

# Właściwości powłok wytwarzanych technologiami wykorzystującymi skoncentrowany strumień energii i ich potencjalne zastosowanie w taborze kolejowym

Norbert RADEK<sup>1</sup>, Izabela PLISZKA<sup>2</sup>, Dariusz LISZEWSKI<sup>3</sup>

## Streszczenie

W artykule opisano wpływ obróbki laserowej na właściwości powłok nanoszonych elektroiskrowo. Ocenę właściwości powłok po obróbce laserowej przeprowadzono na podstawie obserwacji mikrostruktury, pomiarów chropowatości i mikrotwardości oraz badań odporności korozyjnej i porowatości. Opisane badania przeprowadzono wykorzystując elektrody WC-Cu, które wytworzono przez spiekanie nanostrukturalnych proszków metodą metalurgii proszków. Do nanoszenia powłok elektroiskrowych użyto urządzenia EIL-8A. Obróbkę laserową nałożonych powłok elektroiskrowych wykonano laserem Nd:YAG, model BLS 720. Powłoki WC-Cu przed i po modyfikacji laserowej mogą spełniać funkcje przeciwzuzyciowe oraz ochronne, co umożliwia ich zastosowanie w taborze kolejowym.

**Słowa kluczowe:** obróbka elektroiskrowa, obróbka laserowa, powłoka

## 1. Wprowadzenie

Technologie o skoncentrowanym strumieniu energii są stosowane przy obróbce powierzchni elementów z trudnoobrabialnych tworzyw konstrukcyjnych, a także do wykonywania elementów o bardzo skomplikowanych kształtach, których wykonanie metodami tradycyjnymi byłoby bardzo pracochłonne i czasochłonne. Obserwuje się rosnącą rolę tych technologii w kształtowaniu pożądanych cech powierzchni.

Cechą charakterystyczną technologii wiązkowych jest to, że obróbka materiałów następuje w wyniku oddziaływania skoncentrowanego strumienia energii. Sterując strumieniem energii mamy możliwość obróbki wybranych obszarów obrabianego elementu. Średnica plamki oddziaływania strumienia energii jest zróżnicowana

<sup>1</sup> Dr hab. inż.; Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn; e-mail: norrad@tu.kielce.pl.

<sup>2</sup> Mgr inż.; Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn.

<sup>3</sup> Mgr; Przewozy Regionalne sp. z o.o.; e-mail: dariusz.liszewski@p-r.com.pl.

od ułamka nanometrów do kilkudziesięciu centymetrów. Jest to uzależnione od podstawowego zjawiska fizycznego występującego w danej technologii. Najmniejszym polem oddziaływania charakteryzują się metody, w których mamy do czynienia ze strumieniem elektronów czy też z wiązką promieniowania laserowego. Występujące strumienie energii mogą być zogniskowane i sterowane przez systemy soczewek optycznych lub magnetycznych czy też zwierciadeł, a wielkość plamki w ognisku zależy tylko od długości fali promieniowania elektronowego czy laserowego.

Niniejszy artykuł dotyczy wytwarzania przeciwzużyciowych warstw powierzchniowych technologiami wiązkowymi. Pracę potraktowano wielowątkowo z wykorzystaniem zasobów wiedzy z wielu dyscyplin. Skupiono się na wytworzeniu przeciwzużyciowych warstw powierzchniowych technologiami elektroiskrową i laserową. Wytworzone warstwy powierzchniowe mogą być zastosowane na elementach zespołów mechanicznych i elektrycznych taboru kolejowego, np. sworzniach do pantografów, sworzniach do drążków stabilizacyjnych, sworzniach do styczników, tulejkach do styczników KE4D, rożkach opalnych do styczników SPG400.

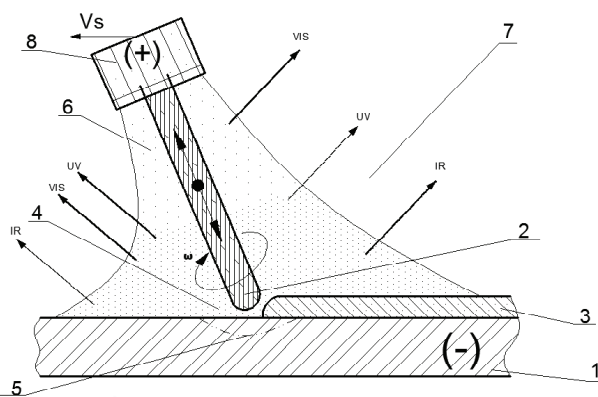
Na podstawie literatury oraz własnych doświadczeń opracowano skład 3 mieszanek proszków, z których wytworzono metodami metalurgii proszków elektrody do nanoszenia powłok obróbką elektroiskrową. Szczegółowo zbadano powłoki węglkowe w osnowie miedzi przed i po modyfikacji wiązką laserową. Ocenę wpływu obróbki laserowej na właściwości ukonstytuowanych warstw powierzchniowych prowadzono na podstawie obserwacji mikrostruktury, pomiarów chropowatości i mikrotwardości oraz badań odporności korozyjnej i porowatości.

## 2. Geneza i podstawy fizyczne obróbki elektroiskrowej

Geneza obróbki wyładowaniami elektrycznymi (*electrical discharge machining* – EDM) sięga 1770 roku, kiedy to angielski naukowiec Joseph Priestly odkrył erozyjny efekt wyładowań elektrycznych. W latach trzydziestych XX wieku wykonano pierwsze próby obróbki metali i diamentów z wykorzystaniem wyładowań elektrycznych. Erozja była spowodowana przez nieregularne wyładowania łukowe, występujące w powietrzu pomiędzy elektrodą i materiałem obrabianym, które były podłączone do źródła zasilania prądem stałym. Te procesy nie były precyzyjne z powodu przegrzania obszaru próbki i zdefiniowano je jako „obróbka łukowa” a nie jako „obróbka elektroiskrowa”. Pionierskie prace dotyczące obróbki elektroiskrowej (ESA) były zapoczątkowane w 1943 roku przez dwoje radzieckich naukowców (B.R. Łazarenko i N.I. Łazarenko) na Uniwersytecie Moskiewskim [2].

W latach pięćdziesiątych XX wieku wprowadzono obwód RC (opornik – kondensator), który zapewnił pełną kontrolę czasu trwania impulsu oraz serwo-kontrolę obwodu, w celu automatycznego znajdowania i utrzymywania danej szczeliny pomiędzy elektrodą (narzędziem) a przedmiotem obrabianym. Obwód RC był powszechnie używany w latach pięćdziesiątych, później służył jako model w sukcesywnym rozwoju technologii obróbki elektroiskrowej. Mniej więcej w tym samym czasie trzech amerykańscy naukowcy przedstawili pomysł używania wyładowań elektrycznych do regeneracji gwintowników i wiertel oraz zaworów hydraulicznych. Prace amerykańskich uczonych stały się podstawą do konstrukcji urządzenia do obróbki elektroiskrowej z lampą próżniową i serwo-układem elektronicznym. Zadaniem serwo-układu było automatyczne ustalanie odpowiedniego odległości elektrody roboczej (ER) od przedmiotu obrabianego (bez kontaktu elektrody z przedmiotem obrabianym). Jednak dopiero w latach osiemdziesiątych nastąpił duży postęp w poprawie sprawności obróbki elektroiskrowej.

Proces obróbki elektroiskrowej jest możliwy dla materiałów, które są przewodnikami prądu, bez względu na ich twardość, kształt lub wytrzymałość. Proces wyładowania następuje w wyniku zbliżenia elektrod i może zachodzić w atmosferze próżni, gazu obojętnego lub powietrza (rys. 1).



Rys. 1. Schemat nanoszenia powłoki obróbką elektroiskrową: 1) materiał poddawany obróbce (katoda), 2) elektroda robocza (anoda), 3) powłoka użytkowa, 4) strumień plazmy, 5) strefa dyfuzji, 6) otoczenie ochronne, 7) otoczenie dalsze, 8) mocowanie elektrody; IR – promieniowanie podczerwone, UV – promieniowanie ultrafioletowe, VIS – promieniowanie widzialne [4]

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 w miarę zbliżania się elektrod,

- przebiecie 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.

Kluczowe znaczenie w opisie elektroiskrowego wyładowania ma poznanie fizycznej strony przebiegu wyładowania elektrycznego między przemieszczającymi się elektrodami. Znane w tym zakresie badania wykazują, że napięcie przebicia  $U_{prze}$  w próżni dla szczelin o wielkości 0,1–0,15 mm nie są nigdy mniejsze niż 300 V. Wielkość tego napięcia można przybliżyć formułą [5]:

$$U_{prze} = (C \cdot d)^{1/2} \quad (1)$$

gdzie: C – stała,

$d$  – odległość między elektrodami.

W atmosferze gazu znaczenie mają takie parametry, jak natężenie pola elektrycznego  $E$  i ciśnienie gazu  $p$ . Jeżeli relacja  $E/p$  jest dużą liczbą, to elektrony opuszczające katodę będą jonizować cząsteczki gazu. Uwolnione tym sposobem kolejne elektrony będą przyspieszane w polu elektrycznym i będą powodować dalszą jonizację gazu. Proces ten szybko narasta i przekształca się w elektronową lawinę. Prędkość przemieszczania się elektronów w polu elektrycznym jest rzędu  $2 \cdot 10^7$  cm/s, natomiast utworzonych jonów  $2 \cdot 10^5$  cm/s.

Cechą charakterystyczną powłok nanoszonych elektroiskrowo jest to, że mają one specyficzną, nie trawiącą się strukturę – pozostają białe. Wierzchnia warstwa jest kształtowana w warunkach lokalnego oddziaływania wysokiej temperatury i dużych nacisków. Wartości podstawowych parametrów obróbki elektroerozyjnej są następujące [3]:

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

Warstwa wierzchnia, ukonstytuowana w rezultacie obróbki elektroiskrowej ma założone cechy, zarówno w aspekcie struktury wewnętrznej, jak również struktury geometrycznej powierzchni (SGP).

Obecnie stosuje się różne odmiany obróbki elektroiskrowej, które spełniają standardy wytwarzania powłok, a także kształtowania mikrogeometrii powierzchni [3–7]. Współczesne zastosowania przemysłowe obróbki elektroiskrowej obejmują

następujące dziedziny: przemysł motoryzacyjny, przemysł kosmiczny, przemysł lotniczy, przemysł okrętowy, przemysł zbrojeniowy, przemysł energetyczny, mechanikę precyzyjną, produkcję narzędzi oraz medycynę.

### 3. Obróbka laserowa warstw powierzchniowych

Wykorzystanie promieniowania laserowego staje się obecnie coraz bardziej rozpowszechnione i różnorodne. Pomimo upływu ponad pięćdziesięciu lat od wynalezienia lasera, tempo badań w zakresie techniki laserowej oraz konstrukcji i produkcji urządzeń laserowych ustawicznie wzrasta. Rosnące zainteresowanie promieniowaniem emitowanym przez laser wynika z jego specyficznych, niezwykle użytecznych właściwości i możliwości budowy źródeł promieniowania o różnych parametrach takich jak: długość fali, mod poprzeczny wiązki, emitowana moc, energia impulsu, czas trwania impulsu, częstotliwość powtarzania impulsów itp.

Do właściwości światła laserowego można zaliczyć: monochromatyczność, spójność, równoległość, polaryzację. Zasadnicze korzyści, jakie daje zastosowanie laserów w obróbce materiałowej są następujące:

- wiązka laserowa nie podlega zużyciu w przeciwieństwie do narzędzi takich, jak np. frez, wiertło,
- możliwość przenoszenia energii na znaczne odległości przy niewielkich stratach,
- duża powtarzalność wyników w związku z utrzymywaniem wąskiej tolerancji dobranych parametrów,
- łatwość automatyzacji procesów technologicznych,
- możliwość koncentracji dużych gęstości mocy,
- materiał i układ pozycjonowania nie podlegają mechanicznemu naciskom.

Większość operacji technologicznych wykonywanych wiązką laserową jest oparta na zjawisku cieplnego oddziaływania światła na nieprzezroczyste materiały. W związku z tym proces ten można opisać modelem fizycznym, który można podzielić na kilka etapów:

- 1) absorpcja światła, pochłanianie i przekazywanie energii siatce krystalicznej materiału,
- 2) nagrzewanie,
- 3) topienie,
- 4) parowanie,
- 5) stygnięcie materiału.

Wymienionym procesom mogą towarzyszyć inne zjawiska, jak np. tworzenie plazmy, emisja elektronów, czy wytwarzanie fali uderzeniowej. Istotny wpływ na wynik modyfikacji laserowej mają właściwości obrabianego materiału. Najważ-

niejszymi z nich są: gęstość, pojemność cieplna, entalpia, przewodnictwo cieplne właściwe, dyfuzyjność cieplna oraz współczynnik absorpcji materiału dla promieniowania laserowego. Absorpcyjność materiału zależy nie tylko od długości fali promieniowania lasera, ale także od sposobu przygotowania powierzchni i temperatury obrabianych elementów oraz czasu oddziaływania promieniowania laserowego na materiał. Według [1] absorpcję promieniowania laserowego obrabianych powierzchni metalowych można zwiększać stosując:

- 1) schropowacenie, pozwalające uzyskać absorpcyjność do 30–40%,
- 2) utlenianie, gdzie można uzyskać wzrost absorpcyjności do 30–40%,
- 3) wzrost temperatury powierzchni przez jej wstępne ogrzewanie, co powoduje wzrost absorpcyjności o 10–30%,
- 4) naniesienie powłoki absorpcyjnej tzw. powłoki antyrefleksyjnej, można uzyskać absorpcyjność dochodzącą nawet do 90%.

Szczególnie interesująco przedstawia się możliwość wykorzystania obróbki laserowej do polepszenia właściwości powłok otrzymanych elektroiskrowo [8–10]. Wiązka laserowa może zostać wykorzystana do wygładzania oraz uszczelniania tych powłok. Zastosowanie wiązki laserowej do wygładzania powłok otrzymanych elektroiskrowo powinno zapewnić zmniejszenie chropowatości powierzchni i zmianę kształtu profilu nierówności. Do wygładzania zalecane są niewielkie gęstości mocy i duże średnice wiązki laserowej w celu przetopienia warstwy na niewielką głębokość. Celem zagęszczania laserowego jest zmniejszenie porowatości powłoki oraz likwidacja rys, rozwarstwień, pęknięć powierzchni powłoki. Na podstawie wykonanych badań własnych i zdobytych doświadczeń można stwierdzić, że obróbka laserowa powłok elektroiskrowych wpływa na [8–10]:

- poprawę gładkości powierzchni powłoki,
- zmniejszenie porowatości powłoki,
- poprawę przyczepności powłoki do materiału podłoża,
- zwiększenie odporności na zużycie oraz zatarcie,
- redukcję niekorzystnych naprężeń rozciągających, co spowoduje podwyższenie wytrzymałości zmęczeniowej,
- zwiększenie odporności na korozję.

Wiązka laserowa może być również wykorzystana do modyfikacji powierzchni służących do intensyfikacji wymiany ciepła. Powierzchnie modyfikowane laserowo mogą być wykorzystane m.in. do produkcji wymienników ciepła [11].

## 4. Materiały i parametry obróbki

Przedmiotem badań były powłoki nakładane elektrodami o przekroju 4 mm x 6 mm (anoda) metodą elektroiskrową na próbki wykonane ze stali C45 w stanie normalizowanym (katoda). Jako gaz ochronny stosowano argon. Stosowano następujące rodzaje elektrod:

- WC50-Cu50, o składzie 50% WC i 50% Cu;
- WC25-Cu75, o składzie 25% WC i 75% Cu;
- WC75-Cu25, o składzie 75% WC i 25% Cu.

Charakterystykę proszków stosowanych do wytworzenia elektrod przedstawiono w tablicy 1. Widok urządzenia wraz z elektrodą WC-Cu umieszczoną w uchwycie przedstawiono na rysunku 2.

Tablica 1

**Proszki stosowane do wytworzenia elektrod**

| Proszek | Rozmiar cząstki, $\mu\text{m}$ | Producent |
|---------|--------------------------------|-----------|
| WC      | $\sim 0,2$                     | OMG       |
| Cu      | $\sim 0,04$                    | NEOMAT    |



Rys. 2. Urządzenie do nanoszenia powłok elektroerozyjnych EIL-8A

W procesie wytwarzania elektrod nanoproszki WC i Cu w odpowiednich proporcjach miesza się przez 30 minut w mieszalniku Turbula T2C, a następnie 12 g odważki wymieszanych proszków wsypuje się do otworów w grafitowej matrycy. Mieszanki prasowano na gorąco, przepuszczając stały prąd przez grafitową matrycę i utrzymując proszek w temperaturze 950°C pod ciśnieniem 40 MPa przez 3 minuty. Matrycę i prasopiec stosowane do wytwarzania elektrod przedstawiono na rysunkach 3 i 4.





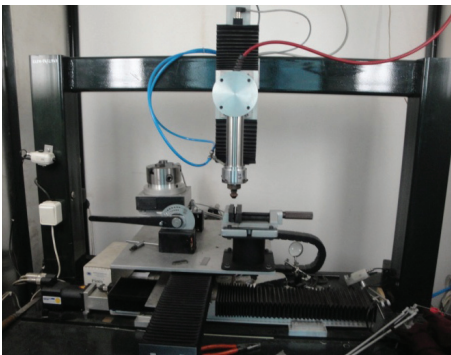
Rys. 3. Matryca grafitowa



Rys. 4. Praso-piec do spiekania elektrod

Do nanoszenia powłok elektroerozyjnych użyto urządzenia EIL-8A o ręcznym przesuwie elektrody. Opierając się na doświadczeniach własnych oraz zaleceniach producenta urządzenia przyjęto następujące parametry nanoszenia powłok elektroerozyjnych: napięcie  $U = 230$  V, pojemność kondensatorów  $C = 150$   $\mu$ F, natężenie prądu  $I = 0,7$  A, czas ekspozycji  $\tau = 2$  min/cm<sup>2</sup>.

Obróbkę laserową przeprowadzono laserem Nd:YAG (impulsowy tryb pracy), model BLS 720 (rys. 5). Próbkę z powłokami elektroerozyjnymi naświetlano laserowo przy następujących parametrach obróbki: średnica plamki laserowej  $d = 0,7$  mm; moc lasera  $P = 60$  W; prędkość przemieszczania wiązki  $v = 250$  mm/min; odległość dysza – obrabiany przedmiot  $\Delta f = 6$  mm; czas trwania impulsu  $t_i = 0,45$  ms; częstotliwość powtarzania  $f = 50$  Hz; skok przesuwu wiązki  $S = 0,4$  mm; gaz osłonowy azot  $Q = 25$  l/min.



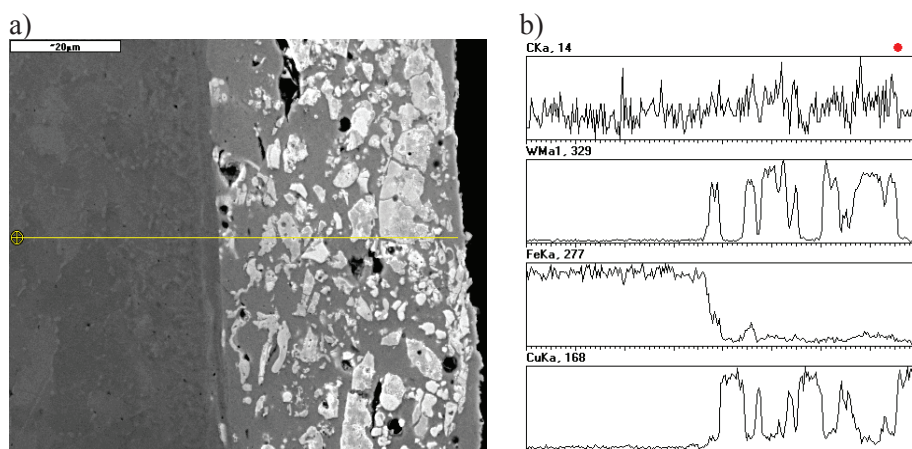
Rys. 5. Laser Nd:YAG model BLS 720: część robocza (po lewej) oraz panel sterowania (po prawej)



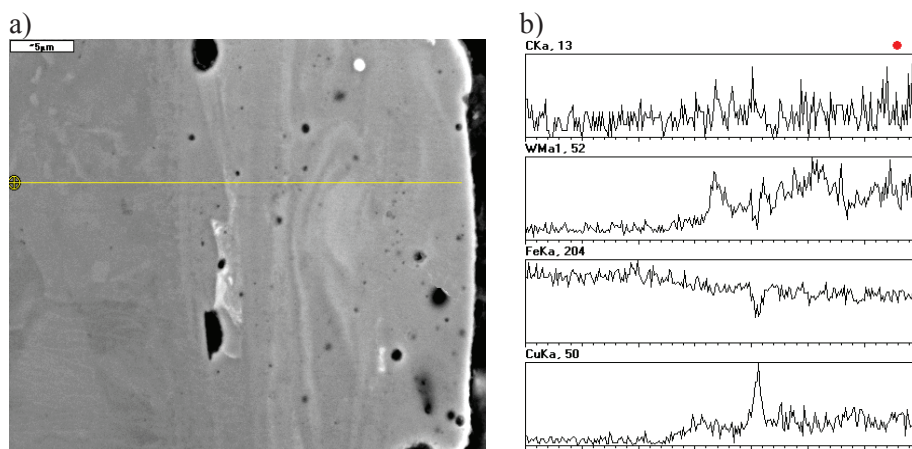
## 5. Omówienie wyników badań

### 5.1. Analiza mikrostruktury

Do badań mikrostruktury wykorzystano elektronowy mikroskop skaningowy Joel typ JSM-5400 wraz z mikroanalizatorem rentgenowskim IBIS-Oxford Instruments. Badania mikroskopowe przeprowadzono na zglądach wykonanych w płaszczyźnie prostopadłej do nakładanej powierzchni, co daje możliwość obserwacji charakterystycznych obszarów badanego materiału, jego struktury oraz umożliwia dokonanie pomiarów grubości naniesionych powłok (rys. 6 i 7).



Rys. 6. Mikrostruktura (a) i rozkład liniowy pierwiastków (b) w powłoce WC75-Cu25



Rys. 7. Mikrostruktura (a) i rozkład liniowy pierwiastków (b) w powłoce WC75-Cu25 po obróbce laserowej (60 W)

Na rysunku 6a przedstawiono przykładowy widok mikrostruktury powłoki WC-Cu stopowanej elektroiskrowo. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że uzyskane warstwy miały grubość od 36–60  $\mu\text{m}$ , a zasięg strefy wpływu ciepła (SWC) w głąb materiału podłoża wyniósł około 20–30  $\mu\text{m}$ . Na przedstawionej fotografii mikrostruktury widoczna jest wyraźna granica pomiędzy powłoką a podłożem oraz można zaobserwować pory i mikropełknięcia.

Analiza liniowa (rys. 6b) powłoki WC-Cu wykazała nierównomierny rozkład pierwiastków w tej powłoce. Można wyróżnić strefy, w których występują znaczne ilości W, Cu oraz Fe. Ponadto na wykresie rozkładu liniowego powłoki WC-Cu są widoczne ślady połączenia dyfuzyjnego powłoki z podłożem. W badanej powłoce wyraźnie jest widoczna segregacja składników. Analizując wykres rozkładu liniowego powłoki WC-Cu (rys. 6b) obserwuje się zwiększoną zawartość węgla w ukształtowanej obróbką elektroiskrową powłoce. Jest to przykład dyfuzji wstępującej, która polegała na przemieszczaniu się z materiału podłoża (stali C45) węgla (w wyniku oddziaływań cieplnych) do kształtowanej elektroiskrowo technologicznej warstwy powierzchniowej (TWP).

W wyniku modyfikacji wiązką laserową powłok WC-Cu naniesionych elektroiskrowych i następującego po nim krzepnięcia, ich skład chemiczny uległ zmianie. Obróbka laserowa spowodowała ujednorodnienie składu chemicznego powłoki (rys. 7b). Nastąpiło również rozdrobnienie struktury i krystalizacja faz silnie przesyconych wskutek występowania znacznych gradientów temperatur oraz uzyskiwania dużych prędkości chłodzenia. Wytworzone w wyniku obróbki laserowej TWP nie miały mikropełnięć i porów (rys. 7a) oraz nieciągłości na granicy powłoka – podłoże. Grubość obrobionych laserem powłok WC-Cu mieściła się w zakresie od 40–74  $\mu\text{m}$ . Powstała w wyniku naświetlania laserowego SWC miała zasięg 30–45  $\mu\text{m}$  i ma to związek z większą gęstością mocy obróbki laserowej w odniesieniu do obróbki elektroiskrowej.

## 5.2. Pomiary chropowatości

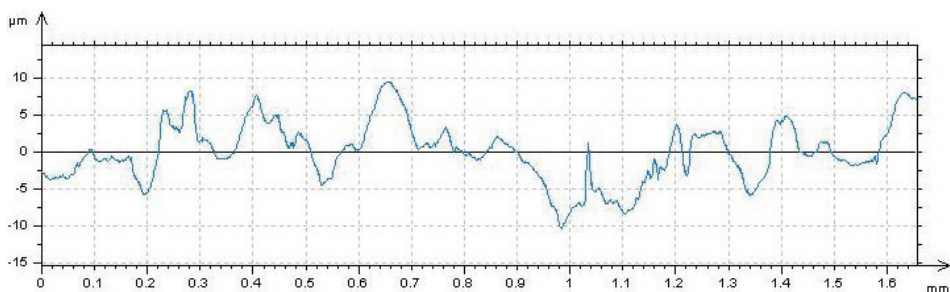
Jedną z głównych wad powłok naniesionych obróbką elektroiskrową jest ich duża chropowatość końcowa. Dotychczas przeprowadzone badania oraz analiza literatury wykazują, że kształtowanie powierzchni zachodzi w wyniku nakładania się na siebie kraterów będących wynikiem erozji podłoża, jak również grzbietów utworzonych z przemieszczających się na powierzchnię cząstek materiału powłokowego (elektrody). Tak powstała powierzchnia ma następujące cechy: regularność, brak kierunkowości, duże promienie zaokrągleń wierzchołków mikronierówności. W 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 profilometru optycznego Talysurf CCI wykorzystującego algorytm korelacji koherencji, umożliwiający pomiar z rozdzielczością w osi z poniżej 0,8 nm.

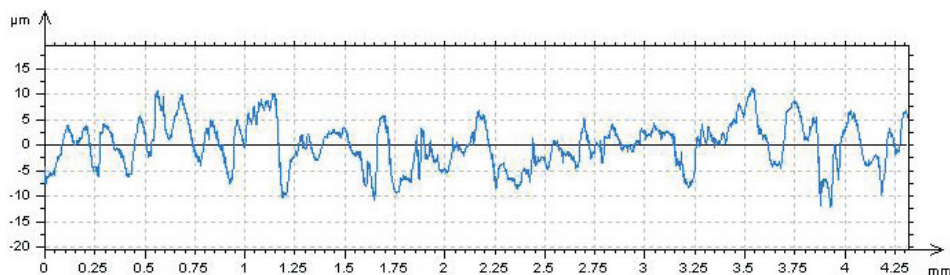
Pomiary chropowatości powłok WC-Cu wykonano w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach. Pierwszy pomiar był wykonany zgodnie z ruchem przemieszczania się elektrody, natomiast drugi pomiar był prostopadły do ściegów skanujących. Z dwóch pomiarów obliczono wartość średnią parametru  $Ra$  dla danej powłoki.

Pomiary powłok WC-Cu obrobionych laserem przeprowadzono 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-Cu miały chropowatość  $Ra = 2,16\text{--}4,03\ \mu\text{m}$ , natomiast po obróbce laserowej chropowatość wynosiła od 2,87 do 5,54  $\mu\text{m}$ . Próbkę ze stali C45, na którą nanoszono powłoki miały chropowatość  $Ra = 0,41\text{--}0,44\ \mu\text{m}$ . Przykładowe wykresy pomiarów parametrów mikrogeometrii badanych próbek przedstawiono na rysunkach 8 i 9.



Rys. 8. Przykładowe wyniki pomiarów parametrów mikrogeometrii powłoki WC75-Cu25



Rys. 9. Przykładowe wyniki pomiarów parametrów mikrogeometrii powłoki WC75-Cu25 po obróbce laserowej (50W)

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów można stwierdzić, że obróbka laserowa powoduje wzrost chropowatości powłok WC-Cu. Większa chropowatość powłok WC-Cu po obróbce laserowej jest efektem ruchu ciekłego metalu wywołanego siłami napięcia powierzchniowego. Niejednorodny rozkład temperatury w wiązce laserowej (mod  $TEM_{00}$ ) 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.

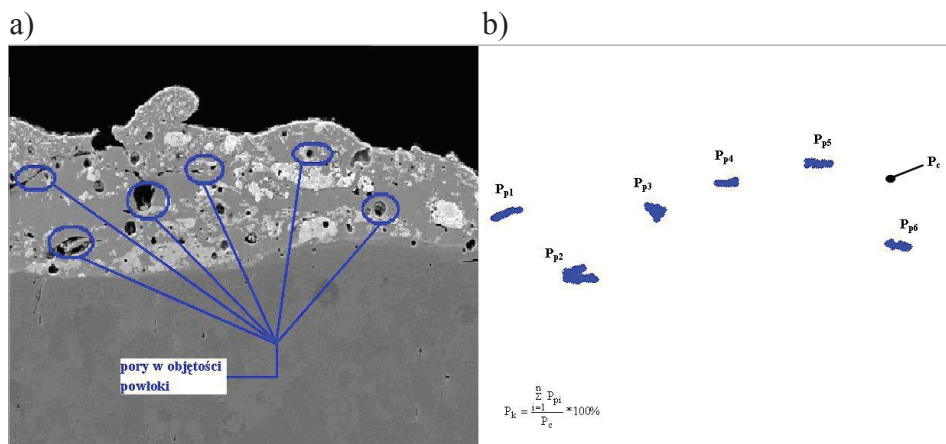
### 5.3. Badania porowatości

W celu oceny stopnia porowatości badanych powłok WC-Cu przed i po obróbce laserowej wykonano ilościową analizę obrazu wykorzystując oprogramowanie SIS będące na wyposażeniu (SEM) Philips XL30/LaB<sub>6</sub>. W analizie ilościowej kierowano się zasadą Cavalieri-Hacquerta, według której miarą porowatości mogą być udziały porów:

- objętościowe (stosunek sumy objętości porów do objętości analizowanego fragmentu powłoki),
- powierzchniowe (stosunek sumy powierzchni porów do całkowitej powierzchni analizowanego szlif),
- na długości odcinka kontrolnego (stosunek sumy długości cięciw przechodzących przez pory do długości analizowanego odcinka pomiarowego na płaszczyźnie szlif).

Wartości porowatości uzyskane według każdej z wymienionych metod są sobie równe. Do ilościowej oceny stopnia wewnętrznej porowatości TWP (tzw. porowatości kohezyjnej  $P_v$ , występującej w objętości powłoki poza strefą połączenia powłoka – podłoże), posłużono się metodą planimetryczną. W tej metodzie formułą określenia udziału porów w ukształtowanej warstwie powierzchniowej jest zmierzenie sumy ich powierzchni ( $P_p$ ) na płaszczyźnie szlif analizowanej TWP, odniesionej do powierzchni całego szlif ( $P_c$ ), co przedstawia rysunek 10. Wyniki badań porowatości powłok WC-Cu przed i po obróbce laserowej przedstawiono w tabelicy 2.

Analizując tabelicę 2 można zauważyć, że powłoki WC-Cu mają większą porowatość w stosunku do powłok po obróbce laserowej. Obróbka laserowa zmniejszyła porowatość powłok ponad dziesięciokrotnie. Porowatość powłok WC-Cu mieściła się w zakresie 5,2–6,1%, natomiast po LBM wyniosła 0,6–0,1%. Stwierdzono



Rys. 10. Przykładowa struktura rzeczywista (a) i schemat (b) wyznaczania porowatości kohezynnej powłok metodą planimetryczną

Tablica 2

### Wyniki badań porowatości powłok WC-Cu przed i po obróbce laserowej

| Powłoka                   | Porowatość [%] |     |     | Wartość średnia [%] |
|---------------------------|----------------|-----|-----|---------------------|
|                           | Numer pomiaru  |     |     |                     |
|                           | 1              | 2   | 3   |                     |
| WC50-Cu 50                | 5,7            | 6,3 | 3,5 | 5,2                 |
| WC50-Cu 50+laser (P=50 W) | 0,6            | 0,4 | 0,4 | 0,5                 |
| WC50-Cu 50+laser (P=60 W) | 0,4            | 0,2 | 0,1 | 0,2                 |
| WC50-Cu 50+laser (P=70 W) | 0,1            | 0,1 | 0,1 | 0,1                 |
| WC75-Cu25                 | 5,5            | 4,8 | 7,9 | 6,1                 |
| WC75-Cu25 +laser (P=50 W) | 0,4            | 0,3 | 0,5 | 0,4                 |
| WC75-Cu25 +laser (P=60 W) | 0,1            | 0,3 | 0,1 | 0,2                 |
| WC75-Cu25 +laser (P=70 W) | 0,1            | 0,2 | 0,1 | 0,1                 |
| WC25-Cu75                 | 8,1            | 6,5 | 2,6 | 5,7                 |
| WC25-Cu75 +laser (P=50 W) | 0,8            | 0,5 | 0,6 | 0,6                 |
| WC25-Cu75 +laser (P=60 W) | 0,2            | 0,1 | 0,1 | 0,1                 |
| WC25-Cu75 +laser (P=70 W) | 0,1            | 0,1 | 0,1 | 0,1                 |

również, że na wartość porowatości ma wpływ moc lasera. Wraz ze wzrostem mocy lasera zmniejszała się porowatość powłok WC-Cu. Mniejsza porowatość powłok WC-Co korzystnie wpływa na ich właściwości eksploatacyjne, polepszając ich odporność korozyjną, przyczepność czy mikrotwardość.

## 5.4. Badania odporności korozyjnej

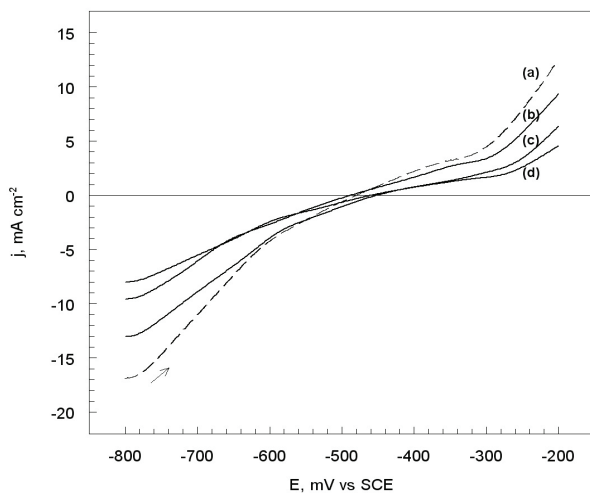
W celu wyznaczenia parametrów korozji stosuje się metodę ekstrapolacji krzywych Tafela. W ten sposób ustala się wartości gęstości prądu korozyjnego, dzięki którym można obliczyć szybkość korozji. Do pomiarów voltamperometrycznych użyto potencjostatu / galwanostatu typu PGSTAT 128N, który był sterowany za pomocą programu NOVA 1.7.

Pomiary elektrochemiczne prowadzono głównie techniką polaryzacji potencjodynamicznej. W celu zbadania wpływu składu powłoki (WC-Cu) na korozję elektrochemiczną podłoża, zarejestrowano krzywe polaryzacyjne w 1 M kwaśnym roztworze jonów chlorkowych. Pomiary prowadzono w zakresie potencjału od  $-800$  do  $-200$  mV, szybkość zmiany potencjału elektrody wynosiła  $1 \text{ mV s}^{-1}$ . Krzywe polaryzacyjne posłużyły do wyznaczenia potencjału korozji ( $E_{\text{kor}}$ ) i gęstości prądu korozji ( $j_{\text{kor}}$ ). Szybkość korozji obliczano z wzoru [12]:

$$k_{\text{kor}} = 3,268 \times \frac{j_{\text{kor}} M}{n \rho} \quad (2)$$

gdzie:  $j_{\text{kor}}$  oznacza gęstość prądu korozji,  $M$  – masę molową żelaza,  $n$  – liczbę wymienianych elektronów,  $\rho$  – gęstość żelaza.

Wszystkie pomiary prowadzono w temperaturze  $25 \pm 0,5^\circ\text{C}$ , którą utrzymywano za pomocą termostatu powietrznego. Krzywe polaryzacyjne dla stali C45 (w środowisku chlorków) pokrytej obróbką elektroiskrową powłokami WC-Cu przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Krzywe polaryzacyjne dla stali C45. Roztwór zawierał 1 M Cl<sup>-</sup>. Stan powierzchni elektrod: a) brak powłoki, b) WC75-Cu25, c) WC50-Cu50, d) WC25-Cu75, dE/dt 1 mV s<sup>-1</sup>



Krzywa (a) dotyczy elektrody C45 niepokrytej warstwą WC-Cu, natomiast krzywe (b) i (d) odnoszą się do próbek stali, które zawierają powłoki o różnym udziale procentowym węgla wolframu i miedzi. Stwierdzono, że w miarę wzrostu udziału miedzi w składzie powłoki WC-Cu obecnej na powierzchni stali, następuje wyraźne obniżenie wartości gęstości prądów katodowego i anodowego. Zatem można przypuścić, że istotną rolę w zabezpieczeniu powierzchni podłoża przed skutkami korozji elektrochemicznej odgrywa miedź.

Krzywe polaryzacyjne (rys. 11) posłużyły do wyznaczenia niektórych parametrów korozji stali, które zestawiono w tabelicy 3. W miarę zwiększania procentowej zawartości miedzi w mieszaninie nanoproszków potencjał korozji przesunął się nieznacznie (około 20 mV) w kierunku wartości dodatnich, natomiast gęstość prądu korozji wyraźnie maleje. W związku z tym w przypadku powłoki WC25-Cu75 szybkość korozji jest około trzy razy mniejsza w porównaniu do stali nie zawierającej powłoki WC-Cu.

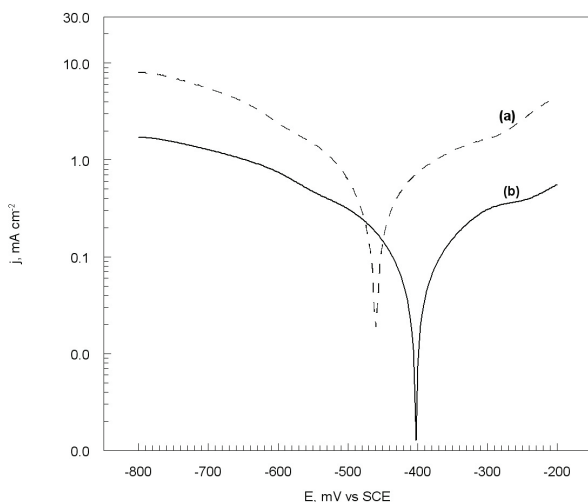
Tabela 3

**Niektóre parametry korozji oraz szybkość korozji stali C45 niepokrytej i pokrytej warstwą WC-Cu w roztworze zawierającym 1 M Cl**

| Powłoka         | $E_{kor}$ , mV | $j_{kor}$ , mA/cm <sup>2</sup> | $k_{kor}$ , mm/rok |
|-----------------|----------------|--------------------------------|--------------------|
| Brak (stal C45) | -480           | 1,10                           | 12,8               |
| WC75-Cu25       | -487           | 0,80                           | 9,3                |
| WC50-Cu50       | -451           | 0,53                           | 6,1                |
| WC25-Cu75       | -459           | 0,40                           | 4,6                |

Na rysunku 12 przedstawiono krzywe polaryzacyjne (w układzie półlogarytmicznym (tafelowskim)) dla próbek stali C45 poddanych obróbce elektroiskrowej elektrodą o składzie: 25% WC i 75% Cu. Krzywa (a) dotyczy próbki nienaświetlanej laserem, natomiast krzywa (b) po naświetlaniu laserem Nd:YAG.

Krzywe polaryzacyjne posłużyły do wyznaczenia niektórych parametrów korozji oraz szybkości korozji badanej stali, które zestawiono w tabelicy 4. W przypadku próbki poddanej naświetlaniu laserowemu, potencjał korozji przesunął się o około 50 mV w kierunku wartości dodatnich, natomiast gęstość prądu korozji zmniejszyła się w porównaniu do próbki nienaświetlanej. Konsekwentnie szybkość korozji stali C45 maleje prawie trzykrotnie.



Rys. 12. Krzywe polaryzacyjne w układzie półlogarytmicznym (tafelowskim) dla stali C45. Roztwór zawierał 1 M Cl<sup>-</sup>. Powierzchnia elektrod pokryta powłoką WC25-Cu75: a) brak naświetlania, b) po naświetleniu laserem Nd:YAG, dE/dt 1 mV s<sup>-1</sup>

Tablica 4

**Niektóre parametry korozji oraz szybkość korozji stali C45 w roztworze zawierającym 1 M Cl<sup>-</sup> pokrytej powłoką WC25-Cu75 przed i po obróbce laserem Nd:YAG**

| Powłoka           | $E_{kor}$ , mV | $j_{kor}$ , mA/cm <sup>2</sup> | $k_{kor}$ , mm/rok |
|-------------------|----------------|--------------------------------|--------------------|
| WC25-Cu75         | -459           | 0,40                           | 4,6                |
| WC25-Cu75 + laser | -402           | 0,15                           | 1,7                |

Obróbka laserowa spowodowała wyraźną modyfikację powierzchni warstwy WC25-Cu75 przez uszczelnienie powłoki oraz likwidację jej defektów powierzchniowych. Nastąpiło również niewielkie rozdrobnienie struktury powłok i krystalizacja faz silnie przesyconych wskutek występowania znacznych gradientów temperatur oraz dużych prędkości chłodzenia.

## 5.5. Pomiary mikrotwardości

Pomiary mikrotwardości wykonano metodą Vickersa przy użyciu mikrotwardościomierza Microtech MX3, 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 elektroerozyjnych WC-Cu przed i po obróbce laserowej przedstawiono w tablicach 5 i 6.

Tablica 5

**Wyniki pomiarów mikrotwardości powłoki WC50-Cu50**

| Mierzone strefy         | Mikrotwardość HV0,4 |     |     | Wartość średnia HV0,4 |
|-------------------------|---------------------|-----|-----|-----------------------|
|                         | Numer pomiaru       |     |     |                       |
|                         | 1                   | 2   | 3   |                       |
| <b>Warstwa biała</b>    | 652                 | 691 | 585 | 643                   |
| <b>SWC</b>              | 428                 | 464 | 421 | 438                   |
| <b>Materiał rodzimy</b> | 262                 | 297 | 275 | 278                   |

Tablica 6

**Wyniki pomiarów mikrotwardości powłoki WC50-Cu50 po obróbce laserowej**

| Mierzone strefy         | Mikrotwardość HV0,4 |     |     | Wartość średnia HV0,4 |
|-------------------------|---------------------|-----|-----|-----------------------|
|                         | Numer pomiaru       |     |     |                       |
|                         | 1                   | 2   | 3   |                       |
| <b>SPP</b>              | 594                 | 621 | 635 | 617                   |
| <b>SWC</b>              | 391                 | 397 | 432 | 407                   |
| <b>Materiał rodzimy</b> | 276                 | 288 | 273 | 279                   |

Zastosowanie obróbki elektroiskrowej spowodowało zmiany mikrotwardości w obrabianym materiale. Mikrotwardość materiału podłoża po obróbce elektroerozyjnej wynosiła średnio około 278 HV0,4 (taką samą wartość mikrotwardości miał materiał w stanie wyjściowym). Nakładając obróbkę elektroiskrową powłoki WC-Cu uzyskano znaczny wzrost mikrotwardości w stosunku do mikrotwardości materiału podłoża. Powłoka WC-Cu miała średnią mikrotwardość 643 HV0,4 (nastąpił wzrost mikrotwardości średnio o 131% w stosunku do mikrotwardości materiału podłoża). Mikrotwardość SWC po obróbce elektroerozyjnej wzrosła o 58% w stosunku do mikrotwardości materiału podłoża.

Zastosowanie obróbki laserowej obniżyło nieznacznie mikrotwardość powłok elektroiskrowych. Naświetlanie laserowe spowodowało spadek mikrotwardości powłok WC-Cu o 9% 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. Przyczyną tego efektu może być rozpuszczenie węglików. W dalszym etapie badań tak należy dobrać parametry wiązki laserowej, które pozwolą na uniknięcie rozpuszczenia węglików w ukształtowanej technologicznej warstwie powierzchniowej.

## 6. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań, stwierdzono, że:

1. Powierzchnię stali węglowej można modyfikować metodą obróbki elektroiskrowej używając elektrod WC-Cu o różnej zawartości procentowej obu składników.
2. Skoncentrowanym strumieniem wiązki laserowej można skutecznie modyfikować stan warstwy powłok elektroiskrowych WC-Cu i wpływać na poprawę ich właściwości użytkowych.
3. Zastosowanie obróbki laserowej do modyfikacji powłok WC-Cu nakładanych elektroiskrowo podniosło ich właściwości eksploatacyjne, a w szczególności zwiększyło ich odporność korozyjną i zmniejszyło porowatość.
4. Szybkość korozji podłoża wyraźnie zmniejsza się w miarę zwiększania zawartości miedzi w mieszaninie nanoprošków WC-Cu.
5. Obróbka laserowa powłok WC-Cu spowodowała ujednorodnienie składu chemicznego, rozdrobnienie struktury oraz likwidację mikropęknięć i porów.
6. Powłoki WC-Cu po obróbce laserowej miały o około 27% większą chropowatość 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).
7. Obróbka laserowa powłok elektroiskrowych powoduje obniżenie ich mikro-twardości w porównaniu do warstw nie poddanych przetopieniu laserowemu.

## Literatura

1. Burakowski T., Wierchoń T.: *Inżynieria powierzchni metali*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1995.
2. Łazarenko B.R., Łazarenko N.I.: *Elektroiskrowaja obrabotka tokoprovodiaszczih materialow*, Akademia Nauk CCCP, Moskwa 1958.
3. Miernikiewicz A.: *Doświadczalno-teoretyczne podstawy obróbki elektroerozyjnej (EDM)*, Politechnika Krakowska – Rozprawy – nr 274 – Kraków 2000.
4. Ozimina D., Scholl H., Styp-Rekowski M.: *Formowanie przeciwzużyciowych warstw wierzchnich obróbką elektroiskrową*, Wybrane zagadnienia obróbek skoncentrowaną wiązką energii, rozdział 2, 2003, s. 104–109.
5. Petrow J. (pod red.): *Elektroiskrowoje legirowanie metalličeskich powierzchni*, Kisziniew 1985.

6. Radek N.: *Determining the operational properties of steel beaters after electrospark deposition*, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, No. 4/2009, pp. 10–16.
7. Radek N.: *The properties and applications of electro-spark deposited coatings*, Rozdział 3.1 w monografii: Selected problems of mechanical engineering and maintenance, Edited by Norbert Radek, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, pp. 127–143, Kielce 2012.
8. Radek N., Antoszewski B.: *Influence of laser treatment on the properties of electro-spark deposited coatings*, Kovove Materialy – Metallic Materials, Vol. 47, No. 1/2009, pp. 31–38.
9. Radek N., Bartkowiak K.: *Performance properties of electro-spark deposited carbide-ceramic coatings modified by laser beam*, Physics Procedia, No. 5/2010, pp. 417–423.
10. Radek N., Wajs E., Luchka M.: *The WC-Co electrospark alloying coatings modified by laser treatment*, Powder Metallurgy and Metal Ceramics, Vol. 47, No. 3–4/2008, pp. 197–201.
11. Radek N., Orman Ł.J.: *Preliminary data of boiling heat transfer of laser treated heat exchanger surfaces*, Rozdział 3.2.3 w monografii: Scientific basis of modern technologies: experience and prospects, Edited by J.I. Shalapko and L.A. Dobrzański, Wydawnictwo Khmelnytskyi National University, pp. 236–245, Jaremche 2011.
12. Scendo M.: *Działanie wybranych inhibitorów korozji miedzi w wodnych roztworach chlorków*, Wydawnictwo Akademii Świętokrzyskiej, Kielce 2006.

## **Properties of the Coatings Produced Technologies Using a Concentrated Beam of Energy and their Potential use in Rolling Stock**

### **Summary**

The paper is concerned with determining the influence of the laser treatment process on the properties of electro spark coatings. The properties were assessed after laser treatment by analysing microstructure and measuring the roughness, microhardness, porosity and corrosion resistance. The studies were conducted using WC-Cu electrodes produced by the powder metallurgy route of nanostructural powders. The coatings were deposited by means of the EIL-8A and they were laser treated with the Nd:YAG, BLS 720 model. The WC-Cu coatings before and after modification of the laser can act as anti-wear and protective, allowing their use in rolling stock.

**Keywords:** electro-spark deposition, laser treatment, coating

## **Свойства покрытий, которые производятся на основе технологий используемых сконцентрированный поток энергии и их потенциальное использование для железнодорожного подвижного состава**

### **Резюме**

В труде было произведено исследование относительно воздействия лазерной обработки на свойства покрытий, которые наносятся электроискровым способом. Оценка свойств покрытий после лазерной обработки произведена на базе исследования микроструктуры, измерений шероховатости и микротвердости, а также исследований в области коррозионного сопротивления и пороватости. Исследование произведено с использованием электродов WC-Cu, которые были произведены благодаря спеканию наноструктуральных порошков методом металлургии порошков. С целью нанесения электроискровых покрытий использовано устройство модель EIL-8A. Лазерная обработка накладываемых электроискровых покрытий произведена лазером Nd:YAG, модель BLS 720. Покрытия WC-Cu до и после лазерной модификации могут выполнять функции охраны перед износом и охраны вообще, что дает возможность на их применение в железнодорожном подвижном составе.

**Ключевые слова:** электроискровая обработка, лазерная обработка, покрытие