Mihailo Mrdak[1], Časlav Lačnjevac[2], Marko Rakin[3], Darko Veljić[4], Nikola Bajić[4]*

[1]Istraživački i razvojni Centar, IMTEL komunikacije a.d., Beograd, Srbija, [2]Univerzitet u Beogradu, Poljoprivredni fakultet, Beograd, Srbija, [3] Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, Srbija,[4]Techno experts d.o.o – Istraživački i razvojni Center, IHIS, Beograd,Srbija

Naučni rad
ISSN 0351-9465, E-ISSN 2466-2585
UDC: 546.77:620.198:620.172
doi: 10.5937/zasmat1903271M

Zastita Materijala 60 (3)
271 - 276 (2019)

Mehanička svojstva i mikrostruktura slojeva prevlake molibdena deponovane vakuum plazma sprej procesom

IZVOD

Prevlake molibdena se zbog svojih odličnih osobina na habanje i kliznih svojstva u uslovima suvog trenja često koriste u aplikacijama da se odupru trenju i suvom klizanju. Pošto je molibden metal osetljiv na oksidaciju, u ovoj studiji slojevi prevlake molibdena su uspešno deponovani na niskom pritisku inertnog gasa Ar vacuum plazma sprej tehnologijom (VPS). Karakterizacija prevlake Mo je izvršena merenjem mikrotvrdoće slojeva prevlake metodom Vickers $HV_{0.3}$, čvrstoće spoja ispitivanjem na zatezanje i mikrostrukture metodom optičke mikroskopije (OM) i skening elektronske mikroskopije (SEM). Mikrostruktura slojeva prevlake je ispitana u deponovanom stanju i posle nagrizanja. Za nagrizanje se koristio reagens $NH_3{\cdot}H_2O$ i H_2O_2 sa zapreminskim odnosom 1:2. Dobijeni rezultati su pokazali da prevlaka ima dobre mehaničke karakteristike, mikrotvrdoću i visoku adheziono / kohezionu čvrstoću. Slojevi VPS - Mo prevlake su se sastojali od dobro istopljenih čestica praha, delimično neistopljenih čestica sa dobrom vezom u slojevima prevlake i mikro pora sa udelom ispod 0,5%. Utvrđeno je da se mikrostruktura prevlake uglavnom sastoji od lamelarne strukture i stubastih kristalnih zrna Mo. Ispitivanja su pokazala da VPS - Mo slojevi prevlake imaju mehaničke karakteristike i mikrostrukturu koje u potpunosti omogućavaju primenu prevlake na površinama delova od kojih se zahteva da imaju dobra klizna svojstva, otpornost na habanje i koroziju.

Ključne reči: *Molibden, vakuum plazma sprej (VPS), mikrostruktura, mikrotvrdoća, čvrstoća spoja*

1. UVOD

Prah Mo deponovan atmosferski plazma sprej procesom (APS) proizvodi prevlake koje u mikrostrukturi sadrže međulamelarne okside MoO_3 koji povećavaju mikrotvrdoću i zajedno sa mikro porama umanjuju kohezionu čvrstoću prevlake i adheziju. Kvalitet Mo prevlaka zavisi od: sadržaja i distribucije oksida MoO_3, udela poroznosti, neistopljenih čestica, kohezione i adhezione čvrstoće. Strukturne i mehaničke karakteristike prevlake Mo su povezane sa vrstom procesa depozicije, parametrima procesa i tehnologije proizvodnje praha [1-3]. Za izradu kvalitetnih prevlaka prah se deponuje na niskom pritisku inertnog gasa VPS procesom. VPS tehnologija zbog smanjene oksidacije praha proizvodi prevlake sa kontrolisanim udelom mikro pora, oksida i sa većom uniformnosti i manjom kontaminacijom [4 - 6].

*Autor za korespodenciju: Mihailo R. Mrdak
E-mail: drmrdakmihailo@gmail.com
Rad primljen: 12. 02. 2019.
Rad prihvaćen: 20. 03. 2019.
Rad je dostupan na sajtu: www.idk.org.rs/casopis

Osobine deponovanih VPS - Mo prevlaka su u vezi sa njihovim mikrostrukturama i oksidacionim ponašanjem. Mikrostrukture prevlaka i oksidaciono ponašanja definišu uslovi depozicije kao što su: čistoća plazma gasova, plazma sprej odstojanje, temperatura podloge, pritisak u vakuum komori i dr. Plazma sprej odstojanje najviše utiče na poroznost prevlake, a time i na otpornost na habanje. U radu je analizirana depozicija praha na čeličnm podlogama VPS procesom pod zaštitom argona na niskom pritisku [7]. U radovima [8-11] je opisan tehnološki postupak depozicije praha vakuum plazma sprej - VPS procesom. Elekrtični luk visoke frekvencije se pali jonizacijom primarnog gasa Ar koji protiče između bakarne anode hlađene vodom i katode od volframa. Uspostavljanjem stabilnog električnog luka, propušta se jedan od sekundarnih plazma gasova kao što su He, H_2, N_2 ili smeše gasova. Prolaskom sekundarnog gasa kroz električni luk, dolazi do jonizacije gasa koji se kao plazma mlaz fokusira kroz otvor anode i izlazi kao slobodan plamen. U zavisnosti od vacuuma, snage napajanja i protoka gasova, dužina mlaza plazme se menja po potrebi zavisno od praha koji se

deponuje i vrste materijala podloge na kojoj se deponuje prevlaka. Temperatura unutar mlaza plazme može da dostigne visoku temperaturu i do 16000 °C. Sprej materijal u obliku praha se ubrizgava nosećim gasom Ar u mlaz plazme u kome se topi i jonima plazme transportuje velikom brzinom do podloge na kojoj se deponuje kao prevlaka. VPS proces u kontrolisanoj atmosferi inertnog gasa Ar se primenjuje za specijalizovane aplikacije. Posebno se koristi za depoziciju materijala praha koji ima visoku temperaturu topljenja kao što je Mo i koji je izuzetno reaktivan sa okolnim vazduhom. Za razliku od atmosferskog plazma sprej procesa - APS, istopljene čestice praha Mo u čistoj atmosferi inertnog gasa na niskom pritisku ne oksidišu, tako da se proizvode prevlake Mo znatno gušće i većeg kvaliteta. VPS prevlake imaju mnogo veću zatetnu čvrstoću spoja, kohezionu čvrstoću i neznatan udeo mikro pora [8]. Prevlake na poprečnom preseku imaju lamelarnu strukturu, čija se osnova sastoji od Mo sa kubnom kristalnom rešetkom. Prednost VPS prevlaka Mo, zbog boljeg kvaliteta, je velika pouzdanost, duži radni vek funkcionalnih delova i smanjeni troškovi održavanja. Molibden ima visoku tačku topljenja 2620°C, umerenu gustinu 10,2 g/cm^3, dobru čvrstoću i odličnu otpornost na habanje. Na sobnoj temperaturi formira oksidni sloj koji pasivizira površinu. Molibden ima visoku otpornost u kiselinama, alkalnim rastvorima i na rastopljeni metal. Takođe, imaju dobra klizna svojstva u uslovima suvog trenja, pa se prevlake često koriste u aplikacijama da se odupru trenju i suvom klizanju. Pogotovo se prevlake Mo koriste u aplikacijama gde je nisko podmazivanje ili je podmazivanje nepostojeće. Samo prevlake od čistog Mo su te koje nude mazivost prevlake [10]. Plazma sprej prevlake Mo imaju široke aplikacije u oblasti: avio industrije, industrije automobila, proizvodnji vozova, energetike, metalurgije, elektrotehnike i mašinstva, grafičke industrije i industrije stakla [12,13]. Često se primenjuju u proizvodnji lopatica gasnih turbina za automobilske komponente kao što su: klipni i sinhroni prstenovi (automotive components such as piston rings and synchronizing rings), za brizgaljke goriva dizel motora (diesel engine fuel injectors), za kontinualno livenje (continuous casting), za komponente ventila i pumpi (valve and pump components), za zupčanike (gears), za zaštitu od istopljenih metala u neoksidacionoj atmosferi (resistance to molten metals when used in non-oxidizing atmospheres) i dr. [10, 14-16]. Molibden ima samo-vezujuća svojstva za podlogu, zbog čega može da se koristi kao vezna prevlaka i kao funkcionalna prevlaka. Prahovi Sulzer Metco od čistog molibdena projektovani su za proizvodnju gustih prevlaka, koje se dobro vezuju za podlogu koristeći vakuum plazma sprej postupak. Prevlake molibdena obezbeđuju i dobar otpor na krzanje kao rezultat dobre čvrstoće. Nakon plazma sprej depozicije praha na površini prevlake se brzo formira sloj površinskog oksida [11]. Prevlake se koriste na radnim temperaturama do 340 °C. Prevlake se dobro vezuju za čelične podloge, a može se koristiti i na podlogama od legura Mg i legura Al sa odgovarajućom prethodnom pripremom površine podloge. Pre depozicije praha neophodno je sa površine podloge ukloniti okside. Prevlake Mo nisu kompatibilne sa podlogama od bakara ili legura bakra. Tvrdoća prevlake deponovane u vakuumu je niža što prevlaci daje dodatnu prednost za anti trenje. VPS – Mo prevlaka nudi odličnu kombinaciju korozije, oksidacije i otpornost na habanje.

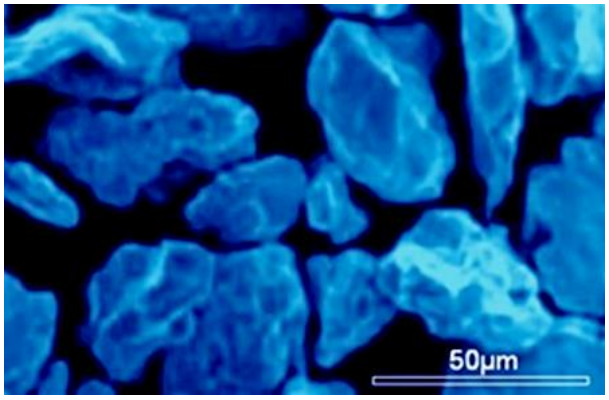
Glavni cilj rada je bio da se VPS procesom na niskom pritisku u zaštitnoj atmosferi inertnog gasa argona deponuju slojevi prevlake Mo koji će pokazati visoku adheziono - kohezionu čvrstoću, dobru mikrostrukturu i mikrotvrdoću. Mo prevlaka je deponovana na podlogama od čelika. Analizirane su mehaničke karakteristike i mikrostrukture slojeva prevlake Mo na optičkom mikroskopu (OM) i skening elektronskom mikroskopu (SEM) u deponovanom i nagrizenom stanju. Analiza je pokazala da VPS – Mo prevlaka ima dobre mehaničke i strukturne karakteristike koje prevlaci obezbeđuju dobru otpornost na habanje, koroziju i klizna svojstva.

2. EXPERIMENT

2.1. Materijali i eksperimentalni detalji plazma sprej depozicije prevlake

Za depoziciju slojeva VPS - Mo prevlake koristio se prah firme Sulzer Metco oznake Metco 63NS [11]. Prah Metco 63NS sadrži 99.0%Mo koji ima temperaturu topljenja 2620 °C. Prah je namenjen za izradu prevlaka koji se mogu koristiti za radne temperature do 340°C. Čestice praha Mo koje su korišćene u eksperimentu su imale nepravilan oblik, proizvedene tehnikom sinterovanja i mlevenja sa rasponom granulata praha od 25 μm do 75 μm. Na slici 1 je prikazana SEM mikrofotografija morfologije čestica praha Mo. Čestice praha su nepravilnog oblika sa oštrim i zaobljenim ivicama.

Uzorci na kojima su deponovani slojevi prevlake Mo za ispitivanje mikrotvrdoće i za procenu mikrostrukture su napravljeni od čelika Č.4171 (X15Cr13 EN10027) u termički neobrađenom stanju dimenzija 70x20x1,5mm. Za ispitivanje zatezne čvrstoće spoja uzorci su napravljeni od istog materijala dimenzija Ø25x50 mm po standardu Pratt & Whitney [17]. Ispitivanja mehaničkih i mikrostrukturnih karakteristika VPS - Mo prevlake su urađene prema standardu Pratt & Whitney [17].



Slika 1. SEM: morfologija čestica praha Mo

Figure 1. SEM: morphology *of Mo powder particles*

Ispitivanje mikrotvrdoće slojeva Mo prevlake urađeno je metodom $HV_{0.3}$ i zatezne čvrstoće spoja ispitivanjem na zatezanje. Ispitivanje mikrotvrdoće je sprovedeno u pravcu duž lamela, u sredini i na krajevima uzorka. Urađeno je pet očitavanja na tri merna mesta, a u radu je prikazana srednja vrednost mikrotvrdoće. Metoda ispitivanja čvrstoće spoja je metoda ispitivanja na zatezanje. Ispitivanje je urađeno na sobnoj temperaturi sa brzinom zatezanja 1mm/1min. Za ispitivanje su upotrebljeno pet epruvete, a u radu je prikazana srednja vrednost. Analiza udela mikro pora u prevlaci je sprovedena obradom 5 fotografija na uveličanju 200X. Preko paus papira mikro pore su označene i osenčene čija se ukupna površina računala na ukupnu površinu mikrofotografije. U radu je prikazana srednja vrednos udela mikro pora. Morfologija čestica praha, mikrostruktura prevlake u nagrizenom stanju i morfologija preloma prevlake je urađena na skening elektronskom mikroskopu (SEM). Mikrostrukturna analiza prevlake u deponovanom i nagrizenom stanju urađena je i na optičkom mikroskopu (OM). Da bi se u prevlaci videle međulamelarne granice i mikrostruktura deponovanih slojeva, urađeno je nagrizanje prevlake u reagensu $NH_3 \cdot H_2O$ i H_2O_2 sa zapreminskim odnosom 1:2.

Depozicija praha Mo izvršena je na niskom pritisku inertnog gasa Ar u VPS sistemu firme Plasma Technik AG. Za depoziciju praha korišćen je plazma pištolj F4. Proces obuhvata čišćenje površine podloga transferovanim lukom i deponovanje praha na niskom pritisku. Na mikroprocesorskoj jedinici robota VPS sistema Plasma Technik AG urađen je program deponovanja praha Mo. U programu su zadati i vremenski sinhronizovani svi parametri procesa kao što je: vakuumiranje komore, protok plazma gasova, čišćenje podloga transferovanim lukom, protok praha, depozicija prevlake, hlađenje podloga sa deponovanom prevlakom i ventilacija vakuum komore. VPS paramatri depozicije praha Mo na čeličnim uzorcima su prikazani u tabeli 1. Pre depozicije praha, površine podloga su ohrapavljene sa česticama belog korunda veličine od 0,7mm do 1,5 mm. Čišćenje površine podloga i depozicija praha urađena je sa mešavinom plazma gasova Ar-He. Prevlaka je deponovana sa debljinom od 60 µm do 80 µm.

Tabela 1. Parametri depozicije praha Mo

Table 1. Parameters deposition powder Mo

Parametri	Vrednosti	
	Čišćenje lukom	Deponovanje
Plazna struja, I (A)	500	650
Napon struje, V (U)	65	70
Primarni plazma gas, Ar (l/min)	50	50
Sekundarni plazma gas, He (1), H_2(2) (l/min)	10 (1)	9 (2)
Noseći gas praha, (l/min)	--	3
Protok praha, (g/min)	--	20
Odstojanje, (mm)	290	220
Pritisak u komori, (mbar)	40	120
Otvor anode, (mm)	8	8
Brzina plazma pištolja, (mm /s)	250	250

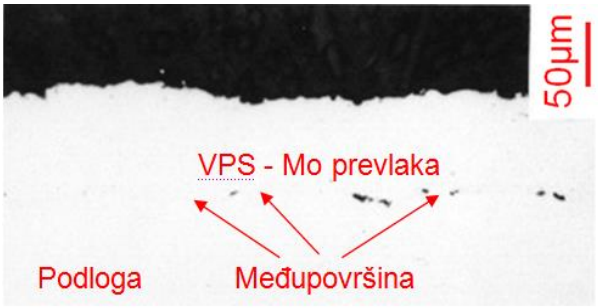
3. REZULTATI I DISKUSIJA

3.1. Rezultati ispitivanja prevlake

Srednja vrednost mikrotvrdoće slojevima Mo prevlake deponovane na niskom pritisku u zaštitnoj atmosferi je 210 $HV_{0.3}$ i znatno je niža od vrednosti mikrotvrdoće prevlake deponovane na atmosferskom pritisku (420 – 455 $HV_{0.3}$) [1,11]. Niža vrednost mikrotvrdoće je posledica otsustva kiseonika u okolnoj atmosferi. Čestice praha Mo su nestabilne u prisustvu O_2 i lako na površini formiraju okside. Zaštitna atmosfera i nizak pritisak u komori uz prisustvo redukcionog plazma gasa H_2 su sprečili formiranje oksida koji povećavaju mikrotvrdoću prevlake. Vrednosti mikrotvrdoće VPS – Mo prevlake ukazuju da kroz slojeve prevlake nisu prisutne lamele oksida MoO_3. Ovo je potvrđeno analizom mikrostrukture slojeva prevlake na optičkom mikroskopu (OM) i skening elektronskom mikroskopu (SEM). Srednja vrednost zatezne čvrstoće spoja između podloge i Mo prevlake bila je 70 MPa i znatno je viša od vrednost koje se dobijaju za prevlake deponovane na atmosferskom pritisku. Pošto su mikro pore i oksidi u direktnoj vezi sa vrednostima zatezne čvrstoće spoja, to

izmerene vrednosti ukazuju da je njihovo prisustvo u slojevima prevlake zanemarljivo ili eliminisano na niskim pritisku. Hrapavljenje površine podloga korundom i čišćenje površine transferovanim lukom je dodatno omogućilo bolje prijanjanje deponovanih čestica prevlake sa podlogom, zbog čega se dobila visoka vrednost čvrstoće spoja. Mehanizam razaranja prevlake je bio athezioni na međupovršini između podloge i prevlake. Vrednosti mikrotvrdoće i zatezne čvrstoće spoja bile su u direktnoj vezi sa njihovim mikrostrukturama, što je potvrđeno analizom mikrostrukture prevlaka.

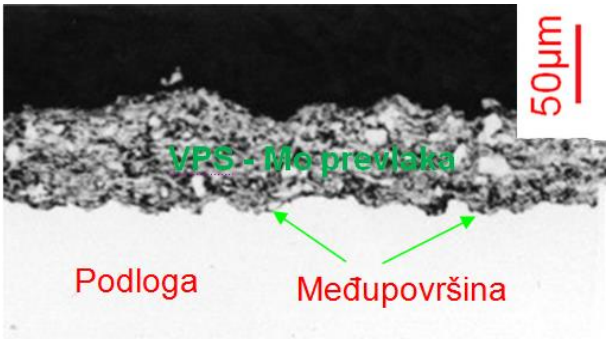
Slika 2 predstavlja tipičnu mikrostrukturu vakuum plazma sprej prevlake u kojoj nisu prisutne oksidne lamele crne boje. Inertna atmosfera argona na niskom pritisku potpuno je potisnula oksidaciju istopljenih čestica praha Mo, što je velika prednost u odnosu na prevlake deponovane na atmosferskom pritisku. Slojevi prevlake su ravnomerno deponovani na podlozi. Prevlala se sastoji od istopljenih čestica Mo koje su dobro sjedinjene. Kroz slojeve prevlake se ne uočavaju međulamelarne granice zbog dobre kohezione veze lamela i zanemarljivog udela mikro pora. Udeo mikro pora u slojevima prevlake je bio manji od 0,5%.



Slika 2. Mikrostruktura Mo prevlake u deponovanom stanju

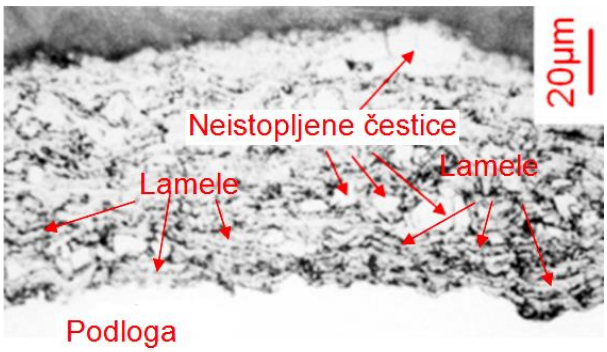
Figure 2. Microstructure Mo coatings in the state deposited

Na međupovršini između deponovanih slojeva prevlake i podloge nisu prisutni defekti kao što je diskontinuitet deponovanih slojeva na podlogama, mikropukotine, makropukotine i odvajanje prevlaka od osnove. Zbog dobrog vezivanja lamela Mo za površinu podloge, duž međupovršine se jasno ne vidi granica između prevlake i podloge. Nagrizanjem prevlake Mo (Sl.3 i Sl.4) jasno se uočava granica između podloge i prevlake. Prevlaka je nagrizena na međugranicama lamela i na granicama između neistopljenih čestica Mo i susednih lamela. Inače, poznato je da su granice mesta koja se lako nagrizaju zbog najvećeg sadržaja zaostalih napona.



Slika 3. Mikrostruktura Mo prevlake u nagrizenom stanju

Figure 3. Microstructure Mo coatings in the state etched



Slika 4. Mikrostruktura Mo prevlake u nagrizenom stanju

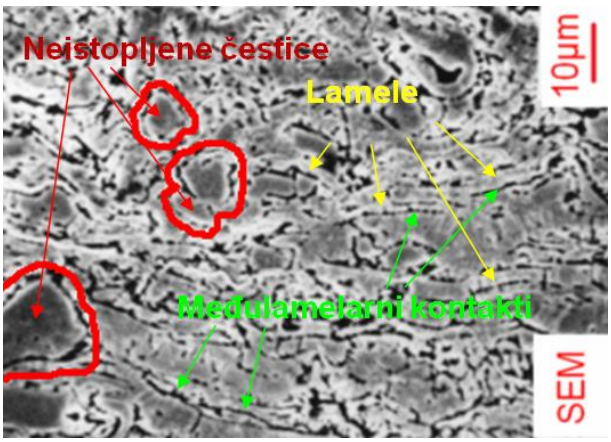
Figure 4. Microstructure Mo coatings in the state etched

U prevlaci se jasno vide neistopljene čestice (Sl.4) ugaonog i nepravilnog oblika bele boje, koje su dobro sjedinjene sa lamelama prevlake. Neistopljene čestice nisu uticale na koheziono / adhezionu čvrstoću prevlake. Istopljene čestica Mo su pravilno razlivene i imaju lamelarnu strukturu koja se sastoje od osnove Mo sa kubnu kristalnom rešetkom.

Da bi se jasnije videla mikrostruktura prevlake u deponovanom stanju, na slici 5. je prikazana SEM - mikrofotografija prevlake Mo. SEM mikrofotografija na poprečnog preseka Mo prevlake prikazuje izdužene i istopljene čestice praha Mo koje obrazuju lamelarnu strukturu sive boje koja je tipična za plazma sprej prevlake. Jasno se vide podužne zakrivljene međugranice lamela crne boje zbog nagrizanja. Na mikrofotografiji su ta mesta označena zelenim strelicama kao međulamelarni kontakti. Zbog nagrizanja prevlake jasno se vide granice crne boje oko neistopljenih čestica sive boje. Kroz slojeve prevlake se ne uočavaju mikro pukotine.

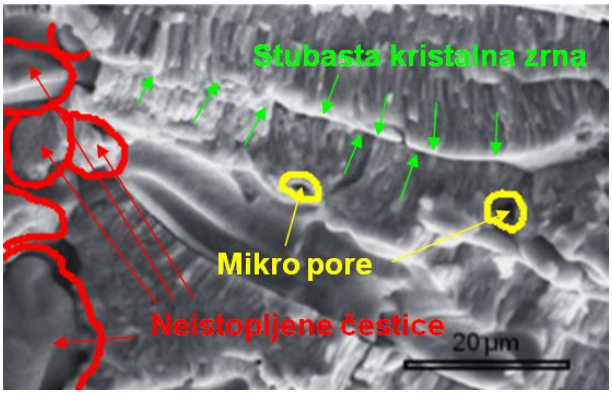
Na slici 6 je prikazana SEM - mikrofotografija površine loma Mo prevlake. Na površini loma

prevlake jasno se vide prelomi lamela i među lamelarni kontakti označeni zelenim strelicama i fine miko pore između lamela označene žutim strelicama. Debljina formiranih lamela je bila raspona od 8 μm do 12 μm. Na prelomu se jasno vidi struktura sa stubastim kristalnim zrnima. Stubasti kristali koji su prisutni u strukturi lamela imaju normalni pravac na pravac deponovanih lamela. Granice stubastih kristalnih zrna se jasno vide. Formiranje stubaste strukture je uzrokovano brzim očvršćavanjem istopljenih čestica na površini depozita, i to sloja po sloja kao mesta za nukleaciju i očvršćavanje do konačnog formiranja stubaste strukture.



Slika 5. (SEM) Mikrostruktura Mo prevlake u nagrizenom stanju

Figure 5. (SEM) Microstructure Mo coatings in the state etched



Slika 6. (SEM) Mikrostruktura loma površine Mo prevlake

Figure 6. (SEM) Microstructure of fracture surfaces of Mo coatings

U mikrostrukturi prevlake je prisutno nekoliko nepotpuno istopljenih čestica Mo sa istopljenim i zaobljenim ivicama u levom regionu mikrofotografije. Nepotpuno istopljene čestice iako nedeformisane u sudaru sa prethodno deponovanim slojem, ostvalile su dobru vezu sa osnovom prevlake.

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu eksperimentalnih istraživanja VPS – Mo prevlake i diskusije mehaničkih karakteristika, mikrostrukture slojeva, površine loma prevlake, došlo se do sledećih zaključaka.

Mo prevlaka deponovana vakuum plazma sprej tehnologijom na čeličnim podlogama imala je srednju vrednost mikrotvrdoće 210$HV_{0.3}$ i zateznu čvrstoću spoja 70MPa. Mehaničke karakteristike prevlake ukazuju da u slojevima prevlake nisu prisutni oksidi koji uvećavaju mikrotvrdoću i smanjuju adheziono / kohezionu čvrstoću prevlake. Ovo je potvrđeno analizom mikrofotografija sa optičkog mikroskopa (OM) i skening elektronskog mikroskopa (SEM). Mehanizam razaranja prevlake je bio adhezioni na međupovršini između slojeva prevlake i podloge.

Mikrostruktura prevlake je tipično lamelarna sa dobrim međulamelarnim kontaktima. U slojevima prevlake nisu prisutni međulamelarni oksidi. Prisutne neisopljene čestice praha koje su prisutne u porevlaci imale su dobru vezu sa osnovom prevlake i nisu uticale na kohezionu čvrstoću prevlake. Zbog dobre kohezione veze lamela, kroz slojeve prevlake se ne uočavaju međulamelarne granice. Slojevi prevlake su gusti sa udelom mikro pora manjim od 5%.

Analiza SEM morfologije poprečnog preseka prevlake molibdena je pokazala pravilnu deformaciju istopljenih čestica u sudaru sa podlogom koje su ostvarile dobru vezu sa prethodno deponovanim česticama. Kroz slojeve prevlake ne uočavaju se mikropukotine. Analiza loma prevlake je pokazala da se lamele sa dobrim među kontaktima sastoje od kristalnih stubastih kristalnih zrna sa jasnim među granicama, koja su vertikalna u odnosu na pravac deponovanih lamela.

Ispitivanja su pokazala da prevlake molibdena deponovane vakuum plazma sprej tehnologijom imaju mehaničke i strukturne karakteristike, koje u potpunosti omogućavaju primenu prevlake na površinama delova od kojih se zahteva da imaju dobra klizna svojstva, otpornost na habanje i koroziju.

Zahvalnica

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj (projekat broj OI 174004 & TR34016).

5. LITERATURA

[1] M.Mrdak, D.Kakaš, Đ.Popović (2005) Characterisation of APS – Mo wear resistant coatings, in: Proceedings of the 5th International Conference on Tribology – BALKANTRIB '05, Kragujevac, Serbia, p.235-239.

[2] M.Mrdak, A.Vencl, M.Ćosić (2009) Microstructure and mechanical properties of the Mo-NiCrBSi coating deposited by atmospheric plasma,University

of Belgrade - Faculty of Mechanical Engineering FME TRANSACTIONS, 37(1), 27-32.
[3] A.Vencl, S.Arostegui, G.Favaro, F.Zivic, M.Mrdak, S.Mitrović, V.Popovic (2011) Evaluation of adhesion/cohesion bond strength of the thick plasma spray coatings by scratch testing on coatings cross-sections, Tribology International, 44(11), 1281-1288.
[4] M.Mrdak, Č.Lačnjevac, M.Rakin (2018) Mechanical and structural features of Nb coating layers deposited on steel substrates in a vacuum chamber, Zastita materijala, 59(2), 167-172.
[5] Mrdak M.R. (2018) Characterization of the vacuum plasma sprayed VPS-Ti / TiC composite coatings, Vojnotehnički glasnik / Military Technical Courier, 66(3), 551-562.
[6] M.Mrdak, Č. Lačnjevac, M. Rakin, N. Bajić (2018) Characterization of tantalum coatings deposited using vacuum plasma spray process, Zastita materijala, 59(4), 489-495.
[7] X.L.Jiang, M.I.Boulos (2001) Particle melting, flattening, and stacking behaviors in the induction plasma deposition of tungsten [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 11(5), 811-816.
[8] M.Mrdak (2017) Karakterizacija plazma sprej bioinertne kompozitne prevlake Al2O325tež. %(ZrO28%Y2O3), Zastita materijala, (58)4, 509-515.
[9] M.Mrdak (2013) Characterization of vacuum plasma sprayed cobalt-nickel-chromium-aluminum-yttrium coating, Vojnotehnički glasnik/Military Technical Courier, 61(4), 26-47.
[10] M.R.Mrdak (2016) Monografija: Plazma sprej procesi i svojstva zaštitnih prevlaka, IHIS Techno experts d.o.o, Beograd.
[11] Material Product Data Sheet (2013) Pure Molybdenum Powders for Thermal Spray Thermal Spray Powder Products Metco 63NS, DSMTS-0105.3, Sulzer Metco.
[12] P.K.Bai, B.Liu, S.L.Hu (2008) Laser rapid prototyping process of Mo-Cu composites part, Chinese journal of nonferrous metals, 18(8), 1094-1099.
[13] D.French, H.J.Hurst, P.Marvig (2001) Comments on the use of molybdenum components for slag viscosity measurements, Fuel Processing Technology, 72(3), 215–225.
[14] A.Koutsomichalis, H.Badekas (1993) Corrosion behavior of molybdenum plasma spray coatings on steel [J]. Scripta Metall Mater, 29(8), 1125-1132.
[15] S.C.Tjong, T.S.Ku, C.S.Wu (1994) Corrosion behavior of laser consolidated chromium and molybdenum plasma spray coatings on Fe-28Mn-7Al-1C alloy [J]. Scripta Metall Mater, 31(7), 835-846.
[16] B.Hwang, J.Ahn, S.Lee (2005) Effects of blending elements on wear resistance of plasmasprayed molybdenum blend coatings used for automotive synchronizer rings, Surface and Coatings Technology, 194, 256 – 264.
[17] Turbojet Engine – Standard Practices Manual (PN 582005) (2002) Pratt & Whitney, East Hartford, USA.

ABSTRACT

MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF MOLYBDENUM COATING LAYERS DEPOSITED VACUUM PLASMA SPRAY PROCESS

Molybdenum coatings due to their excellent wear resistant properties and sliding characteristics under dry friction conditions are often used in applications to resist friction and dry sliding. Since molybdenum metal is susceptible to oxidation, in this study, the molybdenum coating layers were successfully deposited at low pressure inert gas Ar using vacuum plasma spray technology (VPS). Characterization of the Mo coating was performed by measuring the microhardness of the coating layers using the Vickers $HV_{0.3}$ method, the bond strength by tensile testing and the microstructure by optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM). The microstructure of the coating layers was tested in deposited stateand after etching. The etching reagent used was $NH_3 \cdot H_2O$ and H_2O_2 with a volume ratio of 1:2. The results showed that the coating has good mechanical properties, microhardness and high adhesion/cohesion strength. Layers of VPS - Mo coatings were composed of well-melted powder particles, partially unmelted particles with a good bond in the coating layers and micropores with a share below 0.5%. It was found that the microstructure of the coating consists mainly of lamellar structure and columnar crystal Mo grains. Tests have shown that the VPS - Mo coating layers have mechanical characteristics and a microstructure which fully enables the use of the coating on surfaces of parts which are required to have good sliding properties, resistance to wear and corrosion.

Keywords: *Molybdenum, vacuum plasma spray (VPS), microstructure, microhardness, bond strength.*

Scientific paper
Paper received: 12. 02. 2019.
Paper accepted: 20. 03. 2019.
Paper is available on the website: www.idk.org.rs/journal

© 2018 Authors. Published by Engineering Society for Corrosion. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)