia i współczynnik tarcia, co jest wynikiem utworzenia na powierzchni tarcia warstwy granicznej [L. 2] – **Rys. 8.**



**Rys. 8. Zależność siły tarcia i zmieniającej się powierzchni styku od obciążenia [L. 2]**  
 Fig. 8. The dependence of the strength of the friction and the changing surface of point of the contact from the burden [L. 2]



## ZALEŻNOŚĆ LEPKOŚCI CIECZY OD GRUBOŚCI WARSTWY GRANICZNEJ

Chan i Horn [L. 13] oraz Israelachvili [L. 14] stosując w badaniach aparat sił powierzchniowych SFA mierzyli lepkość cieczy w zależności od jej grubości. Badania przeprowadzono między gładkimi powierzchniami miki i stwierdzono, że:

- dla grubości większych od 8 do 10 średnic cząsteczek ścinanie warstwy zachodzi tak jak w masie oleju;
- przy odległościach między powierzchniami poniżej 4 nm cząsteczki cieczy są nieruchliwe;
- cieńsze warstwy cieczy poniżej 4 nm, między dwoma powierzchniami miki wykazują wartość ścinania o 7 rzędów wielkości większe od wartości ciśnienia cieczy w masie;
- w styku tarciovym cieczy newtonowskie zachowują się jak cieczy nie-newtonowskie, ponieważ ze wzrostem prędkości ścinania wzrasta lepkość.

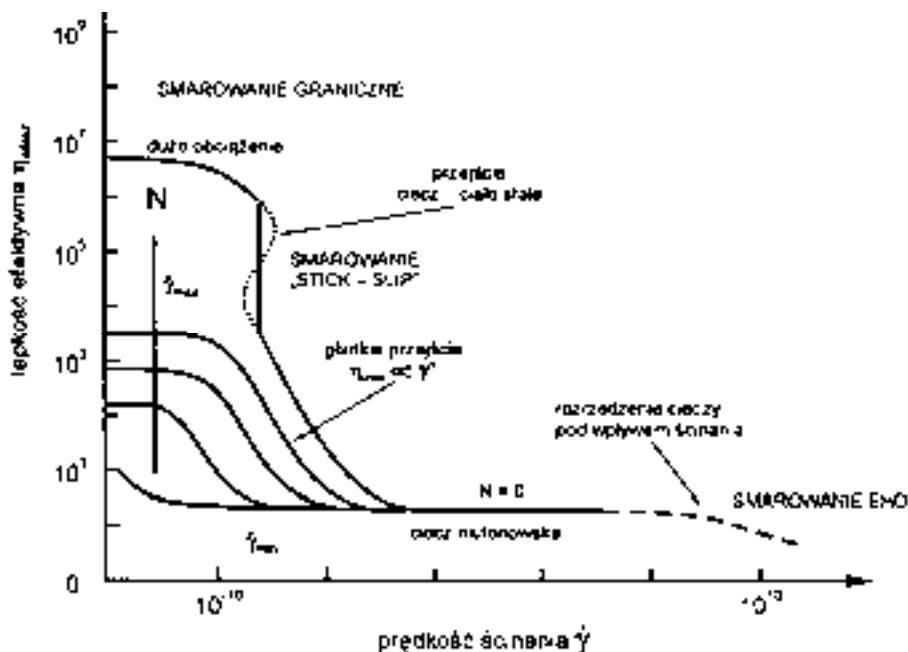
Luengo i współpracownicy [L. 10] przedstawili w skali logarymicznej zależność lepkości efektywnej ( $\eta_{\text{efekt}}$ ) od szybkości ścinania  $\dot{\gamma}$ . Wyodrębniają oni trzy główne zachowania cieczy w czasie ślizgania obciążonych dwóch powierzchni w zależności od grubości warstwy.

Dla grubej warstwy środka smarującego między dwoma powierzchniami współpracującymi – zakres smarowania EHD, przy braku obciążenia węzła tarcia  $\eta_{\text{efekt}}$  jest niezależne od szybkości ścinania, z wyjątkiem gdy ciecz niutonowska jest rozrzedzona  $\eta_{\text{efekt}} < \eta_{\text{cieczy}}$  przy bardzo wysokiej szybkości ścinania ok.  $10^{10}$ .

Dla warstwy granicznej i mieszanej przy niskich obciążeniach i niskich szybkościach ścinania warstwa cieczy zachowuje się jak ciecz niutonowska. Przy wzroście obciążenia wydłuża się zakres szybkości ścinania i rośnie jej maksymalna wartość  $\dot{\gamma}_{\text{max}}$  dla stałych wartości lepkości efektywnej. Przy szybkości ścinania powyżej  $\dot{\gamma}_{\text{min}}$  następuje łagodny spadek  $\eta_{\text{efekt}}$ .

Dla warstwy granicznej występującej przy bardzo dużych obciążeniach,  $\eta_{\text{efekt}}$  rośnie wraz ze wzrostem obciążenia, a szybkość ścinania maleje do zera dla cieczy newtonowskiej, następnie wraz ze wzrostem szybkości ścinania przechodzi łagodnie do wartości  $\dot{\gamma}_{\text{min}}$ .

Przy bardzo dużych obciążeniach, przy których występuje tarcie graniczne,  $\eta_{\text{efekt}}$  przyjmuje skończoną wartość.



Rys. 9. Zależność lepkości efektywnej ( $\eta_{\text{efekt.}}$ ) od szybkości ścinania [L. 10]

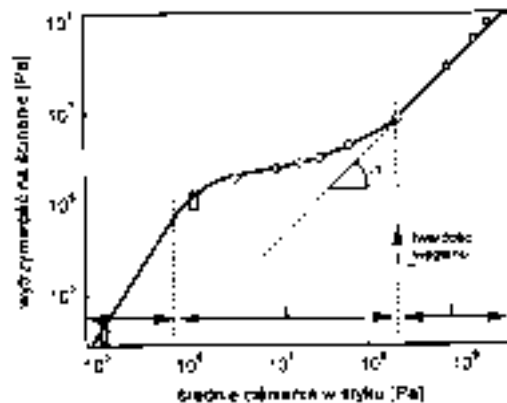
Fig. 9. The dependence of effective stickiness ( $\eta_{\text{the effect.}}$ ) from the speed of shearing [L. 10]

### ZALEŻNOŚĆ WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE OD LEPKOŚCI I RZECZYWISTEGO CIŚNIENIA W STYKU TARCIOWYM PODCZAS TARCIA GRANICZNEGO

Według Georgesa i współpracowników [L. 11] nieprostoliniowość zależności wytrzymałości na ścinanie od ciśnienia można wytłumaczyć zmianami struktury cienkiej warstwy pod wpływem ciśnienia.

Z badań nad cienką warstwą zasadowego sulfonianu wapnia wynika, że:

- dla ciśnienia do około 1 MPa zależność jest prostoliniowa – warstwa płynie;
- dla ciśnienia do około 200 MPa zależność nie jest liniowa;
- dla ciśnień powyżej 200 MPa warstwa jest stała i cząsteczki warstwy są ciasno upakowane;
- dla ciśnienia od 1 do 200 MPa warstwa nie jest w pełni uporządkowana i dlatego zależność nie jest liniowa.



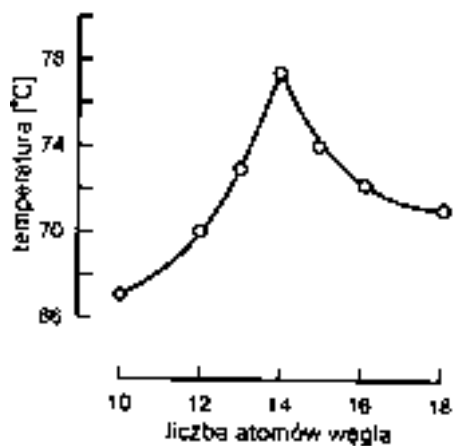
Rys. 10. Zależność wytrzymałości na ścinanie od ciśnienia w warstwie zasadowego (węglanu) sulfonianu wapnia w 20°C [L. 11]

Fig.10. Dependence of endurance on cutting from the thrust in shell of basic (carbonate) sulfonate of calcium in 20°C [L. 11]

Oprócz ciśnienia w warstwie granicznej duży wpływ na zjawiska zachodzące w tej warstwie ma temperatura, która może powodować:

- topnienie monowarstwy;
- desorpcję zaadsorbowanych cząsteczek.

Z badań laboratoryjnych i przemysłowych wynika, że efektywność środków smarowych a zatem prawdopodobnie mechaniczna odporność utworzonych warstw granicznych jest maksymalna kiedy długość łańcucha cząsteczek dodatku jest równa długości cząsteczek rozpuszczalnika [L. 12].



Rys. 11. Temperatury krytyczne kwasów organicznych w tetradekanie [L. 12]

Fig. 11. The critical temperatures of organic acids in tetradecane [L. 12]

## ZJAWISKA ELEKTROCHEMICZNE PODCZAS TWORZENIA WARSTW GRANICZNYCH W PROCESIE TARCIA

W procesie tarcia ulega odkształceniu powierzchnia tarcia, występują lokalne zmiany:

- gęstości ciała stałego;
- naprężeń rozciągających na ściskające;
- struktury elektronowej atomów wywołane przepływem elektronów z miejsc o naprężeniu ściskającym do miejsc o naprężeniu rozciągającym;
- różnic temperaturowych między mikroobszarami powierzchni powodując przepływ elektronów z miejsc o temperaturze wyższej ku miejscom o temperaturze niższej, czego wynikiem jest występowanie prądu termoelektrycznego.

Podczas ruchu elementu węzła tarcia może występować koncentracja ładunków i ich przepływ, które mogą wpływać na tworzenie warstw granicznych.

Wyróżnia się dwa rodzaje wpływu zjawisk elektrycznych na zachowanie tribologicznej warstwy granicznej:

- na kinetykę tworzenia warstwy granicznej: adsorpcja i rozkład dodatków w strefie tarcia mogą być aktywowane obecnością dużego pola elektrycznego;
- zwiększenie odporności do przenoszenia większych obciążeń i proces pękania wiązań w cząsteczkach związanych z powierzchnią tarcia.

Procesy elektrochemiczne odgrywają dużą rolę w trakcie selektywnego przenoszenia. W procesie tarcia brązu po stali w obecności gliceryny przy prędkości poślizgu mniejszej od 6 m/s, przy wysokim nacisku stykowym  $p > 40$  MPa i temperaturze 40 do 60° powstająca warstewka miedzi na stali spowodowała obniżenie intensywności zużycia 1610 razy [L. 2].

## TWORZENIE WARSTWY GRANICZNEJ PRZEZ OLEJE HANDLOWE

W skład olejów handlowych wchodzi dodatki przeciwzużyciowe (AW) i przeciwzatarciowe (EP).

Cechą wspólną tych dodatków jest oddziaływanie na strefę przypo-wierzchniową WW trących elementów poprzez tworzenie warstw granicznych zapewniających warunki tarcia granicznego.

AW i EP są to aktywne środki smarowe poprawiające smarność. Zaliczamy do nich:

- związki fosforowe,
- związki chlorowe lub siarkowe wzbogacone w tlen, cynę, cynk, bor, kwasy tłuszczowe i ich estry, np. kwas stearynowy lub oleinowy.

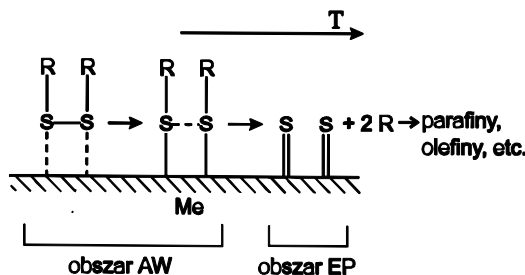
Aktywność tych dodatków zależy od ich struktury chemicznej oraz warunków pracy węzła tarcia, np. siarka lub fosfor wchodzi w reakcję z podłożem metalicznym w podwyższonych temperaturach.

Forbers [L. 15] zaproponował model oddziaływań mono i disiarczków organicznych z powierzchnią metalu przy rosnącej temperaturze – **Rys. 12**. Na początku cząsteczka disiarczku RSSR (R – rodnik węglowodorowy), adsorbuje się na powierzchni metalu. Następnie zachodzi rozerwanie wiązań S-S, tworzy się cząsteczka merkaptynu RSM<sub>e</sub>. Jest to działanie przeciwzużyciowe AW. Wskutek wzrostu wymuszeń (wzrost temperatury) następuje rozerwanie wiązań S-R w merkaptynie – tworzy się warstewka nieorganiczna zawierająca S, która umożliwia działanie przeciwzatarciowe.

Model oddziaływań disiarczków organicznych według Forbesa można podzielić na trzy etapy:

1. Cząsteczka disiarczku RSSR (R – rodnik węglowodorowy) adsorbuje się na powierzchni metalu,
2. Rozerwanie wiązań S-S, tworzenie merkaptynu RSM<sub>e</sub> działanie przeciwzużyciowe (AW),
3. Wskutek wzrostu wymuszeń (wzrost temperatury) następuje rozerwanie wiązań S-R – w merkaptynie tworzy się warstewka nieorganiczna zawierająca S, co umożliwia działanie przeciwzatarciowe EP.

Właściwości przeciwzużyciowe i przeciwzatarciowe dodatków są związane z ich reaktywnością z metalem.



**Rys. 12. Model oddziaływań disiarczków organicznych z powierzchnią metalu według Forbesa [L. 15]**

Fig. 12. The model influences organic disulfides from the surface the metal according to Forbesa [L. 15]

Rola związków siarkowych to:

- na powierzchni tarcia tworzy się monosiarczek metalu;
- stężenie powierzchniowe siarczku jest stałe w warunkach średnich i wysokich obciążeniach, ale różne dla różnego typu dodatku;

- stężenie powierzchniowe siarczku przy końcu testu tarcia jest odwrotnie proporcjonalne do zużycia;
- warstwa graniczna jest usuwana podczas tarcia i utrzymuje się stała szybkość zużycia;
- stężenie powierzchniowe siarczku może być zmniejszone przez obecność innych dodatków;
- siarczek powierzchniowy jest utleniany tlenem obecnym w środowisku smarowym i powierzchniowymi tlenkami żelaza do siarczynów i siarczanów.

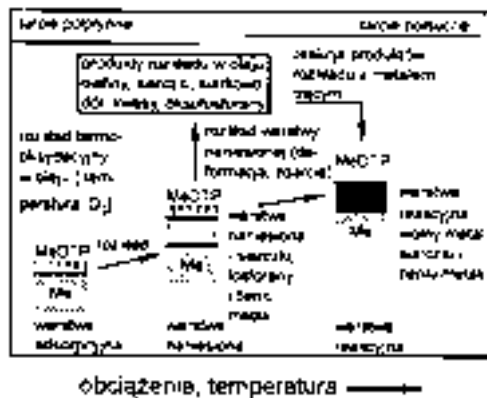
Dodatkiem przeciwzużyciowym dodawanym do olejów handlowych jest ZDTP (dialkyloditiofosforancynku). Dialkilo(arylo)ditiofosforany metali są dodatkami wielofunkcyjnymi przeciwzużyciowymi, wykazującymi również w pewnym stopniu właściwości EP. Efektywność zmniejsza się zależnie od metalu zgodnie z szeregiem  $Zn > Cu > Pb > Co > Ni$ .

Właściwości przeciwтарыowe pochodnych różnych metali występujących w cząsteczce dodatku maleją w następującym szeregu  $Ag > Pb > Co > Zn > Cu$ .

Dodatki do olejów:

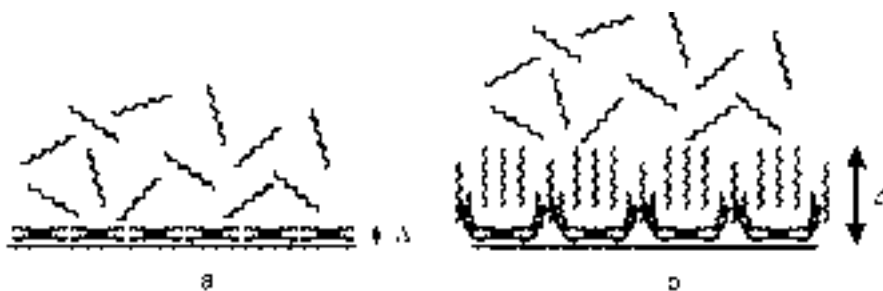
- przeciwzużyciowe (AW) ZDTP dialkyloditiofosforan cynku;
- przeciwzużyciowe i przeciwтарыowe dialkilo(arylo)ditiofosforany metali.

Na **Rys. 13** przedstawiono model mechanizmu tworzenia warstw ditiofosforanów metali w zależności od warunków tarcia [L. 16]. Natomiast na **Rys. 14** przedstawiono organizację warstwy granicznej ZDTP o krótkim i długim łańcuchu alkilowym.



**Rys. 13.** Model mechanizmu tworzenia warstw ditiofosforanów metali w zależności od warunków tarcia [L. 16]

**Fig. 13.** The model of the mechanism of creating the layers dithiophoran of metals in dependence from the conditions of the friction [L. 16]



**Rys. 14. Organizacja warstwy granicznej ZDTP – dodatek: a) o krótkim łańcuchu alkilowym, b) o długim łańcuchu alkilowym [L. 16]**

**Fig. 14. The organization of the layer border ZDTP – the addition: a) about short chain alkyl, b) about the long chain alkyl [L. 16]**

## PODSUMOWANIE

Podsumowując, na proces tworzenia warstwy granicznej ma wpływ wiele czynników, a mianowicie:

- rodzaj stosowanych środków smarowych;
- ciśnienie w styku tarciovym;
- zależność wartości temperatur krytycznych kwasów tłuszczowych od długości łańcucha rozpuszczalnika;
- korelacja między różnicą potencjału a przebiegiem reakcji chemicznych na powierzchni tarcia oraz występowaniem zależności pomiędzy potencjałem generowanym przez tarcie i charakterem nieprzewodzącej warstwy granicznej;
- stopień pokrycia powierzchni cząsteczkami adsorbentu w zależności od ciśnienia i temperatury w strefie styku wg Langmuira;
- kształt łańcucha cząsteczki molekularnie cienkich warstw;
- udział warstw niepolarnych węglowodorów;
- udział cząsteczek substancji polarnej w rozpuszczalniku;
- adsorpcja;
- polarność i niepolarność ciała adsorbującego;
- temperatura;
- obciążenie;
- struktura warstwy wierzchniej.

**LITERATURA**

1. Płaza S.: Fizykochemia procesów tribologicznych. Wyd. Uniwersytet Łódzki 1997.
2. Płaza S., Margielewski L., Celichowski G.: Wstęp do tribologii i tribochemia. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 2005.
3. Marczak R.: Badania przeciwności olejowych kompozycji dwusiarczku molibdenu. Praca doktorska. Politechnika Poznańska 1971.
4. Thiessen P.A., Meyer K., Heinicke G.: Grundlsgm der Tribochemie. Academic - Verlag. Berlin 1967.
5. Enthoven J.C., Spikes H.A.: Temperature profiling of EHD contacts prior to and during scuffing. Proc.XXIth Leeds-Lyon Conference, Leeds 1994.
6. Lee S.C., Cheng H.S.: Experimental validation of critical temperature-pressure theory of scuffing, Tribology Trans., 38 (1995), s. 738–742.
7. ChoY. K., Cai L., Granick S.: Molecular tribology of lubricants and urfaces. Tribology Int. 12/1977.
8. Yozhizawa H., Chen Y. L., Israelchvili J. N.: Fundamental mechanisms of interfacial friction. I: Relation between adhesion and friction. Phys. Chem. 97/1993.
9. Homola A.M., Israelchvili J.N., Gee M.L., Mc Guiggan P.M.: Measurements of and relation between the adhesion and friction of two surfaces separated by molecularly thin liquid films: ASMEJ. Tribology 111/1989.
10. Luengo G., Israelachvili J., Granick S.: Generalized effects in confined films; new friction map for boudary lubrication. Wear 200/1996.
11. Georges J.M., Touck A., Mazuyer D., Loubet J.L.: Friction with colloidal lubrication. Kluwer Academic Publishers 1992.
12. Grew W.J.S., Cameron A.: Thermodynamics of bonduary lubrication and scuffing. Proc.Roy.Soc.London A., 327/1972.
13. Chan D. Y. C., Horn R. G.: The drainage of thin liquid films between solid surfaces. J. Chem. Phys. - 83/1985.
14. Israelachvili J.N., Mc Guiggan P. M., Homola A.M.: Dynamic properties of molecularly thin liquid films, Science, 240 (1988) 189–191.
15. Forbes E.S., Reid A.J.: Liquid phase adsorption / reaction studies of argano- sulfur compounds and their load - carrying mechanism. ASLE Trans., 16/1973.
16. Sieber J., Meyer K., Kloss H., Schoepke A., Characterization of boundary layers formed by different metal dithiophosphates in four-ball machine, Wear, 85 (1983).

**Recenzent:**  
**Ryszard MARCZAK**



**Summary**

**Chosen questions were introduced in the article the relating problems of the border layer which deciding about the resistances of the movement and the waste of the elements of the knots of the friction and processes them plays the essential part in the process of the friction concurrent. It was showed that many factors drawing ahead in the work of the knots of the friction decided about the quality of the border shell.**