



ISPITIVANJE MEHANIČKIH I STRUKTURNIH OSOBINA PREVLAKA OTPORNIH NA EROZIJU I VISOKE TEMPERATURE

Mihailo R. Mrdak¹

¹Istraživački razvojni centar, IMTEL Komunikacije a.d., Beograd, Srbija, miki@insimtel.com

Apstrakt: Cilj ovog rada bio je da se ispituju mehaničke i strukturne karakteristike termo-barijernih prevlaka TBC otpornih na eroziju i visoke temperature. Deponovana su tri tipa TBC sistema dvojnih prevlaka sastavljenih od metalne vezne prevlake $\text{NiCrAlCoY}_2\text{O}_3$ i keramičkih izolacionih prevlaka ZrO_2MgO , $\text{ZrO}_2\text{Y}_2\text{O}_3$ i $\text{ZrO}_2\text{CeO}_2\text{Y}_2\text{O}_3$. TBC sistemi prevlaka su deponovani atmosferskim plazma sprej postupkom (APS) na ohrapavljenim čeličnim substratima sa temperaturom od 160 – 180 °C. Prevlake su deponovane sa optimalnim parametrima depozicije prahova. Vezni slojevi su deponovani sa jednim prolazom plazma pištolja, a keramički slojevi sa četrest prolaza. Procena kvaliteta slojeva je urađena ispitivanjem mikrotvrdoće metodom $\text{HV}_{0.1}$ i zatezne čvrstoće spoja ispitivanjem na zatezanje. Metalografska procena udela mikro pora (image analiza) u strukturi veznih i keramičkih slojeva je urađena tehnikom svetlosne mikroskopije. Morfologije čestica praha je urađena na SEM-u. Analize izvršenih ispitivanja su omogućile da se odaberu TBC sistemi prevlaka sa najboljim mehaničkim i strukturnim karakteristikama.

Ključne reči: atmosferski plazma sprej (APS), termo barijerne prevlake, mikrostruktura, interfejs, mikrotvrdoća, čvrstoća spoja.

1. UVOD

Termo barijerne prevlake (TBC) su grupe prevlaka namenjene za posebne uslove rada zbog svojih specifičnih karakteristika. Prevlake su našle široku primenu kao zaštita delovima izloženim visokim temperaturama, visokotemperaturnoj abraziji čestica, oksidaciji i toploj koroziji. Osnovna uloga TBC je da obezbedi mogućnost rada osnovnog materijala na temperaturama koje su iznad granice njegove izdržljivosti spuštanjem stvarne temperature na donjoj površini veznog sloja TBC sistema za $\Delta T = 200 - 400$ °C [1,2]. Keramički sloj mora da zadrži nisku toplotnu provodljivost tokom dužeg izlaganja u uslovima eksploatacije i da ima dobru otpornost na abraziju čestica, koja može da javi u različitim vidovima [3]. Keramička prevlaka se u poređenju termičkih koeficijenata razlikuje od komponente na koju se primenjuje. Ovaj sloj treba da bude usklađen sa osnovnim materijalom preko veznog sloja. Donji vezni sloj koji je tanji u odnosu na keramički sloj mora da ima dobru vezu sa substratom i keramikom, spreči

difuziju na interfejsu, poveća otpornost na koroziju i smanji uticaj zaostalih napona u keramici [4-7].

Kompozitni prah $\text{NiCr-Al-Co-Y}_2\text{O}_3$ koji se koristi za proizvodnju veznog sloja je obložen oksidom Y_2O_3 koji je stabilizator u keramičkim prevlakama. Oksid Y_2O_3 koji je istovremeno prisutan u metalnom i keramičkom prahu poboljšava vezu između metalnih i keramičkih slojeva [8]. Za proizvodnju keramičkih slojeva koriste se prahovi kao što su Metco 210NS – ZrO_2MgO , Metco 202NS – $\text{ZrO}_2\text{Y}_2\text{O}_3$ i Metco 205NS – $\text{ZrO}_2\text{CeO}_2\text{Y}_2\text{O}_3$ i dr. [9-11]. Atmosferski plazma sprej postupak (APS) je standardni proces za deponovanje termalnih barijera. Čestice praha se ubrizgavaju u protok plazma gasa i ubrzavaju usled prenosa brzine i temperature jona na čestice praha. Pod uticajem substrata, čestice se plastično deformišu i vezuju za substrat da bi se formirala prevlaka. Proces omogućuje deponovanje širokog spektra prahova: legura, keramike, karbida, metalo-karbida, metalo-keramike, kompozitnih prahova i dr. Na kvalitet deponovanih prevlaka utiče veliki broj parametara. Opis atmosferskog plazma sprej

postupka i uticaja parametara depozicije praha na kvalitet prevlaka dat je detaljnije u radovima [12-15]. Jedan od veoma bitnih parametara koji utiče na kvalitet i trajnost TBC u eksploataciji je temperatura substrata na kojoj se deponuju slojevi. Prema ranijim istraživanjima, plazma deponovani keramički depoziti pokazuju lamelarnu strukturu sa ograničenom interlamelarnim vezivanjem [16]. Zbog toga su u depozitu prisutne mikro pore kao zapreminske greške sa velikim koncentracijama napona koji uzrokuju pojavu mikro pukotina. Ograničeno vezivanje lamela u depozitu smanjuje vrednosti tvrdoće, modul elastičnosti, žilavost loma i toplotnu provodljivost odgovarajućeg materijala [17-19].

Predgrevanje substrata se koristi za povećanje adhezije prevlake, poboljšanje mikrostrukture i mehaničkih svojstava [2, 20-22]. Svojstva TBC depozita su uglavnom pod kontrolom morfologije deponovanih čestica i interakcija/prilaganje među njima. Jedan od uzroka propadanja keramičkih prevlaka je termičko opterećenje. Nagle promene temperature mogu uzrokovati pucanje i odvajanje celog TBC sistema sa substrata zbog značajne razlike koeficijenta linearnog širenja keramike i metala. Drugi način propadanja keramičkih prevlaka nastaje od erozije čestica na visokim temperaturama. Ispitivanja otpornosti keramičkih prevlaka na eroziju čestica Al_2O_3 veličine od $15\ \mu\text{m}$ do $53\ \mu\text{m}$, za isti nivo poroznosti, na $980\ ^\circ\text{C}$ su pokazala da najveću otpornost imaju keramičke prevlake $\text{ZrO}_2\text{CeO}_2\text{Y}_2\text{O}_3$ sa zapreminskim gubitkom $1,72 \times 10^4\ \text{cm}^3/\text{gm}$. Za prevlaku $\text{ZrO}_2\text{20Y}_2\text{O}_3$ zapreminski gubitak je nešto viši $1,95 \times 10^4\ \text{cm}^3/\text{gm}$, dok je za prevlaku ZrO_2MgO zapreminski gubitak bio najviši $3,03 \times 10^4\ \text{cm}^3/\text{gm}$ [11].

U ovom radu su ispitana tri tipa TBC sistema prevlaka $\text{NiCrAlCoY}_2\text{O}_3 / \text{ZrO}_2\text{MgO}$, $\text{NiCrAlCoY}_2\text{O}_3 / \text{ZrO}_2\text{Y}_2\text{O}_3$ i $\text{NiCrAlCoY}_2\text{O}_3 / \text{ZrO}_2\text{CeO}_2\text{Y}_2\text{O}_3$. Prahovi su deponovani na predgrejanim substratima sa temperaturom od $160 - 180\ ^\circ\text{C}$ sa ciljem poboljšanja interlamelarne veze, mikrostrukture i mehaničkih svojstava. Izvršena su metalografska ispitivanja sadržaja mikro pora i oksida u veznim slojevima i mikro pora u keramičkim prevlakama. Za svaki sistem TBC prevlaka su ispitane mikrotvrdoće i zatezne čvrstoće spoja. Analize rezultata izvršenih ispitivanja su omogućile da se ustanovi koji sistem prevlaka ima najbolje strukturno mehaničke karakteristike.

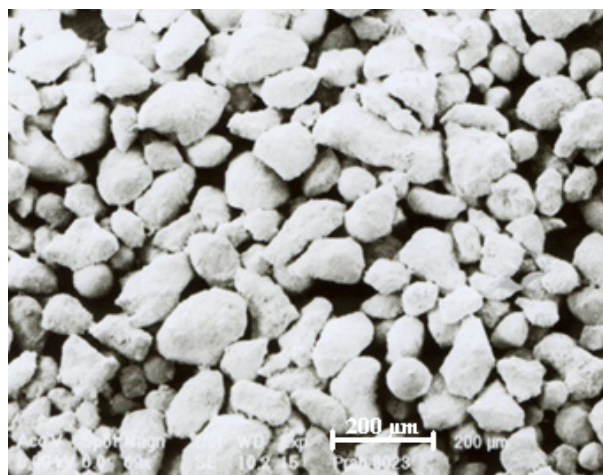
2. EKSPERIMENTALNI DETALJI

2.1 Materijali

Materijal na kome su deponovane termalne barijere je bio od nerđajućeg čelika X15Cr13 (EN

1.4024) u termički neobrađenom stanju. Za izradu termalnih barijera su upotrebljena četiri praha firme Sulzer Metco (Sulzer Metco) sa oznakama: Metco 461 ($\text{NiCr/Al/Co/Y}_2\text{O}_3$), Metco 210NS (ZrO_2MgO), Metco 202NS ($\text{ZrO}_2\text{Y}_2\text{O}_3$) i Metco 205NS ($\text{ZrO}_2\text{CeO}_2\text{Y}_2\text{O}_3$) [8-11].

Kompozitni prah $\text{NiCr/Al/Co/Y}_2\text{O}_3$ je NiCr legura sa 17,5 tež.% Cr obložena sa 5,5 tež.% Al, 2,5 tež. % Co i 0,5 tež. % Y_2O_3 . Prah koji je korišćen u eksperimentu je imao raspon granulacije čestica od $45\ \mu\text{m}$ do $150\ \mu\text{m}$. Temperatura topljenja praha je $1400\ ^\circ\text{C}$. Na slici 1 je prikazama SEM mikrofotografija praha $\text{NiCr/Al/Co/Y}_2\text{O}_3$ na kojoj se vide čestice praha nepravilnog oblika.



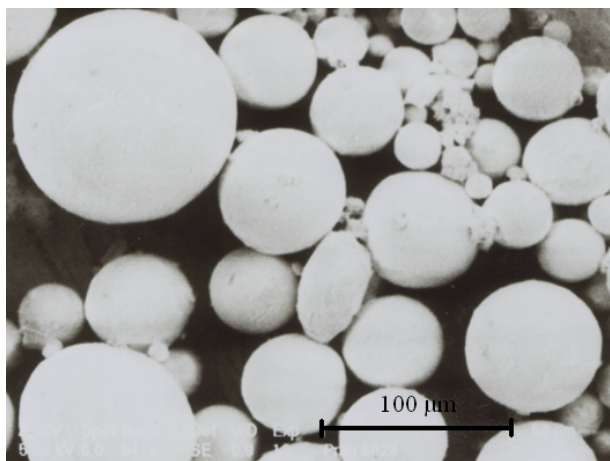
Slika 1. (SEM) morfologija čestica praha $\text{NiCr-Al-Co-Y}_2\text{O}_3$

Keramički prah ZrO_2MgO je proizveden topljenjem. Prednost ove metode je predlegiranost i prirodna homogenizacija čestica praha. Keramika ZrO_2MgO je predlegirana sa 25 tež.% MgO. Za eksperiment je korišćen prah uglastog oblika sa rasponom granulacije čestica od $10\ \mu\text{m}$ do $53\ \mu\text{m}$. Temperatura topljenja praha je $2140\ ^\circ\text{C}$.

Prah $\text{ZrO}_2\text{Y}_2\text{O}_3$ je proizveden tehnološkim postupkom aglomeracije finih čestica keramike sa 80 tež.% ZrO_2 i 20 tež.% Y_2O_3 i suvim raspršivanjem. Tako proizveden prah ima sfernu morfologiju čestica. Raspon granulacije čestica je bio od $45\ \mu\text{m}$ do $106\ \mu\text{m}$ sa temperaturom topljenja praha $2480\ ^\circ\text{C}$.

Čestice praha $\text{ZrO}_2\text{CeO}_2\text{Y}_2\text{O}_3$ su proizvedene homogenizacijom u peći i procesom sferoidizacije HOSP. Keramika $\text{ZrO}_2\text{CeO}_2\text{Y}_2\text{O}_3$ je potpuno predlegirana sa 24 – 26 tež.% CeO_2 i 2 – 3 tež.% Y_2O_3 . Morfologije čestica praha su prikazane na slici 2.

SEM mikrofotografija pokazuje da su čestice praha sa sfernim morfologijama koje omogućavaju odličan protok praha u mlaz plazme i uniformno topljenje. Prah koji je korišćen u eksperimentu je imao raspon čestica od $45 - 90\ \mu\text{m}$ sa temperaturom topljenja $2480\ ^\circ\text{C}$.



Slika 2. (SEM) morfologija čestica praha $ZrO_2CeO_2Y_2O_3$

Uzorci za merenje tvrdoće i metalografska ispitivanja su pravougaoni $70 \times 20 \times 1,5$ mm, dok su za zateznu čvrstoću spoja korišćeni cilindrični uzorci $\varnothing 25 \times 50$ mm.

Merenja mikrotvrdoća su izvršena korišćenjem Vikers dijamant piramide indenter i 100 grama opterećenje ($HV_{0,1}$). Merenje je obavljeno u pravcu duž lamela, u sredini i na krajevima uzorka. Na pet mesta sprovedeno je pet očitavanja a prikazane su minimalne i maksimalne vrednosti.

Testovi zatezne čvrstoće spoja su vršeni na sobnoj temperaturi na hidrauličnoj opremi sa brzinom od 10 mm/min, za sva ispitivanja. Čvrstoća je izračunata tako što se opterećenje kidanja deli sa površinom poprečnog preseka uzorka. Geometrija uzoraka je u skladu sa ASTM C633 standardom, koji je detaljnije obrađen u radu [23]. Korišćeni su u paru dva uzoraka, od kojih je prevlaka deponovana samo na jednom od njih. Uzorci su zalepljeni lepkom i čuvani pod pritiskom jedni prema drugom u peći na temperaturi od 180 °C za 2 sata. Za svaki grupu uzoraka urađene su tri epruvete a prikazane su minimalne i maksimalne vrednosti. Mehaničke i mikrostrukturne karakterizacije dobijenih prevlaka su izvršene prema standardu Pratt & Whitney [24].

Mikrostrukturna analiza prevlaka i image analiza udela mikro pora sa oksidima u veznim prevlakama i udela mikro pora u keramičkim prevlakama urađena je na svetlosnom mikroskopu. Morfologija čestica praha i morfologija površine keramičke prevlake urađena je na SEM-u (skening elektronskom mikroskopu).

2.2 Plazma sprej parametri

Depozicija prahova je urađena sa atmosferski plazma sprej sistemom firme Plasmadyne i plazma pištoljem SG-100, sa odgovarajućim robotizovanim kontrolnim sprej uslovima. Plazma pištolj SG-100 se sastojao od katode tipa K 1083-129, anode tipa A

2084-145 i gas injektora tipa GI 2083-113. Za sve deponovane prevlake kao lučni gas korišćen je Ar u kombinaciji sa He i snaga napajanja od 40 KW. Plazma sprej parametri depozicije su prikazani u tabeli 1. Pre procesa deponovanja površine čeličnih substrata su hrapavljene sa česticama korunda veličine od 0,7 – 1,5 mm i predgrejane na temperaturu od 160 – 180 °C. Vezne prevlake VP – $NiCrAlCoY_2O_3$ su deponovane sa jednim prolazom plazma pištolja debljine 0,068 – 0,093 mm. Sve keramičke prevlake su deponovane sa 15 prolaza plazma pištolja. Prevlaka A – ZrO_2MgO je deponovana sa debljinom 0,486 – 0,50 mm, prevlaka B – $ZrO_2Y_2O_3$ sa debljinom 0,375 – 0,41 mm i prevlaka C – $ZrO_2CeO_2Y_2O_3$ sa debljinom 0,425 – 0,470 mm.

Tabela 1. Parametri depozicije prevlaka VP – $NiCrAlCoY_2O_3$, A – ZrO_2MgO , B – $ZrO_2Y_2O_3$ i C – $ZrO_2CeO_2Y_2O_3$

Parametri depozicije	VP	A	B	C
Plazma struja, I (A)	900	900	900	900
Plazma napon, U (V)	38	38	38	38
Primarni plazma gas protok Ar, l/min	47	47	47	47
Sekundarni plazma gas protok He, l/min	12	12	12	12
Noseći gas protok Ar, l/min	5	7	6	6
Protok praha, g/min	60	50	50	50
Odstojanje substrata, mm	115	100	90	90

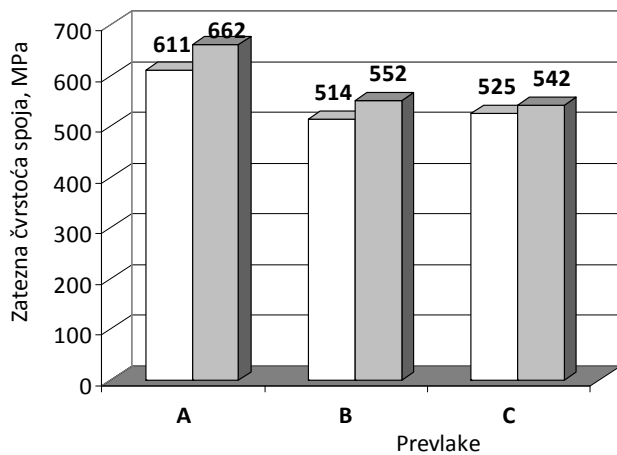
3. REZULTATI I DISKUSIJA

3.1 Mikrotvrdoća

Vrednosti mikrotvrdoće za sve vezne prevlake $NiCrAlCoY_2O_3$ su izmerene u rasponu od min. 279 $HV_{0,1}$ do max. 322 $HV_{0,1}$. Raspodele mikrotvrdoće u veznim prevlakama su posledica različite raspodele mikro pora i oksida u deponovanim slojevima. Ove vrednosti su potvrđene image analizom pri određivanju ukupnog sadržaja mikro pora i oksida u veznim slojevima. Na slici 3 su prikazane min. i max. vrednosti mikrotvrdoće keramičkih prevlaka A – ZrO_2MgO , B – $ZrO_2Y_2O_3$ i C – $ZrO_2CeO_2Y_2O_3$.

Kao što se i očekivalo za sve tri keramičke prevlake dobile su se različite vrednosti mikrotvrdoće kao posledica uticaja različitih vrsta i sadržaja stabilizatora MgO, Y_2O_3 i kombinacije $CeO_2Y_2O_3$. Najveće vrednosti mikrotvrdoće su izmerene u keramičkim slojevima A – ZrO_2MgO sa raspodelom mikrotvrdoće od min. 611 do max. 662 $HV_{0,1}$, a najmanje vrednosti mikrotvrdoće su izmerene u slojevima C – $ZrO_2CeO_2Y_2O_3$ sa raspodelom mikrotvrdoće od min. 525 do max. 542 $HV_{0,1}$. Raspodele mikrotvrdoće u keramičkim prevlakama su, kao i u veznim prevlakama,

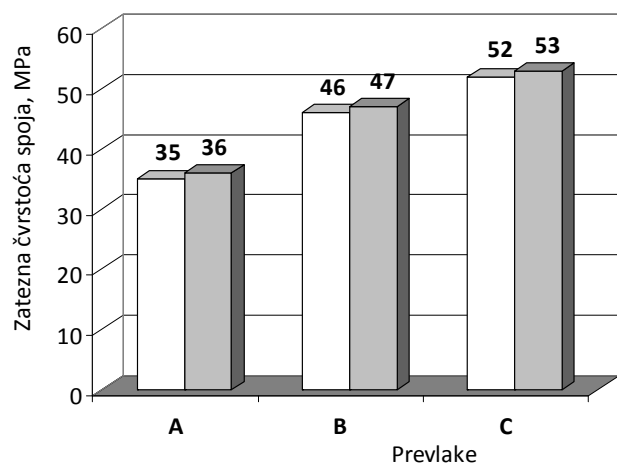
posledica različite raspodele mikro pora u keramičkim slojevima. Najmanja raspodela mikrotvrdoće je izmerena u keramičkim slojevima C – $ZrO_2CeO_2Y_2O_3$, a najveća u keramičkim slojevima A – ZrO_2MgO . Raspodele vrednosti mikrotvrdoće u keramičkim slojevima su bile u skladu sa sadržajem mikro pora, što su potvrdile image analize keramičkih prevlaka.



Slika 3. Mikrotvrdoća prevlaka

3.2 Zatezna čvrstoća spoja

Na slici 4 su prikazane min. i max. vrednosti zatezne čvrstoće spoja sistema prevlaka $NiCrAlCoY_2O_3 / ZrO_2MgO$, $NiCrAlCoY_2O_3 / ZrO_2Y_2O_3$ i $NiCrAlCoY_2O_3 / ZrO_2CeO_2Y_2O_3$.



Slika 4. Zatezna čvrstoća spoja prevlaka

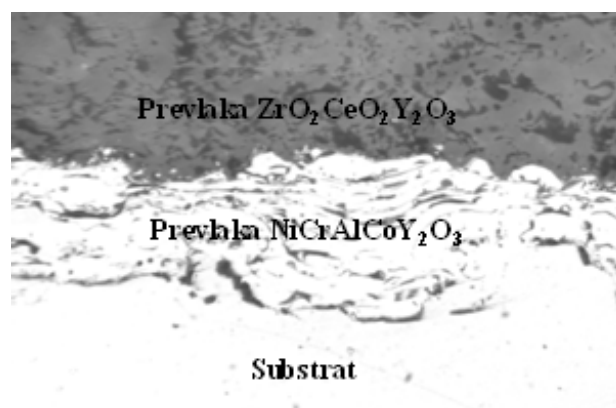
Za sve sisteme prevlaka su izmerene dobre vrednosti zatezne čvrstoće spoja. Predgrevanje substrata je omogućilo da se deponuju prevlake sa dobrim vezivanjem lamela vezne prevlake za supstrate i lamela vezne prevlake sa keramičkim lamelama. Veća temperatura substrata je uticala na povećanje adhezije prevlaka, mehaničkih svojstava i poboljšanje mikrostrukture, što su potvrdila metalografska ispitivanja.

Najveće vrednosti zatezne čvrstoće spoja je imao sistem prevlaka $NiCrAlCoY_2O_3 /$

$ZrO_2CeO_2Y_2O_3$ sa rasponom od 52 – 53 MPa, a najniže vrednosti sistem prevlaka $NiCrAlCoY_2O_3 / ZrO_2MgO$ sa rasponom od 35 – 36 MPa. Oksid Y_2O_3 koji je istovremeno bio prisutan u vezno $NiCrAlCoY_2O_3$ i keramičkoj prevlaci $ZrO_2CeO_2Y_2O_3$ je uticao na bolju inter-lamelarnu kohezivnu čvrstoću između dve prevlake. Sistem prevlaka $NiCrAlCoY_2O_3 / ZrO_2Y_2O_3$ je iz istog razloga imao veću vrednost zatezne čvrstoće spoja sa raspedlom od 46 – 47 MPa u odnosu na TBC sistem $NiCrAlCoY_2O_3 / ZrO_2MgO$. Izmerene vrednosti su potvrdile da temperatura substrata ima bitan uticaj na zatezne čvrstoće spoja. Za sve uzorke lom se dešavao na interfejsu između veznih slojeva i substrata.

3.3 Mikrostruktura

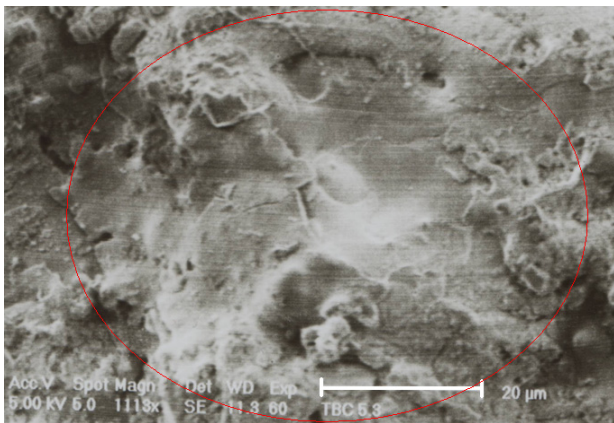
Image analiza veznih prevlaka $NiCrAlCoY_2O_3$ je pokazala da je ukupan sadržaj mikro pora i oksida u slojevima bio od min. 18 % do max. 22 %. Raspon ukupnog sadržaja mikro pora i oksida u veznim prevlakama su posledica različite raspodele mikro pora i oksida u deponovanim slojevima. Na slici 5 je prikazana mikrostruktura vezne prevlake $NiCrAlCoY_2O_3$ u sistemu sa keramičkom prevlakom $ZrO_2CeO_2Y_2O_3$. Vezni slojevi imaju uniformnu lamelarnu strukturu. Granice na interfejsu između podloge i prevlake se jasno mogu videti. Na interfejsu sa podlogom i keramičkim slojem nisu prisutne mikro pukotine i makro pukotine i ne postoji odvajanje slojeva prevlake i ljuštenje sa metalnih substrata.



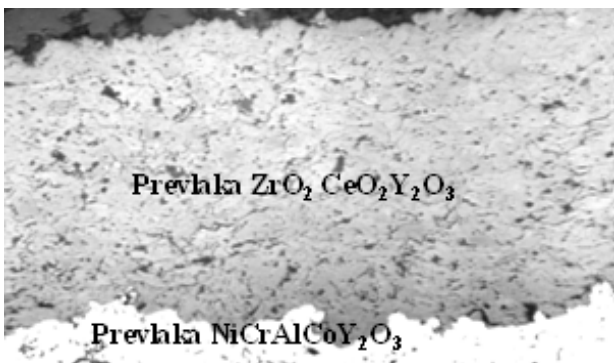
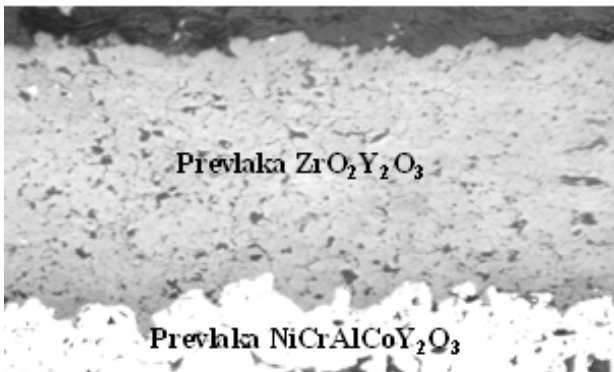
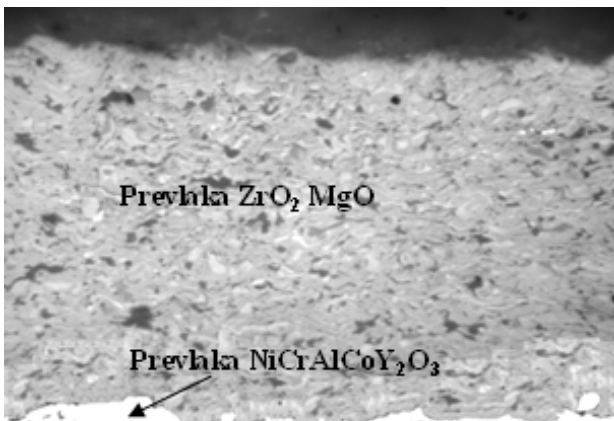
Slika 5. Mikrostruktura prevlake $NiCrAlCoY_2O_3$

Kroz slojeve $NiCrAlCoY_2O_3$ prevlake se jasno uočavaju tamni lamelarni oksidi i mikro pore. Podužne oksidne lamele oksida su formirane u tečnom stanju u plazmi [8].

SEM analiza morfologije površine keramičke prevlake $ZrO_2CeO_2Y_2O_3$ pokazuje potpuno topljenje i razlivanje keramičkih čestica na prethodno deponovani keramički sloj. Na slici 6 je prikazana SEM mikrofotografija površine keramičke prevlake $ZrO_2CeO_2Y_2O_3$.



Slika 6. SEM mikrofotografija površine prevlake $ZrO_2CeO_2Y_2O_3$



Slika 7. Mikrostrukture keramičkih prevlaka: A – ZrO_2MgO , B – $ZrO_2Y_2O_3$ i C – $ZrO_2CeO_2Y_2O_3$; uvećanje 200×

Na SEM mikrofotografiji je crvenom linijom zaokružena površina jedne istopljene i razlivena čestice praša. Potpuno istopljena čestica praša je formirala tanak disk u sudaru sa površinom prethodno deponovanog sloja. Morfologija deponovane čestice potvrđuje da su istopljene čestice u sudaru sa podlogom formirale pravilan oblik i kao takve ostvarile dobru vezu sa prethodno deponovanim česticama. U poprečnom preseku prevlake deponovane čestice imaju lamelarnu strukturu.

Image analiza ukupnog sadržaja mikro pora u keramičkim prevlakama ZrO_2MgO , $ZrO_2Y_2O_3$ i $ZrO_2CeO_2Y_2O_3$ je pokazala da slojevi imaju različiti udeo pora. Najmanji udeo mikro pora je izmeren u prevlaci $ZrO_2CeO_2Y_2O_3$ sa sadržajem od 14 %. U keramičkoj prevlaci $ZrO_2Y_2O_3$ je izmeren udeo mikro pora od 16 %, a u prevlaci ZrO_2MgO je izmeren udeo mikro pora od 17 %. Morfologija čestica praša je bitan parametar za ravnomeran tok praša u plazmi i na njegovo topljenje. Keramički praš $ZrO_2CeO_2Y_2O_3$ sa sfernom morfologijom čestica koje imaju glatku površinu su omogućile izvrsno i uniformno topljenje čestica u odnosu na klasične postupke izrade prahova [11]. Ravnomerno istopljene čestice praša se pravilnije oblikuju u sudaru sa substratom i deponuju slojeve sa manjim sadržajem pora, koji imaju veću kohezionu čvrstoću i zateznu čvrstoću spoja. Na slici 7 su prikazana mikrostrukture keramičkih prevlaka ZrO_2MgO , $ZrO_2Y_2O_3$ i $ZrO_2CeO_2Y_2O_3$.

Na interfejsu između keramičkih slojeva i veznih prevlaka nisu prisutne pukotine. Na uzorcima nije uočeno ljuštenje – piling keramičkih slojeva sa substrata. U keramičkim slojevima su prisutne tamne površine koje predstavljaju mikro pore sa različitim udelima u zavisnosti od vrste keramičke prevlake. Izmerene vrednosti sadržaja mikro pora u keramičkim slojevima su u skladu sa mikrotvrdoćama i mikrostrukturama.

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata prikazanih u ovom radu može se zaključiti, da sistemi prevlaka $NiCrAlCoY_2O_3 / ZrO_2MgO$, $NiCrAlCoY_2O_3 / ZrO_2Y_2O_3$ i $NiCrAlCoY_2O_3 / ZrO_2CeO_2Y_2O_3$ imaju dobra svojstva. Predgrevanje substrata pre depozicije prevlaka je omogućilo da se dobiju slojevi sa dobrim mikrostrukturama i mehaničkim osobinama. Keramički praš $ZrO_2CeO_2Y_2O_3$ zbog sferne morfologije čestica praša je imao najmanji udeo mikro pora i najbolju zateznu čvrstoću spoja. Oksid Y_2O_3 koji je istovremeno bio prisutan u veznoj i keramičkoj prevlaci je uticao na bolju inter-lamelarnu kohezionu čvrstoću između dve prevlake. Sistem prevlaka $NiCrAlCoY_2O_3 /$

ZrO₂Y₂O₃ je takođe zbog oksida Y₂O₃ imao veću vrednost zatezne čvrstoće spoja od sistema prevlaka NiCrAlCoY₂O₃ / ZrO₂MgO.

Najbolje karakteristike od svih sistema prevlaka je imao TBC sistem NiCrAlCoY₂O₃ / ZrO₂CeO₂Y₂O₃.

ZAHVALNOSTI

Autor je zahvalan za finansijsku podršku Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije (nacionalni projekti OI 174004, TR 34016).

LITERATURA

- [1] B. Basler, R. Buerger, W. Hoffelner: Proc. of 1st Int. Conf. on Plasma Surface Engineering, Germisch-Partenkirchen 1, pp. 347, 1988.
- [2] M.R. Mrdak, A. Vencl, B.D. Nedeljkovic, M. Stanković: *Influence of plasma spraying parameters on properties of the thermal barrier coatings*, Materials Science and Technology, Article in Press, doi: 10.1179/1743284712Y.0000000193, 2013.
- [3] A. Vencl, N. Manić, V. Popovic, M. Mrdak: *Possibility of the abrasive wear resistance determination with scratch tester*, Tribology Letters 37, pp. 591-604, 2010.
- [4] E. Celik, I.H. Mutlu, E. Avci, Y.S. Hascicek: *Y₂O₃-ZrO₂ insulation coatings on AgMg sheathed Bi-2212 superconducting tapes by the sol-gel process*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity 10, pp.1329-1332, 2000.
- [5] E. Celik, I.H. Mutlu, Y.S. Hascicek: *Electrical properties of high temperature insulation coatings by the sol-gel method for magnet technology*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity 10, pp. 1341-1344, 2000.
- [6] E. Celik, E. Avci, Y.S. Hascicek: *High temperature sol-gel insulation coatings for HTS magnets and their adhesion properties*, Physica C: Superconductivity, Vol. 340, No. 2-3, pp. 193-202, 2000.
- [7] A.S. Demirkiran, E. Çelik, M. Yargan, E. Avci: *Oxidation behaviour of functionally gradient coatings including different composition of cermets*, Surface and Coatings Technology 142-144, pp. 551-556, 2001.
- [8] *Metco 461 Nickel Chromium-Aluminum-Cobalt-Yttria Composite Powder*, Technical Bulletin 10-315, Sulzer Metco, 2000.
- [9] *Metco 210 Magnesium Zirconate Powder*, Technical Bulletin 10-108, Sulzer Metco, 2000.
- [10] *Metco 202NS Zirconium Oxide Composite Powder*, Technical Bulletin 10-107, Sulzer Metco, 2000.
- [11] *Metco 205NS PreAlloyed Ceria-Yttria Stabilized Zirconia Powder*, Technical Bulletin 10-338, Sulzer Metco, 2000.
- [12] A. Vencl, M. Mrdak, I. Cvijović: *Microstructures and tribological properties of ferrous coatings deposited by APS (Atmospheric Plasma Spraying) on Al-alloy substrate*, FME Transactions, Vol. 34, No. 3, pp. 151-157, 2006.
- [13] A. Vencl, M. Mrdak, M. Banjac: *Correlation of microstructures and tribological properties of ferrous coatings deposited by atmospheric plasma spraying on Al-Si cast alloy substrate*, Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 40, No. 2, pp. 398-405, 2009.
- [14] M. Mrdak, A. Vencl, M. Ćosić: *Microstructure and mechanical properties of the Mo-NiCrBSi coating deposited by atmospheric plasma spraying*, FME Transactions, Vol. 37, No. 1, pp. 27-32, 2009.
- [15] M. Mrdak, A. Vencl: *Uticaj parametara nanošenja NiCr prevlake plazma sprej postupkom u atmosferskim uslovima na njene mehaničke karakteristike i strukturu*, Tehnička dijagnostika 10, pp. 9-14, 2011.
- [16] C.-J. Li, A. Ohmori: *Relationships between the microstructure and properties of thermally sprayed deposits*, Journal of Thermal Spray Technology 11, pp 365-374, 2002.
- [17] R. McPherson, B.V. Shafer: *Interlamellar contact within plasma-sprayed coatings*, Thin Solid Films 97, pp. 201-204, 1982.
- [18] S. Kuroda, T.W. Clyne: *The quenching stress in thermally sprayed coatings*, Thin Solid Films 200, pp. 49-66, 1991.
- [19] C. Li, A. Ohmori, R. McPherson: *The relationship between microstructure and Young's modulus of thermally sprayed ceramic coatings*, Journal of Materials Science 32, pp. 997-1004, 1997.
- [20] L. Bianchi, A.C. Leger, M. Vardelle, A. Vardelle, P. Fauchais: *Splat formation and cooling of plasma-sprayed zirconia*, Thin Solid Films 305, pp. 35-47, 1997.
- [21] V. Pershin, M. Lufitha, S. Chandra, J. Mostaghimi: *Effect of substrate temperature on adhesion strength of plasma-sprayed nickel coatings*, Journal of Thermal Spray Technology 12, pp. 370-376, 2003.
- [22] P. Fauchais, M. Fukumoto, A. Vardelle, M. Vardelle: *Knowledge concerning splat formation: An invited review*, Journal of Thermal Spray Technology 13, pp. 337-360, 2004.
- [23] A. Vencl, S. Arostegui, G. Favaro, F. Zivic, M. Mrdak, S. Mitrović, V. Popovic: *Evaluation of adhesion/cohesion bond strength of the thick plasma spray coatings by scratch testing on coatings cross-sections*, Tribology International 44, pp. 1281-1288, 2011.
- [24] *Turbojet Engine – Standard Practices Manual (PN 582005)*, Pratt & Whitney, East Hartford, USA, 2002.

TESTING THE MECHANICAL AND THE STRUCTURAL PROPERTIES OF THE COATING RESISTANT TO THE EROSION AND THE HIGH TEMPERATURE

Abstract: *The aim of this study was to investigate the mechanical and the structural characteristics of the thermo-barrier coatings (TBC) resistant to the erosion and the high temperature. The deposited are the three types TBC dual coating systems which were consisting of a metal-bonded coatings $\text{NiCrAlCoY}_2\text{O}_3$ and a ceramical insulating coatings ZrO_2MgO , $\text{ZrO}_2\text{Y}_2\text{O}_3$ and $\text{ZrO}_2\text{CeO}_2\text{Y}_2\text{O}_3$. TBC systems of the coatings were deposited, with process of atmospheric plasma spraying (APS), on the roughened steel substrates with a temperature of 160 – 180 °C. The coatings were deposited with the optimal parameters of deposition powders. A bonding layers were deposited with a single pass of plasma gun, and ceramical layers with a fourteen passages. Assessment of a quality layers was done by the testing microhardness with method $\text{HV}_{0.1}$ and bond strength by the testing on tensile. Metallographic assessment proportion of micro-pores (image analysis), in the structure of the bonding and the ceramical layers, was done with the technique of the light microscopy. The Morphology of the particles powder was done on the SEM. Analysis of the performed testings have been enabled to choose the TBC systems of the coatings with the best mechanical and structural characteristics.*

Keywords: *atmospheric plasma spraying (APS), thermo-barrier coatings (TBC), microstructure, interface, microhardness, strength bond.*