

**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOBRADNJE  
SVEUČILIŠTA U ZAGREBU**

**ZAVRŠNI RAD**

Mentorica:  
Doc. dr. sc. Suzana Jakovljević

Kandidat:  
Ivan Hren 0035164121

Zagreb, rujan 2012.

# **IZJAVA**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno uz konzultacije i korištenje navedene literature, te stečenog znanja tijekom studija.

Ivan Hren

# ZAHVALA

Zahvaljujem se svojoj mentorici doc. dr. sc. Suzani Jakovljević na stručnoj pomoći i savjetima prilikom izrade završnog rada. Osobito se zahvaljujem poduzećima Alas-Info d.o.o. ,Pfeifer-TTI te SinterMak d.o.o. na stručnoj pomoći i uzorcima na temelju kojih je ovaj završni rad napravljen.

Želim se zahvaliti g. Slavku Biliću na sugestijama koje su mi uvelike pomogle kako bi ovaj završni rad uspješno i kvalitetno priveo kraju. Zahvaljujem se djelatnicima Laboratorija za metalografska ispitivanja Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, koji su doprinjeli uspješnom provođenju eksperimentanlog dijela završnog rada.

Dragi tata, iako više nisi među nama, uvjeren sam da se i ti raduješ ovom danu, ma gdje god da se nalazio.

Iva, ljubavi, tebi posebno HVALA, jer bez tebe ovaj cilj vjerovatno nikada ne bi bio ostvaren.

Draga mama: „**Hvala ti što si vjerovala u mene**“

Zaslužuješ moju neizmjernu zahvalnost.

## SADRŽAJ

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. UVOD.....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2. POVIJESNI RAZVOJ.....</b>                            | <b>2</b>  |
| <b>3. SINTERIRANI TVRDI METALI.....</b>                    | <b>3</b>  |
| 3.1. Svojstva tvrdog metala.....                           | 3         |
| 3.2. Proizvodnja osnovne sirovine.....                     | 4         |
| <b>4. TEHNOLOGIJE IZRADE PRAHA.....</b>                    | <b>7</b>  |
| 4.1. Plinska atomizacija.....                              | 7         |
| 4.2. Vodena atomizacija.....                               | 8         |
| 4.3. Centrifugalna atomizacija.....                        | 9         |
| <b>5. KOMPAKTIRANJE (prešanje).....</b>                    | <b>9</b>  |
| 5.1. Klasično kompaktiranje (prešanje).....                | 10        |
| 5.2. Injekcijsko prešanje.....                             | 12        |
| 5.3. Toplo izostatsko prešanje.....                        | 13        |
| 5.4. Hladno izostatsko prešanje.....                       | 14        |
| <b>6. SINTERIRANJE.....</b>                                | <b>15</b> |
| <b>7. PRIMJENA.....</b>                                    | <b>17</b> |
| <b>8. SINTERIRANI ALATNI ČELICI.....</b>                   | <b>18</b> |
| <b>9. PRINCIP RADA ALATA ZA OBRADU ODVAJANJEM</b>          |           |
| <b>ČESTICA.....</b>  | <b>24</b> |
| 9.1. Alati za obradu odvajanjem čestica.....               | 24        |
| 9.2. Mehanizmi trošenja alata za obradu odvajanjem         |           |
| čestica.....   | 25        |
| 9.3. Abrazija.....   | 26        |
| <b>10. EKSPERIMENTALNI DIO.....</b>                        | <b>28</b> |
| 10.1. Uvod.....  | 28        |
| 10.2. Analiza otpornosti na abrazijsko trošenje metodom    |           |
| „suhi pijesak-gumeni kotač“ (ASTM G65).....                | 28        |
| 10.3. Ispitivanje mikrotvrdoće uzoraka.....                | 30        |
| 10.4. Mikroskopska analiza tragova trošenja.....           | 32        |
| 10.5. Elektronska mikroskopija.....                        | 32        |
| 10.6. Rezultati mikroskopske analize tragova trošenja..... | 33        |
| <b>11. ZAKLJUČAK.....</b>                                  | <b>36</b> |

## POPIS SLIKA

- Slika 1.** Shematski prikaz podjele alatnih čelika,
- Slika 2.** Shematski prikaz procesa proizvodnje tvrdog metala,
- Slika 3.** Shematski prikaz komore za plinsku atomizaciju,
- Slika 4.** Shematski prikaz komore za vodenu atomizaciju,
- Slika 5.** Shematski prikaz uređaja za centrifugalnu atomizaciju,
- Slika 6.** Alati za direktno prešanje,
- Slika 7.** Shematski prikaz kompenzacije gradijenata gustoće otpreska,
- Slika 8.** Shematski prikaz jednostrukog i dvostrukog prešanja,
- Slika 9.** Shematski prikaz injekcijskog prešanja,
- Slika 10.** Shematski prikaz toplog izostatskog prešanja,
- Slika 11.** Shematski prikaz hladnog izostatskog prešanja,
- Slika 12.** Snimka stvaranja vrata sinteriranjem Ni-kuglica promjera 22  $\mu\text{m}$  pri 1030 °C u trajanju od 30 min,
- Slika 13.** Shematski prikaz sinter peći,
- Slika 14.** Shematski prikaz različitih faza procesa sinteriranja,
- Slika 15.** Dvije varijante (od niza njih) proizvodnje sinteriranog brzoreznog čelika (pojednostavljeno),
- Slika 16.** Histogramska usporedba otpornosti na trošenje (rotirajuća ploča od tvrdog metala WC+Co ) lijevanih i sinteriranih čelika
- Slika 17.** Usporedba raspodjele ukupnih deformacija kaljenja i popuštanja čelika ASP 30 i čelika S 6-5-2,
- Slika 18.** Tijek mekšanja triju tipičnih vrsta alatnih čelika pri povišenim radnim temperaturama

**Slika 19.** Jedinični događaj abrazije,

**Slika 20.** Uređaj za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje,

**Slika 21.** Dijagramski prikaz gubitka mase uzoraka,

**Slika 22.** Skica penetratora i otiska kod Vickersove metode.

**Slika 23.** Shematski prikaz rada svjetlosnog, TEM i SEM mikroskopa

**Slika 24.** Uzorak 1 (TiC), uz povećanje 500x

**Slika 25.** Uzorak 2 (WC), uz povećanje 500x

**Slika 26.** Uzorak 3 (ASP 30), uz povećanje 500x

## **POPIS TABLICA**

**TABLICA 1.** Temperature i vremena sinteriranja za tvrde metale s različitim postotcima vezivne komponente,

**TABLICA 2.** Sinterirani čelici rađeni prema shemi postupka na slici 16,

**TABLICA 3.** Primjeri primjene sinteriranih čelika iz tablice 2,

**TABLICA 4.** Usporedba vrsta, svojstava i udjela karbida u visokougličnim čelicima s 12%Cr i čelika CPM (Crucible Powder Metall),

**TABLICA 5.** Početna masa uzorka,

**TABLICA 6.** Prikaz mikrotvrdoća uzoraka.





# 1. UVOD

Završni rad podjeljen je na dva dijela. Prvi dio rada je teorijski dok je drugi dio eksperimentalan. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je usporediti otpornost na abrazijsko trošenje tvrdog metala i alatnog čelika. U radu su korištena tri uzorka: dva su laboratorijska (u daljnjem tekstu: U1 i U2) i jedan industrijski uzorak (u daljnjem tekstu: U3)

Uzorak U1 i U2 poznatog su kemijskog sastava kao i uzorak U3

U1- sinterirani tvrdi metal, oznake ISO-P 01 na bazi TiC,  
kemijski sastav je: 90% TiC, 10 %Ni+Mo

U2- sinterirani tvrdi metal, oznake SV-10, na bazi WC  
kemijski sastav je: 74.3%WC, 8.8%Co, 15%TiC, 2%TaC(NbC)

U3- sinterirani alatni čelik ( HSS ), oznake ASP 30  
kemijski sastav je: 1.3% C, 4.2% Cr, 6.4% W, 5.0% Mo, 3.1% V,  
8.5% Co

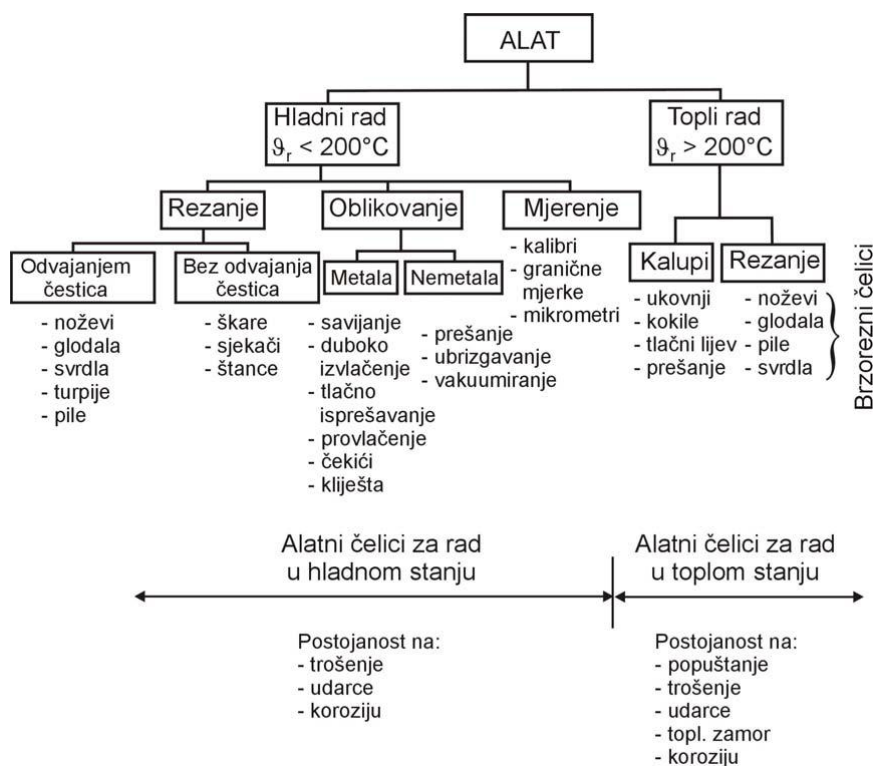
## 2. POVIJESNI RAZVOJ

Upotreba reznih alata potječe od samih početaka ljudske civilizacije. Prvi korišteni alati bili su kamena sjekira, kameni nož te svi ostali predmeti koje je čovjek koristio u svakodnevnom životu. Prije 5000 godina započinje upotreba alata izrađenog od meteoritskog željeza. Kasnijim kontaktom u vatri takvog željeza sa sredstvom za pougljičavanje nastaju prvi alati od čelika. Alat predstavlja svako sredstvo kojim čovjek olakšava ili omogućava izvršenje željene radnje bilo neposredno, snagom ruke, bilo posredno snagom nekog stroja.

Razvoj modernih industrijskih alata doživljava tehnološku revoluciju u drugoj polovici 19. stoljeća. U tom razvoju najvažnije je istaknuti slijedeće godine:

- 1868 g. MUSHET-ov čelik (2% C, 7% W, 2,5% Mo),
- 1898 g. TAYLOR-WHITE-ov brzorezni čelik (1,85% C, 3,8% Cr, 8% W),
- 1904 g. J. A. MATHEWS - brzorezni čelik s vanadijem,
- 1910 g. razvoj wolframovih čelika za topli rad,
- 1912 g. dodatak kobalta u alatne čelike,
- 1930 g. započinje razvoj brzoreznih čelika legiranih molibdenom [1].

Na **slici 1.** shematski je prikazana podjela alata i alatnih čelika kao i najvažniji zahtjevi koje alatni čelici moraju zadovoljiti.



**Slika 1.** Shematski prikaz podjele alatnih čelika [1]

Posebnu grupu alatnih čelika, a koji **slikom 1.** nisu obuhvaćani čine sinterirani alatni čelici i sinterirani tvrdi metali. Istraživanje i razvoj različitih procesa te laboratorijskih metoda sinteriranja započeli su početkom 20. stoljeća, znanstvenici poput Moissona, Troosta, Wedekinda i dr. Spomenuti istraživači predstavljaju začetnike nove industrijske discipline – metalurgije praha (eng. Powder Metallurgy – PM).

Današnji suvremeni materijali dobivaju se optimiranjem sastava i mikrostrukture materijala prema željenim svojstvima. Metalurgija praha pruža velike mogućnosti za ostvarenje takvog pristupa u proizvodnji materijala i različitih dijelova strojeva. Metalurgija praha obuhvaća ne samo proizvodnju metala u obliku praha nego i nemetalnih prahova, te oblikovanje dijelova iz takvih prahova postupkom sinteriranja, odnosno srašćivanja.

Fucks i Kopietz uspjeli su legiranjem volframovog karbida WC s elementima željezne grupe (npr. Fe, Ni, Co, Mn), kromom i titanom dobiti vrlo žilave, ali mekše materijale te prvi puta uvode postupak sinteriranja pod tlakom tzv. legure TIZIT. Kasnije, 1922. god., dolazi do poboljšanja legure TIZIT smanjenjem udjela metala željezne grupe, a povišenjem udjela titanovih karbida. Tako dobivena legura prethodnik je kasnije razvijenim i poznatijim legurama FERRO-TITANIT.

Nakon 1945. god. uglavnom je prevladavalo istraživanje metoda sinteriranja metalnih karbida, ali započinje i rad na ispitivanju mogućnosti sinteriranja keramičkih i željeznih materijala. U razvoju procesa sinteriranja posljednji su usavršavani alati od sinteriranog čelika. Prvi prihvatljivi postupci sinteriranja čelika opisani su tek 1953. god. (W. Hotop i E. Ritzau).

R. Kieffer je definirao sinteriranje kao postupak koji predstavlja prevođenje praha metala, metaloida, metalnih ili nemetalnih spojeva u čvrstu kompaktnu materiju pod utjecajem topline, a da pri tom bar jedna komponenta ostane nerastaljena. Općenito, sinteriranje predstavlja proces srašćivanja čestica istog ili različitog materijala koji se intenzivnije odvija pri višim temperaturama te ukoliko su čestice koje srašćuju manjih dimenzija.

Intenzivniji razvoj metalurgije praha počeo je proizvodnjom i uporabom "tvrdih metala", a posljednjih godina prolazi kroz razdoblje značajnijeg napretka. Danas se postupcima metalurgije praha mogu postići jednaka ili bolja svojstva od tradicionalnih postupaka oblikovanja metala. Postupci oblikovanja praha danas se također primjenjuju u proizvodnji keramike i metalnih kompozita.

Postupci sinteriranja čelika razvijeni su nakon usavršavanja postupaka sinteriranja tvrdih metala (npr. karbidi + Co, karbidi + Ni) i keramičkih materijala. Glavni razlog kasnijeg razvoja sinteriranja čelika predstavljao je problem proizvodnje osnovne sirovine tj. željeznog ili čeličnog praha [2].

## 3. SINTERIRANI TVRDI METALI

### 3.1. Svojstva tvrdog metala

Jedno od najvažnijih svojstava tvrdog metala je, kao što mu i naziv govori **TVRDOĆA**. Osim toga odlikuje se i dobrom žilavošću, što mu je zajedno sa osnovnim svojstvom- tvrdoćom daje odlična mehanička svojstva. Stoga je danas tvrdi metal materijal koji je nezamjenjiv u proizvodnji alata za sve vrste obrade i sve vrste materijala koji se obrađuju.

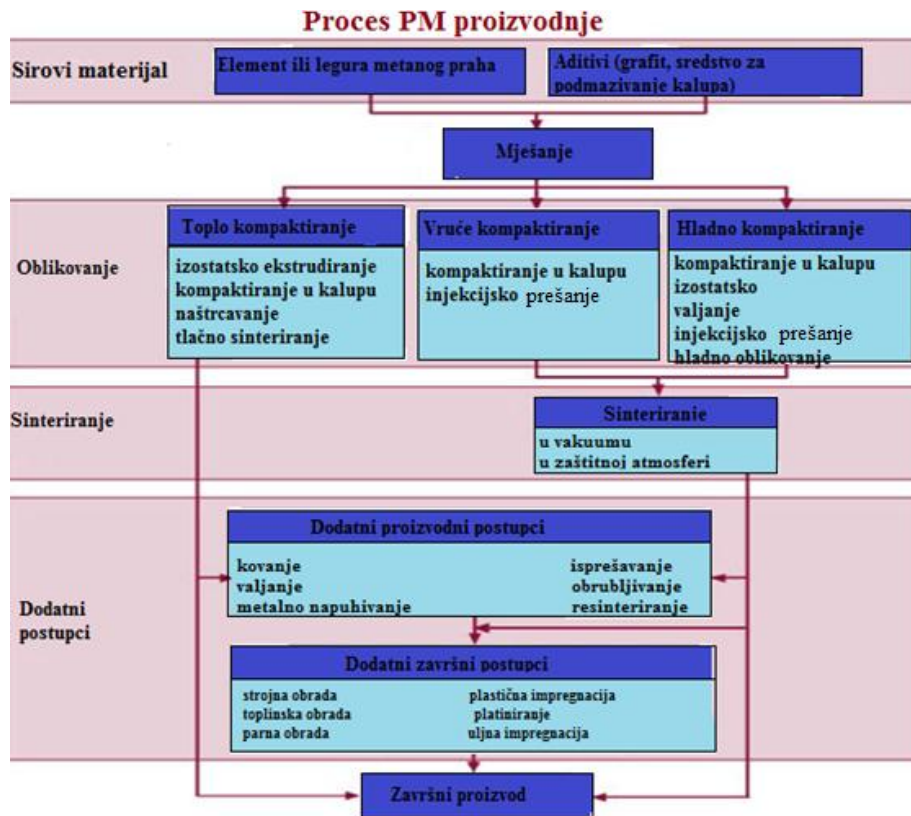
Također su važna električna i toplinska vodljivost, te koeficijent toplinske dilatacije, koji se razlikuju u odnosu na klasične materijale. Kako se tvrdi metal dobiva tehnologijom praškaste metalurgije, zapravo je moguće odabirom sastava, tj. postotka pojedinih komponenti, te veličinom čestice karbida projektirati svojstva tvrdog metala prema zahtjevima njegove primjene.

### 3.2. Proizvodnja osnovne sirovine

Tvrdi metal se dobiva tehnologijom praškaste metalurgije. To znači da su polazne sirovine, odnosno komponente prahovi. Prahovi se miješaju u željenim omjerima. Dobivena smjesa se zatim parafinira i granulira. Od granulata ili RTP ( Ready to press ) praha prešaju se otpresci. Postoje dva tipa otpreska.

**Prvi tip** otpreska, prešanjem dobiva konačni oblik, te se nakon prešanja termički obrađuju, odnosno sinteriraju da bi se dobio gotovi tvrdi metal.

**Drugi tip** je otpreska je otpresak koji nakon prešanja nema konačni oblik. Kako je brušenje tvrdog metala skup i relativno polagan proces, takvi se otpresci prije sinteriranja, predsinteriraju. Na taj način dobivaju dovoljnu mehaničku čvrstoću, te se mogu klasničnom mehaničkom obradom dovesti u finalni oblik. Nakon toga se sinteriziraju u gotov tvrdi metal. Na **slici 2.** dan je shematski prikaz procesa proizvodnje tvrdog metala. [3]



**Slika 2.** Shematski prikaz procesa proizvodnje tvrdog metala [4]

Osnovna komponenta tvrdog metala je volfram karbid ( WC ), a u slučaju da je riječ o brzoreznom čeliku (PMX-HSS), osnovna komponente su ( WC, VC, MoC, CrC ). Postotak WC kod tvrdog metala se kreće od 70 do 90 težinskih %. To je komponenta koja tvrdom metalu daje tvrdoću. Vezivna komponenta, koja tvrdom metalu daje žilavost su kobalt (Co) ili nikal ( Ni ). Postotak metala kreće se od 30-40 tež. %

Često se u tvrdi metal dodaju komponente za legiranje, kako bi se poboljšala neka svojstva da se balansiraju procesi sinteriranja.

Komponente koje se koriste za legiranje su:

- tantalniobi-karbid ( (TaNb)C ),
- titan-karbid ( TiC ),
- molibden-karbid ( Mo<sub>2</sub>C ),
- vanadij-karbid ( VC),
- krom-karbid ( Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>)

Što se tiče vrsti tvrdih metala, njih možemo podjeliti prema komponentama i prema sastavu. Prema komponentama dijelimo ih na:

a) Klasični tvrdi metal

- tvrdi metal na bazi WC-Co
- tvrdi metal na bazi WC-TiC-Co
- tvrdi metal na bazi WC-TiC-Ta(Nb)C-Co

b) Specijalni tvrdi metal

- tvrdi metal na bazi WC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-Ni
- tvrdi metal na bazi WC-TiC-Ni-Mo

Klasični tvrdi metali se osim toga klasificiraju prema postotku kobalta i veličine zrna volfram karbida, te primjenom. Ta klasifikacija je standardizirana standardom ISO 4499.[3]

Prema standardu ISO 4499 postoji pet grupa s podgrupama:

|                   |  |
|-------------------|--|
| <b>P 01- P 40</b> | Fina, srednja i gruba obrada željeza, čelika, legiranih čelika, temper ljeva                               |
| <b>K 01- K 40</b> | Fina, srednja i gruba obrada sivog ljeva, temper ljeva, manganskog čelika, obojenih metala, plastike, drva |
| <b>M 10- M40</b>  | Tokarenje, glodanje, blanjanje ; Srednja brzina rezanja s velikom dubinom reza                             |
| <b>G 10- G 60</b> | Kovanje, provlačenje, duboko izvlačenje, štancanje/perforiranje  |
| <b>B 06- B 40</b> | Sve vrste obrade kamena, betona, granita   |

Specijalni tvrdi metali razvijeni su za potrebe strojnih dijelova koji moraju biti otporni na koroziju. Jedna od važnih primjena je u strojevima i postrojenjima za preradu hrane, budući da gotovo sve vrste bilja i mesa sadrže kiseline i lužine koje klasični metal nagriza i na taj način u hranu mogu unjeti metalni otrov.

**Obzirom da se kao vezivo u specijalnim tvrdim metalima koristi nikal, takav tvrdi metal je nemagnetičan i stoga pogodan za izradu specijalnih alata koji ne smiju biti magnetični.**

## 4. TEHNOLOGIJE IZRADE PRAHA

Jedan od glavnih razloga razmjerno kasnog razvoja sinteriranih (neželjeznih) tvrdih metala pa i sinteriranih alatnih čelika bio je problem proizvodnje osnovne sirovine. Mehaničko mljevenje nije zadovoljavalo zbog nemogućnosti postignuća jednolike veličine praška. Čestice praška dobivene mljevenjem, imaju promjer između 10 i 400 $\mu$ m. Napredak se postigao uvođenjem raspršivanja litine željeza ili legure u struji vode ili inertnog plina.

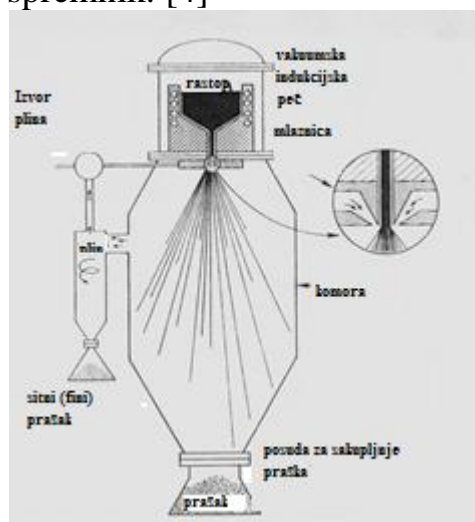
Proizvodnja metalnog praška može uslijediti iz tekućeg ili krutog stanja te fizikalnim, kemijskim i elektrokemijskim metodama. Fizikalni postupci proizvodnje praška su:

- rezanje,
- mljevenje,
- atomizacija

Posljednjih godina proizvodnja metalnog praška usmjerila se najviše na atomizaciju, gdje se prašk dobiva iz rastaljenog metala. Rastaljeni metal raspršuje se strujanjem fluida (voda, inertni plin, zrak) pod velikim pritiskom u sitne kapi, ili rastaljeni metal pada na rotirajući disk gdje dolazi do brzog skrućivanja u sitne čestice. Komercijalne atomizacijske jedinice mogu proizvesti i do 400 kg praška u minuti.[4]

### 4.1. Plinska atomizacija

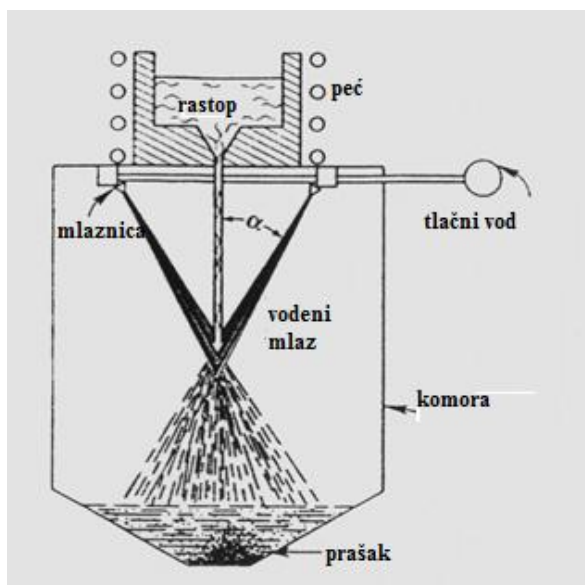
Plinska atomizacija koristi zrak, dušik ili argon kao fluid koji raspršuje rastaljeni metal. Zbog visokog pritiska plina rastaljeni metal se izlaskom iz sapnice pretvara u fini sprej. Kapljice se za vrijeme leta kroz komoru, **slika 3** skrućuju i padaju u prostor za skupljanje. Najsitnije čestice se strujom plina prenose u posebni spremnik. [4]



**Slika 3.** Shematski prikaz komore za plinsku atomizaciju [4]

## 4.2. Vodena atomizacija

Vodena atomizacija je najčešći postupak za dobivanje praška metala i njihovih slitina koji se tale na temperaturama ispod 1600 °C. Mlaz vode pod visokim pritiskom sudara se pod određenim kutem sa mlazom rastaljenog metala, što rezultira raspršivanjem i brzim skrućivanjem nastalih kapljica. Veličina čestica praha ovisi prvenstveno o pritisku vode. Tako su eksperimentom dobivene čestice čeličnog praha srednje veličine 117  $\mu\text{m}$ , uz pritisak vode od 1,7 MPa. Uz pritisak vode od 13,8 MPa dobivene su čestice srednje veličine 41  $\mu\text{m}$ . Pritisci vode od 150 MPa daju čestice veličine 5  $\mu\text{m}$ . [4]



**Slika 4.** Shematski prikaz komore za vodenu atomizaciju [4]

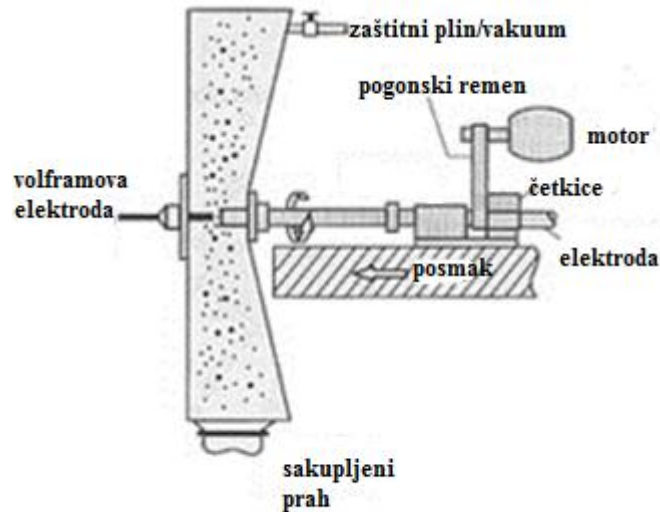
Osim atomizacije (daleko najveći udio u proizvodnji) prah se proizvodi i već ranije spomenutim kemijskim postupcima i elektrolizom.

Čestica praha je definirana kao najmanja više nedjeljiva jedinica. Općenito u PM koriste se čestice veće od čestica dima (0,01...1  $\mu\text{m}$ ), ali manje od zrnaca pijeska (0,1...3 mm). Mnogi metalni prašci su dimenzija sličnih promjeru ljudske kose (25...200  $\mu\text{m}$ ).



### 4.3. Centrifugalna atomizacija

Centrifugalna atomizacija primjenjuje se za proizvodnju praha iz reaktivnih i teško taljivih metala kao što su Zr, Ti ili Ni-slitine. Vrh rotirajuće elektrode (cca 50000 RPM ) od takovog metala topi se u komori elektronskim snopom i/ili lukom plazme, a kapljice prilikom leta u komori skrućuje u fini prah.



Slika 5. Shematski prikaz uređaja za centrifugalnu atomizaciju [4]

## 5. KOMPACTIRANJE ( prešanje )

Drugi korak u postupku proizvodnje PM dijelova je compactiranje. Podjela postupaka compactiranja prikazana je u poglavlju 3.2. **slikom 2.**

Četiri najčešće korištena postupka compactiranja su:

- compactiranje (prešanje) u kalupu,
- injekcijsko prešanje,
- toplo izostatsko prešanje HIP,
- hladno izostatsko prešanje CIP

## 5.1. Kompaktiranje u kalupu

Prešanje tvrdometalnih otpresaka obavlja se u alatima koji imaju matrice od tvrdog metala, dok su im žigovi (tiskači) od čelika tipa OCR 12 ili sinter čelika koji ima svojstvo da se može zakaliti na tvrdoću 62-64 HRC. Ako su žigovi mekši, dolazi do ljepljenja granulata na radnu površinu žigova, a ako su pak tvrdi može doći do pucanja i oštećenja matrice alata koja je od tvrdog metala.

Preše na kojima se prešaju otpresci su hidraulične ili mehaničke. Pritisak prešanja ovisi o vrsti tvrdog metala koji se preša i kreće se u rasponu od  $1-3 \text{ t/cm}^2$ , odnosno 100-300 Mpa.

Postoje dva tipa otpreska :

- direktni otpresci,
- otpresci kojima se prešanjem ne može dobiti konačni oblik

**Direktni otpresci** su nakon prešanja spremni za sinteriranje. Uglavnom se koriste za izradu pločica za tokarenje i glodanje koje na sebi imaju gravure koje omogućuju bolju i bržu obradu u eksploataciji. U tom slučaju, koriste se automatske preše koje imaju ugrađene mjerne instrumente kojima se u toku prešanja kontroliraju parametri. Također posjeduju robotske ruke koje odmah pripremaju za slaganje u sinter peć.

Posebno valja naglasiti da je za takvu vrstu prešanja izuzetno važna kvaliteta izrade alata. Na **slici 6** prikazani su alati za direktno prešanje. [3]



**Slika 6.** Alati za direktno prešanje [3]

### Otpresci kojima se prešanjem ne može postići konačni oblik

To su otpresci koji nemaju konačan oblik i moraju se naknadno oblikovati. Postupak izrade se izvodi tako da se otprešaju slični oblici, te zatim u sinter pećima očvrstnu na tvrdoću „krede“. Nakon toga oblikuju se na željeni oblik i sinteriraju.

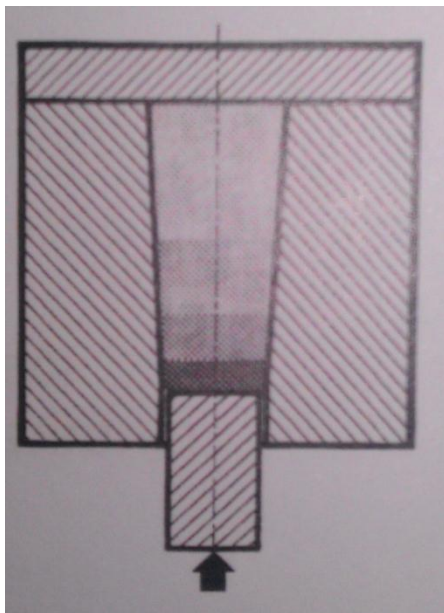
Kod otpresaka koje treba naknadno oblikovati valja voditi računa o gustoći otpreska. Naime, postoji iskustveni omjer između visine otpreska i širine, odnosno promjera otpreska, taj omjer je izražen formulom:

$$H = 2.5D$$

pri čemu je: H-visina otpreska

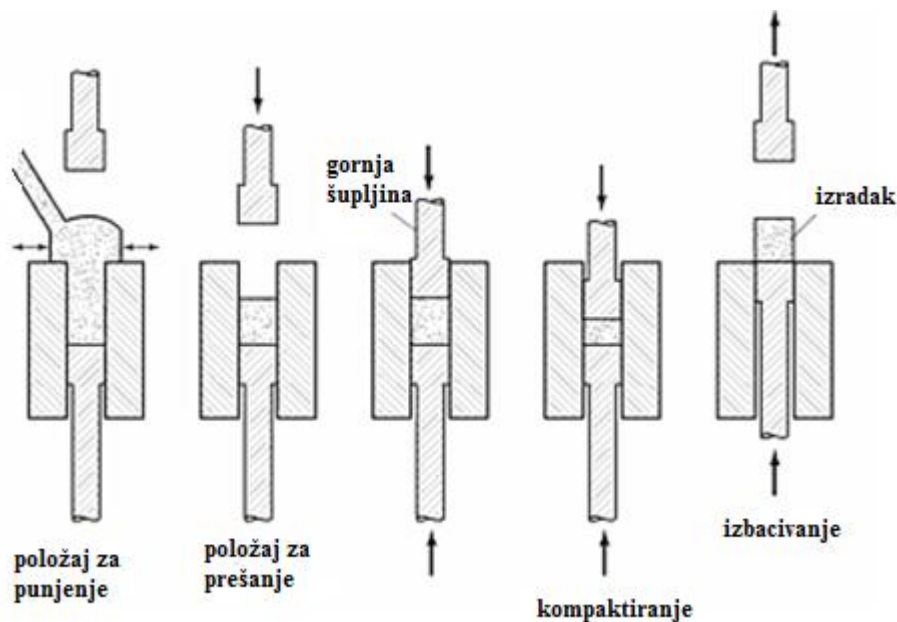
D- promjer otpreska

Kod cilindričnih otpresaka taj problem se često rješava tako da se prešaju konusni otpresci. Jedna strana, obično, gornja je šira čime se kod stezanja kompenzira gradijent gustoće otpreska. Na **slici 7** shematski je prikazan takav slučaj.



**Slika 7.** Shematski prikaz kompenzacije gradijenta gustoće otpreska [3]

Opći problem kod ovog postupka je rad s vrlo visokim pritiscima stoga je potrebno uzeti u obzir trenje i trošenje, stoga se prahu dodaje mazivo. Ukoliko se pritisak ostvaruje preko oba žiga, postupak se naziva dvostruko prešanje, a ako se pritiskanje ostvaruje samo s jedne strane postupak se naziva jednostruko prešanje. Na **slici 8** shematski su prikazani postupci jednostrukog i dvostrukog prešanja.[3]



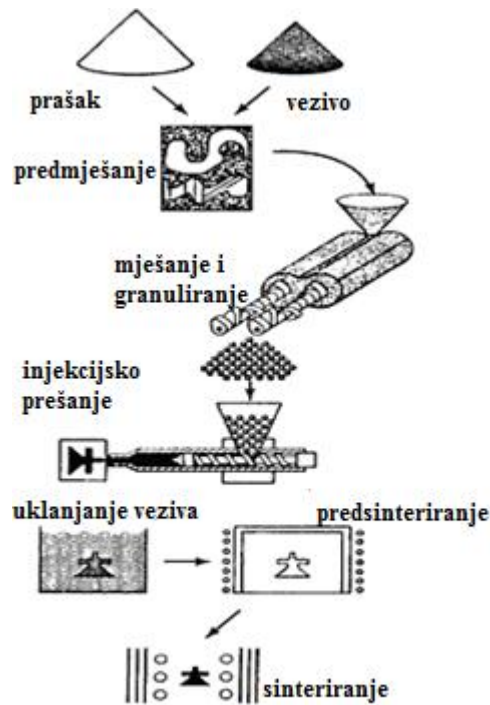
**Slika 8.** Shematski prikaz jednostrukog i dvostrukog prešanja [4]

Osim klasičnog prešanja, postoje još i toplo izostatsko prešanje, hladno izostatsko prešanje i injekcijsko prešanje.

## 5.2. Injekcijsko prešanje

Ovaj je postupak poznat je pod kraticom PIM (*Powder Injection Molding*). Kod ovog postupka sjedinjene su prednosti različitih tehnologija. Od klasične PM preuzeta je mogućnost višestrukog legiranja mješanjem i prešanjem najrazličitijih prašaka kao i mogućnost proizvodnje dijelova od nelivljivih ili visokotaljivih metala i njihovih slitina. Od prerade polimera koristi se mogućnost izrade proizvoda složenog oblika ovim postupkom.

Postupak počinje predmiješanjem metalnog praha s organskim vezivom ( termoplastična mješavina voska, polimera, ulja i maziva) . Nakon miješanja i granulirana smjesa se ubrizgava u kalup. Nakon prešanja vezivo se uklanja otapanjem i/ili zagrijavanjem. Završni korak je sinteriranje. Tipični prah za PIM je okruglastog oblika, a veličina čestica ( 10...20  $\mu\text{m}$ ) je manja nego kod konvencionalnog prešanja (50...150  $\mu\text{m}$ ). Zbog prisustva veziva u otpresku ( do 40% volumena) dolazi do značajnog smanjenja dimenzija sinteriranjem ( do 20 % linearno). Ovim postupkom proizvode se poglavito manji, složeniji otpresci boljih eksploatacijskih svojstava u usporedbi s klasičnim kompaktiranjem u prvom redu zbog više gustoće. **Slikom 9** shematski je prikazan postupak injekcijskog prešanja. [4]



**Slika 9.** Shematski prikaz inekcijskog prešanja [4]

### 5.3. Toplo izostatsko prešanje HIP

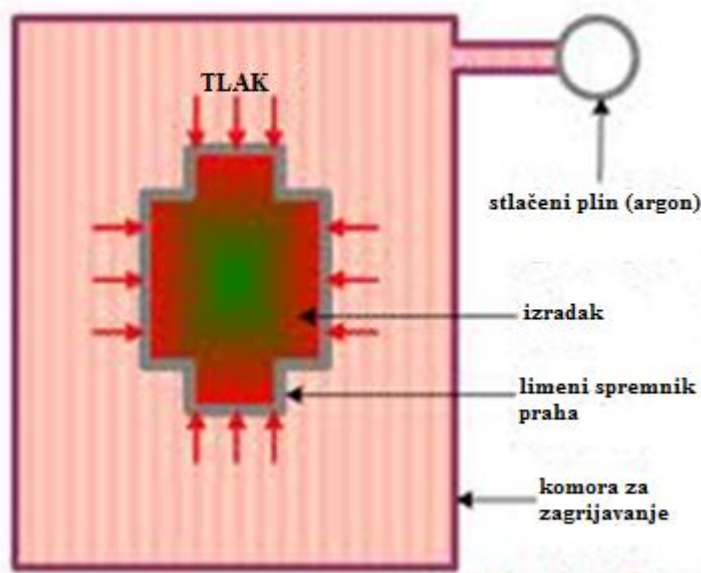
Toplo izostatsko prešanje ( *engl. hot isostatic pressing - HIP* ) spada u postupke koji objedinjuju postupke kompaktiranja i sinteriranja u jednom koraku za razliku od klasičnog postupka. Zbog toga što je na taj način moguće postići potpunu ili teoretsku gustoću. HIP pripada tzv. postupcima za postizanje potpune gustoće ( *engl. full-density processes* ).

Koriste se fleksibilni kalupi, a tijekom procesa kontroliraju se parametri temperature, tlaka i vremena. Prah se puni u spremnik koji je nepropusan za plin. Izrađuje se od materijala koji je deformabilan kod radne temperature ( koriste se čelik, nehrđajući čelik, staklo ) ovisno o maksimalnoj temperaturi. Spremnik se prije same HIP konsolidacije zagrijava pod vakuumom zbog otplinjavanja, te se zabrvtljuje.

Prešanje praha provodi se u plinskoj atmosferi ( npr argonu ili dušiku ) uz istovremeno zagrijavanje. Temperature dosežu 2000 °C, a tlak 200 MPa. Nakon završetka ciklusa spremnik se skida s otpreska. Zbog ekonomičnosti HIP se provodi samo na skupim materijalima ( npr. superslitine, Ti , Al, tvrdi metalni kompoziti ) za izradke najviše kvalitete koji se po mehaničkim svojstvima izjednačuju ili čak premašuju lijevane ili gnječene izvedbe. Prahovi koji se koriste kod toplog izostatskog prešanja obično su kuglastog oblika i veoma u čisti. Površina čestice praha nema nečistoća kao što su npr. oksidni filmovi.

**Slikom 10.** shematski je prikazan postupak toplog izostatskog prešanja. [5]

### Toplo izostatsko prešanje



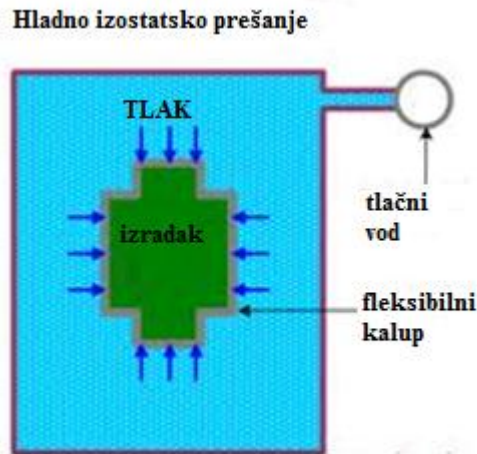
**Slika 10.** Shematki prikaz toplog izostatskog prešanja [6]

#### 5.4. Hladno izostatsko prešanje CIP

Postupak hladnog izostatskog prešanja koristi fleksibilnu membranu kako bi se prašak razdvojio od tekućeg medija, koji je pod tlakom. Tipični materijala za izradu kalupa su: neopren, latex, uretan, poly-vinilklorid te ostali elastomerni materijali. Kako se tijekom ovog postupka kalup stže (skuplja) zajedno sa praškom, utjecaj trenja je smanjen. Isto tako pošto je pritisak medija ravnomjerno raspoređen po površini kalupa, ne postoji teoretska granica u veličini izradka, a promjer i visina izradka ovise o veličini komore za prešanje.

Pri usporedbi ovog postupka sa klasičnim kompaktiranjem, hladnim izostatskim prešanjem može se postići ujednačenija gustoća zbog minimalnog trenja. Tlak u komorama za prešanje obično je ograničen na 415 Mpa iako se na tržištu mogu pronaći i komore koje ostvaruju veće tlakove. Također oprema za hladno izostatsko prešanje može se automatizirati ali je broj proizvedenih komada po jedinici vremena manje nego kod klasičnog kompaktiranja.

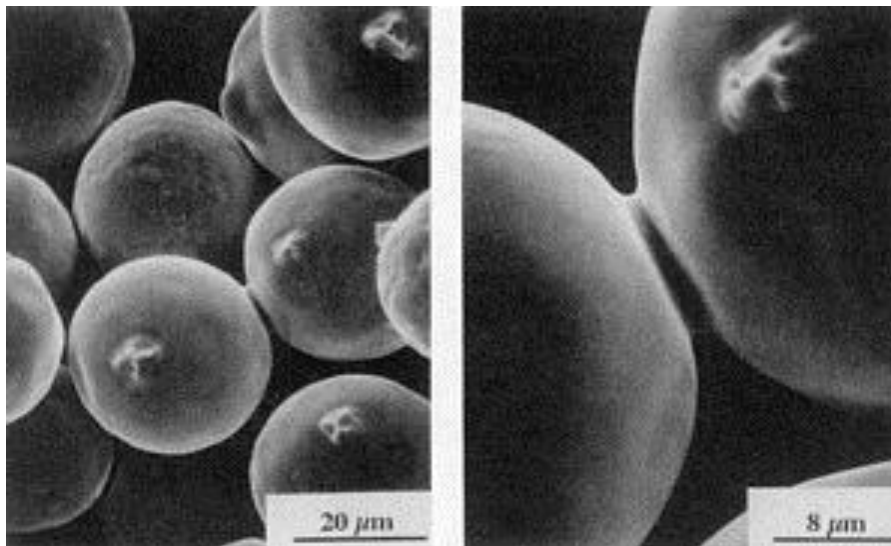
**Slikom 11** shematski je prikazan postupak hladnog izostatskog prešanja [4]



**Slika 11.** Shematski prikaz hladnog izostatskog prešanja [6]

## 6. SINTERIRANJE

Sinteriranje (hrv. srašćivanje) je spajanje čestica pri visokoj temperaturi. Može uslijediti na temperaturi ispod temperature tališta (cca  $2/3 T_t$ ) i u krutom stanju, difuzijom atoma ali se u nekim stadijima sinteriranja može javiti i talina. Veza među česticama ostvaruje se stvaranjem "vrata" na mjestu kontakta, **slika 12**.



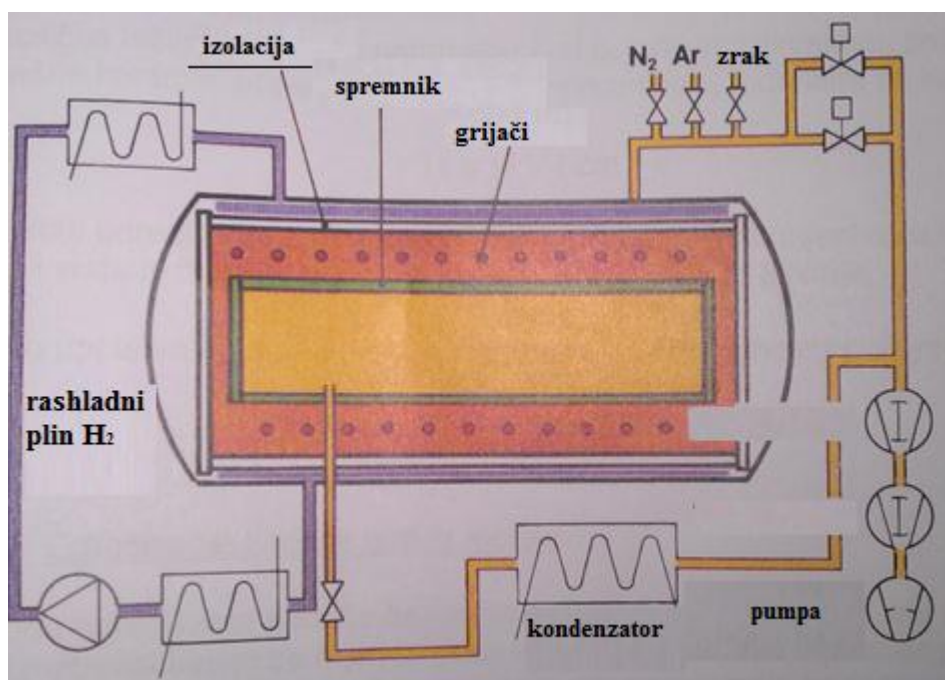
**Slika 12.** Snimka stvaranja vrata sinteriranjem Ni-kuglica promjera  $22 \mu\text{m}$  pri  $1030^\circ\text{C}$  u trajanju od 30 min. [6]

Sinteriranje otpresaka i oblikovanih otpresaka obavlja se u pećima za sinteriranje u zaštitnoj atmosferi reducirajućeg plina (vodika) ili vakuumu. Temperature i vrijeme sinteriranja ovise o vrsti tvrdog metala odnosno o postotku vezivne komponente (Co, Ni ili Mo). **Tablicom 1** dane su temperature i vremena sinteriranja za tvrde metale s različitim postocima vezivne komponente. [4]

TABLICA 1. Temperature i vremena sinteriranja za tvrde metale s različitim postocima vezivne komponente [3]

| Temperatura (°C) | Vrijeme (min) | % vez.komp. |
|------------------|---------------|-------------|
| 1215             | 15            | 25-30       |
| 1310             | 45            | 15          |
| 1350             | 60            | 10          |
| 1400-1450        | 60            | 4-6         |

**Slikom 13** prikazana je vakuumska peć za deparafiniranje i sinteriranje s otpornim grijačima.



**Slika 14.** Shematski prikaz sinter peći [3]

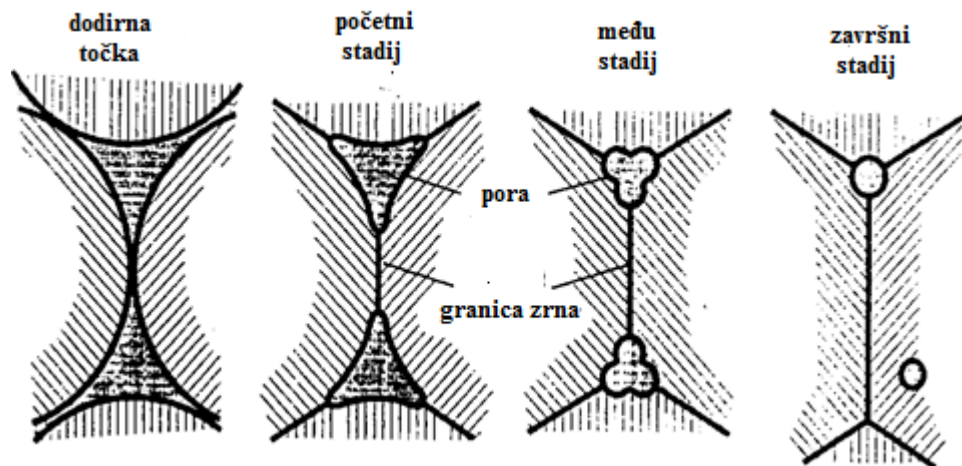
Otpresci koji se sinteriraju slažu se na grafitnu podlogu. Grafitna podloga je tipa MKSU ili CFC ( sinterirana grafitna vlakna ). U slučaju novih podloga ili ako podloge nisu upotrebljavane više od 20 dana, treba ih odžariti na 1100°C.

Da bi se otpresci tvrdog metala zaštitili od difundiranja ugljika iz podloga, one se moraju premazati suspenzijom etilnog alkohola ( tehničkog ) ili benzina i zirkonijevog oksida u prahu. Premazane ploče treba sušiti na zraku 2-3 sata.

Srašćivanje čestica nastaje kretanjem atoma koje smanjuju visoku površinsku energiju kuglica. **Što su čestice manje imaju višu površinsku energiju te srašćuju brže!** Kod mehanizma sinteriranja način kretanja atoma je opće tečenje. Za metalne prahove to je difuzija atoma kroz površinu čestice na mjestu kontakta u drugu interkristalno ili pak transkristalno. Budući da je difuzija toplinski aktivirani proces funkcija je temperature i vremena. Slijedeća slika



pokazuje shematski različite faze procesa sinteriranja. S vremenom čestice srašćuju, udio pora se smanjuje te se formiraju granice zrna.



**Slika 14.** Shematski prikaz različitih faza procesa sinteriranja [4]

## 7. PRIMJENA

Pored primjene ovih materijala za izradu "klasičnih" strojnih dijelova (posebice u auto-industriji), postupak sinteriranja metalnih prahova primjenjuje se za izradu dijelova koje je teško ili nemoguće izraditi drugim tehnologijama (porozni filteri i ležajevi, tvrdi metali, cermeti i sl.).

## 8. SINTERIRANI ALATNI ČELICI

Sinterirani čelici postižu potpunu izotropiju strukture, svojstava i vlastitih naprezanja prvenstveno su zbog primjene praha vrlo malih dimenzija te vrlo brzog hlađenja čime se isključuje mogućnost pojave dendritne strukture praha. Srašćene čestice također pokazuju bezdendritnu strukturu. Sinterirani čelici su prikladni za termokemijsku obradbu i za obradbu prevlačenjem (PVD, CVD) jer je izotropna struktura znatno povoljnija za difuziju od anizotropne. Glavna negativna karakteristika svih metala nastalih postupkom sinteriranja je njihova visoka krhkost.

Glavni razlog više otpornosti na trošenje sinteriranih čelika u odnosu na kovane čelike predstavlja pojava dvostrukih molibdenovih i/ili volframovih te vanadijevih karbida u mikrostrukturi sinteriranih čelika. Karbidi nastali kod sinteriranih čelika su znatno kvalitetniji od karbida  $M_7C_3$ .

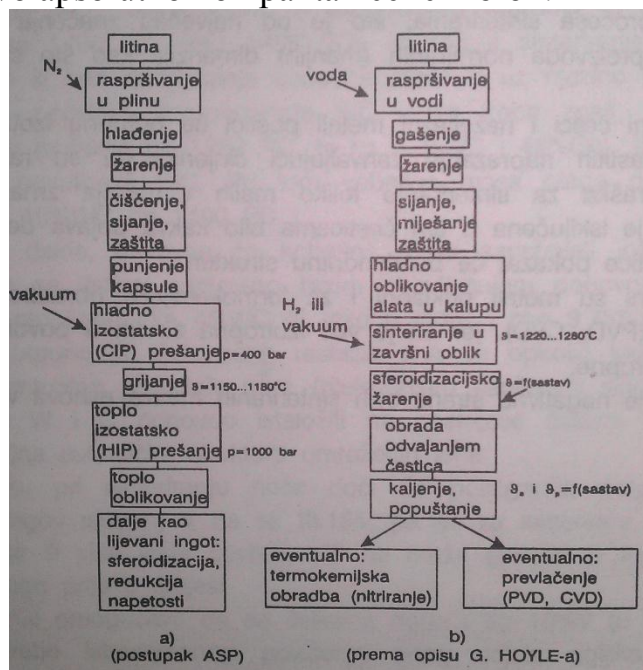
Sinteriranje čelika razvilo se nakon već gotovo potpuno razvijenih postupaka sinteriranja tvrdih metala i keramičkih materijala. Glavni cilj sinteriranja čelika, u pravilu jednak je cilju sinteriranja ostalih materijala: **težnja prema izotropiji**. Jedan od glavnih razloga razmjerno kasnog razvoja ove skupine čelika bio je problem proizvodnje osnovne sirovine: željeznog ili čeličnog praha. Mehaničko mljevenje, naime, nije zadovoljavalo zbog nemogućnosti postignuća jednolike veličine praška. Čestice željeznog ili čeličnog praška dobivene mljevenjem, imaju naime karakterističnu dimenziju („promjer“) između 10 i 400  $\mu\text{m}$  i jednoličnije.

Napredak je postignut uvođenjem tehnologije raspršivanja taline željeza ili legure u struji vode ili inertnog plina, taj postupak nazive se, kao što je već ranije spomenuto u poglavljima 4.1 i 4.2 **ATOMIZACIJA**.

Među postupcima raspršivanja taline poznati su postupci ASEA-Stora (švedski) te CRUCIBLE (američki). U oba postupka talina se fino raspršuje u inertnom plinu i male se čestice toliko brzo hlade (gase), da segregacije u njima niti ne mogu nastati, pa je svaka čestica za sebe već izotropne građe.

Nastali se prašak puni u limene kapsule proizvoljnih dimenzija, obično sličnih onima uobičajeno lijevanih ingota. Kapsula se zatvori limenim poklopcem koji se obično zavari i onda se evakuira i podvrgne hladnom izostatskom prešanju (CIP), tlakom od 400 bara. [1]

Nakon ugrijavanja na 1150°C kapsula se toplo izostatski tlači tlakom od 1000 bara što daje gotovo apsolutno kompaktni čelični blok.



**Slika 15.** Dvije varijante (od niza njih) proizvodnje sinteriranog brzoreznog čelika (pojednostavljeno) [2]

Nakon toga, čelični se blok dalje toplo oblikuje i žari postupcima koji su uobičajeni za lijevane čelične ingote. Naime iz ovoga se da lako zaključiti da se na ovaj način mogu proizvoditi i konstrukcijski čelici.

Također odavdje se vidi da je postupak „klasičnog“ sinteriranja u struji vodika zamijenio postupak HIP (toplo izostatsko prešanje).

U **tablici 2** dan je prikaz sastava triju skupina sinteriranih alatnih čelika i to upravo onih skupina, koje u valjanom i kovanom stanju imaju izrazite segregacije, a i koje se rabe za kalupe te rezne alate gdje upravo pojava dendritičnosti posebno smeta.

Osim toga potrebno je naglasiti na visoke udjele ugljika i vanadija što se u lijevanim i kovanim čelicima ne da postići. Isto tako treba upozoriti i na visoke sadržaje kroma u čelicima tipa: ISOMATRIX M390 i CPM T440 VM, koji su otporni na trošenje jer sadrže mnogo karbida ali su i postojani na koroziju jer im osnovna masa otapa više od 12%Cr.[2]

TABLICA 2. Sinterirani čelici rađeni prema shemi postupka na slici 15 [2]

| trgovački naziv sinteriranog čelika | sastav, % |      |      |     |      |      | žarenje    |               | kaljenje   |         | popuštanje**     | napomena                           |
|-------------------------------------|-----------|------|------|-----|------|------|------------|---------------|------------|---------|------------------|------------------------------------|
|                                     | C         | Cr   | W    | Mo  | V    | Co   | meko*      | reduk. napet. | 9a, °C     | gašenje |                  |                                    |
| ISOMATRIX PM- (Böhler, Austrija)    |           |      |      |     |      |      |            |               |            |         |                  |                                    |
| - K 190                             | 2,3       | 12,5 | -    | 1,1 | 4,0  | -    | 800..850   | 650..700      | 1100       | U, TK   | 530(2x3h)        | kalupni čelici<br>brzorezni čelici |
| - M 390                             | 1,9       | 20,0 | 0,6  | 1,0 | 4,0  | -    | 1020..1040 | 650..700      | 1070..1150 | Z,U,TK  | 150..400         |                                    |
| - S 690                             | 1,33      | 4,3  | 5,9  | 4,9 | 4,1  | -    | 770..840   | 600..650      | 1130..1200 | U,Z,TK  | 540..560         |                                    |
| - S 390                             | 1,6       | 4,75 | 0,8  | 2,0 | 5,0  | 8,0  | 770..840   | 600..650      | 1150..1250 | U,Z,TK  | 520..560         |                                    |
| SPEEDSTEEL ASP (Söderfors, Švedska) |           |      |      |     |      |      |            |               |            |         |                  |                                    |
| ASP 23                              | 1,3       | 4,2  | 6,4  | 5,0 | 3,1  | -    | 870..900   | 600..700      | 1050..1180 | TK,Z,U  | 3x ↓<br>560..580 | brzorezni čelici                   |
| ASP 30                              | 1,3       | 4,2  | 6,4  | 5,0 | 3,1  | 8,5  | 870..900   | 600..700      | 1100..1190 | TK,Z,U  | 560..580         |                                    |
| ASP 60                              | 2,3       | 4,0  | 6,5  | 7,0 | 6,5  | 10,5 | 870..900   | 600..700      | 1100..1190 | TK,Z,U  | 560..580         |                                    |
| CPM (R.Zapp, Njemačka)              |           |      |      |     |      |      |            |               |            |         |                  |                                    |
| CPM Rex M4                          | 1,35      | 4,25 | 5,75 | 4,5 | 4,0  | -    | 840..880   | 650..700      | 1080..1200 | U,Z,TK  | 3x ↓<br>540..560 | brz.čel.                           |
| CPM 10 V                            | 2,45      | 5,25 | -    | 1,3 | 9,75 | -    | 780..850   | 650..700      | 1070..1180 | U,Z,TK  | 540..560         |                                    |
| CPM 9 V                             | 1,73      | 5,25 | -    | 1,3 | 9,0  | -    | 770..840   | 600..700      | 1070..1150 | U,Z,TK  | 540..560         | kalupni čelici                     |
| CPM T440 VM                         | 1,90      | 17,5 | -    | 1,2 | 6,0  | -    | 1000..1040 | 600..700      | 1080..1120 | U,Z,TK  | 200..450         |                                    |
| CPM Superacor                       | 3,75      | 25,0 | -    | 3,0 | 9,0  | -    | 900..960   | 600..700      | 1080..1180 | U,Z,TK  | 540..560         |                                    |

Kratice: TK-topla kupka

U- ulje

Z-zrak

\*hlađenje 15....30K/h

\*\* temperatura tople kupke:

- za brzorezne čelike 500...550°C

- za kalupne čelike 200...250°C ili 400...450°C

Svi su ovi čelici nenormirani, a podaci su uzeti iz stručne literature [2]

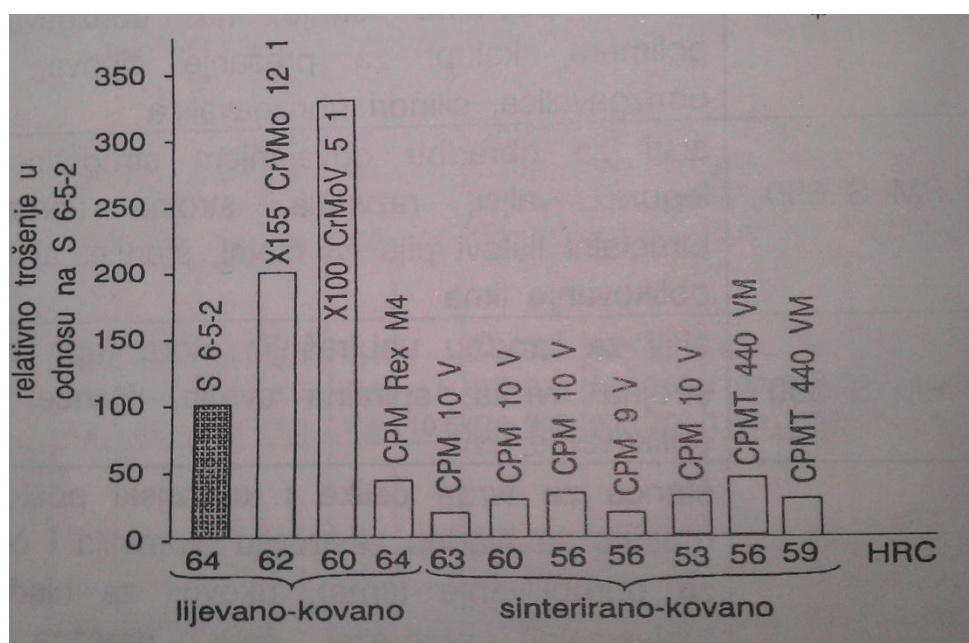
TABLICA 3. Primjeri primjene sinteriranih čelika iz tablice 2. [2]

| naziv čelika              | područje primjene   |
|---------------------------|---|
| <b>ISOMATRIX PM K 190</b> | kalupi za preradu duroplasta, cilindri ekstrudera za polimere, mlaznice, zasuni povratne struje, štance (posebno za tanki lim), kalupi za tlačno isprešavanje metala, alati za duboko vučenje, alati za valjanje navoja, matrice za hladno kaovanje, alati za obradu drveta, kalupi za prešanje keramike i praška za sinteriranje |
| <b>ISOMATRIX PM M 390</b> | kalupi za preradu abrazivnih i korozivnih polimera, zasuni povratne struje na ubrizgavalicama za polimere, kalupi za prešanje čipova, pužni vijci ubrizgavalica, cilindri ubrizgavalica   |
| <b>ISOMATRIX PM S 690</b> | alati za obradu odvajanjem strugotine Ni i Ti legura, valjci, razvrtala, strojna narezna svrdla, bimetalni listovi pila za metal, štance, alati za hladno oblikovanje lima  |
| <b>ISOMATRIX PM S 390</b> | alati za izradu unutarnjih utora, strojna svrdla, spiralna svrdla, štance, matrice za oblikovanje lima  |
| <b>ASP 23</b>             | štance za tvrde čelike i korozivni postojane čelike, matrice za hladnu ekstruziju aluminija i čelika, štance za obrubljivanje (srha), ukovnji za hladno kovanje, „univerzalni“ brzorezni čelik, narezna svrdla za obradu malim brzinama rezanja   |
| <b>ASP 30</b>             | tokarski noževi, glodala, alat za narezivanje, razvrtala, upuštala, štance  |
| <b>ASP 60</b>             | tokarski noževi (i za odrezivanje), glodala, razvrtala, štance, kalupi za prešanje praška   |
| <b>CPM Rex M 4</b>        | brzorezni čelici za opću primjenu, štance, kalupi za preradu korozivski neaktivnih polimera   |
| <b>CPM 10 V</b>           | cilindri ubrizgavalica polimera, posebno za žigove i matrice kalupa za preradu abrazivski aktivnih polimera   |
| <b>CPM 9 V</b>            | zasuni povratne struje na ubrizgavalicama za polimere, žigovi i matrice za preradu duromera   |
| <b>CPM T 440 M</b>        | žigovi i matrice za preradu korozivski aktivnih i abrazivnih polimera   |

Dijagramom na **slici 16** dan je kvantitativni prikaz trošenja koje je nastalo neposrednim mjerenjem kao argument na **tablicu 4**.

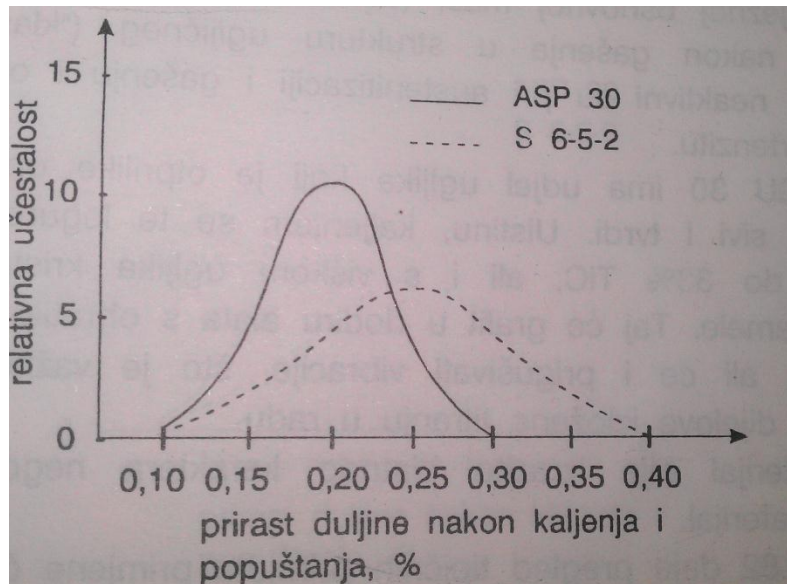
TABLICA 4. Usporedba vrsta, svojstava i udjela karbida u visokougličnim čelicima s 12% Cr i čelika CPM (Crucible Powder Metall) [2]

| materijal         | tip karbida                   | HV <sub>μ</sub> karbida    | HV <sub>μ</sub> matrice | maks. HRC matrice | udio karbida % |
|-------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------|----------------|
| 12%-tni Cr čelici | M <sub>7</sub> C <sub>3</sub> | ~ 1300                     | ~ 700                   | 62                | ~ 15           |
| CPM čelici        | M <sub>6</sub> C i MC         | 1500...1800<br>2700...2900 | 800...900               | 65                | ~ 30           |



**Slika 16.** Histogramska usporedba otpornosti na trošenje (rotirajuća ploča od tvrdog metala WC+Co) lijevanih i sinteriranih čelika (tablica 2) [2]

Jedna od posebnosti ove skupine čelika jest snižavanje temperature austenitizacije sa uobičajenih 1180°C na 1100, pa i na 1050°C, čime se može utjecati na žilavost (snižavanje tvrdoće samo za sebe bilo bi besmisleno). Odavdje slijedi i zaključak o primjenjivosti ovih u, biti brzoreznih čelika i za alate za udarni rad (npr. za čekiće mlinova čekićara). Daljnja prednost sinteriranih brzoreznih čelika posljedica je visoke izotropije, a sastoji se od znatno povoljnije raspodjele skupnih deformacija kaljenja nego što bi to bio slučaj za kovani čelik S 6-5-2 (Č.7680), a to je prikazano **slikom 17**. [2]



**Slika 17.** Usporedba raspodjele ukupnih deformacija kaljenja i popuštanja čelika ASP 30 i čelika S 6-5-2 [2]

Sinterirani su čelici vrlo prikladni za termokemijske obrade i obrade prevlačenjem. Postupci nitriranja i postupci prevlačenja (PVD, CVD) izvode se nakon potpuno završene osnovne obrade i nakon brušenja. Svrha je svih tih obradbi dodatno povećanje otpornosti na trošenje putem smanjenja koeficijenta trenja ili postignućem inkompatibilnosti rešetaka površinskih slojeva oštrice i obratka.

## 9. PRINCIPI RADA ALATA ZA OBRADU ODVAJANJEM ČESTICA

### 9.1. Alati za obradu odvajanjem čestica

Mehanička naprezanja rijetko su takva, da bi bila uzrok uništenja alata (npr, izvijanje ili torzija svrdla). Glavni problem je u naprezanjima uslijed trenja (na lokalitetu oštrice), jer se trenjem razvija toplina pa temperatura lokaliteta oštrice raste. Toplina se razvija zbog:

- odvajanja strugotine,
- sabijanja strugotine,
- trenja strugotine o radnu plohu alata

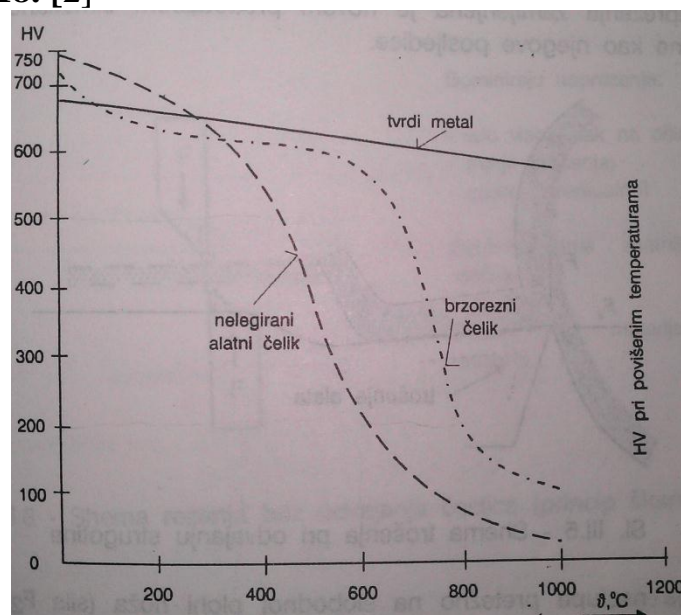
pa da, prema tome, količina razvijene topline ovisi o:

- režimu obrade (posmak, brzina, dubina),
- geometrijskim karakteristikama oštrice alata,
- obrašivanom materijalu.

Glavna će se karakteristika rada oštrice moći opisati lokalnim trenjem i površinskim tlakom pri povišenim radnim temperaturama.

Trošenjem oštrice (zatupljivanjem) mjesto je najjačeg toplinskog naprezanja, a to mjesto pomiče se sve bliže oštrici i pojačano potpomaže konačno zatupljenje. Razvijena toplina povisuje temperaturu oštrice, izaziva pojačano popuštanje i mekšanje, što u sve jačoj mjeri otežava, pa i onemogućava daljnje rezanje .

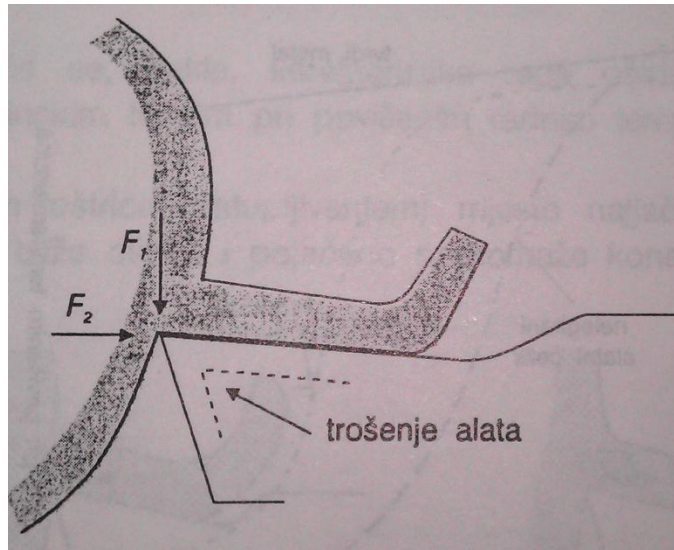
Predočavanje tri tipična alatna materijala pri radu na povišenim temperaturama predočava **slika 18.** [2]



**Slika 18.** Tijek mekšanja triju tipičnih vrsta alatnih čelika pri povišenim radnim temperaturama [2]



## 9.2. Mehanizmi trošenja alata za obradu odvajanjem čestica



Slika 19. Shema trošenja pri odvajanju strugotine [2]

Trošenje nastupa pretežno na slobodnoj plohi noža (sila  $F_2$ ) i na stražnjoj plohi noža (sila  $F_1$ ), a manifestira se svojim tribološkim komponentama:

- abrazijom (mikrorezanje mekšeg članka tvrdim),
- adhezijom (navarivanje nakon lokalne plastične deformacije i to samo ako su rešetke članaka slične),
- umorom (izmjenični tok naprezanja oštrice),
- oksidacijom (materijal reagira s okolišem),
- mehaničkim otkrhućem (zbog lokalnog mehaničkog preopterećenja)

Iz ovih spoznaja slijedi da, da rezni alat mora prvenstveno biti tvrd, jer što je alat tvrdi, abrazija je manja, a granica razvlačenja ( $R_e$ ) je viša, pa teže nastupa plastična deformacija ( a ona je za adhezijsko navarivanje jedan od nužnih uvjeta ).

Najopćenitija definicija trošenja glasi:

**„Trošenje je progresivni gubitak čestica sa površine tijela uvjetovan mehaničkim djelovanjem“.**

Trošenje predstavlja postepeni gubitak materijala s površine krutog tijela, usljed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom ili česticom. Trenje i trošenje nisu u jednoznačnoj vezi u jednom tribosustavu.

Mehanizmi trošenja opisuju se jediničnim događajima, a oni predstavljaju slijed zbivanja koji dovodi do odvajanja jedne čestice trošenja s trošene površine. [7]

Osnovni pokazatelj za indentifikaciju mehanizama trošenja su izgled trošenih površina i oblik čestica trošenja. Najjednostavnija klasifikacija trošenja je na **slabo** i jako **trošenje**. Slabo trošenje je u osnovi vezano za mala opterećenja, gdje je na neki način uključena metalna interakcija, a produkti takvog trošenja su fine čestice koje su u obliku oksida.

Površinski slojevi, kao što su oksidi, mogu smanjiti stupanj interakcije između glavnine materijala u kontaktu. To ne znači da nikada ne dolazi do metalnog dodira tarnog para s obzirom da rezultirajuće metalne čestice mogu oksidirati na visokim lokalnim temperaturama površina. Relativno mala čestica rezultira karakteristično slabim trošenjem i ugađivanjem površina.

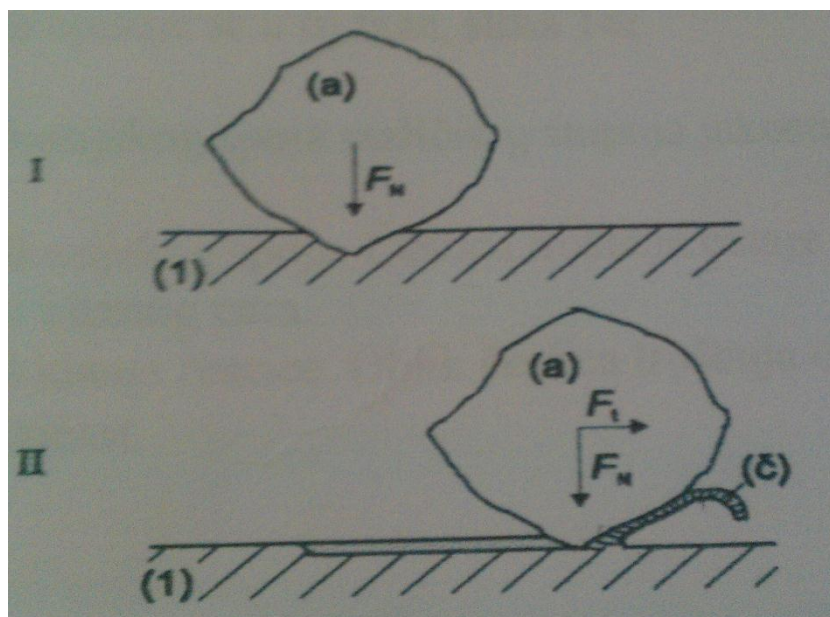
Kod velikih opterećenja dolazi do grubljeg procesa trošenja, gdje su čestice trošenja daleko veće nego kod slabog trošenja, a istrošene površine su daleko hrapavije. U tom slučaju stupanj trošenja se povećava nekoliko puta.

To je tzv. **režim jakog trošenja**.

U daljnjem radu biti će opisana samo abrazija kao mehanizam trošenja jer su provedena ispitivanja nastala pod pretpostavkom da su uzorci materijali od kojih se rade rezni alati. [7]

### 9.3. Abrazija

**Abrazija** je mehanizam trošenja usljed kojeg dolazi do istiskivanja materijala uzrokovanog tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Definiramo je i kao odnošenje materijala s površine, pod utjecajem abrazivnih tvrdih čestica. Opisuje se kao mikrorezanje abrazivom, nedefinirane rezne oštrice, s dvije faze jediničnog događaja, što prikazuje **slika 19**. [7]



**Slika 19.** Jedinični događaj abrazije [7]

Postoje **dvije faze** jediničnog događaja abrazije, od kojih je:

- **prva faza** prodiranje abraziva (a) u površinu materijala (1), pod utjecajem normalne komponente opterećenja  $F_n$ ,
- **druga faza** je istiskivanje materijala u obliku čestica trošenja (č), pod utjecajem tangencionalne komponente opterećenja  $F_t$ .

Postoje **tri vrste** abrazije, ovisno o međusobnom odnosu tvrdoće abraziva i materijala: čista abrazija, selektivna abrazija i nulta abrazija.

„**Čista**“ abrazija pojavljuje se kada je tvrdoća abraziva (a) veća od tvrdoće trošene podloge (1). Površina je izbrazdana, a čestice trošenja su u obliku spiralne strugotine ili lomljene strugotine, ovisno o tome da li je abradirani materijal duktilan ili krhak.

„**Selektivna**“ abrazija pojavljuje se kada u abradiranom materijalu postoji faza koja je tvrđa od abraziva. Površina je izbrazdana, s prekidima na mjestima gdje se nalaze zrna ili trake tvrde faze, dok su čestice trošenja iste kao i kod čiste abrazije uz povremeno pojavljivanje zrna tvrde faze.

„**Nulta**“ abrazija pojavljuje se kada je cijela abradirana površina tvrđa od abraziva. Površina ima polirani izgled, a čestice trošenja su sitne ljuskice.

Otpornost na abraziju povezana je međusobnim odnosom tvrdoća abraziva i materijala trošene podloge, odnosno njegovih strukturnih konstituenata, jer je on odlučujući za prvu fazu jediničnog događaja abrazije, a to je prodiranje koje je preduvjet za nastanak početne pukotine, čime nastaje čestica trošenja. [7]

## 10. EKSPERIMENTALNI DIO

### 10.1. Uvod

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je analizirati otpornost na abrazijsko trošenje dvije vrste čelika (sinterirani tvrdi metal i sinterirani alatni čelik). Izbor materijala za uzorke temeljio se na dostupnosti istih. Iz skupine tvrdih metala dobivena su dva uzorka, koji su posebno napravljeni u laboratorijske svrhe od strane poduzeća SinterMak d.o.o. dok je iz skupine alatnih čelika dobiven jedan uzorak, koji je izrezan iz glodalca.

Dobiveni uzorci su sljedeći i u daljnjem tekstu biti će označeni kraticama **U1, U2 i U3**.

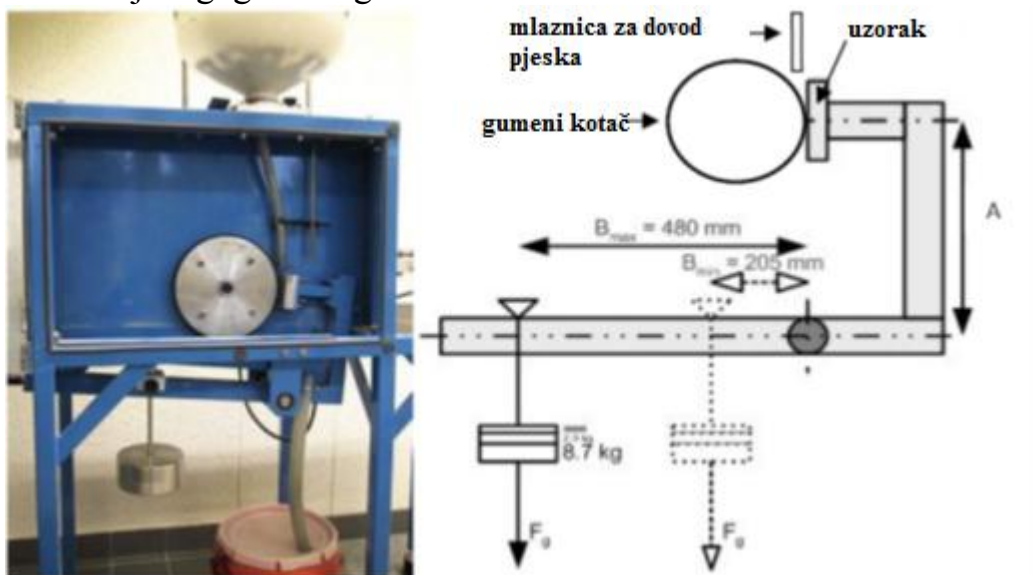
**UZORAK U1:** sinterirani (nemetalni) tvrdi metal na bazi TiC,  
kemijski sastav je: 90% TiC, 10 %Ni+Mo

**UZORAK U2:** sinterirani (nemetalni) tvrdi metal na bazi WC  
kemijski sastav je: 74.3% WC, 8.8% Co, 15% TiC,  
2% TaC(NbC)

**UZORAK U3:** sinterirani alatni čelik (ASP 30)  
kemijski sastav je: 1.3% C, 4.2% Cr, 6.4% W,  
5.0% Mo, 3.1% V, 8.5% Co

### 10.2. Analiza otpornosti na abrazijsko trošenje metodom „suhi pijesak-gumeni kotač“ (ASTM G65)

Ova metoda jedan je od najčešće korištenih metoda za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje. Abrazivno sredstvo (pijesak) pušta se u prostor između uzorka i rotirajućeg gumenog kotača **slika 20**.



**Slika 20.** Uređaj za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje [8]

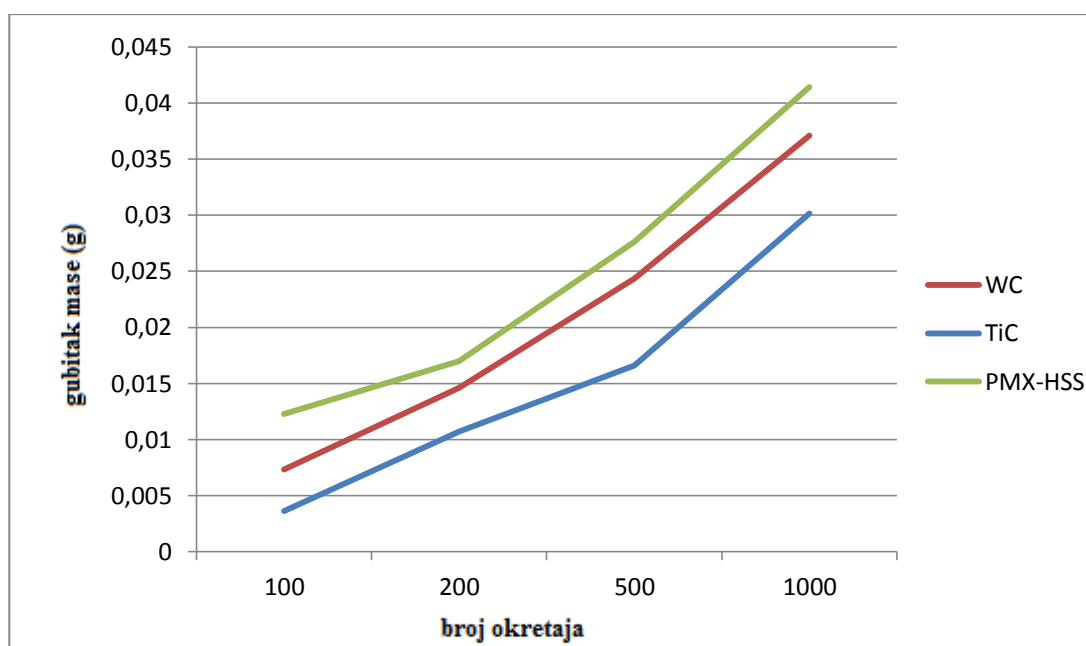
U većini slučajeva kao abrazivno sredstvo koristi se pijesak, no mogu se koristiti i drugi materijali ovisno o području primjene iz koje potječe uzorak. Ovom metodom mogu se ispitivati različite vrste materijala kao što su npr. metali, kermika, plastika, kompoziti te različite prevlake. Fleksibilnost parametara (opterećenje, veličina i kvaliteta zrnaca, brzina vrtnje kotača) ove metode ispitivanja, omogućava nam da simuliramo različite uvjete rada.

U ovom dijelu rada rađeno je ispitivanje na tri uzorka: **U1(TiC)**, **U2(WC)** i **U3(ASP 30)** uz četiri ponavljanja pri različitim brojevima okretaja gumenog kotača, mjerena je gubitak mase, a na temelju gubitka mase napravljen je dijagram, osim toga potrebno je naglasiti da su svi uzorci istih dimenzija. Prije puštanja uređaja u rad, uzorci su izvagni preciznom vagom, a rezultati su prikazani **tablicom 5**.

TABLICA 5. Početna masa uzoraka

| Redni br. uzorka  | Početna masa uzorka (g) |
|-------------------|-------------------------|
| 1. TiC (ISO-P 01) | 96.0190                 |
| 2. WC (SV-10)     | 155.2020                |
| 3. ASP 30         | 141.5141                |

Nakon provedenog ispitivanja dobiveni rezultati analitički su obrađeni, a na temelju njih napravljen je dijagram gubitka mase radi jednostavnijeg prikaza.



**Slika 21.** Dijagramski prikaz gubitka mase uzoraka U1- TiC, U2-WC, U3-ASP 30,

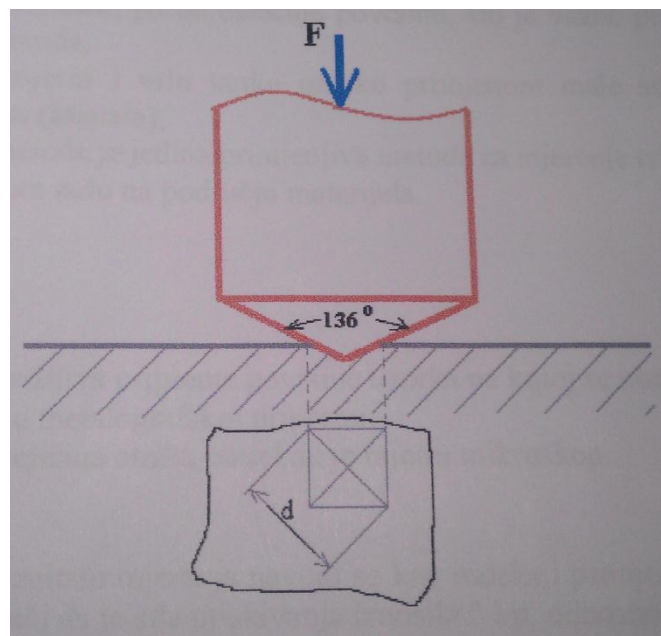
Ovaj dijagram daje slikoviti prikaz rezultata gubitka mase uzorka. Gubitak mase uzorka **U1** (tvrdi metal na bazi TiC ) najmanji je, pa se prema tome može zaključiti da je uzorak U1(TiC) najotporniji na mehanizam abrazijskog trošenja.

Nadalje, uzorak **U3** (sinterirani alatni čelik **ASP 30** ) je najmekši, odnosno ima najveći gubitak mase, pa se lako može zaključiti da je najslabije otporan na mehanizam abrazijskog trošenja.

### 10.3. Ispitivanje mikrotvrdoće uzoraka

Vickersovom metodom moguće je mjeriti tvrdoće i najtvrdih materijala, jer tvrdoća nije ovisna o primjenjenoj sili. Mjerenje i najtvrdih materijala omogućeno je primjenom dijamanta za penetrator u obliku istostrane četverostrane piramide s kutem između stranica od 136°. Ovakav kut nije odabran nasumice, već se utiskivanjem penetratora s tim kutem dobivaju vrijednosti tvrdoće neovisne o primjenjenoj sili, pa se tvrdoća mekih i tvrdih materijala može mjeriti primjenom iste sile, a isto tako se tvrdoća istog materijala može mjeriti s različitim opterećenjima. [9]

Utiskivanjem ovakvog penetratora u materijalu ostaje otisak oblika piramide **slika 22**. Kod Vickersa se na tvrdoću zaključuje na osnovi veličine otiska.



**Slika 22.** Skica penetratora i otiska kod Vickersove metode [9]

Tvrdoća se određuje prema izrazu:

$$HV = F/S,$$

gdje su:

F- primjenjena sila,

S- površina šuplje piramide nastale u materijalu.

Pomoću mjernog mikroskopa mjeri se dijagonala (d) baze piramide otisnute u materijalu, a tvrdoća se određuje prema izrazu:

$$HV = 0.189 F/d^2$$

gdje je:

F- primjenjena sila [N],

d- dijagonala baze piramide [mm].

Dijagonale  $d_1$  i  $d_2$  mjere se točnošću  $\pm 0.001$  mm. Debljina ispitnog uzorka mora iznositi najmanje 1.5 d.

Rezultati mjerenja mikrotvrdoće uzoraka **U1**, **U2** i **U3** prikazani su **tablicom 6**.

TABLICA 6. Prikaz mikrotvrdoća uzoraka

| Uzorak             | Tvrdoća HV 0.5 |
|--------------------|----------------|
| Uzorak U1 (TiC)    | 1430           |
| Uzorak U2 (WC)     | 1361           |
| Uzorak U3 (ASP 30) | 812            |

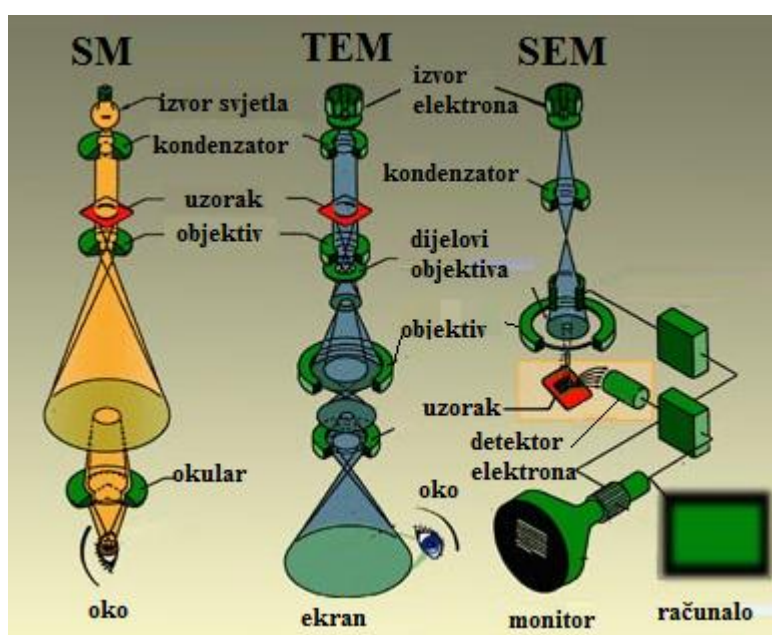
**Tablica 6.** potvrđuje rezultate koji su prikazani dijagramom na **slici 21**. Uz ta dva navedena podatka lako se može zaključiti da je sinterirani tvrdi metal na bazi TiC doista najotporniji na abrazijsko trošenje i najtvrdi je, što je u biti i logično pošto je tvrdoća TiC po Mochovoj ljestvici visoko pozicionirana i iznosi 9-9.5 (dijamant 10), dok tvrdoća volfram karbida približno iznosi 9. Osim toga potrebno je istaknuti činjenicu, a koja je spomenuta ranije u tekstu, da su dimenzije uzoraka **jednake**, što uzorku **U1** (TiC) daje veliku prednost u primjeni iz razloga što je lakši za ~61% od uzorka **U2** (WC).

## 10.1. Mikroskopska analiza tragova trošenja

### 10.1.1. Elektronska mikroskopija

Elektronske mikroskope nalazimo u dva osnovna oblika: **transmisijski elektronski mikroskop (TEM)** i **skenirajući elektronski mikroskop (SEM)**. Transmisijski i skenirajući elektronski mikroskopi su slični po tome što oba primjenjuju zraku elektrona, no za stvaranje slike koriste posve različite mehanizme. Kao što samo ime govori, **TEM** sliku oblikuje pomoću elektrona koji se odašilju kroz preparat. **SEM**, pak, skenira površinu preparata te sliku oblikuje otkrivajući elektrone koji se odbijaju od vanjske površine preparata. Skenirajuća elektronska mikroskopija je naizgled neobična tehnika zbog dojma dubine koji se stječe (npr. promatranjem bioloških struktura).

Zbog niske prodorne snage elektrona, uzorci koji se pripremaju za elektronsku mikroskopiju moraju biti iznimno tanki. Sprava koja se koristi za tu svrhu naziva se ultramikrotom. Opremljena je dijamantnim nožićem te može rezati presjeke debljine do 20 nm. Postojeći deblji pripravci se također mogu promatrati elektronskim mikroskopom, ali je u tom slučaju potreban znatno veći pogonski napon kako bi se primjereno povećala prodorna snaga elektrona. Takav visoko-naponski elektronski mikroskop koristi pogonski napon od nekoliko tisuća kilovolta (kV), što je jedva usporedivo s rasponom od 50 – 100 kV koliko je potrebno većini konvencionalnih instrumenata. [10]



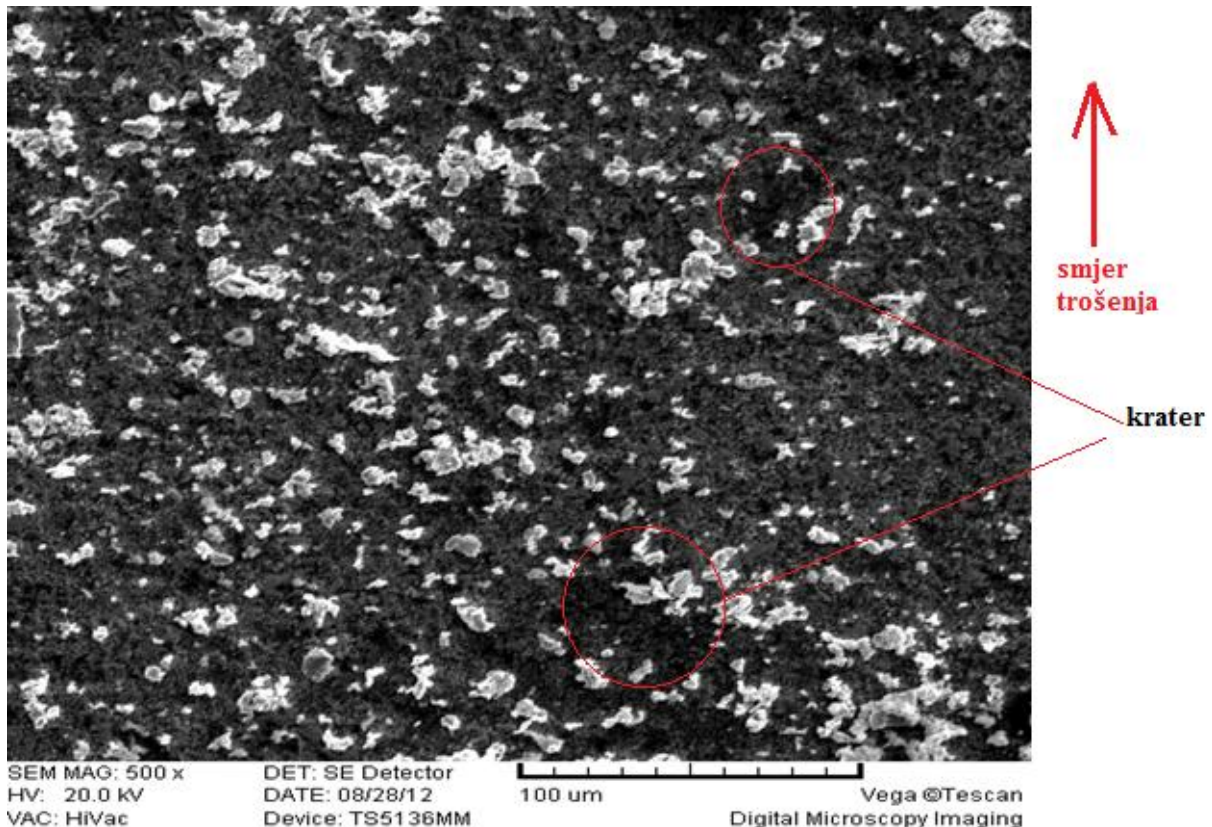
Slika 23. Shematski prikaz rada svjetlosnog, TEM i SEM mikroskopa [10]



## 10.2. Rezultati mikroskopske analize tragova trošenja

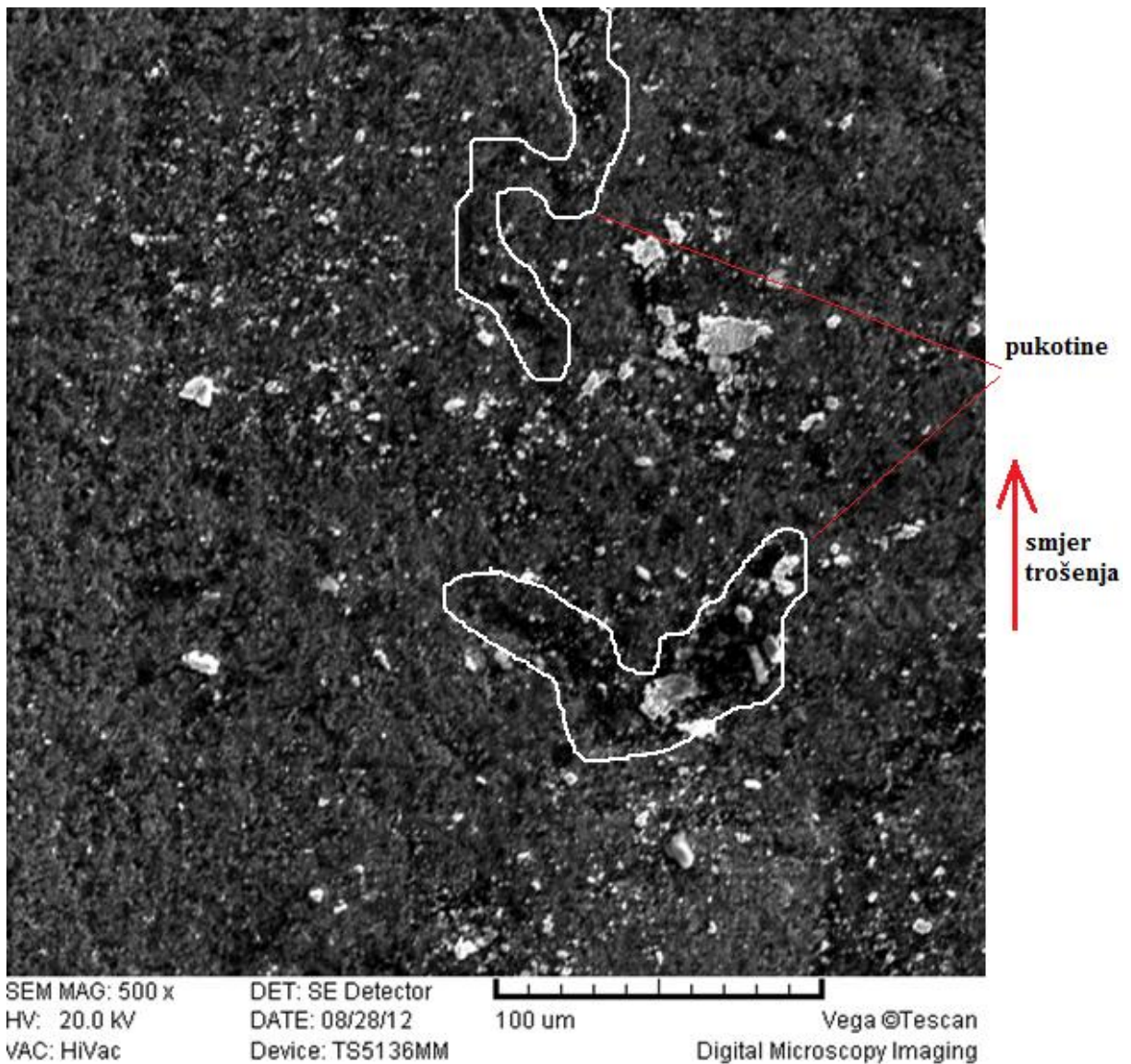
Mikroskopskom analizom potrebno je analizirati tragove trošenja. Tijekom analize trošenja moguće je utvrditi sljedeće stvari:

- smijer trošenja,
- oblik abradiranih čestica,
- vrsta abrazije,
- izgled „isčupanih čestica“



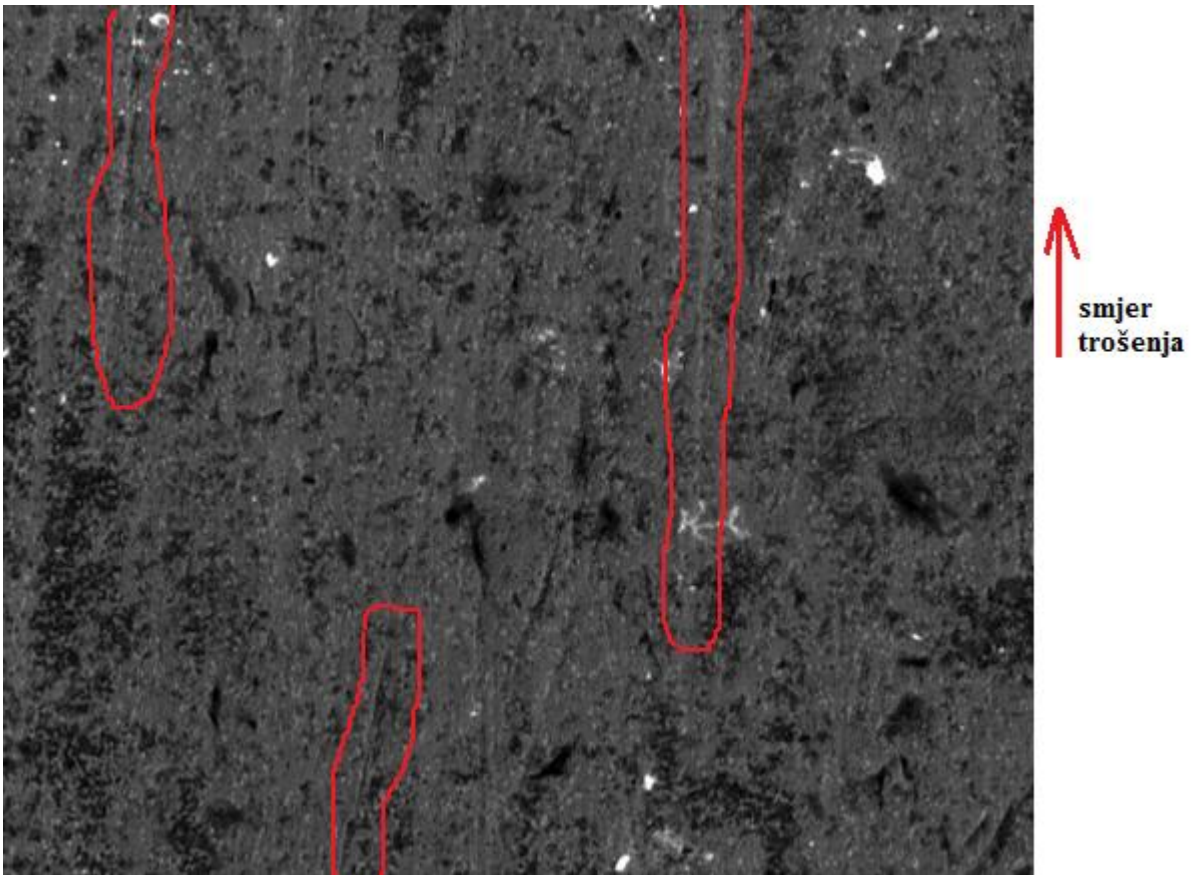
**Slika 24.** Uzorak 1 (TiC), povećanje 500x

Na uzorku **U1** mogu se vidjeti tragovi trošenja te krateri (udubine). Uzrok udubina nije poznat, stoga je za utvrđivanje porijekla potrebna detaljnija analiza. Tragovi trošenja, odnosno smjer trošenja može se, zahvaljujući elektronskom mikroskopu prepoznati. Elektronski mikroskop nam pruža dubinu (oštrinu) slike, pa se gledanjem u sliku steće dojam da su djelovi čestice titan-karbida (bijela područja) u „sjeni“, tj. ona područja (na čestici TiC-a) koja su tamnija su „uzvišena“ i rade sjenu „ulegnutim“ mjestima. Isto vrijedi za **sliku 25**, samo što su utom slučaju bijele čestice, čestice wolfram karbida. Osim toga na **slici 25** vidljive su i pukotine za čije je utvrđivanje porijekla, također potrebna detaljnija analiza.



**Slika 25.** Uzorak U2, povećanje 500x

Na uzorku **U3** tragovi trošenja jasnije se vide, a utvrđivanje smjera trošenja puno je jednostavnije. Početak traga trošenja vidi se kao veća udubina (početak prodiranja abraziva) s obzirom na kraj (završetak prodiranja abraziva) traga trošenja.



**Slika 26.** Uzorak 3 (ASP 30),povećanje 500x

## 11. Zaključak

Kada se svi rezultati sagledaju, moguće je zaključiti sljedeće stvari:

- uzorak **U1** (TiC) najotporniji je na mehanizam abrazijskog trošenja i najtvrdi je, pa je stoga i najpogodniji za upotrebu kao materijal za izradu alata za strojnu obradu, kao i za strojne dijelove koji moraju biti otporni na trošenje. Osim toga uzorak **U1** je i najlakši, a dimenzije su mu iste kao i ostalim uzorcima, pa je taj materijal (TiC) idealan za upotrebu gdje je potrebno uštediti na ukupnoj masi sustava.
- uzorak **U2** (WC) slabije je otporan na mehanizam abrazijskog trošenja od uzorka **U1** (TiC) no također je pogodan kao materijal za izradu alata za strojnu obradu. Masa mu je za ~61% veća od uzorka **U1** (TiC) stoga se pretežno koristi kao materijal za izradu alata za strojnu obradu.
- uzorak **U3** (ASP 30) definitivno je najlošiji po pitanju tvrdoće i otpornosti na trošenje, no i dalje je u uporabi i često se koristi za izradu alata.

Potrebno je naglasiti da niti jedan od ovih uzoraka nije bio prevučen slojem, koji bi dodatno povećao otpornost na trošenje. Kad bi se npr. uzorak **U3** prevukao slojem TiC, otpornost na trošenja bi mu značajno porasla ( bilo putem smanjenja trenja ili putem same tvrdoće prevlake), što bi taj materijal (brzorezni čelik) možda i plasirao na prvo mjesto po pitanju otpornosti na trošenje.

## LITERATURA

- [1] S. Kožuh, „Specijalni čelici“ -skripta
- [2] M. Novosel, F. Cajner, D. Krumes, „Alatni materijali“
- [3] Literatura podzeća SinterMak d.o.o.
- [4] Predavanja iz kolegija „Posebni metalni materijali“
- [5] **ASM Metals Handbook**, svezak 7, stranice: 83-1502
- [6] [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=main\\_page](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=main_page)
- [7] Predavana iz kolegija „Tribologija i inženjerstvo površina“
- [8] <http://arncotech.com/resources/detail/hardbanding-wear-testing/>
- [9] V. Ivušić, M. Franz, Đ. Španiček, L. Čurković, „Materijali 1“
- [10] <http://www.vcbio.science.ru.nl/en/fesem/info/fesemfaq/>