



# 8<sup>th</sup> International Tribology Conference

Osma internacionalna konferencija o tribologiji  
Beograd, 8. - 10. oktobra 2003.

## ISPITIVANJE STRUKTURNIH I MEHANIČKIH OSOBINA PREVLAKA SA POVIŠENOM OTPORNOŠĆU NA HABANJE

Dr Mihailo MRDAK, dipl. ing., VZ Moma Stanojlović, Beograd, Srbija i Crna Gora,  
Dr Damir KAKAŠ, red. prof., Tehnički fakultet Novi Sad, Srbija i Crna Gora,  
Đuro POVIĆ, Kriotehnika, Pančevo, Srbija i Crna Gora

### Rezime

U radu su prikazani rezultati ispitivanja prevlaka dobijenih plazma sprejom koje su primenjene za značajno povećanje otpornosti na habanje površina čaura u papirnoj industriji. Prevlake su dobijene na bazi keramike  $Al_2O_3TiO_2$  i metalokarbida  $WC12Co$ . Pre ugradnje funkcionalnih delova izvršena su laboratorijska ispitivanja strukturnih i mehaničkih osobina primenjenih prevlaka.

## TESTING STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF COATINGS WITH INCREASED WEAR RESISTANCE

### Summary

The paper describes test results of plasma sprayed coatings applied for increasing wear resistance of sleeve surfaces in paper industry. The coatings were obtained on the basis of ceramics  $Al_2O_3TiO_2$  and carbide  $WC12Co$  powders. Prior to installation of functional parts, laboratory tests of structural and mechanical properties of applied coatings were performed.

### 1. UVOD

Plazma sprej predstavlja jednu od vodećih tehnologija za proizvodnju prevlaka sa povišenom otpornošću na habanje. Prevlake  $Al_2O_3TiO_2$  su otporne na eroziju, kavitaciju, koroziju i habanje do  $850^\circ C$  /1/. Široku primenu su našla za zaštitu delova u industriji papira, tekstila i plastike /1, 2/. Prevlake na bazi  $WC12Co$  su otporne na habanje, abraziju, eroziju, koroziju i kavitaciju do  $480^\circ C$  /1,2/. Zbog visoke tvrdoće WC prevlaka imaju veliku primenu za zaštitu vazduhoplovnih delova, pumpi, alata, poljoprivrednih mašina i dr. Moguće prednosti korišćenja prevlaka su velike i obuhvataju produženje resursa osnovnom materijalu, povećavajući pouzdanost rada uz smanjenje troškova eksploatacije /5/. Na resurs prevlaka utiču

karakteristike deponovanog materijala, njegov faznih sastav, udeo pora i nestopljenih čestica, koheziona i adheziona čvrstoća /2/. Ove osobine su usko povezane sa uslovima depozicije i znatno poboljšanje može da se očekuje sa optimizacijom parametara depozicije. Danas se proizvode prahovi  $Al_2O_3TiO_2$  sa različitim udelima  $TiO_2$  i  $WCCo$  sa različitim udelima  $Co$  /2/. Sve ih treba razmotriti kao mogućnost za optimizaciju kvaliteta prevlaka za različite primene. Ovaj rad je posvećen ispitivanju strukturnih i mehaničkih prevlaka izrađenih od prahova  $Al_2O_3TiO_2$  i  $WC12Co$  koji se razlikuju po hemijskom sastavu i tehnici izrade. Cilj je izrada kvalitetnih prevlaka koje rade u uslovima intenzivnog uticaja filcanog prstena i agresivnog dejstva celulozne mase.

## 2. TEORIJSKA RAZMATRANJA

Aluminijumoksid je jedan od najvažnijih oksida koji se koristi kao osnovna komponenta za izradu prevlaka otpornih na habanje. U cilju povećanja žilavosti prevlake i čvrstoće spoja, oksidu  $Al_2O_3$  se dodaje oksid  $TiO_2$ . U zavisnosti od eksploatacionih uslova sadržaj oksida  $TiO_2$  u prevlaci je od 3-40% /1,2/. Visok energetski nivo plazme uzrokuje razlaganje oksida  $TiO_2$  (rutil) koji je u ovom stehiometrijskom odnosu bele boje.

Deponovani oksid  $TiO_{1,95}$  je crne boje i uvek je prisutan u većoj količini u prevlaci, zbog čega prevlaka ima mikrotvrdoću od 1000-1100  $HV_{0,3}$  /1,2/. Izuzetno visoka temperatura plazme uzrokuje veći gubitak kiseonika i nepoželjno prisustvo oksida  $TiO_{1,5}$  i  $TiO_{1,0}$  koji umanjuju žilavost prevlake i otpornost na habanje /1,2/. Slična je situacija i sa monokarbidom WC koji se razlaže na visokim temperaturama. Razlaganje karbida WC je nepotpuno zbog kratkog zadržavanja čestica praha u plazma mlazu. Zavisno od toplotne razmene plazma mlaza sa prahom, dužine boravka praha u plazmi, veličine zrna karbida WC i sadržaja Co, prisutno je više ili manje razlaganje karbida /1,2/. Gubitak ugljenika se takođe može dogoditi sa dodatkom vodonika kao sekundarnog gasa. Zbog ovoga, mikrotvrdoća prevlake je od 800-1300  $HV_{0,3}$  pošto sastav prevlake dosta odstupa od polaznog sastava praha /2/. U prevlaci je pored karbida WC i  $W_2C$  prisutan kompleksni karbid  $W_xCo_yC$  čija je mikrotvrdoća u opsegu od 600-1300  $HV_{0,3}$  /2/. U zavisnosti od parametara depozicije, u prevlaci se može pojaviti W čija je mikrotvrdoća oko 400  $HV_{0,3}$  i Co sa tvrdoćom ispod 200  $HV_{0,3}$  /2/. Da bi se razumeli metalurški procesi kada se deponuje karbid WC, važno je poznavati dijagram stanja konstituenta WC. Sistem sadrži poznate heksagonalne karbide WC,  $W_2C$  i visokotemperaturnu fazu  $\beta$ -WC koji ima kubnu strukturu i široko područje stabilnosti. Karbid WC sa heksagonalnom strukturom se topi na 2795°C i sa W na 2710°C pravi eutektikum /2/. Stabilnost WC se smanjuje sa temperaturom i na 1300 C počinje da se razlaže na W i heksagonalni WC koji ima veoma usku oblast stabilnosti. Za deponovanje se koristi monokarbid WC sa kubnom strukturom, a kao vezivno sredstvo se koriste Co ili Ni koji daju žilavost i otpornost na koroziju prevlaci.

## 3. EKSPERIMENT

Pri izradi tvrdih prevlaka korišćeno je iskustvo renomiranih firmi (Rolls Royce, Snecma, Pratt Whitney i dr.) koje su verifikovale prahove za izradu prevlaka otpornih na habanje. U eksperimen-

tu, korišćeni su prah  $Al_2O_3TiO_2$  proizveden tehnikom topljenja i naknadnim mlevenjem očvrstnutig rastopa i prah  $WC12Co$  proizveden tehnikom sinterovanja WC i Co. U tabeli 1. je dat hemijski sastav prahova, temperature topljenja i raspon granulacije čestica prahova. Depozicija prahova izvršena je na ispitnim epruvetama, koje su prethodno ohrapavljene belim plemenitim elektrokorundom granulacije 0.7 – 1.5 mm.

**Tabela 1.** Sastav, temperature topljenja i raspon granulacije čestica za prahove korišćene u eksperimentu

$Al_2O_3TiO_2$	$WC12Co$
Sastav: $Al_2O_3$ 97%, $TiO_2$ 3%	Sastav: WC 88%, Co 12%
Tem. toplj.: 2000°C	T. toplj.: 2777°C WC 1445°C Co
Raspon granulacije: 12-40 $\mu m$	Raspon granulacije: 45-75 $\mu m$

Cilj hrapavljenja je aktiviranje površine substrata uklanjanjem tankog oksidnog sloja čineći je reaktivnom. Depozicija je izvršena plazma gorionikom SG-100 na atmosferskom pritisku (prečnika anode 8 mm) sa mešavinom Ar-He kao plazma gasova sa tri različita nivoa snage. Prevlake su formirane sa debljinama od 0.15-0.2 mm. Pri izboru parametara depozicije strogo se vodilo računa o temperaturama topljenja pojedinih komponenti, fazne stabilnosti konstituenata i njihovom ponašanju u viskoenergetskom plazma mlazu. Zbog ovoga menjana je jačina električne struje, koja je u direktnoj vezi sa temperaturom i entalpijom plazma mlaza.

Pri depoziciji obe prevlake, na svim uzorcima parametri procesa su održavani konstantnim osim jačine električne struje: kod prve grupe uzoraka jačina električne struje je bila 700A, kod druge grupe uzoraka 800A, a kod treće grupe uzoraka 900A. Ostali parametri depozicije za prevlaku  $Al_2O_3TiO_2$  su imali sledeće vrednosti: protok primarnog gasa (Ar) 47 litara u minuti, protok sekundarnog gasa (He) 15 litara u minuti, protok nosećeg gasa (Ar) 6 litara u minuti. Parametri depozicije za prevlaku  $WC12Co$  su imali sledeće vrednosti: protok primarnog gasa (Ar) 47 litara u minuti, protok sekundarnog gasa (He) 35 litara u minuti i protok nosećeg gasa (Ar) 8 litara u minuti.

Za merenje tvrdoće, ispitivanje čvrstoće spoja i procenu strukture prevlake korišćeni su uzorci napravljeni od čelika AMS 5504 po

standardu PWA (Pratt Whitney) (naš ekvivalent Č.4172). Dimenzije uzoraka za merenje tvrdoće i procenu strukture bile su 70x20x1.5 mm, dok su se za ispitivanje čvrstoće spoja koristili uzorci dimenzija  $\phi 25 \times 50$  mm. Karakterizacija prevlaka vršena je merenjem mikrotvrdoće metodom HV<sub>0.3</sub>.

Merenje je izvršeno u pravcu duž lamela u sredini i na krajevima uzoraka. Izvršeno je pet očitavanja vrednosti mikrotvrdoće. Zbog promene faznog sastava prahova i udela pora u tabeli 2. su

prikazane minimalne i maksimalne vrednosti mikrotvrdoće.

#### 4. REZULTATI I DISKUSIJA

U tabeli 2 su date vrednosti za mikrotvrdoću i čvrstoću spoja iz kojih se vidi da su najbolji rezultati dobijeni za prevlaku Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>TiO<sub>2</sub> koja je deponovana sa jačinom električne struje 900A i snage uređaja 36KW i za prevlaku WC12Co koja je deponovana sa jačinom električne struje 800A i snage uređaja 28KW.

**Tabela 2.** Vrednosti tvrdoće i čvrstoće spoja prevlaka

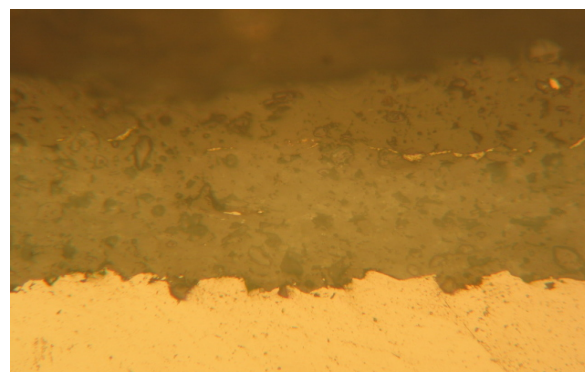
Grupa uzoraka	Prevlaka Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> TiO <sub>2</sub>		Prevlaka WC12Co	
	Mikrotvrdoća HV <sub>0.3</sub>	Čvrstoća spoja [MPa]	Mikrotvrdoća HV <sub>0.3</sub>	Čvrstoća spoja [MPa]
I	710-990	18.2	763-1232	41.4
II	926-1145	27.6	890-1390	55.0
III	1006-1390	39.7	454-1238	34.5

Za prevlaku Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>TiO<sub>2</sub> vrednosti mikrotvrdoće 1006-1390 HV<sub>0.3</sub> su u granicama propisanim od proizvođača praha. Ove vrednosti ukazuju da je prevlaka deponovana sa optimalnim parametrima depozicije. Za istu prevlaku se dobila visoka vrednost čvrstoće spoja 39.7 MPa, što potvrđuje da je atezija prevlake sa substratom izvanredna kao i koheziona čvrstoća prevlake. Karakter razaranja prevlake je bio čisto ateziono na interfejsu prevlaka-substrat, za razliku od prevlake deponovane sa jačinom električne struje 700A kod koje je razaranje bilo koheziono, tj. kroz prevlaku.

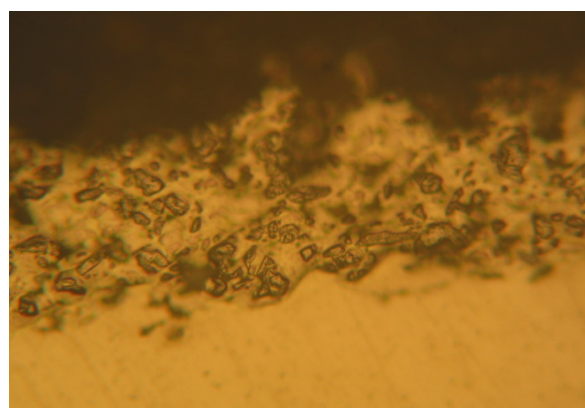
Najveće vrednosti mikrotvrdoće 890-1390 HV<sub>0.3</sub> su se dobile za prevlaku WC12Co koja je deponovana sa snagom napajanja uređaja od 28KW. Izmerene vrednosti su u propisanim granicama po standardu PWA (53-2) (min 700 HV<sub>0.3</sub>). Za istu prevlaku izmerena vrednost čvrstoće spoja 55.0 MPa je iznad vrednosti propisane standardom PWA (53-2) (45.5 MPa). Karakter razaranja je bio ateziono na interfejsu prevlaka-substrat.

Visoke vrednosti mikrotvrdoće i čvrstoće spoja za obe prevlake prvi su pokazatelji da su udeli pora i nestopljenih čestica ispod kritičnih vrednosti propisanih standardom PWA. Strukture prevlaka Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>TiO<sub>2</sub> i WC12Co deponovanih sa optimalnim parametrima su prikazani na slici 2a i 2b. Kvalitativna analiza prevlaka ukazuje da se dobila uniformnost keramičkih i metalokarbidnih

slojeva na substratima. Na interfejsu nisu uočene prskotine ni odvajanje slojeva sa substrata.



a) 400x



b) 400x

Slika 2: a) Mikrostruktura prevlake Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>TiO<sub>2</sub>  
b) Mikrostruktura prevlake WC12Co

Takođe nisu uočene prskotine kroz depnovane slojeve. U keramičkoj prevlaci udeo pora i nestopljenih čestica je ispod 5%, a u metalokarbidnoj ispod 15% propisan standardom PWA (53-2) (15%).

Na prikazanoj slici 2a se jasno uočavaju tamna polja oksida  $TiO_{1.95}$  koji je ravomerno raspoređen u prevlaci i bele lamele nerazgrađenog oksida  $TiO_2$ .

U prevlaci WC12Co su jasno prepoznatljiva zrna WC uglastog oblika raspoređena u osnovi Co koja su prikazana na mikro-fotografiji 2b.

## 5. ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata prikazanih u ovom radu može se zaključiti da prevlake  $Al_2O_3TiO_2$  i WC12Co izrađene plazma sprejom imaju veoma dobra strukturno mehanička svojstva koja se zahtevaju od tvrdih prevlaka otpornih na habanje, Ovi rezultati su potvrđeni u eksploataciji čaura izrađenih od čelika Č.4171 koje su izložene abrazivnom habanju filcanog prstena i celulozne mase u procesu proizvodnje papira. Primenom tvrde prevlake  $Al_2O_3TiO_2$  otpornost čaura je

uvećana 6 puta, a primenom prevlake tipa WC12Co trajnost čaura je uvećana 9 puta.

## LITERATURA

- [1] Teaching plasma spraying, Introducing plasma spray techniques, 5610 Wohlen Switzerland.
- [2] P. Fauchais, Plasma Spray Coating, Laboratoire de Thermodynamique Université de Limoges, Limoges, France.
- [3] "Turbojet engine-standard practices manuel" Part No 58 5005, Pratt-Whitney.
- [4] D. Golubović, M. Mrdak, M. Simović, Tribološki efekti implementacije specijalnih čaura keramikom, YUTRIB '91, Kragujevac, 1991.
- [5] D. Golubović, R. Ječmenica, M. Mrdak, M. Simović, Prilog razvoju metalokeramičkih elemenata implementacijom keramike plazma tehnologijom, YUTRIB '93, Kragujevac, 1993.