

# PRIMJENA PVD PREVLAKA KOD REZNIH PLOČICA OD METALNOG PRAHA

---

Pap, Ivan

Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:741860>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-31**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

STROJARSKI ODJEL

SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

Ivan Pap

PRIMJENA PVD PREVLAKA KOD REZNIH  
PLOČICA OD METALNOG PRAHA

DIPLOMSKI RAD

Karlovac, 2022.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

STROJARSKI ODJEL

SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

Ivan Pap


PRIMJENA PVD PREVLAKA KOD REZNIH  
PLOČICA OD METALNOG PRAHA

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

dr. sc. Jasna Halambek, v.pred.

Karlovac, 2022.

|                                                                                                                                                             |                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
|  <b>VELEUČILIŠTE U KARLOVCU</b><br>Karlovac University of Applied Sciences | Klasa:<br>602-11/___-01/___ |
| <b>ZADATAK ZAVRŠNOG / DIPLOMSKOG RADA</b>                                                                                                                   | Datum:                      |

|                                                             |                 |                                    |  |
|-------------------------------------------------------------|-----------------|------------------------------------|--|
| Ime i prezime                                               | <b>Ivan Pap</b> |                                    |  |
| OIB / JMBG                                                  |                 |                                    |  |
| Adresa                                                      |                 |                                    |  |
| Tel. / Mob./e-mail                                          |                 |                                    |  |
| Matični broj studenta                                       |                 |                                    |  |
| JMBAG                                                       |                 |                                    |  |
| Studij (staviti znak <b>X</b> ispred odgovarajućeg studija) | preddiplomski   | <b>X</b> specijalistički diplomski |  |
| Naziv studija                                               |                 |                                    |  |
| Godina upisa                                                |                 |                                    |  |
| Datum podnošenja molbe                                      |                 |                                    |  |
| Vlastoručni potpis studenta/studentice                      |                 |                                    |  |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Naslov teme na hrvatskom: <b>Primjena PVD prevlaka kod reznih pločica od metalnog praha</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                    |
| Naslov teme na engleskom: <b>Application of PVD coatings for metal powder cutting inserts</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                    |
| Opis zadatka:<br><br>U teorijskom dijelu rada obraditi će se problematika metalurgije praškastih materijala, metode kompaktiranja i sinteriranja praha. Također će se govoriti o primjeni metalnog praha, te važnosti i značenju PVD i CVD prevlaka. U eksperimentalnom dijelu rada ispitati će se karakteristike ASP 23 reznih pločica prije i nakon nanošenja PVD prevlake. |                                    |
| Mentor:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Predsjednik Ispitnog povjerenstva: |

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam ovaj rad napravio samostalno koristeći se znanjem stečenim tokom studiranja i uz navedenu literaturu. Zahvaljujem se mentorici dr.sc. Jasni Halambek, v. pred. na pomoći, savjetima i prijedlozima poboljšanja rada.

Ivan Pap

## SAŽETAK

Metalurgija praha je u današnje vrijeme vrlo rasprostranjena, te se koristi u mnogim proizvodnjama zbog svojih odličnih karakteristika te odličnog omjera uloženog i dobivenog. U današnje vrijeme, praškasti metali su neizostavan materijal u sve bržim i zahtjevnijim proizvodnjama. Kako bi alat bio dugotrajniji te sami proces jeftiniji, moramo zaštititi alat modificiranjem površine. Jedan od načina zaštite je nanošenje prevlake na alat, gdje se prevlaka nanosi ovisno o materijalu korištenim za alat, te upotrebom samog materijala u proizvodnji. PVD prevlake su tu da poboljšaju alate napravljene od metalnog praha u obliku dugotrajnosti, adhezije, zagrijavanja te korozije.

U prvom dijelu ovog rada opisana je metalurgija praha, koji su bitni faktori za sami proces, te razdioba procesa na konvencionalne procese poput sinteriranja i kompaktiranja te na postupak atomizacije. U drugom dijelu rada detaljno su dani postupci fizikalnog i kemijskog prevlačenja površine u parnoj fazi. U eksperimentalnom dijelu ovog rada ispitane su karakteristike ASP 23 reznih pločica prije i nakon nanošenja PVD prevlake.

**Ključne riječi:** metalurgija praha, CVD, PVD, rezne pločice.

## Summary

Powder metallurgy is very widespread nowadays, and it is used in many productions because of its excellent characteristics and the excellent ratio between investment and profit. Nowadays, powdered metals are an indispensable material in increasingly fast and demanding productions. In order to make the tool last longer and the process itself cheaper, we have to protect the tool by modifying the surface. One way of protection is applying a coating to the tool, where the coating is applied depending on the material used for the tool, and the use of the material itself in production. PVD coatings are there to improve tools made from metal powder in the form of durability, adhesion, heating and corrosion. The first part of this work describes powder metallurgy, which are important factors for the process itself, and the division of the process into conventional processes such as sintering and compaction and the atomization process. In the second part of the work, the procedures of physical and chemical coating of the surface in the vapor phase are given in detail. In the experimental part of this work, the characteristics of ASP 23 cutting inserts were tested before and after applying the PVD coating.

**Keywords:** powder metallurgy, CVD, PVD, cutting plates.

# Sadržaj

|                                                                                                      |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. UVOD</b> .....                                                                                 | <b>1</b>  |
| <b>2. TEORIJSKI DIO</b> .....                                                                        | <b>2</b>  |
| 2.1. METALURGIJA PRAHA .....                                                                         | 2         |
| 2.2. KONVENCIONALNI PROCESI KOMPACTIRANJA I SINTERIRANJA .....                                       | 6         |
| 2.2.1. Jednoaksijalno prešanje.....                                                                  | 6         |
| 2.2.2. Hladno aksijalno prešanje.....                                                                | 8         |
| 2.2.3. Vruće izostatsko prešanje .....                                                               | 9         |
| 2.2.4. SINTERIRANJE .....                                                                            | 11        |
| 2.2.4.1. Sinteriranje tekuće faze .....                                                              | 11        |
| 2.2.4.2. Prolazno sinteriranje tekuće faze.....                                                      | 12        |
| 2.2.4.3. Visokotemperaturno sinteriranje.....                                                        | 12        |
| 2.2.4.4. Pojave pri sinteriranju.....                                                                | 12        |
| 2.2.5. Atomizacija .....                                                                             | 13        |
| 2.3. KEMIJSKE I ELEKTROLITIČKE METODE PROIZVODNJE PRAHA .....                                        | 15        |
| 2.3.1. Redukcija oksida .....                                                                        | 15        |
| 2.3.2. Toplinska razgradnja .....                                                                    | 16        |
| 2.3.3. Elektrodepozicija.....                                                                        | 16        |
| 2.3.4. Mehaničko legiranje .....                                                                     | 16        |
| 2.3.4.1. Proces mehaničkog legiranja.....                                                            | 18        |
| 2.4. INŽENJERSTVO POVRŠINA .....                                                                     | 19        |
| 2.5. FIZIKALNI POSTUPAK PREVLAČENJA IZ PARNE FAZE (PVD) .....                                        | 20        |
| 2.5.1. Toplinsko isparavanje (vakuumsko isparavanje) .....                                           | 23        |
| 2.5.2. Proces otprašivanja (engl., sputtering) metala ili spoja u čvrstom stanju.....                | 25        |
| 2.5.3. Isparavanje elektronskim lukom.....                                                           | 25        |
| 2.5.4. Isparavanje snopom elektrona .....                                                            | 27        |
| 2.6. Plazmom potpomognuto prevlačenje (PACVD-engl., Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition) ..... | 29        |
| 2.6.1. Prevlake dobivene primjenom PACVD postupka i njihova primjena.....                            | 30        |
| 2.7. KEMIJSKO PREVLAČENJE U PARNOJ FAZI CVD-ENGL., CHEMICAL VAPOR DEPOSITION .....                   | 35        |
| 2.7.1. Provođenje CVD postupka .....                                                                 | 36        |
| <b>3. EKSPERIMENTALNI DIO</b> .....                                                                  | <b>38</b> |
| 3.1. IZRADA I TOPLINSKA OBRADA ISPITNIH UZORAKA .....                                                | 38        |
| 3.2. PVD PREVLAČENJE REZNIH PLOČICA ASP 23 .....                                                     | 44        |
| 3.2.1. Oprema korištena pri PVD prevlačenju.....                                                     | 45        |
| <b>4. ANALIZA REZULTATA</b> .....                                                                    | <b>47</b> |
| <b>5. ZAKLJUČAK</b> .....                                                                            | <b>52</b> |



|                     |    |
|---------------------|----|
| LITERATURA .....    | 53 |
| POPIS SLIKA.....    | 54 |
| POPIS TABLICA ..... | 55 |

# 1. UVOD

Metalurgija praha danas bi se mogla nazvati izgubljenom umjetnošću. Za razliku od gline i drugih keramičkih materijala, umijeće oblikovanja i pečenja praktičnih ili ukrasnih metalnih predmeta samo se povremeno primjenjivalo tijekom ranih faza zabilježene povijesti. Sinteriranje metala bilo je potpuno zaboravljeno tijekom proteklih stoljeća, da bi se u Europi oživjelo krajem 18. stoljeća, kada su zabilježene različite metode proizvodnje platinastog praha.

Praksa metalurgije praha koristile su se Inke i njihovi prethodnici u proizvodnji platine prije nego što je Kolumbo otputovao u "Novi svijet" 1492. godine. Korištena tehnika temeljila se na djelovanju veziva nižeg taljenja, tehnici sličnoj sadašnjoj praksi, izrade sinteriranih karbida. Tehnika se sastojala od cementiranja zrna platine (odvojenih od rude ispiranjem i selekcijom) dodavanjem legure zlata i srebra otporne na oksidaciju s prilično niskom točkom tališta kako bi se navlažila zrna, spajanjem istih površinskom napetosti i formiranjem sirovog ingota prikladnog za daljnje rukovanje. U današnje vrijeme, praškasti metali su neizostavan materijal u sve bržim i zahtjevnijim proizvodnjama. Pri radu s alatima za obradu odvajanjem čestica pojavljuju se razni mehanizmi trošenja poput: abrazije, adhezije, difuzije te oksidacije između alata i repromaterijala. Kako bi alat bio dugotrajniji te sami proces jeftiniji, moramo zaštititi alat modificiranjem površine. Jedan od načina zaštite je nanošenje prevlake na alat, gdje se prevlaka nanosi ovisno o materijalu korištenim za alat te upotrebom samog materijala u proizvodnji. Iz tog razloga pokušavaju se unaprijediti postupci modificiranjem površine kako bi upotreba materijala bila što raznovrsnija. Tada se koriste najčešće procesi poput PVD i CVD-a koji unaprjeđuju već razvijene alate.

## 2. TEORIJSKI DIO

### 2.1. METALURGIJA PRAHA

Metalurgija praha (P/M) su tehnologije prerade praha tj. procesi proizvodnje gotovog ili mrežastog oblika koji kombiniraju značajke tehnologije izrade oblika za zbijanje praha s razvojem konačnog materijala i dizajnerskih svojstava (fizičkih i mehaničkih) tijekom naknadnog zgušnjavanja ili konsolidacije procesa (npr. sinteriranje). Tehnike proizvodnje metalnog praha koriste se za proizvodnju širokog spektra metalnih prahova dizajniranih da zadovolje zahtjeve velikog broja primjena. Mogu se proizvoditi prahovi gotovo svih metala. Različiti procesi proizvodnje praha omogućuju preciznu kontrolu kemijskih i fizičkih karakteristika praha i dopuštaju razvoj specifičnih atributa za željene primjene. Procesni proizvodnje praha stalno se poboljšavaju kako bi se zadovoljili zahtjevi kvalitete, cijene i izvedbe svih vrsta primjena.

Ključno je prepoznati ovaj međudnos na početku procesa projektiranja jer suptilna promjena u proizvodnom procesu može uzrokovati značajnu promjenu svojstava materijala. [2]

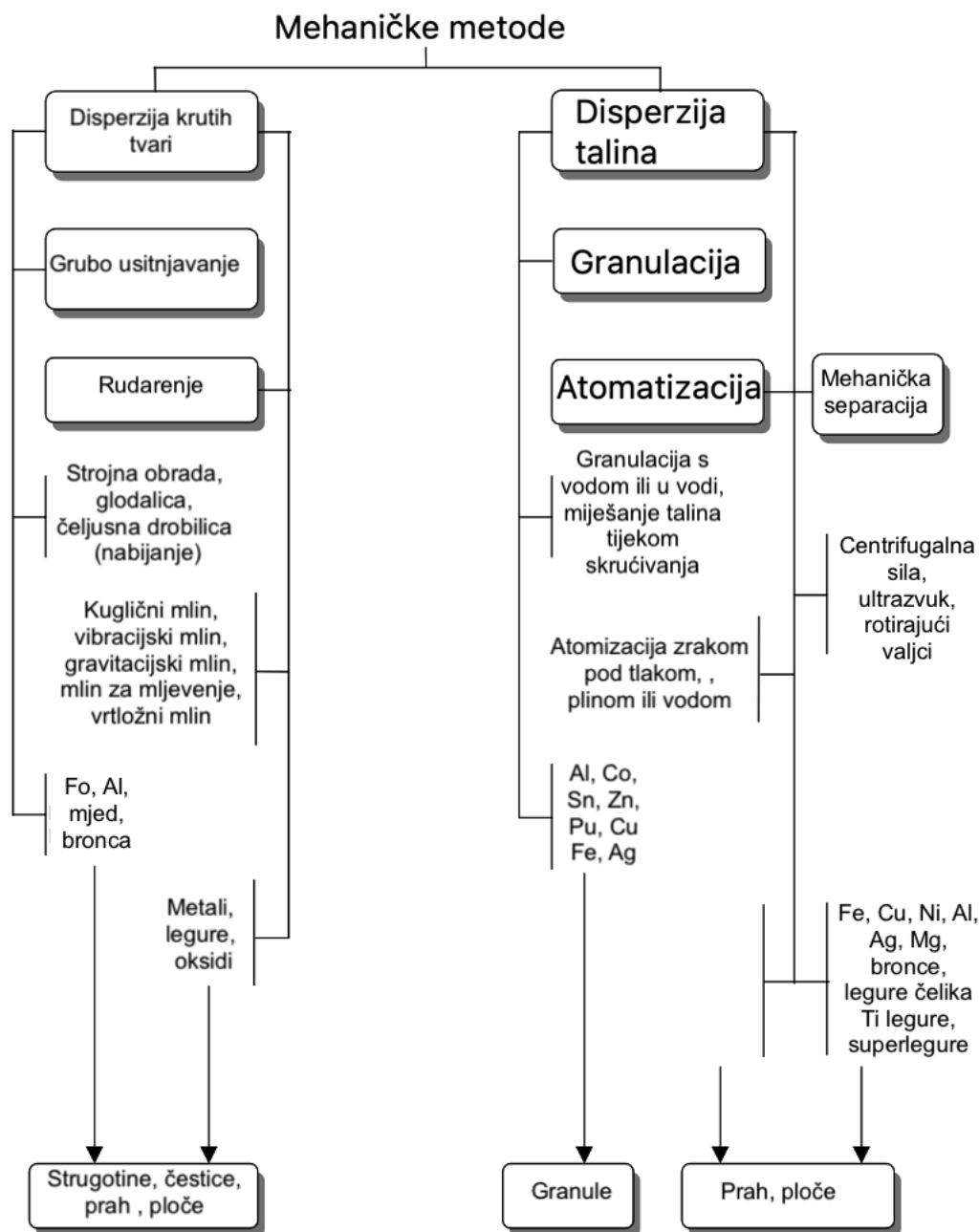
Da bi se započeo dizajn pomoću obrade prahom, potrebno je uzeti u obzir šest ključnih razmatranja dizajna. Uz niz dostupnih shema za obradu praha, odabir odgovarajuće metode u velikoj mjeri ovisi o tim ograničenjima dizajna. Pod tih šest ključnih razmatranja dizajna podrazumijevamo sljedeće:

- **Veličina** - Zbog fizičke prirode procesa i fizičkih ograničenja komercijalne proizvodne opreme, veličina proizvoda ima određene kritične granice. Za neke procese praha, veličina proizvoda je prilično ograničena (kao što je brizganje metala, MIM), dok se za vruće izostatičko prešanje (HIP) veličina ne smatra ozbiljnim ograničenjem. [2]
- **Složenost oblika** - Metalurgija praha je fleksibilan proces sposoban za proizvodnju složenih oblika. Sposobnost razvoja složenih oblika u obradi praha određena je metodom koja se koristi za konsolidaciju praha. [2]
- **Tolerancije** - Kontrola tolerancija dimenzija, zahtjevna značajka svih proizvodnih procesa gotovog ili mrežnog oblika, složeno je pitanje u preradi praha. Tolerancije

su određene takvim procesnim parametrima kao što su karakteristike praha, parametri zbijanja i ciklus sinteriranja. Količina zgušnjavanja tijekom sinteriranja i ujednačenost tog skupljanja kontrolira toleranciju dimenzija u većini P/M proizvoda. Zbog vrlo male promjene veličine tijekom sinteriranja konvencionalnih P/M dijelova za prešanje i sinteriranje, ovi proizvodi obično imaju najbliže tolerancije dimenzija u usporedbi s HIP dijelovima, koji zahtijevaju najveći raspon tolerancija. [2]

- **Materijalni sustavi** - Oblik, veličina i čistoća praha važni su čimbenici u primjeni tehnike obrade praha. Za neke procese ili korake konsolidacije prašci moraju biti glatke, sferične čestice, ali za druge procese potreban je puno nepravilniji oblik praha. Gotovo svaki sustav materijala i legura dostupan je u obliku praha. Za neke materijale kao što su cementirani karbidi, kompoziti bakra i volframa i vatrostalni metali (volfram, molibden, tantal, itd.), obrada praha je jedini komercijalno održiv proizvodni proces. Na primjer, za obradu "uprešavanjem i sinteriranjem" poželjan je nepravilan oblik praha i raspodjela veličina čestica za adekvatnu čvrstoću i reakciju sinteriranja. Vruće izostatsko prešanje zahtijeva sferične prahove (raspršene plinom) za najmanje nečistoće i dobro pakiranje čestica. MIM proces također preferira sferične čestice, ali je potrebna vrlo mala veličina čestica (10 do 20 nm) kako bi se osigurala pravilna homogena raspodjela u produktu. [2]
- **Svojstva** - Funkcionalni odgovor bilo kojeg proizvoda određen je njegovim fizičkim ili mehaničkim svojstvima. U preradi praha na ta svojstva izravno utječu na gustoću proizvoda, sirovinu (prah) i uvjete obrade (najčešće ciklus sinteriranja). [2]
- **Količina i trošak** - Ekonomska izvedivost P/M obrade obično je funkcija broja komada koji se proizvode. Za konvencionalnu obradu prešanjem i sinteriranjem, poželjne su količine proizvodnje od najmanje 1000 do 10 000 komada kako bi se amortizirala investicija u alat. Nasuprot tome, izostatička obrada može biti izvediva za mnogo manje količine, u nekim slučajevima čak i od 1 do 10 komada. [2]

Metalni prah proizvodi se mehaničkim ili kemijskim metodama. Najčešće korištene metode uključuju atomizaciju vode i plina, glodanje, mehaničko legiranje, elektrolizu i kemijsko smanjenje oksida. Proces proizvodnje praha koristi ovisi o potrebnoj stopi proizvodnje, željenim svojstvima praha i željenim svojstvima u završnom dijelu. Kemijske i elektrolitičke metode koriste se za proizvodnju praha visoke čistoće. Mehaničko glodanje široko se koristi za proizvodnju tvrdih metala i oksida. Atomizacija je najsvestranija metoda za proizvodnju metalnih prahova. To je dominantna metoda za proizvodnju metalnih i predlegiranih prahova od aluminija, mjedi, željeza, niskolegiranog čelika, nehrđajućeg čelika, alatnog čelika, superlegure, legure titana i drugih legura. Za proizvodnju ultra - finih ili nano - prahova koriste se rastuće tržište, reakcije plinske faze, metode sušenja u spreju ili oborina. Praškasti metal može se proizvesti u obliku spužve ili atomiziranih prahova. U slučaju željeza, spužvasti prah se proizvodi od magnetitne željezne rude koja se izravno smanjuje na povišenim temperaturama kako bi se dobio oblik spužve. Materijal se zatim raspada u prah i žari kako bi se dobila željena svojstva. Za proizvodnju atomiziranih prahova, rastaljeni čelik se atomizira u nepravilne i homogene čestice koje se zatim žare. Zalihe taline i naknadna obrada pažljivo se kontroliraju kako bi se proizveli jednolični čelični prahovi dizajnirani za P/M dijelove veće gustoće. [7]



*Slika 1 Podjela mehaničkih metoda [8]*

Da bi se razumjela ograničenja dizajna svake metode obrade praha, najbolje je pregledati te procese pojedinačno. Metode proizvodnje P/M mogu se podijeliti u dvije glavne kategorije: kompaktiranja i sinteriranja te procesa pune gustoće. [7]

## 2.2. KONVENCIONALNI PROCESI KOMPAKTIRANJA I SINTERIRANJA

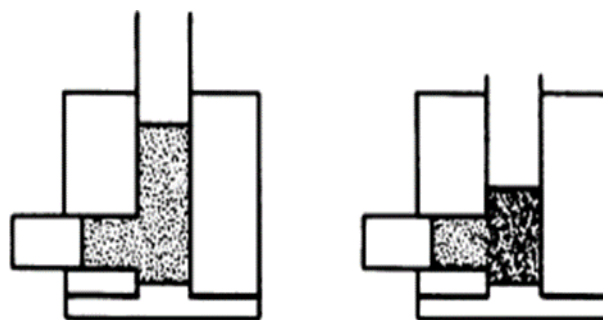
Prašci se zbijaju pod visokim tlakom različitim metodama gdje primjena tlaka pakira prah i smanjuje poroznost. Za razliku od metoda oblikovanja, tehnike zgušnjavanja uzrokuju deformaciju čestica. Koriste se mnoge metode zbijanja, ali najrasprostranjenija metoda za proizvodnju P/M dijelova je jedno-aksijalno zbijanje u krutoj matrici.

Ova metoda je isplativa s relativno jednostavnim alatima. [3]

Međutim, metode zbijanja same po sebi proizvode dijelove s varijacijama gustoće koje rezultiraju dimenzionalnim varijacijama konačnog sinteriranog dijela. To se događa zato što prijenos stresa kroz masu čestica praha nije ujednačen. U slučaju zbijanja u krutoj matrici, ujednačenost stresa koji se prenosi kroz praškastu masu i raspodjela gustoće u zelenim kompaktima proizvedenim u krutim maticama mnogo su manje ujednačeni nego u izostatskom. [3]

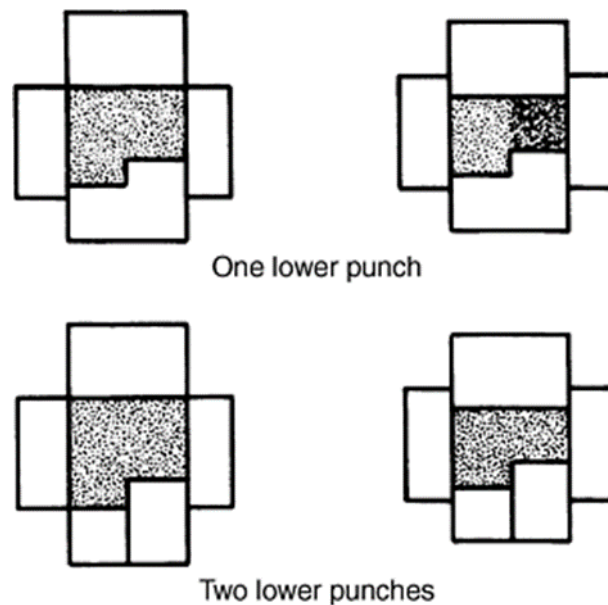
### 2.2.1. Jednoaksijalno prešanje

Kada je tekućina izložena hidrostatskom tlaku unutar ograničene, krute matrice, naprezanje koje tekućina prenosi na unutarnje površine matrice je ujednačeno, bez obzira na to mora li tekućina teći iza uglova. To nije tako kada se pritisne prah; teče samo u smjeru primijenjenog tlaka, a ne iza uglova. Ovaj fenomen je ilustriran na slici ispod, koja shematski prikazuje zbijanje praha u matrici s bočnim oružjem. Ako se tlak primjenjuje samo na gornji udarac, prah se zbija samo u vertikalnom dijelu matrice, ali ostaje labav u vodoravnom dijelu. Zbijanje u bočnom dijelu postiže se kada se pritisak primijeni i na gornji udarac i na bočni udarac. [3]



*Slika 2 Jednoaksijalno prešanje [2]*

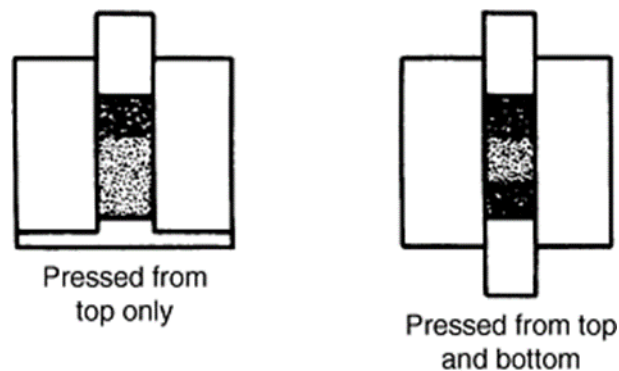
U jednoaksijalnom prešanju metalnog praha tlak se nanosi na prah samo udarcima koji se kreću u vertikalnom smjeru. Zbijanje metalnih praškastih dijelova u krutim maticama, gdje se udarci kreću samo u vertikalnom smjeru, nameće ograničenja u obliku dijelova koji se mogu lako proizvesti. Dijelovi s kutovima ponovnog sudionika i s rupama pod kutom prema vertikalnom smjeru općenito se ne proizvode zbijanjem. [3]



*Slika 3 Dvije vrste zbijanja [2]*

Druga posljedica protoka praha samo u smjeru primijenjenog tlaka tijekom zbijanja je takva da su dijelovi s različitim razinama debljine u smjeru prešanja zbijeni samo jednim nižim udarcem, razvijaju različite zelene gustoće u različitim razinama. Pojedinačni udarci za svaku razinu potrebni su za ujednačeniju gustoću. Ovi udarci moraju putovati na takav način da je omjer visine labavog praha i visine u zelenom kompaktu (omjer kompresije) isti za sve razine. Pritiskom s vrha i dna također se smanjuju varijacije gustoće. [3]





*Slika 4 Zbijanje s gornje strane na lijevoj stran slike, zbijanje s gornje te donje strane na desnoj strani slike [2]*

Čak i kompakti sa samo jednom razinom u smjeru prešanja pokazuju varijaciju gustoće u smjeru pritiskanja zbog trenja između stijenke matrice i praha. Ovo trenje se smanjuje što je više moguće mazivima. Obično se mazivo dodaje metalnom prahu u obliku praha. Maziva smanjuju trenje između praha i bočnog zida, kao i između pojedinih čestica praha. Također se mogu nanositi kao tanki premaz na zidove krutih matrica. U velikoj proizvodnji, ovo podmazivanje zida matrice se obično ne koristi.

Matematički odnosi i modeliranje odnosa gustoće tlaka u zbijanju praha imaju važnu praktičnu vrijednost, posebno s većim naglaskom na istodobni inženjering. [3]

### 2.2.2. Hladno aksijalno prešanje

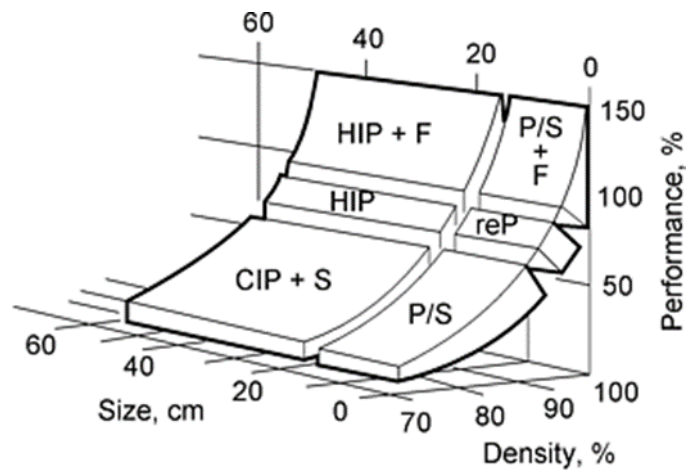
(CIP) koristi fleksibilnu membranu za izolaciju praha iz tekućeg medija koji je pod tlakom kako bi izazvao zgušnjavanje praha. Tipični materijali su lateks, neopren, uretan, polivinil klorid i ostali elastomerni spojevi. Budući da se kreće s prahom dok se zgušnjava, učinci trenja su minimalizirani. Također, budući da se tlak primjenjuje ravnomjerno oko kalupa, ne postoji teoretska granica veličine. Visina do promjera i ukupna veličina ograničeni su veličinom tlačne posude. Često su kruta vretena dio alata; te budući da prah mora kliziti duž ove vretene, obložen je materijalom za smanjenje trenja.

U usporedbi s prešanjem matrice, hladnim izostatskim prešanjem može se postići ujednačenija gustoća zbog minimiziranih učinaka trenja. Tlačne posude obično su ograničene na tlakove od 415 MPa (60 ksi), iako su proizvedene jedinice s dvostruko većim kapacitetom. Izostatska oprema za prešanje može se automatizirati (tj. CIP jedinice suhe vrećice), ali su stope proizvodnje niže od onih u matricinog prešanja. Dimenzionalna kontrola općenito nije tako čvrsta kao kod pritiskanja matrice zbog fleksibilnog alata. Međutim, kao što je navedeno, kruti dijelovi mogu se ugraditi u fleksibilni sklop kalupa kako bi se proizvele točne površine po želji. [3]

### 2.2.3. Vruće izostatsko prešanje

(HIP) svestran je proces oblika koji je pronašao mjesto u proizvodnji zrakoplovne strukture i tržišta motora, oblika visokolegirane i alatne čeličane i pojedinačnih komponenti. Cilj vrućeg izostatskog prešanja je gotovo čisti oblik i puna gustoća. Prašak je hermetički zatvoren u posudi koja je nefleksibilna na povišenim temperaturama; "konzervirani" prah zagrijava se unutar posude pod tlakom i drži određeno vrijeme. Komercijalno korišteni spremnici uključuju niskougljični čelični lim formiran u spremnik, lim od nehrđajućeg čelika, pa čak i staklo. Medij pod tlakom obično je inertni plin kao što je argon, a tlakovi se kreću između 100 i 300 MPa (15 i 45ksi). Temperatura za HIP ovisi o materijalu, naravno, ali tipična proizvodna oprema može zagrijati dijelove od 1000 do 1200 °C (2000 do 2200 °F). HIP jedinice za keramiku i ugljično-bazne materijale mogu se zagrijati do 1500 °C (2700 °F). Mehanizmi zgušnjavanja aktivni tijekom HIP-a uključuju masovnu deformaciju (ograničenu količinu), sinteriranje i puzanje, pri čemu potonji čine značajan dio zgušnjavanja. Gustoće >98% pune gustoće su tipične, a puna gustoća rutinski se može postići s pažnjom tijekom brtvljenja praha i stroge kontrole vremena, tlaka i temperature. Prašci koji se koriste u vrućem izostatskom prešanju obično su sfernog oblika i vrlo čisti. Površine čestica su bez nečistoća, kao što su oksidni filmovi. Sfernost olakšava punjenje i rukovanje, a čistoća površine čestica omogućuje lijepljenje čestica. Rukovanje prahom i izbjegavanje onečišćenja ključno je za uspjeh procesa, a potrebna su i nepotrebna ulaganja u objekte i opremu, nakon čega slijedi pozornost na operativne postupke i "dobro skladištenje". Vruće izostatsko prešanje može proizvesti složene oblike. Kao i kod hladnog izostatskog prešanja, ostvarive

dimenzijske tolerancije u najboljem su slučaju gotovo neto zbog fleksibilnog kalupa. Neke neto površine mogu se postići ako su kruti dijelovi ugrađeni u kalup. [2]



*Slika 5 Područje primjene HIP-a [2]*

Područja primjene HIP-a na temelju veličine dijela, složenosti i razine zgušnjavanja tri varijable koje diktiraju P/M pristup su veličina, gustoća i performanse (kao postotak kova). Takvo ponašanje odgovara željezno-baznim P/M sustavima, ali je reprezentativno za mnoge P/M materijale. [2]

## 2.2.4. Sinteriranje

Sinteriranje je postupak srašćivanja konsolidiranog praha u kontroliranim uvjetima temperature i vremena. Da bi sinteriranje bilo učinkovito, čestice praha moraju biti u bliskom kontaktu. Dok se većina dijelova praha sinterira tijekom njihove proizvodnje, faza zgušnjavanja sinteriranja možda se neće koristiti, a u tim slučajevima primarna upotreba sinteriranja je postizanje metalurško povezivanje čestica. Zbijeno-prešani dijelovi obično spadaju u ovu kategoriju jer je dimenzionalna kontrola od primarne važnosti. [3]

Procesni proizvodni postupci koji se posebno oslanjaju na sinteriranje za postizanje velike gustoće obično spadaju u tri kategorije. Koristi se vrlo fina veličina čestice tako da se u posljednjoj fazi sinteriranja minimiziraju staze za difuziju rasutog tereta, a u ranim fazama postoji visoka početna površina za pogon sinteriranja. To je jedan od razloga za uporabu ultra-finih prahova u brizganju gdje je sinteriranje primarni mehanizam za razvoj visokih razina svojstava. Tijekom sinteriranja prisutna je tekuća faza, trajna ili prolazna, tako da se potiče preraspodjela čestica. Visoka temperatura se koristi tako da lokalno topljenje može pratiti sinteriranje. [3]

### 2.2.4.1. Sinteriranje tekuće faze

Upotreba miješanih prahova omogućuje kombinaciju niskog praha za topljenje s prahom koji se više topi tako da je tekućina prisutna tijekom sinteriranja. Ova tekućina može pomoći preuređenju praha i denzifikaciji zelenog kompakta. Kermeti se obično proizvode ovom tehnikom. Ovom tehnikom mogu se postići mikrostrukture bez pora. [3]

#### 2.2.4.2. Prolazno sinteriranje tekuće faze

Podklasa sinteriranja tekuće faze je prolazno sinteriranje tekuće faze. Ovdje mješavina praha sadrži donju fazu točke taljenja, kao gore. Samo u ovom slučaju, tekuće legure s krutom fazom koja ostaje čvrsta, a tekućina je prisutna samo kratko vrijeme. Ovaj proces se ne koristi kao primarna metoda denzifikacije, ali se koristi za postizanje još jednog povećanja gustoće. Na primjer, može se koristiti u proizvodnji čelika visoke legure ili alatnog čelika kako bi se povećala gustoća zelenog kompakta s 80% na >95% pune gustoće. [3]

#### 2.2.4.3. Visokotemperaturno sinteriranje

Ako se temperatura zelenog kompakta podigne na razine vrlo blizu solidus temperature dijagrama ravnoteže, mali bazeni tekućine mogu se formirati zbog mikro-segregacije legirajućih elemenata. Ova količina tekućine ubrzava zgušnjavanje tijekom sinteriranja. Iako to predstavlja pomalo ekstremnu uporabu visoko-temperaturnog sinteriranja, ova tehnika je korisna za širok raspon legura, a koristi se posebno za alatne čelike i druge komponente čelika visoke legure. [3]

#### 2.2.4.4. Pojave pri sinteriranju

U sinteriranju prahova se odvijaju 2 pojave: - adhezija ili zavarivanje površina čestica i promjena oblika čestica.

Te su dvije pojave potrebne kako bi nastao sami proces sinteriranja, smanjio se udio pora, postizanje velike gustoće te željenih svojstava.

Za postupke sinteriranja koriste se još i postupci poput injekcijskog prešanja metala, vrućeg izostatskog prešanja, kompaktiranja valjanjem, ekstruzije praha te kovanje. Injekcijsko prešanje metala kombinira napredne postupke injekcijskog prešanja plastike i mogućnost manipulacije metalnim prahom. Takvim postupkom proizvodnje dobivamo oblike kompliciranih oblika koje možemo koristiti na visokim temperaturama pod raznim opterećenjem uz niske troškove proizvodnje te veliku primjenjivost na materijalima.

Postoji još velik broj postupaka sinteriranja praha i kompakta, poput kovanja i vrućeg prešanja ili ekstrudiranja ili pneumatskog izostatičkog kovanja i drugih, ali svi se svode na srašćivanje praha u čvrstu, neporoznu strukturu koja zadovoljava tražene kriterije naručitelja odnosno može osigurati dugotrajnu i kvalitetnu upotrebu gotovih proizvoda. Da bi takva struktura bila dobivena, potrebno je prah zgusnuti u kompakt te dobiveni kompakt dovesti do teorijske gustoće, odnosno stanja od 0 % poroznosti materijala. Uglavnom se to obavlja na povišenim temperaturama ispod temperature taljenja baznog praha i/ili uz prisustvo plina ili drugog medija pod tlakom. [3]

### 2.2.5. Atomizacija

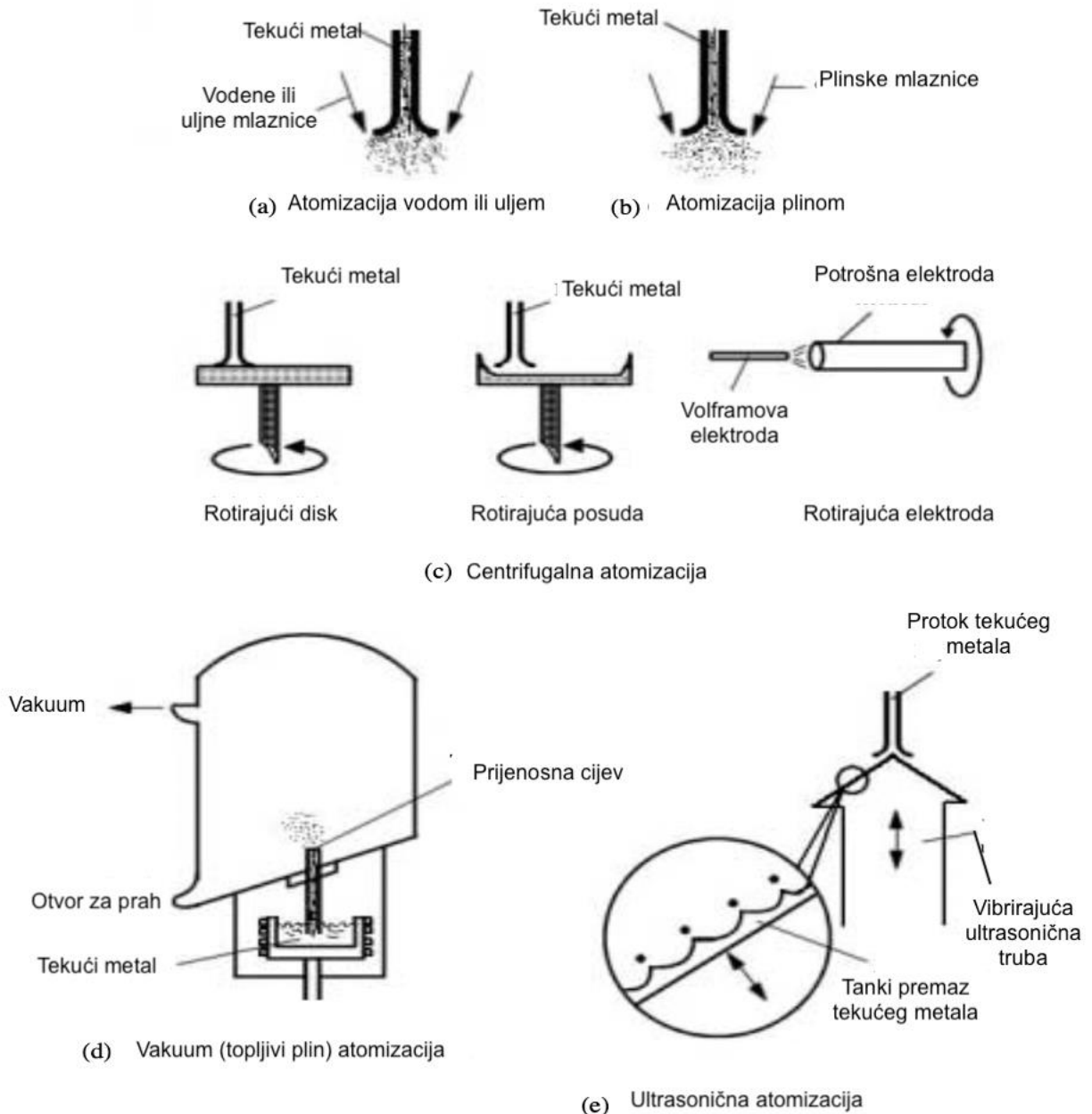
Atomizacija je dominantna metoda za proizvodnju metalnih prahova te legura od aluminija, mesinga, željeza, niskolegiranih čelika, nehrđajućeg čelika, alatnih čelika, superlegura, legura titana i drugih legura. Trenutna tehnologija atomizacije rezultat je stalnog napretka u posljednjih 50 godina od prve velike proizvodnje atomiziranog željeznog praha tijekom Drugog svjetskog rata. Atomizacija je jednostavno razbijanje tekućine u fine kapljice. Bilo koji materijal dostupan u tekućem obliku može se atomizirati. U slučaju materijala za visoko taljenje, rezultat su smrznute kapljice, odnosno prah. Tipično, veličina atomiziranog praha manja od 150 um, iako se mogu proizvesti prašci veće veličine (u tom se slučaju atomizacija naziva "pucanje" ili "granulacija"). Atomizacija je također sinonim za pojam nebulizacija, koji se primjenjuje na atomizaciju aerosola u kemijskoj/farmaceutskoj industriji. [3]

Ona je najvažniji postupak za dobivanje metalnog praha direktno iz taline, uz visoku čistoću te je neovisan o mehaničkim i fizikalnim svojstvima čvrstog materijala.

Opće vrste procesa atomizacije obuhvaćaju niz industrijskih i istraživačkih metoda. Industrijske metode uključuju:

- Atomizacija s dvije tekućine, gdje se tekući metal razgrađuje na kapljice sudaranjem visokotlačnih mlazova plina, vode ili ulja (sl. 6a i b)
- Centrifugalna atomizacija, gdje se tekući tok raspršuje u kapljice centrifugalnom silom rotirajućeg diska, šalice ili elektrode (sl. 6c)
- Vakuumska ili topljiva atomizacija plina, gdje je rastaljeni metal prezasićen plinom koji uzrokuje mutaciju metala u vakuumu (sl. 6d)

- Ultrazvučna atomizacija, gdje je tekući metalni film uznemiren ultrazvučnim vibracijama (Slika 6e)
- Voda, plin, centrifugalna, ultrazvučna i topljiva atomizacija plina koriste se u komercijalnoj proizvodnji, ali metode dva fluida, atomizacije plinom (uključujući zrak) ili vodom čine više od 95% kapaciteta atomizacije širom svijeta. [8]



Slika 6 Proces atomizacije [8]

## 2.3. Kemijske i elektrolitičke metode proizvodnje praha

Kemijske i fizikalno-kemijske metode proizvodnje metalnog praha omogućuju velike varijacije u prahu. Širok raspon trenutno dostupnih varijabli obrade i proizvodnih parametara omogućuje blisku kontrolu veličine i oblika čestica. Prašci proizvedeni smanjenjem oksida, oborinama iz otopine ili iz plina, termo-kompozicijom, kemijskom krtosti, razgradnjom hidrida i termičkim reakcijama pripadaju ovoj klasifikaciji. Najčešće korišteni procesi unutar ove kategorije uključuju redukciju oksida, taloženje iz otopine i termičku izolaciju. [7]

### 2.3.1. Redukcija oksida

Proizvodnja praha željeza, bakra, volframa i molibdena iz njihovih oksida dobro su uspostavljeni komercijalni procesi. U manjem opsegu, redukcija oksida također se koristi za proizvodnju praha kobalta i nikla. Oksidom smanjeni praškasti razredi željeza i bakra natječu se s praškastim razredima koje proizvode drugi procesi. Oksid-reducirani prašci karakteristično pokazuju prisutnost pora unutar svake čestice praha i tako se nazivaju spužvastim prahom. Ova spužvastost kontrolira se količinom i veličinom pora i objašnjava dobru kompaktnost i sinterabilnost takvih prahova.

U praksi su, međutim, temperature smanjenja obično mnogo više nego što pokazuju termodinamički podaci. Konačna svojstva praha kao što su veličina čestica, poroznost čestica i gubitak vodika koji kritički određuju performanse (prividna gustoća, protok praha te svojstva zbijanja i sinteriranja) prvenstveno ovise o čistoći i veličini polaznog materijala i kinetici procesa redukcije. Kinetika procesa redukcije ovisi o kompoziciji i brzini protoka redukcijskog plina, redukcijskoj temperaturi, temperaturnom profilu u peći i dubini sloja oksida ako se smanjenje provodi u stacionarnom sustavu. [7]

Za razliku od atomiziranih prahova gdje se oksidi često obogaćuju na površini čestice, prašci reducirani oksidom, najmanje kada se svježije smanje ili stabiliziraju protiv potamnjenja, sadrže većinu njihovih zaostalih oksida unutar čestica. [7]



### 2.3.2. Toplinska razgradnja

Od skupine termički raspadnutih prahova, oni proizvedeni toplinskom razgradnjom karbonila su najvažniji. I željezo i nikal proizvode se razgradnjom odgovarajućih karbonila. Prašak se proizvodi kuhanjem karbonila u zagrijanim posudama pri atmosferskom tlaku u uvjetima koji omogućuju razgradnju unutar zagrijanog prostora, a ne na stranama spremnika. Prah se skuplja i prosijava i može se mljeti, nakon čega slijedi popuštanje u vodik. Kemijska čistoća praha može biti vrlo visoka (preko 99,5%), a glavne nečistoće su ugljik, dušik i kisik. Veličina čestica može se vrlo pažljivo kontrolirati. Željezni-karbonil u prahu obično je sfernog oblika i vrlo fin (manje od 10  $\mu\text{m}$ ), dok je nikal u prahu obično sasvim iregularnog, poroznog i finog oblika. [7]

### 2.3.3. Elektrodepozicija

Elektrodepozicija metala iz vodenih otopina proizvodi razne metalne prahove. Metode koje se koriste za elektrolitičku proizvodnju praha opisuju vrste izrađenih metalnih prahova i njihove fizičke i kemijske karakteristike. Postoje dvije praktične metode dobivanja praha elektrodepozicijom: (1) izravno taloženje labavo prijanjavuće praška ili spužvastog ležišta koje se lako može mehanički raspasti u sitne čestice i (2) taloženje gustog, glatkog, krhkog sloja rafiniranog metala koji se može usitniti u prah. Na primjer, bakar i srebro proizvode praškaste spužvaste katodne naslage. Suprotno tome, željezo i mangan mogu proizvesti koherentne katodne naslage; jer će se te naslage zgnječiti i usitniti u prah, vrlo je poželjno da budu krhke. Krhkost naslage katode može se smanjiti pravilnom kontrolom uvjeta elektrolitičkih stanica.

Trenutno se samo željezni, bakreni i srebrni prah komercijalno proizvode u bilo kojoj mjeri elektrodepozicijom. [4]

### 2.3.4. Mehaničko legiranje

Mehaničko legiranje je jednostavna i korisna tehnika za sintezu i ravnoteže i neravnoteženih faza komercijalno korisnih materijala počevši od elementarnih prahova. To je također ekonomičan proces s važnim tehničkim prednostima. Jedna od najvećih prednosti mehaničkog legiranja je sinteza novih legura koje nisu moguće nijednom Veleučilište u Karlovcu – Strojarski odjel

drugom tehnikom, kao što je legiranje normalno nepogrešivih elemenata. To je zato što je mehaničko legiranje kompletna tehnika obrade čvrstog stanja i stoga se ovdje ne primjenjuju ograničenja koja nameću fazni dijagrami.

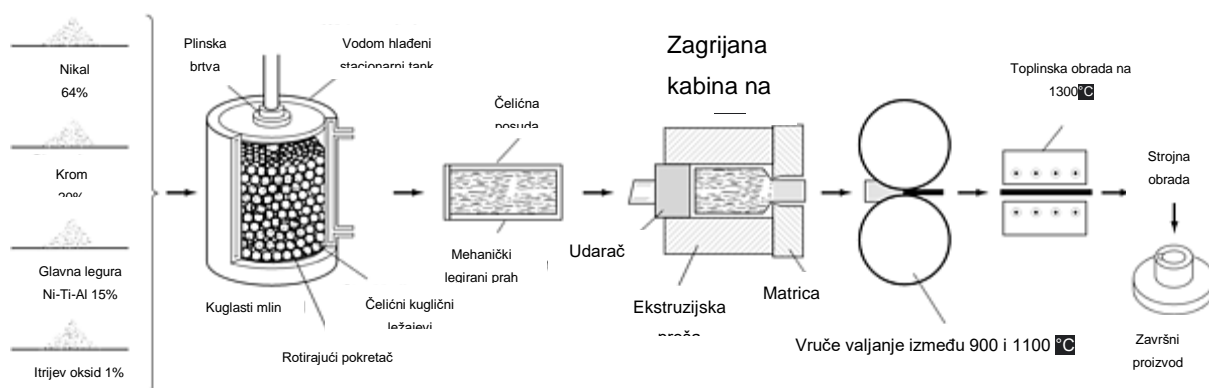
Mehaničko legiranje (MA) obično je suha, visokoenergetska tehnika glodanja kugličnih lopti i korištena je za proizvodnju komercijalno korisnih i znanstveno zanimljivih materijala. Ova jednostavna, ali učinkovita tehnika obrade primijenjena je na metale, keramiku, polimere i kompozitne materijale. [3]

#### Važni atributi mehaničke legure:

- Proizvodnja fine disperzije čestica druge faze
- Proširenje čvrstih ograničenja topljivosti
- Dorada veličina zrna do raspona nanometara
- Sinteza novih kristalnih i kvazi-kristalnih faza
- Razvoj amorfnih (staklenih) faza
- Remećenje naručenih intermetala
- Mogućnost legiranja teško legiranih elemenata
- Izazivanje kemijskih (pomaknih) reakcija na niskim temperaturama

### 2.3.4.1. Proces mehaničkog legiranja

Slika ispod je shema koja prikazuje put sirovina pomoću MA procesa. Sirovine, vrsta korištenog mlina, proces konsolidacije i detalji toplinske obrade razlikuju se ovisno o vrsti željenog proizvoda, ali put obrade ostaje u osnovi isti. Moguće je da se neki manji koraci dodaju ili izbrišu u nekim posebnim okolnostima. [7]



Slika 7 Shema MA procesa [7]

Stvarni proces MA započinje miješanjem praha u pravom omjeru i unošenjem smjese u mlin zajedno s brusnim medijem (općenito čeličnim kuglicama). Ta se mješavina zatim melje po željenom trajanju vremena dok se ne postigne stabilno stanje. Stabilno stanje nastaje kada je sastav svake čestice praha isti kao i udio elemenata u početnoj mješavini praha. Ponekad se prah melje u srednje stanje ili da bi se formirale metastabilne faze ili kako bi se postigla određena željena svojstva. Mljeveni prah se zatim konsolidira u rasuti oblik i toplinski obradi kako bi se dobila željena mikrostruktura i svojstva. [7]

## 2.4. Inženjerstvo površina

Inženjerstvo površina uključuje promjenu svojstava površine i regije blizu površine na poželjan način. Može uključivati proces prekrivanja ili proces modifikacije površine. U procesima prekrivanja na površinu se dodaje materijal, a temeljni materijal (podloga) je pokriven i ne može se otkriti na površini. Proces modifikacije površine mijenja svojstva površine, ali materijal podloge je još uvijek prisutan na površini. Na primjer, u anodizaciji aluminijske površine kisik reagira s anodnom aluminijskom elektrodom kako bi proizveo debeli oksidni sloj na aluminijskoj površini. Svaki proces ima svoje prednosti, nedostatke i primjene. U nekim slučajevima procesi površinske modifikacije mogu se koristiti za izmjenu površine podloge prije taloženja filma ili premaza. Na primjer, čelična površina može se modificirati nitriranjem u plazmi (ionitiranjem) prije taloženja tvrdog premaza postupkom fizičkog taloženja pare (PVD). U drugim slučajevima, postupak modifikacije površine može se koristiti za promjenu svojstava premaza. Na primjer, premaz odložen prskanjem na lopatici turbine zrakoplova može se zbiti mehaničkom silom kako bi se premaz zgusnuo i stavio u tlačni stres. Proces atomističkog taloženja je onaj u kojem se prekrivajući materijal taloži atom po atom. Dobiveni film može se kretati od jednog kristala do amorfnog, potpuno gustog do manje od potpuno gustog, čistog do nečistog i tankog do debelog. Općenito, izraz "tanki film" nanosi se na slojeve debljine po redoslijedu mikrona ili manje i može biti tanak kao nekoliko atomskih slojeva. Deblje naslage nazivaju se premazi. Izraz "debeli film" obično se ne koristi za debele atomistički odložene vakuumske naslage jer se taj izraz koristi za "paint - on, fire - on" vrste taloženja. Često na svojstva tankih filmova utječu svojstva temeljnog materijala (podloge) i mogu varirati kroz debljinu filma. Deblji slojevi općenito se nazivaju premazi. Proces atomskog taloženja može se obaviti u vakuumskom, plazmenom, plinovitom ili elektrolitičkom okruženju. [1]

## 2.5. Fizikalni postupak prevlačenja iz parne faze (PVD)

Procesi fizikalnog prevlačenja iz parne faze (PVD) (često se nazivaju samo tankim filmskim procesima) su procesi atomnog prevlačenja u kojima materijal isparava iz čvrstog ili tekućeg izvora u obliku atoma ili molekula i prelazi u obliku pare kroz vakuumsko ili niskotlačno plinovito (ili plazma) okruženje do podloge, gdje se kondenzira. Obično se PVD procesi koriste za taloženje filmova debljina u rasponu od nekoliko nanometara do tisuća nanometara; međutim, mogu se koristiti i za oblikovanje višeslojnih premaza, stupnjevanih naslaga sastava, vrlo debelih naslaga i samostojećih struktura. Podloge se mogu kretati u obliku od ravnih do složenih geometrija kao što su trake za satove i bitovi alata. Tipične stope taloženja PVD-a su 10–100nm/S (1–10 nanometara) u sekundi.

PVD procesi mogu se koristiti za prevlačenje filmova elemenata i legura, kao i spojeva pomoću reaktivnih procesa prevlačenja. U procesima reaktivnog prevlačenja spojevi nastaju reakcijom materijala za prevlake s okruženjem okolnog plina kao što je dušik (npr. titan nitrid, TiN) ili s materijalom za zajedničko taloženje (npr. titanijev karbid, TiC).

Kvazi-reaktivno taloženje je taloženje filmova složenog materijala iz složenog izvora gdje se gubitak hlapljivijih vrsta ili manje reaktivnih vrsta tijekom procesa transporta i kondenzacije kompenzira djelomičnim tlakom reaktivnog plina u okruženju taloženja; na primjer, kvazi-reaktivno taloženje ITO-a (indij-kositrov oksid) iz ITO cilja prskanja pomoću djelomičnog tlaka kisika u plazmi.

Prema načinu provođenja materijala iz čvrstog u plinovito stanje, PVD postupci se dijele na one koje se temelje na principu toplinskog isparavanja materijala, toplinskoj sublimaciji, na principu otprašivanja (engl., *sputtering*) metala ili spoja u čvrstom stanju.

Cijeli postupak provedbe procesa PVD prevlačenja odvija se u tri glavna koraka:

- 1) U prvom koraku dolazi do isparavanja čestica od strane izvora.
- 2) U drugom koraku dolazi do transporta deponiranog materijala do radnog komada.

Transport od izvora do radnog komada može biti kroz plazmu ili vakuum.

- 3) Konačni korak je samo deponiranje dodatnog materijala na sam radni komad te stvaranje tankog sloja. [1]

### Prednosti PVD postupka prevlačenja su sljedeće:

- moguća je upotreba vrlo širokog spektra materijala za deponiranje u svrhu postizanja vrlo raznolikih zaštitnih slojeva,
- ekološki prihvatljiv proces,
- moguće je koristiti nekoliko tehnika za deponiranje željenog zaštitnog sloja,

PVD prevlake se odlikuju odličnom korozivskom, temperaturnom i tribološkom postojanošću. [6]

### Nedostatci PVD postupka prevlačenja:

- neke izvedbe postupaka se izvodi pod određenim temperaturama i visokim vakuumom što zahtjeva posebno motrenje,
- potreban je rashladni sustav kako bi se toplina kvalitetno odvodila [6]

### Faze izrade PVD-a

Proizvodnja korisnih i komercijalno atraktivnih "projektiranih površina" pomoću procesa taloženja PVD-a uključuje niz faza koje su međusobno ovisne. Faze su:

1. Izbor podloge
2. Definiranje i određivanje kritičnih svojstava površine podloge i kako se ona mogu odrediti.
3. Razvoj odgovarajućeg postupka pripreme površine koji uključuje čišćenje i može uključivati promjenu površinske morfologije ili kemije (površinska modifikacija).
4. Izbor filmskog materijala i filmske strukture za proizvodnju potrebnog prijanjanja filma i filmskih svojstava.
5. Izbor postupka izrade kako bi se osigurala ponovljiva svojstva premaza i dugoročna stabilnost.
6. Razvoj proizvodne opreme koja će dati potrebnu propusnost proizvoda.
7. Razvoj opreme za proizvodnju, parametara procesa, ograničenja parametara i tehnika praćenja / kontrole kako bi se dobio dobar prinos proizvoda.

8. Razvoj odgovarajućih tehnika karakterizacije za određivanje svojstava i stabilnosti proizvoda.
9. Eventualno razvoj tehnika za ponovnu obradu ili popravak dijelova s neispravnim premazima.
10. Izrada pisanih specifikacija i uputa za proizvodne procese (MPI) za sve faze obrade. [5]

### Primjena prevlaka dobivenih PVD postupkom

Neke od najčešće korištenih primjena procesa taloženja tankog filma uključuju:

1. Jednoslojni i višeslojni filmovi i premazi
2. Materijali nanoslojevima
3. Optički filmovi za prijenos i refleksiju
4. Ukrasni filmovi
5. Dekorativni i otporni na habanje (dekorativni/funkcionalni) premazi
6. Prožimajuće barijere za vlagu i plinove
7. Filmovi otporni na koroziju
8. Električno-izolacijski slojevi za mikroelektroniku
9. Premaz lopatica turbina motora
10. Premazivanje čelika visoke čvrstoće kako bi se izbjegla krtost vodika
11. Slojevi difuzijskih barijera za metalizaciju poluvodiča
12. Magnetski filmovi za snimanje medija
13. Prozirni električni vodiči i anti-statični premazi
14. Premazi otporni na habanje i eroziju (tvrđi premazi, premazi alata)
15. Suha filmska maziva
16. Kompozitni i fazni raspršeni filmovi i premazi
17. Nanokompozitni materijali
18. Tankoslojne samostojeće konstrukcije i folije

## Neki materijali podloženi PVD procesima:

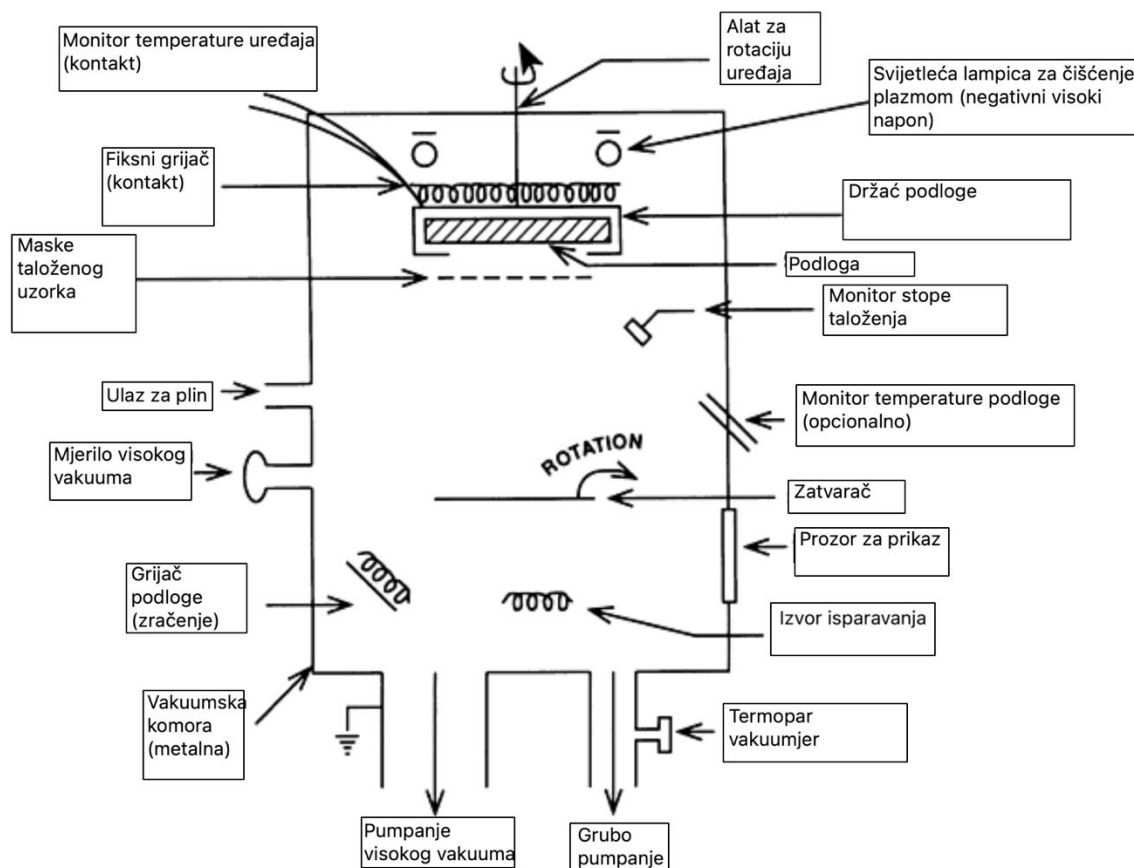
1. Zlato – električni vodič, antikorozivna površina, površinska replikacija
2. Srebro – električni vodič, reflektor topline, optička ogledala, mazivo od čvrstog filma s niskim smicanjem
3. Aluminij – električni vodič, optička refleksija, otpornost na koroziju, barijera za prožimanje
4. Bakar – električni vodič, lemljivost
5. Kadmij – otpornost na koroziju (postupno se ukida)
6. Cink – otpornost na koroziju
7. Titan – "sloj ljepila" za okside
8. Krom – "sloj ljepila" za okside, otpornost na koroziju, tvrdi premaz
9. Paladij – galvanski korozijski sloj između Ti i Au
10. Molibden – "sloj ljepila" za okside
11. Tantal – otpornost na koroziju i eroziju
12. Berilij – samostojeći rendgenski prozori
13. Ugljik (DLC) – tvrdi sloj, kemijski otporan, nisko trenje
14. Nikal - "sloj ljepila" za metale, osnovni kaput na mesingu
15. Silikonski – poluvodički uređaji
16. Selen – fotoosjetljivi materijal

### 2.5.1. Toplinsko isparavanje (vakuusko isparavanje)

Toplinsko isparavanje, koje se ponekad naziva vakuusko isparavanje, PVD je proces u kojem materijal iz izvora toplinskog isparavanja dopire do supstrakta s malim ili nikakvim sudarom s molekulama plina u prostoru između izvora i podloge. Putanja isparenog materijala je "linija vida". Vakuusko okruženje također pruža mogućnost smanjenja plinovite kontaminacije u sustavu taloženja na nisku razinu. Obično se taloženje vakuuma odvija u rasponu tlaka plina od  $10^{-5}$  Torr do  $10^{-9}$  Torr, ovisno o razini plinovite zagađenosti koja se može tolerirati u sustavu taloženja. Brzina toplinskog isparavanja može biti vrlo visoka u usporedbi s drugim metodama isparavanja. Materijal isparen iz izvora ima sastav koji je proporcionalan relativnim tlakovima pare materijala u rastaljenom izvornom materijalu. Toplinsko isparavanje obično se vrši pomoću termički zagrijanih Veleučilište u Karlovcu – Strojarski odjel



izvora kao što su volframove žičane zavojnice ili zagrijavanjem visokoenergetskog elektronskog snopa (e-snopa) samog izvornog materijala. Općenito, podloge se montiraju na značajnoj udaljenosti od izvora isparavanja kako bi se smanjilo blistavo zagrijavanje podloge izvorom isparavanja. Vakuumsko taloženje koristi se za oblikovanje optičkih simetričkih premaza, zrcalnih premaza, dekorativnih premaza, filmova s barijerama za prožimanje na fleksibilnim materijalima za pakiranje, električno provodljivih filmova, premaza otpornih na habanje i zaštitnih premaza za koroziju. [7]



Slika 8 Tipična vakuumska komora za taloženje [7]

## 2.5.2. Proces otprašivanja (engl., sputtering) metala ili spoja u čvrstom stanju

Proces otprašivanja je taloženje čestica isparenih s površine postupkom fizičkog prskanja. Fizičko prskanje je proces netoplinskog isparavanja u kojem se površinski atomi fizički izbacuju s čvrste površine prijenosom zamaha iz energetske čestice bombardiranja atomske veličine, koja je obično plinoviti ion, ubrzan iz plazme. Ovaj PVD proces ponekad se naziva samo prskanje, tj. Općenito je udaljenost izvora do podloge kratka u usporedbi s vakuumskim taloženjem. Taloženje prskanja može se izvesti energetskim ionskim bombardiranjem čvrste površine (cilj prskanja) u vakuumu pomoću ionskog pištolja ili plazme niskog tlaka gdje raspršene čestice trpe nekoliko ili nimalo sudara plinske faze u prostoru između mete i podloge. Prskanje se također može obaviti u višem tlaku plazme gdje se energetske čestice raspršene ili reflektiraju od cilja prskanja "termiziraju" sudarima plinske faze prije nego što dođu do površine podloge. Plazma koja se koristi u prskanju može se ograničiti u blizini površine prskanja ili može ispuniti područje između izvora i podloge. Izvor prskanja može biti element, legura, smjesa ili spoj, a materijal se isparava s rasutim sastavom cilja. Cilj prskanja pruža dugovječni izvor isparavanja koji se može montirati kako bi ispario u bilo kojem smjeru. Složeni materijali kao što su TiN i cirkonijev nitrid (ZrN) obično se "reaktivno talože" pomoću reaktivnog plina u plazmi. Prisutnost plazme "aktivira" reaktivni plin ("aktivacija plazme"), čineći ga kemijski reaktivnijim. Taloženje prskanja široko se koristi za taloženje metalizacije tankog filma na poluvodički materijal, premaze na arhitektonskom staklu i reflektirajuće premaze na kompaktnim diskovima (CD), te za magnetske filmove, suha filmska maziva, tvrde premaze (alate, dijelove motora) i dekorativne premaze. [6]

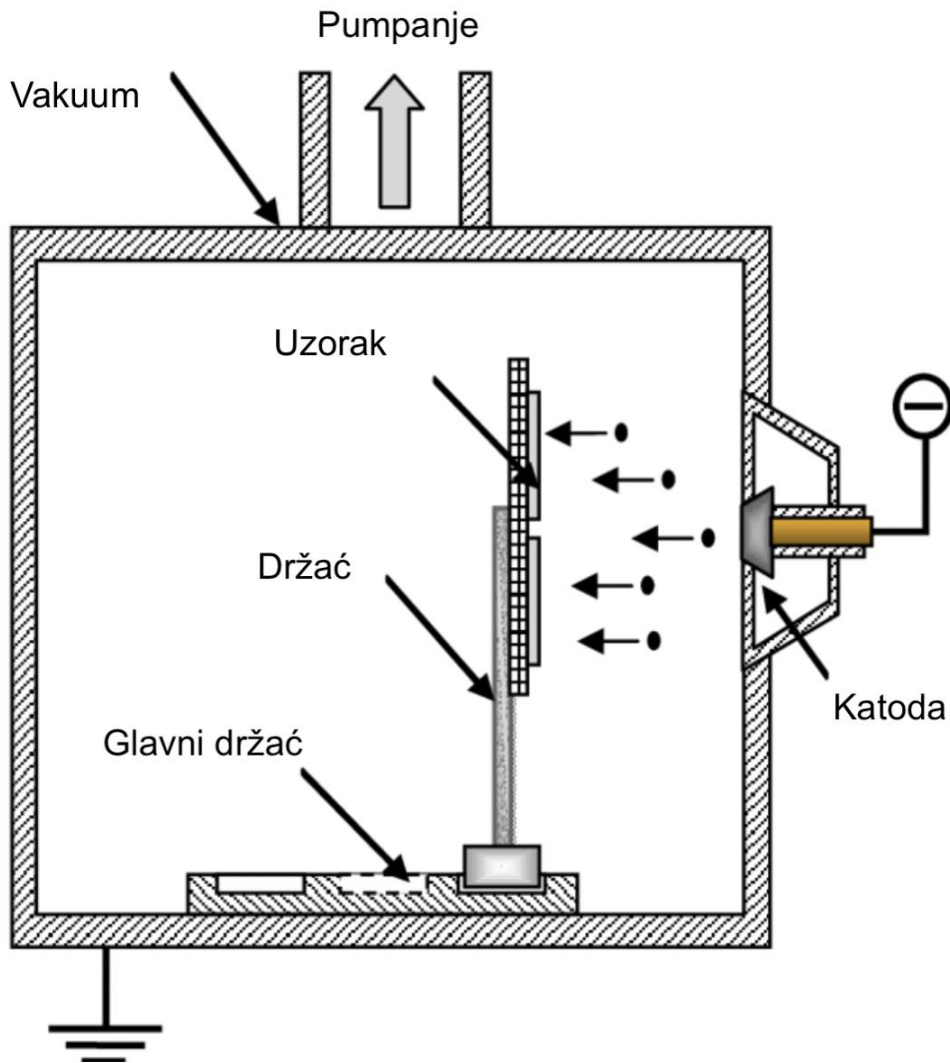
## 2.5.3. Isparavanje elektronskim lukom

Isparivanje elektronskim lukom koristi luk visoke struje, niskog napona za isparavanje katodne elektrode (katodni luk) ili anodne elektrode (anodni luk) i taloženje isparenog materijala na podlogu. Ispareni materijal je visoko ioniziran i obično je podloga pristrana kako bi se ubrzali ioni na površinu podloge. Isparavanje elektronskim lukom koristi se za taloženje tvrdih i dekorativnih premaza. Ioni koji nastaju u isparavanju luka korisni su u procesu ionske oplata. Tehnika se može koristiti za taloženje metalnih, keramičkih i

kompozitnih filmova. Proces isparavanja električnog luka počinje paljenjem luka visoke struje i niskog napona na površini katode (poznatoj kao meta) koja stvara malo (obično nekoliko mikrometara široko), visokoenergetsko emitirajuće područje poznato kao katodno mjesto. Lokalna temperatura na katodnoj točki je izuzetno visoka (oko 15000 °C), što rezultira mlazom isparenog katodnog materijala velike brzine (10 km/s), ostavljajući krater na površini katode. Katodna mrlja je aktivna samo kratko vrijeme, zatim se sama gasi i ponovno pali u novom području blizu prethodnog kratera. Ovo ponašanje uzrokuje prividno kretanje luka. S obzirom da je luk u osnovi vodič kroz koji prolazi struja, na njega se može utjecati primjenom elektromagnetskog polja, koje se u praksi koristi za brzo pomicanje luka preko cijele površine mete, tako da se ukupna površina s vremenom erodira. [6]

Luk ima izuzetno visoku gustoću snage što rezultira visokom razinom ionizacije (30-100%), višestruko nabijenim ionima, neutralnim česticama, klasterima i makročesticama (kapljicama).

Jedna loša strana procesa isparavanja luka je da ako katodna mrlja predugo ostane na točki isparavanja, može izbaciti veliku količinu makročestica ili kapljica. Ove kapljice su štetne za učinak premaza jer se slabo prijanjaju te se mogu proširiti kroz premaz. Isto tako, ako materijal katodne mete ima nisku točku taljenja, katodna mrlja može ispariti kroz metu što rezultira ili isparavanjem materijala podložne ploče mete ili ulaskom vode za hlađenje u komoru. Stoga se magnetska polja koriste za kontrolu gibanja luka. Ako se koriste cilindrične katode, katode se također mogu okretati tijekom taloženja. Ne dopuštajući katodnoj točki da predugo ostane u jednom položaju, mogu se koristiti aluminijske mete i time se smanjuje broj kapljica. Neke tvrtke također koriste filtrirane lukove koji koriste magnetska polja za odvajanje kapljica od fluksa premaza. [5]

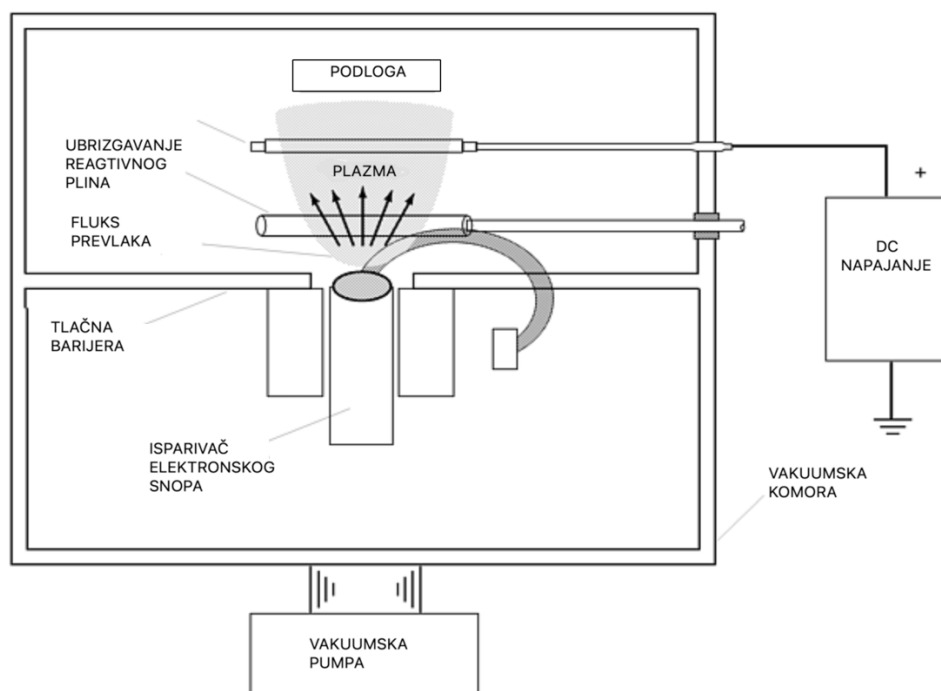


*Slika 9 Isparavanje elektronskim lukom [5]*

#### 2.5.4. Isparavanje snopom elektrona

Isparavanje snopom elektrona ili taloženje ionske pare (IVD), koristi istodobno ili periodično bombardiranje filma za taloženje energetskim česticama atomske veličine za modificiranje i kontrolu svojstava filma koji se taloži. U ionskoj oplati energije, toka i mase, vrsta bombardiranja zajedno s omjerom bombardiranja čestica i taloženja čestica važne su varijable obrade. Materijal za taloženje može ispariti isparavanjem, prskanjem, erozijom luka ili razgradnjom kemijske pare. Energetske čestice koje se koriste za bombardiranje obično su ioni inertnog ili reaktivnog plina ili, u nekim slučajevima, ioni

materijala kondenzacijskog filma. Ionska oplata može se obaviti u plazmenom okruženju gdje se ioni za bombardiranje izvlače iz plazme ili se to može učiniti u vakumskom okruženju gdje se ioni za bombardiranje formiraju u zasebnom "ionskom pištolju". Potonja konfiguracija ionske oplate često se naziva taloženje potpomognuto ionskom zrakom (IBAD). Korištenjem reaktivnog plina u plazmi mogu se taložiti filmovi složenih materijala. Ionska oplata može osigurati guste premaze pri relativno visokim tlakovima plina gdje raspršivanje plina može povećati površinsku pokrivenost. Ionska oplata koristi se za taloženje tvrdih premaza složenih materijala, prijanjajućih metalnih premaza, optičkih premaza visoke gustoće i konformnih premaza na složenim površinama. [5]



*Slika 10 Proces isparivanja visokoreaktivnog plina koristeći pištolj za isparivanje snopom elektrona [5]*

## 2.6. Plazmom potpomognuto prevlačenje (PACVD-engl., Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition)

PACVD za zagrijavanje radnog komada i aktiviranje kemijske reakcije koristi plazmu. Postupak se odvija na način da se koristi energija slobodnih elektrona kao reakcija za taloženje i deponiranje. Plazma je bilo koji plin čiji je značajni broj atoma i molekula u ioniziranom stanju. Dovođenjem električne energije pri dovoljno visokom naponu i odgovarajućem tlaku dolazi do dijeljenja plina i nastanka plazme. [6]



*Slika 11 PACVD postrojenje [6]*

Koristeći plazmu brzina deponiranja je veća nego što je to slučaj kod CVD i PVD prevlačenja. Temperatura provođenja procesa osigurava jednoliko stvaranje zaštitnog sloja bez opasnosti od toplinskih deformacija na radni komad. Temperature na kojima se provodi PACVD su od 4700C do 5800C. Snižanjem temperature provedbe postupka proširena je primjena provedbe prevlačenja na razne alate kao što su alatni čelici za hladni rad. Temperatura provedbe procesa je snižena do 200°C. Debljina slojeva prevlake se kreće u rasponu od 1-10  $\mu\text{m}$  uz brzinu deponiranja od 1  $\mu\text{m}/\text{h}$ . [5]

### Prednosti PACVD postupka prevlačenja:

- niža temperatura postupka u odnosu na CVD,
- velika brzina depozicije,
- izbjegavanje dvostrukog kaljenja,
- nema promjene dimenzije obratka,
- mogućnost prevlačenja masivnih predmeta kompliciranog oblika,  $\theta$  nema emisije štetnih tvari,
- efekt samočišćenja površine,
- velika pouzdanost procesa,

### Nedostatci PACVD prevlačenja:

- skupa provedba postupka,
- vrlo skupa oprema i montaža opreme
- ne dobiva se uvijek čisti zaštitni film 40

## 2.6.1. Prevlake dobivene primjenom PACVD postupka i njihova primjena

### Titan nitrid (TiN)

Najviše se koristi za prevlačenje alata za obradu metala rezanjem. Prevlaka se odlikuje vrlo dobrim mehaničkim svojstvima, visokom tvrdoćom kao i vrlo visokom otpornosti na trošenje. Svoju primjenu nalazi u prevlačenju reznih alata jer smanjuje koeficijent trenja na površini, omogućava strugotini lakši protok, onemogućava naljepljivanje naslaga na rub rezne oštrice i smanjuje zagrijavanje reznog alata. Odlikuje se vrlo dobrom kemijskom postojanošću što ga čini pogodnim za upotrebu u medicini i prehrambenoj industriji. Svojom zlatnom bojom spada u dekorativne slojeve. Osnovne karakteristike ove prevlake su:

- mikrotvrdoća - 2300 HV,
- radna temperatura 200-600°C,
- debljina sloja 1-6  $\mu\text{m}$ ,
- zlatna boja [6]

### Osnovne primjene prevlake:

- alati za bušenje (svrdla),
- rezni alati,
- alati niske tvrdoće



*Slika 12 Alati s TiN prevlakama [6]*

### Titan bor nitrid (TiBN)

Odlikuje se dobrom otpornošću na koroziju što prevučenom alatu daje produženi životni vijek. Mehanička svojstva prevlake su također vrlo zadovoljavajuća. Kombinacija sa borom čiji udio u cjelokupnom elementu daje poboljšana mehanička i tribološka svojstva. Prevlaka svoju prvenstvenu primjenu ima kod reznih alata. Osnovne karakteristike ove prevlake su:

- mikrotvrdoća - 3500 HV,
- radna temperatura 600-900°C,
- debljina sloja 2-4  $\mu\text{m}$ ,
- boja - siva.

### Primjena prevlake:

- alati za oblikovanje rezanje i savijanje, [6]



- alati opterećeni u radu na visoka
- mehanička opterećenja,



*Slika 13 Alati za oblikovanje [6]*

### Titan karbo nitrid (TiCN)

Tvrda prevlaka koja se odlikuje različitim svojstvima. Zbog svoje visoke čvrstoće, visokog elastičnog modula, dobre adhezije na površinu radnog komada i malog koeficijenta trenja primjenjuje se kao prevlaka na većini reznih alata. Prevlaka se također odlikuje visokom otpornošću na trošenje i visokom temperaturom tališta. Dobro podnosi glodanje i ostale obrade odvajanjem čestica. Prevlaka je razvijena zbog prevelikog trošenja TiN prevlake koja ima lošija svojstva od TiCN prevlake.

### Osnovne karakteristike prevlake TiCN:

- mikrotvrdoća-3000 HV,
- radna temperatura 400°C ,
- debljina sloja 2-3  $\mu\text{m}$  ,
- boja-smeđa. [6]



*Slika 14 Alat s TiCN prevlakom [6]*

#### Primjena prevlake:

- alati opterećeni u radu na visoka
- alati za rezanje i savijanje, mehanička opterećenja

#### DLC (engl., Diamond like carbide)

Najvažnija svojstva koja obilježavaju DLC prevlake su visoka otpornost na trošenje, kemijska inertnost, visok električni otpor, mali koeficijent trenja. Prevlaka je crne boje i često se upotrebljava u dekorativne svrhe. Glavni cilj primjene DLC prevlaka je osiguranje željenih svojstava prevučenog dijela svojstvima koja odgovaraju dijamantu na skoro bilo kojoj vrsti obrađivanog materijala. Taloženje i deponiranje DLC prevlaka se provodi u kontroliranoj atmosferi koja sadrži potreban postotak vodika. Određivanjem potrebnog postotka ugljika određuje se kvaliteta i struktura prevlake kao i prijanjanje na podlogu obrađivanog radnog komada [6]

### Osnovne karakteristike DLC prevlaka:

- mikrotvrdoća - 7000 HV,
- debljina sloja - 1-3  $\mu\text{m}$  ,
- radna temperatura 300°C,
- boja - crna.

### Primjena prevlake:

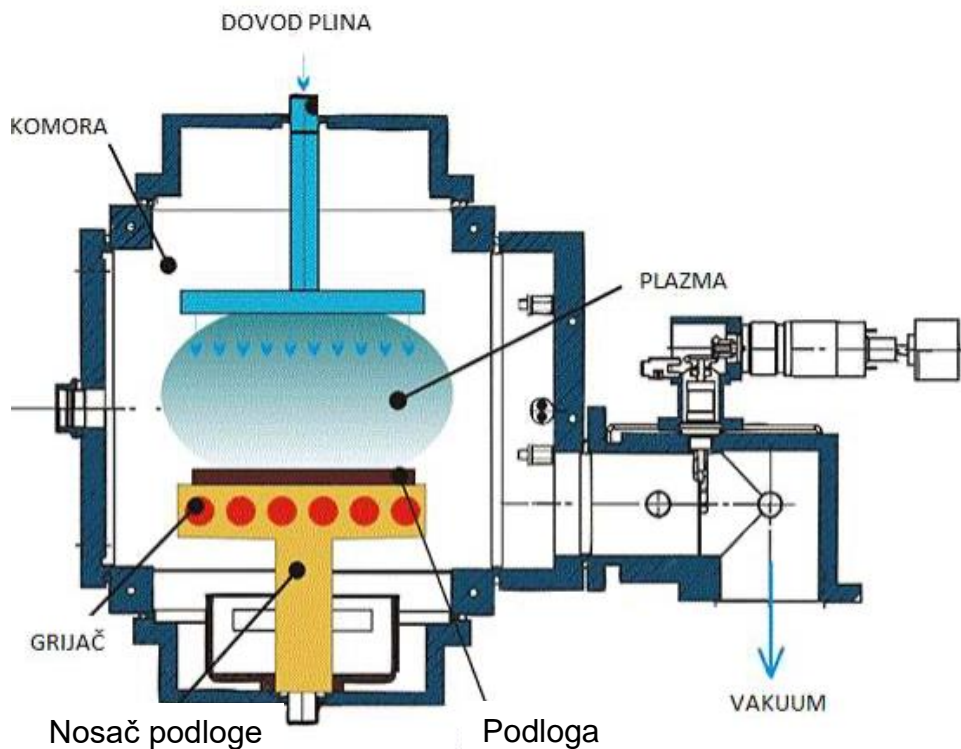
- za alate za obradu grafita,
- obrada neželjeznih metala,
- prevlaka za nemetalne materijale,
- prevlačenje prijenosnih zupčanika

*Tablica 1 Prevlake dobivene primjenom PACVD postupka (vlastiti izvor)*

| Prevlake                         | Prevlake dobivene primjenom PACVD postupka |             |             |            |
|----------------------------------|--------------------------------------------|-------------|-------------|------------|
|                                  | <b>TiN</b>                                 | <b>TiBN</b> | <b>TiCN</b> | <b>DLC</b> |
| mikrotvrdoća (HV)                | 2300                                       | 3500        | 3000        | 7000       |
| radna temperatura (°C)           | 200-600                                    | 600-900     | 400         | 300        |
| debljina sloja ( $\mu\text{m}$ ) | 1-6                                        | 2-4         | 2-3         | 1-3        |
| boja                             | zlatna                                     | siva        | smeđa       | crna       |

## 2.7. Kemijsko prevlačenje u parnoj fazi CVD-engl., Chemical Vapor Deposition

- Postupak se provodi uz atmosferski tlak ili uz niži vakuum
- Proces se odvija kao interakcija smjese plinova i zagrijane površine radnog komada.
- Prilikom zagrijavanja radnog komada dolazi do kemijske reakcije korištenih plinskih komponenti pri visokim temperaturama i taloženja tih plinova na površinu radnog komada.
- Taloženjem se stvara tanki zaštitni sloj koji djeluje kao prevlaka na površini obrađivanog materijala.
- Temperatura provođenja postupka iznosi oko 1000°C u trajanju od 1-6 sati. [6]



Slika 15 Kemijsko prevlačenje u parnoj fazi (CVD) [6]

### 2.7.1. Provođenje CVD postupka

Postupak prevlačenja u parnoj fazi daje kvalitetne zaštitne slojeve na površini obrađivanog materijala čija se debljina može kontrolirati provedbom postupka. Sam postupak prevlačenja se odvija u 3 faze. Prva faza je isparavanje i transport plinovitih reaktanata prema površini obrađivanog komada. U ovoj fazi dolazi i do stvaranja nusprodukata i strujanje je turbulentno. Druga faza se sastoji od difuzijskog prodiranja reaktanata kroz granični sloj obrađivanog komada gdje se u toj fazi procesa odvija laminarno strujanje. Treći korak postupka prevlačenja se sastoji od adsorpcije reaktanata na površinu radnog komada koja je zagrijana na odgovarajuću temperaturu te dolazi do reakcija i stvaranja čvrstog sloja na površini radnog komada. Zadnja faza je desorpcija plinskih produkata i nusprodukata iz graničnog sloja te odstrujavanje iz sloja obrađivanog predmeta. CVD postupak prevlačenja u parnoj fazi može se podijeliti u nekoliko skupina:

- prema operativnom tlaku
- prema temperaturnom rasponu. [6]

#### Prednosti CVD postupka prevlačenja:

- dobra kontrola debljine zaštitnog sloja,
- dobivaju se homogeni i ujednačeni slojevi čije se vrijednosti čistoće kreću blizu teorijskoj,
- oprema potrebna za provođenje procesa je jednostavna,
- za provođenje procesa nije potreban visoki vakuum što smanjuje cijenu izvedbe postupak ali i opreme,
- brzina deponiranja zaštitnog sloja se može jednostavno regulirati. [6]

### Nedostatci CVD postupka prevlačenja:

- kod visokotemperaturnog i srednjetemperaturnog temperatura provođenja postupka je vrlo visoka,
- zbog visokih temperatura postoji opasnost od deformacija,
- zbog upotrebe različitih kemijskih spojeva potrebna je prevlačenja zatvorena i kontrolirana atmosfera,
- pri visokim temperaturama procesa potrebna je velika količina energije za deponiranje zaštitnog sloja,
- za visoko vakuumsko provođenje prevlačenja cijena opreme je vrlo velika. [6]

## 3. EKSPERIMENTALNI DIO

### 3.1. Izrada i toplinska obrada ispitnih uzoraka

Za rezne pločice odabran je materijal ASP 23 (ASP 2023)

U tablici 2. prikazana je tehnička dokumentacija i kemijski sastav rezne pločice ASP 23.

Tablica 2 Tehnički list ASP 2023 (vlastiti izvor)

| Position: 1                                                   |                           |                       |         |                           |       |            |            |                 |              |       |
|---------------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------|---------|---------------------------|-------|------------|------------|-----------------|--------------|-------|
| B01/ B04 / B03 Description / Delivery condition / requirement |                           |                       |         |                           |       |            |            | B15 Item No.    |              |       |
| Sheets, cross rolled, descaled, annealed, sheared             |                           |                       |         |                           |       |            |            | 06100-900481.21 |              |       |
| B08 Qty.                                                      | B02, B14 Mat. Description |                       |         | B09 Dimensions            |       |            | B13 Weight |                 | B07 Heat No. |       |
| 2.0                                                           | pcs                       | 1.3391.02/8           | ASP2023 | 650,000x3,00x2.000,000 mm |       |            | 68,0       | kg              | Z820139      |       |
| Chemical composition (weight %) & hardness                    |                           |                       |         |                           |       |            |            |                 |              |       |
|                                                               |                           | C30<br>Test procedure |         |                           |       | C32<br>AVG |            |                 |              |       |
|                                                               |                           | Hardness Brinell      |         |                           |       | 241 HB     |            |                 |              |       |
|                                                               |                           | C %                   | Si %    | Mn %                      | P %   | S %        | Cr %       | Mo %            | V %          | W %   |
| Z820139                                                       |                           | 1.310                 | 0.630   | 0.270                     | 0.021 | 0.011      | 3.960      | 4.820           | 2.990        | 6.040 |

ASP 23 je odabran iz sljedećih razloga:

- ✓ Visoka otpornost na habanje (abrazivni profil)
- ✓ Visoka tlačna čvrstoća
- ✓ Vrlo dobra svojstva otvrdnjavanja
- ✓ Dobra žilavost
- ✓ Vrlo dobra stabilnost dimenzija pri toplinskoj obradi
- ✓ Vrlo dobra otpornost na temperature
- ✓ ASP 23 je posebno pogodan za brušenje i oblikovanje tanjih radnih materijala gdje se susreće mješoviti (abrazivno-ljepljivi) ili abrazivni tip trošenja i gdje je rizik od plastične deformacije radnih površina alata visok

Dimenzije ploče ASP 23 koja se kasnije reže na zadane dimenzije su 650x3x2000 mm, Težine 68 kg. Tvrdoća bez PVD prevlake joj je 682 HB ili 61,7 HRC.



*Slika 16 ASP 2023 ploča (vlastiti izvor)*

Ploča je vodeno rezana uređajem:

- ✓ Proizvođač: WATER JET SWEDEN
- ✓ Maksimalna debljina materijala: 100 mm
- ✓ Preciznost postavljanja:  $\pm 0.01$  mm/300 mm ( $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}$ )
- ✓ Preciznost ponavljanja:  $\pm 0.008$  mm ( $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}$ )
- ✓ Max. pritisak: 4000 bar
- ✓ Veličina alata: 1×1 m

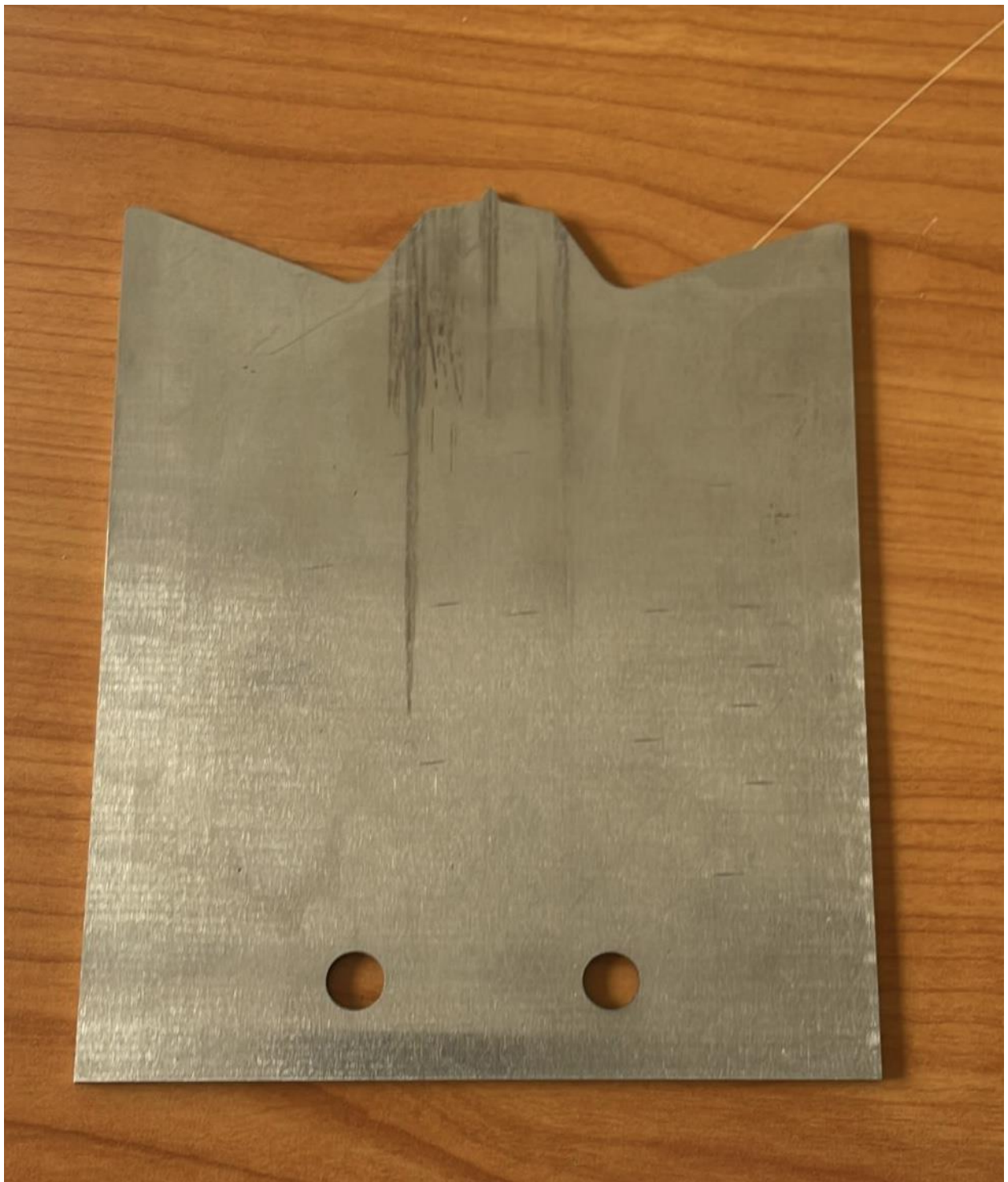




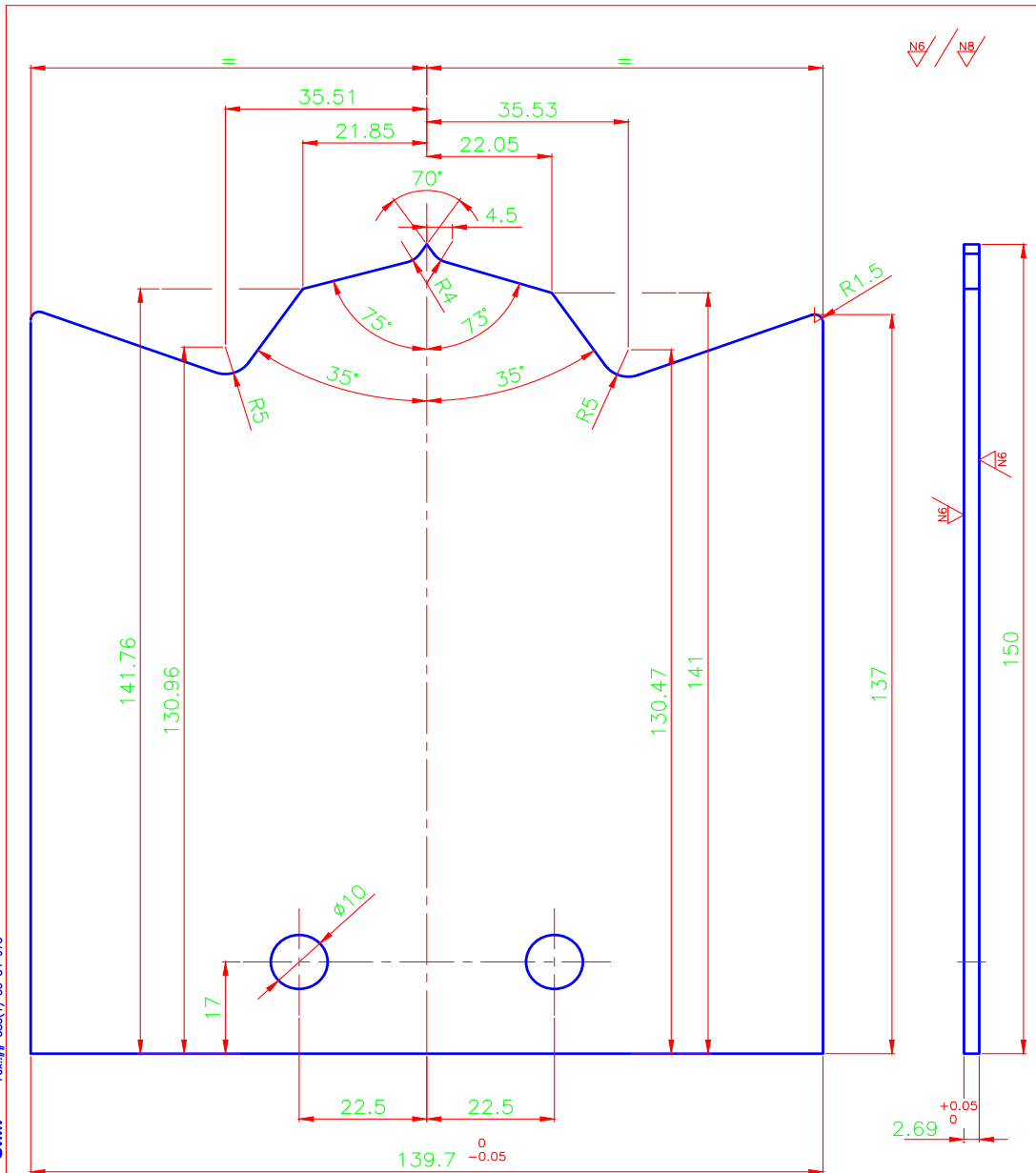
*Slika 17 Alatni stroj za rezanje vodenim mlazom WJS Micro [11]*



*Slika 18 Slika noža bez PVD prevlake na kojem se već nakon 60 minuta rada vide oštećenja. (vlastiti izvor)*



*Slika 19 Slika noža prije nanošenja PVD prevlake TiN (vlastiti izvor)*



NAPOMENA  
 nanesti titan nitrid po cijelom nožu

ident: 20-095-03

| Poz.                                            | Naziv        |                   |             |                    |                             |                               |              | Kom. | Materijal | Masa(kg) | Tvrdoća(HRc) |
|-------------------------------------------------|--------------|-------------------|-------------|--------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------|------|-----------|----------|--------------|
| Dopuštena odstupanja mjera bez toler.ISO 2768-1 |              |                   |             |                    |                             |                               |              |      |           |          |              |
| Dimen.(mm)                                      | 0.5-3        | 3-6               | 6-30        | 30-120             | 120-400                     | 400-1000                      | 1000-2000    |      |           |          |              |
| Fina                                            | ±0.02        | ±0.05             | ±0.1        | ±0.15              | ±0.2                        | ±0.3                          | ±0.5         |      |           |          |              |
| <b>Srednja</b>                                  | <b>±0.05</b> | <b>±0.1</b>       | <b>±0.2</b> | <b>±0.3</b>        | <b>±0.5</b>                 | <b>±0.8</b>                   | <b>±1.2</b>  |      |           |          |              |
| Gruba                                           | ±0.2         | ±0.3              | ±0.5        | ±0.6               | ±1.2                        | ±2                            | ±3           |      |           |          |              |
| Datum: 6.12.2021.                               |              | Ime               | Potpis      | MJERILO:           | Crt.kupca br.: crt.: uzorak |                               | Šifra kupca: |      |           |          |              |
| Snimio:                                         |              | Izvuk             |             | 1:1                | Materijal: Č.ASP2023)       |                               | 11557        |      |           |          |              |
| Pregled:                                        |              | Naziv: <b>Nož</b> |             | Tvrdoća: HRc 63-66 |                             | Broj crteža: <b>11557-003</b> |              |      |           |          |              |

/21

Slika 20 Tehnički nacrt slike noža (vlastiti izvor)

### 3.2. PVD prevlačenje reznih pločica ASP 23

Na rezne pločice je bilo potrebno nanijeti Titan-nitrid PVD prevlaku koja je zlatne boje, ima visoku tvrdoću (mala potrošnja alata), malu adheziju te odličnu korozijska postojanost.

Prilikom rezanja je primjećeno (PAP-PROMET d.o.o.) da ako se ne stavi PVD prevlaka, dolazi do prevelike adhezije, trenja, zagrijavanja te na kraju i zaglavljenja noža u vodilici prilikom rezanja lima.



*Slika 21 Slika prevelikog zagrijavanja te zapinjanja noža u vodilici u trenutku rezanja (vlastiti izvor)*

### 3.2.1. Oprema korištena pri PVD prevlačenju

PVD prevlaka nanosila se pomoću stroja za elektrolučno nanošenje PVD prevlake PLATIT π411.



*Slika 22 Stroj za elektrolučno nanošenje PVD prevlake PLATIT π411 (vlastiti izvor)*



*Slika 23 Slika unutarnje komore PLATIT π411 (vlastiti izvor)*

## 4. ANALIZA REZULTATA

Na slici 24. prikazane su rezne pločice nakon provedenog PVD postupka.



*Slika 24 Noževi nakon PVD obrade (vlastiti izvor)*



Kod PVD postupka isparavanja elektronskim lukom koji se koristio za nanošenje titan-nitrid (TiN) prevlake, prije taloženja, supstrati se zagrijavaju do 450 °C, a zatim se čiste postupkom jetkanja ionima argona. U ovom sustavu plazma se stvara između otporom grijane volframove niti i dvije obližnje katode. Ioni argona izvlače se iz lučnog pražnjenja i ubrzavaju do supstrata pomoću (pulsnog) napona od –400 V. Napon i struja između žarne niti i katoda su 65 V odnosno 6 A. Za proces nanošenja premaza koriste se četiri mete, a snaga od 3 kW (20 V/150 A) se primjenjuje na svaku od četiri mete. Tlak taloženja je 4 Pa, dok se na podložni stol primjenjuje prednapon od 70 V. Vrijeme taloženja je 45 min, što rezultira prevlakama debljine 3 µm na podlogama montiranim na okretnoj ploči koja ima mogućnost trostruke rotacije.

#### Mjerni instrument korišten pri ispitivanju debljine prevlake:

Debljina dobivene prevlake na uzorcima reznih pločica izmjerena je na uređaju Calotest series Compact (CAT<sup>2</sup>c) prikazanim na slici 25.

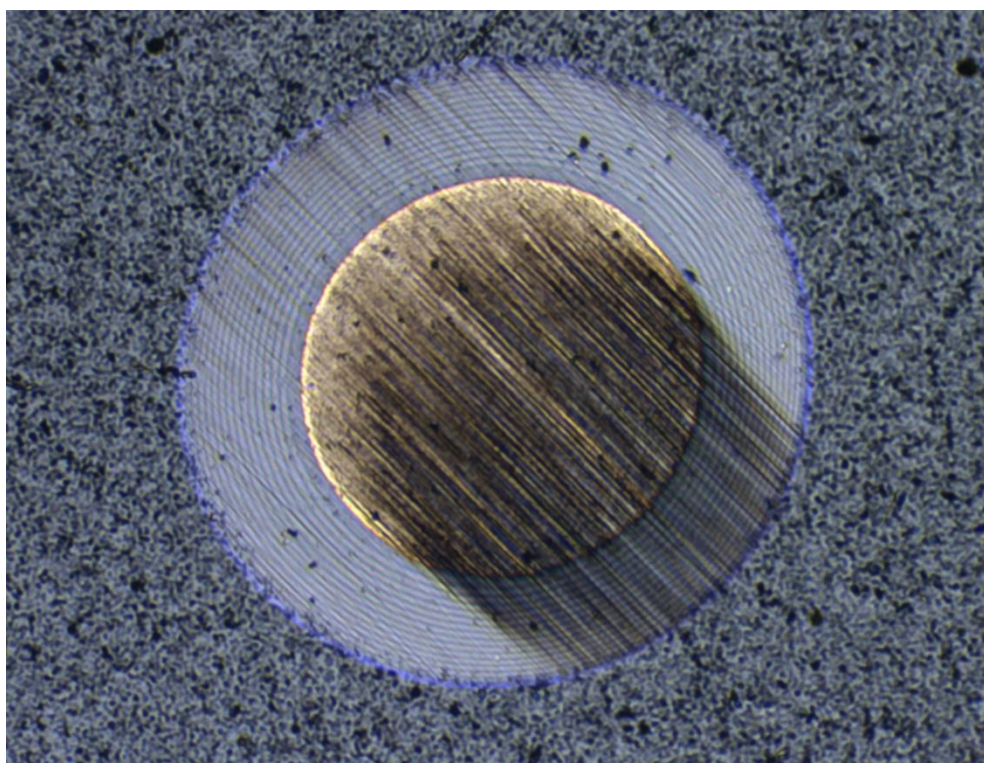
Kalotest troši prevlaku rotirajućom kuglicom u kontaktu s materijalom. Nakon prodiranja kuglice do podloge, mjeri se debljina prevlaka.



Slika 25 Calotest series Compact (CAT<sup>2</sup>c) [10]

*Tablica 3 Parametri postupka ispitivanja kalotestom (vlastiti izvor)*

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| Brzina vrtnje (okr/min) | 60,00 |
| Vrijeme ispitivanja (s) | 50,00 |
| Promjer kuglice (mm)    | 25,00 |



*Slika 26 Multislojna TiN prevlaka (vlastiti izvor)*

*Tablica 4 Debljine prevlake*

| Vrsta prevlake | Debljina prevlake [ $\mu\text{m}$ ] |
|----------------|-------------------------------------|
| TiN            | 3                                   |

Mjerni instrument korišten pri ispitivanju tvrdoće prevlake:

Za određivanje tvrdoće koristio se uređaj za ispitivanje tvrdoće KBE 150 R Digitalni Rockwell tvrdomjer s motoriziranom ispitnom glavom za sve postupke prema Rockwellu.

Može se koristiti i za indentaciju kuglom i mjerenja dubine prema Vickersu i Brinellu.

Velik raspona ispitnog opterećenja od 1 – 150 kg.

Automatsko ispitivanje tvrdoće – potpuno automatiziran postupak testiranja, maksimalna preciznost evaluacije.

Sve izmjerene vrijednosti odmah se prikazuju digitalno.

Praktična upravljačka ploča visokih performansi sa LCD zaslonom u boji.

Primjena ispitnih sila je elektronski regulirana i maksimalno precizna.



*Slika 27 Digitalni tvrdomjer KBE 150 R [9]*

*Tablica 5 Srednje vrijednosti nanotvrdoće i dubine (vlastiti izvor)*

| Prevlaka | Srednja vrijednost tvrdoće HRC |
|----------|--------------------------------|
| TiN      | 67,4                           |

## 5. ZAKLJUČAK

Problem zagrijavanja te zaglavljenja noža je riješen procesom isparavanja elektronskog luka nanošenjem TiN PVD prevlake debljine 3  $\mu\text{m}$ . Samim time mu je povećana tvrdoća, uz sve ostale prednosti koje PVD prevlake nose poput dugotrajnosti, korozijske postojanosti, manje adhezije, manjeg oštećivanja površine i dr. Napravljena su i ispitivanja koja to potvrđuju poput ispitivanja tvrdoće, ispitivanje debljine prevlake te na kraju i radni komad u stroju gdje se nije više pojavljivalo uglavljivanje noža u vodilici. Savršena metoda nažalost ne postoji, jer svaka od metoda ima svoje prednosti i nedostatke, ali s pravilnim izborom materijala i povećanom pažnjom na detalje procesa greške su svedene na minimum. Sama činjenica da su prevlake toliko rasprostranjene po raznim proizvodnjama, govori nam da prednosti daleko nadmašuju nedostatke.

## Literatura

- [1] Panjan,P.;Drnovšek,A.; Mahne,N.;Čekada,M.;Panjan,M. Surface Topography of PVD Hard Coatings. *Coatings* 2021, 11, 1387. <https://doi.org/10.3390/coatings11111387>
- [2] Randal M. German, "Powder metallurgy and particulate materials processing : the processes, materials, products, properties and applications," Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey, 2005
- [3] V. K. Sarin,Daniele Mari, Luis Miguel, Christoph Nebel, » Comprehensive Hard Materials, Elsevier, Amsterdam, 2014
- [4] J. Poyner, »Workshop Practice Series. Volume 11. Electroplating.,Fox Chapel Publishing,2021
- [5] D. M. Mattox, » Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing,Elsevier, December 31, 1998
- [6] C. M. Cotell, Jr, F. A. (and others) (eds) Smidt, J. A. Sprague, ASM International, Materials Park, OH International HandbookCommittee, ASM handbook. Vol. 5 : Surface engineering, SM International, Materials Park, OH, 1994
- [7] Prasan K. Samal and Joseph W. Newkirk , ASM Handbook, Volume 7: Powder Metallurgy, ASM International Materials Park, Ohio,2015
- [8] INDUSTRY SEGMENT PROFILE SIC 33991, *Metal Powder Production*,  
*Publikacija* The EPRI Center for Materials Production
- [9] <https://www.ispitivanje.com/tvrdoca/tvrdomjeri-po-rockwellu/> (21.08.2022.)
- [10] <https://www.anton-paar.com/corp-en/products/details/calotest/> (22.08.2022.)

[11] <https://www.waterjetsweden.com/products/micro> (16.06.2022.)

## Popis slika

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1 Podjela mehaničkih metoda.....                                                                                  | 5  |
| Slika 2 Jednoaksijalno prešanje .....                                                                                   | 6  |
| Slika 3 Dvije vrste zbijanja .....                                                                                      | 7  |
| Slika 4 Zbijanje s gornje strane na lijevoj stran slike, zbijanje s gornje te donje strane na desnoj strani slike ..... | 8  |
| Slika 5 Područje primjene HIP-a.....                                                                                    | 10 |
| Slika 6 Proces atomizacije.....                                                                                         | 14 |
| Slika 7 Shema MA procesa .....                                                                                          | 18 |
| Slika 8 Tipična vakuumska komora za taloženje .....                                                                     | 24 |
| Slika 9 Isparavanje elektronskim lukom.....                                                                             | 27 |
| Slika 10 Proces isparivanja visokoreaktivnog plina koristeći pištolj za isparivanje snopom elektrona .....              | 28 |
| Slika 11 PACVD postrojenje .....                                                                                        | 29 |
| Slika 12 Alati s TiN prevlakama.....                                                                                    | 31 |
| Slika 13 Alati za oblikovanje .....                                                                                     | 32 |
| Slika 14 Alat s TiCN prevlakom .....                                                                                    | 33 |
| Slika 15 Kemijsko prevlačenje u parnoj fazi (CVD).....                                                                  | 35 |
| Slika 16 ASP 2030 ploča (vlastiti izvor) .....                                                                          | 39 |
| Slika 17 Alatni stroj za rezanje vodenim mlazom WJS Micro .....                                                         | 40 |
| Slika 18 Slika noža bez PVD prevlake na kojem se već nakon 60 minuta rada vide oštećenja. (vlastiti izvor) .....        | 41 |
| Slika 19 Slika noža prije nanošenja PVD prevlake TiN (vlastiti izvor).....                                              | 42 |
| Slika 20 Tehnički nacrt slike noža (vlastiti izvor).....                                                                | 43 |
| Slika 21 Slika prevelikog zagrijavanja te zapinjanja noža u vodilici u trenutku rezanja (vlastiti izvor).....           | 44 |
| Slika 22 Stroj za elektrolučno nanošenje PVD prevlake PLATIT π411 (vlastiti izvor)....                                  | 45 |
| Slika 23 Slika unutarnje komore PLATIT π411 (vlastiti izvor).....                                                       | 46 |
| Slika 24 Noževi nakon PVD obrade (vlastiti izvor).....                                                                  | 47 |
| Slika 25 Calotest series Compact (CAT <sup>2</sup> c) .....                                                             | 48 |

|                                                          |    |
|----------------------------------------------------------|----|
| Slika 26 Multislojna TiN prevlaka (vlastiti izvor) ..... | 49 |
| Slika 27 Digitalni tvrdomjer KBE 150 R .....             | 50 |

## **Popis tablica**

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablica 1 Prevlake dobivene primjenom PACVD postupka (vlastiti izvor) ..... | 34 |
| Tablica 2 Tehnički list ASP 2023 .....                                      | 38 |
| Tablica 3 Parametri postupka ispitivanja kalotestom (vlastiti izvor) .....  | 49 |
| Tablica 4 Debljine prevlake.....                                            | 49 |
| Tablica 5 Srednje vrijednosti nanotvrdoće i dubine (vlastiti izvor).....    | 51 |