

MATERIJAL ZA PREDAVANJA IZ PREDMETA

REPARACIJA MAŠINSKIH DELOVA I

KONSTRUKCIJA

Postupci termičkog raspršivanja - metalizacija
(Handout 3)

Prof. dr Miloš Đukić

Beograd, 2022

Metalizacija

Imajući u vidu različitost uslova (parametara radne sredine, okruženja) kojima su površine različite opreme (delova opreme, komponente, elementi) izložene tokom rada, kao i oštećenja koja se sledstveno tome mogu da jave (korozija, erozija, habanje,...) razvijen je veliki broj metoda čijom primenom je moguće **zaštiti opremu ili je popraviti**. Znači, izbor metode nanošenja prevlaka, pre svega, zavisi od toga da li je potrebno obezbediti zaštitu površina od radnih uslova ili je potrebno izvršiti popravku oštećenog dela. Nanošenje prevlaka može da se izvede:

- elektrohemijskim ili hemijskim postupcima
- difuzionim postupcima
- metalizacijom (postupcima termičkog raspršavanja)
- postupcima navarivanja
- postupkom livenja.

1. Elektrohemijski i hemijski postupci

Elektrohemijski postupci se odnose na obrazovanje galvanskih prevlaka koje se dobijaju elektrolitičkim taloženjem metala na površinu osnovnog materijala koji ima ulogu katode. Metalne prevlake koje se dobijaju na katodi imaju kristalnu strukturu, pa se proces elektrolitičkog taloženja često naziva i elektrokristalizacija. Na karakter prevlake, odnosno njenu strukturu, tvrdoću, unutrašnje napone, sjaj utiče veliki broj faktora, kao što su: gustina struje, koncentracija elektrolita, njegova priroda, temperatura, mešanje i prisustvo površinski aktivnih supstanci u elektrolitu. Za elektrohemijske reakcije je karakteristično da može da se utiče na njihovu brzinu, od koje zavisi da li će se dobiti kompaktna površina ili sunderasta, sjajna ili mat, itd.

Za razliku od galvanskih, hemijski postupci su tehnološko jednostavniji i jeftiniji, ne samo po izvođenju već i po opremi (kade, kuke, kranovi). Ovim postupcima se izvodi zaštita predmeta velikih dimenzija i komplikovanih oblika, prevashodno od korozije.

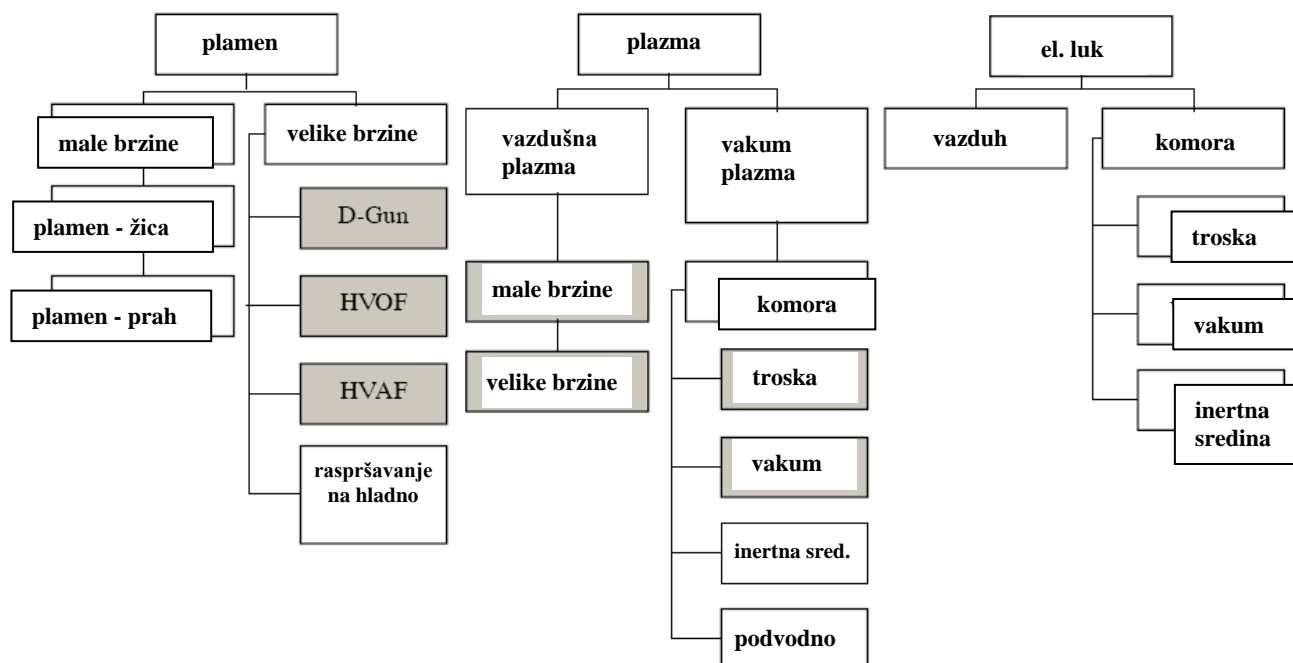
2. Difuzioni postupci

Difuzioni postupci se zasnivaju na zasićenju površinskih slojeva metalnih predmeta različitim elementima, prvenstveno metalima (difuzioni postupci se stoga često nazivaju i postupci difuzione metalizacije) putem difuzije iz spoljašnje sredine. Ovim postupcima se uglavnom podvrgavaju čelici, a naziv postupka zavisi od elementa kojim se površinski slojevi difuzionu obogaćaju, npr. alitiranje ako se vrši zasićavanje aluminijumom, hromiranje ako se vrši zasićavanje hromom, siliciranje ako se vrši zasićavanje silicijumom, pocinkovanje ako se vrši zasićavanje zinkom, boriranje ako se vrši zasićavanje borom, berilizacija ako se vrši zasićavanje berilijumom, itd. Sredina u kojoj se izvode postupci difuzione metalizacije može da bude gasovita, tečna ili čvrsta.

Postupci difuzione metalizacije se izvode zagrevanjem metalnog predmeta do potrebne temperature u sredini koja je bogata na elementu kojim se difuziono obogaćuje površina predmeta i držanjem u tim uslovima dovoljno dugo vreme da se ostvari potrebna dubina difuzionog sloja, posle čega se vrši hlađenje. Tako npr. pri hromiranju, najčešće se koriste hromatizovane granule (FeCr). Granule se zagrevaju u aktivnoj atmosferi (H_2+HCl) na oko $850^{\circ}C$, atomi hroma se aktiviraju, adsorbuju na površinu osnovnog metala i difunduju u površinu.

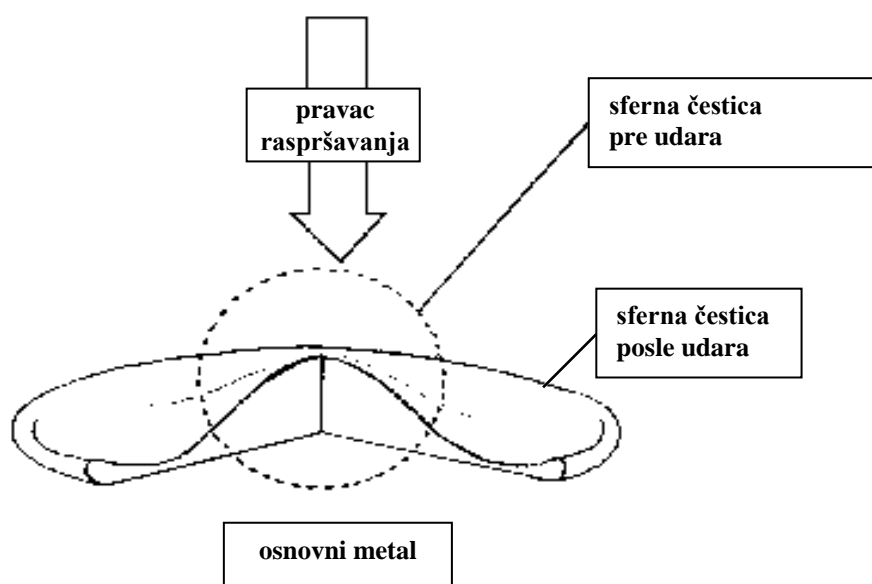
3. Postupci termičkog raspršavanja - metalizacija

Metalizacija obuhvata čitav niz postupaka, slika 3.1, u kojima se čestice rastopljenog ili omekšalog materijala (metal, legura, metal-oksidi-karbid) raspršavanjem nanose na prethodno pripremljenu površinu (može da bude metal, sintetika, gips, drvo, staklo) gde obrazuju prevlaku. Kao specijalni postupak nanošenja prevlaka primenjuje se i postupak metalizacije detonacijom.



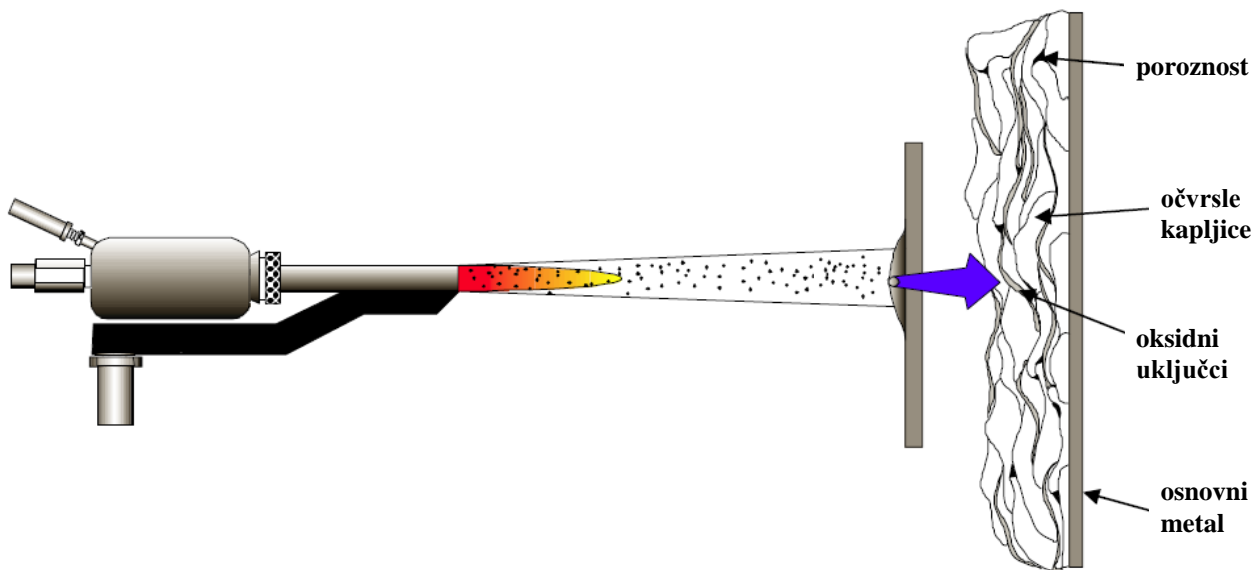
Slika 3.1. Sumarni pregled najznačajnijih postupaka metalizacije

Šematski prikaz termički raspršene čestice (rastopljene, omekšale) i oblika koji poprima nakon udara u ravnu površinu je dat na slici 3.2.

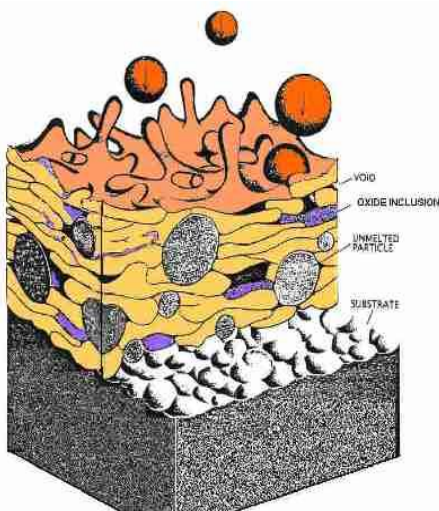


Slika 3.2. Šematski prikaz promene oblika čestice posle raspršavanja a pri udaru o ravnu površinu

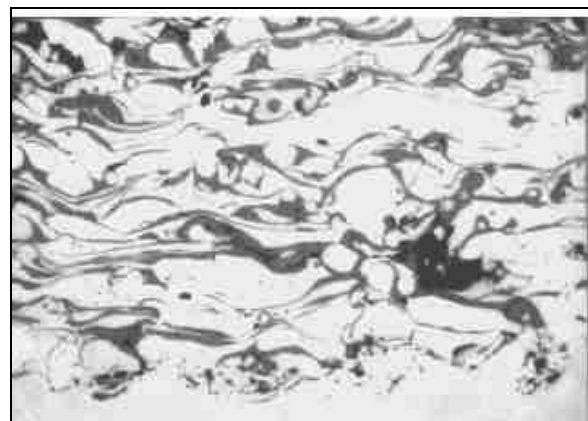
Materijal koji se koristi za prevlačenje u početnoj fazi je uvek žica ili prah. Debljina nanete prevlake zavisi od upotrebe osnovnog materijala, i često može da se nanosi bez ograničenja. Tehnike metalizacije su različite: može da se vrši metalizacija gasno plamenim raspršavanjem, raspršavanjem električnim lukom ili raspršavanjem plazmom kao što je detaljno predstavljeno na slici 1. Na slici 3.3 je šematski prikazan postupak termičkog raspršavanja i mehanizam nanošenja prevlake. Rastopljene ili omekšale čestice se, pri udarnom dodiru sa hladnom površinom, razlivaju velikom brzinom. Prevlake obrazovane termičkim raspršavanjem uobičajeno imaju sočivastu ili lamelarnu strukturu zrna, slike 3.4 i 3.5, koja je posledica očvršćavanja sitnih čestica / kapljica velikom brzinom.



Slika 3.3. Šematski prikaz postupka termičkog raspršavanja i mehanizam nanošenja prevlaka



Slika 3.4. Šematski prikaz izgleda mikrostrukture prevlake obrazovane termičkim raspršavanjem



Slika 3.5. Tipična mikrostruktura prevlake obrazovane termičkim raspršavanjem. Lamelarna struktura je prošarana oksidnim uključcima i porama

Mehanizam veze koji se javlja između osnovnog metala i prevlake nanešene termičkim raspršavanjem još uvek nije previše jasan, ali se veruje da nastaje istovremenim delovanjem mehaničkog povezivanja i difuzione veze, odnosno metalurške veze. Pored ove dve veze sigurno je da deluju i drugi mehanizmi vezivanja kao što su adhezivne, hemijske i fizičke veze, oksidni filmovi, Van der Waalsove veze.

Faktori koji utiču na vezivanje i obrazovanje prevlake su:

- Čistoća površine - čišćenje i odmašćivanje su važne operacije pri pripremi površine osnovnog materijala, jer je za ostvarivanje dobrog vezivanja neophodna hemijski i fizički aktivna površina.
- Veličina površine - što je površina za metalizaciju veća utoliko će biti veća i čvrstoća veze prevlake.
- Topografija površine i profil – gruba i hrapava površina pogoduje mehaničkom vezivanju osnovnog materijala i prevlake.
- Temperatura (termička energija).
- Vreme (brzina reakcije, brzina hlađenja, itd...) – brzina hlađenja individualne čestice pri udaru je reda veličine 1 milion $^{\circ}\text{C/s}$ (10^6Ks^{-1}). Ovaj podatak ukazuje na to da je termička interakcija veoma ograničena, ali i da ga treba imati na umu kada je reč o difuzionoj vezi (temperaturski i vremenski zavisna).
- Brzina (kinetička energija) čestica.
- Fizičke i hemijske osobine čestica.
- Fizičko - hemijske reakcije.

Povećanje termičke i kinetičke energije povećava mogućnost za ostvarivanje metalurške veze (temperatura, brzina, entalpija, masa, gustina, količina specifične toplote, ..). Dodatni materijali za metalizaciju kao što su molibden, volfram i aluminijum/metalni kompozit proizvode tzv. "samo vezujuće" prevlake. Ovi materijali se odlikuju velikom čvrstoćom veze (povećan udeo metalurške ili difuzione veze) i mogu da se dobro vezuju za čistu površinu supstrata. Molibden i drugi refraktorski metali imaju veoma visoku temperaturu topljenja, što direktno utiče na povećanu interakciju između supstrata i čestica prevlake (viša temperatura i duži ciklus hlađenja). Takođe, oksid molibdena isparava i ne učestvuje u obrazovanju metalurške veze.

Aluminijum/metalni kompozit povećavaju nivo egzotermne reakcije zbog reakcije aluminijuma sa metalima kao što je nikl u kom slučaju se obrazuje nikl-aluminat, odnosno sa kiseonikom u kom slučaju se obrazuje aluminijum oksid. Povećana termička aktivnost povećava stepen difuzionog vezivanja.

Viša temperatura predgrevanja supstrata povećava aktivnost za ostvarivanje difuzione veze, ali i sklonost ka oksidaciji osnovnog metala što može da smanji mogućnost postizanja velike čvrstoće veze. Velika kinetička energija termičkog raspršavanja primenom HEP (plazma visoke energije) i HVOF i hladnog raspršavanja pogoduje ostvarivanju velike čvrstoće veze sa podlogom i međusobno između čestica, kao što je slučaj npr. pri primeni WC/Co praha velike gustine i prevlaka dobijenih hladnim raspršavanjem. Metalurška ili difuziona veza se javlja u ograničenom broju slučajeva i do vrlo ograničenih debljina (max 0.5 μm sa zonom uticaja toplote do $\sim 25\mu\text{m}$) u slučaju ovih vrsta prevlaka.

Kod prevlaka koje se obrazuju iz rastopljenog stanja, zbog toga što su čestice potpuno istopljene, dolazi do obrazovanja potpune metalurške veze i između čestica i osnovnog materijala i međusobno između čestica.

Mikrostruktura prevlaka. Izrazito velika brzina hlađenja (10^6Ks^{-1}) čestica može da utiče na obrazovanje neuobičajene amorfne (staklasti metali) i mikrokristalne strukture i pojavu metastabilnih faza, odnosno struktura koje nisu karakteristika vučenih ili livenih metala.

Termičko raspršavanje se većim delom izvodi u vazduhu ili se vazduh koristi za atomizaciju. Tokom raspršavanja se javlja hemijska interakcija, odnosno oksidacija. Metalne čestice oksidišu po svojoj površini obrazujući oksidnu ljusku, čije prisustvo je evidentno u mikrostrukтури prevlake pri čemu oksidni uključci doprinose isticanju granica zrna ili granica čestica. Neki materijali (npr. titan) interaguju ili apsorbuju druge gasove kao što su vodonik i azot.

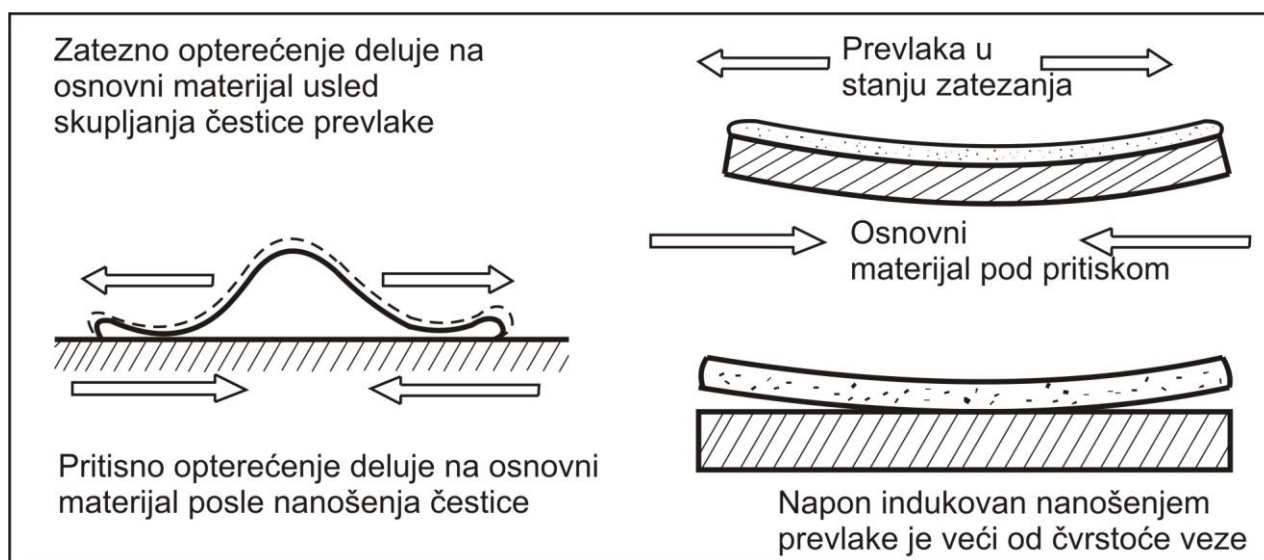
Prevlake imaju lamelarnu strukturu, odnosno izdužena zrna koja su paralelna sa osnovnim materijalom. Struktura stoga nije izotropna, a fizičke/mehaničke osobine su anizotropne, odnosno

različite u podužnom (paralelno sa supstratom) i poprečnom (po debljini prevlake) pravcu. Čvrstoća u podužnom pravcu može da bude 5 do 10 puta veća nego u poprečnom pravcu.

Struktura prevlake je heterogena između ostalog i zato što ne mogu da se izbegnu varijacije u stanju pojedinačnih čestica pri udaru. Naime, praktično je nemoguće stvoriti uslove da sve čestice imaju istu veličinu i da dostignu istu temperaturu i brzinu. Sve prevlake obrazovane konvencionalnim postupcima termičkog raspršavanja sadrže izvestan stepen poroznosti koji se kreće u vrlo širokom opsegu (0.025% do 50%). Poroznost je posledica:

- male udarne energije (nerastopljene čestice / mala brzina)
- efekata zasenčenja (nerastopljene čestice / ugao raspršavanja)
- skupljanja i efekata relaksacije napona.

Naponi. Hlađenje i očvršćavanje većine materijala je udruženo sa njihovom kontrakcijom ili skupljanjem. U trenutku udara o površinu osnovnog materijala, čestica se hladi i očvršćava. Ovi procesi izazivaju zatezne napone unutar čestica i pritisne napone unutar površine podloge, slika 3.6. Kako se podloga nadgrađuje (povećava se debljina), tako rastu i zatezni naponi u prevlaci, koji u jednom trenutku, pri velikoj debljini prevlake, mogu da postanu veći od čvrstoće veze, odnosno kohezivne čvrstoće što će da dovedo do pucanja (loma) prevlake.



Slika 3.6. Naponi koji se indukuju pri termičkom raspršavanju

Materijali koji imaju veliki stepen skupljanja, kao što su neki austenitni čelici, su skloni ka pojavi visokog nivoa napona zbog čega kod njih postoji ograničenje u debljini prevlake koja može da se obrazuje. U svakom slučaju, tanke prevlake su dugotrajnije u poređenju sa prevlakama velike debljine.

Pored debljine prevlake, na nivo napona u prevlaci utiču i postupak raspršavanja i mikrostruktura prevlake. Generalno, prevlake veće gustine se odlikuju višim nivoom napona nego porozne prevlake, pa stoga npr. prevlake obrazovane gasno plamenim postupkom raspršavanja imaju veću graničnu debljinu nego prevlake obrazovane plazma raspršavanjem (veća gustina).

Nasuprot uočenih karakteristika koje se dobijaju kod konvencionalnih postupaka termičkog raspršavanja, kod modernih postupaka kao što su (HVOF, HEP, hladno raspršavanje) zbog izrazito velike kinetičke energije i male termičke energije moguće je dobiti prevlake skoro bez napona i sa vrlo velikom gustinom. Veruje se da je razlog ove pojave obrazovanje pritisnih napona koji su posledica mehaničke deformacije (slično površinskom ojačavanju) pri udaru čestice koja sprečava (otežava) pojavu zateznih napona usled skupljanja čestica pri očvršćavanju i hlađenju.

Osobine prevlaka. U tabeli 3.1 su date neke osobine prevlaka u poređenju sa osobinama odgovarajućeg ekvivalenta u livenom, odnosno vučenom stanju.

Tabela 3.1: Poređenje osobina prevlaka i odgovarajućeg ekvivalenta u livenom /vučenom stanju

OSObine	PREVLAKA	LIVENO/VUČENO
Čvrstoća	niska (5 – 30%)	100%
Duktilnost	veoma niska (1 – 10%)	100%
Osetljivost na udar	niska	visoka
Poroznost	da (ne u slučaju rastopa)	u nekim odlivcima
Tvrdoća	neznatno veća (mikrotvrdoća)	referentna vrednost
Otpornost na habanje	visoka	niska
Korozija	mala/ veoma velika otpornost	dobra/velika otpornost
Obradljivost	slaba	dobra

Prikazani podaci, generalno, ne prikazuju osobine samih prevlaka u dobrom svetlu. Međutim, treba istaći da se kombinacija prevlaka – podloga odlikuje mnogo boljim osobinama nego sama prevlaka. Takođe, prevlake se koriste da poboljšaju površinske osobine materijala, kao što je otpornost na habanje a ne da doprinesu povećanju čvrstoće osnovnog materijala. Takođe, osobine prevlaka treba razmatrati ne u njihovom polaznom stanju pre termičkog raspršavanja, već posle njega jer im se značajno razlikuju fizičke i hemijske osobine.

Poroznost. Poroznost je prisutna kod većine termički raspršenih prevlaka (izuzev prevlaka naknadno termički obrađenih ili obrazovanih iz rastopa). Uobičajena veličina poroznosti je 1 - 25% ali i ona može da se kontroliše (smanji) promenom parametara procesa i materijala. Poroznost je nepovoljna u slučaju: korozije, završne mašinske obrade i čvrstoće / mikrotvrdoće / habanja.

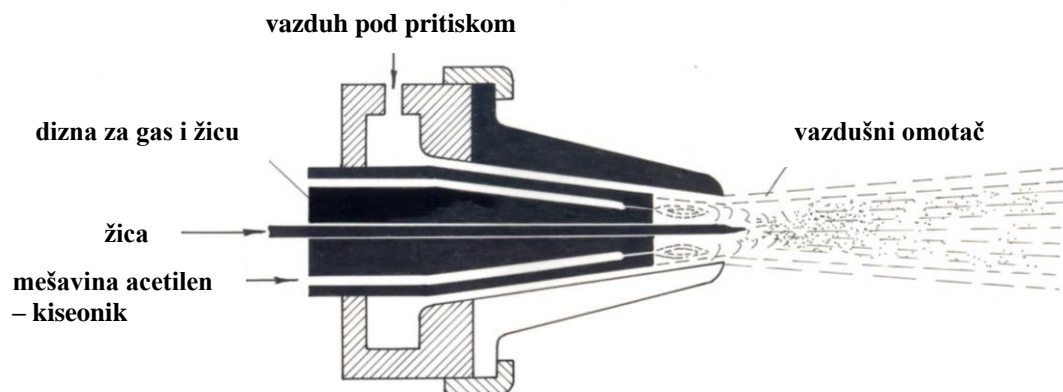
Oksidi. Većina metalnih prevlaka je podložna oksidaciji pri uobičajenom termičkom raspršavanju u vazduhu. Proizvodi oksidacije su obično sadržani u prevlaci. Pošto su oksidi mnogo tvrđi od materijala koji oksidira, onda su i prevlake koje sadrže veliku količinu oksida mnogo tvrđe i imaju bolju otpornost na habanje nego one bez njih. Isto tako, prevlake sa oksidima su osetljive na koroziju, imaju manju čvrstoću i lošu obradljivost.

Čvrstoća. Prevlake se, generalno, odlikuju niskim karakteristikama čvrstoće, duktilnosti i otpornosti na udar. Ove osobine su diktirane "najslabijom karikom u lancu" što u prevlakama predstavljaju čestice ili granice zrna kao i međupovršina prevlaka-podloga. Prevlake su osetljive na opterećenje koje mogu da nose, zbog čega im je neophodna podloga, mada je i tada njihova nosivost nezadovoljavajuća. Unutrašnji zatezni naponi u prevlaci su nepovoljni. Efektivna čvrstoća veze zbog njihovog prisustva je smanjena i može da se prekine ako dođe do porasta unutrašnjih napona. Kao što je već istaknuto, ovaj efekat se odražava na ograničenje u debljini prevlake.

Površinske osobine kao što je otpornost na habanje su uglavnom dobre, s tim što veoma zavise od materijala koji se koristi za prevlačenje.

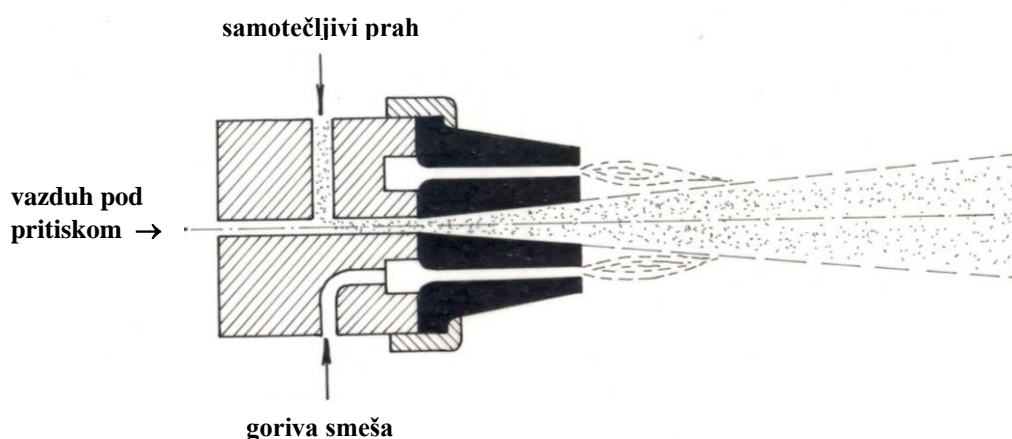
3.1. Gasno plamena metalizacija

Gasno plamena metalizacija (termičko raspršavanje) je postupak u kojem se rastopljene ili omekšale čestice "udarom" nanose na osnovni materijal (supstrat). Pored sistema kod kojeg se metalna žica topi u gasnom plamenu (najčešće mešavina acetilen – kiseonik ili propan – kiseonik), slika 3.7, razvijen je i postupak za raspršavanje materijala u obliku praha, slika 3.8. Praškasti materijal se iz kontejnera pod uticajem gravitacije uvodi u plamenik, u kojem se u struji smeše kiseonika i acetilena (ili kiseonika i vodonika) nosi ka dizni plamenika. Prah se u plameniku skoro trenutno rastapa i raspršava, odnosno nanosi na površinu materijala. Ovaj postupak karakteriše visoka efikasnost deponovanja prevlake (više od 90%). Dobijene prevlake su prilično velike gustine i imaju dosta dobru čvrstoću prijanjanja za osnovni materijal.



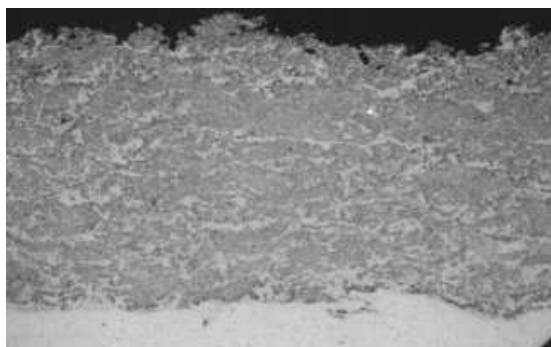
Slika 3.7. Plamenik za žicu za gasno plamenu metalizaciju

Iako opisani postupak ima široku primenu, ima i izvesna ograničenja zbog niske temperature plamena ($\sim 4000\text{ K}$) i male brzine "preleta" rastopljenih čestica ($5 - 10\text{ m/s}$). Upravo ova ograničenja su dovela do razvoja i unapređenja postupka termičkog raspršavanja gasnim plamenom u smislu postizanja velikih brzina preleta rastopljenih čestica strujom kiseonika, odnosno vazduha (high velocity oxygen flame – HVOF, high velocity air flame – HVOF), kao i konstrukcijom samog pištolja za raspršavanje – D-gun.



Slika 3.8. Plamenik za prah za gasno plamenu metalizaciju

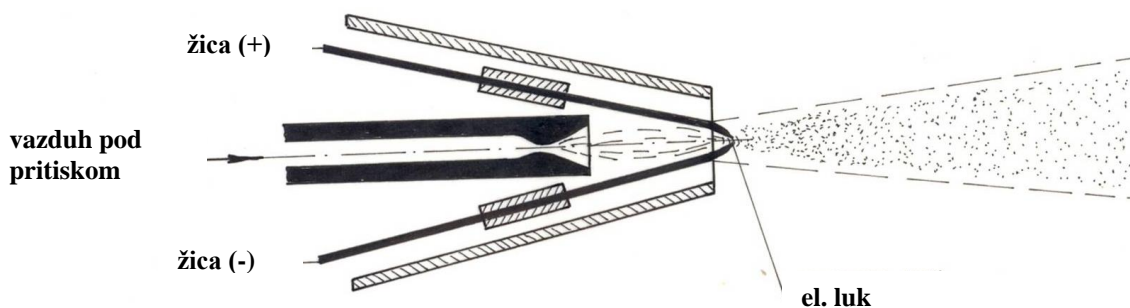
Izgled mikrostrukture prevlake dobijene gasno plamenim termičkim raspršavanjem velikom brzinom u struji kiseonika (HVOF) je prikazan na slici 3.9.



Slika 3.9.
Mikrostruktura prevlake dobijene HVOF
termičkim raspršavanjem WC/12% Co

3.2. Metalizacija električnim lukom

Kod postupka metalizacije električnim lukom, raspršavanje se izvodi električnim lukom koji se stvara između dve izolovane žice postavljene pod ostrim uglom od $\sim 30^\circ$, koje istovremeno predstavljaju materijal za raspršavanje. Sam uređaj za metalizaciju je elektrolučni pištolj, slika 3.10. Usled Džulove toplote u zoni dodira žica, uspostavlja se električni luk koji izaziva topljenje i delimično isparavanje metala sa jonizacijom u prostoru luka. Odvajanje i raspršavanje rastopljenog materijala se vrši komprimovanim vazduhom koji, sa pravilno regulisanim naponom, strujom luka i vođenjem žice, sprečava međusobno zavarivanje žica.

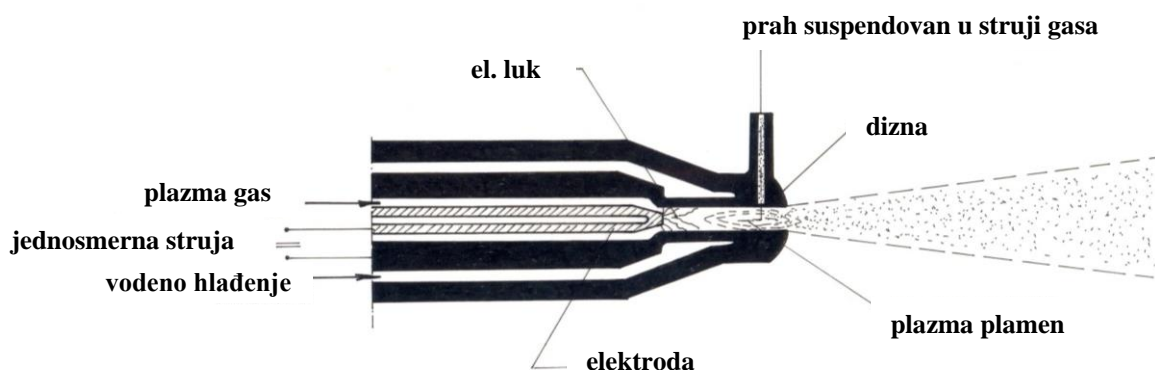


Slika 3.10. Elektrolučni pištolj za metalizaciju - plamenik

Ovim postupkom se dobijaju prevlake visoke tvrdoće i otpornosti na habanje. Athezioni čvrstoća ovako nanetih prevlaka je veoma visoka a često veća i od kohezione čvrstoće prevlaka. Postupak elektrolučnog raspršavanja omogućava primenu svih materijala koji se odlikuju električnom provodljivošću, a efikasnost postupka i osobine dobijenih prevlaka ga favorizuju u odnosu na postupak gasno plamenog raspršavanja. Poseban napredak u primeni ove tehnologije je postignut kada su kao materijali za prevlake počeli da se koriste karbidi metala i legirane elektrode.

3.3. Metalizacija plazmom

U postupku termičkog raspršavanja plazmom, kao izvor toplote, koriste se visokojonizovani gasovi (plazma). U plameniku, u kojem je katoda od volframa a anoda od bakra, slika 3.11, uspostavlja se luk kroz koji prolazi inertni gas. Početni sudari sa atomima i molekulima gasa prouzrokuju jonizaciju atoma i disocijaciju dvoatomnih gasova što je praćeno oslobađanjem toplote i svetlosti. Plamenik je tako konstruisan da obrazuje suženje luka čime se postiže povećanje gustine struje i entalpije gasa, odnosno vrlo visoke temperature (do 20000 K) i brzina poleta stopljenih čestica (0.8 – 3 maha).



Slika 3.11. Šematski prikaz gorionika za plazmu

Raspršavanje se ostvaruje doziranjem praha u takav luk u strogo određenim količinama. Primena plazma postupka, sa svim varijacijama prikazanim na slici 3.1, za nanošenje prevlaka termičkim raspršavanjem je jedan od najefektivnijih načina za dobijanje prevlaka različite namene. Neki podaci iz literature pokazuju da je ovim postupkom moguće povećati radni vek delova mašina za više od 10 puta.

Prednosti metalizacije plazmom u odnosu na klasičnu gasno plamenu metalizaciju su:

- mogućnost primene gasova različitih vrsta za obrazovanje struje plazme (neutralni, redukujući, oksidujuć) što omogućava elastično regulisanje sastava grejne sredine pri nanošenju prevlake,
- porast temperature procesa, što između ostalog značajno proširuje asortiman materijala za obrazovanje prevlaka,
- smanjenje termičkog dejstva struje, u kom slučaju kao podloga mogu da se koriste i plastične mase i hartija,
- dobijanje prevlaka boljeg kvaliteta (manja poroznost, veća gustina, bolja čvrstoća prijanjanja uz osnovni materijal, itd.), slika 3.12.



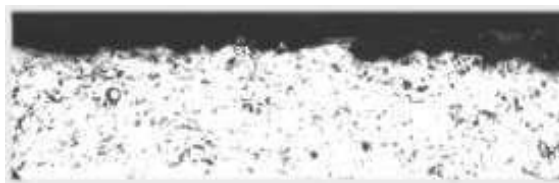
Gasno plamena metalizacija, Grubi
80/20 NiCr prah



Gasno plamena metalizacija, Fini
80/20 NiCr prah



Plazma metalizacija, Grubi
80/20 NiCr prah



Plazma metalizacija, Fini
80/20 NiCr prah

Slika 3.12. Poređenje veličine zrna prevlaka od istog materijala dobijenih gasno plamenom metalizacijom i metalizacijom plazmom

3.4. Metalizacija detonacijom

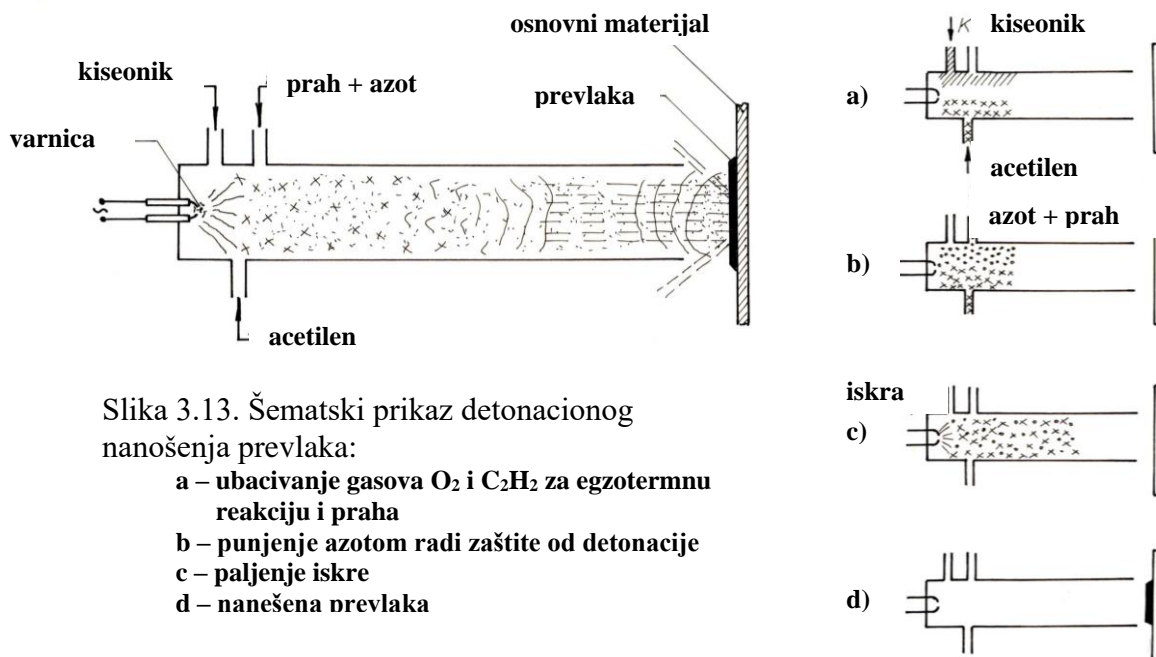
Metod nanošenja prevlaka detonacijom zasniva se na korišćenju energije detonacije (eksplozije) gasne smeše koja služi za zagrevanje i ubrzanje čestica praška koji se nanosi na osnovu. Detonacija može da bude pobuđena u gasno-vazдушnim i gasno (C_2H_2)-kiseoničnim smešama gasova sa određenim odnosom komponenti. Glavni parametar detonacionog procesa je brzina detonacije, odnosno brzina premeštanja površine koja deli praskavi gas od produkata sagorevanja. Ova površina je stvorena detonacionim talasom, a brzina njenog širenja u $O_2 - C_2H_2$ smeši sa istim sadržajem oba gasa dostiže oko 3000 m/s pri temperaturi eksplozije višoj od 3200 °C.

Proces nanošenja prevlake se odvija u nekoliko faza. Sitnodisperzni prašak materijala za prevlaku se raspršuje u praskavom gasu optimalnog sastava koji ispunjava dugačku cev zatvorenu na jednom kraju, slika 3.13. Nakon uvođenja praškastog materijala, cevi se pune azotom radi zaštite od detonacije. Pod dejstvom električne varnice u smeši nastaje normalno gorenje koje na nekom rastojanju od tačke paljenja prelazi u detonaciju. Detonacioni talas opstrujava čestice praška, koje su zatim zahvaćene strujom zapaljivih produkata sagorevanja koja sledi iza talasa. U toj struji se čestice praška zagrevaju do plastičnog stanja i dobijaju nadzvučnu brzinu. Struja čestica, koja se širi velikom brzinom, sudara se sa podlogom, očvršćava i obrazuje prevlaku.

Uređaj za detonaciju je detonaciona puška kalibra cevi 12 – 25 mm i dužine 40 : 60 kalibra. Prevlaka se nanosi serijom uzastopnih pucnjeva. Deo na koji se nanosi prevlaka se pri tome uzastopno pomera ispred otvora cevi pomoću različitih uređaja kojima se upravlja sa određene udaljenosti.

Detonacionom metodom mogu da se dobiju prevlake praktično od svih metala i legura bez njihove bitne oksidacije, što je uglavnom karakteristika prethodnih postupaka. Takođe, prethodna priprema površine po pravilu nije obavezna, jer se prevlake poednako dobro nanose na hrapave, polovne i zamašćene površine.

Prevlake dobijene ovim postupkom ce odlikuju glatkom površinom, velikom gustinom i malom poroznošću, max 1%.



3.5 Materijali za prevlake

Pojava novih konstrukcija raspršivača u kojima se za zagrevanje i ubrzavanje čestica koristi plazmena struja ili energija detonacije dovodi do mogućnosti primene praktično svih materijala za raspršavanje. Pri tome je važno da materijal u toku procesa topljenja ne isparava i da ne menja bitno svoja svojstva.

3.5.1 Materijali za raspršavanje u obliku žice

U većini slučajeva se za postupke raspršavanja koristi materijal u vidu žice. Ravnomernim uvođenjem žice u gorionik, obezbeđeni su uslovi za povećanu postojanost procesa raspršavanja i kvalitet dobijene prevlake.

Cink za raspršavanje može da bude različite čistoće; uglavnom se koristi čistoće veće od 99,6% mada je u upotrebi i elektrolitički cink koji ima čistoću veću od 99,97%. Što je čistoća cinka veća, stvoreni su uslovi da se pri raspršavanju dobiju i manje čestice, što će da obezbedi ne samo kompaktnije nanošenje prevlake već će i njena obradljivost da bude bolja. Da bi se izvelo kvalitetno raspršavanje, na površini žice se ne dozvoljava prisustvo masnoće. Prevlake od cinka pri debljinama od 0,2-0,3 mm obezbeđuju u punoj meri zaštitu materijala, pre svega od korozije. Dalje povećanje debljine prevlake može da pogorša uslove spajanja raspršenog metala sa osnovom, a time i zaštitna svojstva prevlake. Cink se u osnovi koristi za zaštitu čelika od korozije.

Aluminijum se koristi za raspršavanje ako mu čistoća prelazi 99,85%, odnosno 99,95% u slučaju prečišćenog aluminijuma. Prisustvo bakra i železa u aluminijumu znatno snižava njegova antikorozijska svojstva. Zbog toga je za antikorozijske prevlake od aluminijuma potrebna visoka čistoća, tj. mali sadržaj železa i bakra. Aluminijum se koristi za prevlake kod čeličnih konstrukcija koje rade u uslovima u kojima je prisutan sumpor i razni gasovi, u amonijaknim sredinama i drugim agresivnim sredinama. Takođe se primenjuje i za prevlake otporne na toplotu, uz istovremeno obezbeđenje otpornosti na koroziju.

Molibden za prevlake ima čistoću preko 99,95%. Molibden se dobro spaja sa površinama crnih metala. Ovo njegovo svojstvo koristi se za obrazovanje podsloja na koji se zatim nanosi prevlaka od drugog materijala. Molibdenove prevlake se odlikuju dobrom otpornošću na habanje. Molibden se takođe koristi u industriji za zaštitu elemenata konstrukcija od dejstva hlorovodonične kiseline.

Kalaj se primenjuje za prevlake koje su otporne na dejstvo kiselina, a takođe i za prevlake u prehrambenoj industriji. Za zaštitu opreme u prehrambenoj industriji treba da se koristi čisti kalaj, s tim što posebna pažnja treba da se obrati na sadržaj arsena čije je prisustvo apsolutno nedozvoljeno.

Olovo slabo reaguje sa nekoncentrovanom kiselinom, dok se u jakim kiselinama, kao što su azotna ili sumporna, olovo rastvara. Olovne prevlake se nanose na predmete radi povećanja otpornosti na dejstvo kiselina. Olovne žice koje sadrže antimon se raspršavanjem nanose na ležaje zbog povišenja otpornosti na habanje.

Bakar se obično koristi za raspršavanje kada mu čistoća prelazi 99,9%. Dobijene prevlake imaju svojstva elektroprovodljivosti, a takođe se koriste i u dekorativne svrhe. Bakar zajedno sa drugim elementima (Al, Pb, Mn) nalazi veliku primenu za raspršavanje u vidu legura, od kojih su najznačajnije bronzе. Specijalne bronzе na bazi aluminijuma sadrže od 5-12% Al, a njihova čvrstoća i tvrdoća se povećavaju naročito ako sadrže dodatne elemente kao što su železo, nikl i mangan. Ove bronzе se odlikuju dobrim antikorozijskim svojstvom. Osim toga, imaju i dobru otpornost na habanje i eroziju. Fosforna bronza sadrži dodatak fosfora od 0,03-0,35%. Prevlake od ove bronzе imaju dobru otpornost na habanje i nanose se na klizne ležaje. Ova bronza se može nanositi i na sve delove koji su u radu izloženi trenju.

Nikl se koristi za prevlake koje služe za zaštitu od erozionog dejstva. Osim toga, nikl se nanosi kada je potrebno obezbediti visoku tvrdoću i otpornost površine na koroziju. Nikl se rastvara u azotnoj kiselini i u carskoj vodi (HNO_3 i HCl). On ne korodira u vodi i postojan je u većini hemijski aktivnih supstanci. Za termičko raspršavanje se koristi legura nikla i hroma - nihrom (80% Ni – 20% Cr), koja praktično ne oksidiše pri visokim temperaturama i dobro podnosi dejstvo kiselina i baza. Prevlake od ove legure su vrlo otporne na toplotu i koroziju. Ipak nihrom legura se razara pri visokoj temperaturi u atmosferi koja sadrži vodonik sulfid. Monel legura (nikl, bakar i primese železa, aluminijuma, mangana, silicijuma i ugljenika) se odlikuje visokom otpornošću na dejstvo korozije u kiselinama, a u neutralnim i baznim rastvorima praktično ne korodira.

Čelici su široko rasprostranjeni materijali koji se nanose na delove mašina u cilju povećanja njihove otpornosti na habanje. Legirani čelici, otporni na koroziju, se odlikuju dobrim svojstvima i otpornošću na visoke temperature. Ovi čelici prema strukturi, a u zavisnosti od legirajućih elemenata, mogu da budu martenzitni, feritni i austenitni.

Prevlake od *martenzitnih čelika* sa visokim sadržajem ugljenika imaju veliku otpornost na habanje i veliku tvrdoću, ali i dobru otpornost prema koroziji.

Feritni čelici su otporni na koroziju. Sa povećanjem sadržaja hroma poboljšavaju im se antikorozijska svojstva, ali se smanjuje otpornost prema kiselinama.

Austenitni čelici su legure na bazi osnovnih legirajućih elemenata hroma i nikla, a najčešće korišćene legure su tipa Fe-Cr-Ni ili Fe-Cr-Ni-Mn. Ovi čelici se karakterišu dobrom otpornošću na koroziju i visoke temperature, a imaju i visoka mehanička svojstva. Izbor odgovarajuće vrste čelika zavisi u velikoj meri od radne sredine.

3.5.2 Materijali za raspršavanje u obliku praha

Za postupke termičkog raspršavanja često se koriste materijali za raspršavanje u vidu praha. Pri primeni iste vrste postupka, prevlake dobijene raspršavanjem žice imaju bolju kompaktnost i sadrže manju količinu oksida, nego prevlake dobijene raspršavanjem praha tog istog materijala. Nedostatak raspršavanja materijala u prahu je u tome što je teško obezbediti ravnomeran utrošak materijala, što inače zavisi od regulacije dotoka i oblika čestica. Osnovno preimućstvo vezano za raspršavanje materijala u prahu je relativno niska cena i jednostavna tehnologija dobijanja praha metala, legura i hemijskih jedinjenja, a osim toga ne mogu svi materijali koji se koriste za postupke termičkog raspršavanja da se dobiju u obliku žice. Sa druge strane, kod postojećih metoda raspršavanja plazmom i detonacijom, zbog načina na koji se materijal prevlake nanosi i zbog toga što se on odlikuje visokom temperaturom topljenja, može da bude nanet samo u obliku praha. Čestice praha koje se koriste za raspršavanje treba da imaju sferan ili "grudvičast" oblik. Takav prah se odlikuje dobrom rastresitošću što omogućava jednostavnu regulaciju dotoka i održavanje ravnomernog utroška. Inače, čestice praha za raspršavanje mogu da imaju vrlo nepravilne oblike, od sfernih do uglastih.

Nepravilan oblik čestica otežava njihovo dovođenje iz bunkera u gorionik. U bunkeru se za vreme rada obrazuju naslage od praha koje se zatim periodično rasipaju, izazivajući neravnomeran utrošak čime se snižava stabilnost procesa raspršavanja. Veličina čestica materijala za raspršavanje veoma utiče na proces raspršavanja i na svojstva dobijenih prevlaka. Veličina čestica se u osnovi bira u zavisnosti od karakteristika izvora toplote i toplotno fizičkih svojstava materijala za raspršavanje, temperature topljenja, gustine i drugih parametara. Za raspršavanje se najčešće koristi prah čije čestice imaju dimenzije 0,044 - 0,1 mm.

Za raspršavanje se koristi prah dobijen od metala i njihovih legura. Prah cinka i aluminijuma se koristi za prevlake otporne na koroziju. Molibden u prahu se koristi za raspršavanje plazmom. Njegove čestice imaju oblik "grudvica" i raspršavanje se lako izvodi. Olovno-bakarne legure mogu da izdrže visoka opterećenja. Čelici otporni na koroziju koji se koriste u vidu žice za raspršavanje nalaze primenu i u vidu praha. Prevlake dobijene raspršavanjem praha ovih čelika se odlikuju antikorozionim svojstvima, toplotnom otpornošću i otpornošću na habanje.

Nihrom prevlake (80% Ni -20% Cr) su otporne na koroziju i visoke temperature, i pri raspršavanju keramičkih i drugih materijala, tanki sloj nihroma može da bude iskorišćen kao podsloj. Ovakav podsloj obezbeđuje čvrsto spajanje sa materijalom koji se na njega nanosi raspršavanjem. Osim toga podsloj od nihroma je dovoljno kompaktan i ne dozvoljava da agresivni gasovi iz atmosfere, koji prođu kroz pore osnovne prevlake, reaguju sa zaštićenim metalom.

Legure na bazi kobalta sa hromom, volframom i železom imaju visoku tvrdoću koja se praktično ne snižava pri visokim temperaturama. Takođe, imaju dobra svojstva u pogledu otpornosti na habanje i koroziju.

Postoje legure koje daju prevlake bez pora, ako se nakon nanošenja prevlake podvrgnu odgovarajućem termičkom tretmanu. To su legure na bazi nikla, nikla i hroma ili kobalta koje sadrže primese bora i silicijuma. Raspršavanje praha tih legura daje prevlake koje su otporne na habanje, eroziju, visoke temperature, koroziju i oksidaciju pri visokim temperaturama. Prisustvo volframa ovim legurama daje visoku tvrdoću na visokim temperaturama, a takođe i dobru kovnost i dobra antikorozijska svojstva. Među ovim legurama značajne su legure na bazi kobalta, čiji su tipični predstavnici steliti. Legure na bazi kobalta raspolazu povišenom otpornošću na koroziju i habanje pri visokim temperaturama.

Kao materijali za raspršavanje u vidu praha koriste se i keramički materijali (oksidi, boridi, silicidi, karbidi). U poređenju sa drugim materijalima oksidi imaju najnižu električnu i toplotnu provodljivost. Svi *oksidi* na visokim temperaturama nisu postojani. Oksidi hroma, kobalta, nikla, kalaja, titana i cinka lako se redukuju. Najčešću primenu za prevlake nalazi oksid aluminijuma. Prevlake od ovog oksida karakterišu se dobrim toplotno izolacionim svojstvima i postojanošću na visokim temperaturama. Ako je predmet na koji se nanosi sloj oksida aluminijuma predviđen za rad

pri visokim temperaturama u oksidacionoj sredini, između osnove i sloja oksida aluminijuma neophodno je naneti podslaj nikhroma ili drugog toplotno otpornog materijala. Prevlake od ovog oksida mogu da se nanose na klizne površine koje rade bez udarnih opterećenja. Ove prevlake imaju dobru tvrdoću, nizak koeficijent trenja i hemijsku postojanost što ih ubraja u prevlake otporne na habanje. Osnovnim nedostatkom prevlaka od Al_2O_3 smatra se krtoš i niska mehanička čvrstoća. Pri lokalnim udarnim opterećenjima ove prevlake mogu da se odvoje od osnove.

Boridi teško topljivih metala imaju visoke temperature topljenja. Značajan kvalitet borida je njihova tvrdoća. Međutim, mana im je što u oksidacionoj sredini, pri temperaturama 1300 – 1500 °C, oksidišu. U neutralnoj i redukcionoj atmosferi, a takođe i u vakumu boridi su toplotno otporni. Prevlake od borida se nanose putem plazme. Interes za prevlake od borida je naglo porastao sa razvojem nuklearne energetike. Boridi dobro apsorbuju neutrone i zato su i našli primenu u ovoj oblasti.

Silicidi uglavnom imaju niske temperature topljenja. U slučaju korišćenja prevlaka od silicida, pri visokim temperaturama može da dođe do skupljanja.

Karbidi imaju visoku temperaturu topljenja, znatno višu od temperature topljenja samih metala. Temperatura pri kojoj dolazi do omekšavanja karbida prelazi 3000 °C. Pri visokoj temperaturi u oksidacionoj sredini karbidi mogu da se razlažu. Ipak, veliki broj karbida u tim uslovima je otporniji na toplotu od metala otpornih na visokoj temperaturi. Naročito otpornošću na visoke temperature se odlikuju karbidi silicijuma i titana. Karbid titana (TiC) ima visoku tvrdoću, postojan je u atmosferi azota pri 2500 °C, ne rastvara se u hlorovodoničnoj kiselini i perspektivan je za gasne turbine. Veoma je značajan karbid volframa. Ovaj karbid ima visoku tvrdoću, postojan je na erozionom dejstvu, habanje, provodi električnu struju, ne rastvara se u kiselinama.

3.5.3 Materijali za raspršavanje u obliku šipke

Danas se u industriji proizvode šipke prečnika 3.2, 4.8 i 6.4mm i dužine 305, 457 i 610 mm. Za izradu šipki obično se koriste prahovi različitih oksida, kojima se pri presovanju dodaju i vezivni materijali. Najčešće su u upotrebi šipke od oksida aluminijuma i silikata cirkonijuma.

3.6 Ispitivanje svojstava prevlaka

Pri određivanju oblasti primene prevlaka treba imati predstavu o njihovim svojstvima: otpornosti na habanje, otpornosti na visoke temperature, otpornosti na koroziju, otpornosti na eroziju i dr. Prevlake dobijene raspršavanjem predstavljaju tanak sloj na površini osnove i za određivanje njihovih svojstava su potrebne odgovarajuće razrađene metode ispitivanja.

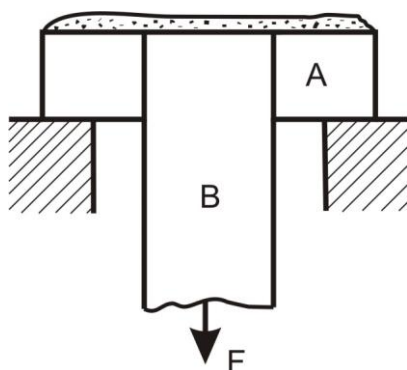
3.6.1 Ispitivanje čvrstoće spoja prevlake i osnove

Čvrstoća spajanja prevlake i osnove je jedan od osnovnih kriterijuma za određivanje oblasti primene i eksploatacionih svojstava prevlake.

Ispitivanje čvrstoće spoja pri zatezanju. Na slici 3.14 je data šema ispitivanja čvrstoće spoja prevlake i osnove metodom izvlačenja čepa. Epruveta za ispitivanje predstavlja osnovu A sa centralnim otvorom u koji se postavlja čep B. Čep se stavlja na taj način da se površina osnove i čepa površina čepa nalaze u jednoj ravni. Posle sastavljanja, na gornju površinu se nanosi prevlaka. Pri ispitivanju, osnova se postavlja na oslonce a čep se povlači nadole. Odnos veličine opterećenja pri kojem dolazi do odvajanja čepa od prevlake, prema površini čepa na kojoj je prevlaka, karakteriše čvrstoću spajanja prevlake i osnove.

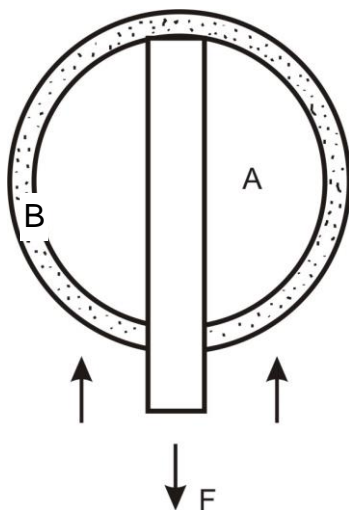
Osnovni nedostatak ove metode ispitivanja je u tome što, čak i pri visokoj tačnosti postavljanja površine čepa i osnove, postoji deo prevlake koji nije u potpunosti spojen (slobodni

deo prevlake) i na kojem dolazi do koncentracije napona. Ova koncentracija dovodi do razaranja prevlake pri nižim opterećenjima.

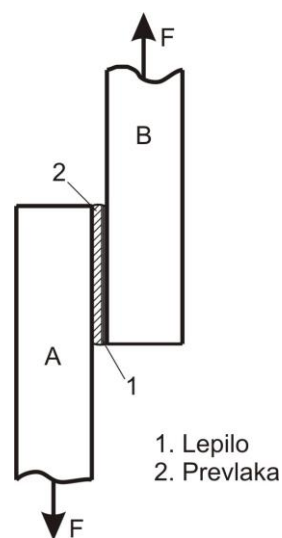


Slika 3.14.
Šematski prikaz ispitivanja čvrstoće spoja prevlake i epruvete izvlačenjem čepa

Za određivanje čvrstoće spajanja prevlake sa cilindričnom površinom, epruveta se priprema drugačije nego u prethodnom slučaju. Na slici 3.15 prikazana je šema ispitivanja čvrstoće spoja prevlake i cilindrične epruvete.



Slika 3.15.
Šematski prikaz ispitivanja čvrstoće spoja prevlake i cilindrične osnove pri zatezanju



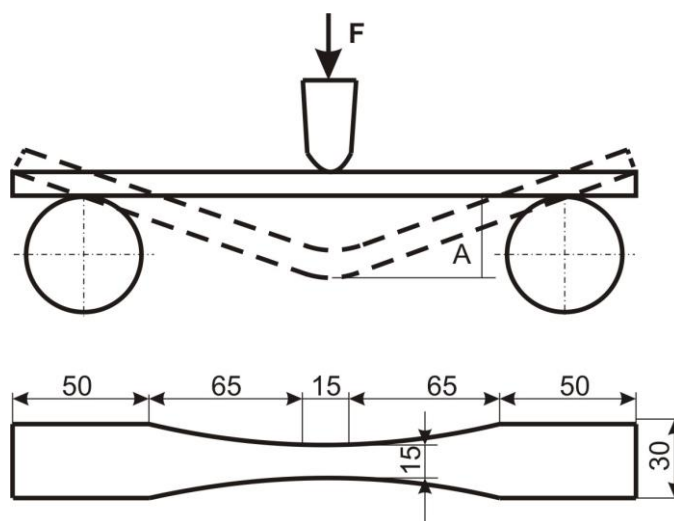
Slika 3.16.
Šematski prikaz ispitivanja čvrstoće spoja na smicanje

U cilindru A se buši otvor u koji se postavlja čep B. Gornja strana čepa se obrađuje na takav način da se obrazuje jedinstvena cilindrična površina na koju se nanosi prevlaka. Čvrstoća spajanja prevlake i osnove se u tom slučaju određuje kao odnos opterećenja pri kojem dolazi do odvajanja čepa od prevlake, prema površini poprečnog preseka čepa. Ovaj način određivanja čvrstoće se koristi u slučaju da treba odrediti čvrstoću spoja prevlake na spoljašnjim cilindričnim površinama kao što je slučaj kod vratila. Čvrstoća spoja prevlake i osnove se može ispitivati i korišćenjem lepila. Deo na koji se nanosi prevlaka sa lepilom se spaja za površinu epruvete gde nema prevlake. Zatim se ovakav spoj izlaže zatezanju i određuje se njegova čvrstoća. Ovom metodom ispitivanja se mogu ispitivati prevlake kod kojih čvrstoća spoja sa osnovom ne prelazi čvrstoću zalepljenog spoja.

Ispitivanje čvrstoće spoja pri smicanju. Na slici 3.16 je prikazana šema ispitivanja čvrstoće spoja pri smicanju. Osnova A na kojoj je prevlaka lepi se za ploču B. Potom se ovakav spoj izlaže smicanju. Čvrstoća spoja prevlake i osnove se određuje kao odnos maksimalne veličine sile pri kojoj dolazi do odvajanja prevlake od osnove, prema veličini površine spoja.

Određivanje čvrstoće spoja na savijanje. Na slici 3.17 prikazana je šema ispitivanja na savijanje. Pri ispitivanju spoja na savijanje, određuje se veličina ugiba epruvete sa prevlakom pri

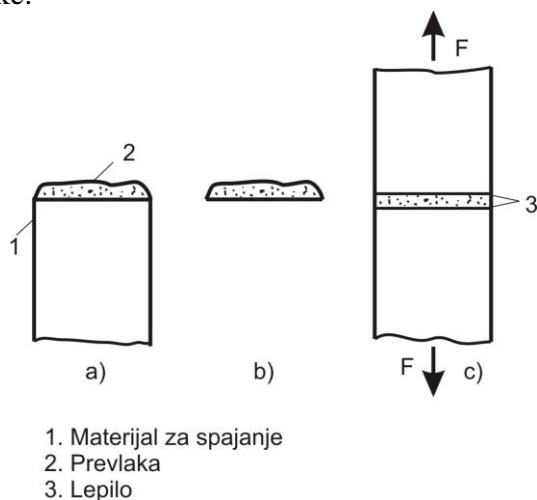
kojoj se na prevlaci pojavljuju pukotine. U toku eksperimenta epruveta se krajevima oslanja na dva oslonca, a opterećenje deluje na sredini epruvete.



Slika 3.17. Šematski prikaz ispitivanja čvrstoće spoja prevlake na savijanje

Ocenu čvrstoće spoja je moguće vršiti ne samo prema trenutku pojave prlina nego i po mestu njihove pojave, a takođe i po veličini površine epruvete na kojoj se prevlaka odvojila. U vezi sa ispitivanjem čvrstoće spoja prevlake i osnove može da se kaže da može da dođe do potpunog odvajanja prevlake od osnove, delimičnog odvajanja, a može da nastupi razaranje u unutrašnjosti sloja prevlake.

Određivanje čvrstoće materijala prevlake Na slici 3.18 prikazana je šema ispitivanja čvrstoće materijala same prevlake. Na čeonu površinu epruvete nanosi se tanak sloj lako topljivog materijala za spajanje. Na ovaj sloj se posle odgovarajuće obrade nanosi prevlaka. Zatim se ova prevlaka odvaja rastapajući materijal za spajanje. Dobijeni sloj prevlake se lepi na čeonu površinu epruvete. Ispitivanje na istezanje takve epruvete daje mogućnost određivanja čvrstoće materijala prevlake.

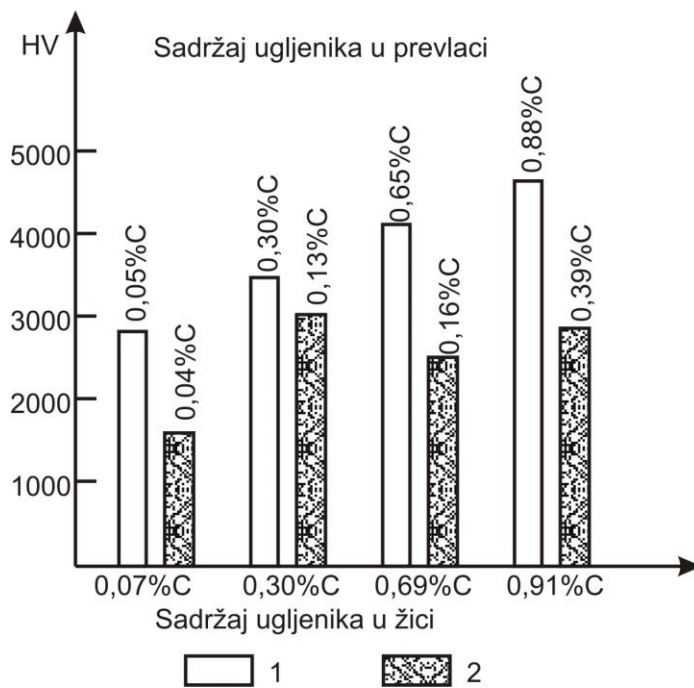


Slika 3.18.
Šematski prikaz ispitivanja
čvrstoće materijala prevlake

Ispitivanje tvrdoće prevlaka. Pri raspršavanju jednog istog materijala mogu da se dobiju prevlake različite tvrdoće, koja zavisi od vrste raspršavanja. Pri istoj metodi raspršavanja, tvrdoća zavisi od uslova raspršavanja (režima rada raspršavača, rastojanja na kome se vrši raspršavanje, karakteristika materijala osnove, temperature pri raspršavanju i drugih faktora). Razlog za dobijanje različitih vrednosti tvrdoće leži u činjenici što metode i uslovi raspršavanja u znatnoj meri utiču na strukturu i veličinu zrna materijala prevlake, poroznost, i prisustvo različitih jedinjenja kao što su oksidi. Pri merenju tvrdoće po Vickersu moguće je odrediti tvrdoću pojedinih zrna u prevlaci. Na primer, mikro tvrdoća zrna koje je sastavni deo prevlake od visoko ugljeničnog čelika iznosi

67HRC, a srednja tvrdoća te prevlake iznosi (38 – 40) HRC. Obično je tvrdoća zrna koja čine prevlaku veća od tvrdoće polaznog materijala što dozvoljava dobijanje veće otpornosti na habanje.

Interesantna je promena tvrdoće u zavisnosti od sadržaja ugljenika u čeličnoj žici za raspršavanje. Raspršavanje gasnim plamenom u poređenju sa elektrolučnim postupkom daje prevlake veće tvrdoće. To se objašnjava time što se pri elektrolučnom raspršavanju u znatnoj meri smanjuje sadržaj ugljenika u materijalu za raspršavanje. Na slici 3.19 je prikazana promena tvrdoće po Vickersu prevlaka od ugljeničnih čelika.



Slika 3.19. Promena tvrdoće prevlaka od ugljeničnih čelika.

1- Raspršavanje gasnim plamenom;

2 – Elektrolučni postupak raspršavanja

Povećanje brzine dovođenja materijala za raspršavanje i pritiska sabijenog vazduha dovode do povećanja tvrdoće prevlake. Osim toga, porast pritiska sabijenog vazduha izaziva povećanje brzine sudara čestica sa površinom osnove što dovodi do obrazovanja kompaktnije prevlake.

Pri visoko frekventnom indukcionom raspršavanju, režimi raspršavanja pokazuju značajan uticaj na tvrdoću prevlake. Prema rezultatima izvedenih eksperimenata u kojima je vršeno ispitivanje prevlaka od ugljeničnog čelika (0,45%C, 0,55% Mn) raspršenih pritiskom vazduha 0,4 MN/m², sa variranjem rastojanja raspršavanja, najveća tvrdoća (400 HB) je dobijena sa primenjenim rastojanjem raspršavanja od 100 mm.

Pri raspršavanju plazmom značajan uticaj na tvrdoću ima i jačina struje. Pri ispitivanjima raspršavanja nikhrom legure (78% Ni, 19,7% Cr, 1,15% Si i mala količina Fe i Mo) postupkom plazme i legure na bazi nikla koja sadrži 50% karbida volframa (35,5% Ni, 8,5% Cr, 2,0% Si, 1,5%B, 0,5%C i 50% WC), tvrdoća prevlake pri jačini struje u raspršavaču od 600 A bila je veća nego za jačinu struje od 400 A.

Ispitivanje otpornosti na habanje prevlaka. Ovo svojstvo je veoma važno za prevlake jer brojni delovi treba da imaju dobru otpornost na habanje. Već je istaknuto da se prevlaka sastoji od velikog broja slojeva raspršenih čestica, čija tvrdoća prelazi tvrdoću polaznog materijala za raspršavanje. Obično u materijalu prevlake, u poređenju sa polaznim materijalom za raspršavanje, ima mnogo oksida koji se raspoređuju na granicama zrna u vidu tankih opni. Takav ravnomeran raspored tvrdih jedinjenja u materijalu prevlake obezbeđuje visoku otpornost prevlake na habanje. Za povećanje otpornosti na habanje, materijal se meša sa praškastim jedinjenjima (karbid volframa). Prevlake otporne na habanje dobijaju se iz različitih materijala: ugljeničnih i martenzitnih čelika, molibdena sa dodacima tvrdih materijala u vidu praha, različitih keramičkih materijala (oksida

aluminijuma, oksida hroma). U zavisnosti od svojstava osnove i uslova rada, na klizne delove se može nanositi prevlaka od fosforne bronzne i drugih materijala. Pri ispitivanju na habanje prevlaka, sama prevlaka se nanosi željenim postupkom, a zatim se vrši ispitivanje na mašini za ispitivanje trenja. Pri ispitivanju se variraju parametri ispitivanja (brzina klizanja, pritisak, vreme, temperatura).

Ispitivanje na zamor. Prevlake se specijalno ispituju na dejstvo promenljivih opterećenja, odnosno na zamor. Od načina pripreme osnove i vrste raspršavanja, zavisi kakav će otpor pri ispitivanju na zamor da ima prevlaka. Prema rezultatima nekih eksperimenata, ispitivanja vršena na prevlakama od aluminijuma, čelika i molibdena, došlo se do zaključka da za prevlake od aluminijuma, nastale raspršavanjem gasnim plamenom debljine 0,05 mm, granica zamora iznosi 406 MN/m^2 , a za iste epruvete bez prevlake 387 MN/m^2 . Značajni su rezultati ispitivanja čelične prevlake: na površinu epruvete prečnika 44.5 mm od čelika (0,35 % C) nanosena je prevlaka velike debljine od ugljeničnog čelika (0,40% C), posle čega je izvršeno struganje i brušenje do prečnika 50,8 mm. Ispitivanje otpornosti na zamor vršeno je pri savijanju za broj obrtaja od 1400 – 2100 o/min. Rezultati su pokazali da prevlaka smanjuje otpornost na zamor do 7%. Vršeno je takođe i ispitivanje otpornosti na zamor vratila sa i bez prevlake. Na vratilo prečnika 50,8 mm nanešena je prevlaka od ugljeničnog čelika (1,2% C). U ovom slučaju daleko povoljniji rezultati su bili za vratilo sa prevlakom. Prevlake od molibdena su nanošene na različite osnove, ugljenični čelik, hrom-nikl čelik i čelik otporan na koroziju. Za sve razmatrane materijale osnove, kod brušenih epruveta sa prevlakama vrednost čvrstoće na zamor je bila znatno niža nego kod brušenih epruveta bez prevlaka.

Ispitivanje otpornosti na visoke temperature. Za prevlake otporne na visoke temperature koriste se metali, legure i keramika. U svojstvu materijala otpornih na visoke temperature, u prvom redu je važno istaći teško topljive metale, kao što su volfram, molibden, legure na bazi nikla i kobalta, oksidi aluminijuma i cirkonijuma. Pored ovih materijala vrlo su perspektivni karbidi teškotopljivih metala. Metalne prevlake otporne na visoke temperature raspolazu visokom otpornošću na dejstvo cikličnih toplotnih opterećenja i imaju dobru toplotnu provodljivost.

Nađeno je da se prevlake koje su kompaktne sa malim brojem pora i višeslojne, odlikuju povećanom otpornošću na visoke temperature. Pri ispitivanju epruvete sa višeslojnom prevlakom dobijenom raspršavanjem gasnim plamenom koja se sastojala iz 6 slojeva molibdena (srednja debljina jednog sloja 0,05 mm.) i 5 slojeva oksida aluminijuma (srednja debljina jednog sloja 0,18 mm.) dobijeni su rezultati koji svedoče o visokoj otpornosti na dejstvo temperature. Pri tome je konstatovano da molibdenski slojevi obezbeđuju veliku postojanost na eroziju, a slojevi oksida aluminijuma veliku otpornost na toplotne udare.

Najbrojniji rezultati ispitivanja otpornosti prevlaka na visoke temperature su dobijeni za prevlake obrazovane raspršavanjem gasnim plamenom: epruvete su izrađene od čeličnog lima debljine 1 mm, na koje su nanošene prevlake od različitih materijala, debljine 0,3 – 0,4 mm; potom su epruvete zagrevane plamenom s tim što je mereno vreme za koje se u epruveti pojavi otvor. Na primer, za osnovu od ugljeničnog čelika bez prevlake otvori se pojavljuju u vremenu od 11 – 13 s, a ako je prevlaka od oksida aluminijuma u vremenu od 27 – 80 s. U većini slučajeva, pri zagrevanju se prevlaka odvajala od osnove uz obrazovanje vazdušne zone. Do pojave vazdušne zone dolazi zbog prodiranja kiseonika iz atmosfere u prevlaku, zbog oksidacije osnove, kao i zbog različitih koeficijenata toplotnog širenja prevlake i osnove.

Za prevlake dobijene raspršavanjem smeše cirkonijum dioksida, oksida aluminijuma i titana na osnovu od čeličnog lima debljine 3 mm postupkom plazme, vreme pojave otvora je 115 – 210 s, dok je na samoj osnovi bez prevlake vreme pojave otvora iznosilo 34 s (3 – 6 puta kraće vreme).

Ispitivanje otpornosti na koroziju. Prevlake otporne na koroziju se koriste najčešće za zaštitu crnih metala. Ako je prevlaka kompaktna i potpuno prekriva osnovu, isključujući prodor agresivnih komponenata na površinu materijala, tada je potrebno ispitati otpornost na koroziju samog materijala prevlake. Tipični materijali koji se koriste za zaštitu crnih metala od korozije su aluminijum i cink.

Prevlake od cinka i aluminijuma elektrohemijским putem štite čelike od korozije. Cink ima dobru otpornost na koroziju pri pH vrednosti 5 – 12, a aluminijum pri pH od 4 – 8. Obično, prevlake od cinka pružaju bolju zaštitu u sredini gde je povećana vlažnost, a prevlake od aluminijuma u različitim industrijskim sredinama. Rezultati eksperimentalnih istraživanja koja su sprovedena na ugljeničnim čelicima i prevlakama od cinka i aluminijuma su pokazali sledeće: prevlake su nanešene na ploče od ugljeničnih čelika dimenzija 100x152x3.2 mm za ispitivanje na vazduhu, odnosno 102x304x3.2 mm za ispitivanje u morskoj vodi; za raspršavanje su korišćene žice prečnika 3.2 mm (čistoća žice od aluminijuma je bila veća od 99%, a od cinka 99,9%); pri ispitivanju u morskoj vodi uzorci su postavljani vertikalno, a u atmosferi vazduha horizontalno ili pod uglom od 30°; u morskoj vodi prevlake od cinka debljine 0,08 i 0,15 mm, a čak i debljine 0,23 mm bile su oštećene i delimično razrušene. Na osnovu toga je konstatovano, a uzimajući u obzir agresivnost morske vode, da su prevlake od aluminijuma postojanije prema koroziji i u morskoj vodi, i u drugim sredinama.

Iako je istaknuto da je prisustvo pora u prevlakama poželjno kada je reč o povećanju otpornosti na habanje, zbog zadržavanja maziva u njima, u slučaju sprečavanja korozije njihovo prisustvo je apsolutno nepoželjno, zato što agresivni gasovi i tečnosti mogu da prođu kroz pore prevlake i dospeju do površine osnove čime se umanjuje radna sposobnost osnovnog materijala.

3.7 Oblast primene prevlaka

Prevlake dobijene raspršavanjem doprinose povećanju otpornosti na habanje, otpornosti na visoke temperature i koroziju, a generalno, površinama delova daju potrebna povoljna svojstva.

Na delove mašina prevlake se, u osnovi, nanose radi obnavljanja delova koji su se istrošili u procesu eksploatacije zbog habanja ili korozije.

Prevlake se koriste u:

- automobilske industriji (bregasta vratila, ventili, klipovi, cilindri i drugi elementi)
- hemijskoj industriji
- avio industriji
- industriji energetske opreme
- u drugim oblastima (različiti ležaji, vratila, cilindri, zupčanici, čaure i drugi elementi).

Nanošenje prevlaka kod ležaja. Ležaji mašina velikih snaga se, umesto od bronz, izrađuju od livenog gvožđa, na čije površine se onda nanosi prevlaka od bronz. Prisustvo pora u prevlakama produžava vreme zadržavanja maziva u ležaju. Čak i pri nedovoljnom dovodenju maziva, uslovi rada ležaja sa prevlakom će biti povoljniji u poređenju sa onim kod ležaja bez prevlake. S obzirom da se za izradu prevlaka ne troši velika količina bronz (direktan uticaj cene), ostvarena je mogućnost upotrebe visokokvalitetnih bronz za ležaje. Unutrašnja površina na koju se prevlaka nanosi, posle završene mehaničke obrade, izlaže se hrapavljenju. Na tako pripremljenu površinu, posle prethodnog zagrevanja, nanosi se sloj na bazi molibdena, debljine 0,1 mm, na koji se zatim nanosi sloj bronz. Poslednja operacija nanošenja prevlaka kod ležaja je završna obrada.

Nanošenje prevlaka na delove turbine. Postupak termičkog raspršavanja se koristi za nanošenje prevlaka na istrošene glavčine rotora turbine. Na istrošenu površinu se nanosi podsloj molibdena, na koji se zatim nanosi čelik otporan na koroziju.

Nanošenje prevlaka na vratila zupčanika. Površini vratila, na koju treba da se nanese prevlaka, se povećava hrapavost urezivanjem žljeba dubine 0.25 – 0.38 mm, a zatim se na površinu deluje abrazivnim materijalima. Posle toga se nanosi prevlaka od čelika otpornog na koroziju koja se zatim brusi. Na ovaj način, radna sposobnost vratila zupčanika je potpuno obnovljena.

Nanošenje prevlaka na vođice mašina alatki. Raspršavanjem gasnim plamenom žice prečnika 2 mm mogu da se nanose prevlake na vođice mašina alatki, npr. strugova. Može da se nanosi prevlaka od ugljeničnog čelika (0.45-0.55 %C, 0.08-0.15 % Si, 0.25-0.4 %Mn) ili čelika na bazi hroma (1.0-1.1 %C, 0.15-0.35 % Si, 0.2-0.4 % Mn, 0.9-1.2 % Cr). Posle grubog brušenja vođica od livenog gvožđa odgovarajuće površine se detaljno odmašćuju, prave žljebovi a zatim se

nanosi prevlaka koja treba da se hladi polako i ravnomerno, zbog čega se prekriva tkaninom. Za vođice koje se ne habaju mnogo u radu, dovoljno je naneti prevlaku debljine 1.5 mm. Posle nanošenja prevlake površina se brusi abrazivnim točilom od silicijum karbida. Važno je da se površina na koju se nanosi prevlaka ne pregreje, jer pri pregrevanju u prevlaci dolazi do pojave prslina. Radni vek vođica sa prevlakom je 2 do 3 puta duži od radnog veka vođica od livenog gvožđa bez prevlaka. Treba istaći i to da su prevlake nanešene ovim postupkom veoma kvalitetne i da se tokom rada ne odvajaju od osnove.

Nanošenje prevlaka na alate za presovanje teško topljivih metala. Presovanje pomoću alata teško topljivih materijala (molibden, tantal, volfram i njihove legure) je jedna od novijih metoda obrade. Osnovni problem pri primeni ove obrade je postojanost alata. Naime, alati za presovanje od čelika čije površine nisu zaštićene prevlakama, pri temperaturi višoj od 1320°C se deformišu do te mere da se više ne mogu da upotrebljavaju, s tim što to nije jedini problem kod ovog vida presovanja. Pri presovanju, na mestu kontakta materijala koji se presuje i površine alata deluju veliki specifični pritisak i temperatura, što dovodi do promene svojstava površina i alata i materijala.

Primer: Za poboljšanje svojstava alata izvršeno je prevlačenje njegovih površina oksidom aluminijuma, odnosno cirkonijuma, sa debljinom prevlake 0.5-1.5 mm. Alat je izrađen od alatnog čelika tvrdoće 40-44 HRC. Alat sa prevlakom od oksida aluminijuma je obezbedio postojanost njegovi površina do temperatura od 1610 °C, dok je pri višim temperaturama došlo do pojave oštećenja. Alat sa prevlakom od cirkonijum-dioksida je pokazao zadovoljavajuće rezultate u radu do 2300°C. Zbog toga se danas u praksi za prevlake uglavnom koristi cirkonijum-dioksid jer povećava 5-10 puta radni vek alata u poređenju sa alatima bez prevlake ili sa manje postojanom prevlakom.

Nanošenje prevlaka na delove avionskih mlaznih motora. Za povećanje otpornosti na habanje i otpornosti na visoke temperature, kao i erozije postojanosti, na delove avionskih mlaznih motora nanose se različiti tipovi prevlaka. Raspršavanje se široko koristi pri generalnoj opravci motora za obnavljanje istrošenih delova. Na površine lopatica kompresora i vratila nanose se prevlake debljine 0.08-0.13 mm od karbida volframa detonacionim putem koje se posle očvršćavanja obrađuju brušenjem.

Nanošenje prevlaka na čelične limove. U industriji se često koriste čelični limovi koji treba da budu otporni na koroziju, zbog čega se termičkim raspršavanjem prevlače karbidom volframa (debljina prevlake 0.08-0.1 mm) koji se veoma dobro spaja sa osnovom. Pri savijanju limova sa prevlakom može da dođe do pucanja prevlake, ali se ona čak ni tada ne odvaja od osnove. Čelični lim sa prevlakom koristi se za oblaganje delova mašina i mehanizama koji su izloženi habanju (vođice mašina alatki). Posle nanošenja prevlake obavezno mora da se izvede završna obrada.