

KOSMYNINA Mirosława¹
 BUKALSKA Eugenia
 MICHALAK Paweł

Badania potencjału elektrycznego materiału konstrukcyjnego w oleju bazowym

Słowa kluczowe: dielektryk, potencjał elektryczny, olej bazowy

Streszczenie

W pracy omówiono wyniki badań strefy oddziaływania materiału konstrukcyjnego na środowisko – hydrorafinat II. Ustalono, że w warunkach ruchu elementu względem środowiska, materiał wykazuje własny potencjał powierzchniowy. Potencjał powierzchniowy elementu określa rodzaj materiału warstwy powłokowej. Potencjał stacjonarny materiałów powłokowych jest bliski wyższemu stopniowi utlenienia metalu kontaktującego się z olejem (Cu^{+2} , Zn^{+2} , Ag^{+1} , Ni^{+3} , Sn^{+4}). Pomiar potencjałów elektrycznych materiałów konstrukcyjnych w oleju bazowym umożliwi komputerowe sterowanie powierzchniowymi przemianami fazowymi w środowisku hydrorafinatu II po uszlachetnieniu jego składu chemicznego.

RESEARCH OF ELECTRIC POTENTIAL STRUCTURAL MATERIAL IN THE BASE OIL

Abstract

In this work the results of the impact zone of the construction material on the environment (hydrorafinate II) are discussed. It was found that in conditions of relative movement according to the environment, the material has its own surface potential. The surface potential of the rotating element is specified by the coating layer. The potential of the stationary coating materials is close to a higher degree of the oxidation of metal which is combined with oil (Cu^{+2} , Zn^{+2} , Ag^{+1} , Ni^{+3} , Sn^{+4}). The possibility of measurement of electrical potentials of structural materials in the base oil will allow computer controlling of the surface phase changes in the environment of hydrorafinate after the process of their chemical composition.

1. WSTĘP

W urządzeniach mechanicznych szerokie zastosowanie znajdują smary oraz uszlachetnione oleje. Na etapie wytwarzania elementów wykorzystuje się je jako chłodziwa [1,2], stanowią ochronę antykorozyjną i międzyoperacyjną [1,3]. W kinematycznych węzłach tarcia, na etapie eksploatacji elementów, wykorzystywane są celem zmniejszenia współczynnika tarcia [4-6]. Aby zminimalizować wpływ tarcia pomiędzy współpracującymi elementami oleje i smary poddaje się modyfikacji, wprowadzając do ich składu zróżnicowane dodatki uszlachetniające [2-9]. Modyfikacja taka wpływa na parametry procesów współoddziaływania materiału konstrukcyjnego ze środowiskiem, a w konsekwencji na efekty współpracy elementów w pracującym urządzeniu technicznym.

W pracach [10-15] udowodniono, że w środowisku przewodzącym prąd elektryczny możliwe jest przedłużenie okresu eksploatacji narzędzi skrawających, zmniejszenie oporów skrawania oraz podwyższenie jakości powierzchni obrabianych, poprzez sterowanie procesami elektrochemicznymi w dodatkowym, kontrolowanym układzie elektrycznym. Cel osiągnięto w środowisku na bazie wodnych roztworów związków chemicznych podczas elektrolitycznego osadzania powłok niskotarciowych.

Materiały konstrukcyjne posiadają własne pola elektryczne wykorzystywane do połączeń międzyatomowych [16]. W naturalnej atmosferze, oleje nałożone na powierzchnie materiałów konstrukcyjnych wstrzymują procesy nadnapieć elektrycznych, zmniejszają lub oddzielają warstwy oddziaływania potencjału materiału ze środowiskiem. Nakładanie warstw smaru stosuje się jako ochronę międzyoperacyjną.

Możliwość pomiarów potencjałów elektrycznych materiałów powłokowych w hydrorafinacie II daje podstawy do komputerowego sterowania procesami przemian fazowych w środowisku uszlachetnianych olejów bazowych.

Celem pracy jest ocena potencjału elektrycznego stali C45 z osadzonymi powłokami miedzi, cynku, srebra, niklu i cyny w środowisku hydrorafinatu II.

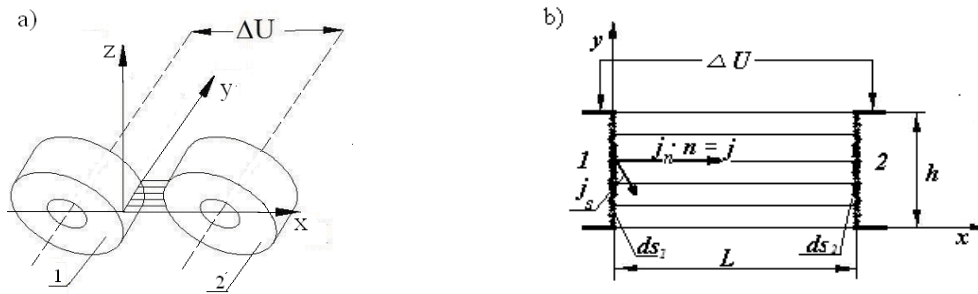
2. PODSTAWY PODJĘCIA TEMATU

W XIX wieku M. Faraday opisał oddziaływanie ładunków elektrycznych jako pole elektryczne, które matematycznie można przedstawić za pomocą wielkości skalarnej - potencjału elektrycznego E . Graficznie pole elektryczne modelujemy za pomocą linii pola.

Na rysunku 1a) pokazano pole elektryczne pomiędzy współpracującymi powierzchniami bocznymi dwóch pierścieni, w środowisku przewodzącym prąd elektryczny. W przestrzeni międzypowierzchniowej pole koncentrowane jest do pola

¹Politechnika 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

płaskorównoległego. Układ współrzędnych kartezjańskich pozwala analizować przebieg procesów elektrycznych i elektrochemicznych w wybranym obszarze. Rozpatrywany układ posiada rzeczywiste wymiary oddziaływania pola elektrycznego (rys.1b): odległość międzypowierzchniową L i wysokość h , równą szerokości pierścienia.



Rys.1. 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

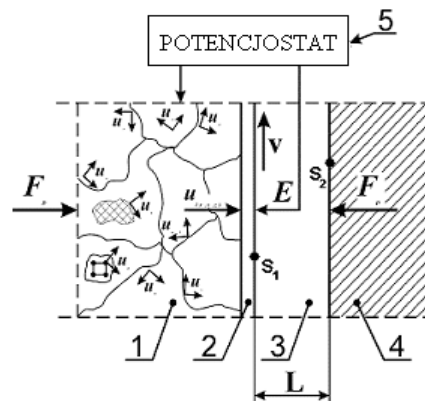
Gęstość ładunków elektrycznych (rys.1b) w omawianym polu elektrycznym równa jest składowej normalnej zwiększonej n -krotnie – wynikającej z sumy wektorów prostopadłych i stycznych, związanych z mikrochropowatością powierzchni:

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

Polaryzacja elementów prądem stałym powoduje ruch strumienia ładunków elektrycznych proporcjonalny do wektorów pola elektrycznego - gradientu potencjału elektrycznego materiału:

$$j = E/\rho; \quad E = -\text{grad} \cdot u(x, y, z) \quad (2)$$

gdzie: E – potencjał elektrochemiczny, mierzony od strony środowiska (rys.2).



Rys.2. 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

Z procedury pomiarowej i w odróżnieniu od $u_1(x,y,z)$ wewnątrz materiału, doprowadzonego do powierzchni rozdziału faz, dla E przyjęto znak „-”.

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

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

gdzie: u_1 – potencjał elektryczny materiału badanego;

E_{r1} – potencjał równowagowy materiału elektrody badanej.

Przy napięciu zewnętrznym ΔU potencjał elektryczny elektrody pomocniczej u_2 wynosi:

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

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 odplywu (strat) to wówczas:

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

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

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

Zapis równania (6) w przyjętych współrzędnych kartezjańskich rys.2 przyjmuje postać:

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

Zakładając, że w kierunku osi z brak jest linii pola, a w kierunku x linie pola są równoległe do osi to dla nieskończonej małej powierzchni Δs równanie (7) upraszcza się do postaci:

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

a dla ogólnych warunków granicznych dla każdej z powierzchni:

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

Dla wyznaczenia niezależności parametrów elektrochemicznych – napięcie pomiędzy elementami, potencjał elementu, potencjał katody, potencjał anody (U, E, E_2, L) w równaniu (7) i przyjętych warunkach brzegowych (3) i (4) wprowadzimy bezwymiarowe współrzędne oraz zmienną:

$$\hat{x} = x/L; \quad \hat{y} = y/L; \quad \hat{z} = z/L; \quad \hat{n} = n/l \quad (10)$$

wówczas:

$$\hat{u}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) = \frac{\hat{u}(\hat{x}L, \hat{y}L, \hat{z}L)}{U - E_{r2} + E_{r1}} \quad (11)$$

W bezwymiarowych zmiennych:

$$\Delta \hat{u}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) = \frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial \hat{x}^2} + \frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial \hat{y}^2} + \frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial \hat{z}^2} = 0 \quad (12)$$

oraz napięciu od strony materiału:

$$\hat{u}_{s_1} = 0; \quad u_{s_2} = 1 \quad (13)$$

to przy prostym przekształceniu matematycznym, stosunek ilości ładunków w dwóch dowolnie wybranych punktach polaryzowanej powierzchni wyniesie:

$$\frac{j_1(A)}{j_2(B)} = \frac{-\frac{1}{\rho} \frac{\partial u}{\partial n}(A)}{-\frac{1}{\rho} \frac{\partial u}{\partial n}(B)} = \frac{(U - E_{r_2} + E_{r_1})/L}{(U - E_{r_2} + E_{r_1})/L} \cdot \frac{\frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{n}}(A)}{\frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{n}}(B)} = \frac{\frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{n}}(A)}{\frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{n}}(B)} \quad (14)$$

Z równań wynika, że w uogólnionych zależnościach, stosunek ładunków elektrycznych (gęstość strumienia ładunków elektrycznych) w dowolnym punkcie A i B materiału polaryzowanego nie zależy od rozmiaru elementów układu (średnicy pierścieni) ani nie zależy od parametrów elektrochemicznych. Procesy elektrochemiczne są procesami wtórnymi oddziaływania elektrycznego.

Przy zamianie środowiska, z ośrodka przewodzącego prąd elektryczny na dielektryk, uniemożliwiamy przejście linii pola elektrycznego i wymiany ładunków elektrycznych pomiędzy materiałami elementów. Pomijana jest przy tym wymiana ładunków elektrycznych pomiędzy materiałem elementu i warstwą dielektrycznego środowiska.

Metaliczny materiał konstrukcyjny posiada własne pole elektryczne [16]. Cienkie warstwy dielektryka, przylegające do materiału elementu, mogą być polaryzowane potencjałem własnym materiału z ukierunkowaniem dipoli i wytworzeniem warstwy podwójnej. Stwarza to możliwość pomiaru potencjału elektrycznego materiału konstrukcyjnego w środowisku nieprzewodzącym przy położeniu elektrody porównawczej bardzo blisko powierzchni lub zwiększenie obszaru oddziaływania pola poprzez ruch (na przykład obrotowy) elementu względem środowiska.

3. METODY BADAŃ

Na pierścieniach o średnicy $\varnothing 40$ mm i wysokości $h=10$ mm wykonanych ze stali C45 osadzono powłoki o grubości: 10-12 μm z miedzi, niklu, cynku, cyny i srebra. Do osadzania zastosowano metodę elektrolityczną. Skład chemiczny użytych elektrolitów i warunki osadzania zawiera tabela 1.

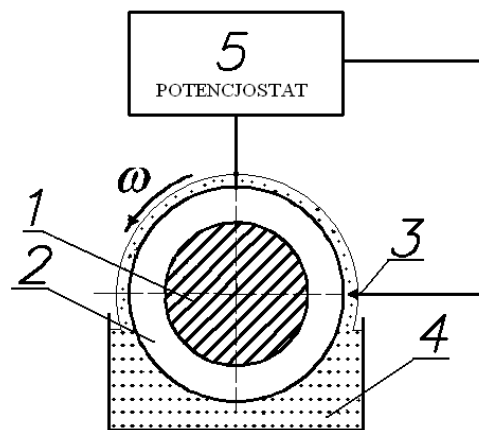
Tab. 1. Skład chemiczny elektrolitów oraz warunki osadzania powłok galwanicznych

Metal osadzany	Skład chemiczny	Stężenie, [g/dm ³]	Kwasowość [pH]	Gęstość prądu, [A/dm ²]	Temperatura [°C]
Miedź	CuSO ₄ 5H ₂ O	30	7,5	0,5-0,7	20±3
	Na ₂ P ₂ O ₇ 10 H ₂ O	120			
	Na ₂ HPO ₄ 12 H ₂ O	85			
Nikiel	NiSO ₄ 7 H ₂ O	250	5,3-5,6	2,0-5,0	20±3
	Na ₂ SO ₄ 10 H ₂ O	100			
	NaCl	50			
	(C ₆ H ₄ CH ₃ SO ₂ NH ₂) ₂				
Cynk	ZnSO ₄ 7 H ₂ O	250	3,5-4,5	2,0-3,0	20±3
	Na ₂ SO ₄ 10 H ₂ O	50			
	Al ₂ (SO ₄) ₃ 18 H ₂ O	30			
	klej	1-3			
Cyna	SnSO ₄	100	-	2,0-5,0	20±3
	H ₂ SO ₄	100			
	fenol	15-30			
	klej	0,5-1,0			
Srebro	AgCl	40	-	2,0-5,0	20±3
	K ₃ [Fe(CN) ₆]	200			
	K ₂ CO ₃ 2 H ₂ O	30			
	MgSO ₄ 7 H ₂ O	0,2			

Pomiary potencjałów prowadzono bezpośrednio po osadzeniu powłok w odniesieniu do elektrody chlorosrebrowej i przeliczano względem elektrody wodorowej.

Potencjał elektryczny elementów z osadzoną powłoką mierzono w Hydrorafinacie II, oleju o lepkości kinematycznej $\nu_{50} = 58,40$ mm²/s, produkcji Mazowieckich Zakładów Rafineryjnych i Petrochemicznych w Płocku.

Do pomiarów zastosowano stanowisko przedstawione na rysunku 3.



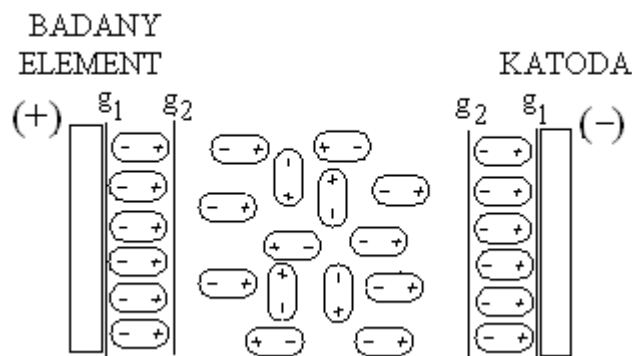
Rys.3. Schemat układu pomiarowego potencjału materiału powłokowego w oleju bazowym: 1 – elektroda wirująca, 2 – pierścień z nałożoną powłoką, 3 – elektroda porównawcza, 4 – olej bazowy, 5 – potencjostat, ω – prędkość obrotowa elementu

Stanowisko składa się z elementu badanego (2), osadzonego na wałku (1) umożliwiającym ruch obrotowy (ω) pierścienia w środowisku. Hydrorafinac II znajdujący się w naczyniu (4) podczas obrotów elektrody nakłada się na powierzchnie elementu w postaci warstwy olejowej. Układ pomiarowy potencjału elektrycznego składa się z elektrody porównawczej (3), potencjostatu/galwanostatu ATLAS 98 (5) i przewodów łączeniowych.

Uzyskane wyniki pomiarowe porównano z potencjałami standardowymi – obliczeniowymi w przyjętych warunkach termodynamicznych.

4. WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

W strefie przyelektrodowej – w polu elektrycznym materiału zanurzonego w hydrorafinacie zachodzi polaryzacja orientacyjna. W mikroobjętościach przylegających do naładowanej powierzchni (rys.4) powstaje sumaryczny (różny od zera), elektryczny moment dipolowy cząsteczek. Spolaryzowanie cząsteczek (dipoli) jest zgodne z kierunkiem polaryzacji materiału.



Rys.4. Schemat tworzenia podwójnej warstwy hydrorafinac w polu oddziaływania elektrycznego elementu badanego o granicach rozdziału faz: g_1 – materiału badanego i własnego pola elektrycznego; g_2 – utworzonej warstwy olejowej ze środowiskiem

Materiał badany z dipolami środowiska tworzy elektryczną warstwę podwójną z granicą rozdziału faz (g_1) między materiałem badanym a wytworzoną warstwą olejową. Taką warstwę podwójną uzyskamy także przy powierzchni katody. Granica (g_2) oddziela zorientowaną elektrycznie przypowierzchniową warstwę oleju od obszaru oleju z nieuporządkowanym rozłożeniem dipoli.

Przy usytuowaniu, blisko powierzchni badanej, drugiego elementu (katody) zjawiska elektryczne sprowadzają się do koncentracji statycznych ładunków elektrycznych materiału badanego i elektrycznego „przebiecia” warstwy olejowej.

Podczas ruchu elementu, np. obrotowego, w środowisku oleju bazowego oddziaływanie pola materiału badanego jest dostateczne dla pomiaru jego potencjału. W teorii procesów elektrochemicznych przyjęto analizować potencjały wewnątrz fazy stałej (od strony materiału) z uwzględnieniem spadku potencjału na granicy rozdziału faz metal/środowisko i cienkiej warstwy środowiska („u” – rys.2).

Potencjał standardowy każdego z pierwiastków chemicznych związany jest z ilością ładunków elektrycznych (lub reakcji elektrochemicznych) oraz z możliwością tworzenia jonów w zróżnicowanym stopniu utlenienia (tabela 2).

Tab. 2. Teoretyczny, standardowy potencjał materiału powłokowego

Materiał powłokowy	Reakcja chemiczna	Potencjał standardowy
Miedź	$\text{Cu} \leftrightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}$	0,337
	$\text{Cu} \leftrightarrow \text{Cu}^+ + \text{e}$	0,521
	$\text{Cu}^+ \leftrightarrow \text{Cu}^{2+} + \text{e}$	0,153
	$\text{Cu} + \text{Cl} \leftrightarrow \text{CuCl} + \text{e}$	0,137
Nikiel	$\text{Ni} \leftrightarrow \text{Ni}^{2+} + 2\text{e}$	-0,230
	$\text{Ni} + 2\text{OH}^- \leftrightarrow \text{Ni}(\text{OH})_2 + 2\text{e}$	-0,720
	$\text{Ni}(\text{OH})_2 + \text{OH}^- \leftrightarrow \text{NiOOH} + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}$	0,490
Cynk	$\text{Zn} \leftrightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}$	-0,763
	$\text{Zn} + 4\text{OH}^- \leftrightarrow [\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-} + 2\text{e}$	-1,216
	$\text{Zn} + 2\text{OH}^- \leftrightarrow \text{Zn}(\text{OH})_2 + 2\text{e}$	-1,245
Cyna	$\text{Sn} \leftrightarrow \text{Sn}^{2+} + 2\text{e}$	-0,140
	$\text{Sn}^{2+} \leftrightarrow \text{Sn}^{4+} + 2\text{e}$	0,150
	$\text{Sn} \leftrightarrow \text{Sn}^{4+} + 4\text{e}$	0,010
Srebro	$\text{Ag} \leftrightarrow \text{Ag}^+ + \text{e}$	0,799
	$\text{Ag} + \text{Cl}^- \leftrightarrow \text{AgCl} + \text{e}$	0,222
	$\text{Ag} + 2\text{OH}^- \leftrightarrow \text{Ag}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}$	0,344
	$\text{Ag}_2\text{O} + 2\text{OH}^- \leftrightarrow 2\text{AgO} + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}$	0,601

Aktywność metalu wyrażona w szeregu napięciowym jest wartością teoretyczną – obliczeniową. Odnosi się do wybranych warunków termodynamicznych. W szeregach napięciowych potencjał wodoru przyjęto za zero. Potencjały mierzone zależą od składu chemicznego środowiska.

Hydrorafinat nie zawiera kationów metalu mierzonego, ani innych anionów.

Przyjęcie koncepcji oceny potencjału materiału pozwoliło uprościć szereg napięciowy metali podając tylko wartość bez wskazania reakcji chemicznej, a przy tym rozdzielić metale na bardziej elektrododatnie i elektroujemne w stosunku do elektrody zerowej (wodorowej).

W tabeli 3 podano wartości potencjałów mierzonych odnośnie elektrody wodorowej w oleju bazowym elementów bezpośrednio po nałożeniu powłok i dobrano potencjał tabelaryczny, najbliższy do potencjału mierzonego.

Tab. 3. Powierzchniowe potencjały elektryczne mierzone w oleju bazowym bezpośrednio po wykonaniu powłoki

Metal powłoki	Potencjał standardowy [V]	Średnia wartość pomiarowa potencjału [V]
Miedź	+ 0,34	+0,34
Nikiel	-0,25	-0,20
Cynk	- 0,75	- 0,75
Cyna	-0,14	-0,20
Srebro	+0,80	+ 0,81

Z danych tablic 2 i 3 wynika, że mierzony potencjał odpowiada wyższemu stopniowi utlenienia metalu dla każdego z rodzajów badanych powierzchni: Cu^{+2} , Zn^{+2} , Ag^{+1} , Ni^{+2} , Sn^{+4} .

Badania składów chemicznych pierwiastków osadzanych metodą galwaniczną wykazały, że powłoki zawierają do 2% zanieczyszczeń elektrolitem i pochodzących najczęściej z elektrolitów. Z oceny powierzchniowych właściwości elektrycznych materiału elementu wynika, że potencjał określa dominujący w materiale składnik.

Pomiary powierzchniowych potencjałów elektrycznych materiałów konstrukcyjnych w oleju bazowym umożliwią komputerowe sterowanie powierzchniowymi przemianami fazowymi w środowisku hydrorafinatu II po uszlachetnieniu jego składu chemicznego.

5. WNIOSKI

- W oleju bazowym, hydorafinacie, istnieje możliwość pomiaru powierzchniowego potencjału elektrycznego elementu metalicznego. Obroty elektrody (pierścienia) umożliwiły badania potencjału pomiędzy materiałem i elektrodą porównawczą.
- Potencjał elektryczny elementu określa rodzaj materiału powłokowego. Potencjał stacjonarny materiałów powłokowych jest bliski wyższemu stopniowi utlenienia metalu kontaktującego się z olejem (Cu^{+2} , Zn^{+2} , Ag^{+1} , Ni^{+2} , Sn^{+4}).

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] *Poradnik inżyniera mechanika. – zagadnienia technologiczne*, WNT, Warszawa, 1985
- [2] Kula P.: *Inżynieria warstwy wierzchniej*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej. Łódź 2000
- [3] *Praca zbiorowa: Poradnik galwanotechnika*. WNT, Warszawa 1985, 2002
- [4] Pytko S.: *Podstawy tribologii i techniki smarowniczej*. Wyd. AGH, Kraków 1989
- [5] *Tribologia i trybotechnika* (pod red. Szczerca M, Wiśniewskiego M.) Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom, 2000
- [6] Dmitriy N. Garkunov .: *Scientific discoveries in tribotechnologies. No-wear effect dunder friction. Hydrogen wear of metals*. Moscow, 2006
- [7] Kotnarowski A.: *Konstituowanie warstw ochronnych z nanoproszków miedzi i molobdeny w procesach tribologicznych*. Wyd. Zakład Poligraficzny Politechniki Radomskiej, Radom 2009
- [8] Burakowski T., Wierzchoń W.: *Surface engineering of metals – principles, equipment, technologies*. CRC Press, Boca Raton-London-New York-Washington. D.C., 1999
- [9] Totten George E., Hong Liang, Marcel Dekker: *Mechanical Tribology. Materials Characteryzation, and Aplications*, INC. New York, 2004
- [10] Kosmynina M.: *Triboelektrolytik deposition of metallic coatings. Materials Protection*. Vol.32. No.10B, Wuchan, Chiny, 1999 s.231-234
- [11] Urząd Patentowy PL, Nr 16 (746) 2002 / Kosmynina M, Mirzójew R.A., Chałko L./ *Układ elektryczny i elektrochemiczny wspomagający pracę węzła tarcia*
- [12] Kosmynina M.: *Układ elektrolityczny zabezpieczający nóż tokarski przed zużyciem tribologicznym*. Tribologia nr 4, 2009, s.89-102
- [13] Kosmynina M.: *Wpływ warstw cynkowych na opory wiercenia*. Tribologia Nr 4/2010 s. 157-171
- [14] Kosmynina M., Bukalska E.: *Osadzanie powłok metalicznych w warunkach eksploatacji urządzeń technicznych*. Logistyka 3/2011
- [15] Kosmynina M.: *Analiza zjawisk towarzyszących procesowi skrawania*. Mechanik nr 1/2012, s.34 XVI
- [16] Jaworski B.M., Dietlaf A.A.: *Fizyka, poradnik encyklopedyczny*. PWN, Warszawa, 1999