

Obróbka laserowa powłok elektroiskrowych – technologia i właściwości

NORBERT RADEK

W pracy przedstawiono informacje dotyczące technologii wytwarzania i badania powłok przeciwzużyciowych nakładanych metodą elektroiskrową przed i po ich modyfikacji laserowej. Technologia ta jest przedmiotem systematycznych badań na Politechnice Świętokrzyskiej, której laboratoria wyposażone są w niezbędne urządzenia do wytwarzania i badania powłok nanoszonych elektroiskrowo oraz ich modyfikacji. Przedstawiono rezultaty obserwacji mikrostruktury powłok WC-Co naniesionych elektroiskrowo, przed i po obróbce laserowej, oraz wyniki pomiarów chropowatości i przyczepności, a także badań odporności korozyjnej powłok.

1. Wstęp

Wytwarzanie powłok obróbką elektroiskrową polega na wykorzystaniu energii wyładowania iskrowego do przenoszenia masy materiału erodowanego z elektrody stanowiącej źródło materiału stopującego na elektrodę ujemną stanowiącą materiał pokrywany [3, 4, 6, 7, 12 ÷ 14].

Sam proces wyładowania następuje w wyniku zbliżenia elektrod i zachodzić może w atmosferze próżni, gazu obojętnego lub też powietrza. Zjawiska fizyczne poprzedzające i towarzyszące samemu procesowi wyładowania mają złożoną naturę i ich przebieg nie jest do końca wyczerpująco opisany.

Podczas procesu nanoszenia powłok obróbką elektroiskrową występują następujące zjawiska fizyczne: wzrost natężenia pola elektrycznego wraz ze zbliżaniem się elektrod, przebicie elektryczne, jonizacja gazu w szczelinie (z gazem lub próżnią), powstanie kanału plazmowego, promieniowanie świetlne i ciepłe oraz parowanie, zwarcie elektrod, mechaniczne oddziaływanie elektrod, erozja katody i anody, przenoszenie materiału, formowanie się powłoki, dyfuzja, krzepnięcie.

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 tempera-

tury i dużych nacisków. Wartości podstawowych parametrów obróbki elektroiskrowej są następujące [5]:

– ciśnienie fali uderzeniowej od iskry elektrycznej wynosi $(2 \div 7) \cdot 10^3$ GPa,

– temperatura osiąga wartości rzędu $(5 \div 40) \cdot 10^3$ K.

Współczesne zastosowania przemysłowe obróbki elektroiskrowej obejmują następujące dziedziny: przemysł motoryzacyjny, przemysł kosmiczny, przemysł lotniczy, przemysł okrętowy, przemysł zbrojeniowy, przemysł energetyczny, mechanika precyzyjna, produkcja narzędzi oraz medycyna.

Powłoki elektroiskrowe posiadają pewne niedostatki, co z kolei istotnie pogarsza ich właściwości użytkowe. Metodą, którą można eliminować wspomniane wady powłok elektroiskrowych jest ich obróbka laserowa [8 ÷ 11].

W wyniku proponowanej obróbki laserowej może nastąpić uszczelnienie powłoki oraz likwidacja jej defektów powierzchniowych, np. rys, rozwarstwień, mikropęknięć.

W pracy przedstawiono informacje dotyczące technologii wytwarzania i badania powłok przeciwzużyciowych nakładanych metodą elektroiskrową przed i po obróbce laserowej. Wymieniona technologia jest przedmiotem systematycznych badań na Politechnice Świętokrzyskiej gdzie zgromadzono niezbędne urządzenia do wytwarzania i badania powłok nanoszonych elektroiskrowo oraz ich modyfikacji laserowej.

W ramach aktualnie realizowanych badań odniesiono się do pomiarów chropowatości i przyczepności, badań odporności korozyjnej oraz obserwacji mikrostruktury powłok WC-Co naniesionych elektroiskrowo przed i po obróbce laserowej.

* Dr hab. inż. Norbert Radek, prof. PŚK – Politechnika Świętokrzyska, Katedra Inżynierii Eksploatacji i Przemysłowych Systemów Laserych, Aleja Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce.

2. Materiały i parametry obróbki

Przedmiotem badań były powłoki nakładane elektrodami WC-Co (95% WC, 5% Co) w kształcie walca o wymiarach $\Phi 5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ (anody) metodą elektroiskrową na próbki wykonane ze stali C45 (katoda). Elektrody zostały wytworzone metodą impulsowo plazmowego spiekania (PPS) na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej.

Do nanoszenia powłok elektroiskrowych użyto urządzenie produkcji ukraińskiej, model EIL-8A. Opierając się na doświadczeniach własnych oraz zaleceniach producenta urządzenia przyjęto następujące parametry nanoszenia powłok elektroiskrowych:

- napięcie: $U = 230 \text{ V}$,
- pojemność kondensatorów: $C = 300 \mu\text{F}$,
- natężenie prądu: $I = 2,2 \text{ A}$.

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 $d = 0,7 \text{ mm}$; moc lasera $P = 20 \text{ W}$; prędkość przemieszczania wiązki $v = 250 \text{ mm/min}$; odległość dysza-przedmiot obrabiany $\Delta f = 1 \text{ mm}$; czas impulsu $t_i = 0,4 \text{ ms}$; częstotliwość powtarzania $f = 50 \text{ Hz}$; skok przesuwu wiązki $S = 0,4 \text{ mm}$.

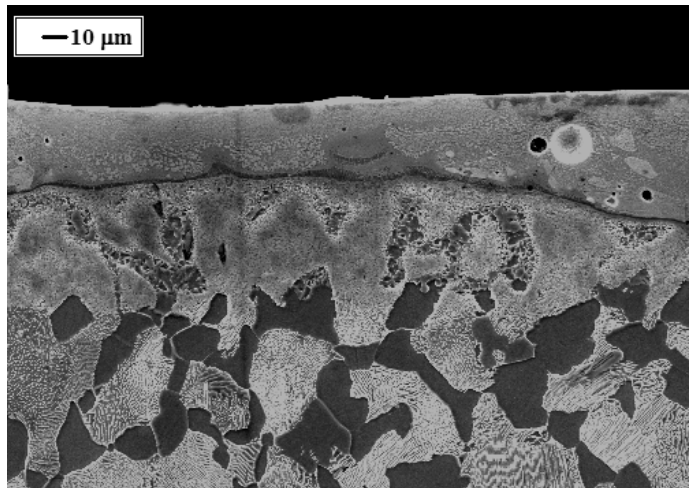
3. Analiza mikrostruktury

Do obserwacji mikrostruktury powłok WC-Co przed i po obróbce laserowej wykorzystano elektronowy mikroskop skaningowy Joel typ JSM-5400.

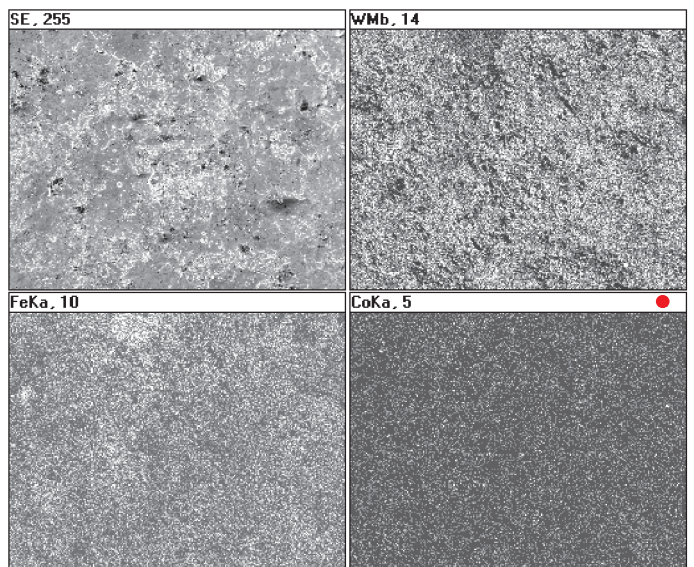
Na fotografii (rys. 1) przedstawiono przykładowy widok mikrostruktury powłoki WC-Co stopowanej elektroiskrowo. W oparciu o uzyskane wyniki stwierdzono, że grubość uzyskanych warstw wyniosła od 30 do $40 \mu\text{m}$, natomiast zasięg strefy wpływu ciepła (SWC) w głąb materiału podłoża ok. $15 \div 20 \mu\text{m}$. Na fotografii mikrostruktury (rys. 1) widoczna jest wyraźna granica pomiędzy powłoką, a podłożem. Można zaobserwować niekorzystne zjawiska w formie porów i mikropęknięć powłoki.

W wyniku modyfikacji wiązką laserową powłoki WC-Co nastąpiło ujednorodnienie jej składu chemicznego. Wytworzone w wyniku przetapiania laserowego technologiczne warstwy powierzchniowe (TWP) nie posiadają mikropęknięć i porów (rys. 3). Grubość powłoki WC-Co po modyfikacji laserowej uległa zmianie i mieściła się w zakresie $40 \div 50 \mu\text{m}$. Zasięg SWC wyniósł w głąb materiału podłoża ok. $30 \div 40 \mu\text{m}$.

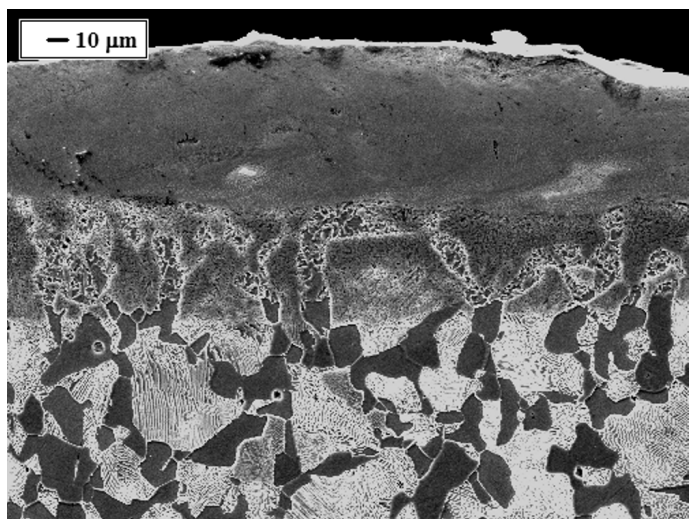
Przykładowe analizy rozkładu powierzchniowego pierwiastków powłoki WC-Co przed i po obróbce laserowej przedstawiono na rysunkach 2 i 4. Na przedstawionych fotografiach ilość pierwiastka jest proporcjonalna do jasności obrazu w analizowanym miejscu. Stopowana elektroiskrowo powłoka (rys. 2) zbudowana jest głównie z atomów wolframu



Rys. 1. Mikrostruktura powłoki WC-Co



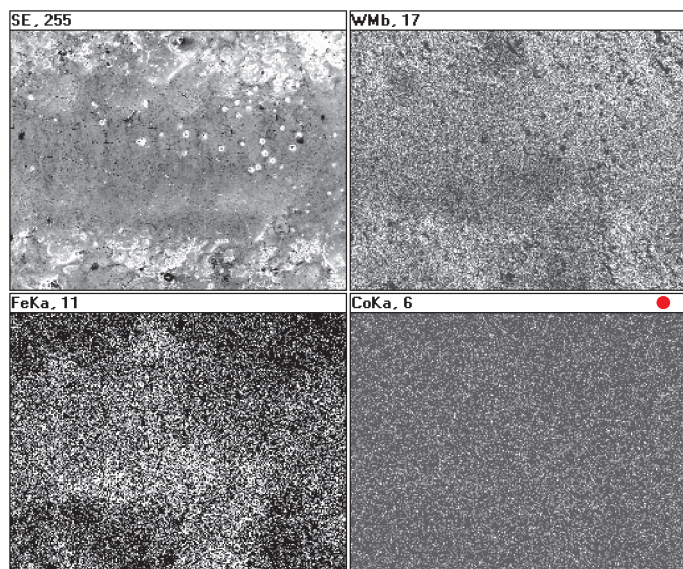
Rys. 2. Rozkład powierzchniowy pierwiastków powłoki WC-Co



Rys. 3. Mikrostruktura powłoki WC-Co po obróbce laserowej

mu i żelaza (duża liczba jasnych pól) oraz niewielkiej ilości atomów kobaltu.

W wyniku przetapiania laserowego powłoki elektroiskrowej (rys. 4) nastąpiło wystąpienie lokalnie dużej intensywności występowania atomów wolframu i żelaza. Duże zgrupowania atomów wolframu wystąpiły po bokach powstałego śladu przetopu, natomiast duża intensywność jasnych pól żelaza powstała w jego centrum.



Rys. 4. Rozkład powierzchniowy pierwiastków powłoki WC-Co po obróbce laserowej

4. Badania odporności korozyjnej

Pomiary odporności korozyjnej zostały przeprowadzone za pomocą skomputeryzowanego zestawu do badań elektrochemicznych Atlas'99 firmy Atlas-Sollich. Pomiary przeprowadzono metodą potencjodynamiczną. Metoda ta należy do najbardziej rozpowszechnionych i nowoczesnych badań elektrochemicznych.

Krzywe polaryzacji katodowej i anodowej wykonano polaryzując próbki z szybkością zmian potencjału wynoszącą 0,2 mV/s (w obszarze ± 200 mV od potencjału korozyjnego) oraz 0,4 mV/s w obszarze większych potencjałów. Próbki z wydłużonym obszarem o średnicy 10 mm polaryzowano do potencjału 500 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: $21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Uzyskane wyniki odporności korozyjnej przedstawiono na wykresie (rys. 5).

Obróbka laserowa polepszyła odporność korozyjną powłok elektroiskrowych w stosunku do powłok bez tej obróbki o około 50%. Przyczyną tego efektu było uszczelnienie ich w trakcie obróbki laserowej i likwidacja mikropęknięć. W wyniku obróbki laserowej zaobserwowano zmniejszenie gęstości prądu korozyjnego z $J_k = 62,3$ do $J_k = 31,7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ oraz zmniejszenie potencjału korozyjnego z $U_k = -560$ mV do $U_k = -510$ mV.

reklama

Key to Markets
Messe Stuttgart

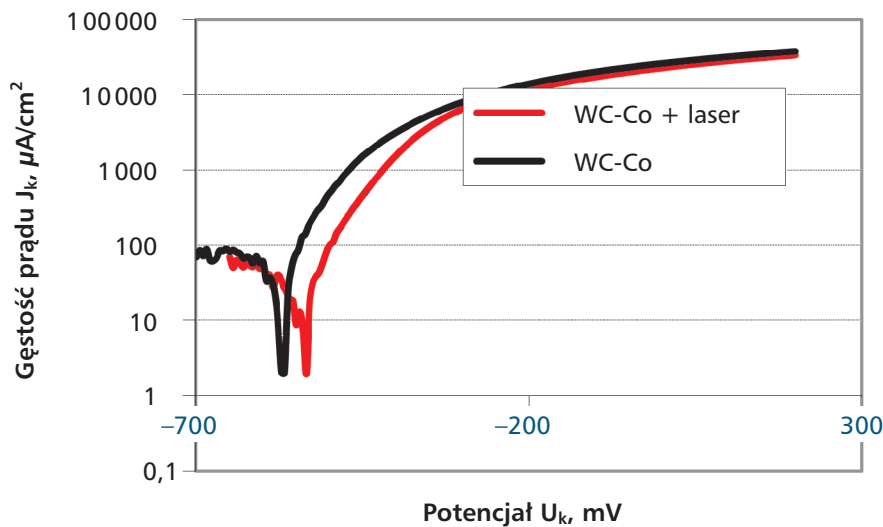
Serce branży obróbki metalu bije w Stuttgarcie!

**GET
YOUR
TICKET
NOW!**

**International Exhibition
for Metal Working**

13 - 17.09.2022
Messe Stuttgart
Germany

amb-expo.de



Rys. 5. Krzywe polaryzacji powłoki WC-Co przed i po obróbce laserowej

5. Pomiary chropowatości

Struktura geometryczna powierzchni wykazuje znaczny wpływ na wiele procesów występujących w warstwie wierzchniej. Problematyce związanej z metodami pomiarów oraz oceną chropowatości i falistości powierzchni poświęconych jest wiele publikacji, np. [1 ÷ 2].

Pomiary struktury geometrycznej powierzchni zostały przeprowadzone w Laboratorium Komputerowych Pomiarów Wielkości Geometrycznych Politechniki Świętokrzyskiej. Badania wykonano przy użyciu profilometru optycznego Talysurf CCI.

Pomiary chropowatości powłok WC-Co 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.

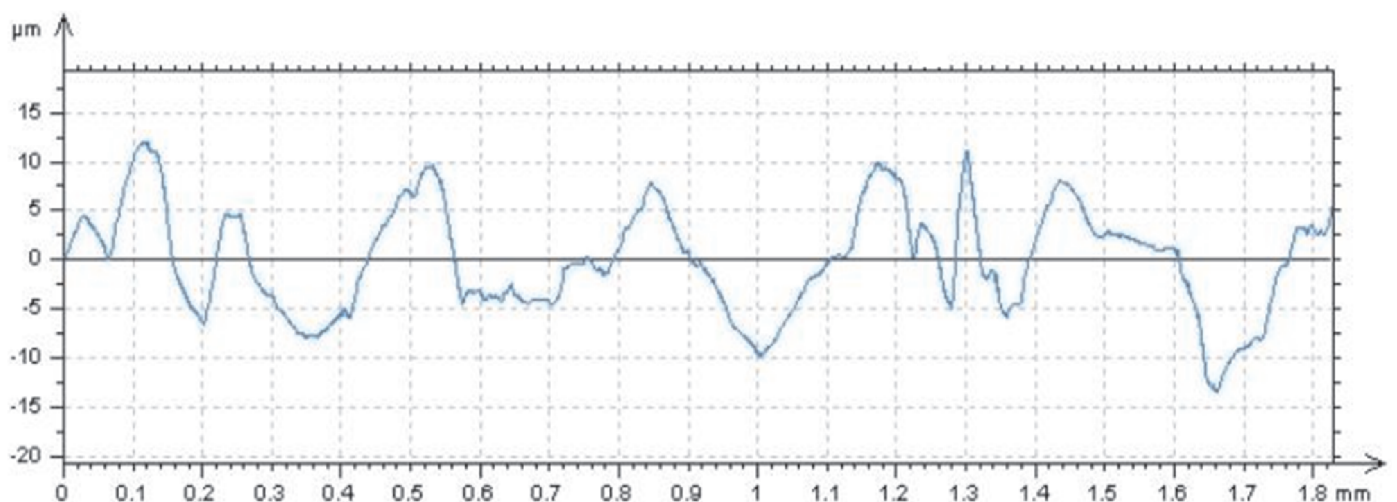
Pomiary powłok WC-Co obrobionych laserem wykonano w kierunkach: prostopadłym i równoległym do osi ścieżek

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 posiadały chropowatość $Ra = 1,35 \div 2,01 \mu m$, natomiast po obróbce laserowej wartość tego parametru chropowatości wynosiła od 3,15 do 4,46 μm . Próbkę ze stali C45, na którą nanoszono powłoki miały chropowatość $Ra = 0,42 \div 0,58 \mu m$.

Przykładowe profilogramy badanych próbek przedstawiono na rysunkach 6 i 7.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów można stwierdzić, że obróbka laserowa powoduje wzrost chropowatości powłok WC-Co. Większa chropowatość powłok WC-Co po obróbce laserowej jest efektem ruchu ciekłego metalu wywołanego siłami napięcia powierzchniowego. Niejednorodny rozkład temperatury w wiązce laserowej (mod TEM₀₀)



Rys. 6. Przykładowy profilogram dla powłoki WC-Co



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.

5. Pomiary przyczepności

Pomiary przyczepności powłok WC-Co przed i po obróbce laserowej wykonano metodą zarysowania (z ang. *scratch test*). Do pomiarów użyto przyrząd typu The Revetest Xpress Scratch Tester produkcji szwajcarskiej firmy CSM Instruments SA. Pomiary przeprowadzono przy następujących parametrach testu zarysowania:

- obciążenie stałe: 200 N;
- prędkość przesuwu stolika z próbką: 1 mm/min;
- długość rysy: 5 mm;
- stożek diamentowy Rockwella o promieniu zaokrąglenia: 200 μm .

Metoda zarysowania polega na kontrolowanym zarysowaniu powierzchni próbki diamentowym wgłębnikiem pod zmiennym obciążeniem. Pod wpływem pewnego, ściśle określonego obciążenia (siły), zwanego krytycznym, zarysowana powłoka (system powłokowy) ulega uszkodzeniu. Dodatkowo scratch tester dokonuje pomiaru siły normalnej działającej na powierzchnię próbki, siły tarcia, a także głębokości penetracji. Zautomatyzowane obserwacje mikroskopowe pozwalają ponadto na analizę linii zarysowania na całej długości zadanej siły. Obserwacja ta pozwala na „wyłowienie” krytycznych punktów w trakcie przeprowadzanego testu. Obciążenie krytyczne wyznacza się za pomocą mikroskopu optycznego. Głębokość „zarysowanego” obszaru (jego wymiary liniowe) ściśle uzależniona jest od zadanych parametrów testu.

Najmniejsza siła normalna powodująca utratę adhezji powłoki (systemu powłokowego) z podłożem, określana jest mianem siły krytycznej F_{kr} i jest przyjmowana za miarę adhezji.

Do oceny wartości siły krytycznej posłużył zapis zmian siły tarcia oraz obserwacje mikroskopowe (mikroskop optyczny wbudowany w przyrząd The Revetest Xpress Scratch Tester). Tabela 1 zawiera wartości sił krytycznych z pięciu pomiarów danej próbki oraz obliczone ich wartości średnie i odchylenia standardowe.

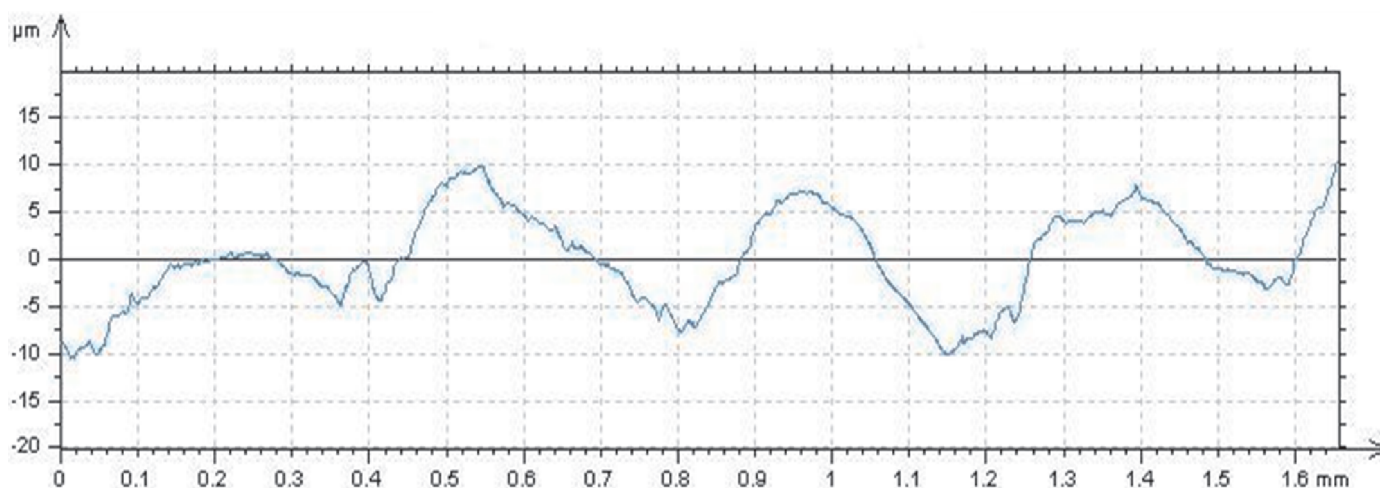
Przeprowadzone badania przyczepności powłok elektroiskrowych przed i po naświetlaniu laserowym pokazały zróżnicowane zachowanie się warstw w zależności od stopowanego materiału oraz jego późniejszej obróbki laserowej. Przykłady widoków 3D rys uzyskanych przy użyciu profilometru optycznego Talysurf CCI po teście zarysowania przedstawiono na rysunku 8.

Na podstawie uzyskanych danych widać, że dzięki obróbce laserowej można poprawić przyczepność powłok WC-Co do podłoża ze stali węglowej. Średnia wartość siły krytycznej powłoki WC-Co obliczona na podstawie pięciu pomiarów wyniosła 6,61 N, po obróbce laserowej wzrosła do 8,64 N. Obróbka laserowa spowodowała o około 24% poprawę przyczepności powłoki WC-Co. Ponadto stwierdzono małe rozproszenie sił krytycznych, co wskazuje, że obróbka laserowa powłok WC-Co eliminuje puste przestrzenie występujące na styku powłoka/podłoże. Do określenia wartości sił krytycznych powodujących uszkodzenie warstw powierzchniowych wskazane jest wykorzystanie metod mikroskopowych, których stosowanie pozwala uzyskiwać bardziej jednoznaczne wyniki.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań zarejestrowano następujące spostrzeżenia, sformułowano także poniższe wnioski:

1. Proces tworzenia technologicznych warstw powierzchniowych metodą obróbki elektroiskrowej związany jest z transferem masy i energii oraz zjawiskiem powstania plazmy niskotemperaturowej.



Rys. 7. Przykładowy profilogram dla powłoki WC-Co po obróbce laserowej

Tabela 1. Wyniki pomiarów przyczepności powłok WC-Co

Powłoka	F_{kr} , N					Wartość średnia, N	Odchylenie standardowe, N
	Pomiar						
	1	2	3	4	5		
WC-Co	6,14	5,89	7,26	6,73	7,02	6,61	0,58
WC-Co + laser	8,47	8,06	9,19	8,52	8,95	8,64	0,44

2. W wyniku laserowego przetopienia powłok elektroiskrowych i następującego po nim krzepnięcia otrzymuje się ujednorodnienie składu chemicznego oraz likwidację mikropęknięć i porów w powłoce.

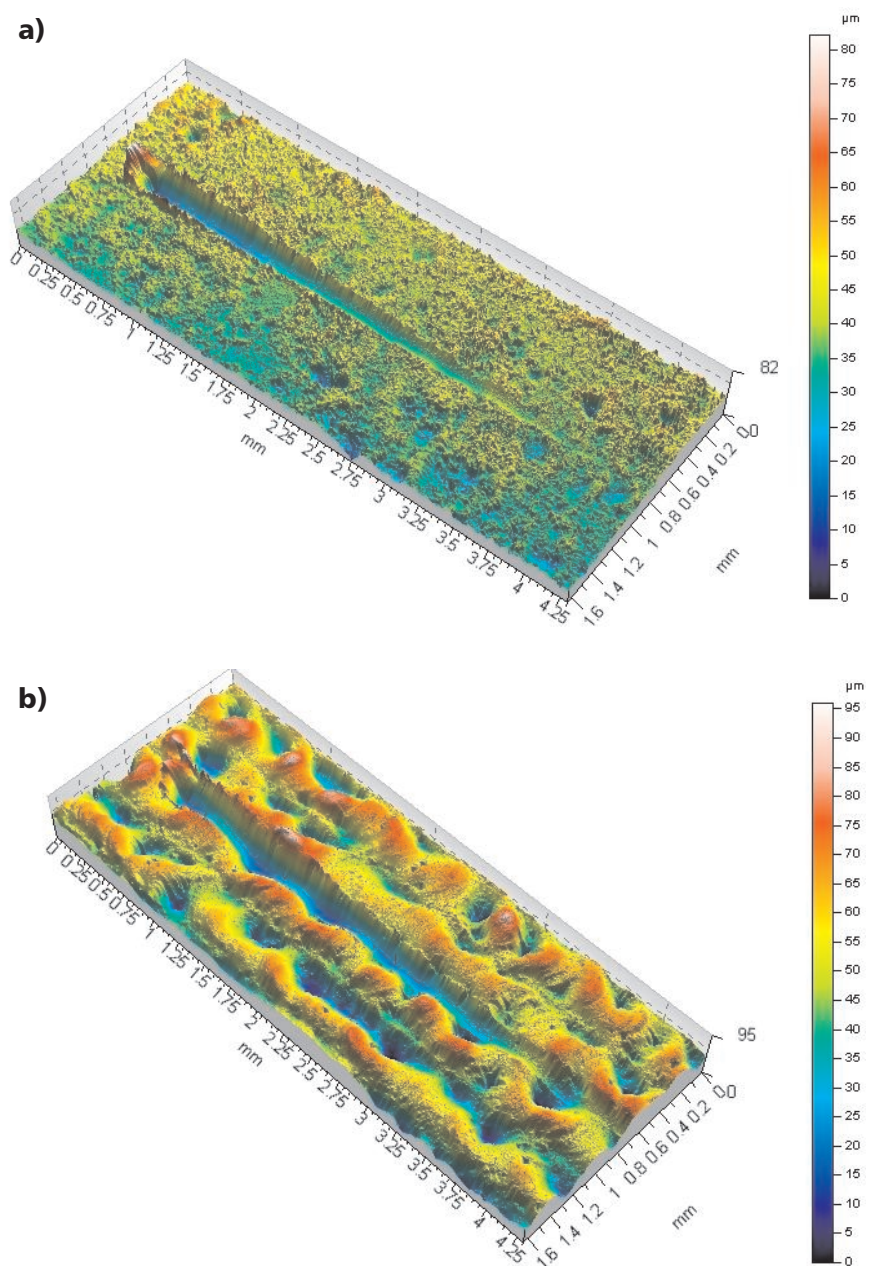
3. W wyniku modyfikacji laserowej uzyskano wzrost odporności korozyjnej powłok elektroiskrowych w stosunku do powłok bez tej obróbki o około 50%. Ma to istotne znaczenie w przypadku elementów pracujących w środowiskach agresywnych, np. pierścienie uszczelnień czołowych pomp wirowych.

4. Powłoki WC-Co po obróbce laserowej charakteryzowały się 2-krotnie większą chropowatością Ra, w stosunku do 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).

5. Powłoki tego typu zwiększają odporność na zużywanie ściernie narzędzi i elementów maszyn.

6. Obróbka laserowa zwiększa przyczepność powłok WC-Cu o około 24%.

7. W dalszym etapie należy wykonać badania tribologiczne oraz składu fazowego powłok WC-Co przed i po obróbce laserowej.



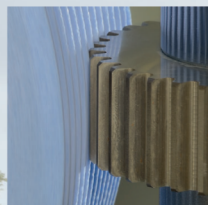
Rys. 8. Widok 3D rys po teście zarysowania powłoki WC-Co: a) przed obróbką laserową, b) po obróbce laserowej

Literatura

- Adamczak S.: *Normalizacja pomiarów struktury geometrycznej powierzchni, Cz. 7, Ocena chropowatości i falistości powierzchni*, Mechanik, (5-6), 2005, ss. 526-529.
- Adamczak S.: *Normalizacja pomiarów struktury geometrycznej powierzchni, Cz. 8, Ocena chropowatości i falistości, Powierzchnie o warstwowym właściwościach funkcjonalnych*. Mechanik, (8-9), 2005, ss. 690-692.
- Galinov I.V., Luban R.B.: *Mass transfer trends during electrospark alloying*, Surface and Coatings Technology (79), 1996, pp. 9–18.
- Łazarenko B. R., Łazarenko N. I.: *Elektroiskrovaja obrabotka tokoprovodiaszczih materialow*, Akademia Nauk CCCP, Moskva 1958.
- Miernikiewicz A.: *Doświadczalno-teoretyczne podstawy obróbki elektroerozyjnej (EDM)*, Politechnika Krakowska – Rozprawy – nr 274 – Kraków 2000.
- Ozimina D., Radek N., Styp-Rekowski M.: *Modyfikowanie cech warstwy wierzchniej za pomocą obróbki elektroiskrowej*, Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, 24 (2), 2004, ss. 229-238.
- Radek N.: *Determining the operational properties of steel beaters after electrospark deposition*, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, (4), 2009, pp. 10-16.
- Radek N.: *The influence of laser treatment on the microstructure and properties of the tungsten carbide electro-spark coatings*, Advances in Manufacturing Science and Technology, 35 (2), 2011, pp. 59-71.
- Radek N., Antoszewski B.: *Influence of laser treatment on the properties of electro-spark deposited coatings*, Kovove Materialy-Metallic Materials, (1), 2009, pp. 31-38.
- Radek N., Bartkowiak K.: *Performance properties of electro-spark deposited carbide-ceramic coatings modified by laser beam*, Physics Procedia (Elsevier), (5), 2010, pp. 417-423.
- 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, pp. 197-201.
- Ruijun W., Yiyu Q., Jun L.: *Interface behavior study of WC92-Co8 coating produced by electrospark deposition*, Applied Surface Science, (240), 2005, pp. 42-47.
- Spadło S.: *Teoretyczno-eksperymentalne aspekty obróbki elektroerozyjno-mechanicznej*. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2006.
- Spadło S., et al.: *The superficial layer of parts machined by brush electro discharge mechanical machining (BEDMM)*, Journal Engineering Manufacture, Vol. 218, part B, 2004, pp. 9-15.

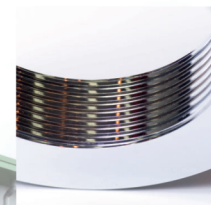
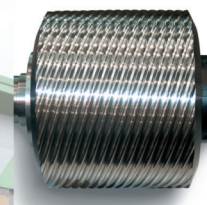
reklama

MATRIX MACHINE TOOL (COVENTRY) LIMITED



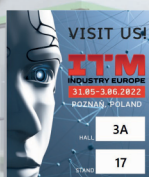
GEAR & HOB MACHINE TOOLS

GEAR CUTTING / GEAR GRINDING



THREAD & WORM MACHINE TOOLS

THREAD GRINDING INTERNAL / EXTERNAL



Tel: +44 (0) 2476 718886
 www: matrix-machine.com
 email : sales@matrix-machine.com