

Wojciech DEPCZYŃSKI<sup>1</sup>  
Norbert RADEK<sup>2</sup>

### WŁASNOŚCI WARSTW STELLITOWYCH WYTWARZANYCH NA DRODZE OSADZANIA ELEKTROISKROWEGO

*W pracy badano właściwości powłok nanoszonych elektroiskrowo na podstawie obserwacji mikrostruktury, badań odporności korozyjnej oraz pomiarów siły tarcia. Badania przeprowadzono wykorzystując stellite jako materiał powłokowy, nakładanej elektroiskrowo na próbki ze stali C45. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że grubość otrzymanych warstw stellite wynosi 10÷15 µm oraz że warstwy charakteryzują się brakiem porów i mikropęknięć i mają charakter połączenia dyfuzyjnego z podłożem. Mikrotwardość naniesionych warstw stellite jest około 2,5 razy większa, w stosunku do mikrotwardości materiału podłoża. Testy korozyjne wykazały większą odporność korozyjną warstw stellite, w odniesieniu do materiału podłoża. Powłoki tego typu wykazują zwiększoną odporność na zużycie oraz korozję.*

### THE PROPERTIES OF STELLITE ALLOY LAYERS APPLIED BY ELECTRO-SPARK DEPOSITION

*The paper is concerned with the properties of electro-spark deposited Stellite alloy coatings. The properties were determined by analyzing the microstructure and corrosion resistance of the layers and measuring the friction forces. The tests were conducted for Stellite alloy coatings electro-spark deposited over the C45 carbon steel substrate. It was found that the Stellite alloy layers were 10÷15 µm in height, they had no pores or microcracks, and there was diffusive interaction with the substrate. Moreover, the microhardness of the Stellite layers was about 2.5 times higher than that of the substrate. The tests show that the electro-spark deposited Stellite coatings are characterized by higher higher resistance corrosion than that of the substrate. Coatings of this type provide improved wear and corrosion protection.*

---

<sup>1</sup> dr inż. Wojciech Depczyński, Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn; 25-314 Kielce; Al.1000 l. P.P. 7, tel: + 48 41 342-45-06, Fax: + 48 41 342-45-19, e-mail: wdep@tu.kielce.pl

<sup>2</sup> dr inż. Norbert Radek, Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn; 25-314 Kielce; Al.1000 l. P.P. 7, tel: + 48 41 342-45-18, Fax: + 48 41 342-45-19, e-mail: norrad@tu.kielce.pl

## 1. WSTĘP

Ocenę właściwości powłok przeprowadzono na podstawie obserwacji mikrostruktury oraz badań odporności korozyjnej i oporów tarcia [1]. Procesy wytwarzania powłok na elementach metalowych, do których należy obróbka elektroiskrowa, związane są z transportem masy i energii oraz reakcjami: chemicznymi, elektrochemicznymi i elektrotermicznymi, które im towarzyszą [1÷2]. Współcześnie stosowane są różne odmiany obróbki elektroiskrowej spełniające standardy wytwarzania powłok, a także kształtowania mikrogeometrii powierzchni [3÷8].

Zastosowanie powłok nanoszonych metodą elektroiskrową dotyczy dwóch grup zagadnień:

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

O pozycji obróbki elektroiskrowej wśród technik wywarzania warstw powierzchniowych, świadczą liczne zastosowania przemysłowe (począwszy od twardych powłok na krawędziach tnących narzędzi skrawających, aż do rozwiniętych struktur na powierzchniach implantów) i nowoczesne konstrukcje urządzeń (od urządzeń ręcznych do zrobotyzowanych systemów obróbki elektroiskrowej). W samych Stanach Zjednoczonych badania nad tą technologią prowadzone są przez instytuty pracujące dla NASA, US AIR FORCE, US NAVY [2, 10]. Cechą charakterystyczną powłok nanoszonych elektroiskrowo jest to, że mają one specyficzną, nie trawiącą się strukturę - pozostają białe. Warstwa wierzchnia kształtowana jest w warunkach lokalnego oddziaływania wysokiej temperatury i dużych nacisków. Wartości podstawowych parametrów obróbki elektroerozyjnej są następujące [9]:

- ciśnienie fali uderzeniowej od iskry elektrycznej wynosi  $(2÷7) \cdot 10^{12}$  Pa,
- temperatura osiąga wartości rzędu  $(5÷40) \cdot 10^3$  K.

## 2. MATERIAŁY I PARAMETRY OBRÓBK

Przedmiotem badań były powłoki nakładane elektrodą stellitową o przekroju 3 x 4 mm (anoda) metodą elektroiskrową na podłoże ze stali C45 (katoda). Skład chemiczny elektrody stellitowej przedstawiono w tabeli 1.

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  $U = 230$  V,
- pojemność kondensatorów  $C = 0,3 \cdot 10^{-3}$  F,
- natężenie prądu  $I = 2,1$  A.

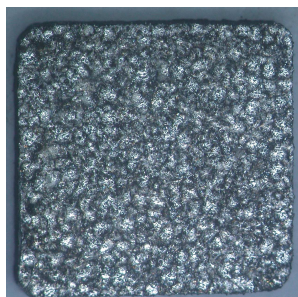
Tab. 1 Skład chemiczny elektrody stellitowej

Pierwiastki	C	Cr	Mn	Fe	Co	W
Zawartość %	7,0	56,0	1,0	0,6	25,0	10,4

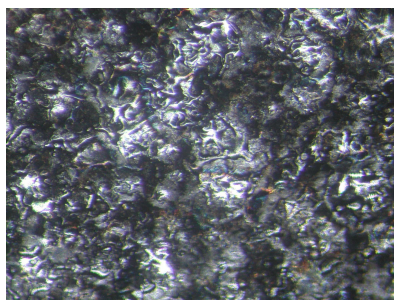
### 3. ANALIZA MIKROSTRUKTURY

Charakterystyczną cechą powłok elektroiskrowych jest to, że powstała warstwa ma specyficzną nie trawiącą się strukturę, pozostaje biała. Podobne warstwy powstają w procesie szlifowania i docierania. Wspólną cechą dla tych przypadków jest to, że warstwa wierzchnia kształtowana jest w warunkach lokalnego oddziaływania wysokiej temperatury i wysokich nacisków.

Lokalnie występująca temperatura podczas obróbki elektroiskrowej znacznie przekracza temperaturę wrzenia materiałów elektrod. Wysoka prędkość odprowadzania ciepła powoduje, że temperatura w zakresie mikrometrowej grubości warstwy spada szybko do temperatury krzepnięcia. Według literatury [10] procesy krystalizacji, przemian fazowych i chemicznego oddziaływania zachodzą w fazie stałej. W ten sposób powłoki elektroiskrowe tworzą struktury drobnoziarniste o składzie nierównowagowym, heterogeniczne pod względem składu, struktury i własności. Powłoki tego typu posiadają bardzo dobrą przyczepność z podłożem (połączenie dyfuzyjne lub reakcyjno-dyfuzyjne). Po naniesieniu powłok na wybrane elementy dokonano wyboru miejsc pobrania wycinków do dalszych badań. Wycięte mechanicznie elementy poddano oględzinom makro w celu oceny jakości wykonania powłok. Na rysunku 1 przedstawiono wygląd próbki z naniesioną warstwą stellite'ową w powiększeniu 6x na rysunku 2 w powiększeniu 50x

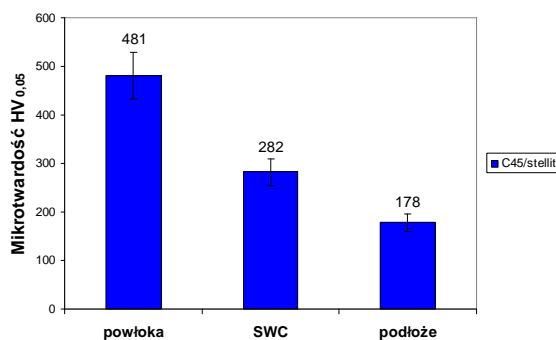


Rys. 1. Makrofotografia powierzchni elementu z warstwą stellite'ową pow. 6x



Rys. 2. Makrofotografia powierzchni elementu z warstwą stellite'ową pow. 50 x

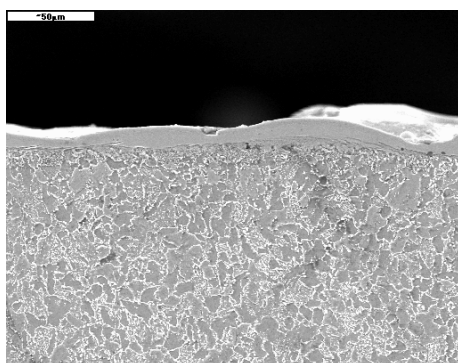
Pomiarów mikrotwardości dokonano za pomocą twardościomierza Hannemana przy obciążeniu 0,5 N. Mikrotwardość wytworzonej powłoki stellitej wyniosła pomiędzy 481  $\mu\text{HV}$  a 452  $\mu\text{HV}$ , mikrotwardość w strefie wpływu ciepła 278 - 280  $\mu\text{HV}$ . Mikrotwardość podłoża oscylowała w granicach 180  $\mu\text{HV}$ . Zmiany twardości przedstawiono na rysunku 3.



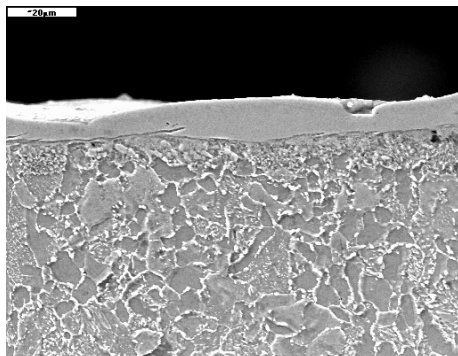
Rys. 3. Średnie wartości mikrotwardości

Analizę mikrostruktury powłok stellitej przeprowadzono przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego Joel JSM-5400. Analiz dokonano za pomocą EDS OXFORD ISIS link 300.

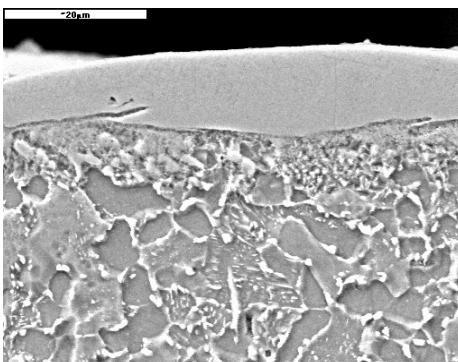
Obserwacje na mikroskopie skaningowym przeprowadzono przy powiększeniach 500÷3500 razy. Przykładowe mikrostruktury przedstawiono na rysunkach 4÷6. Zaobserwowano występowanie przyczepnej warstwy o grubości 10÷15  $\mu\text{m}$ , natomiast zasięg strefy wpływu ciepła (SWC) w głąb materiału podłoża do ok. 15  $\mu\text{m}$ . Nie zaobserwowano porów i mikropęknięć, co może świadczyć o optymalnym doborze parametrów procesu. Powłokę cechuje dobra równomierność grubości warstwy.



Rys. 4. Mikrofotografia SEM warstwy stellitej nakładanej elektroiskrowo pow. 500x



Rys. 5. Mikrofotografia SEM warstwy stellitowej nakładanej elektroiskrowo pow. 1000x



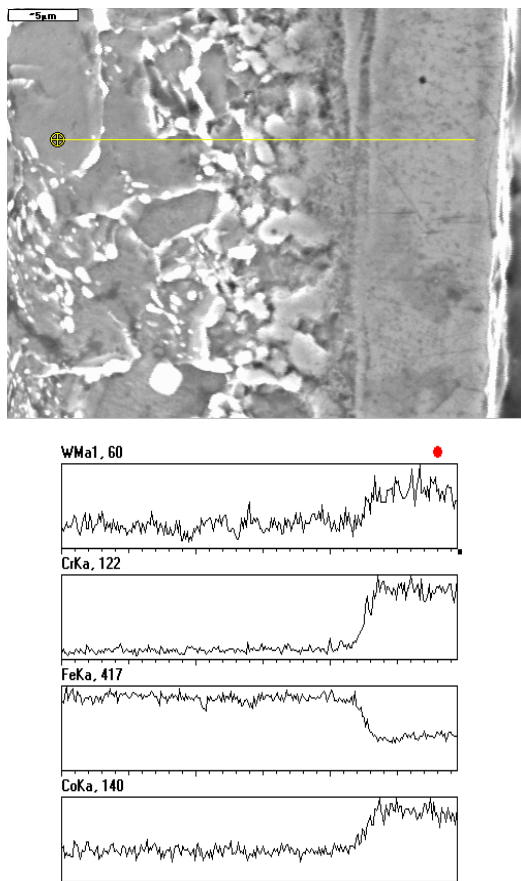
Rys. 6. Mikrofotografia SEM warstwy stellitowej nakładanej elektroiskrowo pow. 2000x

Warstwa stellitowa nie uległa wytrawieniu. Zaobserwowano zmniejszenie wielkości ziarna w strefie dyfuzyjnej pod warstwą stellitową. Wpływ obróbki na zmiany mikrostruktury materiału podłoża jest jednak bardzo niewielki

Powierzchnia warstwy jest dość silnie rozwinięta. Głębokości zagłębień wahają się w granicach od kilku mikrometrów do nawet kilkunastu. Jest to typowe zjawisko dla warstw wytwarzanych za pomocą osadzania elektroiskrowego.

Analiza liniowa (rysunek 7) powłoki stellitowej wykazała nierównomierny rozkład pierwiastków w tej powłoce. Można wyróżnić strefy, w których występują znaczne ilości W, Co oraz Cr. Przebiegi rozkładu liniowego pierwiastków sugerują istnienie połączenia dyfuzyjnego pomiędzy materiałem powłoki i podłożem.

W czasie nakładania powłoki z podłoża przedyfundowało do powłoki pewna ilość żelaza. Obecność zwiększonej ilości żelaza, które przedyfundowało z podłoża może mieć niekorzystny wpływ na odporność korozyjną powłoki stellitowej. W dalszej części badań przeprowadzono testy korozyjne.



Rys. 7. Rozkład liniowy pierwiastków w powłoce stellitej nałożonej elektroiskrowo

#### 4. BADANIA ODPORNOŚCI KOROZYJNEJ

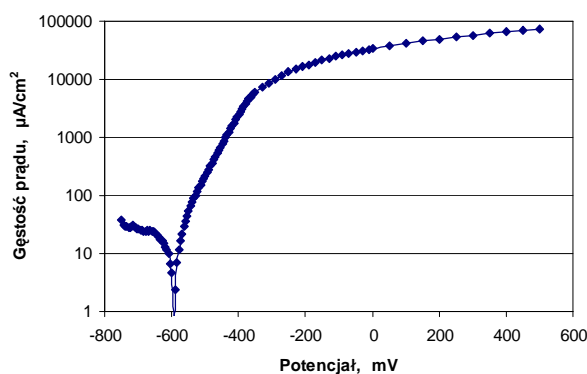
Pomiary odporności korozyjnej zostały przeprowadzone za pomocą skomputeryzowanego zestawu do badań elektrochemicznych Atlas'99 firmy Atlas-Sollich. Pomiary przeprowadzono metodą potencjodynamiczną.

Krzywe polaryzacji katodowej i anodowej wykonano polaryzując próbki z szybkością zmian potencjału wynoszącą 0,2 mV/s (w obszarze  $\pm 200$  mV od potencjału korozyjnego) oraz 0,4 mV/s w obszarze wyższych potencjałów. Próbki z wyodrębnionym 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 -  $21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ . Wykres krzywej polaryzacji powłoki stellitej przedstawiono na rysunku 8. Charakterystyczne wartości elektrochemiczne badanych materiałów przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości gęstości prądu i potencjału korozyjnego badanych próbek

Badany materiał	Gęstość prądu korozyjnego $I_k$ [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]	Potencjał korozyjny $E_{\text{KOR}}$ [mV]
C45	$112 \pm 17,8\%$	-458
C45/stellit	$12,7 \pm 5,4\%$	-594

Gęstość prądu korozyjnego powłoki stellitej wyniosła  $I_k=12,7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , zaś materiału podłoża (stal C45)  $I_k=112 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Powłoka tego typu spowodowała wzrost odporności korozyjnej około 9 razy większy w stosunku do materiału wyjściowego. Ma to związek z dużą zawartością chromu (56 %) w elektrodzie stellitej oraz brakiem mikropęknięć i porów w powłoce stellitej.



Rys. 8. Krzywa polaryzacji powłoki stellitej

## 5. BADANIA TRIBOLOGICZNE

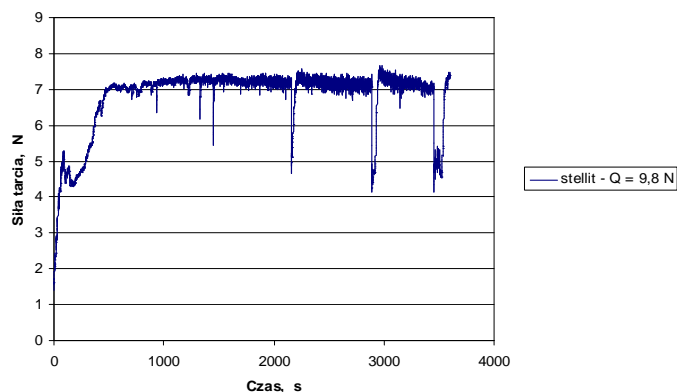
Badania oporów tarcia (tarcie technicznie suche) przeprowadzono na testerze tribologicznym T-01M typu trzpień-tarcza. Jako próbki stosowano pierścienie ze stali węglowej wyższej jakości C45, na które naniesiono elektroiskrowo powłoki stellite. Przeciwpóbką była kulka o średnicy  $\phi 4$  mm wykonana ze stali 100Cr6. Badania na testerze przeprowadzono przy następujących parametrach tarcia:

- prędkość liniowa  $V = 1 \text{ m/s}$ ,
- czas próby  $t = 3600 \text{ s}$ ,
- zakres zmian obciążenia  $Q = 4,9 \text{ N}; 9,8 \text{ N}; 14,7 \text{ N}$ .

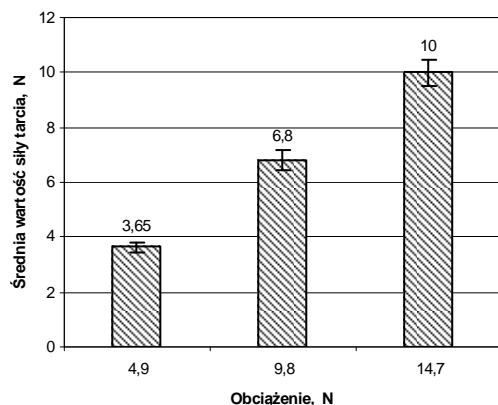
Na przykładowym wykresie (rys. 3) przedstawiony jest przebieg siły tarcia w funkcji czasu próby przy obciążeniu 9,8 N.

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

Obserwowano stabilizację stanu przeciwzyciowej warstwy powierzchniowej (PWP). Na przebiegu (rysunek 9) można zaobserwować, że stabilizacja siły tarcia następuje po upływie 500 sekund, a wartość jej oscyluje na poziomie  $7,1 \div 7,2$  N. Średnie wartości sił tarcia przedstawiono na wykresie (rysunek 10).



Rys. 9. Wykres zmian siły tarcia w funkcji czasu



Rys. 10. Średnie wartości siły tarcia

## 6. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

- proces tworzenia technologicznych warstw powierzchniowych metodą obróbki elektroiskrowej związany jest z transferem masy i energii oraz zjawiskiem powstania plazmy niskotemperaturowej.
- W wyniku obróbki elektroiskrowej można wytworzyć powłoki które posiadają założone właściwości eksploatacyjne.



- w oparciu o uzyskane wyniki stwierdzono, że grubość uzyskanych warstw wyniosła około 10÷15  $\mu\text{m}$ , natomiast zasięg strefy wpływu ciepła w głąb materiału podłoża wyniósł ok. 15÷20  $\mu\text{m}$ .
- Uzyskano warstwy są pozbawione porów i mikropęknięć.
- powłoki stelliteowe charakteryzuje 9 razy większa odporność korozyjna w stosunku do stali C45.
- Wykazana w teście odporność korozyjna w roztworze 3,5% NaCl predestynuje badane warstwy do użycia w środowisku morskim.
- podczas badań tribologicznych zaobserwowano, że średnie wartości sił tarcia wzrastają proporcjonalnie do obciążenia, oraz obserwuje się stabilizację siły tarcia z upływem czasu próby.
- w dalszym etapie należy wykonać badania składu fazowego oraz porowatości powłok stelliteowych nakładanych elektroiskrowo.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Galinov I.V., Luban R.B., Mass transfer trends during electrosark alloying, *Surface and Coatings Technology* (79), 1996, pp. 9 -18.
- [2] Ozimina D., Scholl H., Styp-Rekowski M., Model formowania przeciwzuzyciowych warstw wierzchnich za pomocą obróbki elektroiskrowej, Wybrane zagadnienia obróbek skoncentrowana energia, monografia, rozdział II, Bydgoszcz, 2003, pp. 104 -109.
- [3] [http:// www.stt-inc.com](http://www.stt-inc.com).
- [4] Radek N., Wajs E., Luchka M., The WC-Co electrosark alloying coatings modified by laser treatment, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 47 (3-4), 2008, pp. 197-201.
- [5] Radek N., Experimental investigations of the Cu-Mo and Cu-Ti electro-sark coatings modified by laser beam, *Advances in Manufacturing Science and Technology*, 32 (2 ), 2008, pp. 53-68.
- [6] Radek N., Antoszewski B., Laser treatment of electro-sark deposited coatings, *Materials Engineering*, 12 (4), 2005, pp. 13-15.
- [7] Radek N., Obróbka elektroiskrowa - urządzenia i zastosowania przemysłowe, *Mechanik* (7), 2008, pp. 600-602.
- [8] U.S. Patent No. 5071059 „Method for joining single crystal turbine blade halves” - 1991.
- [9] Miernikiewicz A., Doświadczalno-teoretyczne podstawy obróbki elektroerozyjnej (EDM), Politechnika Krakowska - Rozprawy - nr 274 - Kraków 2000
- [10] Praca zbiorowa pod redakcją Petrowa J., Elektroiskrowe legiowanie metalićieskich powierzchni, Kisziniew, 1985.