

Dariusz Golański¹

Politechnika Warszawska, Instytut Technologii Materiałowych, ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa

TECHNOLOGIA NAKŁADANIA WARSTW KOMPOZYTOWYCH METODĄ ELEKTROISKROWĄ

Przedstawiono metodę elektroiskrową do nakładania różnego rodzaju warstw powierzchniowych ze szczególnym uwzględnieniem warstw kompozytowych gradientowych. Metoda elektroiskrowa oparta na wykorzystaniu skoncentrowanego strumienia energii umożliwia nakładanie warstw powierzchniowych z szeregu różnych materiałów zarówno trudno topliwych metali (wolfram, molibden), węglików (WC, SiC), intermetalików (NiAl, TiAl) czy kompozytów (ZrN+Al₂O₃+Mo).

W Zakładzie Inżynierii Spajania znajduje się urządzenie do elektroiskrowego nakładania warstw HARDIT 3005, przy użyciu którego przeprowadzono szereg badań związanych z nakładaniem warstw pojedynczych, jak i gradientowych kompozytowych na podłożach stalowych. Badania miały charakter podstawowy i dotyczyły możliwości nakładania warstw z wybranych materiałów. Przeprowadzono obserwacje mikroskopowe przekrojów poprzecznych, pomiary grubości i mikrotwardości otrzymanych warstw.

Słowa kluczowe: metoda elektroiskrowa, warstwa powierzchniowa, kompozyt, gradient

DEPOSITION OF COMPOSITE SURFACE LAYERS BY THE SPARK-HARDENING METHOD

This paper presents the application of the spark hardening method used for the deposition of surface layers made of different materials with a special attention to composite gradient layers. The spark hardening method is using the concentrated energy flux which allows to deposit refractory materials (wolfram, molybdenum), carbides (WC, SiC), intermetallics (NiAl, TiAl) and composites (ZrN Al₂O₃+Mo).

The Department of Welding Engineering at Warsaw University of Technology is using the special equipment for the spark hardening process (HARDIT 3005) and is using this apparatus to conduct research related with producing single, multiplayer and composite gradient layers on steel substrates. The research results shown in this paper have the fundamental status and are related with the fabrication of surface layers of selected materials. The microscopic observations and the measurements of microhardness and thickness of produced layers have been included.

Key words: spark hardening method, surface layer, composite, gradient

WSTĘP

Tzw. metoda elektroiskrowa należy do grupy metod opartych na wykorzystaniu skoncentrowanego strumienia energii. Metoda powstała w latach czterdziestych w ZSRR i jest pewną odmianą obróbki elektroerozyjnej. Była rozwijana intensywnie w latach sześćdziesiątych do nakładania warstw metalicznych, a w latach siedemdziesiątych dość powszechnie używano jej do nakładania trudno topliwych materiałów na metale i ich stopy [1].

Metoda stosowana może być w celu nakładania warstw [1-3]:

- regeneracyjnych na narzędzia i części maszyn,
- przejściowych o określonej chropowatości przed nałożeniem powłoki inną metodą,
- z izotopów radioaktywnych,
- dekoracyjnych,
- w których mogą zachodzić procesy pozwalające na tworzenie na powierzchni wiązań chemicznych.

Metoda ta umożliwia otrzymanie warstw o:

- zwiększonej twardości, odporności na zużycie (zwłaszcza ścierne), żaroodporności i odporności korozyjnej,
 - zmniejszonej skłonności do zacierania, zmniejszonym współczynniku tarcia [1],
 - różnych od podłoża właściwościach elektrycznych i promiennych (przede wszystkim emisyjności).
- Główne obszary zastosowania tej metody obejmują [2]:
- narzędzia skrawające (frezy, przeciągacze, rozwiertaki, wiertła, pogłębiacze, piły),
 - narzędzia do obróbki plastycznej (wykrojniki, tłoczniaki, stemple, matryce),
 - narzędzia pomiarowe (szablony, sprawdziany),
 - części maszyn (elementy podające i zaciskające, elementy łożysk, wodzików, krzywki i in.).

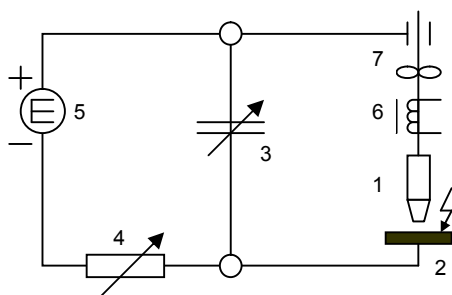
W niniejszej pracy przedstawiono niektóre wyniki badań prowadzonych w Zakładzie Inżynierii Spajania

¹ dr inż.

Politechniki Warszawskiej nad nakładaniem warstw powierzchniowych za pomocą urządzenia do elektroiskrowego nanoszenia warstw HARDIT 3005.

ISTOTA METODY ELEKTROISKROWEGO NAKŁADANIA WARSTW

Spośród wielu metod stosowanych do nakładania warstw powierzchniowych metoda elektroiskrowa jest jedną z mniej znanych. Umożliwia ona otrzymywanie cienkich ($5\div 100\ \mu\text{m}$) warstw powierzchniowych dobrze związanych z podłożem. Predysponuje ją to do zastosowań przemysłowych w celu modyfikacji lub regeneracji powierzchni części trących. Schemat zasady działania urządzenia do nanoszenia warstw tą metodą przedsta-



wiono na rysunku 1.

Obwód ładowania Obwód rozładowania

Rys. 1. Schemat zasady działania urządzenia do elektroiskrowego nakładania warstw: 1 - elektroda, 2 - przedmiot pokrywany, 3 - bateria kondensatorów, 4 - rezystor regulowany, 5 - źródło prądu stałego, 6 - układ drgań wzdlużnych elektrody, 7 - napęd elektrody

Fig. 1. The principle of operation of the spark hardening equipment: 1 - electrode, 2 - substrate, 3 - capacitor battery, 4 - resistor, 5 - DC power supply, 6 - the electrode vibration system, 7 - electrode motor

Elektroda (1), wykonana z materiału nakładanego na podłoże (2), zamocowana jest w uchwycie urządzenia do nanoszenia warstw, które wyposażone jest w układ wytwarzający drgania wzdlużne elektrody (6). Nakładanie warstw realizowane jest wskutek przechodzenia jonów materiału elektrody do podłoża w czasie powtarzających się cyklicznie wyładowań iskrowych między elektrodą i podłożem zasilanych z baterii kondensatorów (3). Układ drgań wzdlużnych elektrody intensyfikuje proces nakładania, powodując wbijanie przechodzących jonów elektrody w podłoże. W powstających między końcem elektrody a materiałem podłoża mikrołukach materiał nagrzewany jest bardzo intensywnie w bardzo krótkim czasie, powodując powstawanie lokalnego mikropola temperatury. Taki charakter procesu przechodzenia metalu w mikrołuku umożliwia otrzymanie warstw o bardzo dobrym dyfuzyjnym połączeniu z podłożem. Ilość materiału anody przenoszona w czasie jednego wyładowania jest bardzo mała. Dlatego do nałożenia warstwy o odpowiedniej grubości na dużą powierzchnię niezbędna jest okresowa komutacja anody z katodą i przemieszcza-

nie erody (skanowanie) po powierzchni pokrywanego przedmiotu.



Rys. 2. Stanowisko do nakładania warstw metodą elektroiskrową
Fig. 2. The spark hardening system

Badania związane z nakładaniem warstw powierzchniowych prowadzono za pomocą urządzenia HARDIT 3005, znajdującego się w Zakładzie Inżynierii Spajania ITMat PW. Urządzenie to (rys. 2) składa się z przenośnego generatora (źródła zasilania prądu stałego) z wbudowanym regulatorem, jednostką sterującą oraz uchwytem elektrodowym, wyposażonym w układ wytwarzający drgania wzdlużne elektrody. Urządzenie to umożliwia pięciostopniową regulację grubości nakładanych warstw w zakresie od 5 do $25\ \mu\text{m}$ z krokiem co $5\ \mu\text{m}$.

TECHNOLOGIA NAKŁADANIA WARSTW

Przygotowanie materiałów do obróbki polega na odłuszczeniu powierzchni podłoża oraz końca materiału elektrody za pomocą acetonu. Z uwagi na występujące drgania wzdlużne elektrody technika nakładania warstw musi być precyzyjna. Przeprowadzone próby wykazały, że istotny jest sposób prowadzenia elektrody wzdluż powierzchni materiału podłoża. Technika ta polega na tym, aby koniec elektrody prowadzić wzdluż podłoża przy minimalnym docisku i pod odpowiednim nachyleniem ($30\div 45^\circ$) w stosunku do płaszczyzny modyfikowanej powierzchni.

Szybkość nakładania warstw zależy od wybranego zakresu grubości nanoszonych warstw oraz średnic zastosowanej elektrody. Wzrost zakresu dopuszczalnej grubości warstwy oraz zwiększenie średnicy elektrody powoduje zwiększenie szybkości nakładania warstwy, choć jest to proces ręczny i jako taki cechuje się małą wydajnością. Szybkość nakładania warstw zależy także od szybkości przesuwu ręcznej elektrody po powierzchni skanowanego podłoża. Zbyt szybki przesuw elektrody sprzyja pozostawianiu obszarów niepokrytych. Najlepsze rezultaty osiągnano, stosując prostoliniowe ruchy wzdlużne elektrody wraz z powolnym przesuwem w kierunku poprzecznym, tak aby kolejny „ścieg” zachodził na poprzedni, umożliwiając pełne wypełnienie powierzchni materiałem nakładanym. Pomimo powolne-

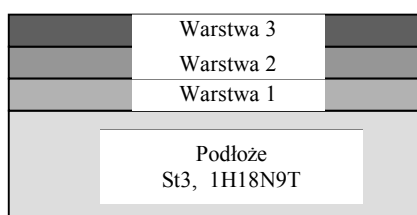
go pokrywania podłoża pozostają na nim widoczne miejsca niecałkowicie pokryte, które należy miejscowo powtórnie pokrywać, aż do ich całkowitego wypełnienia. Operacja ta nie zwiększa grubości całej warstwy, bowiem grubość ta nie przekracza danej nastawy urządzenia dla danego materiału. Orientacyjny czas pełnego pokrycia (z uzupełnieniami ubytków) powierzchni 80 mm² podłoża wynosi około 5 min.

Urządzenie HARDIT 3005 ma wbudowany mechanizm ręcznej płynnej zmiany częstotliwości drgań wzdluznych elektrody. Przeprowadzone próby nakładania warstw przy różnych nastawach częstotliwości drgań również nie wykazały różnic w strukturach otrzymywanych warstw, natomiast miały wpływ na łatwość (płynność) przebiegu procesu nakładania. Istnieje więc pewien optymalny zakres nastawy częstotliwości drgań elektrody, przy którym proces nakładania warstwy przebiega w sposób najbardziej efektywny. Zakres ten ustawić można na podstawie barwy dźwięku towarzyszącego danej nastawie oraz na podstawie oceny przebiegu procesu nanoszenia warstw przy danej nastawie. Zbyt niskie wartości częstotliwości drgań powodują lekkie przyklejanie się końca elektrody do podłoża oraz trudności w prowadzeniu elektrody po powierzchni podłoża. Zbyt wysokie wartości nastawy częstotliwości drgań powodują nadmierne wyładowania w mikrołuku, objawiające się zwiększonym „iskrzeniem”, a powierzchnia warstwy naniesionej zawiera ciemniejsze ślady przypominające obszar przepalony materiału.

NAKLADANIE WARSTW GRADIENTOWYCH KOMPOZYTOWYCH

Materiały gradientowe stanowią specjalną grupę materiałów kompozytowych. Klasyczna definicja mówi, że materiał gradientowy to materiał, który zmienia swoje właściwości w funkcji co najmniej jednego ze swoich wymiarów liniowych [4]. Z drugiej strony materiały gradientowe mogą być traktowane jako kompozyty warstwowe.

W pracy postanowiono otrzymać materiał gradientowy o charakterze kompozytu warstwowego i składający się z trzech różnych materiałów, zachowując przy tym prawidłową kolejność ich nakładania według rosnącego współczynnika rozszerzalności liniowej. Na rysunku 3 przedstawiono schemat przekroju poprzecznego próbki materiału gradientowego kompozytowego.



Rys. 3. Schemat budowy próbki z warstwą z materiału gradientowego

Fig. 3. The structure of the composite FGM multiplayer coatings

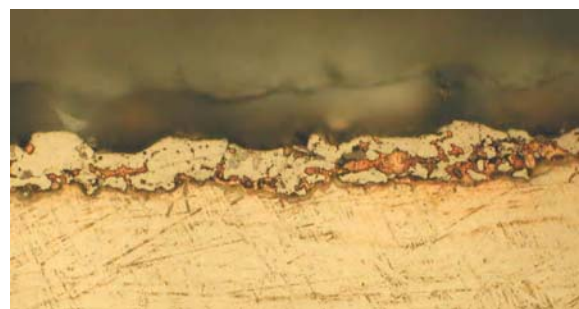
Jako materiał warstwy pierwszej zastosowano Ni, Cu (wsp. rozszerzalności cieplnej $\alpha = 13 \cdot 10^{-6}$ 1/K i $\alpha = 16 \cdot 10^{-6}$ 1/K), warstwy drugiej Ti, Ta, Mo (odpowiednio $\alpha = 9,4 \cdot 10^{-6}$ 1/K, $6,6 \cdot 10^{-6}$ 1/K, $5,1 \cdot 10^{-6}$ 1/K), a warstwy trzeciej WC, WC+ZrO₂ ($5,1 \div 7,3 \cdot 10^{-6}$ 1/K). Przygotowano elektrody z wyżej wymienionych materiałów w postaci prętów o średnicy 5 mm oraz taśm metalowych o grubości 0,5 mm i szerokości 5 mm. W przypadku ZrO₂ materiał ten był podawany pomiędzy elektrodę z WC, a podłoże w postaci proszku o średniej wielkości ziaren wynoszącej 40 nm.

OBSERWACJE MAKROSKOPOWE OTRZYMANYCH WARSTW

Po przeprowadzeniu elektroiskrowego nakładania wszystkie otrzymane warstwy poddane zostały obserwacjom wizualnym. Badania te polegały na obserwacji warstwy nieuzbrojonym okiem lub za pomocą lupy. Obserwacje wykazały, że powierzchnie po obróbce mają strukturę geometryczną losową, typową dla tej metody, tzn. składającą się z wzajemnie nachodzących na siebie mikrokraterów (wzniesień i wgłębień). Związane to jest z brakiem wygładzającego oddziaływania elektrody w czasie realizacji procesu ($Ra = 2,0 \div 2,5$ μm). W zależności od rodzaju użytej elektrody nowo powstałe powierzchnie miały różną barwę, np. miedź odcień czerwony, tantal - czarny, węgiel wolframu srebrnoszary. Pewną poprawę chropowatości powierzchni można uzyskać poprzez polerowanie otrzymanych powierzchni ($Ra = 1,5 \div 2,0$ μm).

BADANIA MIKROSKOPOWE

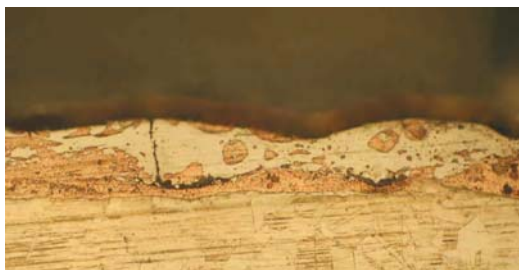
Badania mikroskopowe na zglądach wykonanych w płaszczyźnie prostopadłej do nakładanej powierzchni pozwalają na obserwację charakterystycznych obszarów badanego materiału, jego struktury oraz umożliwiają dokonanie pomiarów grubości i mikrotwardości nałożonych warstw.



Rys. 4. Struktura próbki materiału gradientowego (Cu-Ta-WC), nakładanego elektroiskrowo na podłoże ze stali 1H18N9T, pow. 500x

Fig. 4. The microstructure of (Cu-Ta-WC) gradient material deposited by the spark hardening method onto the 1H18N9T steel, x500

Próbki obserwowano na mikroskopie metalograficznym OLYMPUS IX70. Na rysunkach 4-8 przedstawiono wybrane mikrostruktury otrzymanych warstw gradientowych kompozytowych.



Rys. 5. Struktura próbki materiału gradientowego (Cu-Ti-WC), nakładanego elektroiskrowo na podłoże ze stali 1H18N9T, pow. 500x

Fig. 5. The microstructure of (Cu-Ti-WC) gradient material deposited by the spark hardening method onto the 1H18N9T steel, x500



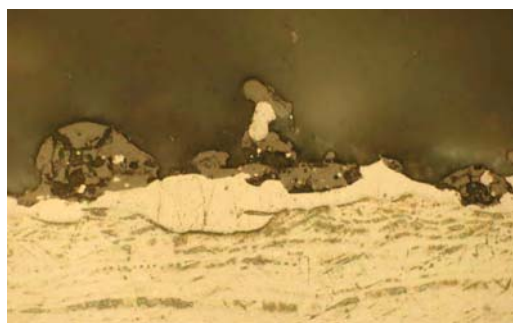
Rys. 6. Struktura próbki materiału gradientowego (Ni-Ti-WC) nakładanego elektroiskrowo na podłoże ze stali St3, pow. 1000x

Fig. 6. The microstructure of (Ni-Ti-WC) gradient material deposited by the spark hardening method onto the St3 steel, x1000



Rys. 7. Struktura próbki materiału gradientowego (Ni-Mo-WC) nakładanego elektroiskrowo na podłoże ze stali St3, pow. 1000x

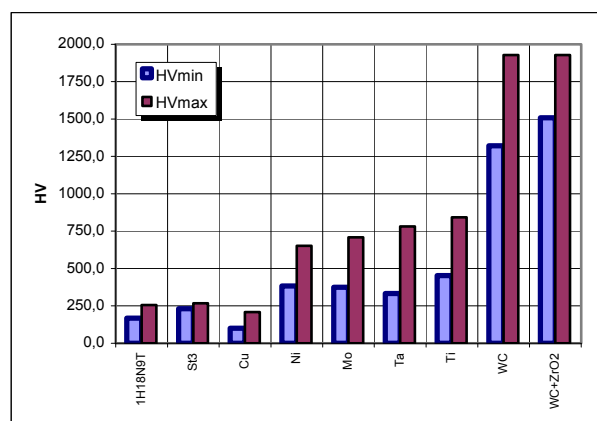
Fig. 7. The microstructure of (Ni-Mo-WC) gradient material deposited by the spark hardening method onto the St3 steel, x1000



Rys. 8. Struktura próbki materiału gradientowego Ni-(WC+ZrO₂) nakładanego elektroiskrowo na podłoże ze stali 1H18N9T, pow. 1000x

Fig. 8. The microstructure of Ni-(WC+ZrO₂) gradient material deposited by the spark hardening method onto the 1H18N9T steel, x1000

Zmierzone sumaryczne grubości uzyskanych warstw gradientowych zawierały się w przedziale od 17 do 50,5 μm . Największą całkowitą grubość zanotowano dla warstwy Cu-Ti-WC - równą 49 μm , wykonaną na stali 1H18N9T, zaś najmniejszą dla warstwy Ni-Ti-WC - równą 17 μm , wykonaną na podłożu St3. Zmierzone grubości warstw gradientowych uzyskane na podłożu ze stali kwasoodpornej okazały się wyższe średnio o kilkanaście mikrometrów niż na podłożu ze stali konstrukcyjnej. W przypadku warstwy kompozytowej Ni-(ZrO₂+WC) grubość warstwy przekroczyła 50 μm i była to najgrubsza otrzymana warstwa.



Rys. 9. Zmierzone maksymalne i minimalne wartości mikrotwardości HV002 dla poszczególnych nanoszonych materiałów

Fig. 9. The measured maximal and minimal microhardness HV002 for all deposited materials

W celu określenia mikrotwardości otrzymanych warstw wykonano pomiary na zglądach poprzecznych mikrotwardościomierzem PMT-3, a wyniki w postaci minimalnych i maksymalnych wartości mikrotwardości dla poszczególnych materiałów zebrano na rysunku 9.

PODSUMOWANIE

Istotną cechą warstwy wierzchniej jest jej spójność z materiałem rdzenia. Na przyczepność powłoki do podłoża, obok czystości powierzchni podłoża, wpływają: naprężenia własne, stopień rozwinięcia powierzchni

podłoża (większa chropowatość - lepsza przyczepność), różnica plastyczności materiału podłoża i powłoki (szczególnie istotna przy poddawaniu przedmiotu z warstwą wierzchnią silnym odkształceniom mechanicznym). Na podstawie obserwacji mikroskopowych nie stwierdzono przypadków złego spoinienia warstwy wierzchniej z materiałem podłoża. Dobra przyczepność warstw wierzchnich zapobiega ich pękaniu, odstawaniu i odrywaniu

w wyniku działania temperatury, silnych oddziaływań zewnętrznych o charakterze głównie mechanicznym i naprężeń własnych. Stwierdzono natomiast prostopadłe do podłoża pęknięcia warstw pojedynczych i wielowarstwowych, zwłaszcza w warstwach z węgla wolframu i tytanu. Prawdopodobnie pęknięcia te powstały na skutek działania naprężeń towarzyszących procesowi elektroiskrowego nanoszenia warstw.

Każda z nakładanych warstw realizowana była przy tych samych parametrach, poza zmianą częstotliwości drgań elektrody. Warstwy pierwsze, nakładane bezpośrednio na podłoże, były wykonywane przy większych częstotliwościach drgań elektrod. Miało to związek z przyklejaniem się elektrod do podłoża nakładanej próbki przy zbyt niskich częstotliwościach. Ogólnie proces nakładania warstw metodą elektroiskrową nie jest skomplikowany, wymaga jedynie dużej uwagi i pewnych sprawności manualnych prowadzącego proces. Większość uzyskanych warstw wierzchnich scharakteryzować można jako ciągłe z obszarami o mniej lub bardziej zróżnicowanej grubości.

Zgodnie z oczekiwaniami, najwyższe wartości mikrotwardości otrzymano dla warstw z węgla wolframu. Pomiary mikrotwardości warstw WC wykazały jej znaczne zróżnicowanie. Zmierzone mikrotwardości nałożonych warstw z WC wahały się w granicach od 1272 do 1927 HV002.

Korzystną cechą otrzymanych warstw gradientowych jest stopniowa zmiana mikrotwardości poszczególnych warstw, tam gdzie potrzebny jest materiał w konstrukcji o stosunkowo miękkim rdzeniu i twardej warstwie

wierzchniej. Najwyraźniej widać to na przykładach warstw Ni-Mo-WC, Ni-Ta-WC.

Przeprowadzone badania nakładania warstw metodą elektroiskrową potwierdziły możliwość otrzymania na metalowych podłożach technologicznych warstw powierzchniowych. Regulacja grubości nakładanych warstw oraz częstotliwości drgań elektrody są głównymi, a zarazem decydującymi parametrami w procesie nakładania warstw metodą elektroiskrową. Większa nastawa grubości powoduje automatycznie zwiększenie grubości powstającej warstwy, a prawidłowa nastawa wielkości drgań wzdłużnych elektrody wpływa na jej późniejszą jakość. Umiejętne sterowanie tymi parametrami jest kluczem do uzyskania warstwy wierzchniej o wymaganej charakterystyce.

Metoda nanoszenia elektroiskrowego z powodzeniem może być wykorzystywana do uszlachetniania powierzchni oraz regeneracji części maszyn i urządzeń pracujących w trudnych warunkach eksploatacyjnych.

Niniejsza praca finansowana była częściowo w ramach projektu zamawianego KBN nr Z-KBN K011/T08/2000 Nanomateriały metaliczne, ceramiczne i organiczne: synteza, budowa, właściwości, zastosowanie.

LITERATURA

- [1] Milewski W., Kierunki rozwoju natryskiwania cieplnego, Mat. Konf. Nauk. Techniki wytwarzania warstw powierzchniowych metali.
- [2] Celiński S., Sekuła J., Wolkowicz J., Stefański T., Obróbka elektroiskrowa narzędzi skrawających, Przegląd Mechaniczny 1984, 12.
- [3] Kowalenko W., Werchoturow A., Łazornoje i elektroerozionnoje uprocznienije matieriałow, Nauka, Moskwa 1986.
- [4] Barlak M., Grześ J., Materiały gradientowe i ich wykorzystanie, Program priorytetowy Nowe Technologie, Prace Naukowe PW, z. 1, Warszawa 1998.

Recenzent
Janusz Grabian