

Juliusz B. GAJEWSKI*, **Marek J. GŁOGOWSKI****,
Wojciech WIELEBA***

**WPLYW POLA ELEKTRYCZNEGO NA TARCIE
WYBRANYCH ELASTOMERÓW PO STALI
W ŚRODOWISKU SILNIKOWYCH OLEJÓW
BAZOWYCH**

**THE EFFECT OF AN ELECTRIC FIELD ON THE FRICTION
OF SELECTED ELASTOMERS AGAINST STEEL IN A MOTOR
BASE OIL'S ENVIRONMENT**

Słowa kluczowe:

„pin-on-disc”, tarcie, pole elektryczne, olej bazowy, elastomer, dodatek uszlachetniający

Key words:

„pin-on-disc”, friction, electric field, base oil, elastomer, additive

* Katedra Inżynierii Kriogenicznej, Lotniczej i Procesowej, Politechnika Wroclawska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Polska, e-mail: juliusz.b.gajewski@pwr.edu.pl, tel. 71 320 32 01.

** Katedra Inżynierii Kriogenicznej, Lotniczej i Procesowej, Politechnika Wroclawska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Polska, e-mail: marek.glogowski@pwr.edu.pl, tel. 71 320 27 93.

*** Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Tribologii, Politechnika Wroclawska, ul. Łukasiewicza 7/9, 50-371 Wrocław, Polska, e-mail: wojciech.wieleba@pwr.edu.pl, tel. 71 320 2774.

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań nad wpływem zewnętrznego stałego pola elektrycznego na współczynnik tarcia wybranych elastomerów podczas tarcia o powierzchnię stalową na stanowisku „pin-on-disc”. W celach porównawczych prowadzono także badania bez zewnętrznego pola elektrycznego. W badanym układzie stosowano próbki trzech różnych elastomerów, syntetyczne oleje bazowe PAG i PAO oraz ich mieszaniny z dodatkami uszlachetniającymi – przeciwzatarciowym (ZDDP) i modyfikatorem tarcia (IRGALUBE F10A), a także stalowy przeciwelement. Wybrane do badań elastomery stosowane są do wytwarzania uszczelnień wargowych. Stwierdzono, że zewnętrzne stałe pole elektryczne istotnie wpływa na współczynnik tarcia, a wielkość tego wpływu zależy od rodzaju elastomeru oraz oleju bazowego i jego mieszanin z dodatkami uszlachetniającymi.

WPROWADZENIE

Tarcie występujące w węźle tarcia, czyli przedmiotowym układzie międzyfazowym: próbka elastomeru–olej–przeciwelement stalowy („pin-on-disc”) powoduje zużycie materiału i straty energii. Jednocześnie maleje ono wraz ze zmniejszaniem się lepkości oleju, co z kolei jest wyraźnie powiązane ze wzrostem temperatury oleju. Ten łańcuch zależności pokazuje, że temperatura oleju jest ważnym czynnikiem przyczyniającym się do zmian sił tarcia.

Aby uzyskać zmniejszenie tarcia i jego skutki, stosuje się różne dodatki uszlachetniające i modyfikatory tarcia dodawane do olejów bazowych w procesie blendowania. Dodatki te są przeznaczone do poprawiania właściwości eksploatacyjnych olejów silnikowych, w tym zmniejszania tarcia i zużycia materiałów. Są to środki przeciwzużyciowe, antyutleniacze, detergenty, poprawiacze indeksu lepkości, inhibitory korozji i wiele innych. Niektóre z nich mają wpływ na właściwości fizyczne cieczy bazowych, inne dają skutek chemiczny. Często wpływają nawzajem na siebie, dając skutek synergiczny. Niestety ich połączenie może także prowadzić do antagonistycznych reakcji, jakkolwiek są one obecnie silnie zmniejszane [L. 1, 2]. Te związki chemiczne tworzą złożone struktury i warstwy na powierzchniach metalowych.

W normalnych, dynamicznych warunkach pracy występują silne odkształcenia, które powodują miejscowe zmiany gęstości materiału stałego i skutkują jego elektryzacją. W dodatku niejednorodność w budowie chemicznej materiału na powierzchni tarcia może przyczynić się do występowania zjawisk elektrochemicznych. W ten sposób pojawiają się mikro- i multielektrodowe układy elektrochemiczne, które są wewnętrznymi źródłami energii elektrycznej ściśle związanymi z przenoszeniem elektronów na granicy faz. Dlatego

też w procesie tarcia występuje triboelektryzacja, a pole elektryczne tworzy się niejako w sposób naturalny [L. 3].

Zewnętrzne stałe i zmienne pola elektryczne mają podobny wpływ na układ tribologiczny. Przenoszenie ładunku może zmieniać stan energetyczny całego układu międzyfazowego, włączając w to granicę faz.

Energia elektryczna w obu przypadkach może odgrywać znaczącą rolę w tworzeniu się warstwy granicznej na powierzchni materiału. Wewnętrzne i zewnętrzne pola elektryczne również uporządkowują i wpływają na budowę podwójnych warstw elektrycznych lub warstw w przypadku odpowiednio rozтворów lub układów typu koloidalnego. Zawsze na granicach faz między powierzchnią wału i filmem olejowym występuje różnica potencjałów. W warunkach statycznych różnica potencjałów przedstawia elektryczną warstwę podwójną. Podczas ruchu względnego i występowania tarcia w węzle warstwa podwójna ulega zaburzeniu, jak się sądzi, a miejscowa gęstość ładunku może być inna niż w innych miejscach i wpływać na budowę warstwy powierzchniowej.

Dialkilditiofosforan cynku (ZDDP) jest środkiem przeciwzużyciowym (*antiwear* – AW) i antyuleniającym, a także inhibitorem korozji. Na smarowanych olejami komercyjnymi metalowych powierzchniach części maszyn współpracujących ślizgowo tworzy warstwę monomolekularną (jednocząsteczkową) we względnie niskiej temperaturze. Absorpcja chemiczna rozpoczyna się w podwyższonej temperaturze [L. 4]. Skład i grubość warstwy zależy od temperatury i intensywności procesu tarcia [L. 1, 5].

Modyfikator tarcia (*frictionmodifier* – FM) jest dodatkiem modyfikującym właściwości tarcia środka smarnego (tutaj oleju smarnego). W przypadku silnikowych środków smarnych i olejów przekładniowych jego podstawowymi funkcjami są: zmniejszenie tarcia, minimalizowanie zużycia i hałasu oraz obniżenie strat energii (mocy). W cieczach transmisyjnych i hydraulicznych modyfikatory tarcia ułatwiają włączenie i wyłączenie sprzęgieł i cięgien, aby zapewnić ich płynne i wolne od hałasu działanie [L. 6]. Dodatki FM są typowo polarnymi związkami chemicznymi mającymi wysokie powinowactwo do metalowych powierzchni i posiadającymi długie łańcuchy alkilowe. Organiczne FM są cząsteczkami o długich łańcuchach z niepolarnym łańcuchem węglowodorowym i polarną grupą końcową. Łańcuchy węglowodorowe rozciągają się do wnętrza oleju smarnego, podczas gdy polarne końcowe grupy albo adsorbują się fizycznie na powierzchni metalu, albo reagują z nią chemicznie. Łańcuchy kojarzą się ze sobą i z olejem smarnym w celu utworzenia trwałej warstwy smarnej.

Na rozkład i trwałość warstw ZDDP występujących na metalowej powierzchni (tutaj stalowej) i na ich tribologiczne zachowanie mają wpływ natura samego ZDDP oraz polarność oleju bazowego. Stwierdzono mianowicie, że w przypadku niektórych mineralnych niepolarnych olejów bazowych dodanie

do nich polarnych cząsteczek ZDDP tworzy znacznie szybciej tribowarstwę i jest ona grubsza niż dla mieszanin ZDDP z syntetycznymi olejami polarnymi [L. 7]. Właściwość ZDDP zwiększa prawdopodobieństwo, że w przypadku niepolarnego oleju bazowego więcej cząsteczek ZDDP dotrze do stalowej powierzchni. Jest to związane z lepszą rozpuszczalnością ZDDP w tego typu oleju [L. 8]. Takie zachowanie się mieszanin ZDDP z olejami bazowymi może ułatwić tłumaczenie określonego ich zachowania się w warunkach dynamicznych.

Oleje bazowe należące do tej samej grupy, np. syntetyczne – polarne i niepolarne, różnią się między sobą składem chemicznym w zależności od producenta, co powoduje, że jakakolwiek analiza lub wyjaśnianie różnych zjawisk jest trudne. Dlatego brakuje jak dotąd ogólnej, spójnej teorii na temat zjawisk i ich mechanizmów, wzajemnych oddziaływań, elektryczności statycznej, elektro- i tribochemii istniejących w układach międzyfazowych podobnych do będących przedmiotem prezentowanych tutaj badań.

Jak dotąd analiza literatury przedmiotu i dyskusje prowadzone podczas konferencji naukowych dotyczących rozważanego przedmiotu badań nie dają jednoznacznych odpowiedzi na pytania o przebieg rzeczywistych procesów i zjawisk oraz mechanizmów nimi rządzących, szczególnie w warunkach dynamicznych. Badania nad tworzeniem się tribowarstw na powierzchni par ślizgowych elastomer–metal w obecności różnych olejów komercyjnych bazowych oraz z dodatkami uszlachetniającymi i ich wyniki nie dają wprost ich właściwej interpretacji i możliwości wyciągania wniosków dotyczących zjawisk zachodzących w przedmiotowym węźle tarcia, czyli układzie międzyfazowym: elastomer–olej–stalowy element współpracujący.

STANOWISKO BADAWCZE

Na **Rysunku 1** pokazano schemat stanowiska do badań tribologicznych na bazie tribometru T-01 M. Próbkę elastomeru (1) umieszczano w oprawce (2) na przeciwelemencie stalowym (3), który znajduje się na wrzecionie (4). Jest on mocowany do wrzeciona za pomocą śruby mocującej (5). Obrotowi ramienia przeciwdziała czujnik siły (10) zamocowany do obudowy stanowiska. Został on umieszczony w kierunku działania siły tarcia. W skład stanowiska wchodzi także falownik (11), wyłącznik bezpieczeństwa (12), rejestrator (13) siły tarcia oraz kamera cyfrowa (14).



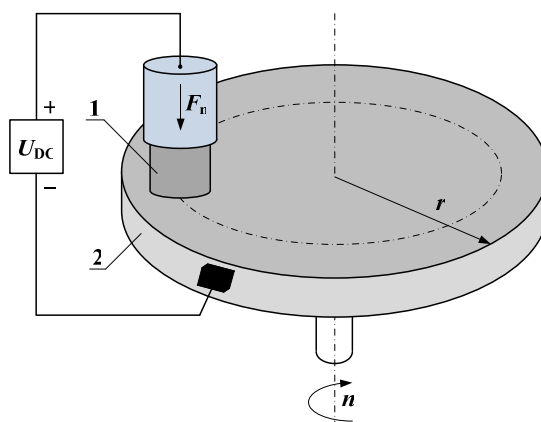
Rys. 1. Stanowisko badawcze do badań tribologicznych na bazie tribometru T-01M. Opis w tekście

Fig. 1. Tribotester for tribological tests based on the tribometer T-01 M. Description in the text

METODA POMIAROWA

Badania współczynnika tarcia i zużycia elastomerów w warunkach bez pola elektrycznego i z wymuszonym stałym zewnętrznym polem elektrycznym przeprowadzono w układzie „pin-on-disc”, którego schemat przedstawiono na **Rysunku 2**. Próbki badanych materiałów elastomerowych w kształcie sworznia o średnicy 6 mm wykonano z prefabrykatów. Podczas badań próbki współpracowały ślizgowo z tarczą wykonaną ze stali C45 o twardości HRC 58 i chropowatości $R_a = 0,3 \mu\text{m}$. Przed pomiarami każdą próbkę elastomerową docierano na tribometrze z takim samym obciążeniem, jakie występowało pod-

czas właściwych badań. Smarowanie odbywało się za pomocą nasączonej środkiem smarnym filcowej płytki.



Rys. 2. Schemat pary ślizgowej typu sworzeń-tarcza: 1 – próbka polimerowa, 2 – wirująca stalowa tarcza

Fig. 2. Schematic of the friction pair of a pin-disc type: 1 – polymer sample, 2 – rotating steel disc

W celu przeprowadzenia badań, w których między elastomerową próbką i tarczą wytwarzano stałe pole elektryczne, uchwyt próbki odseparowano galwanicznie od pozostałych metalowych części tribometru i podłączono do niego dodatni biegun zasilacza, a ujemny biegun zasilacza podłączono za pomocą węglowej szczotki do wirującej tarczy. Układ zasilany był napięciem o wartości $U = 500$ V. Ze względu na ograniczoną wytrzymałość elektryczną węzła tarcia: elastomerowa próbka–olej–tarcza nie można było zastosować wyższego napięcia. Na podstawie badań wstępnych przyjęto, że siła nacisku będzie wynosić $F_n = 9,81$ N, prędkość ślizgania $v = 1$ m/s, a droga tarcia $s = 1000$ m. Dla każdej pary ciernej badania powtarzano 5-krotnie, co daje łącznie 5000 m drogi tarcia.

MATERIAŁY

Badania intensywności zużycia i współczynnika tarcia przeprowadzono dla trzech różnych elastomerów stosowanych na ruchowe uszczelnienia techniczne. Próbki elastomerowe oznaczono następująco:

- 70F wykonane z gumy na bazie kauczuku fluorowego (FPM),
- 70SI wykonane z gumy na bazie kauczuku metylo-winylo-silikonowego (MVQ),
- 70A wykonane z gumy na bazie kauczuku butadienowo-akrylonitrylowego (NBR).

Do smarowania zastosowano następujące bazowe syntetyczne oleje silnikowe (**Tabela 1**) i ich mieszaniny z dodatkami AW (antyzużyciowy) i FM (modyfikator tarcia):

- PAO6 — olej bazowy czysty oraz mieszanina z 0,5% AW i z 0,5% FM,
- PAG ROKOLUB 68 — olej bazowy czysty oraz mieszanina z 0,5% AW i 0,5% FM.

Do bazowych olejów dodawano:

- dialkilditiofosforan cynku (ZDDP), który charakteryzował się następującymi cechami: lepkość kinematyczna odpowiednio 320 i 14 $\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ w 40 i 100°C oraz zawartość fosforu 9,5% i cynku 10,6%,
- modyfikator tarcia IRGALUBE F10A, który charakteryzował się lepkością kinematyczną 400 $\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ w 40°C.

Oba dodatki mają szerokie zastosowanie w olejach silnikowych i przekładniowych.

Tabela 1. Specyfikacja badanych olejów

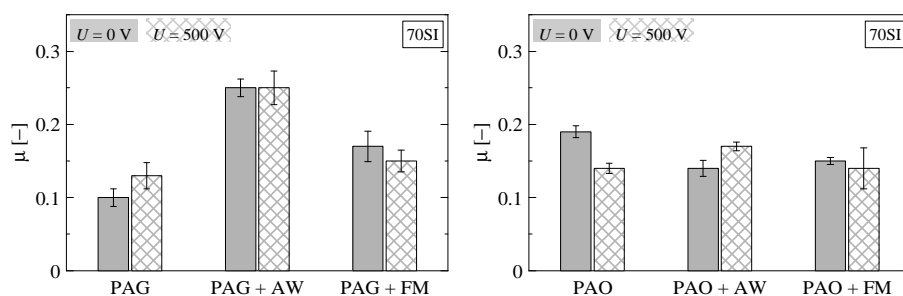
Table 1. Specification of the oils tested

Wielkości i jednostki	PAG	PAO
Lepkość kinetyczna		
w 40°C	56,4	30,2
w 100°C $[\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}]$	10,5	5,8
Wskaźnik lepkości [-]	176	138
Gęstość w 15°C $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	990 w 20°C	825
Rezystywność		
w 40°C	$1,3 \times 10^7$	$2,6 \times 10^{11}$
w 100°C $[\Omega\cdot\text{m}]$	$3,5 \times 10^6$	$6,4 \times 10^{10}$
Przenikalność elektryczna		
w 40°C	5,8	1,9
w 100°C [-]	5,1	1,9

WYNIKI BADAŃ I ICH DISKUSJA

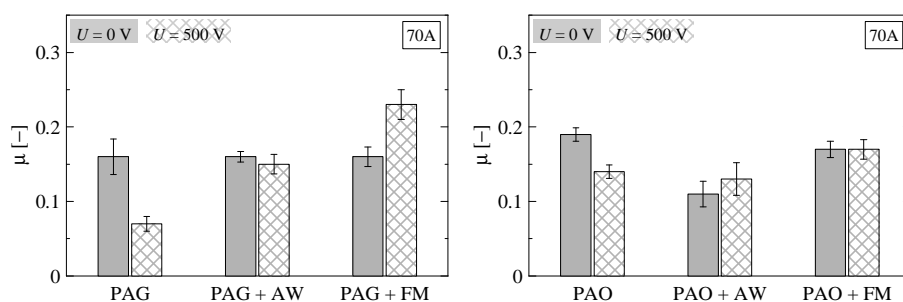
Na **Rysunkach 3–5** przedstawiono zależności współczynnika tarcia μ badanych elastomerów w obecności olejów bazowych z i bez dodatków uszlachetniających dla układu tribologicznego z naturalnym polem elektrycznym i wymuszonym stałym polem elektrycznym.

Wyniki pomiarów zamieszczone na **Rysunkach 3 i 4** obrazują niewielki wpływ zewnętrznego stałego pola elektrycznego na współczynnik tarcia głównie dla olejów bazowych. Największe zmniejszenie współczynnika tarcia, o prawie 60% obserwuje się dla elastomeru 70A w obecności oleju bazowego PAG. Największy wzrost współczynnika tarcia zachodzi dla elastomeru 70A i oleju PAG + FM i wynosi 19%.



Rys. 3. Współczynnik tarcia dla elastomeru 70SI po stali w naturalnym oraz wymuszonym polu elektrycznym

Fig. 3. Coefficient of friction for elastomer 70SI sliding on steel under the natural electric field and external DC electric field

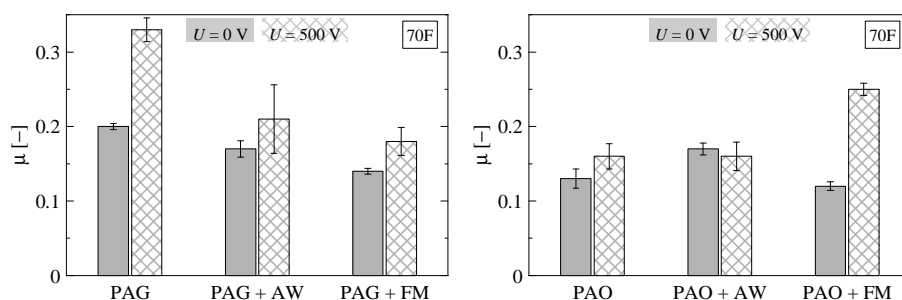


Rys. 4. Współczynnik tarcia dla elastomeru 70A po stali w naturalnym oraz wymuszonym polu elektrycznym

Fig. 4. Coefficient of friction for elastomer 70A sliding on steel under the natural electric field and external DC electric field

Dla elastomeru kauczukowo-fluorowego 70F (**Rys. 5**) widać duże zmiany współczynnika tarcia pod wpływem stałego pola elektrycznego. Dla oleju z dodatkiem AW wyniki nie są jednoznaczne. Największy wzrost współczynnika tarcia obserwuje się dla bazowego oleju PAG i oleju PAO + FM, a zmiany wynoszą odpowiednio 53 i 92%.

Interpretacja wyników jest trudna do przeprowadzenia, ponieważ przyczyną zmian współczynnika tarcia mogą być: niewłaściwe smarowanie spowodowane przerywaniem filmu olejowego podczas ruchu obrotowego tarczy (mała wydajność układu smarowania), a także występowanie tarcia granicznego na styku elastomer–wirująca tarcza. Przykładem są wyniki pokazane na **Rysunku 3**, gdzie dla bazowego PAG i dodatku FM współczynnik tarcia μ jest większy niż dla oleju bazowego PAG. Dla pozostałych przypadków dodatek FM powodował zmniejszenie współczynnika tarcia lub brak zmiany jego wartości.



Rys. 5. Współczynnik tarcia dla elastomeru 70F po stali w naturalnym oraz wymuszonym polu elektrycznym

Fig. 5. Coefficient of friction for elastomer 70F sliding on steel under the natural electric field and external DC electric field

Analiza wyników otrzymanych podczas pomiarów na goniometrze [L. 9] pokazuje, że energia powierzchniowa badanych elastomerów ma wpływ na współczynnik tarcia (Rys. 3–5 dla $U = 0$ V). Im większa jest energia powierzchniowa, tym mniejszy jest współczynnik tarcia, co można tłumaczyć faktem silnego związania filmu olejowego z elastomerem, a tym samym prawdopodobnie zachodzi w układzie zwiększenie udziału tarcia płynnego w tarcu mieszanym. Wcześniejsze badania własne wykazały, że największą wartość energii powierzchniowej wykazuje elastomer 70A, a najmniejszą – elastomer 70SI.

PODSUMOWANIE

Analiza uzyskanych wyników badań wykazuje istotny wpływ zewnętrznego pola elektrycznego na wartości współczynnika tarcia par ślizgowych elastomer–stal współpracujących ze sobą w warunkach tarcia mieszanego w obecności olejów bazowych, zwłaszcza gdy nie zawierały one dodatków. Uzyskane rezultaty umożliwiają przedstawienie następujących spostrzeżeń:

- największy wpływ pola elektrycznego na zmniejszenie tarcia zaobserwowano dla elastomeru (gumy) 70A na bazie kauczuku butadienowo-akrylonitrylowego (NBR) współpracującego ślizgowo ze stalą w obecności czystych olejów bazowych PAG oraz PAO,
- w przypadku elastomerów na bazie kauczuku fluorowego (FPM) oraz kauczuku metylo-winylo-silikonowego (MVQ) pole elektryczne przyczyniało się w większości przypadków do zwiększenia wartości współczynnika tarcia po stali w obecności olejów,
- stosowane w badanych olejach dodatki – antyżużyciowy ZDDP i modyfikator tarcia IRGALUBE F10A – w większości przypadków przyczyniały się do zwiększenia współczynnika tarcia w obecności zewnętrzne-

go pola elektrycznego w badanych parach ślizgowych. Wynika stąd, że ich obecność jest niewskazana w aspekcie zmniejszenia oporów tarcia, jeżeli w węzle tarcia występuje zewnętrzne pole elektryczne.

Przyczyną zaobserwowanych zmian współczynnika tarcia badanych materiałów jest prawdopodobnie zmiana energii powierzchniowej współpracujących ślizgowo materiałów i/lub zmiany własności smarnych olejów w obecności zewnętrznego pola elektrycznego. Przedstawione badania miały charakter badań wstępnych. Bardziej precyzyjne wyjaśnienie otrzymanych wyników wymaga kontynuacji badań tribologicznych par polimer–metal w obecności pola elektrycznego. Również wymagane byłoby przeprowadzenie dodatkowych badań dotyczących wpływu pola elektrycznego na energię swobodną powierzchni polimerów oraz na własności smarne samych bazowych olejów silnikowych, a także zawierających dodatki AW i FM.

LITERATURA

1. Nicholls M.A., Do T. et al.: Review of the lubrication of metallic surfaces by zinc dialkyldithiophosphates. *Tribology International*, 38, (2005), 15.
2. OECD Series on Emission Scenario Documents No. 10: Emission scenario document on lubricants and lubricant additives. OECD Environmental Health and Safety Publications, ENV/JM/MONO(2004)21.
3. Płaza S., Margielewski L., Celichowski G.: Wstęp do tribologii i tribochemia. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 2005.
4. Booth J.E., Nelson K.D. et al.: The feasibility of using electrostatic monitoring to identify diesel lubricant additives and soot contamination interactions by factorial analysis. *Tribology International*, 39, (2006), 1564.
5. Fujita H., Spikes H.A., The formation of zinc dithiophosphate antiwear film, *Proc. Inst. Mech. Eng.* 218 Part J, (2004), 265.
6. Syed Q.A., Rizvi A.: *Comprehensive Review of Lubricant Chemistry, Technology, Selection, and Design*. ASTM International, (West Conshohocken), PA, USA, 2009.
7. Naveira Suarez A., Grahn M. et al.: The influence of base oil polarity on the tribological performance of zinc dialkyldithiophosphate additives. *Proc. 2nd Int. Conf. on Advanced Tribology "Tribology for Tomorrow" iCAT 2008, Singapore, 3–5 December 2008*, 419.
8. Bessette P.A. (prezydent Triboscience and Engineering, Inc., Fall River, MA, USA) – Informacja ustna z 3 grudnia 2008, Singapur podczas The 2nd International Conference on Advanced Tribology "Tribology for Tomorrow" i CAT 2008.
9. Paszkowski M., Wieleba W., Wróblewski R.: Badania właściwości adhezyjnych stali oraz tworzyw sztucznych w kontekście zastosowania ich na węzły tarcia. *Tribologia*, 5, (2010), 95.

Summary

The paper presents the experimental results of research on the effect of an external DC electric field on the coefficient of friction of selected elastomers during their rubbing against a steel surface in the “pin-on-disc” experimental set-up. The tests were also carried out without any external DC electric field to compare the coefficients of friction obtained in both cases. In the tests, three different elastomers were used: pure PAG and PAO synthetic base oils and their blends with two additives – antiwear (ZDDP) and friction modifier (IRGALUBE F10A), and a steel counterface. The elastomers selected and used in the tests are those applied to the manufacture of rotary lip seals. It was found that the external DC electric field exerts a significant effect on the coefficient of friction, which in turn depends on the type of elastomer and the base oil and its blends with the additives used.

