

**Radek N.,\*****Szalapko J.\*\***\*Politechnika Świętokrzyska,  
Kielce, Polska\*\*Khmelnitckij Uniwersytet Narodowy,  
Khmelnitckij, Ukraina

## WŁASNOŚCI TRIBOLOGICZNE POWŁOK MOLIBDENOWYCH NANOSZONYCH ELEKTROISKROWO OBROBIONYCH LASEREM

### 1. Wstęp

Procesy tworzenia warstw wierzchnich na częściach metalowych związane są najczęściej z transferem materii i energii oraz reakcjami: chemicznymi, elektrochemicznymi i elektrotermicznymi, które im towarzyszą [1÷2]. Właściwości eksploatacyjnych warstw wierzchnich (EWW) zależą przede wszystkim od pierwotnej postaci technologicznej warstwy wierzchniej (TWW) i sposobu jej konstituowania, głównie w aspekcie kumulowania energii w obrabianym elemencie [3] (w tym także na jego powierzchni).

Jedną z tanich i dobrze znanych metod jest obróbka elektroiskrowa. Metoda ta powstała w latach czterdziestych w ZSRR, prawie równocześnie z ubytkową obróbką elektroerozyjną. Twórcami obu metod byli B. R. Łazarenko i N. I. Łazarenko[4]. Zaczęto ją intensywnie rozwijać w latach sześćdziesiątych, a w latach siedemdziesiątych dość powszechnie używać do nanoszenia trudno topliwych materiałów na metale i ich stopy, głównie na stale. Metodą tą nakładano powłoki z twardych stopów np. WC, TiC itp.

W Polsce zaczęto interesować się nanoszeniem powłok elektroiskrowych na początku lat osiemdziesiątych. Prekursorem tej metody było Centrum Uczelniano-Przemysłowe Eksploatacji Pojazdów i Maszyn Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Radomiu, obecny Instytut Technologii Eksploatacji (ITE). W 1982 udało się skonstruować polskim inżynierom i naukowcom polską wersję ręcznego urządzenia do elektroiskrowego utwardzania [5]. Urządzenie o nazwie ESH (Elektro Spark Hardening) zostało wdrożone do wielu zakładów przemysłowych, gdzie służyło głównie do nakładania powłok na narzędzia skrawające w celu podniesienia ich trwałości.

Współcześnie stosowane są różne odmiany obróbki elektroiskrowej spełniające standardy wytwarzania powłok, a także kształtowania mikrogeometrii powierzchni [6÷9].

Zastosowanie powłok nanoszonych metodą elektroiskrową dotyczy dwóch grup zagadnień:

1. Ochrona elementów nowych.
2. Przywracanie własności elementom zużyтым.

Można wyróżnić następujące cele nakładania powłok elektroiskrowych:

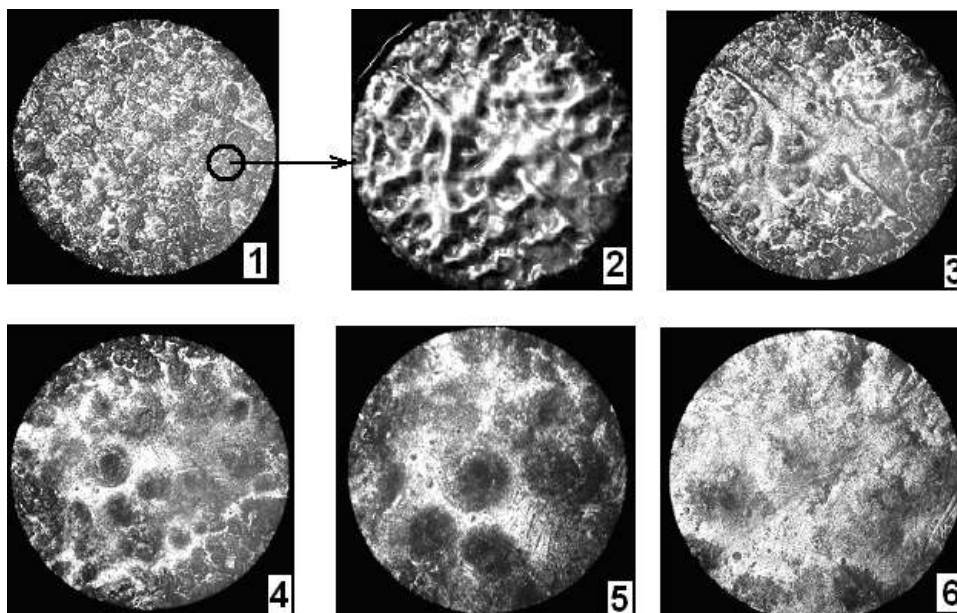
- wzrost twardości;
- zwiększenie odporności na zużycie (zwłaszcza ściernie);
- wzrost żaroodporności;
- zwiększenie odporności na korozję;
- zmniejszenie skłonności do zacierania;
- zmniejszenie współczynnika tarcia;
- zmiana własności elektrycznych i promiennych (głównie emisyjności);
- bioaktywność;
- dekoracja;
- kształtowanie powierzchni.

Obecnie obróbka elektroiskrowa zajmuje ugruntowaną pozycję wśród technik wywarzania warstw powierzchniowych. Świadczą o tym liczne zastosowania przemysłowe (począwszy od umacniania narzędzi, aż do wytwarzania 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.

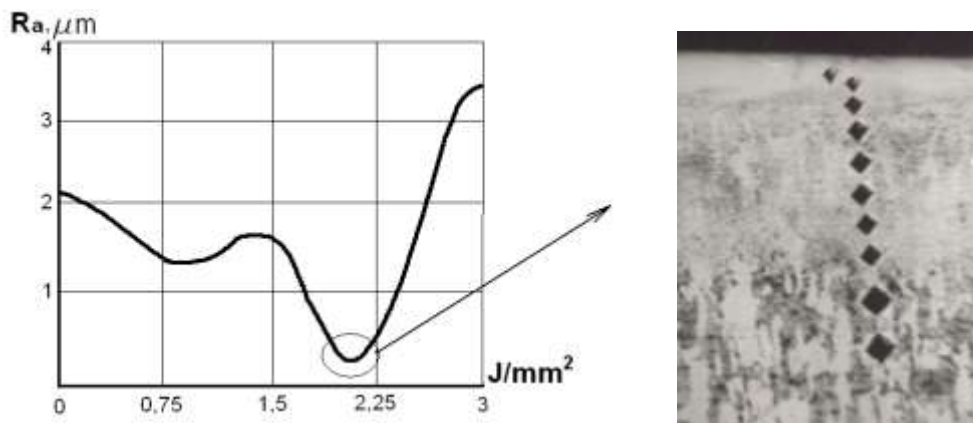
Powłoki elektroiskrowe posiadają pewne niedostatki, co z kolei istotnie obniża ich właściwości użytkowe. Alternatywną metodą, którą można eliminować wady powłok elektroiskrowych jest ich obróbka laserowa. Wiązka laserowa może zostać wykorzystana do wygładzania, kształtowania geometrii powierzchni, uszczelniania, ujednorodnienia składu chemicznego itd. naniesionych powłok Na rys. 1, 2 przedstawiono modyfikacje powierzchni powłoki elektroiskrowej wiązką laserową przy różnych gęstościach energii i sposobie mikroprzetopu. Można zaobserwować stopniowe przejście mikronierówności powierzchni w makro nierówności.

Dość interesująco przedstawia się obróbka laserowa powłok elektroiskrowych o grubości 6÷10 μm. Ze względu na małe grubości wytworzonych warstw powierzchniowych parametry obróbki laserowej (głównie gęstość mocy promieniowania) muszą być tak dobrane, aby nie następowało usuwanie powłoki np. drogą parowania materiału. Powłoki tego typu mogą być przetapiane lub wygładzane wiązką laserową.

W pracy zajęto się określeniem wpływu naświetlania laserowego na właściwości tribologiczne powłok Mo otrzymanych elektroiskrowo. Ocena właściwości tribologicznych powłok przed i po obróbce laserowej przeprowadzono na podstawie testów odporności na zużycie ścierne oraz pomiarów przyczepności.



Rys. 1 – Modyfikacja powierzchni powłoki elektroiskrowej wiązką laserową przy różnych gęstościach energii:  
1, 2 – stan początkowy, 3 – 0,7 J/mm<sup>2</sup>;  
4 – 1,5 J/mm<sup>2</sup>; 5 – 1,8 J/mm<sup>2</sup>; 6 – 2 J/mm<sup>2</sup>



Rys. 2 – Chropowatość powierzchni powłoki elektroiskrowej modyfikowanej wiązką laserową przy różnych gęstościach energii oraz mikrostruktura powłoki w miejscu minimalnej chropowatości

## 2. Metodyka badań

Przedmiotem badań były powłoki jednorodne Mo nakładane z elektrod o średnicy  $\varnothing d = 1$  mm metodą elektroiskrową na próbki ze stali 45, a następnie przetapiane wiązką laserową.

Do nanoszenia powłok elektroiskrowych użyto urządzenie produkcji bułgarskiej, model ELFA-541.

Opierając się na analizie charakterystyk prądowych oraz zaleceniach producenta urządzenia przyjęto następujące parametry nanoszenia powłok elektroiskrowych:

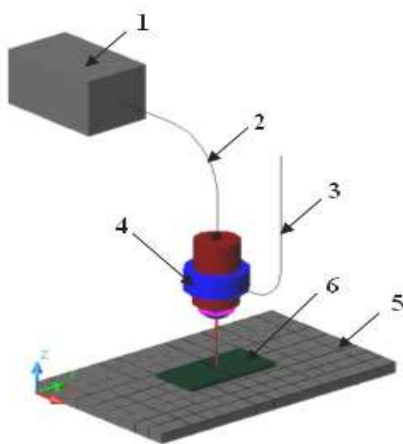
- natężenie prądu  $I = 16$  A,
- prędkość przesuwu stołu  $V = 0,5$  mm/s,
- prędkość głowicy wraz z elektrodą  $n = 4200$  obr/min,
- liczba przejść powlekających  $L = 2$ ,
- pojemność zespołu kondensatorów  $C = 0,47$  μF,
- czas trwania impulsu  $T_i = 8$  μs,

- czas trwania przerwy między impulsami  $T_p = 32 \mu s$ ,
- częstotliwość  $f = 25 \text{ kHz}$ .

Obróbkę laserową przeprowadzono laserem Nd:YAG (impulsowy tryb pracy), model BLS 720. Na rysunku 3 przedstawiono schemat stanowiska do obróbki laserowej, natomiast na rysunku 4 przedstawiono widok zestawu REVETEST do pomiarów przyczepności.

Próbki laserowo przetwarzano przy następujących parametrach obróbki:

- średnica plamki laserowej  $d = 1 \text{ mm}$ ;
- moc lasera  $P = 25 \text{ W}$ ;
- prędkość przemieszczania wiązki  $V = 220 \text{ mm/min}$ ;
- odległość od ogniska  $\Delta f = 1,5 \text{ mm}$ ;
- czas trwania impulsu  $t_i = 0,4 \text{ ms}$ ;
- częstotliwość powtarzania  $f = 50 \text{ Hz}$ ;
- skok przesuwu wiązki  $S = 0,4 \text{ mm}$ .



Rys. 3 – Schemat stanowiska do obróbki laserowej:

- 1 – laser Nd:YAG;
- 2 – światłowód;
- 3 – przewód doprowadzający gaz ochronny lub sprężone powietrze;
- 4 – głowica;
- 5 – stół roboczy;
- 6 – próbka



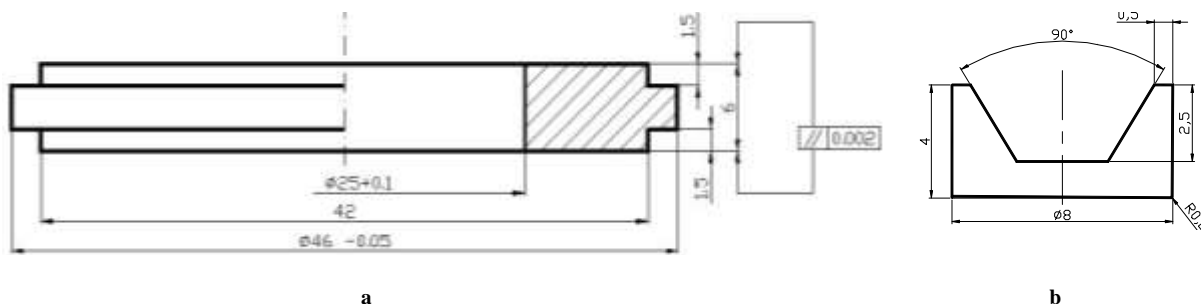
Rys. 4 – Widok zestawu REVETEST do pomiarów przyczepności

### 3. Omówienie wyników badań

Badania tribologiczne przeprowadzono na testerze tribologicznym T-01M typu trzpień-tarcza (pin on disc). Stosując w/w tester dokonano badań odporności na zużycie ścierne próbek przygotowanych w trzech wariantach materiałowych:

- pierwszy z powłokami Mo;
- drugi z powłokami Mo po obróbce laserowej;
- trzeci ze stali 45.

Próbki z powłokami Mo przed i po obróbce laserowej oraz materiał wyjściowy (stal 45) stanowiły pierścienie (rys. 5, a), natomiast przeciwpróbką był trzpień (ślizgacz) wykonany z węgla spiekanego G10 (rys. 5, b).



Rys. 5 – Kształt i wymiary elementów węzła tarcia użytego w badaniach:

a – próbka;  
b – trzpień (ślizgacz)

Wyniki pomiarów ubytku masy badanych próbek oraz widok powierzchni tarcia powłoki Mo po obróbce laserowej przedstawiono na rysunku 6, zaś w tabeli 1 zamieszczono masy próbek przed i po teście odporności na zużycie ścierne.

W przeprowadzanych badaniach zajęto się wyznaczeniem zużycia badanych próbek przy stałej prędkości liniowej  $V = 0,5$  m/s i zmiennym obciążeniu od 5 do 15 N w warunkach tarcia technicznie suchego. Próbkę i przeciwpróbkę były ważone przed i po teście na wadze laboratoryjnej WA33 typ PRL TA13.

Badania na testerze przeprowadzono przy następujących parametrach jego pracy:

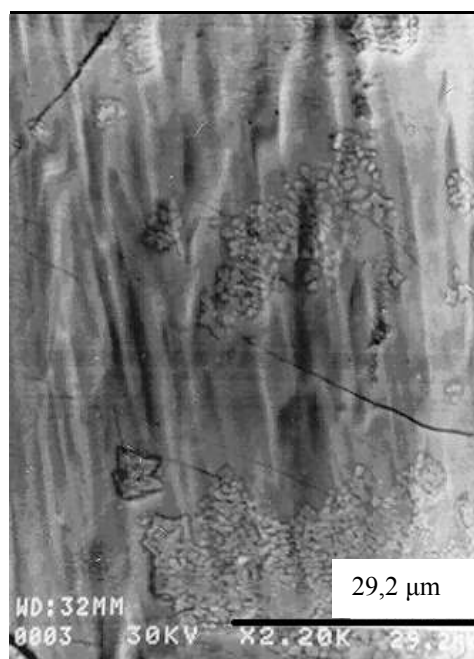
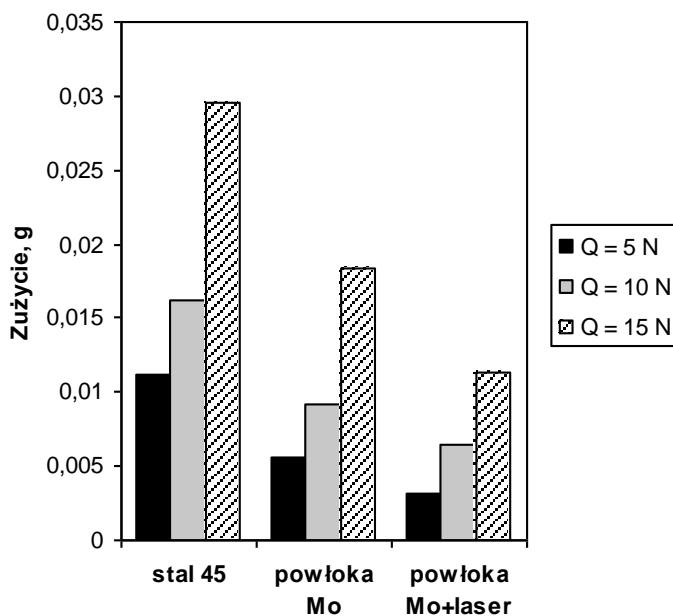
- prędkość obrotowa  $n = 298$  obr/min;
- ilość obrotów  $i = 17905$  obr;
- czas próby  $t = 3600$  s;
- wartości obciążenia  $Q = 5, 10, 15$  N.

Tabela 1

Masy próbek przed i po teście odporności na zużycie ścierne

Obciążenie [N]	Próbki					
	Stal 45		Powłoka Mo		Powłoka Mo+laser	
	$m_1$ [g]	$m_2$ [g]	$m_1$ [g]	$m_2$ [g]	$m_1$ [g]	$m_2$ [g]
5	44,6613	44,6501	47,9316	47,926	48,1723	48,1691
10	44,5489	44,5327	48,1664	48,1572	48,2544	48,248
15	44,7262	44,6967	47,8019	47,7836	48,2067	48,1954

gdzie:  $m_1$  – masa początkowa próbki,  $m_2$  – masa próbki po teście.



Rys. 6 – Wyniki pomiarów zużycia badanych próbek i widok powierzchni tarcia powłoki Mo+laser

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że obróbka laserowa próbek z powłoką Mo poprawia odporność na zużycie ścierne (w każdym przedziale stosowanego obciążenia) w stosunku do pozostałych próbek. Najmniejszą odporność na zużycie posiadała próbka z materiału wyjściowego (stal 45), gdzie przy obciążeniu  $Q = 15$  N odnotowano zużycie  $Z_{stal45} = 0,0295$  g. Przy tym samym obciążeniu ( $Q = 15$  N) powłoka Mo po obróbce laserowej osiągnęła zużycie  $Z_{Mo+laser} = 0,0113$  g, natomiast powłoka Mo posiadała

zużycie  $Z_{Mo} = 0,0183$  g. Zużycie przeciwpróbek (ślizgaczy) mieściło się w przedziale  $0 \pm 0,0005$ , czyli można uznać, że praktycznie nie występowało. Średnia masa początkowa stosowanych trzpieni (z 9 sztuk) wynosiła  $m_t = 2,0823$  g.

W dalszym etapie badań dokonano pomiarów przyczepności metodą zarysowania (scratch test) powłok Mo przed i po obróbce laserowej. Do pomiarów użyto przyrządu typu REVETEST produkcji szwajcarskiej firmy CSEM. Pomiary przeprowadzono przy następujących parametrach testu zarysowania: szybkość wzrostu obciążenia – 103,2 N/min; prędkość przesuwu stolika z próbką – 9,77 mm/min; długość rysy – 9,5 mm; stożek diamentowy Rockwella o promieniu zaokrąglenia – 200  $\mu\text{m}$ .

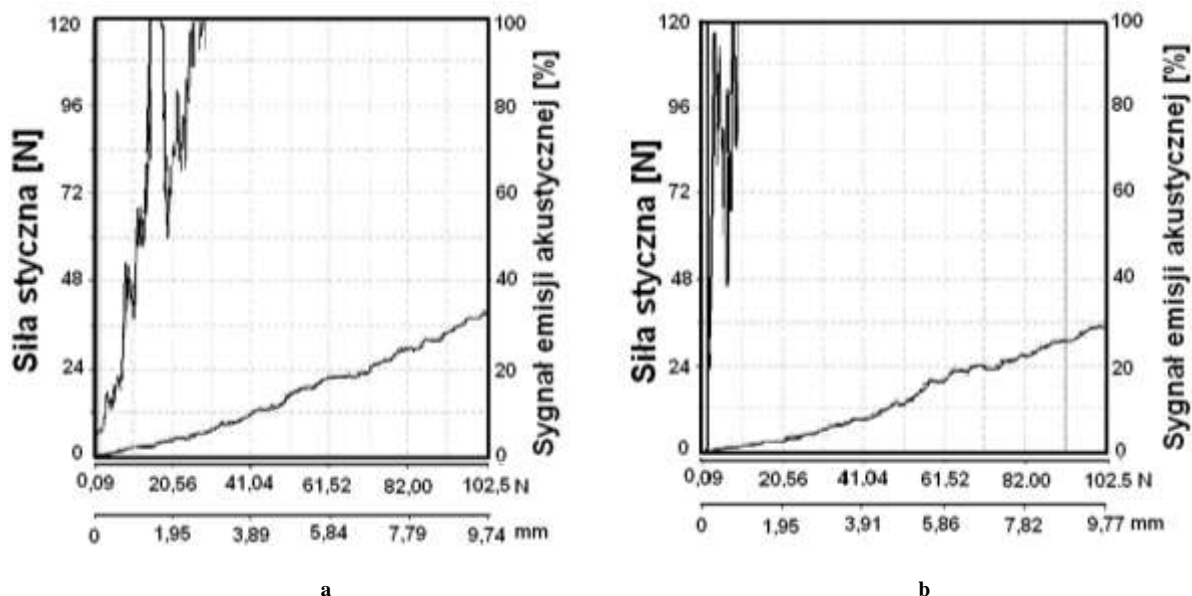
Test zarysowania polegał na wykonaniu rysy za pomocą odpowiednio dobranego penetratora (w tym przypadku stożek diamentowy – Rockwella) przy stopniowym wzroście siły normalnej (obciążającej ten penetrator) z jednoczesnym pomiarem siły oporu stawianego przez materiał (siły stycznej) i rejestracji sygnałów emisji akustycznej informujących o powstawaniu uszkodzeń warstwy w postaci pęknięć lub złuszczeń warstwy. Najmniejsza siła normalna powodująca utratę adhezji powłoki z podłożem, określana jest mianem siły krytycznej i jest przyjmowana za miarę tej adhezji.

Do oceny wartości siły krytycznej służy zapis zmian sygnałów emisji akustycznej i siły stycznej oraz obserwacje mikroskopowe (mikroskop optyczny wbudowany w aparat REVETEST). W naszym przypadku wartości sił krytycznych oceniono na podstawie obserwacji mikroskopowych powstałych rys po przejściu penetratora, które odnoszono do przebiegów sygnałów emisji akustycznej. Wyniki badań przyczepności przedstawiono na przykładowych wykresach (rys. 7, a, 7, b), a tabela 2 zawiera wartości sił krytycznych z trzech pomiarów danej próbki oraz obliczone ich wartości średnie i odchylenie standardowe.

Tabela 2

### Wyniki pomiarów przyczepności powłok

Powłoka	Siła krytyczna [N]			Wartość średnia [N]	Odchylenie standardowe [N]
	Numer pomiaru				
	1	2	3		
Mo	17,72	14,81	12,93	15,15	2,41
Mo+laser	19,13	20,09	19,64	19,62	0,48



Rys. 7 – Zależność siły stycznej i sygnałów emisji akustycznej w funkcji siły normalnej i drogi penetratora na próbce:

a – powłoki Mo;  
b – powłoki Mo po obróbce laserowej

Powłoki elektroiskrowo obrabione wiązką laserową posiadały wyższą przyczepność od powłok bez tej obróbki. Średnia wartość (z trzech pomiarów) siły krytycznej powłoki Mo wyniosła 15,15 N, natomiast po

obróbce laserowej 19,62 N. Obróbka laserowa spowodowała poprawę przyczepności powłoki Mo w stosunku do powłoki bez obróbki o 29 %. Większa przyczepność powłok obrabianych laserem może być spowodowana ograniczeniem ich porowatości, a tym samym poprawą ich szczelności. Jednak szczegółowe ustalenia dotyczące tego problemu będzie realizowane w kolejnych etapach badań.

#### 4. Podsumowanie

Przedstawione w pracy rozważania dotyczące obróbki laserowej powłok Mo nanoszonych elektroiskrowo, stanowią omówienie jednego z licznych jej możliwych zastosowań, zawężone do zagadnień tribologicznych – przede wszystkim w zakresie tworzenia przeciwzużyciowych warstw wierzchnich (PWW).

Wyniki przeprowadzonych doświadczeń, które należy traktować jako badania wstępne, umożliwiają sformułowanie poniższych spostrzeżeń i wniosków:

1. Zastosowanie obróbki laserowej do modyfikacji powłok Mo nakładanych elektroiskrowo podnosi walory eksploatacyjne powłok poprzez zwiększenie odporności na zużycie ścierne, a tym samym ich twardości. Przy obciążeniu 15 N wzrost odporności na zużycie ścierne powłoki Mo po obróbce laserowej wyniósł około 161 % w stosunku do powłoki Mo.

2. Badania przyczepności wykazały, że obróbka laserowa spowodowała poprawę przyczepności powłoki Mo w stosunku do powłoki bez obróbki o 29 %.

3. W dalszym etapie należy wykonać badania składu fazowego oraz porowatości powłok elektroiskrowych przed i po obróbce laserowej.

#### Literatura

1. Galinov I.V., Luban R.B. Mass transfer trends during electrospark alloying // *Surface and Coatings Technology*. – 1996. – № 79. – S. 9-18.

2. Ozimina D., Scholl H., Styp-Rekowski M. Model formowania przeciwzużyciowych warstw wierzchnich za pomocą obróbki elektroiskrowej // *Wybrane zagadnienia obróbek skoncentrowana energią / Rozdział II*, Bydgoszcz. – 2003. – S. 104-109.

3. Kaczmarek J. O wpływie obróbki ściernej i niektórych innych technologii na magazynowanie energii w materiale obrabianym // *Postępy Technologii*. – 1998. – № 22. – S. 35-52.

4. Lazarenko B.R., Lazarenko N.I. Elektroiskrowaja obrabotka metallow. – M.:Gosenergoizdat, 1950. – 455 s.

5. P.R.L. Patent No. 137319 „Układ zasilania urządzenia do elektroiskrowego utwardzania powierzchni” – 1987, Polska.

6. Antoszewski B., Radek N.: Elektroiskrowo nanoszone powłoki tytanowe i molibdenowe // *Przegląd Spawalnictwa*. – 2002. – T. 8. – № 10. – S. 134-135.

7. Tarelnik V.B., Kombinirovannyje technologii elektroerozionnogo legirovanija. – Kijew.: Technika, 1997.

8. Szalapko J.,Kaplun W.,Gonczar W. Lasernaja obrabotka elektroiskrowych pokrytij dla obesieczienija fretingostojkosti // *Wiesnik dwigateliestrojenia*. – 2002. – № 1. – S. 1135-140.

9. Radek N., Ozimina D., Antoszewski B: Ocena własności eksploatacyjnych powłok nanoszonych elektroiskrowo // *Przegląd Spawalnictwa*. – 2003. – № 11. – S. 15 - 18.

Надійшла 14.01.2006