

Właściwości przetapianych laserowo powłok kompozytowych nanoszonych obróbką elektroiskrową

WSTĘP

W pracy badano wpływ przetapiania laserowego na właściwości użytkowe powłok kompozytowych nanoszonych elektroiskrowo. Ocenę właściwości powłok po naświetlaniu laserowym przeprowadzono na podstawie obserwacji mikrostruktury, pomiarów mikrotwardości oraz badań odporności korozyjnej. Badania przeprowadzono wykorzystując Mo, Ti oraz Cu jako materiały powłokowe (anody) nakładane elektroiskrowo na próbki ze stali 45 (katody), a następnie przetapiane wiązką laserową. Do nanoszenia powłok elektroiskrowych użyto urządzenia produkcji bułgarskiej, model ELFA-541. Obróbkę laserową nałożonych powłok elektroiskrowych wykonano laserem Nd:YAG, model BLS 720.

Obróbki wykorzystujące źródła skoncentrowanej energii są stosowane przede wszystkim do obrabiania elementów z trudnoobrabialnych tworzyw konstrukcyjnych, a także do wykonywania elementów o bardzo skomplikowanych kształtach, których wykonanie metodami tradycyjnymi byłoby bardzo praco- i czasochłonne.

W tej grupie wymienić można te obróbki, w których wykorzystuje się szeroko rozumianą erozję, najczęściej wspomaganą energią elektryczną. Są to następujące obróbki: elektroerozyjna (EDM), elektrochemiczna (ECM), laserowa (LBM), elektronowa (EBM), elektroiskrowa (ESA). W tej grupie występują także obróbki hybrydowe: anodowo-mechaniczna (AMM), elektrochemiczno-ścierna (ECG), frezowanie elektrochemiczne (ECM-M), erozyjno-mechaniczna obróbka elektrodą szczotkową (BEDMM) i inne [1].

Wśród wielu metod modyfikacji warstwy wierzchniej znaczące miejsce zajmują technologie nanoszenia powłok metalicznych o odmiennych w stosunku do materiału podłoża właściwościach użytkowych. 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. Zaczęto ją intensywnie rozwijać w latach sześćdziesiątych, a w latach siedemdziesiątych dość powszechnie używać do nanoszenia trudnotopliwych materiałów na metale i ich stopy, głównie na stале. Metodą tą nakładano powłoki z twardych stopów, np. WC, TiC. Warstwy wierzchnie uzyskane obróbką elektroiskrową, tj. przez dodawanie masy, powinny charakteryzować się dobrym połączeniem nanoszonej powłoki z metalicznym podłożem. Dzięki temu, że w obróbce elektroiskrowej, zmieniając biegunowość, istnieje możliwość wprowadzania do WW różnych pierwiastków, w dużym zakresie można sterować cechami formowanych powłok, modyfikując je w niezbędnym zakresie.

Cechą charakterystyczną powłok nanoszonych elektroiskrowo jest to, że mają one specyficzną, nie trawiącą się strukturę i pozostają białe. Warstwa wierzchnia jest kształtowana w wa-

runkach lokalnego oddziaływania wysokiej temperatury i dużych nacisków. Wartości podstawowych parametrów obróbki są następujące: ciśnienie fali uderzeniowej od iskry elektrycznej wynosi $(2 \div 7) \cdot 10^3$ GPa, a temperatura osiąga wartości około $(5 \div 40) \cdot 10^3$ °C [2].

Obecnie obróbka elektroiskrowa zajmuje ugruntowaną pozycję wśród technik wytwarzania warstw powierzchniowych [3 ÷ 6]. 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 Stanach Zjednoczonych badania nad tą technologią są prowadzone przez instytuty pracujące dla NASA, AIR FORCE, US NAVY.

Powłoki elektroiskrowe mają pewne wady, co 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.

Dość interesująca jest obróbka laserowa powłok elektroiskrowych o grubości $6 \div 10$ 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. Obróbka laserowa powłok nakładanych elektroiskrowo poszerza zatem zakres potencjalnych możliwości tej technologii. Dotyczy to zwłaszcza silnie rozwijających się gałęzi przemysłu (np. przemysłu motoryzacyjnego), gdzie przetopione laserowo powłoki elektroiskrowe mogą być stosowane jako powłoki ochronne np. w elementach układów wydechowych oraz powłoki przeciwzuzyciowe w parach kinematycznych silnika oraz podwozia i nadwozia. Mając na uwadze niewielką wydajność metody, jej przydatność będzie ograniczona do elementów, w których skuteczna jest obróbka lokalna.

W pracy określono wpływ przetapiania laserowego na właściwości użytkowe powłok Cu-Ti i Cu-Mo naniesionych elektroiskrowo. Ocena właściwości powłok po obróbce laserowej przeprowadzono na podstawie obserwacji mikrostruktury, pomiarów mikrotwardości oraz badań odporności korozyjnej.

Materiały i metodyka badań

Przedmiotem badań były powłoki kompozytowe Ti-Cu oraz Cu-Mo nakładane z drutów o średnicy 1 mm (anoda) metodą elektroiskrową na próbki ze stali 45 (katoda), a następnie przetapiane wiązką laserową. Do nanoszenia powłok elektroiskrowych użyto urządzenia ELFA-541 (rys. 1).

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

- natężenie prądu $I = 16$ A (dla Cu $I = 8$ A);
- prędkość przesuwu stołu $V = 0,5$ mm/s;
- prędkość głowicy wraz z elektrodą $n = 4200$ obr/min;
- liczba przejść powlekających $L = 2$ (dla Cu $L = 1$);
- pojemność zespołu kondensatorów $C = 0,47$ μ F;
- czas trwania impulsu $T_i = 8$ ms;
- czas trwania przerwy między impulsami $T_p = 32$ ms;
- częstotliwość $f = 25$ kHz.

Obróbkę laserową przeprowadzono laserem Nd:YAG (impulsowy tryb pracy), model BLS 720. Próbkę z powłokami elektroiskrowymi przetapiano 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 od ogniska $\Delta f = 1$ mm;
- czas trwania impulsu $t_i = 0,4$ ms;
- częstotliwość powtarzania $f = 50$ Hz;
- przesuw wiązki $S = 0,4$ mm.

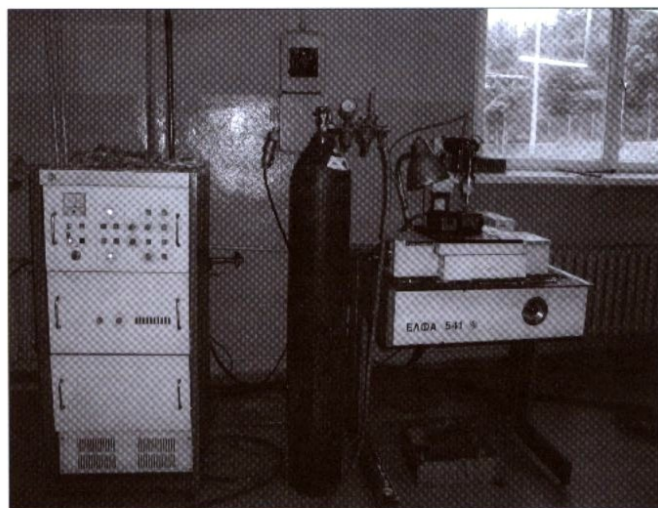
Badaniom własności użytkowych poddano próbki z powłokami Cu-Ti i Cu-Mo przed i po obróbce laserowej.

Analiza mikrostruktury i pomiary mikrotwardości

Wychodząc z analizy metalograficznej zglądów można stwierdzić, że efekt umocnienia polega głównie na zjawiskach dyfuzyjnych. W wyniku wyładowania na katodzie powstaje bardzo cienka warstwa przy czym podłoże nie rozgrzewa się. Ponadto proces ten zachodzi bardzo szybko. Ogólnie warstwa nałożona elektroiskrowo składa się z dwóch stref: zewnętrznej (białej trudnotrawiącej się, jednorodnej) i wewnętrznej (o charakterze dyfuzyjnym i zmiennym składzie). Często obserwuje się też trzecią – strefę wpływu ciepła [5÷6].

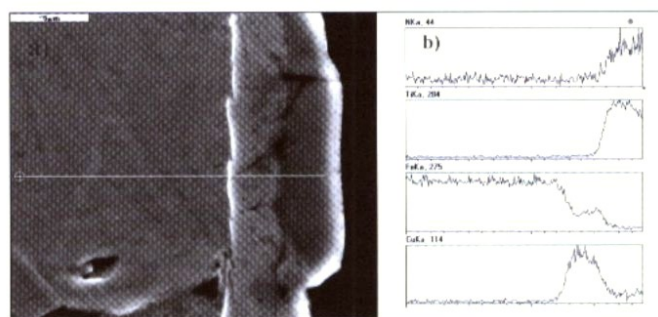
Do badań mikrostruktury wykorzystano elektronowy mikroskop skaningowy Joel typ JSM-5400 z mikroanalizatorem rentgenowskim ISIS-300 Oxford Instruments.

Na rysunkach 2a i 3a przedstawiono widoki mikrostruktury powłok dwuwarstwowych typu Cu-Ti oraz Cu-Mo stopowanych elektroiskrowo. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że grubość uzyskanych warstw wyniosła około $8 \div 10$ μ m, natomiast zasięg strefy wpływu ciepła (SWC) w głąb materiału podłoża był około $10 \div 15$ μ m. Na przedstawionych mikrostrukturach widoczna jest wyraźna granica pomiędzy kombinowaną powłoką



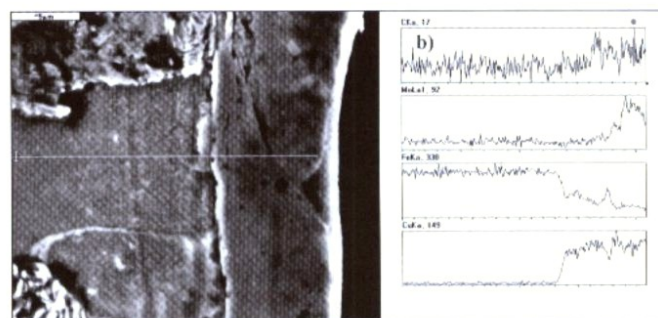
Rys. 1. Urządzenie do nanoszenia powłok elektroiskrowych ELFA 541

a podłożem. Widoczne są również mikropęknięcia, które przebiegają w poprzek i wzdłuż powłoki. Analiza liniowa pierwiastków powłoki Cu-Ti pokazuje na nierównomierny rozkład pierwiastków



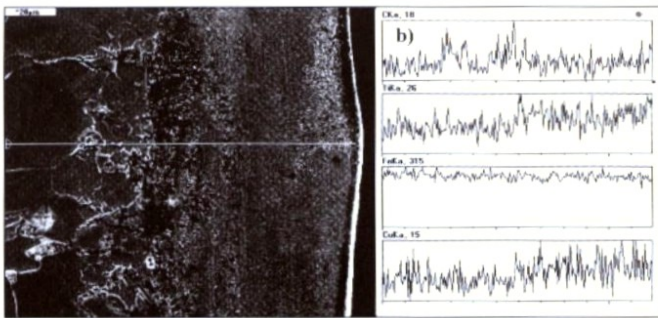
Rys. 2. Mikrostruktura (a) i rozkład liniowy pierwiastków w powłoce Cu-Ti (b)

w powłoce kombinowanej (rys. 2b). Można wyróżnić strefy, w których występują wyraźnie większe ilości Cu, Ti oraz Fe. Na wykresach rozkładu liniowego pierwiastków widoczne są ślady połączenia dyfuzyjnego powłoki z podłożem. W powłoce Cu-Ti brak jest wyraźnie widocznej segregacji składników; podobne zjawisko występuje w powłoce Cu-Mo (rys. 3b). Na wykresie rozkładu liniowego pierwiastków powłoki obserwuje się zwiększoną zawartość węgla w ukształtowanej obróbką elektroiskrową powłoce Cu-Mo. Jest to przykład występującej dyfuzji, która polega na przemieszczaniu węgla z materiału podłoża (stali 45) w wyniku oddziaływań cieplnych do kształtowanej elektroiskrowo TWP. Ponadto można zaobserwować, że nastąpiła również dyfuzja miedzi do warstwy molibdenu (rys. 2b).

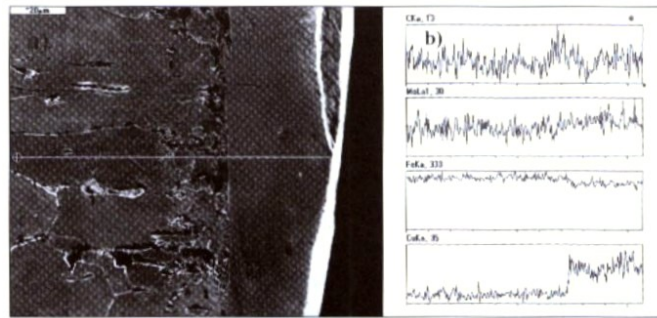


Rys. 3. Mikrostruktura (a) i rozkład liniowy pierwiastków w powłoce Cu-Mo (b)

dokończenie na stronie 16



Rys. 4. Mikrostruktura (a) i rozkład liniowy pierwiastków w powłoce Cu-Ti po obróbce laserowej (b)



Rys. 5. Mikrostruktura (a) i rozkład liniowy pierwiastków w powłoce Cu-Mo po obróbce laserowej (b)

W wyniku analizy SEM/EDS badanych próbek w warstwie Cu-Ti stwierdzono występowanie azotu. Autorzy przypuszczają, że w warunkach procesu wysokoenergetycznego, któremu towarzyszy powstawanie plazmy, jest możliwe wytworzenie cienkowarstwowej fazy azotku tytanu. Jednak szczegółowe ustalenia dotyczące tego problemu będą realizowane w kolejnych etapach badań.

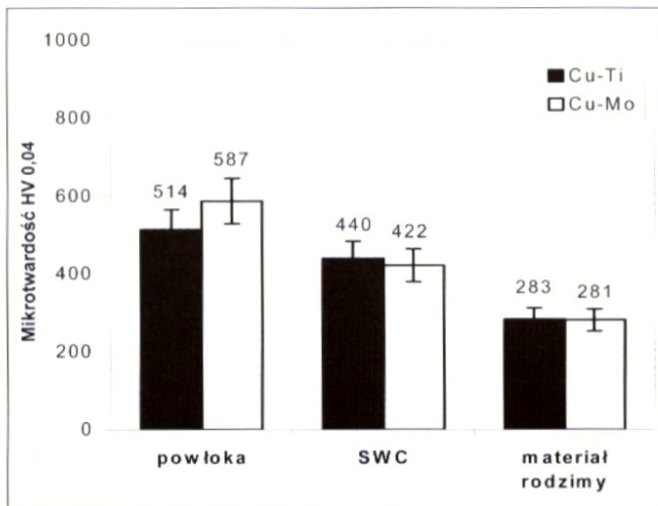
W wyniku laserowego przetopienia wymienionych powłok elektroiskrowych i następującego po nim krzepnięcia, skład chemiczny powłok uległ zmianie. Naświetlanie laserowe spowodowało ujednorodnienie składu chemicznego (rys. 4b i 5b) w wyniku intensywnych ruchów konwekcyjnych ciekłego materiału w jeziorce. Nastąpiło również rozdrobnienie struktury i krystalizacja faz silnie przesyconych (rys. 4a i 5a) wskutek występowania znacznych gradientów temperatur oraz uzyskiwania dużych prędkości chłodzenia. Wytworzone w wyniku stopowania laserowego TWP nie mają mikropełnięć i porów (nastąpiło uszczelnienie) oraz nieciągłości na granicy powłoka – podłoże. Skład chemiczny rdzenia materiału pozostał w zasadzie bez zmian. Grubość przetopionych powłok Ti i Mo oraz powłok dwuwarstwowych Cu-Ti i Cu-Mo mieści się w zakresie od 20÷40 μm . Powstała w wyniku stopowania laserowego strefa wpływu ciepła SWC ma zasięg 20÷50 μm . W strefie tej obserwuje się zwiększoną zawartość węgla (rys. 4b i 5b).

W dalszym etapie badań wykonano pomiary mikrotwardości metodą Vickersa, przy użyciu mikrotwardościomierza Hanemanna, stosując obciążenie 40 G. Odciski penetratorem wykonano na zglądach prostopadłych w trzech strefach: w powłoce (białej trudnotrawiącej się, jednorodnej), w strefie przetopu powłoki oraz w strefie wpływu ciepła (SWC), jak również w materiale rodzimym. Wyniki badań dla powłok elektroiskrowych Cu-Ti i Cu-Mo przed i po obróbce laserowej przedstawiono na wykresach (rys.

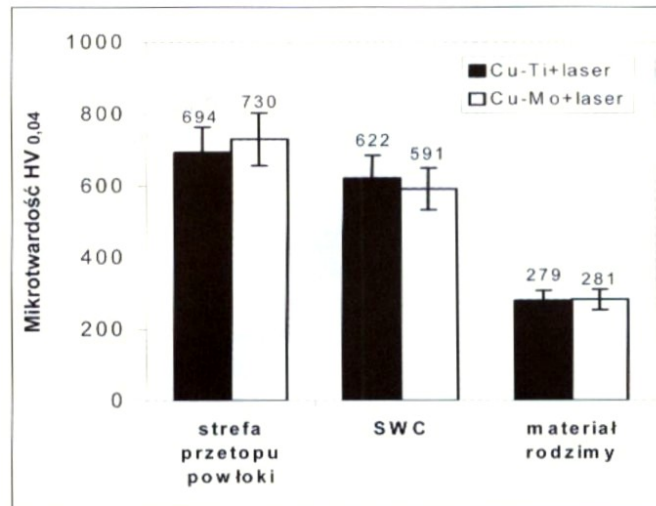
6 i 7). Zastosowanie obróbki elektroiskrowej spowodowało zmiany mikrotwardości w obrabianym materiale. Mikrotwardość materiału podłoża po obróbce elektroiskrowej wynosiła średnio około 280 $\text{HV}_{0,04}$ (taką samą wartość mikrotwardości miał materiał w stanie wyjściowym). Nakładając obróbkę elektroiskrową powłoki niejednorodnego typu Cu-Ti oraz Cu-Mo uzyskano znaczny wzrost mikrotwardości w stosunku do mikrotwardości materiału podłoża. Powłoka Cu-Ti miała średnią mikrotwardość 514 $\text{HV}_{0,04}$ (nastąpił wzrost mikrotwardości średnio o 84% w stosunku do mikrotwardości materiału podłoża), a powłoka Cu-Mo – ok. 587 $\text{HV}_{0,04}$ (nastąpił wzrost mikrotwardości średnio o 110% w stosunku do mikrotwardości materiału podłoża). Mikrotwardość SWC po obróbce elektroiskrowej wzrosła o 57% (powłoka Cu-Ti) i o 51% (powłoka Cu-Mo) w stosunku do mikrotwardości materiału podłoża. Większa wartość mikrotwardości w SWC powłoki Cu-Ti w stosunku do powłoki Cu-Mo może być spowodowana powstaniem w niej węglików tytanu. Zastosowanie obróbki laserowej wpłynęło korzystnie na zmiany mikrotwardości powłok elektroiskrowych. Naświetlanie laserowe spowodowało wzrost mikrotwardości powłoki Cu-Mo o 161%, a powłoki Cu-Ti o 144%.

Badania odporności korozyjnej

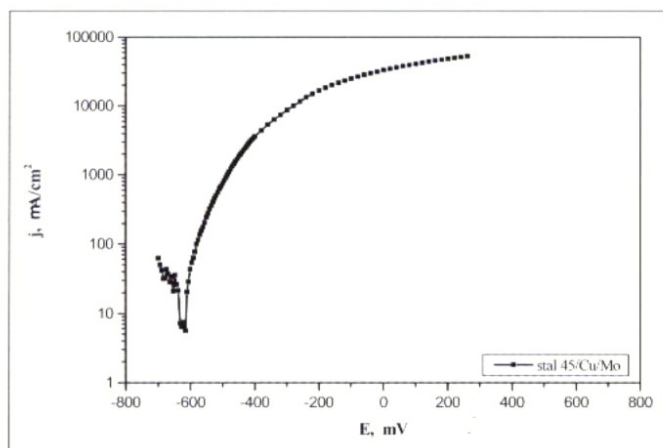
Badania odporności korozyjnej wykonano metodą potencjodynamiczną. Metoda ta należy do najbardziej rozpowszechnionych badań elektrochemicznych. Do pomiarów użyto skomputeryzowanego zestawu do badań elektrochemicznych Atlas'99. Badano próbki z powłokami Cu-Ti i Cu-Mo oraz materiał podłoża (przed i po obróbce laserowej). Krzywe polaryzacji katodowej i anodowej wykonano polaryzując próbki z szybkością zmian po-



Rys. 6. Wyniki mikrotwardości powłok Cu-Ti i Cu-Mo



Rys. 7. Wyniki mikrotwardości powłok Cu-Ti i Cu-Mo po obróbce laserowej



Rys. 8. Krzywa polaryzacji powłoki Cu-Mo

tencjału wynoszącą 0,2 mV/s (w obszarze ± 200 mV od potencjału korozyjnego) oraz 0,4 mV/s w obszarze wyższych potencjałów. Próbkę z wyodrębnionym obszarem o średnicy 10 mm polaryzowano do potencjału 100 mV. Krzywe polaryzacji wykonano po 24 godzinach ekspozycji w testowanym roztworze (3,5% NaCl) w celu ustalenia się potencjału korozyjnego. Badania wykonano w temperaturze pokojowej – $21 \pm 1^\circ\text{C}$. Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono przykładowe wyniki badań korozyjnych w postaci wykresów krzywych polaryzacji warstw powierzchniowych. Charakterystyczne wartości elektrochemiczne badanych materiałów przedstawiono w tabelicy.

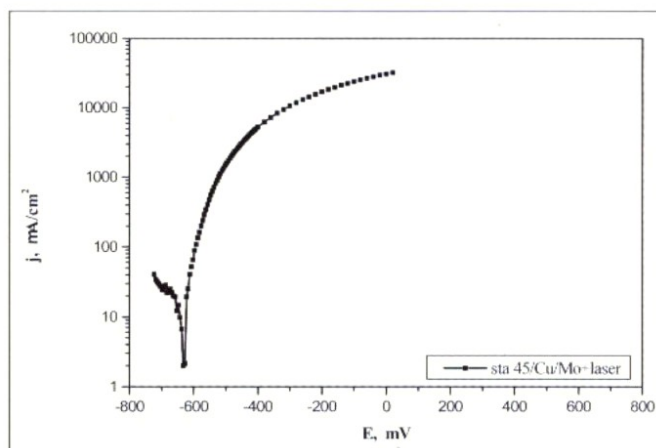
Powłoki nałożone elektroiskrowo miały zbliżoną odporność korozyjną do materiału podłoża. W przypadku stopowania elektroiskrowego mamy do czynienia z wymieszaniem materiału powłokowego z materiałem podłoża oraz z brakiem szczelności tego typu powłok (np. mikropęknięcia, porowatość). Z badań wynikało, że powłoki tego typu mają charakter katodowy i aby spełniać swoją funkcję, tj. poprawę odporności korozyjnej, muszą być szczelne.

Najwyższą odporność korozyjną wykazała powłoka Cu-Mo, której gęstość prądu korozyjnego wyniosła $42,9 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, a materiału podłoża (stal 45) $112 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Powłoka tego typu spowodowała wzrost odporności korozyjnej o ok. 162% w stosunku do materiału podłoża. Swojej funkcji (dużej odporności korozyjnej) nie spełniła powłoka Cu-Ti, co ma związek ze znaczną różnicą w wartościach potencjałów normalnych (P0) występujących między miedzią a tytanem, a tym samym tworzeniem się mikroogniw galwanicznych. W wyniku wymieszania się materiału powłokowego z materiałem podłoża występowała znaczna niejednorodność potencjałów elektrochemicznych na powierzchni warstwy. Występujące pęknięcia w warstwie dodatkowo intensyfikowały procesy korozyjne materiału.

Obróbka laserowa poprawiła odporność korozyjną powłok elektroiskrowych w stosunku do powłok bez tej obróbki. Przyczyną tego efektu było uszczelnienie ich w trakcie obróbki laserowej. Najwyższą odporność korozyjną po obróbce laserowej miała powłoka Cu-Mo ($I_k=30,7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). Stal 45 po obróbce laserowej

Tablica. Wartości gęstości prądu i potencjału korozyjnego badanych próbek

Badany materiał	Gęstość prądu korozyjnego I_k [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	Potencjał korozyjny E_{KOR} [mV]
45	$112 \pm 17,8\%$	-458
45+Laser	$86,4 \pm 16\%$	-522
45+Cu+Ti	$97,8 \pm 5,4\%$	-555
45+Cu+Ti+Laser	$89,3 \pm 19,1\%$	-527
45+Cu+Mo	$42,9 \pm 11,8\%$	-620
45+Cu+Mo++Laser	$30,7 \pm 2,6\%$	-629



Rys. 9. Krzywa polaryzacji powłoki Cu-Mo po obróbce laserowej

miała $I_k=86,4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, nastąpił wzrost odporności korozyjnej o około 30% w stosunku do materiału bez obróbki laserowej.

WNIOSKI

Zastosowanie obróbki laserowej do modyfikacji powłok nanoszonych elektroiskrowo prowadzi do korzystnych zmian warstwy wierzchniej. Poprzez odpowiednie sterowanie parametrami lasera można kształtować warstwy o różnych właściwościach użytkowych, do których można zaliczyć: geometrię powierzchni, mikrotwardość, stan naprężeń, odporność na korozję itd. Stosując obróbkę laserową do modyfikacji powłok Cu-Ti i Cu-Mo nakładanych elektroiskrowo podnosimy walory eksploatacyjne powłok poprzez zwiększenie ich twardości oraz odporności korozyjnej. W wyniku laserowego przetopienia całkowicie zostaje wyeliminowana porowatość powłoki, następuje ujednorodnienie składu chemicznego w powłoce. Te korzystne zmiany właściwości warstwy powierzchniowej powinny zapewnić wzrost odporności na zużycie ścierne.

W dalszym etapie badań za konieczne wydaje się przeprowadzenie testów trybologicznych oraz pomiarów przyczepności powłok elektroiskrowych przed i po obróbce laserowej.

LITERATURA

- [1] Ruszaj A.: Niekonwencjonalne metody wytwarzania elementów maszyn i narzędzi. Wydawnictwo IOS, Kraków, 1999.
- [2] Burakowski T., Roliński E., Wierchoń T.: Inżynieria powierzchni. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1992.
- [3] Ozimina D., Radek N., Styp-Rekowski M.: Modyfikowanie cech warstwy wierzchniej za pomocą obróbki elektroiskrowej. Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji vol. 24, nr 2/2004.
- [4] Antoszewski B., Radek N.: Elektroiskrowo nanoszone powłoki tytanowe i molibdenowe. Przegląd Spawalnictwa 8-10/2002.
- [5] Tarelnik W.: Technologia elektroiskrowego napawania. Technika, Kijów, 1997.
- [6] Praca zbiorowa pod redakcją Petrowa J.: Elektroiskrowe legiowanie metalicznych powierzchni. Kisziniew, 1985.