

**Radek N.,\***  
**Szalapko J.\*\***

\*Centrum Laserowych Technologii Metali,  
Politechnika Świętokrzyska,  
Kielce, Polska,  
\*\*Khmelnitckij Uniwersytet Narodowy,  
Khmelnitckij, Ukraina

**WPLYW OBRÓBKŁ LASEROWEJ NA  
WŁASNOŚCI TRIBOLOGICZNE I  
MIKROSTRUKTURĘ POWŁOK  
WĘGLIKOWO-CERAMICZNYCH  
NANOSZONYCH OBRÓBKĄ  
ELEKTROISKROWĄ**

## 1. Wstę

W obecnym czasie obserwuje się rosnącą rolę obróbek wykorzystujących skoncentrowany strumień energii, do których zalicza się między innymi obróbka elektroiskrowa i laserowa.

Obróbka elektroiskrowa należy do tanich i dobrze znanych obróbek wysokoenergetycznych. Metoda ta znana od czasów powojennych dzisiaj wraz z licznymi modyfikacjami znalazła trwałe miejsce wśród obróbek powierzchniowych. Zdecydowały o tym wyjątkowe cechy omawianej metody a w szczególności: możliwość lokalnego oddziaływania, możliwość nakładania cienkich (od kilku  $\mu\text{m}$ ) i grubszych (zwykle do kilkudziesięciu  $\mu\text{m}$ ), dyfuzyjnie połączonych z podłożem powłok z dowolnych materiałów metalicznych oraz prostota i niski koszt urządzeń do nanoszenia powłok.

Procesy wytwarzania powłok na elementach metalowych, do których należy obróbka elektroiskrowa, związane są z transportem masy i energii oraz reakcjami: chemicznymi, elektrochemicznymi i elektrotermicznymi, które im towarzyszą [1]. Współcześnie stosowane są różne odmiany obróbki elektroiskrowej spełniające standardy wytwarzania powłok, a także kształtowania mikrogeometrii powierzchni [2÷5].

O pozycji obróbki elektroiskrowej wśród technik wywarzania warstw powierzchniowych, świadczą liczne zastosowania przemysłowe (począwszy od twardych powłok na krawędziach tnących narzędzi skrawających, aż do rozwiniętych struktur na powierzchniach implantów) i nowoczesne konstrukcje urządzeń (od urządzeń ręcznych do zrobotyzowanych systemów obróbki elektroiskrowej). W samych Stanach Zjednoczonych badania nad tą technologią prowadzone są przez instytuty pracujące dla NASA, AIR FORCE, US NAVY.

Powłoki nanoszone metodą elektroiskrową spełniające funkcje ochrony przed korozją jak również funkcje przeciwzuzyciowe mogą być stosowane np.:

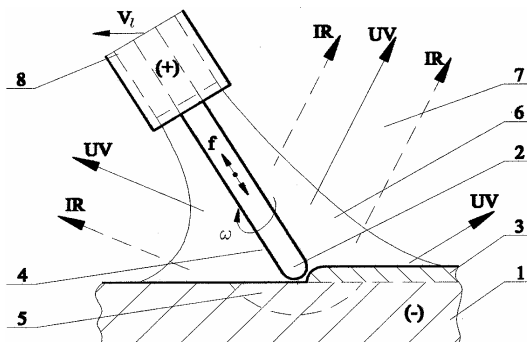
- na pierścieniach uszczelnień czołowych pomp wirowych,
- elementach śrub okrętowych,
- powierzchniach form odlewniczych,
- elementach instalacji transportu paliwa,
- elementach układów wydechowych.

Powłoki elektroiskrowe nie są pozbawione wad, które można eliminować różnymi metodami. Jedną z metod, którą można poprawiać własności powłok elektroiskrowych jest ich obróbka laserowa. Wiązka laserowa może zostać wykorzystana do wygładzania, kształtowania geometrii powierzchni, uszczelniania, ujednorodnienia składu chemicznego itd. naniesionych powłok [6÷9].

Cechą charakterystyczną powłok nanoszonych elektroiskrowo jest to, że mają one specyficzną, nie trawiącą się strukturę - pozostają białe. Warstwa wierzchnia kształtowana jest w warunkach lokalnego oddziaływania wysokiej temperatury i dużych nacisków. Wartości podstawowych parametrów obróbki elektroerozyjnej są następujące [10]:

- ciśnienie fali uderzeniowej od iskry elektrycznej wynosi  $(2÷7) \cdot 10^3$  GPa,
- temperatura osiąga wartości rzędu  $(5÷40) \cdot 10^3$  °C.

Najistotniejsze elementy tworzenia powłoki w wyniku obróbki elektroiskrowej przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1 – Istota formowania warstwy powierzchniowej w procesie obróbki elektroiskrowej

Na przedstawionym schemacie (rys. 1) można wyróżnić: 1 – materiał podłoża (katoda), 2 – elektroda robocza (anoda), 3 – utworzona powłoka o założonych cechach użytkowych, 4 – plazma, 5 – strefa dyfuzyjna lub reakcyjno-dyfuzyjna, 6 – otoczenie bliższe (gaz ochronny), 7 – otoczenie dalsze (powietrze), 8 – uchwyt elektrody z kanałami doprowadzającymi gaz; IR – promieniowanie podczerwone, UV – promieniowanie ultrafioletowe.

W pracy przedstawiono ocenę wpływu obróbki laserowej na właściwości użytkowe powłok WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> naniesionych elektroiskrowo. Ocenę właściwości powłok po obróbce laserowej przeprowadzono na podstawie obserwacji mikrostruktury, badań tribologicznych oraz pomiarów mikrotwardości i chropowatości.

## 2. Materiały i parametry obróbki

Przedmiotem badań były powłoki nakładane elektrodą WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (85 % WC, 10 % Co oraz 5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) o przekroju 3 × 4 mm (anoda) metodą elektroiskrową na próbki wykonane ze stali C45 (katoda). Skład chemiczny stali C45 przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Skład chemiczny stali C45

Pierwiastki	C	Mn	Si	P	S
Zawartość %	0,42±0,50	0,50±0,80	0,10±0,40	0,04	0,04

Do nanoszenia powłok elektroiskrowych użyto urządzenie (o ręcznym przesuwie elektrody) produkcji ukraińskiej, model EIL-8A.

Opierając się na doświadczeniach własnych oraz zaleceniach producenta urządzenia przyjęto następujące parametry nanoszenia powłok elektroiskrowych: napięcie  $U = 230$  V, pojemność kondensatorów  $C = 300$  μF, natężenie prądu  $I = 2,4$  A.

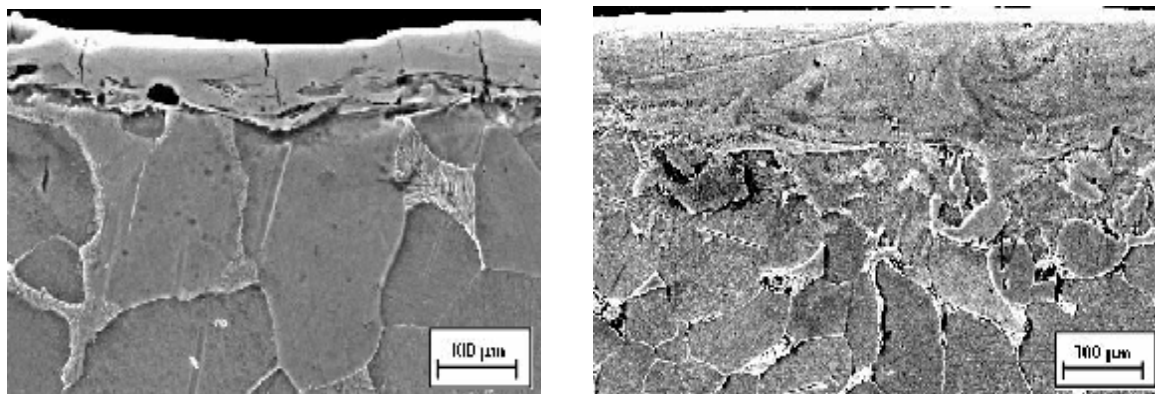
Obróbkę laserową przeprowadzono laserem Nd:YAG (impulsowy tryb pracy), model BLS 720. Próbkę z powłokami elektroiskrowymi naświetlano laserowo przy następujących parametrach obróbki: średnica plamki laserowej  $d = 0,7$  mm; moc lasera  $P = 20$  W; prędkość przemieszczania wiązki  $V = 250$  mm/min; odległość dysza-przedmiot obrabiany  $\Delta f = 1$  mm; czas trwania impulsu  $t_i = 0,4$  ms; częstotliwość powtarzania  $f = 50$  Hz; skok przesuwu wiązki  $S = 0,4$  mm.

## 3. Analiza wyników badań

### 3.1. Analiza morfologii powłok

Analizie mikrostruktury poddano powłoki WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> przed i po obróbce laserowej. Do badań mikrostruktury wykorzystano elektronowy mikroskop skaningowy Joel typ JSM-5400.

Na przykładowej fotografii (rys. 2) przedstawiono przykładowy widok mikrostruktury powłoki WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> stopowanej elektroiskrowo. W oparciu o uzyskane wyniki stwierdzono, że grubość uzyskanych warstw wyniosła od 60±70 μm, natomiast zasięg strefy wpływu ciepła (SWC) w głąb materiału podłoża ok. 30±40 μm. Na przedstawionej fotografii mikrostruktury widoczna jest wyraźna granica pomiędzy powłoką, a podłożem. Można zaobserwować niekorzystne zjawiska w postaci porów i mikropęknięć powłoki.

Rys. 2 – Mikrostruktura powłoki WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> do i po obróbce laserowej

W wyniku modyfikacji wiązką laserową powłok WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nastąpiło ujednorodnienie składu chemicznego powłoki. Wytworzone w wyniku przetapiania laserowego technologiczne warstwy powierzchniowe (TWP) nie posiadają mikropęknięć i porów. Grubość powłoki WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> po modyfikacji laserowej uległa zmianie i mieściła się w zakresie 90÷110 μm. Zasięg SWC wyniósł w głąb materiału podłoża ok. 50÷60 μm.

### 3.2. Pomiary mikrogeometrii

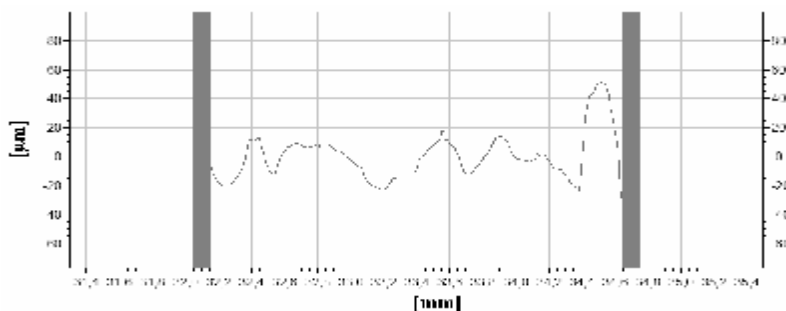
Jedną z głównych wad powłok naniesionych obróbką elektroiskrową jest ich duża chropowatość końcowa. Dotychczas przeprowadzone badania oraz analiza literatury wykazują, że kształtowanie powierzchni zachodzi w wyniku nakładania się na siebie kraterów będących wynikiem erozji podłoża jak również grzbietów utworzonych z przemieszczających się na powierzchnię cząstek materiału powlekającego elektrody. Tak powstała powierzchnia posiada szereg następujących cech: regularność, brak kierunkowości, duże promienie zaokrągleń wierzchołków mikronierówności. W wielu opracowaniach naukowych analizuje się wpływ parametrów procesu na chropowatość powierzchni. Sterując tymi parametrami można uzyskać zakładane zmiany mikrogeometrii powierzchni. Jest to zatem sposób na wytwarzanie powierzchni o zadanej rozwiniętej powierzchni chropowatej zwanej reliefem powierzchniowym.

Pomiary chropowatości przeprowadzono w Laboratorium Pomiarów Wielkości Geometrycznych Politechniki Świętokrzyskiej za pomocą przyrządu TALYSURF 4 przy wykorzystaniu programu SUFORM.

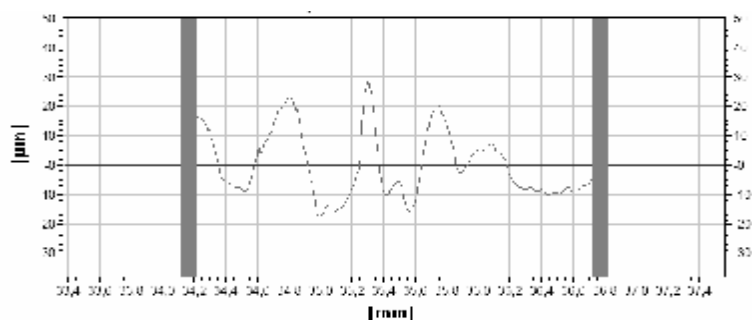
Pomiary chropowatości powłok WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> wykonano w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach. Pierwszy pomiar był wykonany zgodnie z ruchem przemieszczania się elektrody, natomiast drugi pomiar był prostopadły do ściegów skanujących. Z dwóch pomiarów obliczono wartość średnią parametru Ra dla danej powłoki.

Pomiary powłok WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> obrobionych laserem wykonano w kierunku prostopadłym i równoległym do osi ścieżek wykonanych wiązką laserową, a następnie obliczono wartość średnią chropowatości dla danej powłoki. W większości prac podawane są wyniki pomiarów chropowatości dla profili mierzonych wzdłuż osi ścieżek otrzymanych laserem, co nie odzwierciedla rzeczywistego obrazu mikrogeometrii powierzchni po tej obróbce. Maksymalne wysokości chropowatości występują bowiem w kierunku prostopadłym do osi ścieżek.

Powłoki WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> posiadały chropowatość  $Ra = 6,16 \pm 7,79 \mu\text{m}$ , natomiast po obróbce laserowej chropowatość wynosiła od  $13,43 \pm 14,17 \mu\text{m}$ . Próbkę ze stali C45, na które nanoszono powłoki miały chropowatość  $Ra = 0,39 \pm 0,41 \mu\text{m}$ . Przykładowe protokoły pomiarów parametrów mikrogeometrii badanych próbek przedstawiono na rysunkach 3 i 4.



Rys. 3 – Przykładowe wyniki pomiarów parametrów mikrogeometrii dla powłoki WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



Rys. 4 – Przykładowe wyniki pomiarów parametrów mikrogeometrii dla powłoki WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> po obróbce laserowej

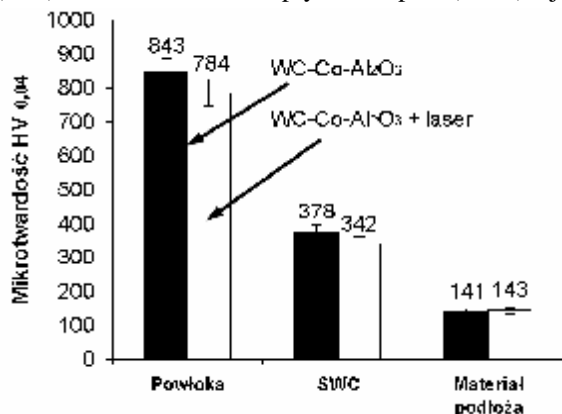
Na podstawie przeprowadzonych pomiarów można stwierdzić, że obróbka laserowa powoduje wzrost chropowatości powłok WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Większa chropowatość powłok WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> po obróbce laserowej jest

efektem ruchu ciekłego metalu wywołanego siłami napięcia powierzchniowego. Niejednorodny rozkład temperatury w wiązce laserowej (mod TEM<sub>00</sub>) powoduje, że profil powierzchni po zakrzepnięciu jest również niejednorodny i w pewnym sensie odzwierciedla rozkład energii w obszarze przetopionym.

W przypadku obróbki laserem impulsowym przyjmuje się, że głównym czynnikiem decydującym o profilu powierzchni po zakrzepnięciu jest ciśnienie par materiału obrabianego, które powoduje „wyrzucanie” materiału z centralnego obszaru i powstanie charakterystycznych wypływek na granicy z obszarem nieprzetopionym. Wpływ parametrów obróbki laserowej na chropowatość powierzchni szczegółowo badano w pracy [11].

### 3.3. Pomiary mikrotwardości

Pomiary mikrotwardości wykonano metodą Vickersa, stosując obciążenie 0,4 N. Odciski penetratorem wykonano na zglądach prostopadłych w trzech strefach: w powłoce (warstwie białej), w strefie przetopu powłoki (SPP) oraz w strefie wpływu ciepła (SWC), jak również w materiale rodzimym. Wyniki pomiarów mikrotwardości dla powłok elektroiskrowych WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> przed i po obróbce laserowej przedstawiono na wykresie (rys. 5).



Rys. 5 – Wyniki pomiarów mikrotwardości

Zastosowanie obróbki elektroiskrowej spowodowało zmiany mikrotwardości w obrabianym materiale. Mikrotwardość materiału podłoża po obróbce elektroiskrowej wynosiła średnio około 142 HV<sub>0,04</sub> (taka samą wartość mikrotwardości miał materiał w stanie wyjściowym). Nakładając obróbkę elektroiskrową powłoki WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> uzyskano znaczny wzrost mikrotwardości w stosunku do mikrotwardości materiału podłoża. Powłoka WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> posiadała średnią mikrotwardość 843 HV<sub>0,04</sub> (nastąpił wzrost mikrotwardości średnio o 498 % w stosunku do mikrotwardości materiału podłoża). Mikrotwardość SWC po obróbce elektroiskrowej wzrosła o

168 % w stosunku do mikrotwardości materiału podłoża.

Zastosowanie obróbki laserowej obniżyło nieznacznie mikrotwardość powłok elektroiskrowych. Naświetlanie laserowe spowodowało spadek mikrotwardości powłok WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> o 8 % w odniesieniu do tych powłok bez naświetlania laserowego. Nieznaczny spadek mikrotwardości badanych powłok (po obróbce laserowej) może mieć wpływ na poprawę ich właściwości plastycznych, co ma istotne znaczenie podczas pracy przy dużych obciążeniach np. narzędzi wiertniczych w przemyśle wydobywczym, elementów pras stosowanych w ceramice budowlanej.

W dalszym etapie badań należy dobrać tak parametry wiązki laserowej, które pozwolą na uniknięcie całkowitego przetopu powłoki z materiałem podłoża.

### 3.4. Badania tribologiczne

Badania oporów tarcia (tarcie technicznie suche) przeprowadzono na testerze tribologicznym T-01M typu trzpień-tarcza. Jako próbki stosowano pierścienie ze stali węglowej wyższej jakości C45, na które naniesiono elektroiskrowo powłoki WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (przed i po obróbce laserowej). Przeciwpółką była kulka o średnicy  $\phi 6,3$  mm wykonana ze stali 100Cr6.

Badania na testerze przeprowadzono przy następujących parametrach tarcia:

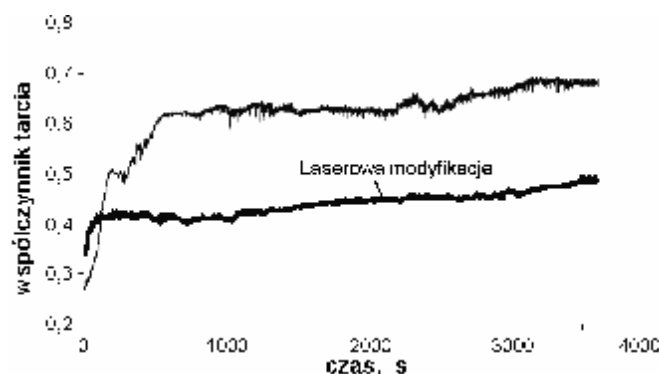
- prędkość liniowa  $V = 0,8$  m/s;
- czas próby  $t = 3600$  s;
- zakres zmian obciążenia  $Q = 5 \div 15$  N.

Wyniki badań przedstawiono na wykresach (rys.5), które ilustrują przebiegi współczynnika tarcia w funkcji czasu próby przy obciążeniu 5 N.

Podczas tarcia technicznie suchego badanych powłok nastąpiło przekształcenie technologicznej warstwy powierzchniowej (TWP) w eksploatacyjną warstwę powierzchniową (EWP). Efekt ten nastąpił głównie na skutek nacisków i prędkości ślizgania oraz oddziaływania atmosfery otoczenia bliskiego z badaną powierzchnią. Obserwowano stabilizację stanu przeciwzuzyciowej warstwy powierzchniowej (PWP).

Na przebiegu (rys. 5) dotyczącym powłoki WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> można zaobserwować, że stabilizacja współczynnika tarcia następuje po upływie około 1000 sekund, a wartość jego oscyluje na poziomie 0,42÷0,46. W przypadku powłoki WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> po modyfikacji laserowej (rys. 6) widzimy, że stabilizacja współczynnika tarcia następuje po upływie 3000 sekund, a wartość jego oscyluje na poziomie 0,66÷0,67. Średni współczynnik

tarcia powłoki WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> jest około 32 % mniejszy od współczynnika tarcia powłoki WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> po naświetlaniu laserowym (w momencie ich stabilizacji).



Rys. 6 – Wykres zmian współczynnika tarcia w funkcji czasu

### Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych wstępnych badań można sformułować następujące wnioski:

1. W wyniku laserowego przetopienia powłok elektroiskrowych i następującego po nim krzepnięcia otrzymujemy ujednorodnienie składu chemicznego oraz likwidację mikropęknięć i porów w powłoce.
2. Chropowatość powłok elektroiskrowych po obróbce laserowej jest większa dwukrotnie w stosunku do chropowatości powłok bez tej obróbki. Jest to zjawisko niekorzystne pod względem jakości i przydatności w określonych warunkach eksploatacyjnych. Należy poszukiwać parametrów obróbki laserowej przy których nastąpi nadtopienie tylko wierzchołków mikronierówności powłoki (wygładzanie laserowe).
3. Podczas badań tribologicznych uzyskany średni współczynnik tarcia powłoki WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> jest około 32 % mniejszy od współczynnika tarcia powłoki WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> po modyfikacji laserowej (w momencie ich stabilizacji).
4. W wyniku modyfikacji laserowej powłok elektroiskrowych nastąpiło obniżenie mikrotwardości powłok WC-Co o 8 % w odniesieniu do tych powłok bez obróbki laserowej. Przyczyną tego efektu było przetopienie powłoki z materiałem podłoża i dyfuzja Fe do powłoki.
5. W dalszym etapie badań za konieczne wydaje się wykonanie pomiarów naprężeń własnych oraz badań analizy fazowej powłok elektroiskrowych przed i po obróbce laserowej.

### Literatura

1. Ozimina D, Scholl H, Styp-Rekowski M. Model formowania przeciwzużyciowych warstw wierzchnich za pomocą obróbki elektroiskrowej. Wybrane zagadnienia obróbek skoncentrowaną energią. Bydgoszcz: Akademia Techniczno-Rolnicza, 2003.
2. Agarwal A, Dahotre N. Pulse electrode deposition of superhard boride coatings on ferrous alloy. *Surface & Coatings Technology*, 106 (1998).
3. Depczyński W, Radek N. Sposób wytwarzania i naprawy warstw wierzchnich z zastosowaniem wyładowań elektrycznych. Patent RP nr 380946 (Decyzja przyznania z dn. 19.01.2009 r.)
4. Radek N.: Teksturowanie par ślizgowych o powierzchniach płaskich technologią laserową i elektroerozyjną. *Mechanik*, 11 (2010).
5. Tarelnik W.: Kombinirowannyje technologii elektroerozionnego liegirowania. Technika, Kijew, 1997.
6. Radek N., Wajs E., Luchka M.: The WC-Co electrospark alloying coatings modified by laser treatment. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 47, 3-4 (2008).
7. Radek N., Shalapko J., Kowalski M.: Investigations of the Cu-Mo and Cu-Ti electro-spark coatings after laser treatment. *Herald of Aeroenginebuilding*, 1 (2009).
8. Radek N., Antoszewski B.: Influence of laser treatment on the properties of electro-spark deposited coatings. *Kovove Materialy-Metallic Materials*, 47, 1 (2009).
9. Radek N., Bartkowiak K.: Performance properties of electro-spark deposited carbide-ceramic coatings modified by laser beam. *Physics Procedia (Elsevier)*, 5, 1 (2010).
10. Miernikiewicz A. Doświadczalno-teoretyczne podstawy obróbki elektroerozyjnej (EDM). Politechnika Krakowska, Kraków 2000.
11. Radziejewska J.: Wpływ stopowania laserowego na strukturę geometryczną i stan warstwy wierzchniej. Rozprawa doktorska, IPPT PAN, Warszawa 1999.

Надійшла 28.02.2011