

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

OCENA WPŁYWU POTENCJAŁU ELEKTRYCZNEGO INDUKOWANEGO W UKŁADZIE MIĘDZYFAZOWYM OBRACAJĄCY SIĘ WAŁ–OLEJ–USZCZELNIENIE WARGOWE NA MOMENT HAMUJĄCY

THE ASSESSMENT OF AN EFFECT OF ELECTRICAL POTENTIAL INDUCED IN A ROTATING SHAFT-OIL-LIP SEAL SYSTEM ON BRAKING TORQUE

Słowa kluczowe:

potencjał elektryczny, moment hamujący, uszczelnienie wargowe, olej smarny, podwójna warstwa elektryczna

Key words:

electrical potential, braking torque, lip seal, lubricating oil, electric double layer

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów potencjału elektrycznego i momentu hamującego w układzie obracający się wał–olej–uszczelnienie wargowe. Podczas ruchu obrotowego wału w wyniku triboelektryzacji są generowane ładunki

* Politechnika Wroclawska, Instytut Inżynierii Lotniczej, Procesowej i Maszyn Energetycznych, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Polska, e-mail: juliusz.b.gajewski@pwr.edu.pl, tel. 71 320 32 01; e-mail: marek.glogowski@pwr.edu.pl, tel. 71 320 27 93.

elektryczne, które wytwarzają pole elektryczne w filmie olejowym. Część linii pola elektrycznego wytwarzanego przez naelektryzowane cząstki oleju zamyka się do pierścienia usztywniającego uszczelnienia wargowego i indukuje w nim potencjał elektryczny, który jest mierzony elektrometrem. Wartość i znak potencjału elektrycznego zależy od rodzaju oleju, prędkości obrotowej wału i temperatury oleju. Pod działaniem siły *Coulomba* część naelektryzowanych cząstek oraz cząstki polarne są przyciągane do powierzchni wału, gdzie już istnieje *elektryczna warstwa podwójna*, którą dodatkowe ładunki „wzmacniają”. Położenie i wartość pozostałej części ładunków elektrycznych w objętości oleju ma charakter stochastyczny i rozkład ładunków nie jest jednorodny wskutek dyfuzji cząsteczek i ruchu cieczy, wywołanego ruchem obrotowym wału. W związku z tym można się spodziewać, że w filmie olejowym mogą występować lokalne zagęszczenia i rozrzedzenia oleju, a tym samym wzrosty lub spadki jego lepkości, co z kolei implikuje wzrost lub spadek wartości momentu hamującego.

WPROWADZENIE

Ciała nienaelektryzowane po zetknięciu z innymi ciałami obojętnymi albo naelektryzowanymi stają się naładowane. Ładunki na nich, tzn. na ich powierzchniach, mają taką samą wartość, ale różnią się znakiem. Elektryzacja na granicy dwóch różnych ciał jest wynikiem między innymi powstania *elektrycznej warstwy podwójnej*. Proces tworzenia się warstwy podwójnej jest związany z występowaniem takich zjawisk jak: dysocjacja, iniekcja, adsorpcja i innych.

W cieczech i ich roztworach warstwa podwójna jest rozmyta, ponieważ jony przeciwnych znaków podlegają zarówno przyciąganiu elektrostatycznemu, jak i ruchowi chaotycznemu, którego intensywność silnie zależy od temperatury. Warstwy tej nie można zatem traktować jako płaskiego kondensatora, jak stwierdzili *Gouy [L. 1]* i *Chapman [L. 2]*.

Warstwa podwójna w przypadku cieczy jest związana z nieruchomą warstwą jonów przyciąganych do powierzchni ciała stałego siłami elektrostatycznymi *Coulomba* oraz adhezji. Potencjał warstwy zmienia się liniowo. Grubość warstwy podwójnej δ ocenia się na podstawie wzoru Frenkla

$$\delta = \sqrt{D\tau} \quad (1)$$

D – współczynnik dyfuzji molekularnej, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$,

τ – czas relaksacji ładunków elektrycznych, s.

Wzór ten ma charakter uniwersalny, gdyż można go stosować do układów ciało stałe–ciecz (roztwór) i ciało stałe–ciało stałe.

Jony w cieczy (roztworze) dyfundują do powierzchni metalu, gdzie niektóre z nich zostają zaadsorbowane. Ze względu na nieduże prawdopodobieństwo, że jony dodatnie i ujemne mają taki sam współczynnik adsorpcji można przyjąć, że powierzchnia metalu adsorbuje w nadmiarze jony określonego znaku. Jeśli powierzchnia metalu adsorbuje jony dodatnie, wówczas nadmiar jonów ujemnych znajduje się w cieczy. Pole elektryczne między dodatnimi ładunkami metalu i ujemnymi jonami w objętości cieczy powoduje odpływanie jonów dodatnich od powierzchni granicznej, podczas gdy jony ujemne są przyciągane. Proces trwa tak długo, aż nastąpi równowaga dynamiczna między jonami dryfującymi w polu elektrycznym i dyfuzją jonów przeciwnego znaku wywołaną gradientem koncentracji jonów. Stan równowagi między jonami dodatnimi i ujemnymi w pobliżu powierzchni granicznej przedstawia się następująco: część warstwy podwójnej tworzą jony ujemne w objętości cieczy, których koncentracja maleje wykładniczo w głąb objętości cieczy. W warstwie adsorpcyjnej koncentracja jonów jest stała. Rozkład potencjału zarówno w metalu, jak i w warstwie adsorpcyjnej jest taki sam i stały, natomiast w głąb objętości cieczy maleje wykładniczo.

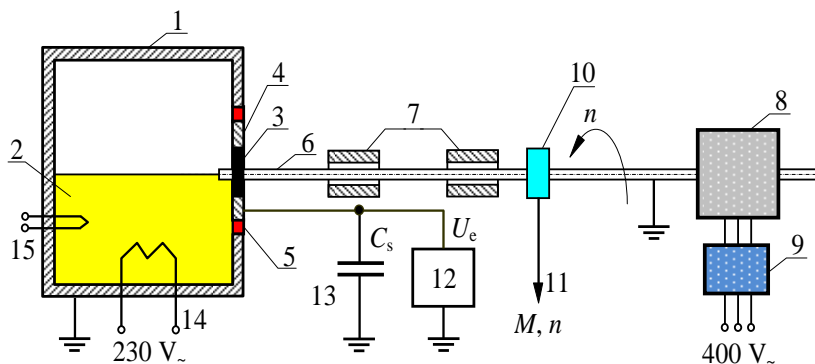
Jeśli w układzie np. tribologicznym wystąpi ruch elementów wężła tarcia, to warstwa ta jest zakłócana i może występować miejscowa koncentracja ładunków, które mogą wpływać na przemiany i budowę warstwy podwójnej [L. 3].

Badania własne autorów [L. 4, 5] przeprowadzone na stanowisku do badań uszczelnień współpracujących z elementami wirującymi wykazały, że istnieje triboelektryzacja naturalna oleju podczas ruchu obrotowego wału. W zależności od materiału, z jakiego wykonano wargę uszczelnienia, rodzaju oleju i komponentów w nim zawartych, np. ZDDP i innych, jego temperatury triboelektryzacja może osiągać różne wartości i znaki.

STANOWISKO BADAWCZE, MATERIAŁY I PROCEDURY POMIAROWE

Stanowisko badawcze

Pomiary momentu hamującego i potencjału elektrycznego wykonano na stanowisku do badań uszczelnień wargowych (**Rys. 1**) składającym się z: komory olejowej (1) wypełnionej do połowy badanym olejem (2); uszczelnienia wargowego (3), metalowego gniazda uszczelnienia (4); dielektrycznego pierścienia (5); wału (6), opraw łożyskowych (7); silnika trójfazowego (8); falownika (9); czujnika momentu obrotowego (10), za pomocą którego dokonywano pomiaru momentu hamującego i prędkości obrotowej wału (11); elektrometru (12); kondensatora wzorcowego (13); grzałki (14) i czujnika temperatury oleju (15).



Rys. 1. Stanowisko badawcze do pomiaru momentu hamującego i napięcia
 Fig. 1. The experimental set-up for measuring the braking torque and voltage

Materiały użyte w badaniach

W badaniach wykorzystano syntetyczne oleje bazowe: PAO typu **PAO 6** oraz PAG typu **ROKOLUBE 68**, a ich specyfikacje przedstawiono w **Tabeli 1**.

Tabela 1. Specyfikacja badanych olejów
 Table 1. Specification of the oils tested

	PAO	PAG
Lepkość kinematyczna ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)		
przy 40°C	30.2	56.4
przy 100°C	5.8	10.5
Indeks lepkości (-)	138	176
Gęstość przy 15°C ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	825	990 przy 20°C
Rezystywność ($\Omega \cdot \text{m}$)		
przy 40°C	$2.6 \cdot 10^{11}$	$1.3 \cdot 10^7$
przy 100°C	$6.4 \cdot 10^{10}$	$3.5 \cdot 10^6$
Przenikalność elektryczna (-)		
przy 40°C	1.9	5.8
przy 100°C	1.9	5.1

Metodyka badawcza

Podczas ruchu obrotowego wału na granicach faz: wał–olej i olej–uszczelnienie oraz pomiędzy poruszającymi się i trącymi o siebie cząstkami oleju (ich warstwami) występuje naturalna triboelektryzacja. W wyniku triboelektryzacji naładowane cząstki wytwarzają wypadkowe pole elektryczne, którego część linii pola elektrycznego zamyka się do innych posiadających nadmiarowy ładunek cząstek o przeciwnym znaku w objętości filmu olejowego, a część do ele-

mentów metalowych (pierścień pomiarowy, uziemiona obudowa komory olejowej, uziemiony wał), w których pojawiają się ładunki zwierciadlane przeciwnego znaku. Wskutek indukcji elektrostatycznej na odizolowanym od ziemi pierścieniu pomiarowym indukują się ładunki elektryczne o takiej samej wartości, lecz o przeciwnym znaku niż na wale. Mierzony potencjał elektryczny na pierścieniu pomiarowym jest tylko częścią całkowitego potencjału, który powstałby, gdyby wszystkie linie sił pola zamykały się do pierścienia. Dlatego też mierzy się tylko pewien potencjał elektryczny proporcjonalny do cząstek znajdujących się w filmie olejowym i posiadających nadmiarowy ładunek. Wobec niezmienności geometrii całej części badawczo-pomiarowej stanowiska oraz przy ustalonych parametrach fizycznych układu, np. stała, zadana temperatura oleju, stan powierzchni wału i wargi uszczelnienia czy stabilna prędkość obrotowa wału, nawet przy braku wzorcowania układu pomiarowego, co stanowi problem właściwie nie do rozwiązania, mierzony na pierścieniu potencjał jest miarą intensywności elektryzacji dynamicznej (triboelektryzacji), jaka zachodzi podczas obracania się wału.

Układ do pomiaru potencjału elektrycznego pierścienia usztywniającego uszczelnienia składa się z elektrometru KEITLEY 6517A połączonego przewodem ekranowanym bezpośrednio z pierścieniem pomiarowym.

Na wejściu elektrometru umieszczono wzorcowy kondensator o dużej pojemności $C_s = 100$ nF względem pojemności układowych, aby praktycznie cały ładunek pierścienia przepłynął do kondensatora i aby stłumić ewentualne pulsacje sygnału wejściowego.

Przyjmuje się także, że wartość zmierzonego potencjału (napięcia) jest proporcjonalna do potencjału zeta ζ

$$U_e \propto \zeta = f(\rho) \quad (2)$$

gdzie ρ jest wypadkową gęstością objętościową ładunku oleju, wynikającą z koncentracji w nim jonów dodatnich i ujemnych.

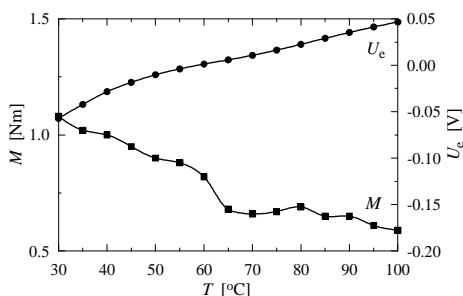
Moment hamujący i prędkość obrotową mierzono za pomocą czujnika momentu obrotowego typu 8661 firmy BURSTER zamontowanego na uziemionym wale za pomocą dwóch sprzęgieł mieszkowych. Pomiar i regulacja temperatury oleju w komorze była regulowana z dokładnością $\pm 0,5^\circ\text{C}$ za pomocą mikroprocesorowego regulatora RE 10. Prędkość obrotową silnika trójfazowego napędzającego wał regulowano falownikiem z dokładnością regulacji do 0,1%.

W układzie międzyfazowym uszczelnienie wargowe–olej–obracający się wał zastosowano uszczelnienie fluorowe o średnicy 85 mm, a użyty wał stalowy o średnicy 85 mm miał chropowatość 0,32 μm .

WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

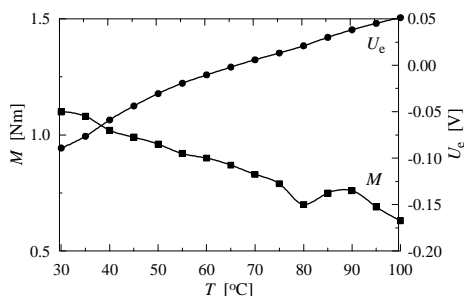
Na **Rys. 2–5** przedstawiono zmiany momentu hamującego M i napięcia U_e w funkcji temperatury dla badanych olejów PAO i PAG dla dwóch prędkości obrotowych wału: 1000 i 1500 obr./min. Na wykresach symbole graficzne oznaczają odpowiednio: ■ — moment i ● — napięcie.

Przebiegi momentu hamującego i napięcia dla oleju PAO przedstawiono na **Rys. 2–3**, a dla oleju PAG na **Rys. 4–5**. Na podstawie tych wykresów można stwierdzić, że:



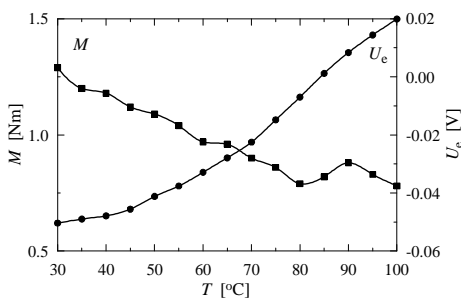
Rys. 2. Zależność momentu hamującego i napięcia w funkcji temperatury dla PAO przy 1000 obr./min

Fig. 2. Braking torque and voltage as a function of temperature for PAO at 1000 rpm



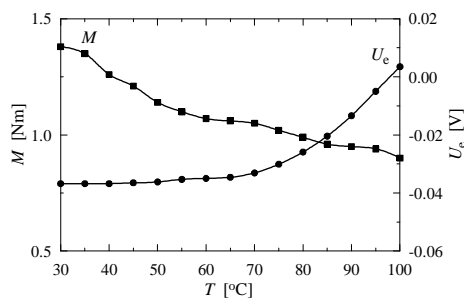
Rys. 3. Zależność momentu hamującego i napięcia w funkcji temperatury dla PAO przy 1500 obr./min

Fig. 3. Braking torque and voltage as a function of temperature for PAO at 1500 rpm



Rys. 4. Zależność momentu hamującego i napięcia w funkcji temperatury dla PAG przy 1000 obr./min

Fig. 4. Braking torque and voltage as a function of temperature for PAG at 1000 rpm



Rys. 5. Zależność momentu hamującego i napięcia w funkcji temperatury dla PAG przy 1500 obr./min

Fig. 5. Braking torque and voltage as a function of temperature for PAG at 1500 rpm

- w zakresie początkowych i końcowych temperatur olej PAO mocniej się elektryzuje w porównaniu z olejem PAG, gdyż PAG ma mniejszą rezystywność niż olej PAO;
- zmiana wartości napięcia z ujemnych na dodatnie ma miejsce dla oleju PAG dla temperatur około 85 i 100°C, a dla PAO przy 65°C;
- przebiegi indukowanego napięcia badanych olejów różnią się między sobą: wydaje się, że wartość napięcia dla oleju PAO dąży do pewnej wartości stałej i może być to związane z równowagą, jaka powstaje między ilością generowanych ładunków elektrycznych i czasem ich relaksacji, a dla oleju PAG wartość napięcia rośnie wraz ze wzrostem temperatury w badanym zakresie 30–100°C, co można tłumaczyć intensywniejszym procesem generowania nowych ładunków elektrycznych od ich czasu relaksacji.

Jak wiadomo, moment hamujący w badanym układzie zależy od lepkości dynamicznej oleju, prędkości obrotowej wału i parametrów geometrycznych układu. Lepkość oleju zmienia się wykładniczo zgodnie ze wzorem:

$$\eta(T) = Ae^{\frac{\Delta E}{kT}} \quad (3)$$

gdzie: A – stała proporcjonalności, ΔE – energia aktywacji dla przepływu lepkiego, k – stała Boltzmanna i T – temperatura.

Na podstawie otrzymanych wyników widzimy, że dla stałej prędkości obrotowej wału moment w pewnym zakresie temperatury oleju zmienia się niezgodnie z zależnością (3). Zmiany te występują gdy indukowane napięcie U_e zmienia znak z wartości ujemnych na dodatnie, bardzo dobrze jest to widoczne na **Rys. 2–4**. Taki przebieg momentu hamującego przy przejściu napięcia przez zero można tłumaczyć „odrywaniem się” polarnych i naelektryzowanych cząstek jednego znaku i „przyklejaniem się” do powierzchni wału naelektryzowanych cząstek o przeciwnym znaku. Podczas tego procesu w wyniku wymuszonego ruchu cząstek wywołanego zmianą kierunku działania naturalnego pola elektrycznego następuje lokalne zwiększenie lub zmniejszenie lepkości oleju przy powierzchni obracającego się wału, co obserwujemy w postaci zmian momentu hamującego przy przejściu napięcia przez zero.

PODSUMOWANIE

W oparciu o wyniki przeprowadzonych badań można stwierdzić, że występuje pewna zależność pomiędzy indukowanym napięciem a momentem hamującym obracającego się wału.

Zmiany znaku indukowanego napięcia można traktować jako informację o zachodzących procesach w elektrycznych warstwach podwójnych i dyfuzyjnych znajdujących się przy powierzchni wału i uszczelnienia. Procesy te mają

duży wpływ na wytrzymałość warstwy granicznej, a lepsze zrozumienie mechanizmów zachodzących w warstwie granicznej wału i wargi uszczelnienia oraz w samym filmie olejowym może umożliwić poprawę warunków pracy uszczelnienia wargowego, a także zmniejszenia tarcia przy powierzchni wału i tym samym momentu hamującego wału.

Badania finansowane przez Narodowe Centrum Nauki, projekt badawczy UMO-2011/03/B/ST8/04961 i zlecenia statutowego S30011/I20.

LITERATURA

1. Gouy G., Constitution of electrical charge at surface of an electrolyte, *J. Physique*, vol. 9, 1910, s. 457.
2. Chapman D.L., Theory of electrocapillarity, *Phil. Mag.*, vol. 25, 1913, s. 475.
3. Płaza S., Margielewski L., Celichowski G., *Wstęp do tribologii i tribochemia*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 2005.
4. Gajewski J.B., Głogowski M.J., Additives Contents in PAG and Synthetic Motor Base Oils and Their Effect on Electrostatic Phenomena in a Rotating Shaft–Oil–Lip Seal System. 8ème conférence de la Société Française d’Electrostatique, 3-5 juillet 2012, Cherbourg-Octeville, France, s. 257–261.
5. Gajewski J.B., Głogowski M.J., Gatner K., Gawliński M., ZDDP content in mineral and synthetic motor base oils and its effect on electrostatic and tribological phenomena in a rotating shaft–oil–lip seal system. 2nd International Conference on Advanced Tribology iCAT 2008, 3–5 December 2008, Singapore, s. 152–154.

Summary

The paper presents the results of measurements of the electric potential and braking torque in the friction junction, which is in a rotating metal shaft–base oil–rotary lip seal system for different ranges of the base oil’s temperature and of the shaft’s angular velocities. The system is an interfacial one and consists of two interfaces: shaft–oil film and oil film–lip seal. When a shaft rotates, intense tribocharging occurs, and an electric field forms that generates the flow of charge within an oil film between two electrical double layers at both surfaces of a shaft and a lip of a rotary lip seal. It is of interest that, within a narrow range of the oil’s temperature, a local change in the rotating torque occurs – a local *extremum* (minimum) – while the potential difference changes its sign from negative to positive. In the research, the synthetic PAG (polyalkylene glycol) and PAO base oils and a fluorocarbon rotary lip seal are used.