

KARAKTERIZACIJA WCCo/NiCrBSi PREVLAKE OTPORNE NA HABANJE

Mrdak R. *Mihailo*, IMTEL – Institut za mikrotalasnu tehniku
i elektroniku, Beograd

UDC: 544.023.22
623.746.174-7

Sažetak:

U radu su analizirani mikrostruktura, mehaničke i tribološke karakteristike (APS) prevlake WCCoNiCrBSi koja se primenjuje za reparaciju cilindara nosne noge helikoptera. Tribološka procena prevlake određena je primenom tribometra blok-na-prstenu. Spregnuti materijal-blokovi sa prevlakom ispitani su na okaljenom i poboljšanom čeličnom prstenu. Za ukupno odstojanje od 3000 m bili su konstantna brzina 0,5 m/s i opterećenje 400 N. Prednost primene ove prevlake je u značajnom produženju resursa delova uz smanjenje troškova eksploatacije i održavanja.

Ključne reči: atmosferski plazma spreng (APS), mikrostruktura, mikro tvrdoća, čvrstoća spoja, interfejs, habanje klizanjem, frikcija.

Uvod

Plazma-sprej postupak je jedan od postupaka termičkog nanošenja prevlaka procesom raspršivanja koji ima široku primenu za dobijanje prevlaka sa povećanom otpornošću na habanje. Tokom postupka nanošenja neke, uglavnom krupnije čestice praha se ne istope u potpunosti, pre svega zbog kratkog vremena zadržavanja u plazmi. Oksidacija čestica praha, a samim tim i prevlake, takođe je prisutna s obzirom na to da je u pitanju postupak koji se obavlja u atmosferskim uslovima. Step en oksidacije i količina oksida u prevlaci određena je kinetičkom energijom i temperaturom čestica praha. Ove pojave prouzrokuju udeo pora u dobijenim prevlakama i do 20% [1, 2]. Korišćenjem poboljšanih uređaja za nanošenje prevlaka moguće je dobiti prevlake sa udelom pora ispod 3%, a sve radi povećanja homogenosti prevlake.

Različite vrste prahova legure NiCrBSi koriste se, u kombinaciji sa karbidima i metalima, za zaštitu i reparaciju delova od prekomernog habanja. Kombinacijom prahova WCCo i NiCrBSi i termičkim procesom raspršivanja u atmosferskim uslovima proizvode se prevlake koje se primenjuju za zaštitu metalnih delova izloženih habanju, abraziji, eroziji i koroziji do 540°C.

Prevlaka tipa WCCoNiCrBSi nastala je kao rezultat poboljšanja triboloških karakteristika prevlake tipa WC12Co. Prah tipa WCCo/NiCrBSi sastoji se od 50% finog sinterovanog praha WC-Co pomešanog sa finim prahom legure NiCrBSi [3, 4]. Leguri NiCr dodat je B i Si koji smanjuju temperaturu topljenja legure sa 1399°C na 1025°C [2]. Niža temperatura pretapanja legure pogodna je zbog osnove i zbog WC koji se ne pretapa i ne sme razgraditi u procesu pretapanja prevlake. Ovaj tip praha je specijalno razvijen za izradu prevlaka velike kohezije i adhezije čvrstoće koje su veoma guste, tvrde i glatke. Spada u grupu od nekoliko prevlaka koje su razvijene za pretapanje prevlake i difuziono spajanje prevlake sa osnovom u normalnoj atmosferi. Slojevi legure NiCrBSi izuzetno su otporni na habanje zbog malog koeficijenta trenja.

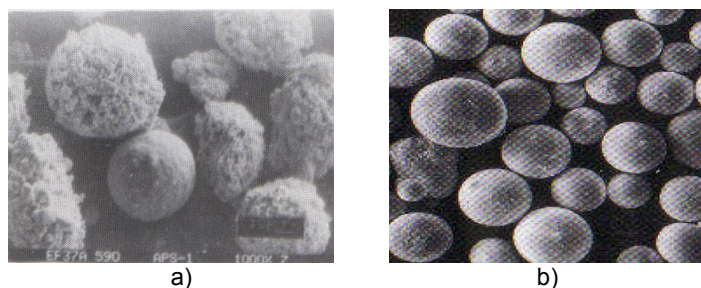
U mikrostrukturi slojeva WCCo prisutni su mikrokonstituenti tipa WC, W_2C i W_3C_3Co uglastog oblika koji su ravnomerno raspoređeni u osnovi legure WCo mikrotvrdoće od 1000 HV_{0,3} [5]. U slojevima NiCrBSi su, uglavnom, prisutni precipitati tamne boje sa visokom koncentracijom hroma, kao što su hrom karbidi (Cr_7C_3 ako je C ≈ 0,6% i Cr_3C_2 ako je C > 0,8% i boridi nikla i hroma. Osnovna faza je čvrsti rastvor nikla (γ -Ni 71,9%), koji ima mali udeo Cr, nizak sadržaj Fe i visoku koncentraciju Si [2, 6, 7].

Za primene prevlake gde se zahteva veća otpornost na mehanička opterećenja radi se pretapanje i difuziono spajanje slojeva sa osnovom. Pretapanjem prevlake iznad 1025°C ostvaruje se metalurška veza između slojeva NiCrBSi i površine osnove. Gustina prevlake se povećava pošto nestaju mikropore. Pretapanjem slojeva ne menja se hemijski sastav prevlake. Razlika u strukturi odnosi se samo na morfologiju, veličinu i procenat prisutnih konstituenta [7]. Minimalna preporučena debljina prevlake za pretapanje je 0,3 mm. Maksimalna debljina slojeva koja može da se pretapa je od 0,5 mm do 0,6 mm [3]. Za prevlake velike debljine radi se predgrevanje osnove na temperaturi od 200°C, koja se u procesu nanošenja prevlake održava u opsegu od 200°C do 300°C. Male površine osnove ne treba predgrevati. Za vreme predgrevanja odstojanje osnove treba da bude od 100 mm do 125 mm. Pretapanje prevlake može da se radi na više načina. Jedan od načina je primena oksiacetilenskog plamena u peći za termičku obradu, indukcijom zagrevanjem uz pomoć induktora, a u poslednje vreme laserom [1]. Najkvalitetniji način pretapanja prevlake obezbeđuje laser. Karakteristike pretopljenih slojeva NiCrBSi zavise od ugla pretapanja. D. Felgueroso i drugi autori ustanovili su da najbolje karakteristike imaju slojevi pretopljeni pod uglom od 45°. Prevlake imaju sitnozrnu strukturu i veoma su guste i bez defekata. Najviše vrednosti habanja ustanovili su u prevlakama pretopljenim pod uglom od 90° [1]. Isti autori ustanovili su da se sa pretapanjem slojeva smanjuje prosečna vrednost hrapavost prevlake sa $R_a = 3,39 \mu m$ na $R_a = 0,56 \mu m$, kao i debljina prevlake sa 0,4 mm na 0,36 mm [1]. Pre primene prevlaka neophodno je ispitati mikrostrukturne, mehaničke karakteristike prevlake i otpornosti na habanje u uslovima klizanja sa podmazivanjem ili bez podmazivanja.

Glavni cilj rada bio je karakterizacija strukturnih, mehaničkih i tribo-loških osobina prevlake WCCoNiCrBSi namenjene za reparaciju kliznih površina mašinskih delova u remontu vazduhoplova.

Detalji eksperimenta i materijal

Za eksperiment je korišćen prah Metco 43F koji je smeša prahova WC12Co i NiCrBSi u odnosu 50% WC12Co i 50% NiCrBSi sa rasponom granulacije čestica praha od 15 do 90 μm . Sadržaj legirajućih elemenata na ukupnu količinu praha iznosi: 50% WC12Co; 33% Ni; 9% Cr; 3,5% Fe; 2,0% Si; 2,0% B; 0,5% C. Temperature topljenja komponenti prahova su: $2777^\circ\text{C} \rightarrow \text{WC}$, $1445^\circ\text{C} \rightarrow \text{Co}$ i $1025^\circ\text{C} \rightarrow \text{NiCrBSi}$. Prah WC12Co je izrađen tehnikom sinterovanja finih čestica karbida volframa i kobalta. Čestice praha NiCrBSi izrađene su tehnikom topljenja i atomizacijom tečnog rastopa inertnim gasom. Na slici 1a) prikazana je morfologija praha WCCo, a na slici 1b) morfologija praha NiCrBSi. Osnove na koje su deponovane prevlake bile su od čelika Č.4171 (X15Cr13 EN10027) u termički neobrađenom stanju. Proces nanošenja prevlake na površinu osnove urađen je termičkim postupkom raspršivanja na atmosferskom pritisku. Površina osnove na koju se nanosi prevlaka ohrapavljena je belim plemenitim elektrokorundom granulacije od 0,7 mm do 1,5 mm. Radi boljeg vezivanja slojeva prevlake za površinu osnove pre nanošenja prevlake izvršeno je predgrevanje osnove na temperaturi od 200°C . Pri izboru parametara nanošenja slojeva prevlake vodilo se računa o temperaturama topljenja prahova, faznoj stabilnosti konstituenata i njihovom ponašanju u plazmi. Jačina električne struje bila je 500 A i napon luka 64 V. Nanošenje prevlake izvršeno je plazma-pištoljem tipa F4-MB, firme Sulzer Metco sa mešavinom plazma gasova Ar i H_2 . Ostali parametri imali su sledeće vrednosti: protok primarnog gasa (Ar) 47 l/min, protok sekundarnog gasa (H_2) 12 l/min, protok nosećeg gasa (Ar) 4 l/min, protok praha 30 g/min i odstojanje osnove 125 mm od otvora anode. Prevlake su formirane sa debljinama od 0,3 mm do 0,35 mm.

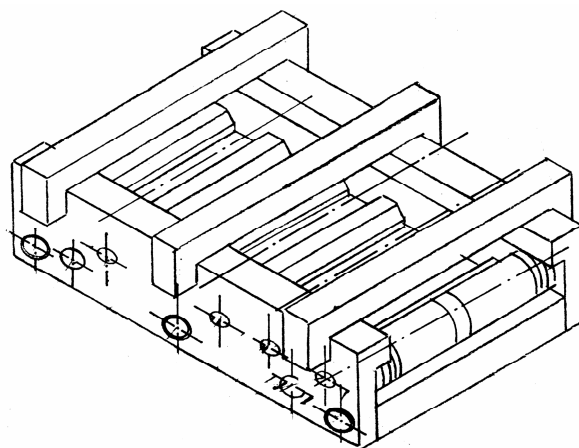


Slika 1 – Morfologija prahova a) WCCo i b) NiCrBSi.
Figure 1 – Powder morphology a) WCCo i b) NiCrBSi

Ispitivanje mikrotvrdoće, čvrstoće spoja i mikrostrukture

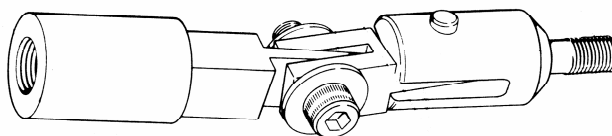
Na poprečnom preseku uzoraka ispitana je mikrotvrdoća slojeva prevlaka. Uzorci su pripremljeni standardnom metodom zatapanja, brušenja i poliranja. Po standardu Pratt & Whitney za ispitivanje mikrotvrdoće slojeva koristila se skala Vickers sa opterećenjem od 300 g. Merenje je urađeno u pravcu duž slojeva WC12Co i slojeva NiCrBSi na krajevima i u sredini uzoraka.

Ispitivanje čvrstoće spoja između prevlake i osnove je metoda ispitivanja zatezanjem na kidanje. Uzorci za merenje čvrstoće spoja izrađeni su po standardu PWA (Pratt Whitney) od materijala AMS 5504 (X15Cr13 EN10027). Centriranje i lepljenje uzoraka urađeno je u alatu prikazanom na slici 2.



Slika 2 – Alat za lepljenje uzoraka
Figure 2 – Tool for gluing specimens

Za ispitivanje uzoraka zatezanjem na kidanje koristili su se univerzalni adapteri koji su tako konstruisani da u toku ispitivanja obezbeđuju eliminisanje sile na smicanje. Jedan univerzalni adapter prikazan je na slici 3 [8].



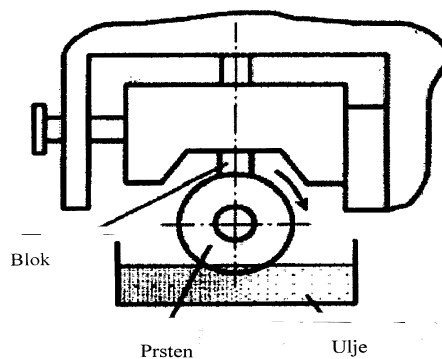
Slika 3 – Univerzalni adapter za uzorke
Figure 3 – Universal adapter for specimens

Ispitivanje epruveta urađeno je na sobnoj temperaturi sa brzinom kidanja od 1 mm/60 s [8]. Koristilo se pet epruveta za ispitivanje, a dobijene vrednosti su usrednjene.

Ispitivanje mikrostrukture slojeva urađeno je tehnikom svetlosne mikroskopije sa uvećanjem od 400x. Za mikrostrukturnu analizu slojeva uzorci su obrušeni i ispolirani do ogledala. Pošto prevlaka nije pretapana nije rađeno nagrizanje uzoraka.

Tribološka ispitivanja

Tribološka ispitivanja urađena su na tribometru blok-na-prstenu (slika 4). Ispitivanje je rađeno u uslovima klizanja podmazivanjem sa mazivom tipa TPD-95 na sobnoj temperaturi prema standardu ASTM G77. Blok sa prevlakom ispitan je na okaljnom i poboljšanom prstenu od čelika Č.1731 (ISO C60E4), sa spoljašnjim prečnikom Φ 45,2 mm i tvrdoćom 46–48 HRC. Hrapavost prevlake bila je $Ra = 0,5 \mu\text{m}$.



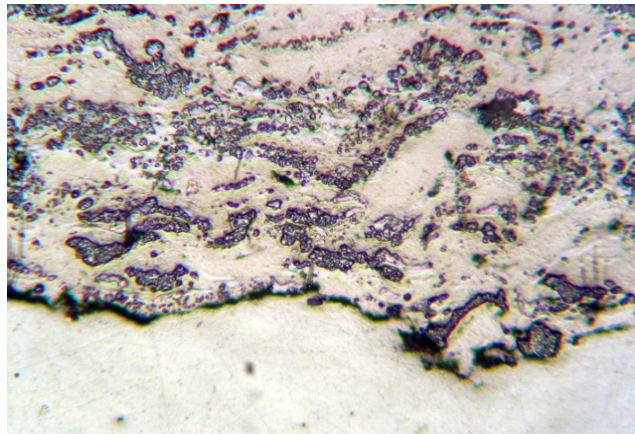
Slika 4 – Šematski dijagram tribometra blok –na–prstenu
Figure 4 – Schematic diagram of a pin – on – ring tribometer

Opterećenje je bilo konstantno od 400 N, kao i brzina ispitivanja od 0,5 m/s. Rađeno je pet merenja. Svaki uzorak je pojedinačno ispitan na dužini klizanja od 3000 m. Kao što se može videti sa slike, prsten je urođen u posudu sa uljem za podmazivanje.

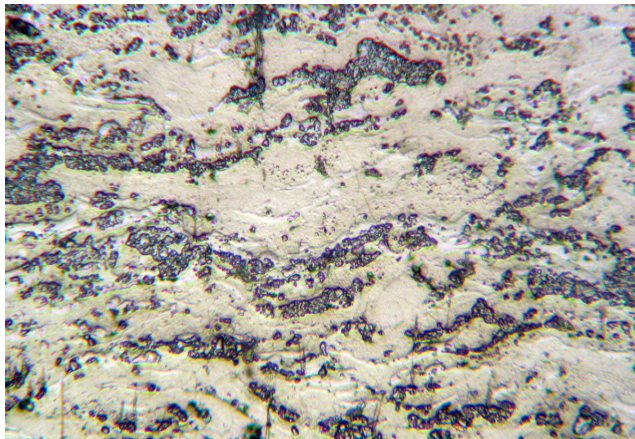
Mikrostruktura prevlake, mikrotvrdoće i čvrstoća spoja

Na slici 5a) i 5b) prikazane su mikrostrukture slojeva prevlake WCCo-NiCrBSi na poprečnom preseku uzorka. Na mikrofotografijama u prevlakama vide se uniformni slojevi metalokarbida WCCo i legure NiCrBSi. Slika

5a) prikazuje interfejs između osnove i prevlake gde se jasno vidi granica. Na interfejsu nisu prisutne čestice Al_2O_3 od hrapavljenja. Duž granice interfejs/prevlaka nisu prisutne makro i mikro- prskotine. Veza prevlake sa osnovom je neprekidna bez odvajanja slojeva prevlake sa osnove. Na slici 5b) ne uočavaju se mikro i makro prskotine kroz slojeve prevlake. Struktura prevlake je slojevita i lamelarna. U slojevima nisu prisutne nestopljene čestice praha i mikroporoznost. Slojevi su gusti i homogeni.



a) 400x

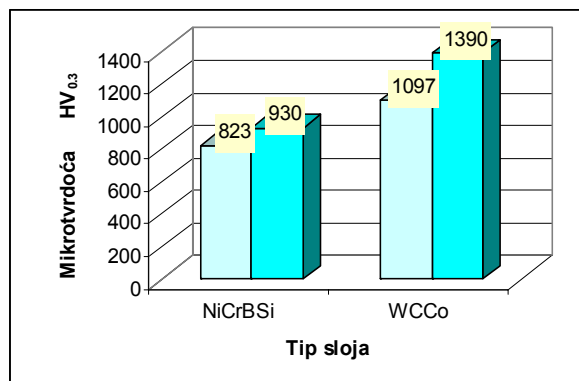


b) 400x

Slika 5 – a) Mikrostruktura prevlaka /substrat
b) Mikrostruktura prevlake WCoNiCrBSi.

Figure 5 – a) Coatings/ substrate microstructure
b) WCoNiCrBSi. coating microstructure

U slojevima prevlake WCCo uočavaju se tamne čestice faza volfram-karbida tipa WC, W_2C i W_3C_3Co uglastih i nepravilnih oblika različite veličine, koji su smešteni između slojeva legure NiCrBSi koji su svetlije boje. Mikrokonstituenti WC su ravnomerno raspoređeni u slojevima tipa WCCo. Osnovu slojeva legure NiCrBSi sačinjava čvrsti rastvor hroma u niklu γ -Ni(Cr) u kojoj su prisutne dispergovane faze karboborida, borida, i silicida. U slojevima legure NiCrBSi uočavaju se fini precipitati borida nikla bele boje. Fini precipitati borida nikla formiraju se u slojevima legure NiCrBSi taloženjem za vreme brzog hlađenja čestica praha. Pošto su čestice WC pomešane sa česticama NiCrBSi i u slojevima WCCo se uočava faza nikalborida bele boje, što ukazuje da je u procesu nanošenja prevlake jednim delom došlo do mešanja čestica praha WCCo sa česticama praha NiCrBSi, ali ne i do legiranja zbog velike razlike u temperaturama topljenja pojedinih faza. Na slici 6. dijagramski su prikazane vrednosti mikrotvrdoće slojeva WCCo i slojeva NiCrBSi. Slojevi tipa WCCo imaju vrednosti mikrotvrdoće u dosta uskom rasponu od 1097 do 1390HV_{0,3} zbog visokog sadržaja mikrokonstituenta WC i velike gustine i homogenosti slojeva.



Slika 6 – Mikrotvrdoća WCCo i NiCrBSi slojeva

Figure 6 – Microhardness of WCCo and NiCrBSi layers

U slojevima tipa NiCrBSi takođe su izmerene vrednosti sa uskom raspedelom mikrotvrdoće od 823 do 930HV_{0,3}, što ukazuje na to da su slojevi dosta homogeni i gusti. Visoke vrednosti mikrotvrdoće slojeva ukazuju na dobru istopljenost čestica praha, međulamelarno vezivanje u prevlaci, kao i dobro vezivanje prevlake za osnovu. Vrednosti adhezione i kohezione čvrstoće slojeva su u direktnoj vezi sa udelima nestopljenih čestica i pora. Slojevi su pokazali vrednosti čvrstoće spoja od 59 N/mm² koja je dosta visoka zbog predgrevanja supstrata i dobre istopljenosti praha. Mehanizam razaranja bio je adhezioni na interfejsu supstrat/prevlaka.

Tribološka svojstva

Za veći nivo sigurnosti u ocenjivanju ispitnih rezultata ponovljeno je pet triboloških ispitivanja prevlake WCCoNiCrBSi. Dve krajnje vrednosti nisu se uzimale u proceduri ocene dinamičkog koeficijenta trenja i habanja slojeva prevlake. Dinamički koeficijent trenja prevlaka kao funkcija dužine klizanja za konstantnu brzinu i opterećenje prikazani su u tabeli 1. Takođe, merena je i temperatura maziva za svako ispitivanje. Temperatura maziva je rasla za vreme ispitivanja, ali nakon nekog perioda se ustalila i nije prelazila 48°C. Na osnovu dobijenih rezultata može se ustanoviti da dinamički koeficijent trenja do 1500 m ima vrednosti od $\mu = 0,122-0,124$, da bi se nakon 2500 m ustalio i imao vrednost od $\mu = 0,1-0,11$. Rezultati dinamičkog koeficijenta trenja za tri uzorka pokazuju dobru reproduktivnost. Rezultati ispitivanja habanja slojeva prevlake, tj. gubitak mase materijala prevlake za tri uzorka bio je: $\Delta m_b = 0,11$ mg, $\Delta m_b = 0,11$ mg i $\Delta m_b = 0,13$ mg. Neznatno veća vrednost gubitka mase prevlake trećeg uzorka je posledica osetljivosti merenja mase na petu decimalu.

Rezultati triboloških ispitivanja

Tabela 1

Results of tribological testings

Table 1

Usl. ispit.	Par. ispit.	Metco 34F	Uz.
400 N 0,5 m/s 3000 m	Δm_B (mg)	0,11	1
	μ	0,124 (500–1500 m) 0,111(posl.2500 m)	
	$T_{maz.}$ (°C)	25,5–42,1	
400 N 0,5 m/s 3000 m	Δm_B (mg)	0,11	2
	μ	0,122(500–1500 m) 0,110(posl.2500 m)	
	$T_{maz.}$ °C)	25–41,6	
400 N 0,5 m/s 3000 m	Δm_B (mg)	0,13	3
	μ	0,123(500–1500 m) 0,110(posl. 2500 m)	
	$T_{maz.}$ (°C)	38,2–48,0	

Zaključak

Prevlaka WCCoNiCrBSi naneta je na čelične osnove termičkim postupkom raspršivanja na atmosferskom pritisku (APS) sa optimalnim parametrima depozicije i ispitana su i analizirana njena struktura, mehanička i tribološka svojstva.

Struktura prevlake je lamelarna i slojevita, što je tipično za ovu vrstu prevlake. U strukturi nisu prisutne pore i nestopljene čestice. Osnovu slojeva WCCo čine volfram-karbid, a slojeva NiCrBSi čvrsti rastvor γ -Ni sa sadržajem hrom-karbida, hrom-borida i nikal-borida.

Čvrstoća spoja između prevlake i površine osnove je adheziona i veoma visoka. Lom je bio na granici prevlaka/osnova, što ukazuje na visoke vrednosti kohezivne čvrstoće slojeva prevlake.

Vrednosti mikrotvrdoće slojeva prevlake su u propisanim granicama za ovu vrstu prevlake i te vrednosti su zajedno sa čvrstoćom spoja u korelaciji sa mikrostrukturama slojeva prevlake.

Tribološka ispitivanja slojeva prevlake pokazala su dobru reproduktivnost dinamičkog koeficijenta trenja za ispitani broj uzoraka i kao takve mogu se pouzdano primeniti na površinama delova koji su izloženi habanju u eksploataciji.

Literatura

[1] Felgueroso, D., Vijande, R., Cuetos, J. M., Tucho, R., Hernandez, A.: Parallel laser melted tracks on the wear behaviour of plasma – sprayed Ni-based coatings, *Wear*, 264 (2008) 257–263.

[2] Gonzales, R., Garcia, M. A., Penuelas, I., Cadenas, M., Fernandez, Ma. del Rocio, Hernandez Battez, A., Felgueroso, D.: Microstructural study of NiCrBSi coatings obtained by different processes, *Wear*, 263 (2007) 619–624.

[3] METCO 34-Fine grade tungsten Carbide powder with a fine nickel-chrome self-fluxing alloy powder, An Engineering guide to Coating Performance and Applications, SULZER METCO The Coatings Company.

[4] Kushner, B. A.: Thermal Spray powders – Manufacturing Methods and Quality Control Procedures, 1st plasmatechnik symposium Lucerne / Switzerland may 18th–20th, 1988.

[5] Mrdak, M., Kakaš, D., Pović, Đ.: Testing structural and mechanical properties of coatings with increased wear resistance, 8th International tribology Conference, October, 2003, Belgrade, Serbia.

[6] ASM HANDBOOK VOLUME 3, Alloy Phase Diagrams ASM International, Printed in United States of America.

[7] Kim, H., Hwang, S., Lee, C., Juvanon, P.: Assessment of wear performance of flame sprayed and fused Ni-based Coatings, *Surf. Coat. Technol.* 172 (2003)-262–269.

[8] "Turbojet engine-standard practices manual" Part No 58 5005, Pratt-Whitney.

CHARACTERIZATION OF WEAR RESISTANT PLASMA SPRAYED APS – WCCo/NiCrBSi SELF-FLUXING COATINGS

Summary:

In this paper, the microstructural, mechanical and tribological properties of WCCoNiCrBSi thermal spray coatings, applied to repair the cylinders of helicopter nasal feet, were analysed. The process used for coating depo-

sition on steel substrate was the Atmospheric Plasma Spraying (APS). The plasma spray process is a procedure widely used for applying coatings with increased resistance to wear. The combination of WCCo and NiCrBSi powders produced coatings for the protection of metal parts exposed to wear, abrasion, erosion and cavitation to 540°C. The WCCoNiCrBSi 50/50% powder is specially developed for the production of coatings of high cohesion and adhesive strength. The coatings are very dense, hard and smooth. Microstructures present in the layers are tungsten carbides and chromium layers that increase resistance to wear and abrasion. Powder is deposited on the substrate rugged with Al₂O₃. The substrates were heated at temperatures up to 200°C. Powder deposition was performed with the optimal deposition parameters. The microstructure and micro hardness of the coating layer was investigated on the cross section of samples using the Pratt & Whitney standard. Micro hardness was tested using the Vickers scale with a load of 300g. The microstructure of the layers was investigated on an optical microscope (OM) with a magnification of 400X. Testing of bond strength between coatings and substrates was performed at room temperature with the speed of twitch of 1mm/60sec. The structure is multi-layered and layers are dense and homogeneous. In the WCCo layers there are dark WC phase particles. The NiCrBSi alloy layers contain fine precipitates of white nickel boride. The WCCo layers have micro hardness values ranging from 1097 - 1390 HV_{0,3}. The tribological evaluation of the coating was performed using a pin - on - ring tribometer. Lubricate sliding wear tests were carried out at room temperature according to the ASTM G77 standard. The coated blocks were tested on a hardened and tempered steel ring. A constant load of 400 N and a constant speed of 0,5 m/s were applied for a total distance of 3000 m. The values of micro hardness were also measured in the NiCrBSi layers in a narrow range of 823–930 HV_{0,3}. The values indicate that the layers are homogeneous and thick. The coating bond strength is 59N/mm. The value is high because of the warming substrate. The dynamic coefficient of friction has a value of $\mu = 0,1$ to $0,11$. The mass loss was small and on average it amounted to $\Delta m_b = 0,11$ mg. The results of tribology tests showed good reproducibility of the dynamic coefficient of friction. The coating can be reliably applied to surfaces exposed to wear during operation. The advantage of this coating application is in a significant prolongation of service life of parts, together with reduced operating and maintenance costs.

Key words: Atmospheric Plasma Spraying(APS), WCCoNiCrBSi coating, microstructure, micro hardness, bond strength, sliding wear, friction.

Datum prijema članka: 20. 10. 2009.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa: 12. 1. 2010.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje: 15. 1. 2010.