

Krzysztof KRAWCZYK*, **Agnieszka CHOJNACKA****,
Emil NOWIŃSKI***

MECHANIZM KONSTYTUOWANIA WARSTWY GRANICZNEJ Z UWZGLĘDNIENIEM ZJAWISK TRIBOELEKTRYCZNYCH

THE MECHANISM OF BOUNDARY LAYER FORMATION INCLUDING TRIBOELECTRIC PHENOMENON

Słowa kluczowe:

zjawiska triboelektryczne, warstwa graniczna

Key words:

triboelectric phenomenon, boundary layer

Streszczenie

W strefie tarcia, gdy środek smarowy rozdziela dwie powierzchnie, w odpowiednich warunkach zaczynają występować cząsteczki nieobojętne elektrycznie (polarne, naelektryzowane i zjonizowane) w znacznych

* Politechnika Radomska, Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, ul. Chrobrego 45, 26-600 Radom.

** Politechnika Radomska, Wydział Materiałoznawstwa, Technologii i Wzornictwa, ul. Chrobrego 27, 26-600 Radom.

*** Ośrodek Szkolenia Lotniczego, 26-600 Radom.

stężeniach. Cząsteczki te powodują występowanie intensywnych zjawisk triboelektrycznych, wydzielają się w postaci oddzielnej warstwy dobrze przewodzącej prąd elektryczny, a strefa poślizgu generuje cząsteczki o podwyższonej energii, które oddziałują na warstwę graniczną.

WSTĘP

Przyjęto, iż zjawiska triboelektryczne występują w całym zakresie warunków tarcia począwszy od hydrodynamicznego, a kończąc na zacieraaniu [L. 10, 11], ale z różną intensywnością [L. 12].

Interesujące są warunki, w których zjawiska triboelektryczne mają decydujący wpływ na proces tarcia ze smarowaniem i można je jednoznacznie zidentyfikować **ze szczególnym uwzględnieniem ich wpływu na warstwy graniczne**.

Analizując zjawiska triboelektryczne, należy uwzględniać problemy związane z warstwą graniczną, ponieważ warstewka ta zbudowana jest z cząsteczek oleju posiadających wyższą energię i wysycających tę energię w kontakcie z powierzchnią trącą.

O problemach zwiększenia koncentracji związków i cząsteczek polarnych pisali już B.J. Kostecki [L. 1], T. Stolarski [L. 2].

Obecnie zagadnienia wiążące energię powierzchni i energię cząsteczek tworzących film graniczny eksponowane są w opisie i interpretacji filmu granicznego.

W tym miejscu przytoczymy definicję warstwy granicznej wg [L. 3]:

Warstwa graniczna (film graniczny) jest to uporządkowana, kilkucząsteczkowa warstwa cieczy smarującej, znajdująca się w zasięgu niewysyconych sił powierzchni smarowanej. Działanie pola tych sił powoduje polaryzację indukowaną cząsteczek smaru i związaną z tym ich orientację równoległą do linii działania tych sił. W wyniku tego zmienia się lepkość i gęstość cieczy smarującej w warstwie przypowierzchniowej. W rezultacie właściwości cieczy smarującej są inne w warstwie przypowierzchniowej niż w pozostałej objętości. Zdolność tworzenia warstw granicznych posiadają ciecze smarujące zawierające substancje powierzchniowo czynne o charakterze polarnym takie jak siarka i jej związki oraz węglowodory aromatyczne. Zdolność ta zależy również od stanu energetycznego powierzchni smarowanej.

Powyższą definicję należy uzupełnić o zagadnienia, które wydają się niezwykle istotne, a mianowicie: zdolność tworzenia warstw granicznych

posiadają ciecze smarujące, zawierające substancje powierzchniowo czynne o charakterze polarnym takie jak np. związki siarki, chloru, fosforu oraz węglowodory aromatyczne. Ponadto uważa się, iż w procesie tarcia powstająca energia powoduje elektryzację niektórych cząsteczek, jak również pękanie niektórych łańcuchów węglowodorowych i w ten sposób powstają spontanicznie cząsteczki nieobojętne elektrycznie. Cząsteczki te mogą wchodzić w skład warstewki granicznej, jak również kreować zjawiska triboelektryczne. Przez cząsteczki nieobojętne elektrycznie rozumiemy cząsteczki polarne, naelektryzowane oraz zjonizowane.

Istotny jest fakt, iż tak zdefiniowane warstwy graniczne związane z powierzchnią trącą mają charakter statyczny, ponieważ są związane z powierzchnią, a proces tarcia odbywa się nie w tych warstewkach tylko poprzez burzenie tych warstewek. Jak wiadomo niszczenie struktur statycznych wiąże się z dostarczaniem dodatkowej energii i im bliżej powierzchni to tarcie wymaga wyższej energii pokonującej energię powierzchni. Tarcie wewnętrzne występuje w całej warstwie granicznej. Warstwa ta może zawierać cząsteczki niszczonej, statycznej warstwy granicznej, ale już wchodzące w skład struktury dynamicznej, która posiada inny charakter uporządkowania. Cząsteczki, które były uporządkowane w warstwie granicznej przechodząc do struktur dynamicznych, zmieniają charakter na nieuporządkowany i zaczynają uczestniczyć w zjawiskach triboelektrycznych.

W świetle powyższej dyskusji proponujemy na użytek niniejszej pracy następującą **definicję warstwy granicznej**:

Środek smarowy w warstwie granicznej przejawia inne właściwości reologiczne niż w objętości i powstaje z wielu warstw nieobojętnych elektrycznie cząsteczek zaadsorbowanych do powierzchni trącej, która posiada niewysoczoną energię.

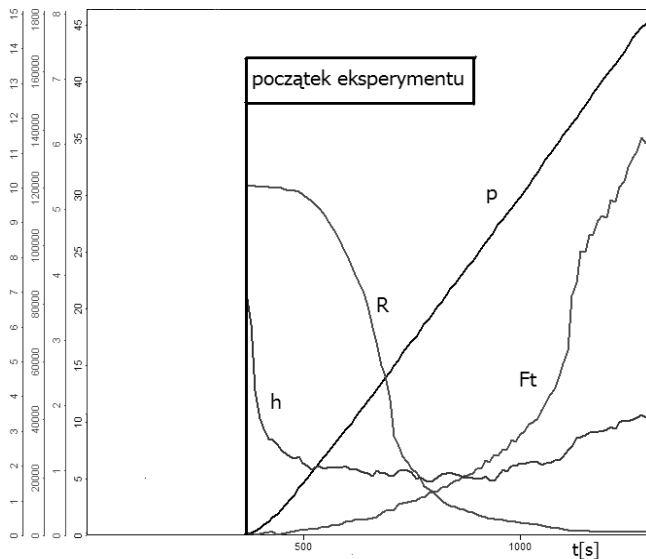
W świetle powyższego tworzące się na powierzchni warstwy tlenków, chlorków, siarczków i innych związków takich jak mydła, powstałych na skutek oddziaływania dodatków przeciwzatarciowych, są warstwami zmodyfikowanej powierzchni i należą do niej. Nie są to więc warstwy graniczne. Tak zmodyfikowane warstewki wchodzą w skład szerszego pojęcia spotykanego w literaturze [L. 4], czyli eksploatacyjnej warstwy wierzchniej (EWW) i mogą jedynie zmieniać stan energetyczny powierzchni, a tym samym wpływać na warstwy graniczne.

W naszym rozumieniu zjawiska triboelektryczne przejawiają się i dotyczą warstw granicznych oraz warstw dynamicznych, w których odbywa się tarcie wewnętrzne. Procesy tarcia wewnętrznego w warstewce smarowej zawsze związane są ze zjawiskami triboelektrycznymi (z powstawaniem i oddziaływaniem polarnych, naelektryzowanych i zjonizowanych cząsteczek), ale ich intensywność zależy od parametrów tarcia: im cięższe warunki (wyższa prędkość, wyższy nacisk jednostkowy, wyższe temperatury), tym zjawiska triboelektryczne intensywniejsze.

Intensywność tych zjawisk może przebiegać nieliniowo, a nas interesuje pewien stan nasycenia tymi zjawiskami, który będziemy nazywali *intensywnymi zjawiskami triboelektrycznymi*, a przejawia się to możliwością wpływania na proces tarcia prądem elektrycznym.

Przejawy występowania intensywnych zjawisk triboelektrycznych występują przy smarowaniu niepolarnym olejem parafinowym, olejem parafinowym z dodatkami np. kwasu stearynowego i alkoholu stearylowego, jak też ciekłymi kryształami.

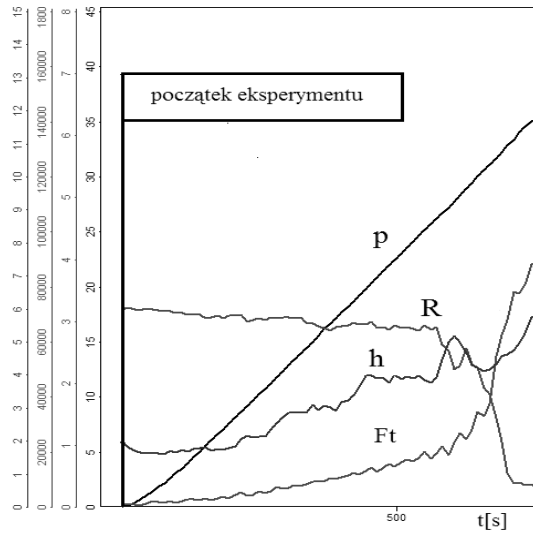
Ilustrują to **Rysunki 1–4**.



p – nacisk [MPa]; R – rezystancja [Ω]; h – grubość filmu olejowego [μm]; Ft – siła tarcia [N]

Rys. 1. Badanie zjawisk triboelektrycznych w węzle tarcia smarowanym olejem parafinowym; $T=30[^\circ\text{C}]$, $v=1[\text{m/s}]$

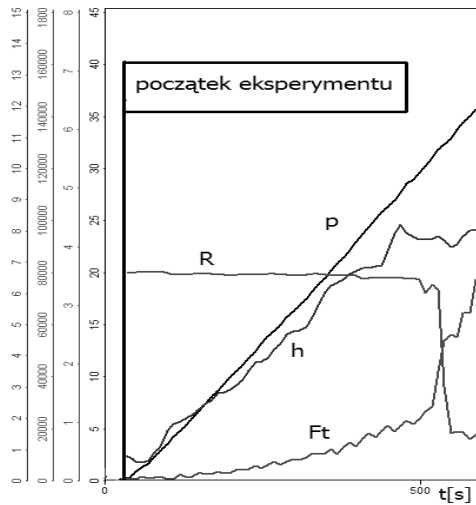
Fig. 1. Investigation of triboelectric phenomenon in lubricated friction zone; $T=30[^\circ\text{C}]$, $v=1[\text{m/s}]$



p – nacisk [MPa]; R – rezystancja [Ω]; h – grubość filmu olejowego [μm]; Ft – siła tarcia [N]

Rys. 2. Badanie zjawisk trioelektrycznych w węzle tarcia smarowanym olejem parafinowym z dodatkiem kwasu stearynowego; $T = 30[^\circ\text{C}]$, $V = 1 [\text{m/s}]$

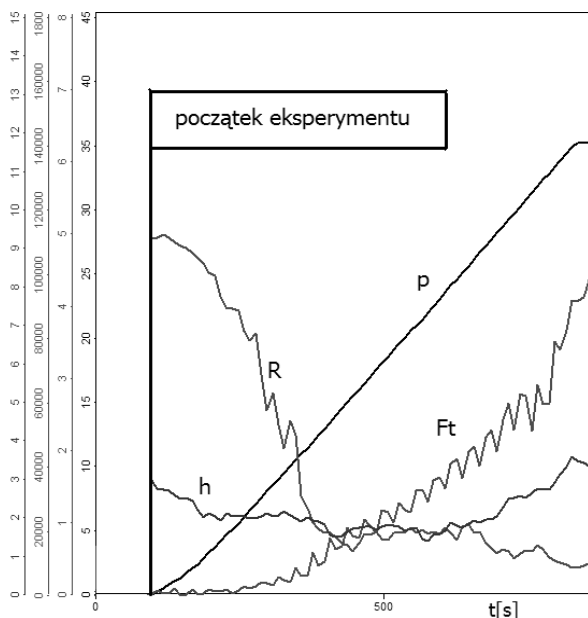
Fig. 2. Investigation of triboelectric phenomenon in lubricated friction zone with stearic acid; $T = 30[^\circ\text{C}]$, $v = 1[\text{m/s}]$



p – nacisk [MPa]; R – rezystancja [Ω]; h – grubość filmu olejowego [μm]; Ft – siła tarcia [N]

Rys. 3. Badanie zjawisk trioelektrycznych w węzle tarcia smarowanym olejem parafinowym z dodatkiem alkoholu stearylowego; $T = 30[^\circ\text{C}]$, $V = 1[\text{m/s}]$

Fig. 3. Investigation of triboelectric phenomenon in lubricated friction zone with stearyl alcohol; $T = 30[^\circ\text{C}]$, $v = 1[\text{m/s}]$



p – nacisk [MPa]; R – rezystancja [Ω]; h – grubość filmu olejowego [μm]; Ft – siła tarcia [N]

Rys. 4. Badanie zjawisk triboelektrycznych w węzle tarcia smarowanym ciekłym kryształem; $T = 30[^\circ\text{C}]$, $V = 1[\text{m/s}]$

Fig. 4. Investigation of triboelectric phenomenon in lubricated friction zone with liquid crystal; $T = 30[^\circ\text{C}]$, $v = 1[\text{m/s}]$

Za występowanie warunków tarcia z intensywnymi zjawiskami triboelektrycznymi uważamy taki zakres, w którym spadkowi rezystancji filmu olejowego towarzyszy wzrost grubości tego filmu przy jednoczesnym wzroście oporów tarcia, co również ilustrują powyższe rysunki. Szerszy opis tych problemów znajduje się w [L. 9], natomiast powyższe przykłady świadczą o powszechności występowania tych zjawisk w odpowiednich warunkach.

UKŁAD DO POMIARÓW INTENSYWNYCH ZJAWISK TRIBOELEKTRYCZNYCH

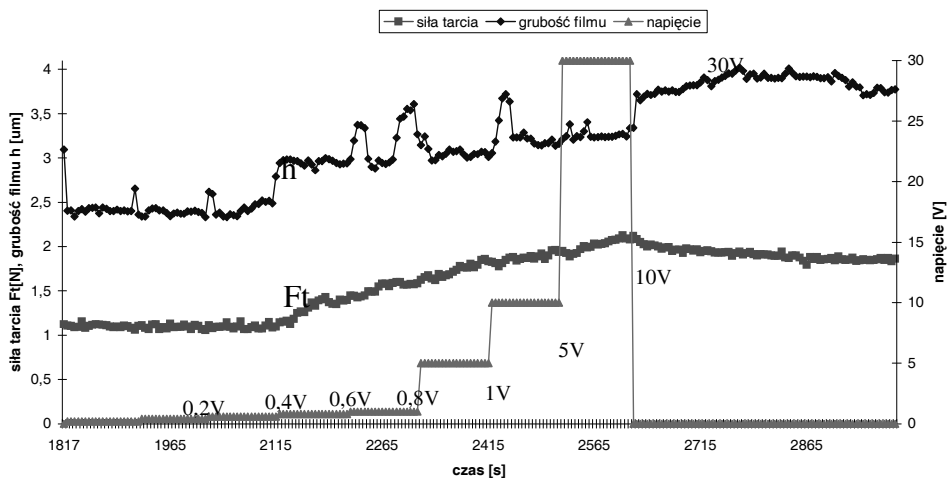
Do identyfikacji zjawisk triboelektrycznych służą dwa tory pomiarowe rejestrujące równocześnie dwa parametry: grubość filmu olejowego oraz rezystancję strefy tarcia (rezystancja może być równoważnie rozumiana jako przewodność).

Tor pomiarowy oraz sposób pomiaru grubości filmu olejowego został opisany w publikacji [L. 5], natomiast tor pomiarowy rezystancji w patentach [L. 6–8]. Jest to pomiar metodą techniczną, czyli mierzony jest spadek napięcia pomiędzy powierzchniami trącymi, a napięcie przyłożone do tych powierzchni wynosi 20 [mV].

Tak małe napięcia pomiarowe i okresowe włączanie pomiaru rezystancji podyktowane jest obawą zakłócania zjawisk triboelektrycznych przez zewnętrzne źródło prądu (zewnętrzne źródło prądu może nie tylko zakłócać proces tarcia, ale i wpływać na jego parametry). Eksperymentalnie dobrane napięcie rzędu 20 [mV] jest na tyle małe, że w sposób zauważalny nie wpływa na procesy tarcia i okresowe włączanie pomiaru rezystancji też nie poprawia jakości pomiarów ani nie wpływa na badany proces tarcia w sposób zauważalny.

Badania prowadzone nad możliwością sterowania siłą tarcia za pomocą prądu elektrycznego pokazują, iż zauważalny wpływ na proces tarcia rozpoczyna się od poziomu napięć rzędu 600 [mV], gdzie na przyłożone napięcie zaczyna reagować siła tarcia.

Przykładowo ilustruje to **Rys. 5**.



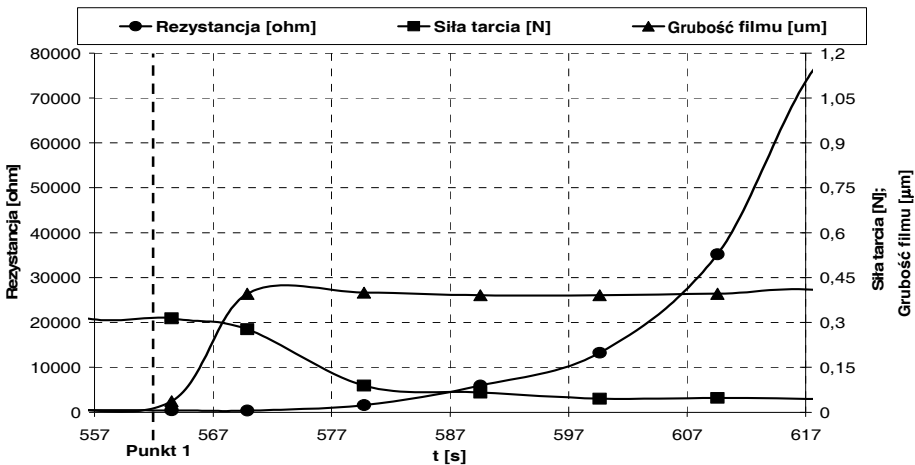
Rys. 5. Oddziaływanie prądu elektrycznego na strefę tarcia – pomiar siły tarcia z oddziaływaniem prądu elektrycznego na strefę tarcia. Parametry eksperymentu $v = 1$ [m/s], $T = 40$ [°C], $p = 25$ [MPa], środek smarowy – olej parafinowy, napięcie przyłożone do powierzchni trących 0–30 [V]

Fig. 5. The friction force measurement during electric current influence on friction zone. Parameters of experiment: $v = 1$ [m/s], $T = 40$ [°C], $p = 25$ [MPa], lubricating oil –paraffinic oil, electric tension 0–30 [V]

Należy wnioskować, iż poziom napięcia pomiarowego 20 [mV] nie wpływa w sposób widoczny na badania w zakresie warunków, gdzie występują intensywne zjawiska triboelektryczne.

WPLYW INTENSYWNYCH ZJAWISK TRIBOELEKTRYCZNYCH NA TWORZENIE WARSTWY GRANICZNEJ

Warstwa graniczna zaadsorbowana na powierzchni jest uporządkowana poprzez oddziaływanie energii powierzchni trącej, a to uporządkowanie powoduje wysoką rezystancję tej warstwy. Efekt porządkowania i wzrostu rezystancji opisany jest w publikacji [L. 9] i ilustruje to Rys. 6.



Rys. 6. Ilustracja procesu powstawania granicznego filmu olejowego. Punkt 1 – chwila, w której wiano środek smarowy (olej parafinowy)

Fig. 6. The illustration of oil film thickness measurement. Point 1 – the moment of lubricant addition

Analizując powyższy rysunek zauważa się, że wzrost grubości filmu w chwili wiania oleju jest powiązany ze spadkiem siły tarcia. Interesujące jest to, iż te zmiany nie mają charakteru skokowego i świadczą o konstytuowaniu się (po pewnym czasie) warstwy granicznej. Charakter tego konstytuowania w tej fazie nie jest znany. Należy przypuszczać, iż wysycanie energii (adsorpcja) do powierzchni cząsteczek środka smarowego wymaga pewnego czasu i o tym świadczy powolny spadek siły tarcia oraz powolne narastanie grubości filmu.

Problem powolnego konstytuowania się filmu granicznego (porządkowania cząsteczek) ilustruje zależność zarejestrowanej rezystancji na tym rysunku, na którym narastanie rezystancji rozpoczyna się z bardzo znaczącym opóźnieniem i łagodnym przebiegiem w stosunku do zaistniałych zmian siły tarcia i grubości filmu olejowego.

Ten powolny wzrost rezystancji świadczy o tym, że przebudowa struktury filmu granicznego do stanu uporządkowanego, który charakteryzuje się wysoką rezystancją, następuje powoli oraz że porządkują się cząsteczki nieobojętne elektrycznie, które w początkowej fazie bardzo dobrze przewodziły prąd elektryczny.

Można sądzić, iż nieuporządkowany film graniczny jest przewodny, co można uogólnić i postawić hipotezę, że nieuporządkowane i nieobojętne elektrycznie cząsteczki oleju (domniemywać można, że takowe zbierają się przy powierzchni) mają zdolność do przewodzenia prądu.

Z **Rys. 6** wynika, że rezystancja elektryczna nie jest związana z grubością filmu granicznego, a ukonstytuowany film graniczny (uporządkowany) charakteryzuje się wysoką rezystancją.

Podczas realizacji dalszego programu badań obciążano strefę tarcia z liniowym narastaniem nacisków jednostkowych, aby znaleźć warunki, w których film graniczny zacznie zmieniać swoje właściwości tribologiczne. Ilustrują to **Rysunki 1–4**.

Wzrastający nacisk jednostkowy powoduje wzrost grubości filmu olejowego przy równoczesnym spadku rezystancji strefy tarcia. Takie zachowanie środka smarowego w strefie tarcia sugeruje zmianę struktury, czyli stanu uporządkowania cząsteczek cieczy smarującej w strefie tarcia. Zmiana uporządkowania z pewnością wiąże się z występowaniem zjonizowanych, naelektryzowanych i polarnych cząsteczek środka smarowego, które lepiej przewodzą prąd, ale w przestrzeni są rozmieszczone chaotycznie tak jak to ma miejsce w początkowym okresie porządkowania pokazanym na **Rys. 2**.

Ponieważ wzrasta sumaryczna grubość filmu olejowego, to spadek rezystancji spowodowany jest zmniejszeniem grubości uporządkowanego (o wysokiej rezystancji) filmu granicznego, przy jednoczesnym wzroście nieuporządkowanych warstw triboelektrycznych.

Spadek grubości uporządkowanych warstewek granicznych (charakteryzowany spadkiem rezystancji) przy jednoczesnym wzroście siły tarcia świadczy o tym, że strefy poślizgu przybliżają się do powierzchni (silniejsze oddziaływanie energetyczne powierzchni), natomiast nieuporząd-

kowane warstwy triboelektryczne rozdzielają powierzchnie z warstwami granicznymi i nie odbywa się w nich tarcie.

Dodatkowym efektem, który w zasadzie nie pomaga nam wyjaśnić lepszej przewodności filmu olejowego, jest znaczny wzrost siły tarcia. Ten wzrost siły tarcia mówi nam o charakterze nowo powstałej struktury filmu i wskazuje na nieuporządkowanie warstewki triboelektrycznej.

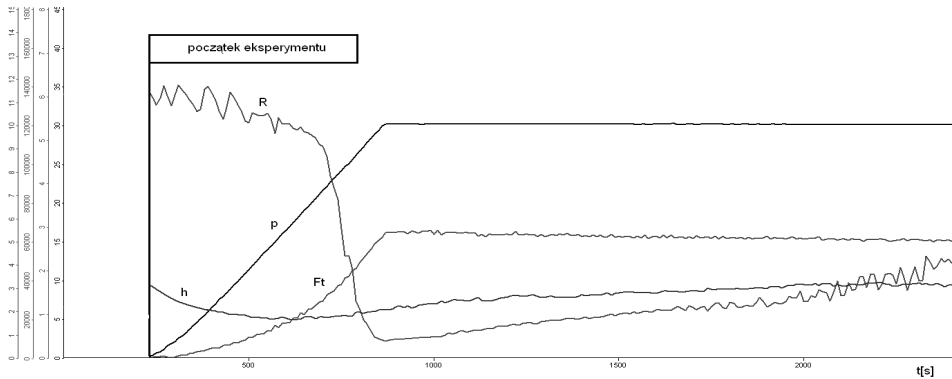
Spadek rezystancji w całym przekroju filmu olejowego związany jest z niszczeniem uporządkowanej warstwy granicznej, która jest nieprzewodząca. Dlatego też pojawienie się zjonizowanych, naelektryzowanych cząsteczek o wyższej energii wynikającej z cięższych warunków tarcia powoduje destrukcję uporządkowania warstwy granicznej (począwszy od warstw granicznych usytuowanych najdalej od powierzchni), mimo iż następuje sumaryczny wzrost grubości filmu olejowego związany z rozwojem warstwy triboelektrycznej.

Wypływa z powyższego następujący wniosek: proces tarcia odbywa się na granicy warstwy granicznej i warstwy intensywnych zjawisk triboelektrycznych, a opory tarcia zależą od odległości tej strefy od powierzchni tarcia. Powstające w strefie poślizgu cząsteczki o wysokiej energii wbudowują się w warstwę graniczną powoli zwiększając jej grubość i wytrzymałość, przy równoczesnym zmniejszeniu oporów tarcia, co prawdopodobnie wiąże się z większą odległością od powierzchni tarcia.

Ilustruje to **Rysunek 7**, na którym widać, jak odbudowuje się rezystancja i nieznacznie sumaryczna grubość filmu olejowego jak również zauważa się powolny spadek siły tarcia.

W trakcie badań otrzymano wyniki, które sugerują, że rzeczywista strefa tarcia (występująca na granicy warstwy granicznej i warstewek triboelektrycznych) generuje energię, która bierze udział w tworzeniu warstw triboelektrycznych, ale nie tylko; wysoko energetyczne cząsteczki powstałe w strefie poślizgu wbudowują się w warstwę graniczną, którą przebudowując czynią grubszą i wytrzymalszą.

Na **Rysunkach 7 i 9** pokazano eksperyment przeprowadzony w ustalonych warunkach nacisku, temperatury i prędkości, ale w dość długim czasie trwania. Na rysunku tym można zauważyć, iż powoli zwiększa się rezystancja strefy tarcia oraz jej grubość, a siła tarcia nieznacznie spada.

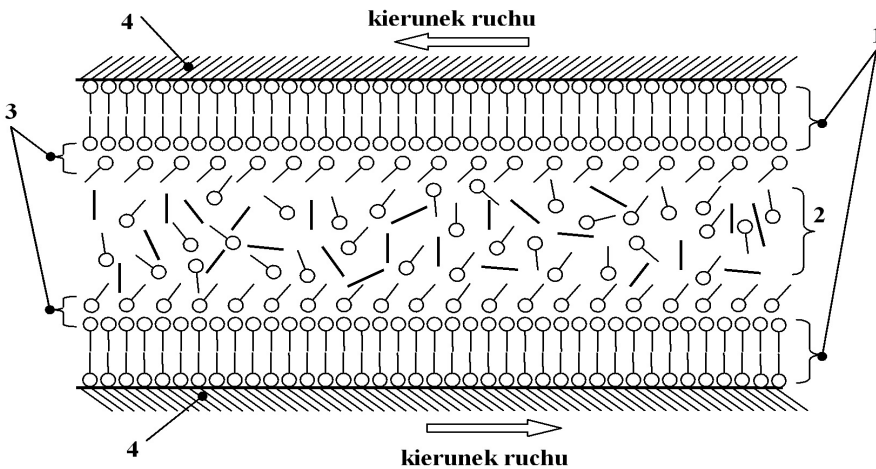


p – nacisk [MPa]; R – rezystancja [Ω]; h – grubość filmu olejowego [μm]; F_t – siła tarcia [N]

Rys. 7. Konstituowanie warstwy granicznej w czasie. Parametry eksperymentu $v = 1$ [m/s], $T = 40$ [$^{\circ}\text{C}$], $p = 30$ [MPa], środek smarowy – olej parafinowy

Fig. 7. The boundary layer formation $v = 1$ [m/s], $T = 40$ [$^{\circ}\text{C}$], $p = 30$ [MPa], lubricating oil – paraffinic oil

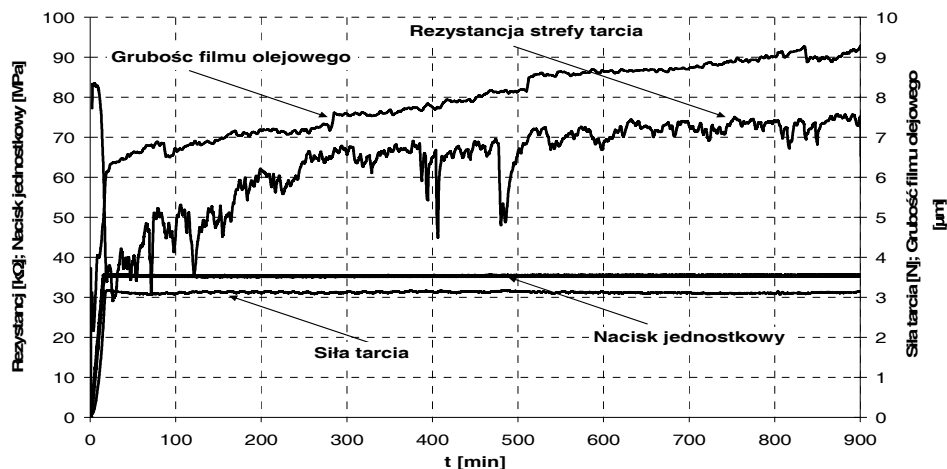
W celu zilustrowania powyższej koncepcji zjawisk triboelektrycznych posłużono się następującym modelem strefy tarcia opisywanym w publikacji [L. 9] i zamieszczonym na **Rysunku 8**.



Rys. 8. Model warstwy granicznej i warstwy triboelektrycznej w procesie tarcia: 1 – warstwa graniczna; 2 – warstwa triboelektryczna; 3 – strefy poślizgu; 4 – powierzchnie tarcie

Fig. 8. The model of boundary layer and triboelectrical layer during the friction process: 1 – boundary layer; 2 – triboelectrical layer; 3 – skid's zones; 4 – friction surfaces

Za pomocą tego modelu wyjaśniono, iż warstwa graniczna i warstwa, gdzie występują intensywne zjawiska triboelektryczne, są zbudowane z tych samych cząsteczek oleju, nieobojętne elektrycznie, a różnica polega na tym, że warstwa graniczna jest porządkowana siłami energii powierzchni, natomiast warstewki triboelektryczne są nieuporządkowane.

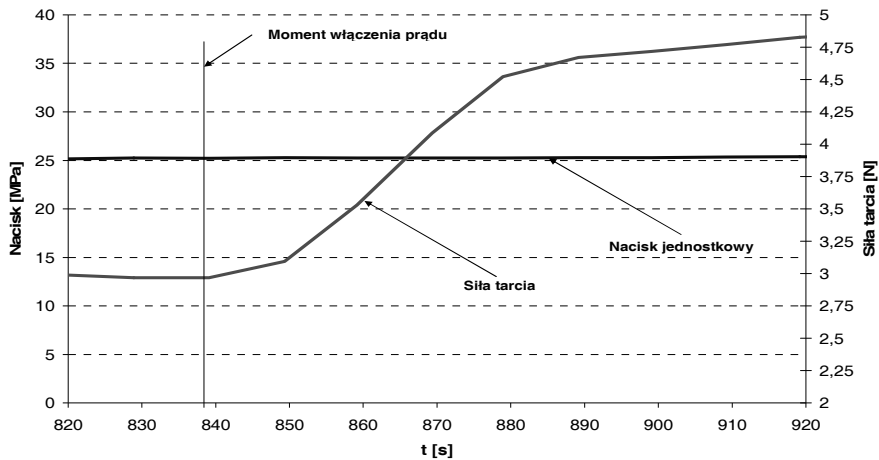


Rys. 9. Ilustracja narastania grubości filmu granicznego spowodowana czasem trwania próby

Fig. 9. The boundary layer generation vs. time

Wzrost rezystancji świadczy o tym, iż rośnie grubość warstwy granicznej (uporządkowanej). Ten fakt możemy tłumaczyć odbudową warstwy granicznej poprzez selektywne wbudowywanie się cząsteczek o właściwej energii, przez co warstwa graniczna staje się grubsza i wytrzymalsza na skutek lepszego uporządkowania. Przypuszczenie, iż jest to efekt lepszego porządkowania, wynika z faktu, że zauważone przez nas efekty porządkowania warstwy granicznej lub burzenia tego uporządkowania, przebiegają w dość długim czasie, co charakteryzuje procesy konstytuowania warstwy granicznej.

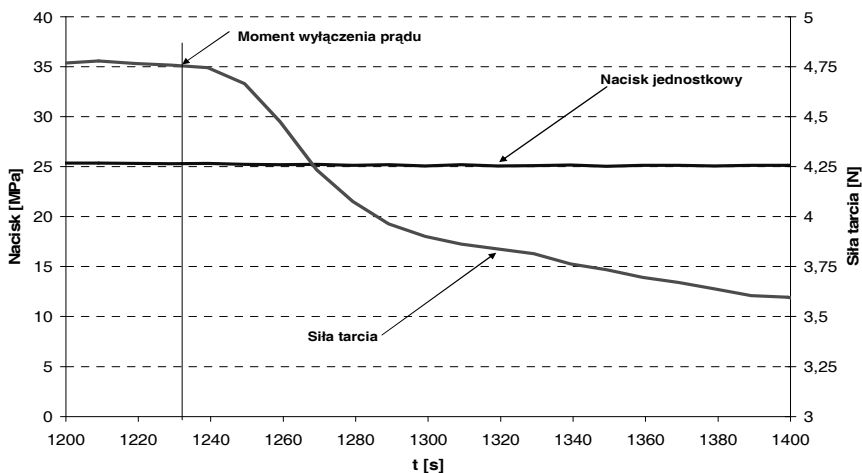
Dla uzupełniającego potwierdzenia przypuszczenia, że konstytuowanie warstwy granicznej (porządkowanie struktur) odbywa się w czasie, przeprowadzono następujący eksperyment: na ukonstytuowaną warstwę graniczną oddziaływano prądem elektrycznym o napięciu 1,1[V], który spowodował niszczenie warstwy granicznej. Po takim oddziaływaniu prądem elektrycznym wyraźnie wzrósł współczynnik tarcia, ale nastąpiło to w czasie 25 [s], co ilustruje **Rysunek 10**.



Rys. 10. Zmiana siły tarcia pod wpływem włączenia prądu elektrycznego; Parametry eksperymentu $v=0,5[m/s]$, $T=40[^\circ C]$, $p=25 [MPa]$, środek smarowy – olej parafinowy

Fig. 10. The friction force change under influence of electric current turning on

Odłączenie prądu od strefy tarcia spowodowało zmniejszenie współczynnika tarcia, ale (naturalna – bez ingerencji z zewnątrz) odbudowa właściwości warstwy granicznej następuje po bardzo długim czasie 300 [s]. Ilustruje to **Rysunek 11**.



Rys. 11. Zmiana siły tarcia pod wpływem wyłączenia prądu elektrycznego; Parametry eksperymentu $V = 0,5[m/s]$, $T = 40[^\circ C]$, $P = 25 [MPa]$, środek smarowy – olej parafinowy

Fig. 11. The friction force change under influence of electric current turning off

WNIOSKI

Warstwy graniczne i warstwy triboelektryczne zbudowane są z nie-obojętnych elektrycznie cząsteczek środka smarowego. Różnią się natomiast stanem uporządkowania spowodowanym oddziaływaniem energii powierzchni porządkującej struktury warstw granicznych. W pewnej odległości po jej zaniku zanika również uporządkowanie tych warstw. Brak uporządkowania charakteryzuje warstwy triboelektryczne, co przejawia się wysoką przewodnością elektryczną.

LITERATURA

1. Kostecki B.J., Natanson M.E., Bierszadzki L.I.: Mechanochemiczne procesy przy tarcu granicznym, Nauka, Moskwa 1972.
2. Stolarski T.: Zjawiska mechanochemiczne towarzyszące tarcu łożyska ślizgowego smarowanego mieszaniną smaru ŁT4 i policzterofluoroetyleny, Inżynieria łożyskowania, Politechnika Gdańska 1976.
3. Szczerek M., Wiśniewski M.: Tribologia, tribotechnika, PTT 2000.
4. Marczak R.: Fizykochemia procesu tarcia.: Tribologia, t. 5, 2000.
5. Krawczyk K., Firkowski A., Nowiński E., Chojnacka A., Stępniewski M., Polit W., Klasek T.: Ocena zmian grubości filmu olejowego w badaniach tribologicznych, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów PW nr 2/2010.
6. Kajdas C., Krawczyk K., Nita J.: Metod and device for testing lubricating properties of lubricating means, Patent USA nr 4311036, 1981.
7. Kajdas C., Krawczyk K., Nita J.: Sposób i układ do pomiaru własności smarnych środków smarowych, Patent polski nr p202886, 1980.
8. Kajdas C., Krawczyk K., Nita J.: Methode und Gerät für Berstimmung fürtribologischen Eigenschaften von Schmierstoffen, Patent Niemiecki nr G-7364644, 1981.
9. Krawczyk K.: Zjawiska triboelektryczne w warstewce rozdzielającej powierzchnie trące podczas tarcia ślizgowego, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów PW nr 2/2010.
10. Nakayama K.: Triboemission of charged particles from various solids under boundary lubrication conditions. Wear 178, 1994.
11. Harvey T., Wood R., Denuault G.: Investigation of electrostatic charging mechanisms in oil lubricated tribo-contact. Tribology International 35, 2002.
12. Hang Y., Yur J., Chou H.: Tribo-electrification mechanisms for self mated carbon steels in dry severe wear process. Wear 260, 2006.

Recenzent:
Dariusz OZIMINA

Summary

The aim of this paper is to reveal the mechanism of boundary layer formation.

Significant concentrations of electrified particles, ions and non-neutral particles appear in the friction zone in appropriate conditions. Above particles cause intensive triboelectric phenomena and form as a separate layer conducting electric current and generates particles of elevated energy in the sliding zone that influence the boundary layer.

