

POSSIBILITY OF ASSESSMENT OF ELEMENTS INTERACTION DYNAMICS CHANGE IN FRICTIONAL CONTACT WITH TRIBOELECTRICAL EFFECTS USED

Edward Cypko, Tadeusz Kałdoński

Military University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Poland
tel.: +48 22 6837503, +48 22 6839140, fax: +48 22 6839449
e-mail: edward.cypko@wat.edu.pl, dziekan@wme.wat.edu.pl

Abstract

In the paper are presented results of triboelectrical effects investigations occurring during frictional process of metal elements.

In non-lubricated contacts triboelectrical effects, are observed as „friction microcurrents”. It is possible to discriminate three phases of generation. In the first phase of interaction value increase of „friction microcurrent” is proportionally low. This phase meets so called running-in period, when active contact surface of interaction elements is increase. In the second phase, after increased of contact surface, decreased of resistance and increased of electrons energy, value intensely increases. In the third phase, state of thermic equilibrium forms for accept investigation conditions and „friction microcurrents” and has maximal, quasi-stabilized value.

In lubricated contacts triboelectrical effects, are observed as „generated potential difference”. It is possible to discriminate three phases of generation. The first phase measured from moment of start elements assessment interaction to moment of start potential difference generated, says about ability of tribological system to forming of oil wedge. The second phase says about intensity of phisico-chemical processes, proceed at surface layers of elements. The third phase says about stabilisation tribological processes in frictional contact (running-in process was finished) and frictional contact can be full load for assume conditions of interaction.

Keywords: frictional contact, friction, wear, triboelectrical effects

MOŻLIWOŚĆ OCENY PRZEBIEGU WSPÓŁPRACY ELEMENTÓW TWORZĄCYCH SKOJARZENIE CIERNE Z WYKORZYSTANIEM ZJAWISK TRIBOELEKTRYCZNYCH

Streszczenie

W referacie przedstawiono wyniki badań zjawisk triboelektrycznych, towarzyszących procesowi tarcia elementów metalowych

W skojarzeniach niesmarowanych zjawiska tribologiczne obserwowane są jako „mikroprądy tarcia”. Wyróżnić można trzy fazy generowania. W pierwszej fazie współpracy narastanie wartości jest stosunkowo niewielkie. Faza ta odpowiada tzw. okresowi docierania, w trakcie której zwiększa się powierzchnia czynna styku współpracujących elementów. W fazie drugiej, po zwiększeniu powierzchni styku i spadku rezystancji oraz zwiększeniu energii elektronów wartość intensywnie rośnie. W fazie trzeciej następuje stan równowagi termicznej dla zadanych warunków badań a „mikroprądy tarcia” i osiąga wartość maksymalną, quasi-ustaloną.

W skojarzeniach smarowanych zjawiska tribologiczne obserwowane są jako „generowana różnica potencjałów”. Wyróżnić można trzy okresy generowania. Okres pierwszy mierzony od chwili rozpoczęcia współpracy elementów skojarzenia do chwili powstania generowanej różnicy potencjałów, świadczy o zdolności układu tribologicznego do utworzenia klina smarnego. Okres drugi do osiągnięcia maksymalnej wartości GRP, świadczy o intensywności procesów fizyko-chemicznych, zachodzących na powierzchniach elementów. Okres trzeci informuje o stabilizacji procesów tribologicznych w węźle tarcia, to jest kiedy nastąpiło pełne dotarcie elementów a skojarzenie osiągnęło zdolność przenoszenia pełnego obciążenia dla zadanych warunków współpracy.

Słowa kluczowe: skojarzenie cierne, tarcie, zużycie, zjawiska triboelektryczne

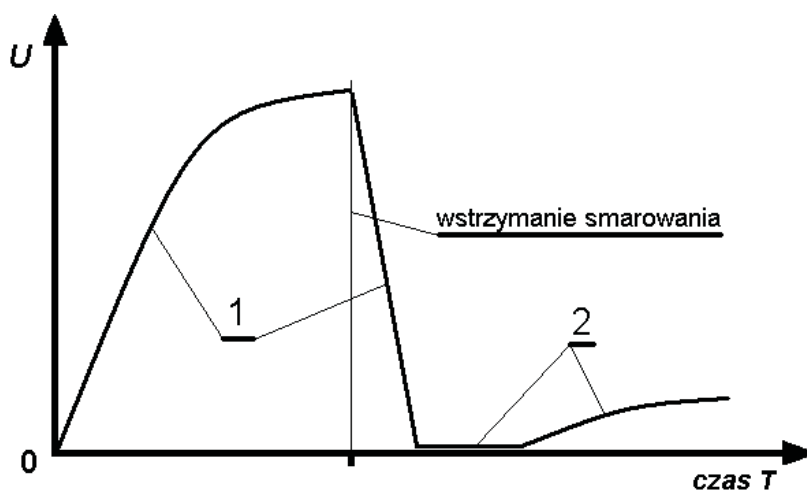
1. Wstęp

Podniesienie trwałości i niezawodności elementów tworzących skojarzenie cierne można osiągnąć poprzez diagnozowanie, czyli ocenę przebiegu współpracy tych elementów, zastosowanie nowych materiałów na elementy bądź kształtowanie odpowiednich właściwości warstw wierzchnich tych elementów. W każdym z ww. przypadków wymagana jest precyzyjna analiza przebiegu procesu tribologicznego, zachodzącego w skojarzeniu. Jest to szczególnie istotne wobec tendencji rozwoju konstrukcji maszyn w kierunku stałego wzrostu obciążenia współpracujących elementów.

Efektom współpracy dwóch elementów w skojarzeniu ciernym jest zawsze zużycie. Ocena zużycia rzeczywistych węzłów tribologicznych praktycznie możliwa jest dopiero post factum, tzn. po zakończeniu współpracy i demontażu węzła. W trakcie współpracy możliwa jest obserwacja i ocena przebiegu procesu tarcia (i pośrednio zużycia) poprzez rejestrację wskaźników trwającego procesu tribologicznego, takich jak moment, współczynnik tarcia, temperatura węzła tarcia itp. Jednak niska czułość ww. wskaźników oraz duża bezwładność reakcji na zmiany zachodzące w skojarzeniu tribologicznym podczas współpracy jego elementów, utrudniają przeprowadzenie precyzyjnej analizy procesu tribologicznego.

W Katedrze Pojazdów Mechanicznych i Transportu Wojskowej Akademii Technicznej już od wielu lat prowadzone są badania zjawisk triboelektrycznych, towarzyszących procesowi tarcia elementów metalowych. Zjawiska te zachodzą zarówno w skojarzeniach smarowanych, obserwowane jako „generowana różnica potencjałów” oraz w skojarzeniach niesmarowanych – jako „mikroprądy tarcia” [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

Uogólniony przebieg zmian wartości „generowanej różnicy potencjałów” (w skojarzeniu smarowanym) oraz „mikroprądów tarcia” (po wstrzymaniu smarowania) przedstawiono na Rys. 1.



Rys. 1. Uogólniony wykres przebiegu: 1 - „generowana różnica potencjałów”, 2 - „mikroprądy tarcia”
 Fig. 1. Generalized diagram of change: 1 - „generated potential difference”, 2 - „friction microcurrent”

2. Zjawiska triboelektryczne w przypadku tarcia technicznie suchego

Badania zjawisk triboelektrycznych wykazały, iż „mikroprądy tarcia” [5, 6, 7] są efektem nie tylko elektryczności statycznej, występującej podczas tarcia dielektryków, ale także mogą być generowane podczas tarcia technicznie suchego metali. W przypadku tarcia technicznie suchego metali „mikroprądy tarcia” są generowane poprzez: kontaktową różnicę potencjałów, zjawisko termoelektryczne, termoemisję elektronów, elektryczność statyczną produktów zużycia, mechaniczne zdzieranie elektronów. Zjawiska te uzależnione są od czynników zewnętrznych, takich jak m.in.: naciski jednostkowe, prędkość względna, wilgotność powietrza oraz od

właściwości termoelektrycznych skojarzonych elementów, chwilowej chropowatości powierzchni tarcia, gradientu temperatury w mikroobszarze tarcia itp.

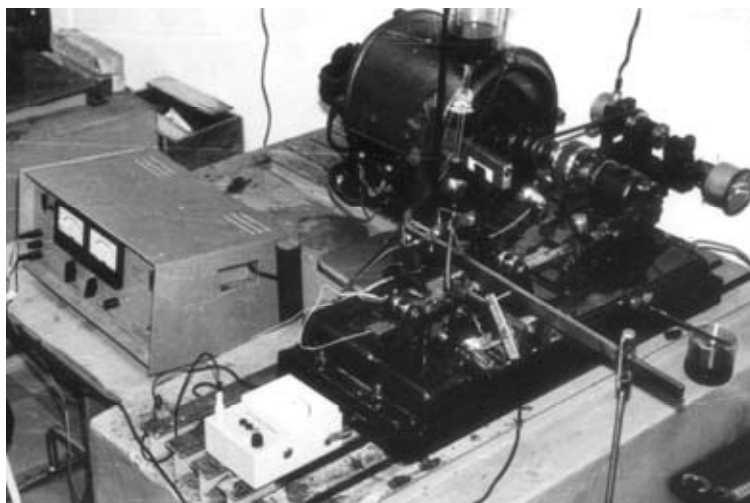
Kierunek przepływu „mikroprądów tarcia” pomiędzy współpracującymi elementami skojarzenia zależy od właściwości termoelektrycznych metali współpracujących elementów, chwilowej chropowatości powierzchni w obszarze styku, charakterystycznych własności struktury warstwy wierzchniej elementów itp.

W przypadku współpracy elementów wykonanych z różnych metali, na kierunek przepływu i wielkość „mikroprądów tarcia” w dużym stopniu wpływa kontaktowa różnica potencjałów. Im te metale są bardziej oddalone od siebie w szeregu elektrochemicznym Volty i w zasadniczy sposób różniące się właściwościami termoelektrycznymi, tym „mikroprądy tarcia” wykazują większą wartość.

W przypadku współpracy elementów wykonanych z metali jednoimiennych lub metali stosunkowo blisko siebie leżących w szeregu Volty (o zbliżonych wartościach prac wyjścia elektronów), znaczący wpływ ma termoemisja elektronów, zależna od geometrii wężła tarcia, w tym tzw. symetryczności charakteru tarcia, czyli wzajemnego stosunku wielkości współpracujących elementów. Współpracujący element o mniejszej objętości nagrzewa się szybciej i oddaje elektrony elementowi o większej objętości, a za tym i większej pojemności cieplnej [5, 6, 7].

Intensywność narastania wartości „mikroprądów tarcia” w trakcie zużywania jest zmienna i zależy od charakteru współpracy: okres docierania, okres quasi stabilnej współpracy, okres intensywnie narastającego zużywania aż do przeciążenia wężła tarcia (zatarcia).

Proces tarcia zrealizowano na stanowisku tribologicznym KEWAT-1 (klocek-płytką) (Rys. 2.)



*Rys. 2. Stanowisko tribologiczne KEWAT-1 (klocek-płytką)
Fig. 2. Tribotester KEWAT-1 (block-plate)*

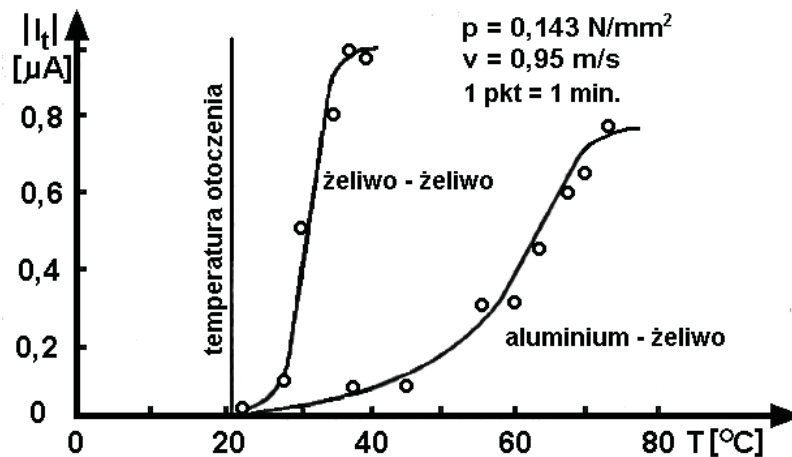
Na Rys. 3 przedstawiono przykład zależności „mikroprądów tarcia” od wartości generowanej w wyniku tarcia temperatury dla dwóch różnych skojarzeń: żeliwo – żeliwo oraz aluminium – żeliwo, w warunkach zużywania ściernego.

Wyróżnić można trzy fazy generowania „mikroprądów tarcia” I_t .

W pierwszej fazie współpracy narastanie wartości „mikroprądów tarcia” I_t jest stosunkowo niewielkie, pomimo znacznego narastania temperatury T . Faza ta odpowiada tzw. okresowi docierania, w trakcie której zwiększa się powierzchnia czynna styku współpracujących elementów.

W fazie drugiej, po zwiększeniu powierzchni styku i spadku rezystancji oraz zwiększeniu energii elektronów wartość I_t intensywnie rośnie pomimo mniejszego gradientu temperatury niż w fazie pierwszej.

W fazie trzeciej następuje stan równowagi termicznej dla zadanych warunków badań (naciski jednostkowe, prędkość ruchu względnego, chropowatość powierzchni trących elementów) a „mikroprądy tarcia” osiągają wartość maksymalną, quasi-ustaloną.



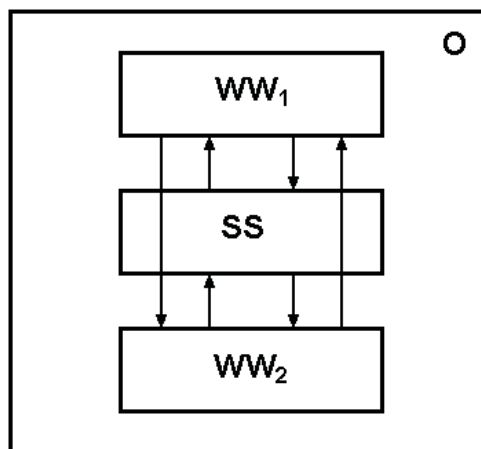
Rys. 3. Przykładowe zależności „mikroprądów tarcia” I_t od wartości generowanej w węźle tarcia temperatury T dla dwóch różnych skojarzeń: żeliwo-żeliwo i aluminium-żeliwo [5, 6]

Fig. 3. Example of dependences between „friction microcurrent” I_t and generated in frictional contact temperature T for two differences frictional contacts: cast iron - cast iron and aluminum - cast iron [5, 6]

Spadek wartości I_t przy dalszym wzroście temperatury T w węźle tarcia świadczy o przeciążeniu węzła. Zużycie wówczas jest bardzo intensywne i zmienia swój charakter - może nawet doprowadzić do szczepień adhezyjnych i w efekcie do zatarcia skojarzenia.

3. Zjawiska triboelektryczne w przypadku tarcia w obecności środka smarnego

W przypadku skojarzenia smarowanego proces generowania ładunków elektrycznych przebiega nieco inaczej. Film olejowy uniemożliwia styk metaliczny powierzchni trących i eliminuje szereg czynników istotnych podczas tarcia technicznie suchego, np. kontaktową różnicę potencjałów, mechaniczne zdzieranie elektronów, zjawisko termoelektryczne, emisję elektronów z metalu do metalu [5, 6, 7].

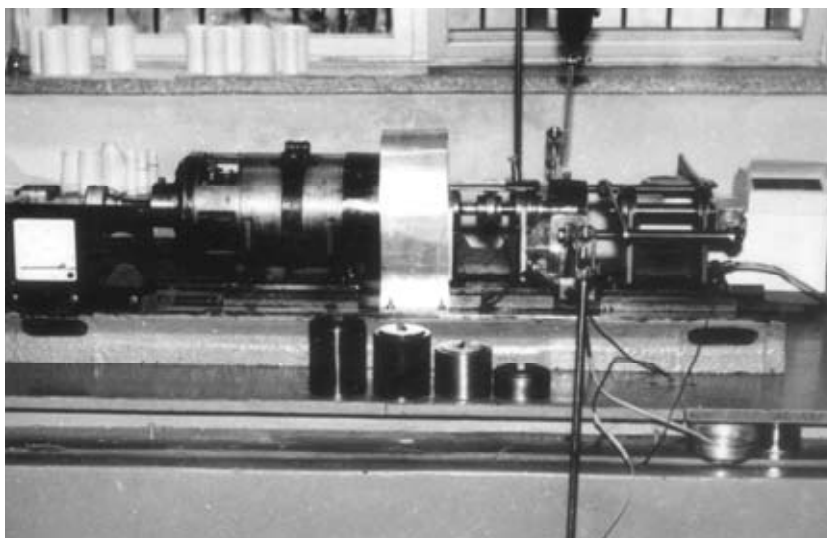


Rys. 4. Schemat wzajemnego oddziaływania elementów składowych smarowanego węzła tarcia [2]: WW_1 – warstwa wierzchnia elementu pierwszego, WW_2 – warstwa wierzchnia elementu drugiego, SS – środek smarny, O – otoczenie
Fig. 4. Scheme of mutual influence between component elements of lubricated frictional contact [2]: WW_1 – surface layer of first element, WW_2 – surface layer of second element, SS – lubricated agent, O – environment

Warstwy wierzchnie elementów smarowanego skojarzenia ślizgowego tworzą układ tribologiczny: warstwa wierzchnia elementu pierwszego (WW_1) – środek smarny (SS) – warstwa wierzchnia elementu drugiego (WW_2), które są poddane wymuszeniu zewnętrznemu otoczenia i wzajemnie na siebie oddziałują (Rys. 4).

Model fizyczny smarowanego skojarzenia ślizgowego można przedstawić jako kondensator elektryczny, w którym warstwy wierzchnie pełnią rolę drgających okładzin a środek smarny – rolę dielektryka. Drgania okładzin odzwierciedlają zmiany odległości pomiędzy wierzchołkami chropowatości powierzchni elementów skojarzenia. Zmiana odległości pomiędzy okładzinami wpływa na zmianę pojemności, a to z kolei wpływa na zmianę napięcia kondensatora [2, 3, 4].

Proces tarcia zrealizowano na stanowisku tribologicznym KRWAT-1 (czop-panewka) (Rys. 5).



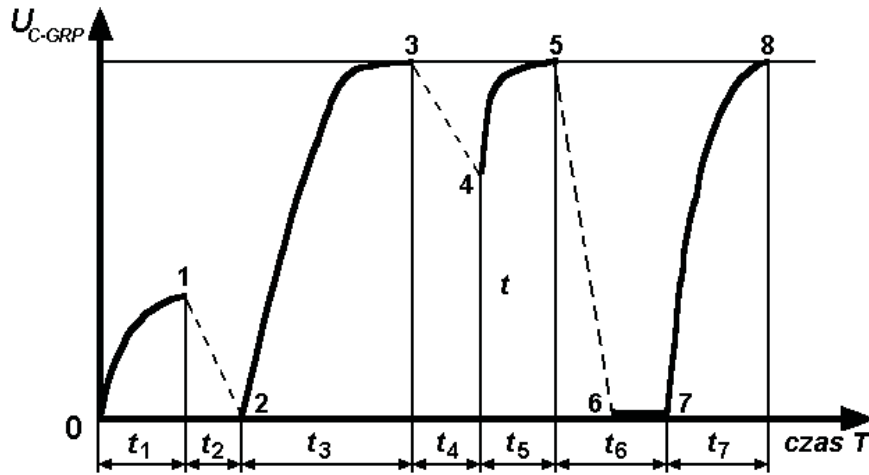
*Rys. 5. Stanowisko tribologiczne KRWAT-1 (czop-panewka)
Fig. 5. Tribotester KRWAT-1 (crankshaft-slide bearing)*

Zmiany wartości napięcia, umownie nazwanego „napięciem chwilowym generowanej różnicy potencjałów” U_{C-GRP} można rejestrować na oscyloskopie (oscylografie).

W celu zinterpretowania oscylogramów wykorzystuje się opracowany poglądowy wykres przebiegu zmian wartości napięcia U_{C-GRP} (Rys. 6). Krzywe 0-1, 2-3, 4-5, 7-8 odpowiadają ładowaniu kondensatora. Krzywe 1-2, 3-4, 5-6-7 (linie przerywane) odpowiadają rozładowaniu kondensatora (na oscylogramie linie te są niewidoczne). Odcinki czasu t_1 , t_3 , t_5 , t_7 odpowiadają tarcia płynnemu, odcinek t_4 – tarcia granicznemu (rozładowanie poprzez cienką warstwę filmu smarowego), a odcinki t_2 i t_6 – tarcia technicznie suchemu.

W tym przypadku fakt generowania różnicy potencjałów elektrycznych świadczy o rozdzieleniu powierzchni trących filmem smarnym. W początkowym okresie współpracy powierzchnia tarcia charakteryzuje się stosunkowo wysoką chropowatością a profil nierówności nie sprzyja utrzymaniu wystarczająco grubej warstwy środka smarnego. Wielkość amplitudy sygnału wzrasta wraz z czasem współpracy. Im większa amplituda, tym większa jest różnica potencjałów, a za tym i większa grubość środka smarnego rozdzielającego trące powierzchnie współpracujących elementów.

Przykładowe oscylogramy napięcia chwilowego generowanej różnicy potencjałów U_{C-GRP} przedstawiono na Rys. 7. Każda krzywa (impuls) gwałtownego spadku potencjału w zapisie generowanej różnicy potencjałów na oscylogramie może świadczyć o bezpośrednim styku trących się powierzchni, podczas którego ładunek elektryczny przechodzi z jednego elementu skojarzenia na drugi.

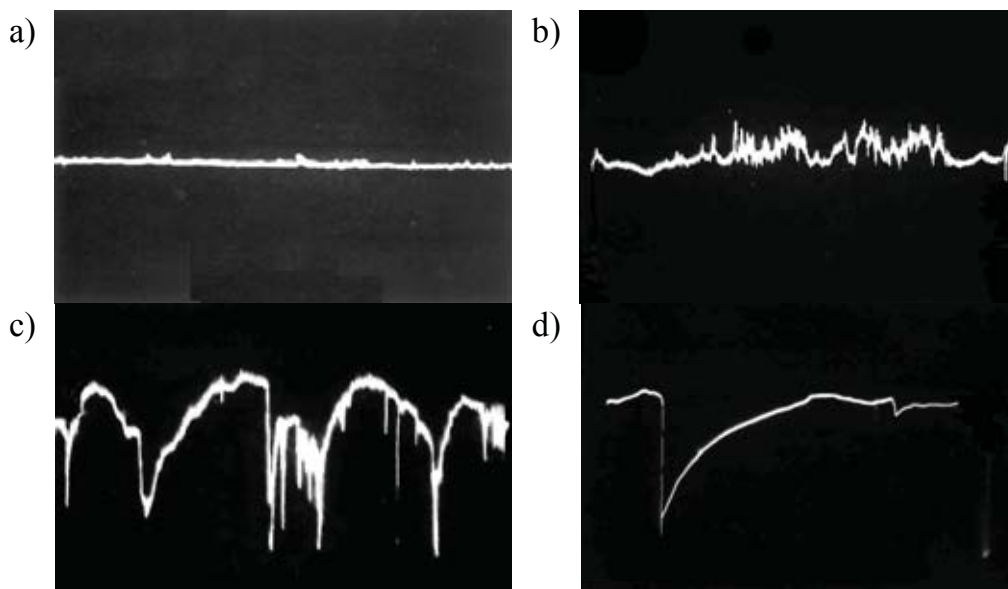


Rys. 6. Interpretacja oscylogramu wartości chwilowej „generowanej różnicy potencjałów” U_{C-GRP} [2, 3, 4]
 Fig. 6. Interpretation of oscillogram of „generated potential difference” instantaneous value U_{C-GRP} [2, 3, 4]

Gęstość impulsów może świadczyć o ilości punktów wzajemnego styku nierówności trących powierzchni (Rys. 7b – tarcie graniczne). Ze wzrostem czasu współpracy elementów skojarzenia ilość impulsów zmniejsza się a amplituda rośnie, co świadczy o zwiększaniu się powierzchni nośnej filmu smarnego (Rys. 7c – tarcie mieszane z przewagą tarcia płynnego).

Kształt impulsów związany jest czasem występowania tarcia płynnego. Impuls o kształcie krzywej, asymptotycznie zdążającej do pewnego poziomu, charakterystycznego dla danego skojarzenia, świadczy o powstaniu warunków do utworzenia stabilnego klina smarnego i zdolności skojarzenia do przenoszenia większych obciążeń (Rys. 7d – tarcie płynne).

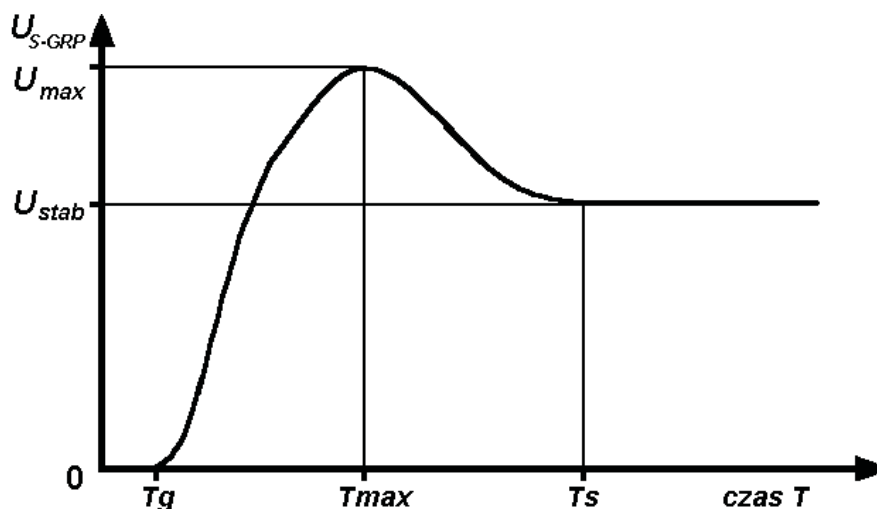
Na Rys. 7a, w celu porównania, przedstawiono oscylogram pełnego styku metalicznego elementów skojarzenia, bez obecności środka smarnego (tarcie technicznie suche).



Rys. 7. Przykładowe oscylogramy napięcia chwilowego generowanej różnicy potencjałów U_{C-GRP} [1]: a) – tarcie technicznie suche, b) – tarcie graniczne, c) – tarcie mieszane z przewagą tarcia płynnego, d) – tarcie płynne
 Fig. 7. Example of oscillograms of „generated potential difference” instantaneous value U_{C-GRP} [1]: a) – dry friction, b) mitigated solid friction, c) – semi-fluid (mixed) friction, d) – fluid friction

Scałkowane wartości napięć chwilowych „generowanej różnicy potencjałów” U_{C-GRP} , obliczone dla pewnego okresu τ , umownie określono jako napięcie skuteczne „generowanej różnicy potencjałów” [2, 3, 4] i oznaczono jako U_{S-GRP} .

Dla ustalonych warunków wymuszających, tj. dla stałych parametrów obciążenia tribologicznego, na uogólnionym wykresie przebiegu wartości skutecznej U_{S-GRP} , można wydzielić trzy charakterystyczne etapy (Rys. 8).



Rys. 8. Uogólniony wykres przebiegu wartości skutecznej „generowanej różnicy potencjałów” U_{S-GRP} [2, 3, 4]
 Fig. 8. Generalized diagram of change of „generated potential difference” effective value U_{S-GRP} [2, 3, 4]

Czas T_g mierzony jest od chwili rozpoczęcia współpracy elementów skojarzenia do chwili powstania GRP rejestrowanej na oscyloskopie. Czas ten świadczy o zdolności układu tribologicznego do utworzenia klina smarnego i informuje o tym jak długo trwała współpraca elementów w warunkach tarcia suchego i granicznego. Wartość T_g zależy od właściwości materiałów tworzących skojarzenie tribologiczne. Im czas T_g jest krótszy dla danego skojarzenia, tym mniejsze jest zużycie jego elementów składowych i tym szybciej tworzony jest klin smarny.

Czas T_{max} osiągania maksymalnej wartości U_{max} GRP zależy od właściwości układu tribologicznego i może świadczyć o intensywności procesów fizyko-chemicznych, zachodzących na powierzchniach elementów, np. powierzchniowej aktywności środka smarnego.

Czas T_s informuje o stabilizacji procesów tribologicznych w węzle tarcia, to jest kiedy nastąpiło pełne dotarcie elementów a skojarzenie osiągnęło zdolność przenoszenia pełnego obciążenia dla zadanych warunków współpracy.

4. Podsumowanie

Obserwacja zjawisk triboelektrycznych w skojarzeniu ciernym jest jakościowo nową metodą oceny współpracy elementów. Analiza przebiegu zmian wartości „mikroprądów tarcia” oraz „generowanej różnicy potencjałów” pozwala na bezpośrednie śledzenie w czasie rzeczywistym i w sposób ciągły charakteru przebiegu współpracy elementów w skojarzeniu.

Czułość tego wskaźnika, szybkość reakcji na zmiany wymuszenia oraz zasób zawartej w nim informacji znacznie przewyższa dotychczas stosowane „klasyczne” wskaźniki, takie jak moment i współczynnik tarcia, temperatura węzła tarcia itp.

Powyższa metoda może mieć zastosowanie zarówno do diagnozowania istniejących węzłów tarcia (zużycie elementów, zanieczyszczenie i starzenie środka smarnego), a także przy doborze nowych materiałów konstrukcyjnych i środka smarnego na skojarzenia cierne.

Prowadzone są dalsze badania, mające na celu wyznaczenie obszaru możliwości zastosowania „generowanej różnicy potencjałów” do oceny własności tribologicznych elementów smarowanego skojarzenia ślizgowego; wyznaczenie obszaru możliwości zastosowania „generowanej różnicy potencjałów” jako parametru diagnostycznego służącego do oceny smarowanych skojarzeń

ślizgowych; ustalenie podstawowych zależności pomiędzy wartością generowanej w węźle tarcia różnicy potencjałów elektrycznych a zjawiskami zachodzącymi w węźle tarcia.

Literatura

- [1] Cypko, E., *Analiza przydatności warstwy regeneracyjnej czopa do współpracy z panewką wielowarstwową*, Rozprawa doktorska, WAT, Warszawa 1993.
- [2] Cypko, E., Kałdoński, T., *Triboelectrical effects in frictional contacts*, Solid State Phenomena, vol. 113/2006, s. 411-414, Zurich 2006.
- [3] Cypko, E., Kałdoński, T., *Triboelectrical effects in dry and lubricating contacts*, materiały International Tribology Conference Putting Tribology to Work (AUSTRIAN 2006), s. 118-121, Brisbane 2006.
- [4] Gołębiowski, W., Cypko, J., *Generowane potencjały jako źródło informacji o procesach trybologicznych*, Biuletyn WAT, nr 4 (380), s. 109-116, Warszawa 1984.
- [5] Kałdoński, T., *Wpływ zjawisk triboelektrycznych i magnetycznych na ukonstytuowanie się filmu olejowego i zużycie elementów maszyn*, Biuletyn WAT, nr 5 (573), s. 5-20, Warszawa 2000.
- [6] Kałdoński, T., *Zużywanie ściernie w systemach tribologicznych typu tłok-cylinder*, Wydawnictwo WAT, Warszawa 1996.
- [7] Kałdoński, T., Wachal, A., *Modelowe badania prądów tarcia smarowanych obszarów styku metalowych elementów maszyn*, materiały X Konferencji Tribologicznej „Wpływ smarowania na trwałość i niezawodność maszyn i urządzeń”, s. 29-31, Kielce 1977.