

## KSZTAŁTOWANIE STRUKTURY I WŁAŚCIWOŚCI POWŁOK WĘGLIKOWYCH $\text{Cr}_3\text{C}_2$ – NiCr NANOSZONYCH METODĄ NATRYSKU PLAZMOWEGO NA POWIERZCHNIĘ ODLEWÓW Z ŻELIWA SFEROIDALNEGO

### STRUCTURE FORMATION AND PROPERTIES OF $\text{Cr}_3\text{C}_2$ – NiCr CARBIDE COATINGS APPLIED BY PLASMA SPRAYING ONTO THE SURFACE OF DUCTILE IRON CASTINGS

Adam Tchórz, Łukasz Boroń, Marzanna Książek

Institut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Polska

#### Streszczenie

W pracy przedstawiono rezultaty badań struktury i trwałości mechanicznej powłok na bazie węgla chromu typu  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr na powierzchniach odlewów z żeliwa sferoidalnego. Powłoki na bazie węgla chromu były nanoszone na podłoże z żeliwa metodą natrysku plazmowego. Zastosowano obróbkę przetopieniową powłoki naniesionej metodą natrysku plazmowego. Do badania składu chemicznego i morfologii warstwy wierzchniej użyto mikroskopii optycznej i skaningowej wraz z analizą EDS. Zbadano rozkład mikro-twardości na jej przekroju oraz przeprowadzono badania cykliczne zmęczeniowe. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że zastosowanie obróbki przetopieniowej powłoki  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr powoduje polepszenie jej przyczepności do podłoża, wpływa zarówno korzystnie na zmiany w budowie strukturalnej powłok jak i na jej trwałość mechaniczną w warunkach zmiennych obciążeń. Badania miały na celu opracowanie założeń technologicznych do wykonania powłok ochronnych na odlewach z żeliwa sferoidalnego, pracujących w warunkach dużego zapylenia i obciążeń cyklicznych.

Słowa kluczowe: natrysk plazmowy, obróbka przetopieniowa, żeliwo sferoidalne

#### Abstract

The study presents the results of structure examinations and mechanical tests carried out on coatings based on  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr chromium carbide, applied onto the surface of ductile iron castings. The chromium carbide-based coatings were applied onto the cast iron substrate by the technique of plasma spraying. Then the coatings were subjected to a remelting treatment. The chemical composition and morphology of the surface layer were examined by optical microscopy and by SEM with EDS analysis. The distribution of micro-hardness values on the specimen cross-section was determined and cyclic fatigue testing was carried out. Basing on the results of the tests it has been concluded that remelting of  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr coating improves its adherence to the substrate as well as the structure and mechanical properties under the conditions of variable loading. The investigations mainly aimed at the development of technical guidelines for manufacture of protective coatings on ductile iron castings operating under the conditions of heavy dust and cyclic loading.

Keywords: plasma spraying, remelting, ductile iron

## Wprowadzenie

Żeliwo sferoidalne znajduje coraz szersze zastosowanie w energetyce. Odlewy z żeliwa sferoidalnego stosuje się m.in. na łopatki wentylatorów przemysłowych. W warunkach pracy łopatki narażone są na intensywne ścieranie i korozję. Naniesienie warstw ochronnych metodą natrysku plazmowego na powierzchnię łopatek ma na celu zwiększenie ich właściwości mechanicznych, jak również eksploatacyjnych. W wyniku natryskiwania plazmowego powstają warstwy, zawierające wydłużone ziarna wzdłuż powierzchni podłoża, pustki i pory, tlenki oraz zanieczyszczenia [1, 2]. Taka struktura warstwy nie stanowi dobrej ochrony w warunkach działania czynników agresywnych, dlatego stosuje się różne modyfikacje. Stwierdzono, że w wyniku zastosowania obróbki przetopieniowej powłoki wcześniej naniesionej metodą natrysku plazmowego można uzyskać znaczne wygładzenie powierzchni, zmniejszenie porowatości oraz korzystną strukturę materiału powłokowego [3, 4].

Prezentowana praca dotyczy kształtowania struktury, morfologii oraz trwałości mechanicznej powłok na bazie węgliku chromu wytworzonych metodą natrysku plazmowego z zastosowaniem obróbki przetopieniowej. Tego rodzaju powłoki poprawiają trwałość eksploatacyjną odlewów z żeliwa sferoidalnego, narażonych na działanie czynników agresywnych.

### 1. Materiał do badań i metodyka badań

Powłoki na bazie węgliku chromu  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr wykonano metodą natrysku plazmowego przy użyciu plazmotronu MIM 40 o mocy 1000 kW. Zastosowano proszek o składzie chemicznym: 80% ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$  z dodatkiem WC) +20% NiCr i średniej średnicy cząstek wynoszącej 800 nm. Podłożem metalowym do nanoszenia powłok było żeliwo sferoidalne o zawartości 80÷90% perlitu i 10÷20% ferrytu. W celu uzyskania silnie rozdrobionej struktury powłoki, zastosowano obróbkę przetopieniową powłoki po natryskiwaniu przy użyciu palnika acetylenowego. Próbkę o wymiarach 100x15x3 mm pobrano z odlewów łopatek do wentylatorów przemysłowych, na których powierzchnię naniesiono warstwy o grubości od 300-350  $\mu\text{m}$ .

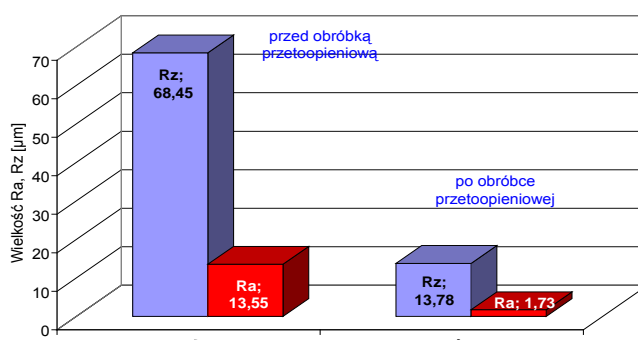
Strukturę oraz wybrane właściwości mechaniczne powłok węglkowych określano metodami mikroskopii optycznej i skaningowej wraz z mikroanalizą składu chemicznego, pomiarami mikrotwardości oraz odporności na cykliczne zmiany obciążenia.

Badania metalograficzne oraz pomiary mikrotwardości powłok ochronnych, a także podłoża metalowego przeprowadzono metodą Vickersa za pomocą mikrotwardościomierza Hanemanna, zamontowanego na mikroskopie Neophot 2 przy obciążeniu 100 G. Badano zgłady wykonane na przekrojach poprzecznych próbek normalnych do ich powierzchni.

W ramach eksperymentu wykonano pomiary chropowatości powierzchni powłok wytworzonych natryskiem plazmowym, również po ich przetopieniu. Ponadto, wykonano badania fraktograficzne powierzchni przełomów powłok uzyskanych w próbie zmęczeniowej (3-punktowe zginanie).

## 2. Wyniki badań i dyskusja

Powłoki na bazie węgla chromu  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$  naniesione metodą natrysku plazmowego bezpośrednio na podłoże z żeliwa sferoidalnego, zarówno bez, jak i po zastosowaniu obróbki przetopieniowej powłoki, wykazują zwartą budowę bez pęknięć i dobrą przyczepność do podłoża. Wskazuje to na korzystne warunki procesu nanoszenia, zapewniające odpowiednią adhezję powłoki do podłoża. Powłoki naniesione plazmowo bez zastosowania obróbki przetopieniowej charakteryzują się występowaniem spłaszczonych ziaren, typowych dla procesu nanoszenia plazmowego. Ponadto, cechuje je stosunkowo duża chropowatość powierzchni. Wartość parametru chropowatości  $R_a$  dla podłoża pokrytego powłoką wynosiła  $13,55 \mu\text{m}$ , natomiast przetopiona powłoka ma zdecydowanie mniejszą chropowatość powierzchni, wynoszącą  $1,73 \mu\text{m}$  (rys. 1). Mała wartość chropowatości jest bardzo korzystną cechą w przypadku elementów maszyn pracujących w warunkach narażenia na zużycie erozyjne.

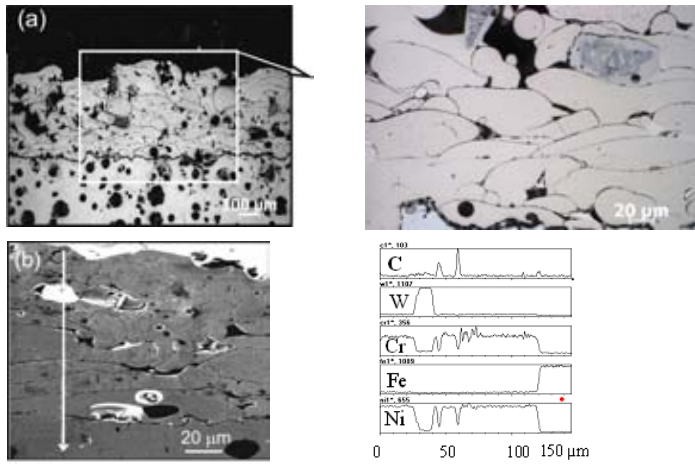


Rys. 1. Parametry chropowatości:  $R_a$  (średnie arytmetyczne odchylenia profilu od linii średniej),  $R_z$  (wysokość chropowatości)

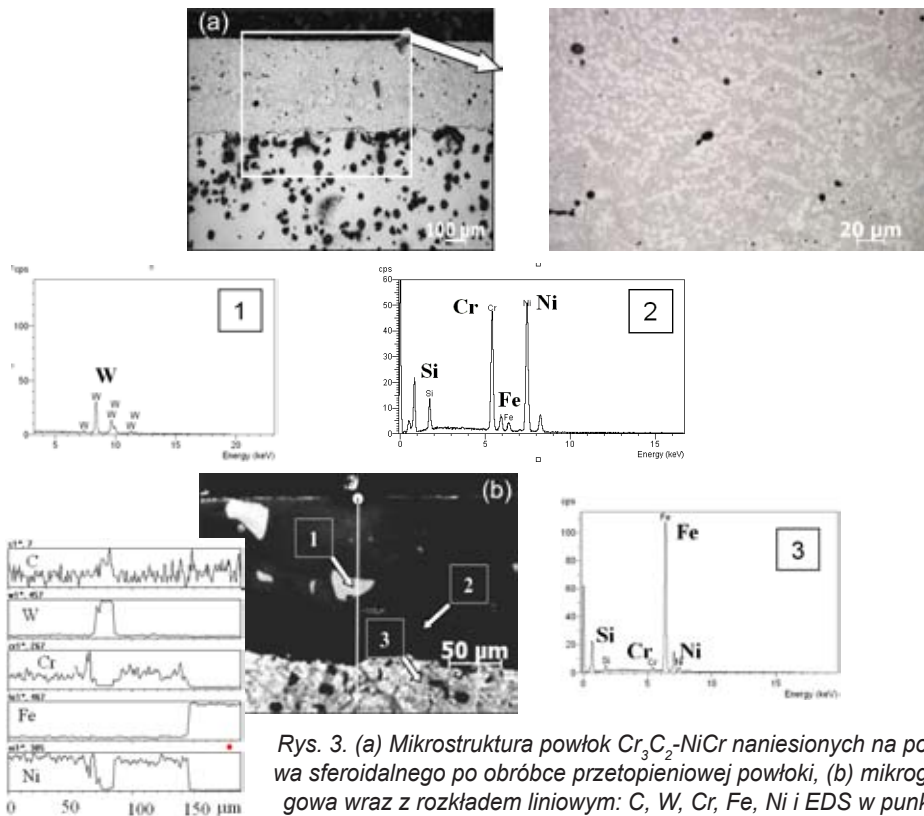
Fig. 1. Roughness parameters:  $R_a$  (the arithmetic average of the roughness profile deviation from the mean line),  $R_z$  (roughness height)

Badania strukturalne przeprowadzone za pomocą mikroskopii optycznej i skaningowej, ujawniły znaczące zmiany w budowie powłok po przetopieniu, wyrażające się ujednorodnieniem ich składu chemicznego połączonym z zanikiem cech typowych dla powłok nanoszonych plazmowo, tj. warstwowości budowy i porowatości (rys. 2, 3). Badania SEM ujawniły ponadto znaczne rozdrobnienie struktury w przetopionych powłokach (rys. 2b, 3b). Wyniki mikroanalizy rentgenowskiej przy zastosowaniu EDS wskazują, że powłoka ma strukturę wielofazowego roztworu stałego na bazie Ni i Cr z wydzieleniami węglików chromu i wolframu.

Mikrotwardość powłok, zarówno bez, jak i po zastosowaniu przetopienia powłoki kształtuje się na podobnym poziomie i wynosi ok.  $1000 \mu\text{HV}$  (rys. 4). W stosunku do mikrotwardości podłoża, mikrotwardość powłoki wzrosła 3-krotnie. W obszarze granicy rozdziału podłoże–powłoka wartości mikrotwardości mają mniejszą wartość niż w znacznej odległości od granicy rozdziału. Zróżnicowanie poziomu wartości mikrotwardości w powłoce związane jest z występowaniem typowej struktury po przetopieniu, tj. struktury mikrodendrytycznej.



Rys. 2. (a) Mikrostruktura powłok  $Cr_3C_2$ -NiCr naniesionych na podłoże z żeliwa sferoidalnego przed obróbką przetopieniową powłoki, (b) mikrografia skaningowa wraz z rozkładem liniowym: C, W, Cr, Fe, Ni  
 Fig. 2. (a) Microstructure of  $Cr_3C_2$ -NiCr coatings applied on ductile iron substrate before remelting; (b) scanning micrograph showing a linear distribution of C, W, Cr, Fe, Ni



Rys. 3. (a) Mikrostruktura powłok  $Cr_3C_2$ -NiCr naniesionych na podłoże z żeliwa sferoidalnego po obróbce przetopieniowej powłoki, (b) mikrografia skaningowa wraz z rozkładem liniowym: C, W, Cr, Fe, Ni i EDS w punktach 1, 2, 3  
 Fig. 3. (a) Microstructure of  $Cr_3C_2$ -NiCr coatings applied on ductile iron substrate after remelting; (b) scanning micrograph showing a linear distribution of C, W, Cr, Fe, Ni and EDS at points 1, 2, 3

Rys. 4. Mikrotwardość powłoki Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr naniesionej metodą natrysku plazmowegoFig. 4. Microhardness of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coating applied by plasma spraying

Badania trwałości zmęczeniowej próbek z naniesionymi powłokami Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr polegały na poddaniu ich zmiennemu obciążeniu o wartości mniejszej niż granica plastyczności, aż do ich zniszczenia. Próby prowadzono przy sterowaniu naprężeniem ( $\delta a = \text{const}$ ) oraz przy obciążeniu sinusoidalnie zmiennym. Wyniki przeprowadzonej próby zmęczeniowej metodą trójpunktowego zginania zostały umieszczone w tabeli 1.

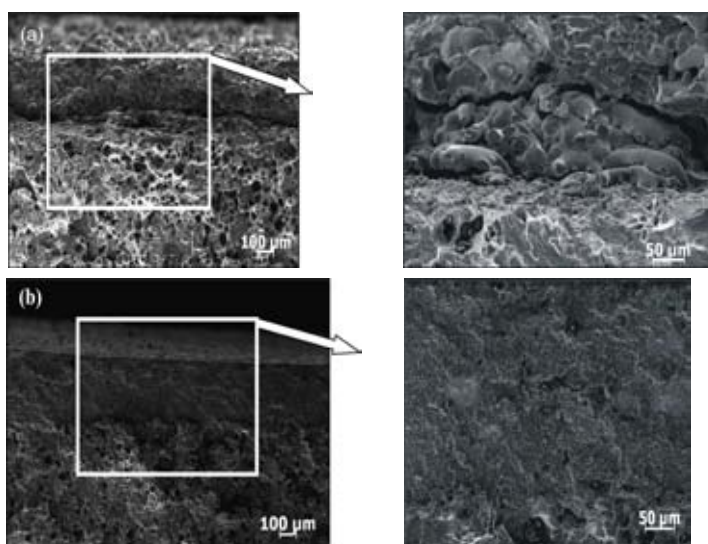
Warto zaznaczyć, że przetopienie powłok wytworzonych przez natrysk plazmowy powoduje zanik porów i innych defektów ich budowy, co w konsekwencji zwiększa adhezję powłoki do podłoża. Stąd też, ilość cykli powodująca zniszczenie próbek typu podłoże–powłoka po przetopieniu jest znacznie większa niż dla próbek bez obróbki przetopieniowej.

Tabela 1. Wyniki próby cyklicznego zginania

Table 1. The results of cyclic bending test

Rodzaj próbki	Ilość cykli (do złamania)	Parametry próby zmęczeniowej		
		Amplituda A, kN	Częstotliwość f, Hz	Siła F, kN
Bez obróbki przetopieniowej	27050 cykli	0,4	1	0,5
Z obróbką przetopieniową	29600 cykli			

Badania fraktograficzne powierzchni przelomów próbek po próbie zginania wskazują, że w próbkach przed obróbką przetopieniową pęknięcie występuje częściowo zarówno wzdłuż granicy połączenia jak i w powłoce (rys.5a). Natomiast w próbkach podłoże–powłoka po przetopieniu, pęknięcie przebiega w podłożu metalowym, w pobliżu granicy połączenia podłoża z powłoką (powłoka zostaje nienaruszona) (rys. 5b). Świadczy to o tym, że zastosowanie przetopienia powłoki powoduje wzrost odporności na pęknięcie, najprawdopodobniej w wyniku znacznego rozdrobnienia struktury powłoki i redukcji nieciągłości materiałowych.



Rys. 5. Morfologia powierzchni przelomu próbek typu podłoże-powłoka; a) przed obróbką przetopieniową powłoki, b) po obróbce przetopieniowej powłoki

Fig. 5. Morphology of specimen fracture surface of a substrate-substrate type: a) before remelting; b) after remelting

## Wnioski

W oparciu o przeprowadzone badania oraz dokonaną analizę wyników sformułowano następujące wnioski:

1. Zastosowanie obróbki przetopieniowej powłoki na bazie węgla  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr naniesionej metodą natrysku plazmowego powoduje dobrą przyczepność do żeliwa sferoidalnego, znaczne zmniejszenie chropowatości powierzchni powłoki oraz większą jej trwałość w warunkach cyklicznych zmian obciążenia, w porównaniu do powłok bez przetopienia.

Ponadto, twardość powłok po naniesieniu natryskem plazmowym oraz po przetopieniu jest porównywalna, przy czym w obydwu przypadkach występuje znaczny wzrost twardości powłoki w stosunku do podłoża.

2. Przetopienie materiału powłoki powoduje wystąpienie korzystnych zmian w budowie morfologicznej powłoki. Obserwuje się między innymi zmniejszenie porowatości w powłoce, wad mikro i makrostrukturalnych, ujednorodnienie składu chemicznego oraz zanik warstwowości jej budowy, a także silne rozdrobnienie struktury.
3. Powłoki na bazie węgla chromu wykonane metodą natrysku plazmowego z zastosowaniem przetopienia powinny stanowić skuteczną osłonę dla odlewów z żeliwa sferoidalnego, pracujących w warunkach dużego zapylenia i obciążeń cyklicznych.

## Podziękowanie

Pracę zrealizowano w ramach Działalności Statutowej Instytutu Odlewnictwa w roku 2007.

## Literatura

1. Klimpel A.: Napawanie i natryskiwanie cieplne, WNT, Warszawa 2000
2. Młynarczyk A., Jakubowski J.: Obróbka powierzchniowa i powłoki ochronne, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998
3. Irisawa T., Matsumoto H., Kishitake K., Tanaka T., Yamada O.: Thermal Cycling Life of Plasma Sprayed Alumina Coating on Cast Irons, Materials Science Forum, 2004, Vols. 455-456, pp 200-203
4. Hiroshi M., Jun'ichi T., Yoshio H., Tomoki T., Tetsu G., Shuhei N.: Recent Development of Thermal Plasma Materials Processing. Microstructure of  $Cr_3C_2$ -NiCr Sprayed Coatings Modified by Chromium Diffusion Treatment, Journal of the Japan Institute of Metals, 1999, Vol. 63, pp 126-134

*Recenzent: dr hab. inż. Andrzej Baliński, prof. AP*