

Mirosława KOSMYNINA¹
Eugenia BUKALSKA

OSADZANIE POWŁOK METALICZNYCH W WARUNKACH EKSPLOATACJI URZĄDZEŃ TECHNICZNYCH

Okres eksploatacji ustalony na podstawie potencjalnych właściwości materiału różni się od okresu rzeczywistego zużycia materiałów elementów współpracujących. Stanowi to podstawę do opracowania sposobów kompensacji zużycia tribologicznego podczas pracy elementów.

Na przykładzie węzła skrawania nóż tokarski - obrabiany element uzasadniono celowość stosowania elektrolitycznego osadzania powłok metalicznych, zabezpieczających układ przed zużyciem tribologicznym. W niniejszej pracy oceniano zużycie energii elektrycznej w procesie osadzania powłok cynku i wpływ tego procesu na zużycie energii podczas toczenia. Cienka powłoka cynku zmniejsza zużycie tribologiczne w układzie skrawania i jest warstwą ochronną dla podłoża stalowych, niskostopowych.

DEPOSITION OF METALIC COATINGS DURING EQUIPMENT OPERATION

Life time determined on the basis of the material potential properties differs from the period of real wear time of cooperating elements materials. This is the basis of devise methods of tribological wear compensation during elements work.

On the example of turning tool – turned, the advisability was accounted of electrolytic deposition of metallic coatings in order to protect against tribological wear. The electric energy consumption during zinc coating deposition was evaluated as well as influence of this process on electrical energy consumption during turning process. Thin zinc coating decrease tribological wear in turning system and provide protective layer on low alloyed steel substrates.

1. WSTĘP

Komputerowe programy projektowania bryłowego: CAM, CAD, Inventor, 3D Solidworks, Mechanical i inne, przy ustalonych właściwościach materiału konstrukcyjnego na podstawie badań według PN (ISO) modeli – próbek [1,2], pozwalają ideę projektu maszyny, każdego z elementów realizować w bardzo krótkim przedziale czasowym. Także i okres wytwarzania elementów skraca się przez stosowanie obrabiarek CNC. Służą do tego

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

programy Mastercam, Heihenhein Edgecam i podobne, które równocześnie umożliwiają symulację współpracy elementów.

Przeniesienie projektów urządzeń technicznych do produkcji powinno mieć uzasadnienie w technologiach recyklingu materiałów konstrukcyjnych, w tym cieczy chłodząco - smarujących i smarów [3]. Stosowane w technice materiały metalowe mogą być wtórnie wykorzystywane w recyklingu materiałów konstrukcyjnych.

Zamknięty cykl obiegu materiałów w technice polega na: wytworzeniu elementu, modyfikacji stanu materiału metodami inżynierii powierzchni, eksploatacji urządzenia oraz na recyklingu i utylizacji (rys.1.).

Najistotniejszym okresem zamkniętego cyklu obiegu materiałów jest okres eksploatacji urządzenia, a w nim każdego z układów współpracujących.



Rys.1. Zamknięty cykl obiegu materiałów konstrukcyjnych w technice: 1-2 –wytwarzanie elementu; 2-3 – modyfikacja stanu materiału metodami inżynierii powierzchni; 3-4 – eksploatacja urządzenia; 4-1 – recykling, utylizacja

Obserwacje pracy urządzeń technicznych w warunkach eksploatacji wskazują, że elementy zużywają się z niejednakową szybkością [4-7].

W pierwszej kolejności zużywają się (zmieniają kształt i wymiary) elementy obciążone mechanicznie z tarcie i korozyjnie. Przedłużenie okresu eksploatacji dla takich elementów jest wciąż aktualnym tematem. Uzasadnione jest zwiększenie okresu eksploatacji współpracujących elementów poprzez osadzanie warstw metalicznych, niskotarciowych bez użycia olejów i trudno degradowalnych emulsji olejowych [10].

Do elementów urządzenia technicznego – maszyny, obciążanych równocześnie czynnikami mechanicznymi (tarcie) i korozyjnymi, należą narzędzia skrawające. Jest to okres ich eksploatacji.

W pracach [8-10] pokazano możliwość trzykrotnego przedłużenia okresu eksploatacji noży tokarskich. Osadzenie elektrolityczne powłok cynkowych na narzędziu skrawającym zmniejsza współczynnik tarcia od wartości: 0,4 – 0,6 do wartości: 0,03 – 0,05 [11,12].

Osadzanie powłok cynkowych w węźle skrawania następuje w wyniku połączenia niezależnych technologii: kształtowania elementu poprzez toczenie oraz elektrolitycznej redukcji metalu z cieczy chłodziwo-smarującej.

Przy tym dodatkowo do procesu mechanicznego, kształtującego element, dodawana jest energia elektryczna związana z wydzieleniem powłoki.

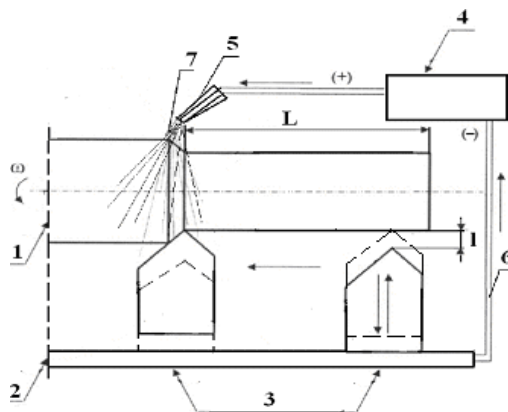
Celem niniejszej pracy jest ocena efektywności technologii tworzenia warstwy niskotarciowej w węźle skrawania.

2. METODY BADAŃ

Badano energochłonność i materiałochłonność niezależnych i synergicznych procesów: toczenia elementów stalowych z jednoczesnym elektrolitycznym wytworzeniem cienkiej warstwy niskotarciowej – cynku.

Proces skrawania przeprowadzono na tokarce marki Proma SKF 800 (moc przyłączeniowa 0,55 kW); wybrano nóż tokarski wykonany ze stali narzędziowej szybko tnącej SW18 wg PN-EN ISO 4957:2004; obrabiano element w postaci wałka $\varnothing 30$ wykonanego ze stali 45 (skład chemiczny: C 0,43%; Mn 0,6%; Si 0,3%; P 0,2%; S 0,03%; Cr 0,2%; Ni 0,2%; Mo 0,1%; Al 0,02%; Cu 0,2%); w wybranych warunkach: obroty wrzeciona – 600 obr/min.; głębokość skrawania – 0,5 mm; długość toczenia – 130 mm; posuw automatyczny – 0,2 mm/obr.; prędkość skrawania 68 m/min.

Nie naruszając parametrów toczenia zastosowano korzystne warunki osadzania powłok. Wybór parametrów osadzania powłok ciągłych, cynkowych prowadzono poza układem skrawania za pomocą potencjostatu Atlas 98.



Rys. 2. Układ mechaniczny i elektrolityczny stosowany w warunkach toczenia elementu: 1 – kształtowany element; 2 – prowadnica tokarki; 3 – położenie noża tokarskiego w różnych fazach obróbki; 4 – źródło prądu stałego; 5,6 – przewody łączeniowe z elektrodą pomocniczą; 7 – elektrolit; L – długość elementu obrabianego; l – odległość noża od powierzchni obrabianej; ω – prędkość obrotowa

Do wydłużenia okresu eksploatacji noża tokarskiego rozbudowano układ skrawania o dodatkowy obwód elektrolityczny. Tym samym, zwiększono ilość energii potrzebną na

proces skrawania o energię elektryczną, zużywaną na wydzielenie powłok. Układ elektrolityczny (rys.2) składa się ze źródła prądu stałego (4), podłączonego do węzła skrawania (1-3) oraz pomocniczej elektrody cynkowej (5), umieszczonej w środowisku elektrolitu (7).

Eksperymentalnie ustalono rzeczywisty pobór energii elektrycznej oraz udział materiałów powłokowych w procesie toczenia, z zastosowaniem elektrolitycznego osadzania powłok.

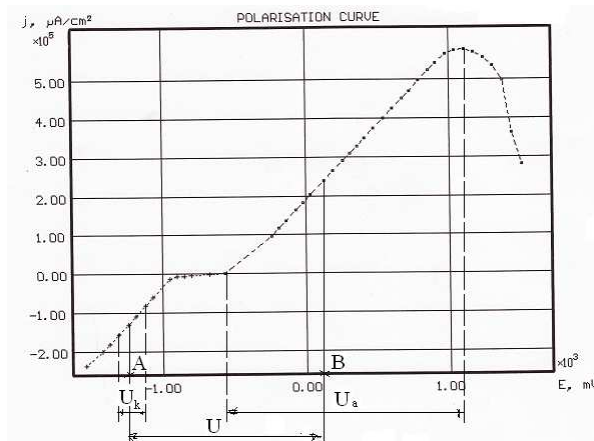
Analizę przedstawiono w omówieniu wyników badań (3).

3. WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

3.1. Wybór parametrów osadzania cynkowych powłok ciągłych

Parametry osadzania powłok elektrolitycznych określone są w warunkach stanowiska badawczego w równoległym polu elektrycznym dla próbek płaskich, równoległych o znanej geometrii. Napięcie elektryczne pomiędzy nożem, elementem obrabianym i elektrodą pomocniczą ustalane jest poza tokarką w układzie badawczym, sterowanym komputerowo.

Na rysunku 3. przedstawiono przykładowe krzywe polaryzacji katodowej i anodowej osadzania cynku na stalowym podłożu. Napięcie elektryczne U (jakie powinno być zadane pomiędzy elektrodami w procesie skrawania tj. pomiędzy nożem tokarskim, obrabianym elementem i elektrodą pomocniczą) wyznaczane jest na podstawie badań voltamperometrii liniowej, stałoprądowej (w przypadku zastosowaniu źródła prądu stałego). Badania prowadzone są w równoległym polu elektrycznym.



Rys.3. Wybór napięcia elektrycznego pomiędzy współpracującymi elektrodami określony na podstawie katodowej i anodowej krzywej polaryzacji: U_k – zakres potencjałów dla których zachodzi proces osadzania powłok ciągłych, U_a – zakres potencjałów roztwarzania elektrody pomocniczej, U – napięcie w układzie badanym

Zakresy potencjałów, w których przebiegają procesy osadzania powłok wymaganej jakości, przy aktywnym roztwarzaniu elektrody pomocniczej wybierane są poprzez

polaryzację elektrody od potencjału stacjonarnego i zatrzymaniu potencjału w wybranym potencjale na okres redukcji metalu w stanie makroskopowym. Te działania proceduralne pozwalają ustalić dwie wielkości:

- zakres potencjałów osadzania powłok ciągłych;
- średnią ilość ładunków elektrycznych, która bierze udział w procesie elektrokryształizacji na powierzchni polaryzowanej.

Na rysunku 3. pokazano zakresy potencjałów polaryzacji anodowej: (U_a) od -600 mV do 1100 mV i katodowej (U_k) od -1500 mV do -1100 mV. Zwiększenie potencjału anodowego prowadzi do pasywacji elektrody pomocniczej. Nieznaczne odchylenie potencjału katody od stacjonarnego do ok. -600mV sprzyja niepełnemu wydzieleniu powłok, a powyżej -1500 mV – osadzaniu proszków. Obrazy powłok przy pow.100x pokazano na rysunku 4a – powłok ciągłych i rysunku 4b - powłok proszkowych z uwidocznionymi dendrytami. Dendryty są słabo związane z podłożem, podczas elektrolizy w postaci cząstek osiadają w elektrolicie.

a)



b)

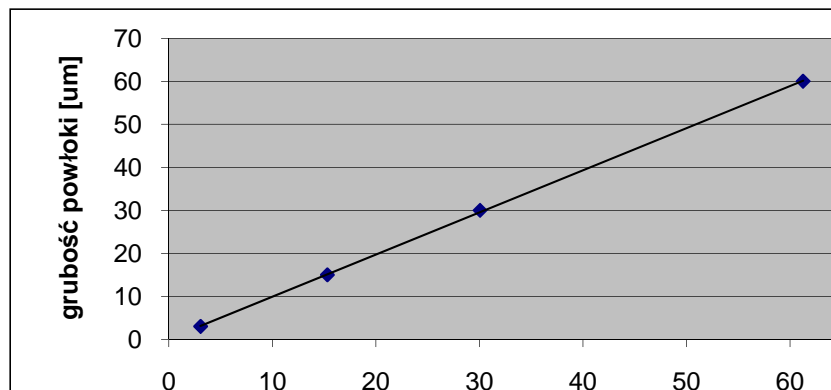


Rys. 4. Wygląd zewnętrzny powłoki cynkowej przy powiększeniu 100x. a) polaryzacja w zakresie od Est do - 1500mV; b) polaryzacja w zakresie od Est do - 2800mV; z prędkością zmian potencjału względem elektrody EAgClP – 311T równej $v = 20\text{mV/s}$. i zatrzymaniem procesów w czasie 5 min

Na podstawie krzywej polaryzacji katodowej określono zakres potencjałów, przy których wydzielają się powłoki cynkowe ciągłe, równomiernie pokrywające powierzchnię stali C45.

Proponowana do zastosowania w procesie obróbki skrawaniem różnica napięć ($U = U_a - U_k$) zaznaczona na rysunku 3 może wynosić na przykład: 1300-1500 mV.

Wybór zakresów potencjałów polaryzacji przy stabilizacji potencjału elektrody pozwala ocenić średnią wartość ładunków elektrycznych, biorących udział w procesie [13-15]. Przy tym znana jest geometryczna wielkość powierzchni. To pozwala zastosować prawo Faradaya do wyznaczenia grubości powłoki, osadzonej w zależności od czasu prowadzenia procesu. Taką zależność szybkości elektrokryształizacji w czasie pokazano na rysunku 5.



Rys.5. Szybkość osadzania powłoki z glicerynowego elektrolitu cynkowania, obliczenia wykonano przyjmując, że: gęstość cynku wynosi $\gamma = 7,2 \text{ g/cm}^3$, wydajność prądową jest stu procentowa i średnia gęstość ładunków elektrycznych biorących udział w procesie wynosi: 18 mA/cm^2 (rys.3.)

Wartość potencjału wybranego procesu w przyjętej metodzie badań jest stała i kontrolowana w trakcie jego trwania, a zmianom podlega gęstość ładunków elektrycznych, biorących udział w reakcjach osadzania. Ustalając potencjał na jednakowym poziomie wymuszamy odpowiadającą temu potencjałowi ilość ładunków elektrycznych i szybkość procesu elektrokryształizacji. Przyjęcie takiej metody badań pozwala na ocenę grubości zgodnie z prawem Faradaya oraz wybór czasu trwania procesu elektrolizy.

Średnia grubość wydzielanej powłoki jest proporcjonalna do czasu trwania procesu elektrolizy tak jak dla próbek płaskich w polu równoległym. Zmieniają się lokalne grubości powłok w układach o innej konfiguracji elementów obrabianych.

Przeniesienie warunków badawczych ($\Delta U = \text{const}$) osadzania powłok w złożony układ jakim jest węzeł skrawania wymaga uwzględnienia tego, że:

- węzeł skrawania znajduje się w ruchu względem elektrody pomocniczej;
- pole powierzchni obrabianej ulega ciągłej zmianie (tworzenie się i odrywanie wióra);
- opór dodatkowego obwodu elektrycznego zwiększa się o rezystancję (zmienną) elementów maszyny, wchodzących w jego skład.

Zastosowanie dobranych w warunkach badawczych parametrów osadzania powłok do warunków rzeczywistych, istniejących w węźle skrawania, omówiono w rozdziale 3.2.

3.2. Osadzanie powłok cynkowych metodą elektrolityczną podczas procesu toczenia

Skrawanie jest technologią ubytkową i polega na usuwaniu cienkich warstw materiału z obrabianego elementu. W związku z tym powierzchnia podlegająca obróbce elektrolitycznej jest znacznie większa, niż powierzchnia ukształtowanego elementu.

W warunkach badawczych można określić ilość energii elektrycznej, zużywanej na proces osadzania warstw metalicznych oraz zużycie materiału na wytworzenie powłoki.

Korzystną strukturą osadzonej warstwy są powłoki cynkowe, ciągłe. Wartość mierzonego napięcia U , pomiędzy narzędziem skrawającym a elektrodą pomocniczą (w odległości 2-3 cm), nie może przekraczać granic wyznaczonych zakresów podczas badań z użyciem potencjostatu: 1300 – 1500 mV. Zakładając, że wydzielamy powłokę o grubości 1 mikrometr na 1 metrze kwadratowym powierzchni obrabianej możemy ocenić na podstawie wzoru (1) wartość zużycia energii technologicznej elektrolizy (E_E) [16] (1):

$$E_E = \frac{U \cdot \gamma \cdot \delta}{10^3 \cdot \eta \cdot K} \quad (1)$$

gdzie: U – napięcie; γ – gęstość materiału powłokowego; δ – grubość powłoki; K – równoważnik elektrochemiczny; η – wydajność prądowa.

Przyjmując dla omawianego procesu osadzania cynku: $U = 1,5$ V; $\gamma = 7,2$ g/cm³; $\delta = 1$ μm; $K=1,22$ g/Ah; $\eta= 100$ % (1) otrzymamy, że na pokrycie 1 m² powierzchni układu obróbkowego powłoką o grubości 1 μm zużyjemy 9·10⁻³ kWh/m². Jest to zużycie elektroenergii w procesie podstawowym – na osadzanie cynku.

Do wydłużenia okresu eksploatacji noża tokarskiego rozbudowano układ skrawania o dodatkowy obwód elektrolityczny. Tym samym, zwiększono ilość energii potrzebną na proces skrawania, o energię na wydzielenie powłok.

Kontrolowany obwód elektryczny składający się z: źródła prądu, elektrody pomocniczej i przewodów łączeniowych zamyka się poprzez elementy tokarki. Ważnym czynnikiem, wpływającym na pobór mocy przez ten układ, jest dobór miejsca podłączenia ujemnego bieguna źródła prądu. Punkt ten powinien znajdować się jak najbliżej punktu styku: nóż tokarski – obrabiany element (w miarę możliwości rozwiązań technicznych) w celu zminimalizowania spadków napięć na podzespołach obrabiarki o dużej rezystancji. Na przykład spadki napięć przy podłączeniu przewodu łączeniowego do imaka narzędziowego (rys.2) wynosiły ok. 3V, a przy połączeniu do prowadnic ok. 10V (wartości odczytane ze wskaźnika źródła prądu).

Dodatkowo na zwiększenie spadków napięć wpływają użyte smary, zabezpieczające elementy maszyny oraz jej stan techniczny (występowanie luzów). Spadki napięć w przewodach łączeniowych można pominąć ze względu na ich dobrą przewodność elektryczną (miedź).

Niezależnie od wyboru miejsca podłączenia źródła prądu i występujących spadków napięć, wartość potencjału (ΔU) występującego pomiędzy elektrodą pomocniczą a węzłem skrawania: nożem tokarskim i elementem obrabianym, pozostaje stała na poziomie wartości określonej w warunkach badawczych.

Możliwość utrzymania potencjału o wybranej wartości w warunkach toczenia powoduje, że uzyskujemy powłoki cynkowe ciągłe: jednolite, gładkie, półbłyszczące na obrabianym elemencie.

Pomiary mocy skrawania wykonane podczas toczenia wałka stalowego o średnicy 20 mm wykazały, że zastosowanie elektrolitycznego wydzielania powłoki cynkowej w węźle skrawania zmniejsza pobór mocy przez tokarkę średnio od wartości 334 W do 286 W czyli zmniejsza energochłonność procesu o około 14%.

Dodatkowy obwód elektrolityczny zastosowany w celu osadzania powłok cynkowych w procesie toczenia pobiera moc rzędu 4 – 7 W, co stanowi 1,2 – 2,1% mocy pobranej przez tokarkę zastosowaną w badaniach.

Z powyższego wynika, że oszczędność energii pobranej przez obrabiarkę podczas procesu z zastosowaniem elektrolizy cynku w pełni rekompensuje wydatek mocy, pobranej przez dodatkowy obwód elektrochemiczny, dając około 12-to procentowy zysk energii w stosunku do obróbki na sucho.

Dane te odnoszą się do tokarki, o małej mocy przyłączeniowej 550 W. Zwiększenie mocy tokarki nie wpływa na zwiększenie mocy pobranej przez układ do elektrolitycznego osadzania powłok. Moc tego dodatkowego układu nie jest zależna od mocy tokarki.

W procesie toczenia z jednoczesnym wydzielaniem powłok cynkowych, oprócz energii elektrycznej, zużywany jest metaliczny cynk. Zużycie cynku do osadzenia powłoki o grubości 1 μm wynosi 7,14 g na m^2 obrabianej powierzchni [16]. Cynk jest osadzany na: obrabianym elemencie, nożu i wiórze.

Na ostrzu noża tokarskiego możliwe jest osadzanie powłoki wówczas, gdy istnieje dostęp elektrolitu i nad napięć elektrycznych do tej strefy. Tym dogodnym okresem współpracy jest rozpoczęcie procesu toczenia, złamanie wióra i zakończenie procesu – odsunięcie noża od obrabianego elementu. Podczas tych czynności wielkość powierzchni obrabianej elektrolitycznie ulega ciągłej zmianie.

Wydzielanie powłoki w procesie toczenia pozwoliło skompensować zużycie noża tokarskiego. Oceniono, że trzykrotny współczynnik synergizmu dla zastosowanej technologii nie spowodował objawów zużycia noża [8].

Równocześnie osadzona powłoka na obrabianym elemencie stanowi przejściową warstwę dla procesu podstawowego – uzyskania powłok szczelnie związanych z podłożem wybranymi metodami inżynierii powierzchni [17]. Powłoka osadzona w trakcie procesu skrawania zwiększa adhezję połączenia rdzenia materiału z powłokami, stosowanymi w inżynierii powierzchni.

Metoda elektrolitycznego osadzania metali podczas obróbki skrawaniem daje duże oszczędności czasu pracy. Eliminuje konieczność używania smarów w celu zabezpieczenia detali przed korozją, zanim zostaną poddane następnym operacjom obróbkowym (ochrona międzyoperacyjna). W efekcie nie poświęca się czasu na usuwanie i neutralizację smarów, uzyskując przez to duże oszczędności finansowe.

Proces elektrolitycznego osadzania powłok podczas obróbki skrawaniem nie wymaga uciążliwego przygotowania podłoża pod wydzielaną powłokę, ponieważ metal osadza się na powierzchni, z której jednocześnie zdejmowana jest warstwa wierzchnia. Jest więc to rdzeń materiału, bez nalotów, tlenków czy innych zanieczyszczeń. Ogranicza to stosowanie wielu środków myjących i trawiących.

Z cieczy chłodząco-smarujących (elektrolitów), używanych w procesie elektrochemicznego osadzania powłok podczas toczenia, można odzyskiwać jony metali, które służą do ponownego uzupełniania stężenia jonów w elektrolicie. Jest to ogromną zaletą tej technologii, ponieważ obecnie odpady pogalwaniczne są powodem zanieczyszczeń środowiska naturalnego człowieka. Problemem dużej wagi jest także olbrzymie zużycie wody w galwanotechnice, około 100 litrów na osadzenie 1 m² powłoki. Dlatego poszukiwanie i wdrażanie nowych, ekologicznych i ekonomicznych rozwiązań technologicznych jest wyzwaniem stawianym projektantom i konstruktorom urządzeń technicznych [13].

4. WNIOSKI:

1. Dobrane w warunkach badawczych parametry osadzania powłok cynkowych ciągłych efektywnie zastosowano w warunkach rzeczywistych, istniejących w węźle skrawania.
2. Potwierdzono celowość stosowania kompensacji zużycia noża tokarskiego i osadzania powłok na elemencie obrabianym poprzez elektrolityczne konstituowanie powłoki cynkowej.
3. Wykazano, że osadzanie cynku bezpośrednio podczas obróbki wiórowej powoduje obniżenie oporów skrawania i zmniejsza (o około 12%) energochłonność procesu.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1]. Dobrzański L. A.: Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo. Materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego. WNT, Warszawa, 2002
- [2]. Michel F. Ashby: Dobór materiałów w projektowaniu inżynierskim. WNT, Warszawa, 1998
- [3]. Rosik- Dulewska Cz.: Podstawy gospodarki odpadami. Wyd. PWN, Warszawa 2005.
- [4]. Tribologia i tribotechnika. Pod redakcją M. Szczerka i M. Wiśniewskiego. Wyd. Inst. Technol. Eksploatacji, Radom, 2000
- [5]. Garkunow D.: Scientific discoveries In tribotechnologies. No-wear effect under friction hydrogen wear of metals. Moskwa 2006.
- [6]. Szczerek M.: Metodologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych. Wyd. ITE, 1997
- [7]. Marzec S., Pytko S.: Tribologia procesów skrawania metali. Nowe ciecze chłodząco-smarujące. Wyd. Zakł. Poligraficznego ITE, Radom, 1999
- [8]. Kosmynina M.: Układ elektrolityczny zabezpieczający nóż tokarski przed zużyciem tribologicznym. Tribologia nr 4, 2009, s.89-102
- [9]. Kosmynina M., Chałko L.: Wytwarzanie powłok elektrolitycznych w procesie skrawania. Inżynieria Materiałowa, Nr 5/2002, 2002, s.368
- [10]. Patent Politechniki Radomskiej (Kosmynina M., Mirzójew 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.

- [11]. Kosmynina M.: Kształtowanie tribologicznych własności węzłów tarcia poprzez konstituowanie technologicznej warstwy powierzchniowej. *Tribologia*, Nr 6, 1999, s. 839–847
- [12]. Kosmynina M., Kosmynin A.: Osadzanie powłok w procesie triboelektrolizy. *Inżynieria Materiałowa*, nr 6/2000, s.329-332
- [13]. Kosmynina M.: Rozrobota tychnologii powyszenia i znosostjokosti detalej maszyn c pomoszczu kontrola i uprawlenia i strukturoj elektrochemiczyskim metodom.Sankt-Petersburg, wyd. S-PPTU, 2005
- [14]. Kosmynina M.: Triboelektrolytik deposition of metallic coatings. *Materials Protection*. Vol.32. No.10B, Wuchan, Chiny, 1999 s.231
- [15]. Kosmynina M.: Mechanizm przemian fazowych w układach triboelektrolitycznych. *Tribologia*, 2/2000(170) s.177-186
- [16]. *Poradnik galwanotechnika*. Praca zbiorowa. Wyd. WNT, Warszawa, 2002
- [17]. Burakowski T., Wierzchoń W.: *Surface engineering of metals – principles, equipment, technologies*. CRC Press, Boca Raton-London-New York-Washington. D.C., 1999