

Mirosława KOSMYNINA¹

BADANIA ROZKŁADÓW PÓL ELEKTRYCZNYCH W MATERIAŁOWYCH SYSTEMACH OBCIĄŻONYCH MECHANICZNIE Z TARCIEM

W pracy omówiono przebieg możliwych procesów przemieszczenia ładunków elektrycznych przez strefę tarcia podczas jednego cyklu badawczego.

Podano warunki występowania reakcji elektrochemicznych (chemicznych) podczas pracy węzła tarcia. Na przykładzie pracy węzła tarcia składającego się z dwóch pierścieni współpracujących bocznymi powierzchniami, uzasadniono możliwość przemieszczenia ładunków elektrycznych bez reakcji lub z nieznacznym udziałem reakcji elektrochemicznych (chemicznych).

Dla kompensacji zużycia tribologicznego poprzez elektrochemiczne przemiany fazowe celowym jest zastosowanie stabilnego pola elektrycznego (wytwarzanego w dodatkowym, kontrolowanym obwodzie elektrycznym) oraz wybranych procesów elektrochemicznych.

INVESTIGATIONS OF ELECTRIC FIELDS DISTRIBUTION IN MECHANICALLY LOADED MATERIAL SYSTEMS WITH FRICTION

The paper discussed possible processes of displacement of electric charges through the friction zone during one research cycle.

Conditions of electrochemical (chemical) reactions during friction joint work are given. On the example of friction joint consisted of two rings cooperating with lateral surfaces the possibility of electric charges displacement without reactions or with slight participation of electrochemical (chemical) reactions is justified.

For the compensation of tribological wear by the change of electrochemical phase transformations it is advisable to use stable electric field (which is generated in additional, controlled electrical circuit) and selected electrochemical processes.

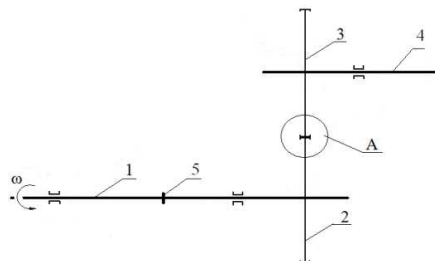
1. WSTĘP

Obecnie produkowane są maszyny tribologiczne - testery z dostępnym do badań kinematycznym węzłem [1,2]. Systemy sterujące – pomiarowe urządzenia tribologiczne pozwalają na kalibrowanie i testowanie torów pomiarowych, sterowanie przebiegiem testu, dokonanie pomiarów i obróbkę wyników testu. Proponowane testery różnią się geometrią układu obciążanego i obciążającego. Badania fizykochemiczne materiałów, biorących

¹ Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny; 26-600 Radom; ul. Krasickiego 54.
Tel: + 48 48 361-76-28, 361-76-79, E-mail: mirosława.kosmynina@pr.radom.pl

udział w procesach tribologicznych, mogą być prowadzone w środowisku ciekłym lub gazowym (w naturalnej atmosferze).

Schemat układu obciążenia wałka maszyny tribologicznej „Amslera” pokazano na rysunku 1. Węzeł tarcia składa się z dwóch pierścieni współpracujących bocznymi powierzchniami, które tworzą strefę tarcia A i trajektorię ruchu tej strefy, którą jest ich boczna powierzchnia.



Rys.1. Schemat układu obciążenia wałka maszyny tribologicznej: 1,2– wałek z osadzonym pierścieniem obciążającym; 3 - pierścień obciążający osadzony na wałku 4,5 - układ pomiarowy sił obciążających; A – strefa tarcia współpracujących pierścieni

Opory ruchu względnych elementów mierzone są elektrycznymi (elektronicznymi) przyrządami pomiarowymi. Są to czujniki tensometryczne służące do pomiaru wielkości nieelektrycznych na przykład: sił, naprężeń lub drgań. Najczęściej stosowanymi tensometrami są tensometry oporowe lub napięciowe, zmieniające swoją rezystancję (napięcie) wraz ze zmianą obciążeń zewnętrznych. Pozwala to ocenić moment obrotowy pierścienia przed i po obciążeniu powierzchni pierścienia 2 pierścieniem 3.

Właściwości tribologiczne, czyli charakterystyki tarcia i zużyciowe, nie dotyczą tylko jednego z elementów węzła, lecz całego układu włącznie z oddziaływaniem środowiska, w którym powierzchnie elementów współpracują. Utrata zdolności eksploatacyjnych może być skutkiem zmian właściwości fizyko-chemicznych warstwy wierzchniej, wywołanych tarciami. Konsekwencją współpracy elementów jest ubytek ich masy i zmiana wymiarów elementów trących. W zagadnieniach tribologicznych problemy materiałowe na ogół sprowadzają się do analizy warstwy wierzchniej elementów trących po zakończeniu badań.

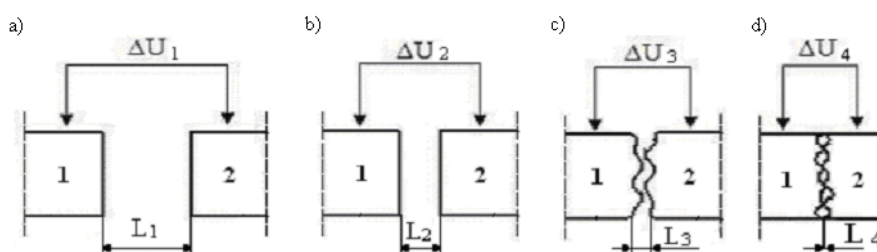
Napięcia elektryczne obserwowane są również pomiędzy elementami współpracującymi 2 i 3 tj. pomiędzy wałkami 1 i 4 (rys.1) [3-9]. To było powodem opracowań naukowych związanych z przemieszczeniem ładunków elektrycznych i materiałowych przekształceń fazowych w układach tribologicznych. Do nich należy odnieść: osadzanie bezprądowe (chemiczne) [10,11], elektrochemiczne [13-16], badania selektywnego przenoszenia [3,5,13], udziału wodoru w procesach tribologicznych [3,16]. W pracy [17,18] układ elektryczny (niekontrolowany) występujący podczas pracy maszyny, oddzielono od układu obciążeń mechanicznych dodatkowym kontrolowanym obwodem elektrycznym.

Celem niniejszej pracy jest uzasadnienie stosowania dodatkowego obwodu elektrycznego ze stabilizowanym polem elektrycznym, który jest podłączony do układu

obciążeń mechanicznych z tarcieniem i stosowany do wymuszenia wybranego rodzaju materiałowych przemian fazowych.

1. ANALIZA PROCESÓW I MECHANIZMÓW PRZEBIEGAJĄCYCH W JEDNYM CYKLU BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH

Cykl badawczy składa się z kolejnych operacji – działań technicznych, które można połączyć z rodzajami tarcia omawianymi w literaturze tematycznej [2,12]. Na rysunku 2 schematycznie przedstawiono kolejność operacji: przygotowanie elementów do badań, obciążenia wstępnego i w zależności od wielkości sił obciążających przebieg tarcia mieszanego lub mikroskrawanie.



Rys.2. Operacje techniczne w jednym cyklu badawczym: 1 – element obciążany; 2 – element obciążający; a) przygotowanie elementów do badań z zamocowaniem na wałku maszyny; b) obciążenie wstępne; c) obciążenie z realizacją tarcia mieszanego [2,3]; d) obciążenie z realizacją mikroskrawania; L – odległość międzypowierzchniowa; U – napięcie zewnętrzne

Każda z wykonywanych operacji wymaga określonego czasu. Podczas kolejnych operacji zmieniają się procesy współdziałania pomiędzy powierzchniami, a także możliwe mechanizmy zużycia materiałowego. W układzie elementów a) odległość między ich powierzchniami jest na tyle duża, że uniemożliwia wytworzenie pola elektrycznego pomiędzy elementami. Spadki napięcia pochodzące od pracujących mechanizmów maszyny nie mogą brać udziału w procesach materiałowych przemian fazowych elementów. Materiał elementu pracuje w otoczeniu atmosfery lub w środowisku eksploatacyjnym. Są to warunki sprzyjające procesom korozyjnym. Zbliżenie elementów (rysunek 2b), bez kontaktu ich powierzchni, umożliwia wytworzenie pomiędzy powierzchniami pola elektrycznego. Stwarza to warunki dla pracy lokalnego obwodu elektrycznego, a w tym i przebiegu procesów elektrochemicznych. Bezpośredni styk powierzchni c) i d) uruchamia procesy związane z elektronowym przeniesieniem impulsów elektrycznych przez strefę tarcia. W pracy [19,20] taki rodzaj połączenia podczas współpracy elementów nazwano niekontrolowanym obwodem elektrycznym. Formalnie jest to obwód elektryczny składający się z: nieumiejscowionego źródła prądu, przewodów łączeniowych i odbiornika (układu c) lub d) ze zróżnicowanymi efektami: cieplnymi, świetlnymi, dźwiękowymi lub wibracjami). Prawdopodobnie jest to związane ze

zróźnicowaniem prędkości długości i częstotliwości fal elektromagnetycznych w omawianym obwodzie. Efekty obciążenia materiałów w cyklu badań (maszyna i element obciążany) można oceniać jako wynik obciążenia mechanicznego, elektrycznego (przy pominięciu polaryzacji każdego z elementów) oraz elektrochemicznego (chemicznego) z udziałem polaryzacji. Udział każdego z procesów w końcowym wyniku badań zależy od okresu trwania danej operacji technicznej w cyklu badawczym.

Do obserwacji ruchu cząstek materialnych przemian fazowych przebiegających na granicy faz: ciało stałe - środowisko potrzebne jest stabilne pole elektryczne.

2. ROZKŁAD I EFEKT NAPIĘCIA W ODBIORNIKU LOKALNEGO OBWODU ELEKTRYCZNEGO MASZYNY

2.1. Naprężenie pola elektrycznego

Własnością materiałów, która pozwala komponować układy elektryczne i elektrochemiczne jest ich przewodność elektryczna. Wielkością odwrotną do przewodności elektrycznej jest oporność, której wartości, dla niektórych środowisk, pokazano w tabelicy 1.

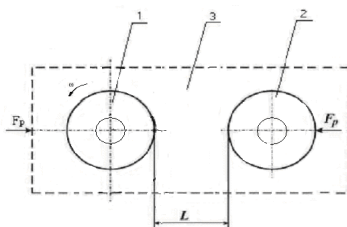
Tab. 1. Zakresy oporów elektrycznych niektórych środowisk

Rodzaj materiałów	Opór elektryczny [$\Omega \cdot m$]
Przewodniki	$10^{-8} - 10^{-2}$
Materiały węglowe	$10^{-8} - 10^{-2}$
Półprzewodniki	$10^{-2} - 10^6$
Elektrolity	$10^{-2} - 10^4$
Izolatory:	$10^5 - 10^{18}$
- słabe	$10^5 - 10^8$
- dobre	$10^{14} - 10^{18}$
Oleje – dielektryki	$10^7 - 10^{18}$

Bibliografia [21]

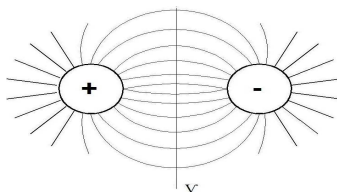
Na rysunku 3 pokazano układ dwóch pierścieni 1 i 2 wykonanych z materiałów elektroprzewodzących – metali w środowisku 3 o mniejszej przewodności elektrycznej (elektrolicie) pracujących w otoczeniu (naturalnej atmosferze) posiadającym słabą przewodność elektryczną. Napięcie doprowadzone do przewodzących materiałów – pierścieni powoduje przemieszczenie ładunków swobodnych w elektrolicie drogą z najmniejszym oporem elektrycznym. Dla układu (rys.3) jest to najmniejsza odległość międzypowierzchniowa L.

Zdolność do koncentracji pola elektrycznego omówiono w pracy [18]. Wykazano, że w przypadku dwóch pierścieni, współpracujących bocznymi powierzchniami, pole elektryczne koncentruje się na tych powierzchniach.



Rys.3. Schemat układu dwóch elementów 1,2 współpracujących w środowisku eksploatacyjnym 3 obciążonych siłami zewnętrznymi (F_p), określającymi odległość L pomiędzy ich powierzchniami

Pomiędzy dwoma elementami (rys.3) przyjętymi za ładunki punktowe (rys.4) wytwarzane jest pole wektorowe. Do graficznego przedstawienia pola elektrycznego używane są linie pola, które w każdym punkcie przestrzeni międzypowierzchniowej są styczne do wektora siły działającej na ładunek próbny umieszczony w tym polu. Linie pola rozpoczynają się i kończą na ładunkach.



Rys.4. Pole elektryczne pomiędzy dwoma ładunkami punktowymi; V – napięcie pola elektrycznego

Koncepcję pola elektrycznego wprowadził Michael Faraday (w połowie XIX wieku). Opisał pole elektryczne jako oddziaływanie ładunków elektrycznych. Tę teorię rozwinął James Clerk Maxwell, uzupełniając przy pomocy równań matematycznych fakt, że poruszający się ładunek elektryczny wytwarza nie tylko pole elektryczne, ale również pole magnetyczne. W literaturze traktowane są obydwa pola jako elektromagnetyczne. Pole elektryczne pozostaje polem źródłowym, a wielkością opisującą pole elektryczne jest potencjał elektryczny E , który jest wielkością skalarną.

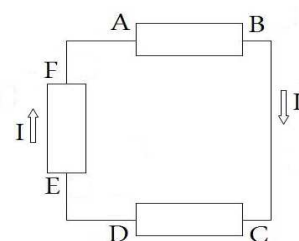
Element maszyny jest zbiorem ładunków elektrycznych, tworzących ciało stałe i pole elektryczne pochodzące od struktury tego ciała. Napięcie elektryczne ΔU (rys.3) spowoduje powstanie pola elektrycznego ze zmiennym gradientem w zależności od odległości pomiędzy powierzchniami elementów L lub pomiędzy ładunkami (rys.4) (przy pokonywaniu oporów elektrycznych). Tę wielkość, wyrażaną w V/m umownie nazywamy napięciem pola elektrycznego. Jest to napięcie pomiędzy elementami, które przy zadanej odległości międzypowierzchniowej spowoduje elektryczne połączenie w lokalnym obwodzie elektrycznym. Przy zachowaniu stałej wartości napięcia pola elektrycznego, za pomocą odległości międzypowierzchniowej regulowany jest rozkład tego pola na

powierzchni elementów. Zbliżenie powierzchni spowoduje jego koncentrację, a oddalenie rozprzestrzenianie linii pola.

Efekty oddziaływania pola elektrycznego pomiędzy materiałami (rys.3) opisują znane obecnie zakresy widm (spektrum) fal elektromagnetycznych. Na podstawie równań Maxwella wnioskuje się [22,23], że wszystkie fale mają tę samą naturę i prędkość rozchodzenia się, a różnią się częstotliwościami i długościami fal. Podczas przebiegu procesów tribologicznych występuje mnogość nieidentyfikowalnych zjawisk, spowodowanych parametrami elektromagnetycznymi o nieznanym wpływie na materiałowe przemiany fazowe. Dla spowodowania wybranych materiałowych przemian fazowych potrzebny jest kontrolowany obwód elektryczny ze stabilnym polem i czas potrzebny dla przebiegu tych przemian.

2.2. Kontrolowany lokalny obwód elektryczny

Dla obserwacji przemieszczeń cząstek materialnych w przestrzeni oddziaływania pola elektrycznego z pełnego widma fal elektromagnetycznych wybierane są pola stabilne w czasie. Takim wymogom odpowiadają pola z częstotliwością do 1 MHz, z możliwością regulowania kształtu i amplitudy fali podawanej na elementy.



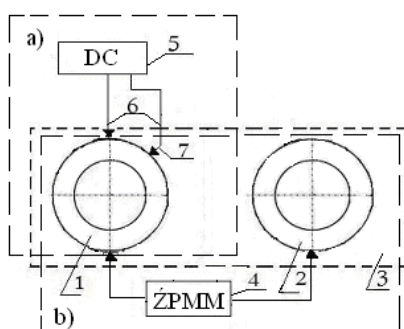
Rys.5. Kontrolowany lokalny obwód elektryczny: A-B- źródło prądu; B-C i D-A przewody łączeniowe z uwzględnieniem spadków napięć (oporów) maszyny E-F; C-D - odbiornik (badane elementy rys.3); I – kierunek ładunków elektrycznych przy podłączeniu źródła prądu stałego

Lokalny obwód elektryczny w urządzeniu mechanicznym składa się z: źródła prądu AB, przewodów łączeniowych BC, DA i odbiornika CD. Źródło prądu służy do kompensacji spadków napięć w przewodach łączeniowych, poprzez urządzenia maszyny EF i nadanie kierunku przemieszczeń ładunków elektrycznych w obwodzie. Podłączenie źródła prądu stałego spowoduje przemieszczenie strumienia ładunków elektrycznych w kierunku pokazanym strzałkami na rysunku 5. Napięcie elektryczne mierzone na zaciskach źródła prądu różni się od napięcia na zaciskach odbiornika o spadki napięć w elementach urządzenia mechanicznego. Zależą one od miejsca podłączenia przewodów i od aktualnego stanu technicznego maszyny.

Urządzenie mechaniczne EF (rys.5) może być częścią innego niekontrolowanego obwodu elektrycznego. W niekontrolowanym obwodzie nieznanym jest rodzaj źródeł prądów i jego parametry elektryczne. Nieznany jest też udział parametrów elektrycznych w

rozkładach i procesach elektrochemicznych w odbiorniku (układzie współpracujących elementów (rys.3).

Wpływ pracujących mechanizmów urządzenia technicznego na napięcia pomiędzy elementami obciążanym i obciążającym można pominąć, jeśli w odbiorniku zamkniemy obwód elektryczny dodatkową elektrodą pomocniczą w celu uzyskania stabilnego pola elektrycznego. Schemat podłączenia elektrody pomocniczej pokazano na rysunku 6.



Rys.6. Współpracujące obwody elektryczne; a) kontrolowany: 1 - element obciążany; 3 - środowisko; 5 - źródło prądu stałego (DC); 6 - przewody łączeniowe; 7 - elektroda pomocnicza; b) niekontrolowany: 1,2 - odpowiednio elementy obciążany i obciążający; 3 - środowisko; 4 - źródło prądu mechanizmów maszyny (ŻPMM);

Zastosowanie elektrody pomocniczej pozwoliło utworzyć dwa współpracujące obwody elektryczne:

- niekontrolowany - mechanizmy maszyny i elementy współpracujące;
- kontrolowany, składający się ze źródła prądu o znanych parametrach i odbiornika: (element badany 1 lub 1 i 2 w zależności od sytuacji - rys.2), środowiska i elektrody pomocniczej.

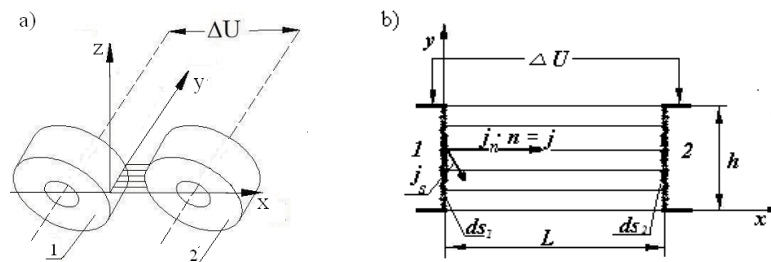
W odbiorniku niekontrolowanego obwodu elektrycznego geometria elementu jest niezmienna i wynika z konstrukcji urządzenia. Wraz ze zmianą odległości międzypowierzchniowych elementów zmieniają się także parametry procesów omówionych na podstawie rysunku 2. Kontrolowany obwód elektryczny pozwala:

- dostosować rozkład pól elektrycznych pomiędzy elementem obciążanym i elektrodą pomocniczą do układu obciążeń mechanicznych;
- zadać odległość międzypowierzchniową;
- wymuszać procesy korzystne w zastosowaniu, na przykład korzystnym procesem jest osadzanie powłok.

Osadzone powłoki przeważnie są zużywane w strefie tarcia bez naruszenia materiału konstrukcyjnego.

3. PROCESY ELEKTROCHEMICZNE W ODBIORNIKU KONTROLOWANEGO OBWODU ELEKTRYCZNEGO

Konstrukcję strefy reakcyjnej określa konstrukcja układu mechanicznego – strefa tarcia układu mechanicznego. Na rysunku 7a pokazano pole elektryczne pomiędzy powierzchniami pierścieni, które za pomocą odległości pomiędzy nimi skoncentrowano do pola płasko równoległego. Dla wybranego układu wybrano współrzędne kartezjańskie do analizy procesów w tej strefie. Wybrany obszarom powierzchni przypisano rzeczywiste wymiary oddziaływania pola elektrycznego (rys.7b): odległość międzypowierzchniową L i wysokość h , równą szerokości pierścieni. Taki rodzaj oddziaływania międzypowierzchniowego stosuje się w kontrolowanym obwodzie elektrycznym. Rodzaj materiału elektrody pomocniczej w odróżnieniu od rodzaju materiału elementu obciążającego zależy od procesów przemian fazowych jakie zastosujemy w kontrolowanym obwodzie elektrycznym.

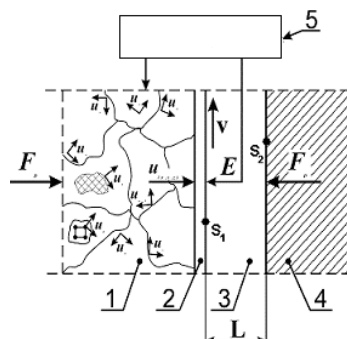


Rys.7. Rozkład pola elektrycznego: a) pomiędzy bocznymi powierzchniami pierścieni 1 i 2; b) w wybranym układzie współrzędnych. ΔU – napięcie doprowadzone do pierścieni, L – odległość międzypowierzchniowa; h – szerokość występującego pola równa szerokości pierścienia; ds_1 , ds_2 – wycinek powierzchni polaryzowanej; j – wypadkowy strumień ładunków elektrycznych - j_n – normalnych i j_s – stycznych

Z rysunku 7b wynika, że przy doprowadzeniu do elementów prądu stałego wypadkowy strumień ładunków elektrycznych jest proporcjonalny do wektorów pola elektrycznego, który jest gradientem potencjału elektrycznego materiału:

$$j = E/\rho; \quad E = - \text{grad} \cdot u(x, y, z) \quad (1)$$

E – potencjał elektrochemiczny, mierzony od strony środowiska (rys.8). Z procedury pomiarowej i w odróżnieniu od $u_1(x,y,z)$ doprowadzonego do powierzchni rozdziału faz przyjęto znak „-”.



Rys.8. Schemat pomiarów potencjału elektrycznego E materiału badanego 1, posiadającego warstwę pasywacyjną 2 w środowisku 3, obciążonego siłami związanymi z wymuszeniem ruchu powierzchni względem środowiska v , elementem 4 działającym siłą F na powierzchnię S_1 ; $u(x,y,z)$ – potencjał elektryczny tworzywa badanego; E – potencjał elektrochemiczny materiału w środowisku; L – odległość pomiędzy powierzchniami elementu badanego i pomocniczego, 5 – potencjostat

Gęstość ładunków elektrycznych (rys.7b) w omawianym polu elektrycznym równa jest składowej normalnej, zwiększonej o wartość n – wynikającej z sumy wektorów.

$$j = j_n \cdot n = -\frac{1}{\rho} (\text{grad} \cdot u \cdot n) \quad (2)$$

Potencjał E dla niepolaryzowalnych materiałów w środowisku elektrolitu różni się od napięcia $u(x,y,z)$ o wartość stałą:

$$u_1 \approx -E_{r1} = \text{const}_1 \quad (3)$$

u_1 – potencjał elektryczny materiału badanego;
 E_{r1} – potencjał równowagowy materiału elektrody badanej.

Dla elektrody pomocniczej przy napięciu zewnętrznym ΔU potencjał elektryczny elektrody pomocniczej u_2 wynosi (4):

$$u_2 \approx \Delta U - E_{r2} = \text{const}_2 \quad (4)$$

Równania (3) i (4) nie uwzględniają polaryzacji elektrod i wykorzystywane są do badań rozkładów pól elektrycznych.

Jeśli na drodze przejścia strumienia ładunków nie ma ich odpływu to znaczy (5):

$$\operatorname{div} j = - \operatorname{div} \left(\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} u \right) = 0 \quad (5)$$

Przy oporności elektrolitu (jednakowej w całej objętości) można wyciągnąć przed znak operatora dywergencji ($1/\rho$) i wtedy równanie dla potencjału u przyjmuje postać równania Laplace'a (6):

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} u \equiv \nabla^2 u = 0 \quad (6)$$

Zapis równania (6) w przyjętych współrzędnych kartezjańskich (rys. 7) przyjmuje postać (7):

$$\nabla^2 u = \frac{\partial^2 u}{\partial^2 x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial^2 y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial^2 z^2} = 0 \quad (7)$$

Z założenia, że pole jest równoległe i jednorodne dla nieskończenie małej powierzchni Δs równanie (6) upraszcza się do postaci (8):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial^2 x^2} = 0 \quad (8)$$

a dla ogólnych warunków granicznych dla każdej z powierzchni (9):

$$\left. \frac{\partial u}{\partial n} \right|_s = -\rho \cdot j \quad (9)$$

Uwzględniając, że przy doprowadzeniu do elementów prądu stałego, katodowe i anodowe zależności przebiegają według równań (10 i 11):

$$E_k = E_k^r + \eta_k(j_k), \quad (10)$$

$$E_a = E_a^r + \eta_a(j_a), \quad (11)$$

gdzie: E_k^r i E_a^r – potencjały równowagowe materiałów elektrod;

η_k i η_a - katodowe i anodowe nadnapięcie.

Katodowe i anodowe nadnapięcia są funkcją katodowego i anodowego strumienia ładunków elektrycznych. Strumień ładunków elektrycznych (odniesiony do powierzchni s , na której oddziałuje) jest gęstością ładunków elektrycznych – gęstością prądu.

Potencjały elektrodowe mierzone z uwzględnieniem równań (10) i (11) wyrażane są poprzez wartości funkcji potencjalnych i ich pochodnych prostopadłych do każdej z powierzchni (12 i 13):

$$u_k = E_k^r - \eta_k \left(-\frac{1}{\rho} \frac{\partial u}{\partial n} \Big|_{S_k} \right) \quad (12)$$

$$u_a = U - E_a^r - \eta_a \left(-\frac{1}{\rho} \frac{\partial u}{\partial n} \Big|_{S_a} \right) \quad (13)$$

Potencjały równowagowe materiałów E_k^r , E_a^r są wartościami tabelarnymi (teoretycznymi). Przy zanurzeniu materiału elektrodowego do środowiska potencjały mierzone różnią się od wartości potencjałów równowagowych. Potencjał, który przyjmuje materiał w środowisku nazywamy potencjałem stacjonarnym (E_{st}).

Nadnapięcia (η_k i η_a) dla przebiegu wybranych procesów elektrodowych określane są na podstawie ogólnych charakterystyk napięciowo-prądowych, uzyskiwanych poprzez polaryzację elektrod od stacjonarnego do zadanego.

Charakterystyki przemian fazowych materiału obrabianego: osadzania, roztwarzania, pasywacji i transpasywacji (w stanie makroskopowym) uzyskujemy przez polaryzację w wybranym potencjale. Obserwujemy przy tym ilość ładunków elektrycznych, biorących udział w procesie przemian.

W pracach [17-20] pokazano charakter przemian fazowych w kontrolowanym obwodzie elektrycznym osadzania powłok cynkowych w układzie mechanicznym: nóż tokarski/obrabiany element wykonany ze stali, zabezpieczenie wiertel przed zużyciem tribologicznym lub zabezpieczenie antykorozyjne powłoką cynkową osadzoną w warunkach pracy obrabiarki (elektronacieranie).

Opracowane technologie potwierdzają celowość stosowania kontrolowanego obwodu elektrycznego w układzie mechanicznym.

4. WNIOSKI:

1. Rozkład pól elektrycznych w układach współpracujących elementów określają ich własności materiałowe: przewodność elektryczna, geometria i odległość międzypowierzchniowa;
2. Przebieg reakcji elektrochemicznych (chemicznych) wymaga okresu czasu dla przekształceń fazowych i stabilnego pola elektrycznego, uzyskiwanego w kontrolowanym obwodzie elektrycznym;
3. Stabilne pole elektryczne i obserwacje przemieszczeń, przekształceń fazowych w dodatkowym, kontrolowanym układzie elektrycznym wykorzystywane są do kompensacji zużycia tribologicznego narzędzi skrawających.

5. BIBLIOGRAFIA:

- [1]. Szczerek M.: *Metodologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych*. Wyd. ITE, 1997
- [2]. *Tribologia i tribotechnika*. Pod redakcją M. Szczerka i M. Wiśniewskiego. Wyd. Inst. Technol. Eksploatacji, Radom, 2000
- [3]. Dmitriy N. Garkunov.: *Scientific discoveries in tribotechnologies. No-wear effect under friction. Hydrogen wear of metals*. Moscow, 2006
- [4]. Kałdoński Ł. Wackel A.: *Tworzenie się mikroprądów podczas tarcia technicznie suchego*. Tribologia nr 4, 1979
- [5]. Mróz W.: *Prąd triboelektryczny wskaźnikiem jakości pracy łożysk ślizgowych*. Technika Motoryzacyjna, Warszawa 1981, s.5-6
- [6]. Malonow N., Asenowa M.: *Mass transfer processis as an aspekt of tribosistems self-organization* Rev. Roun Sci. Techn: Ser. Mech. Appl
- [7]. Thissen K.P.: *Phänomonologia, Analyse und Theorie der Wechselwirkung Lokaler und Integraler Prozesse an Festkörperelektroden unter Einwirkung Mechanischer Impakte*, Diss Adw, Berlin, 1983
- [8]. Кухаркин В.И., Мещеряков в.и., Новиков М.В.: *Электронная эмиссия при трении электропроводящих материалов. Сб.Современные материалы и средства исследования и измерения высшего трения*. Москва. Металлургия, 1980, с.70-73
- [9]. Бедов М., М. Кшеминский.: *Электризация, обнаруженная после соприкосновения тел*. Техническая физика. т.27 №5, 1987, с.921-928
- [10]. Marzec S.: *Właściwości warstw miedzi pozostałych z cieczy w procesie toczenia*. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn z.3(103) vol.30,1995
- [11]. Кужаров Ф.С., Задошенко Е. Г., Марчак Р.: *Самоорганизация трибологической системы бронза-глицерин-сталь. Тез. Докл. V Международная научно-техническая конференция по динамике технологических систем*. Ростов-на-Дону, II, 1997, с.124-126
- [12]. Burakowski T., Wierchoń W.: *Surface engineering of metals – principles, equipment, technologies*. CRC Press, Boca Raton-London-New York-Washington. D.C., 1999
- [13]. Kosmylina M.: *Triboelektrolytik deposition of metallic coatings*. Materials Protection. Vol.32. No.10B, Wuchan, Chiny, 1999 s.231-234
- [14]. Kosmylina M.: *Kształtowanie tribologicznych własności węzłów tarcia poprzez konstituowanie technologicznej warstwy powierzchniowej*. Tribologia, Nr 6,1999, s. 839 –847
- [15]. Kosmylina M., Kosmylin A.: *Tribologiczne i elektrochemiczne procesy w systemach tribologicznych*. Problemy Eksploatacji, 3/2000(38), s. 97-111
- [16]. Starczewski L.: *Wodorowe zużywanie ciernych elementów maszyn*. Wyd. ITE, Radom, 2002
- [17]. Patent PL Politechniki Radomskiej (Kosmylina M., Mirzozjew R., Chałko L.) Nr 345374 wyd. 29.01.2008. *Sposób zabezpieczenia przed zużyciem współpracujących ze sobą powierzchni metalowych i układ elektryczny do stosowania tego sposobu*
- [18]. Kosmylina M.: *Razrobotka technologii powyszenia i znosostojkosti detalej maszyn c pomoszczu kontrola i upravlenia strukturoj elektrochimiczyskim metodom*. Sankt-Petersburg. Wyd. S-PPTU, 2005

-
- [19]. Kosmyńska M.: *Układ elektrolityczny zabezpieczający nóż tokarski przed zużyciem tribologicznym*. Tribologia nr 4, 2009, s.89-102
- [20]. Kosmyńska M.: *Wpływ warstw cynkowych na opory wiercenia*. Tribologia Nr 4 2010 s. 157-171
- [21]. Wojtkun F., Sołncew J.P.: *Materiały specjalnego przeznaczenia*. Politechnika Radomska. Monografie nr 36. Radom, 1999
- [22]. Jaworski B.M., Dietłaf A.A.: *Fizyka, poradnik encyklopedyczny*. Wyd. PWN Warszawa 1999
- [23]. Milliday D., Resnick R.: *Fizyka*. Wyd. PWN Warszawa 1996