

UTJECAJ SASTAVA MATERIJALA REZNOG ALATA I PARAMETARA OBRADE NA TROŠENJE REZNOG ALATA OD TVRDOG METALA

Danilović, Lucija

Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni

2021

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:128:724561>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-08**



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

UTJECAJ SASTAVA MATERIJALA REZNOG ALATA I PARAMETARA OBRADE NA TROŠENJE REZNOG ALATA OD TVRDOG METALA

Danilović, Lucija

Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni

2021

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:128:724561>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2023-02-14**



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

LUCIJA DANILOVIĆ

**UTJECAJ SASTAVA MATERIJALA
REZNOG ALATA I PARAMETARA OBRADE
NA TROŠENJE REZNOG ALATA OD
TVRDOG METALA**

ZAVRŠNI RAD

KARLOVAC, 2021.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

LUCIJA DANILOVIĆ

**UTJECAJ SASTAVA MATERIJALA
REZNOG ALATA I PARAMETARA OBRADE
NA TROŠENJE REZNOG ALATA OD
TVRDOG METALA**

ZAVRŠNI RAD

Mentor : dr.sc. Tihana Kostadin

KARLOVAC, 2021.

IZJAVA :

Izjavljujem da sam ja Lucija Danilović ovaj diplomski rad napravila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija te navedenu literaturu.

Ovim putem se posebno zahvaljujem mentorici dr. sc. Tihani Kostadin na susretljivosti, nesebičnosti i stručnim savjetima tijekom studija i prilikom izrade ovog rada. Također se zahvaljujem gospodinu Aleksandru Niševiću, direktoru tvrtke Niteh d.o.o. te gospodinu Tomislavu Cindriću, šefu proizvodnje Wolf tehnologije na izuzetnoj susretljivosti i pomoći prilikom izrade eksperimentalnog dijela rada.

Za kraj se posebno zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima koji su bili velika podrška tijekom studija.

Lucija Danilović

SAŽETAK :

Ovim radom analiziran je utjecaj sastava materijala reznog alata i parametara obrade na trošenje reznog alata od tvrdog metala. Završni rad sastoji se od teorijskog (općeg) i eksperimentalnog dijela.

Općim (teorijskim) dijelom opisani su tvrdi metali, njihovo dobivanje i primjena, također su obuhvaćeni rezni alati sa posebnim naglaskom na glodala. U eksperimentalnom dijelu opisan je proces izrade reznih alata od tvrdih metala te njihovo trošenje s obzirom na različiti kemijski sastav te određene parametre obrade. Eksperimentalni dio diplomskog rada odrađen je u tvrtci Nitech d.o.o.

Nakon završetka eksperimentalnog dijela rada napravljena je analiza rezultata te na temelju istih donesen zaključak.

Ključne riječi:

- Tvrdi metali,
- Rezni alati,
- Parametri obrade,
- Trošenje alata,
- Kemijski sastav.

SUMMARY :

This paper analyzes the influence of the material composition of the cut tool and machining parameters on the wear of the carbide cutting tool. Thesis consists of a theoretical (general) and an experimental part.

The general (theoretical) part describes carbide metals, their production and application, cutting tools with special emphasis on milling. The experimental part describes the process of making cutting tools from hard metals and their wear with regard to different chemical composition and certain processing parameters.

The experimental part of the thesis was done in the company Niteh d.o.o.

After the completion of the experimental part of the work, an analysis of the results was made and a conclusion was made based on them.

Key words :

- Carbide metals
- Cutting tools,
- Processing parameters,
- Tool wear,
- Chemical composition.

Sadržaj

Popis tablica	3
Popis oznaka	4
1. Uvod	5
2. Tvrdi metali	6
2.1. Povijest tvrdih metala	7
2.2. Podjela tvrdih metala	8
2.3. Mikrostruktura i sastav tvrdih metala	10
2.4. Svojstva tvrdog metala	12
2.4.1. Tvrdća tvrdih metala	12
2.4.2. Žilavost tvrdih metala	13
2.4.3. Ostala svojstva tvrdih metala	14
3. Proizvodnja tvrdih metala	16
3.1. Metalurgija praha	16
3.2. Postupci proizvodnje prahova	18
3.2.1. Metoda atomizacije	19
3.2.2. Elektrolitičke metode	19
3.2.3. Kemijske metode	19
3.2.4. Mehaničke metode	20
3.3. Miješanje i mljevenje praha	21
3.4. Kompaktiranje/oblikovanje praha	22
3.5. Sinteriranje	25
4. Postupci prevlačenja površina	26
4.1. Postupci prevlačenja u parnoj fazi	26
4.2. Kemijsko prevlačenje u parnoj fazi-CVD	27
4.3. Fizikalno prevlačenje u parnoj fazi-PVD	27
4.4. Plazmom potpomognuto prevlačenje u parnoj fazi	28
5. Primjena tvrdih metala	29
6. Rezni alati za obradu odvajanja čestica	30
6.2. Geometrija reznog alata	32
6.3. Prisutna gibanja na alatnim strojevima	34
6.4. Glodanje	35
7. Eksperimentalni dio	37
7.1. Specifikacija ispitinih uzoraka	37
7.2. Procesi izrade reznog alata	39

7.2.1. Oblik i dimenzije sirovca	39
7.3. Izrada reznog alata	40
7.3.1. Podešavanje parametara obrade u softveru	40
7.4. Izrada reznog alata	45
7.5. Priprema aluminijske ploče za obradu	49
7.6. Rezultati ispitivanja.....	51
7.7. Analiza dobivenih rezultata ispitivanja.....	58
8. Zaključak.....	59
Literatura	60

Popis slika

Slika 1. Podjela tvrdih metala prema vrsti i veličini zrna karbida [3]	9
Slika 2. Mikrostruktura tvrdog metala WC-Co [4]	10
Slika 3. Fazni dijagram W-C sustava [2]	11
Slika 4. Ovisnost tvrdoće o sadržaju kobalta kod različite veličine zrna [3].....	13
Slika 5. Ovisnost lomne žilavosti o sadržaju kobalta za različite veličine zrna [3].....	14
Slika 6. Utjecaj kobalta na mehanička svojstva	15
Slika 7. Procesi metalurgije praha [7].....	16
Slika 8. Oblici čestica praha i njihove metode dobivanja.....	20
Slika 9. Prikaz mljevenja praha [3].....	21
Slika 10. Jednostrano kompaktiranje [7]	23
Slika 11. Dvostrano kompaktiranje [7].....	23
Slika 12. Presjek WC-Co ravnotežnog dijagrama stanja WC-Co [2].....	25
Slika 13. Rezni list kružne pile od tvrdog metala	29
Slika 14. Rezne pločice od tvrdih metala	29
Slika 15. Podjela postupaka obrade odvajanja čestica [12].....	30
Slika 16. Neki od alata koji se koriste za OOC [14].....	32
Slika 17. Osnovni kutovi reznog alata [14].....	33
Slika 18. Osnovni elementi glodala.....	35
Slika 19. Standardni sirovac RGMC [12]	39
Slika 20. Biranje vrste alata.....	40
Slika 21. Odabir tipa čelone oštrice	41
Slika 22. Odabir broja reznih oštrica.....	41
Slika 23. Nacrt reznog alata sa zadanom geometrijom	42
Slika 24. Konfiguracija geometrije promjera	42
Slika 25. Odabir kuta spirale	43
Slika 26. Konfiguracija promjera alata.....	43
Slika 27. Odabir dužine i promjera reznog alata.....	44
Slika 28. Odabir smjera oštrice i vrste materijala	44
Slika 29. Pet osni CNC obradni centar Walter HMC 400	45
Slika 30. Sirovci za izradu reznog alata	46
Slika 31. Pozicioniranje sirovca	46
Slika 32. Korištene brusne ploče od dijamanta.....	47
Slika 33. Gotov rezni alat pri završetku obrade	47
Slika 34. Gotovi rezni alati.....	48
Slika 35. Nacrt testne ploče	50
Slika 36. Testna ploča obrađena reznim alatom CTS30D	51
Slika 37. Testna ploča obrađena reznim alatom CTS20D	52
Slika 38. Testna ploča obrađena reznim alatom CTS18D	53
Slika 39. Rezni alat postavljen u uređaj za mjerenje i izračunavanje geometrijskih parametara	54
Slika 40. Istrošenost reznog alata CTS30D.....	55
Slika 41. Istrošenost reznog alata CTS20D.....	56
Slika 42. Istrošenost reznog alata CTS18D.....	57

Popis tablica

Tablica 1. Prednosti i nedostaci metalurgije praha.....	17
Tablica 2. Postupci proizvodnje prahova i njihova primjena	18
Tablica 3. Neke od osnovnih kriterija podjela glodanja	36
Tablica 4. Kemijska svojstva CTS18D (ISO 513 K20-K40)	37
Tablica 5. Kemijska svojstva CTS20D (ISO 513 K20-K40)	38
Tablica 6. Kemijska svojstva CTS30D (ISO 513 K30-K40)	38
Tablica 7. Standardne dimenzije sirovca [12]	39
Tablica 8. Specifikacija testne ploče za obradu.....	49

Popis oznaka

OZNAKA	MJERNA JEDINICA	ZNAČENJE
WC		Karbid wolframa
TiC		Karbid titana
TaC		Karbid tantala
Co		Kobalt
Ni		Nikal
Fe		Željezo
Cd		Kadmij
Zn		Cink
Cr		Krom
Ta		Tantal
R _h		Rodij
R _{ms}	N/mm ²	Savojna čvrstoća
R _{mt}	N/mm ²	Tlačna čvrstoća
R _d	N/mm ²	Dinamička izdržljivost
E	N/mm ²	Modul elastičnosti
G	GPa	Modul smičnosti
v _f	m/s	Posmična brzina
a _p	mm	Dubina rezanja
v _c	m/s	Brzina rezanja
α	°	Stražnji kut
β	°	Kut klina
γ	°	Prednji kut

1. Uvod

Čovjek je kroz povijest oduvijek imao potrebu za primjenom alata koji bi upotrebljavao za lov, preživljavanje, građenje, ratovanje itd. Čelik je bio najzastupljeniji materijal za izradu alata, ali razvijanjem čovječanstva došlo je do razvijanja i pronalaska novih materijala za izradu alata. Razvojem industrije došlo je do postavljanja novih određenih zahtjeva na trošenje alata i ostalih strojnih dijelova. Trvdi metali su se između ostalih pokazali kao materijali zadovoljavajućih mehaničkih svojstava.

Kao rezultat nezadovoljavajuće otpornosti na trošenje željeznih materijala nastali su tvrdi metali. Trvdi metali su tehnički materijali koji se odlikuju visokom tvrdoćom, osobito pri visokim temperaturama te otpornošću prema trošenju. To nisu metali u običnom smislu, nego kompozitni materijali (tehnički materijali) koji se sastoje od karbida ili nitrida nekih prijelaznih metala (volframa, titanija, tantala, molibdena, kroma) kao tvrde faze, i od kobalta ili nikla kao veznoga metala.

2. Tvrđi metali

U grupu neoksidne keramike se mogu uvrstiti i keramički materijali pod imenom tvrdi metali, kod kojih su izražena metalna svojstva. Upotreba tvrdih metala primjenu nalazi u izradi visokokvalitetnih reznih alata. Visokokvalitetni rezni alati mogu se primijeniti pri velikim brzinama rezanja, također je moguće postići visoke kvalitete obrađivane površine. Postavljeni zahtjevi su otpornost na toršenje, visoka tvrdoća, i otpornost na puzanje (tj. otpornost pri povišenim temperaturama) iz razloga visokih temperatura koje se javljaju prilikom rezanja ($>700^{\circ}\text{C}$). Njihova toplinska i električna vodljivost i ostala svojstva, pokazuju njihov metalni karakter. Osnovu tvrdih metala čine karbidi volframa (WC), titana (TiC) i tantala (TaC), koji su međusobno najčešće povezani kobaltom. Rezne alate izrađene od tvrdih metala karakteriziraju bolja svojstva od alata koji su izrađeni od brzoreznih čelika, posebno bolja svojstva rezanja pri povišenim temperaturama. Nositelji tvrdoće i otpornosti kod tvrdih metala su karbidi, dok žilavost osigurava vezivi materijal. Dobivaju se postupkom sinteriranja tj. metalurgijom praha, tvrde legure su na osnovi volframovog karbida, titanijevog karbida i titanijevog nitrida. Tvrde metale nije moguće oblikovati plastičnom deformacijom, niti toplinski obraditi zbog postupka proizvodnje i visoke tvrdoće. Tvrđi metal koji je na bazi volfram karbida izrađuje se vezanjem WC na temperaturama od 2500°C , a zatim vezanjem s Co te sinteriranjem na temperature koje iznose oko 1500°C . [1]

2.1. Povijest tvrdih metala

Nakon uvođenja volframa u proizvodnju električnih žarulja počinje nastanak i razvoj tvrdih metala. Bila je dobra ideja da se od volframa izrađuju žarne niti žarulja, ali pokazalo se da je iz volframa izrada tankih niti izuzetno teška. Međutim, Amerikanac Coolidge koji je na početku 20. stoljeća radio u General Electricu našao je rješenje problema. Zaključio je da potrebno povećati rastezljivost volframa te da se nakon toga izvlači u žicu pomoću dijamantnih matrica. Iz razloga skupe i zahtjevne izrade dijamantnih matrica, razmišljalo se da se dijamant zamjeni nekim drugim materijalom. Volfram karbid pokazao se kao dobra alternativa, jer posjeduje zadovoljavajuću visoku tvrdoću. Sljedeće pitanje bilo je kako od volfram karbida proizvesti matricu. Postupak lijevanja bio je prvi pokušaj, nažalost pokazao se neuspješnim. Nakon niza pokušaja, njemačka tvrtka Krupp uspjela je napraviti smjesu praha volfram karbida i praha kobalta koja je sinterirana u atmosferi vodika. Tako je 1926. godine stvoren materijal pod nazivom „WIDIA“ (prema njemačkom wie Diamant = kao dijamant) koji je pogodan ne samo za izradu matrica, nego i za izradu svih vrsta alata za različite obrade. [2]

Sinterirani tvrdi metali u pravom smislu nisu legure, već smjesa raznih sastojaka, koji su uglavnom karbidi uloženi u neku mekšu i žilaviju metalnu masu. Prvi višekarbidni tvrdi metali (WC-TiC-Co, WC-TiC-TaC-Co) javljaju se u razdoblju od 1931. do 1932. godine. Slični tipovi tvrdih metala i danas se upotrebljavaju, za obradbu metala koji daju kratku strugotinu ili jednokarbidni (npr. sivi lijev, obojeni metali), a za obradbu metala s dugom strugotinom ili višednokarbidni (npr. čelik). [2]

Za vrijeme poslije Drugog svjetskog rata pretežno su se ispitivale metode sinteriranja metalnih karbida, također su započeta istraživanja mogućnosti sinteriranja željeznih i keramičkih materijala. Kao brusna zrna, tj. kao sastojci različitih pasta za poliranje služile su keramičke čestice. Istovremeno su se razvili materijali na osnovi aluminijeva oksida na području reznih alata. Stupanj poroznosti proizvoda znatno je smanjen razvitkom sinteriranja. Valja napomenuti da je tome pridonijela i primjena postupaka CIP i HIP („Cold Isostatic Pressing“ – hladno izostatičko prešanje i „Hot Isostatic Pressing“ – toplo izostatičko prešanje). Prethodno definirani postupci temelje se na djelovanju hidrostatičkog tlaka na sinterirani proizvod, čime se postiže potpunost proizvoda od 99% do 100%. Tvrdi metali su zadnjih par desetljeća značajno su povećali svoju primjenu te su danas zastupljeni gotovo u svim granama industrije.

2.2. Podjela tvrdih metala

Tvrđi metali mogu se podijeliti s obzirom na komponente od kojih su napravljeni, prema tome tvrđe metale dijelimo na dvije vrste, klasične tvrđe metale te specijalne tvrđe metale.

Klasični tvrđi metali dijele se u tri podskupine :

- tvrđi metali na bazi WC-Co,
- tvrđi metali na bazi WC-TiC-Co,
- tvrđi metali na bazi WC-TiC-Ta(Nb)C-Co. [2]

Specijalni tvrđi metali dijele se u dvije podskupine, a to su :

- tvrđi metali na bazi WC-Cr₃C₂-Ni,
- tvrđi metali na bazi WC-TiC-Ni-Mo. [2]

Specijalni tvrđi metali koriste se u slučajevima gdje se zahtjeva dobra otpornost na koroziju. Specijalni tvrđi metali su između ostalog svoju primjenu našli u industriji za preradu hrane. Iz razloga što za vrijeme obrade mesa i biljaka s metalom u kontakt dolaze razne kiseline koje ga nagrízaju. [1]

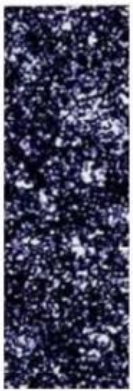
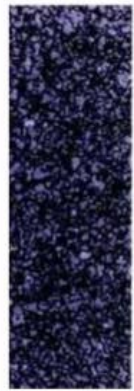

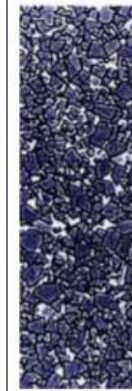



Tvrđi metali kao rezni alati s obzirom na obrađivani materijal mogu se podijeliti na sljedeći način:

- Tvrđi metali grupe K (90% WC, 0...4% TiC ili TaC, ostalo kobalt) koji su prikladni za obradu materijala s kratkom strugotinom,
- Tvrđi metali grupe M za obradu svih materijala (80...85% WC i do 10% TiC ili TaC, ostalo kobalt), dok se kod obrade čelika upotrebljavaju do srednjih brzina obrade,
- Tvrđi metali grupe P (do 43% TiC i TaC). Prikladni su za obradu metala, pri čemu obično nastaje kontinuirana strugotina.

Za tvrđe metale grupe K koriste se tvrđi metali koji sadrže čisti volframov karbid s kobaltom, maseni udio kobalta iznosi od 3% do 11% dok veličina zrna volframnog karbida iznosi od 0,5 μm do 5 μm. Sitnozrnate vrste (<1 μm) uglavnom se upotrebljavaju za brušenje. Rekristalizaciju zrna volfram karbida za vrijeme sinteriranja usporava mali postotak dodatka TaC i VC, samim time i rast zrna. Sitnozrnati tvrđi metali odlikuju se malom čvrstoćom pri povišenim temperaturama te visokom tvrdoćom

pri sobnim temperaturama. Polimeri i sivi lijev su materijali koji se obrađuju. Prilikom obrade žilavih materijala kao npr. čelika dolazi do stvaranja naljepka i izjedenosti na oštrici alata. Tvrdi metali grupe M koriste se za materijale koji se teže obrađuju, npr. obojeni metali i visokolegirani čelici. Povoljni su za obradu materijala kratke i duge strugotine. Problem je što nemaju dobru trajnost. Višekarbidnim tvrdim metalima gupe P (WC-TiC-TaC-Co) obrađuju se materijali sa dugom (kontinuiranom) strugotinom. Za izradu valjaka, matrica, cilindara i drugih dijelova veće mase koriste se velike količine tvrdih metala, naročito WC-Co. U slučaju da je u primjeni važnija dobra otpornost na abrazijsko trošenje od otpornosti na udarna opterećenja koristi se niži udio kobalta. Tvrdi metali svoju primjenu također nalaze pri dubokim bušenjima Zemljine kore, pri kopanju ruda te pri obradi kamena. Njihova primjena proširila se i na dinamički opterećenim alatima, pomoću uvođenja toplog izostatskog prešanja. [1]

Tvrdi metali se također dijele i prema veličini zrna karbida kako je prikazano na sljedećoj slici.

Vrsta i veličina zrna karbidne faze, μm						
Nano	Ultra fina	Submikron	Fina	Srednja	Gruba	Ekstra gruba
< 0,2	0,2 - 0,5	0,5 - 0,8	0,8 - 1,3	1,3 - 2,5	2,5 - 6,0	> 6
						

Slika 1. Podjela tvrdih metala prema vrsti i veličini zrna karbida [3]

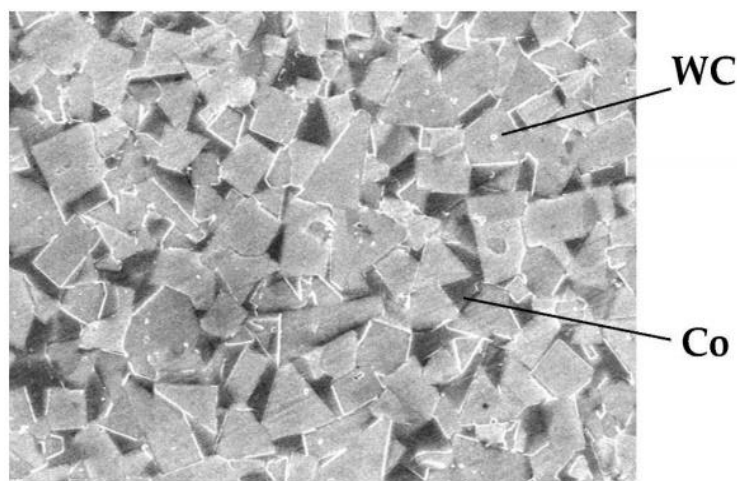
2.3. Mikrostruktura i sastav tvrdih metala

Pošto su mehanička svojstva materijala određena mikrostrukturom ona je izuzetno bitna. Izravan utjecaj na mikrostrukturu imaju različiti parametri procesa pri postupku izrade. Morfologija zrna i veličina zrna sinteriranog materijala mogu značajno varirati ovisno o raspodjeli čestica praha, veličini čestica praha te samom postupku sinteriranja.

Mikrostruktura tvrdih metala sastoji se od tri sljedeće faze :

- α faza: WC,
- β faza: Co, rjeđe Ni ili Fe,
- γ faza: TiC ili TaC – karbidi s kubnom kristalnom rešetkom. [1]

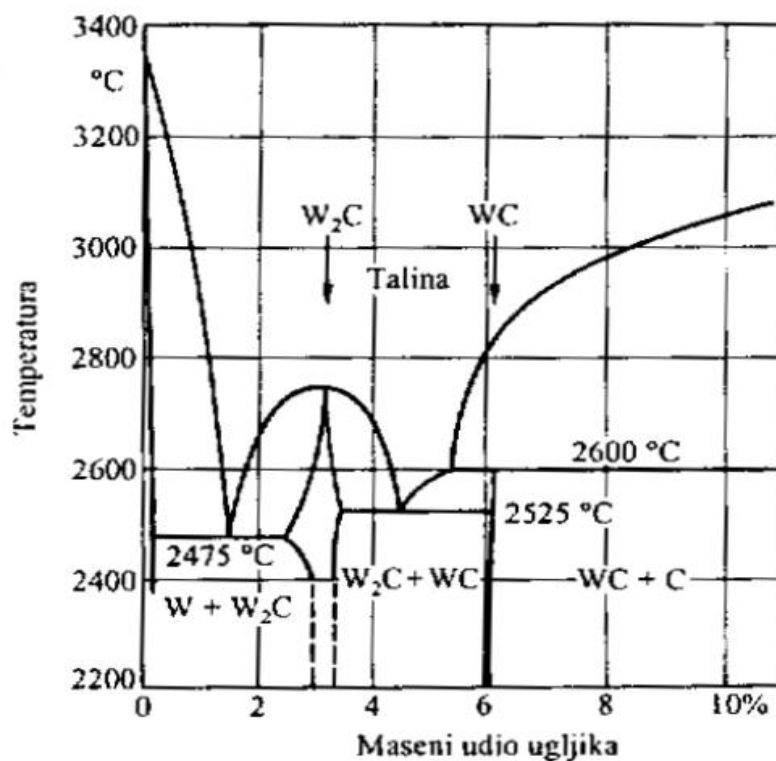
Tvrda faza, tj. α faza osnovna je komponenta tvrdih materijala. Tvrda faza daje tvrdoću, dobru toplinsku i električnu vodljivost te ostala izražena metalna svojstva. Matrica, tj. β faza najčešće je kobalt. Matrica tvrdom metalu daje mekoću i žilavost. Kobalt kao matrica ima veću topivost WC-a pri temperaturi sinteriranja, odličnu mogućnost oblikovanja tijekom mljevenja i miješanja te povećanu otpornost na trošenje. Tvrdi metali imaju zrnatu strukturu, tj. zrnca karbida zalivena su metalnim vezivom. Mikrostruktura tvrdog metala WC-Co prikazana je na sljedećoj slici.



Slika 2. Mikrostruktura tvrdog metala WC-Co [4]

Tvrda faza se bolje otapa kada je u rastaljenom veznom materijalu nego obratno, a topljivost ovisi o temperaturi. Volfram karbid ima najveću topljivost u kobaltu, što je jedan od razloga zašto se tvrdi metali najčešće sastoje od tih komponenti. Na temperaturi koja je niža od tališta raspada se volfram karbid, nakon toga se pri nižoj temperaturi (od 1300 do 1700°C) proizvodi sinteriranjem. Kobalt počinje otapati volfram karbid pri 700 °C na način da prilikom sinteriranja postoji tekuća faza koja je zasićena volframovim karbidom te popunjava prostor između čestica karbida. Nakon završetka procesa volumni udio šupljina nije veći od 1%. Najveći udio volfram karbida hlađenjem s temperature sinteriranja kristalizira, dok preostali udio volfram karbida stabilizira kubičnu modifikaciju kobalta pri temperaturi nižoj od 417 °C te transformira u heksagonsku strukturu. Kobalt se nakon hlađenja nalazi pod vlačnim naprezanjem iz razloga različitih koeficijenata toplinskog rastezanja, dok su kristali volfram karbida tlačno napregnuti. Vjerojatnost loma krhke karbidne komponente iz tog se razloga smanjuje pri mehaničkom opterećenju. [2]

Na sljedećoj slici prikazan je fazni dijagram sustava WC.



Slika 3. Fazni dijagram W-C sustava [2]

2.4. Svojstva tvrdog metala

Kao što to samo ime govori jedno od najvažnijih svojstva tvrdih metala je tvrdoća. Tvrdi metali također se odlikuju i drugim dobrim svojstvima kao što su :

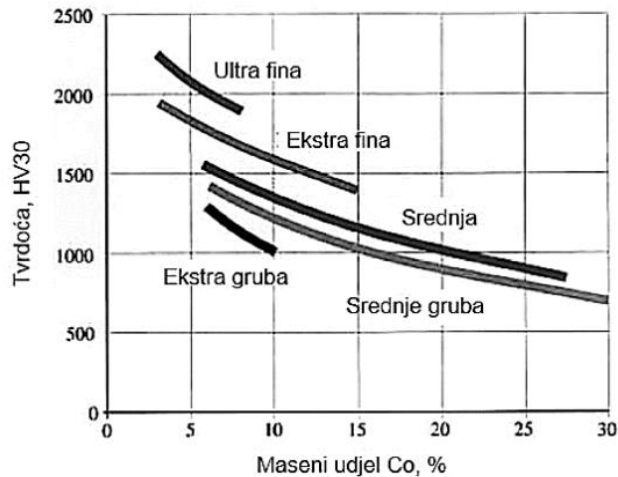
- Visoko talište,
- Visoka otpornost na trošenje,
- Visoka toplinska i električna vodljivost,
- Visoka otpornost na koroziju,
- Dobra postojanost na temperaturne promjene,
- Dobra prionjivost s metalnim taljevinama. [1]

2.4.1. Tvrdoća tvrdih metala

Za rezne alate izrazito je bitno svojstvo tvrdoće. Raspon tvrdoće tvrdih metala iznosi od 700 HV30 do 2200 HV30. Karbidi su glavni nositelji tvrdoće te ovise o sljedećim karakteristikama kao što su :

- Kemijski sastav,
- Veličina čestica polaznog praha,
- Parametri mljevenja i miješanja,
- Parametri konsolidiranja (kompaktiranja i sinteriranja). [5]

Porastom temperature dolazi do smanjenja tvrdoće zbog povećane plastičnosti. Pomoću Vickers metode uglavnom se ispituje tvrdoća, no ponekad se koristi i Rockwell A metoda. Smanjenjem sadržaja kobalta (veziva) i veličine zrna povećava se tvrdoća, kao što možemo vidjeti sa sljedeće slike.

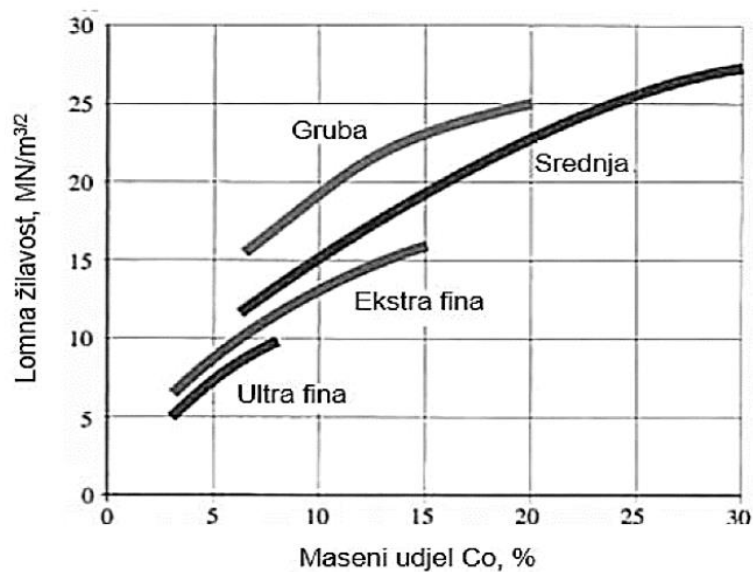


Slika 4. Ovisnost tvrdoće o sadržaju kobalta kod različite veličine zrna [3]

Parametri sinteriranja temperatura i vrijeme značajno utječu na tvrdoću. Produljenjem vremena držanja na određenoj temperaturi te porastom temperature sinteriranja smanjuje se tvrdoća zbog rasta zrna. Pojedini tvrdi metali mogu sadržavati karbide (TiC, TaC, NbC) koji utječu na porast tvrdoće te na otpornost deformiranju. Na Mohsovoj skali tvrdoća tvrdih metala iznosi iznad 9, skoro kao dijamant koji na Mohsovoj skali ima najveću tvrdoću 10. [5]

2.4.2. Žilavost tvrdih metala

Tvrđi metali se uz tvrdoću također odlikuju odličnom žilavosti. Posljedica dobre žilavosti je žilava i meka matrica. Porastom žilavosti pada tvrdoća i obrnuto. Lomna žilavost (K_{IC}) definiramo kao mjeru otpornosti materijala na širenje pukotine. Također nam lomna žilavost služi kao parametar za izračunavanje dugotrajnosti te kontrolu kvalitete tvrdih metala. Kod WC-Co tvrdih metala nema značajnih promjena lomne žilavosti do 600°C. Iznad 700°C značajno se povećava lomna žilavost tvrdih metala sa malim udjelom karbida (TiC, TaC, NbC). Za sve tvrde metale ne vrijedi ovakva pojava iz razloga što kod nekih tvrdih metala s porastom temperature dolazi do smanjenja lomne žilavosti, a kod nekih ona ostaje ista. Puno bolju lomnu žilavost imaju WC-Co tvrdi metali za razliku od onih sa Ni i Fe matricom. Lomna žilavost tvrdih metala u ovisnosti o udjelu kobalta za različite veličine zrna prikazana je na sljedećoj slici. [3]



Slika 5. Ovisnost lomne žilavosti o sadržaju kobalta za različite veličine zrna [3]

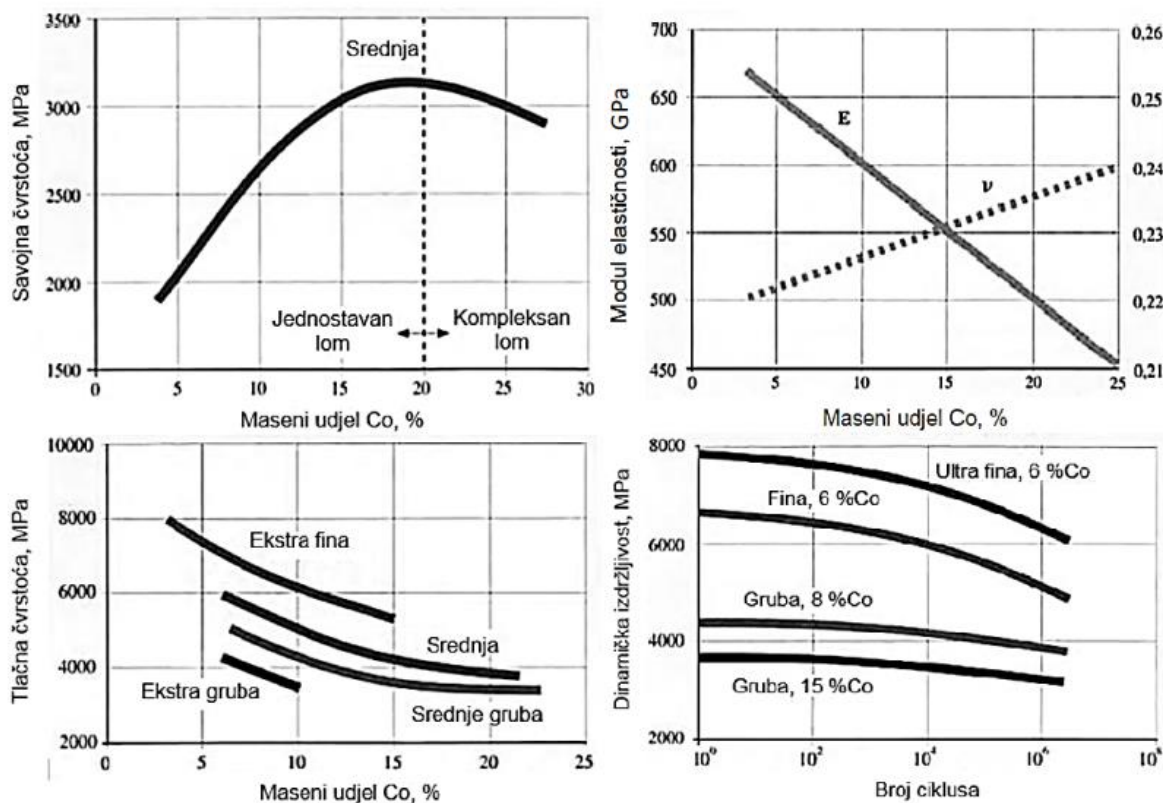
Novim istraživanjima je pokazano da smanjenjem veličine zrna ne dolazi do smanjenja lomne žilavosti. Kod nanostrukturiranih tvrdih metala homogena sitnozrnata mikrostruktura te homogeni raspored kobalta između karbida uzrokovali su veću žilavost. Na temelju navedenog može se zaključiti da tvrdoća i žilavost ovise o kemijskom sastavu, parametrima sinteriranja, veličini čestica praha, karakteristikama mikrostrukture te veličini zrna karbida. [5]

2.4.3. Ostala svojstva tvrdih metala

Također bitno svojstvo za tvrde metale je savojna čvrstoća (R_{ms}). Najveću savojnu čvrstoću imaju tvrdi metali sa srednjim i grubim zrnom sa otprilike 15% kobalta, a porastom temperature ona pada. [6] Tlačna čvrstoća (R_{mt}) jedno je od važnih svojstva tvrdih metala u uvjetima jednoosnog opterećenja. Smanjenjem veličine zrna i smanjenjem udjela veziva povećava se tlačna čvrstoća. Niskim udjelom veziva te malom veličinom WC zrna tlačna čvrstoća doseže vrijednosti i do 7000 N/mm². [6]

Prilikom upotrebe rezni alati su često podvrgnuti dinamičkom naprežanju. Pri uvjetima gdje se javlja pulsirajuće tlačno opterećenje dinamička izdržljivost (R_d) tvrdih metala iznosi od 65 do 85% vrijednosti tlačne čvrstoće kod $2 \cdot 10^6$ ciklusa. Granica dinamičke izdržljivosti nije jasno iskazana kod tvrdih metala. Dinamička izdržljivost raste nakon smanjenja udjela kobalta te smanjenja WC zrna. [6]

Modul elastičnosti (E) tvrdih metala je 2 do 3 puta veći od modula elastičnosti čelika, a smanjenjem udjela veziva se povećava. Vrijednosti mogu varirati od 450 do 670 GPa, dok vrijednosti modula smičnosti (G) iznose između 180 i 270 GPa. Na sljedećoj slici prikazan je utjecaj kobalta na prethodno navedena mehanička svojstva.



Slika 6. Utjecaj kobalta na mehanička svojstva

3. Proizvodnja tvrdih metala

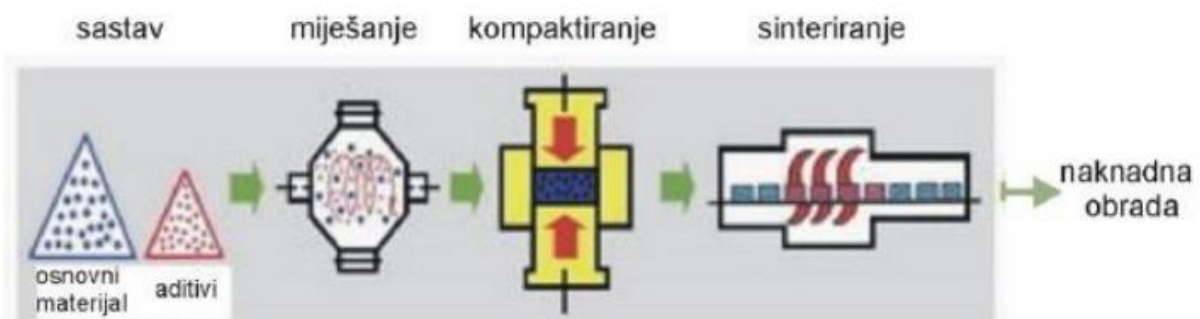
3.1. Metalurgija praha

Postupkom metalurgije praha dobivaju se tvrdi metali. Metalurgija praha (engl. powder metallurgy) je izradba metalnih poluproizvoda i proizvoda prešanjem i sinteriranjem praha nekih metala ili njihovih spojeva, ponekad i uz dodatak nemetalnih sastojaka. Kompozitni materijali pogodni za izradu metalurgije praha su oni koji imaju u sastavu dva ili više međusobno netopivih metala. Prahovi koji su danas u upotrebi karakterizira visoka čistoća i izuzetno mala veličina zrna. Također su danas u primjeni novi postupci koji omogućuju proizvodnju dijelova odličnih mikrostrukturnih karakteristika i mehaničkih svojstva. Stoga se metalurgija praha primjenu pronalazi za ekonomičnu proizvodnju dijelova složenog oblika, visoke kvalitete i s visokom dimenzijskom točnošću. Ustvari ekonomična proizvodnja je velikoserijska proizvodnja, zato dobar dio metalurgije praha (oko 70%) otpada na automobilsku industriju. [3]

Generalno, postupci metalurgije praha dijele se na četiri osnovne tehnološke operacije:

- Proizvodnja praha,
- Stvaranja mješavine prahova,
- Kompaktiranje i
- Sinteriranje.

Na sljedećoj slici prikazan je tijek osnovnih procesa metalurgije praha.



Slika 7. Procesi metalurgije praha [7]

Postupci metalurgije praha mogu se podijeliti u dvije skupine, a to su:

- Konvencionalni postupci i
- Postupci za postizanje teorijske gustoće. [7]

Konvencionalne postupke tvore tri osnovne tehnološke operacije, a to su: miješanje praha, kompaktiranje praha i sinteriranje. Navedenim operacijama dobivaju se različite mješavine prahova. Primjenu najčešće pronalaze u proizvodnji gotovih dijelova metalurgijom praha.

Glavni cilj postupaka za postizanje teorijske gustoće je postizanje teoretske gustoće da bi se eliminirao porozitet. Ovu grupu karakteriziraju sljedeći postupci, a to su: kovanje praha, injekcijsko prešanje praha (MIM), toplo izostatičko prešanje (HIP), sinetiranje+toplo izostatičko prešanje (sinter HIP), toplo prešanje, kompaktiranje valjanjem te ekstrudiranje. Postupci se koriste za dobivanje strukturnih keramika, visoko temperaturnih kompozita, dijamantnih alata, alatnih čelika, tvrdih metala, itd. [7]

U sljedećoj tablici prikazane su prednosti i nedostaci metalurgije praha.

Tablica 1. Prednosti i nedostaci metalurgije praha

Prednosti	Nedostaci
Poboljšana magnetska svojstva	Visoka cijena polaznih prahova
Razvoj materijala novih mikrostruktura	Skupa i komplicirana izrada kalupa za oblikovanje praha tijekom postupka kompaktiranja
Točne dimenzije gotovih proizvoda	Zahtijeva se skladištenje i rukovanje prahom u čistoj okolini
Proizvodnja dijelova gotovog ili skoro gotovog oblika bez naknadne obrade	Otežano rukovanje prahovima
Visok stupanj iskoristivosti materijala	Mogućnost pojave poroziteta i oksidacije, što rezultira smanjenjem mehaničkih svojstava
Mogućnost proizvodnje jednostavnih i složenih oblika	Razlike u gustoći gotovih dijelova u slučaju jednoosnoga kompaktiranja
Oblikovljivost metala	Iskoristivo i ekonomično jedino za velikoserijsku proizvodnju
Ušteda energije i troškova proizvodnje	Ograničenja oblika i dimenzija gotovih proizvoda
Pouzdanost procesa i svojstva za kritične primjene	Stroga kontrola svih segmenata proizvodnje

3.2. Postupci proizvodnje prahova

Izrazitu važnost u metalurgiji prahova ima proizvodnja prahova. Razlog toga je što svojstva gotovog proizvoda ovise o prahu nakon postupka sinetriranja. Poznati postupci koji se koriste u metalurgiji praha za proizvodnju praha navedeni su u sljedećoj tablici.

Tablica 2. Postupci proizvodnje prahova i njihova primjena

Postupak	Prah	Veličina čestice [μ]	Primjena
Automatizacija	Fe,Cu,Al,Ni,Ag,Ti,Sn,Zn,Bi,Cd, Au; Bronca, mesing, predlegirani i legirani prahovi	10-500	Sinter magneti, laki metali, porozni materijali, elektromaterijali, sinterirani čelik, nuklearna tehnika, itd.
Elektrolitički	Fe,Cu,Sn,Pb; Ta,Nb,Ti,Th,Zr,V	0,1-30	Kemijska industrija, nuklearna tehnika, porozni materijali, visokovakuumski materijali, sinterirani nosači, itd.
Kemijski	Zn,MoO ₃ ; Ni,Fe,Mo,W; Co,Cu; Ag,Au,Pt,Sn; Ta,Nb,Ti,Th,U,Zr,V,Hf, tvrdi metali	0,1-50	U nuklearnoj tehnici, bimetali, vakuumski materijali, sinter magneti, čisti metali, u kemijskoj industriji, porozni ležajevi, obojeni metali, kompoziti, itd.
Mehanički	Mn,Mg,Cr,Sb,Bi,Co,Be; Fe,Ti,Zr,HfU,Th; WC,TiC,TaC,Co; Ta,Nb,Fe-Al,Fe-Al-Ti,Ni-Al,Ni-Ti,Fe-Cr,Fe-Si; Ni-Fe,Ag,Ag-Sn; Super legure	0,5-400	Dijelovi strojeva iz sinteriranog čelika, dijelovi za kemijsku industriju; nuklearna tehnika, porozni ležajevi, tvrdi metali, teško taljivi metali, sinter magneti, laki metali, itd.

3.2.1. Metoda atomizacije

U proizvodnji prahova metala ključna je metoda atomizacije. Zbog mogućnosti dobivanja prahova metala direktno iz taline danas ima izuzetno široku primjenu. Dobiveni prah metala karakterizira visoka čistoća. Ovaj postupak odvija se u tri koraka, a to su:

- Taljenje,
- Atomizacija, zatim skrućivanje i
- Hlađenje.

Četiri komercijalne metode koje danas koristimo su:

- Dvo-fluidna atomizacija (za raspršivanje kostisti plin i vodu),
- Atomizacija pomoću rotirajuće elektrode,
- Centrifugalna atomizacija pomoću rotirajućeg diska i
- Atomizacija u vakuumu. [7]

3.2.2. Elektrolitičke metode

Prahovi se u ovoj metodi dobivaju prilikom taloženja na katodi nekog metala za vrijeme procesa elektrolize. Dobiveni talog se zatim skida, suši, melje, prosijava te zatim priprema za daljnji rad. Na kraju dobiveni talog može biti čvrst, rastresit i visokodisperzni, a to ovisi o sastavu otopine, svojstvima materijala te uvjetima elektrolize.

3.2.3. Kemijske metode

Kemijskom metodom obuhvaćeni su kemijski procesi koji uključuju redukciju metalnih smjesa poput oksida, karbonata, nitrata ili halogenida s plinovima ili krutinama.

Također poznate su još neke kemijske metode:

- Hibrid-dehibrid postupak,

- Postupak reakcije sinteze i
- Taloženje iz otopine soli metala i isparavanjem. [7]

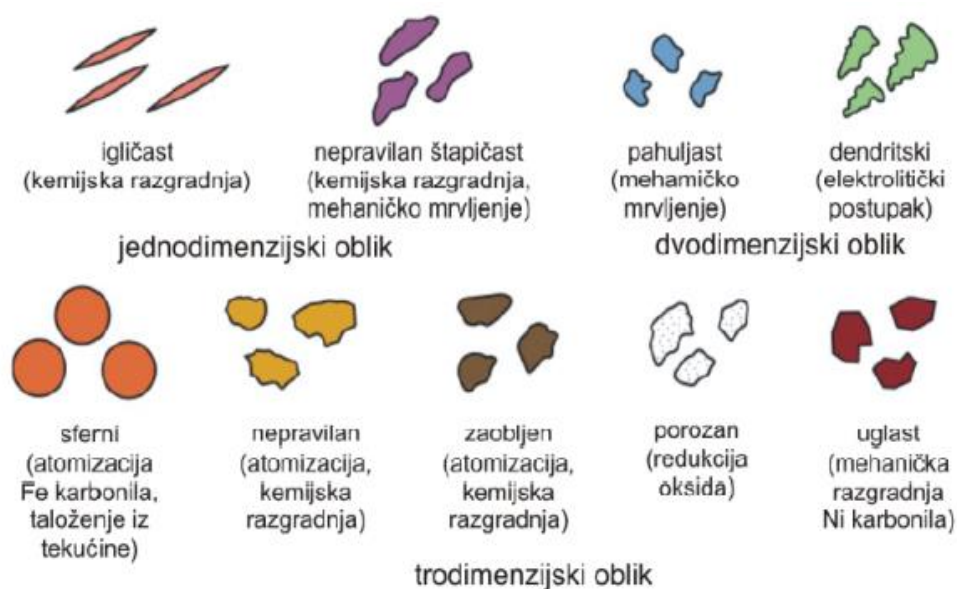
Prethodno nabrojenim metodama moguće je dobiti prahove gotovo svih metala, različitih oblika i veličina čestica. [7]

3.2.4. Mehaničke metode

Ovom metodom usitnjavanjem materijala uz pomoć djelovanja vanjskih sila dobiva se prah. Korištene vanjske sile su sljedeće :

- Trenje,
- Tlačenje,
- Udarni rad loma i
- Sječenje.

Na sljedećoj slici prikazani su dobiveni oblici čestica praha i metode pomoću kojih su dobivene.



Slika 8. Oblici čestica praha i njihove metode dobivanja

3.3. Miješanje i mljevenje praha

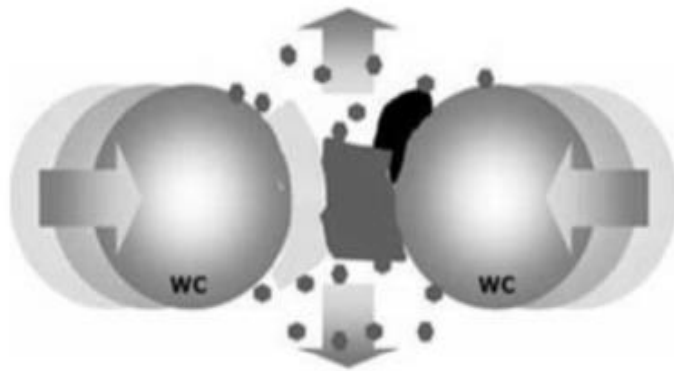
Proces mehaničkog oblikovanja praha za vrijeme krutog stanja definira se kao postupak mljevenja. Tada stiže do lomnjenja i hladnog oblikovanja čestica praha. Homogenizacija dvaju ili više prahova postiže se mljevenjem. Postupci mljevenja koji se koriste su :

- Mljevenje valjanjem,
- Kuglično mljevenje i
- Udarno mljevenje.

Postupci mljevenja provode se na mlinovima koji mogu biti :

- Kuglični,
- Vibracijski,
- Vrtložni,
- Atritorni i
- Planetarni.

Kuglično mljevenje je često korišten postupak mljevenja, a izvodi se na kugličnim mlinovima koji sadrže kuglice kojima se usitnjuje polazni materijal. Sastav kuglica bi trebao biti istog ili sličnog sastava kao i prah koji se melje. Za izradu kuglica za mljevenje koriste se sljedeći materijali : alatni čelici, očvrtnuti Cr-čelici, nehrđajući čelici te tvrdi metali i keramike. Za izradu bubnja koriste se: očvrtnuti i alatni čelici te tvrdi metali. [3], [7]



Slika 9. Prikaz mljevenja praha [3]

Proces kojim se postižu homogene mješavine čestica praha u čvrstom stanju zove se miješanje. Glavni cilj je da ne dođe do naknadnog smanjenja veličina čestica polaznih prahova. Razlikujemo miješanje i umješavanje. Miješanje podrazumijeva prahove istih ili različitih veličina čestica i istog kemijskog sastava, dok umješavanje podrazumijeva prahove različitih veličina čestica i različitih kemijskih sastava. Za postizanje homogene strukture dodaju se aditivi kao što su grafit ili lubrikant. Njihova zadaća je smanjiti trenje između površine mlina i mase praha. [5]

3.4. Kompaktiranje/oblikovanje praha

Oblikovanje praha ili kompaktiranje definira se kao postupak gdje je cilj čestice praha povezati u željeni oblik. Oblikovanja praha izvodi se primjenom visokog pritiska u kalupovima uslijed čega dolazi do deformacija čestica praha i uklanjanja poroznosti. Točne dimenzije i željena čvrstoća izratka moraju biti osigurane konstrukcijom kalupa. Moguća greška je razlika u dimenzijama, a javlja se u slučaju nehomogena raspodjela gustoće materijala. Glavni ciljevi postupka kompaktiranja su:

- Konsolidacija praha u željeni oblik,
- Postizanje željenih konačnih dimenzija,
- Postizanje željenog stupnja i vrste poroziteta i
- Postizanje zadovoljavajuće čvrstoće za daljnje rukovanje. [7]

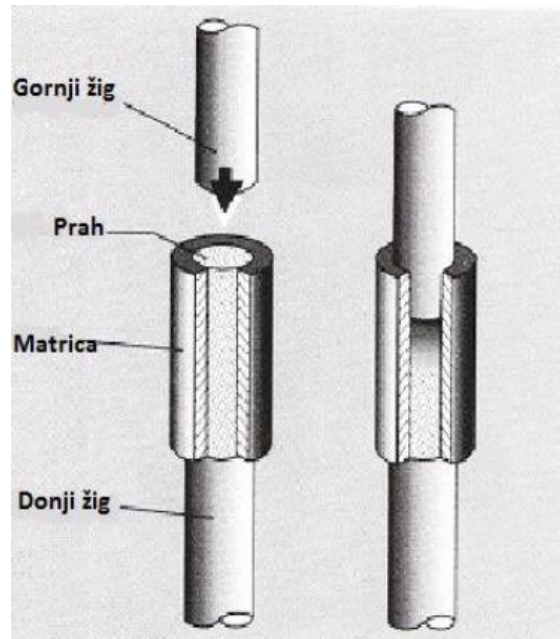
Postupak kompaktiranja može se podijeliti na hladno (okolišna i malo povišena temperatura) i toplo kompaktiranje (pri visokoj temperaturi), gdje primjenjeni pritisak može biti jednosmjernan, dvosmjernan ili izostatički.

Postupak koji se najčešće koristi u konsolidaciji praha je jednoosno kompaktiranje. Postupak se dijeli na nekoliko sljedeće navedenih koraka:

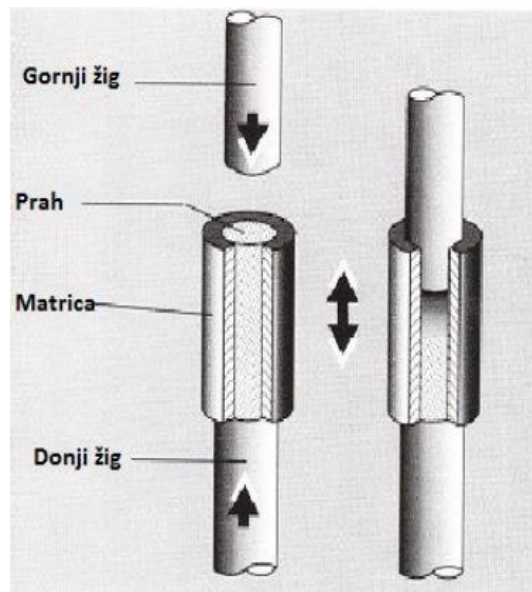
1. Popunjavanje kalupa česticama praha,
2. Primjena tlaka putem žiga,
3. Rasterećenje povlačenjem žiga i
4. Izbacivanje zelenog sirovca.

Pomoću ovog postupka prenosi se pritisak na čestice praha pomoću klipa koji se pomiče po jednoj osi. Kada se izvodi kompaktiranje pomoću jednog klipa javljaju se razlike u vrijednostima gustoće dijelova različite debljine. Taj problem moguće je smanjiti upotrebom dvostrukih klipova (gornjeg i donjeg).

Na sljedećim slikama prikazano je jednostrano i dvostrano kompaktiranje.



Slika 10. Jednostrano kompaktiranje [7]



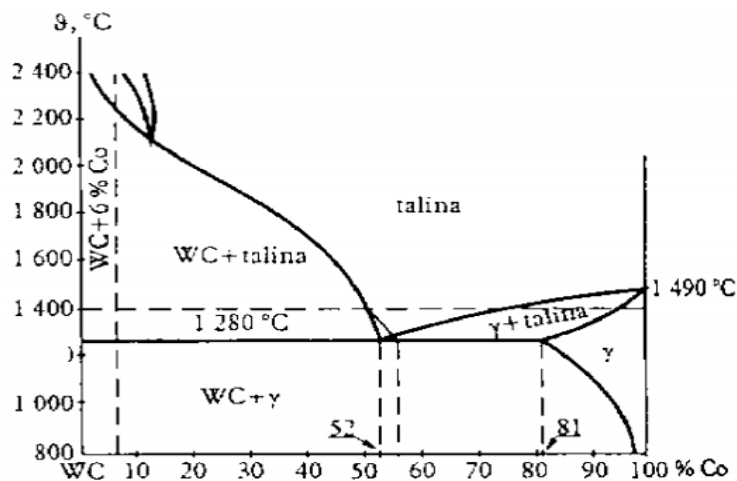
Slika 11. Dvostrano kompaktiranje [7]

Pomoću postupaka hladnog izostatskog prešanje i toplog izostatskog prešanja moguće je postići bolju gustoću i mehanička svojstva.

Hladnim izostatskim prešanjem (CIP-eng. cold isostatic pressing) omogućeno je kontroliranje dimenzija. Glavni razlog toga su visoki tlakovi prešanja te dobro definiran kalup. Ovaj proces visoko je pouzdan i nudi visoku razinu proizvodnje zahvaljujući automatizaciji i mehanizaciji. Toplo izostatsko prešanje (HIP-eng. hot isostatic pressing) relativno je nov postupak. Pomoću ovog postupka postižu se osjetno bolja fizikalna i mehanička svojstva te više vrijednosti gustoće kompaktiranih dijelova. Nakon provedenog postupka klasične vrijednosti postignutih gustoća iznose od 75 do 85 % za hladno izostatsko prešanje, dok te vrijednosti mogu iznositi čak i 92% kod toplog izostatskog prešanja. U cilju da se izbjegne nejednoličnost gotovog proizvoda postupak toplog izostatskog prešanja zahtjeva strogu kontrolu temperature. Do porasta čvrstoće kompaktiranog komada dolazi nakon hlađenja zahvaljujući prethodno dodanom polimeru. [5]

3.5. Sinteriranje

Sinteriranje je definirano kao postupak okrupnjivanja sitnozrnatog materijala. Provodi se dovođenjem metalnog praha, metalnih i nemetalnih spojeva u čvrstu i kompaktnu tvar pod utjecajem topline. Preduvjet je da pri postupku barem jedna komponenta ostane djelomično rastaljena. Prilikom sinteriranja tvrdih metala u kapljevitoj fazi dijelom se otapa karbidna faza. Što možemo vidjeti na sljedećoj slici na primjeru WC-Co sustava sa 6% Co.



Slika 12. Presjek WC-Co ravnotežnog dijagrama stanja WC-Co [2]

Ugrijavanjem smjese na 1400 °C (temperaturu sinteriranja), u čvrstome stanju se počinje otapati kobalt, C i WC slobodni su na temperaturi od oko 600 °C. Sinteriranjem na temperaturi od 1400 °C otapa se daljnja količina WC, sastav taline tada sadrži od oko 52% WC i 48% Co. Potom kapljevita faza okružuje karbidne čestice i zatim prodire u pore i šupljine. Nakon sinteriranja ukupna popunjenost iznosi od 95 do 98% (poroznost od 2 do 5%). Prilikom sinteriranja važnu ulogu ima difuzija. Zrnca srastaju i tvore granice zrna te fazne granice pod djelovanjem difuzije, s obzirom koliko je faza u procesu. Osjetno složeniji procesi pri sinteriranju tvrdih metala su oni koji sadrže TiC, TaC i WC uz veznu kobaltovu masu. Tada dolazi do stvaranja različitih mješanaca, čiji sastav ovisi o temperaturi sinteriranja, vremenu držanja na zadanoj temperaturi te uvjetima ohlađivanja. Neke od prednosti sinteriranih metalnih proizvoda su vrste i udijeli tvrdih čestica. Tvrdi čestice su nosioci otpornosti na trošenje, sastava i strukturnog stanja vezivnog materijala koji su nosioci žilavosti. [2]

4. Postupci prevlačenja površina

Između ostalog postupci prevlačenja kod tvrdih metala za rezne alate koriste se radi poboljšavanja svojstva reznih alata. Kod postupka prevlačenja nanosi se određena prevlaka na površinu u cilju povećanja otpornosti materijala na trošenje te povećanja površinske tvrdoće. Također se primjenjuju različiti postupci kod prevlačenja. S obzirom na temeljni mehanizam (toplinski, mehanički, kemijski ili u kombinaciji) ti postupci mogu se svrstati u sljedeće podskupine:

- Toplinsko prevlačenje,
- Mehaničko prevlačenje,
- Toplinsko-mehaničko prevlačenje,
- Kemijsko prevlačenje i
- Prevlačenje u parnoj fazi. [9]

4.1. Postupci prevlačenja u parnoj fazi

Prilikom postupka prevlačenja u parnoj fazi glavni cilj je postizanje zaštitnog sloja koji je različitog sastava s obzirom na podlogu s time da nije difundirao u površinske slojeve, nego je samo nanesen. Zaštita od trošenja alata i strojnih dijelova je glavna svrha ovih postupaka. [10]

Postupci prevlačenja u parnoj fazi podjeljeni su na sljedeći način na:

- Postupke kemijskog prevlačenja u parnoj fazi-CVD,
- Postupke fizikalnog prevlačenja u parnoj fazi-PVD i
- Plazmom potpomognute postupke prevlačenja u parnoj fazi-PACVD.

4.2. Kemijsko prevlačenje u parnoj fazi-CVD

CVD (engl. Chemical Vapor Deposition) postupak je prevlačenja u parnoj fazi i provodi se uz atmosferski tlak ili niži vakum. Odvijanje procesa sastoji se od interakcija između zagrijanje površine radnog komada i smjese plinova. U proces se uz materijale prevlake također dovode elementi koji su nužni za stvaranje prevlake, ti elementi su u obliku isparivih spojeva kojima se stvara materijal prevlake uz pomoć kemijskih reakcija. Zagrijavanjem radnog komada dolazi do kemijske reakcije između plinskih komponenti koje su korištene pri visokim temperaturama, također dolazi do taloženja tih plinova na površinu radnog komada. Nakon taloženja tih plinova na površini obrađenog materijala dolazi do stvaranja tankog sloja koji djeluje kao prevlaka. Postupak provođenja izvodi se na temperaturama od 800 do 1000°C u vremenskom periodu od 1 do 6 sati. Postizanje slojeva otpornih na trošenje i koroziju te produljenje vijeka trajanja određenih komponenti glavni je cilj CVD postupka. Na taj način dobivaju se sljedeći spojevi : TiC, TiN, TiCN, TiAlN, TiAlNC, B₄C, SiC, oksidna keramika (Al₂O₃, MoSi₂, ZrO₂, TiO₂) itd. [9]

Svoju primjenu CVD postupak nalazi u području vojne i svemirske tehnologije, tribologiji i u području elektrotehnike. Pomoću ovog postupka prevlačenja smanjuje se trošenje na osnovi sniženja adhezije i abrazije. Alati koji su prevučeni CVD prevlakama pokazali su veću ili jednaku trajnost u uvjetima većeg opterećenja, kao što su više brzine rezanja ili veći stupanj deformacije. [1]

4.3. Fizikalno prevlačenje u parnoj fazi-PVD

PVD (engl. Physical Vapor Deposition) fizikalni je postupak nanošenja prevlaka iz parne faze. Fizikalnim načinom dobiven je dodatni deponirani materijal, nastaje prenošenjem iz čvrste faze pomoću neparivanja ili napašivanja u parnu fazu. Zatim u vakuumskoj atmosferi ili u stanju plazme putuje od izvora na osnovni materijal. Nakon toga u obliku tankog zaštitnog sloja kondenzira konačna parna faza na površini radnoga komada. Prevlake dobivene ovim postupkom mogu biti višeslojne i mogu nastati gotovo od svih elemenata. Metali su u izvoru većinom rastaljeni, ali neki isparuju bez taljenja, tj. sublimiraju kao npr. : Cd, Zn, Cr, Ta i Rh. Do promjene oblika i teksture

obratka ne dolazi iz razloga neznatnog grijanja (ispod 200°C) podloge za vrijeme napanjanja. Provođenje PVD procesa ima znatno niže temperature nego kod CVD procesa, time se omogućuje prevlačenje raznih alata koji se ne mogu podvrgnuti CVD postupku prevlačenja. Za provedbu PVD postupka prevlačenja temperaturni raspon iznosi od 150 do 500°C. Fazne transformacije u osnovnom materijalu izbjegavaju se korištenjem niskog temperaturnog raspona što ovaj postupak čini vrlo pristupačnim.

Deponiranje zaštitnog filma može se provesti u više slojeva na površinu radnog komada. Debljina jednoslojne prevlake iznosi oko 2-5 µm. Izvedba višeslojne prevlake je moguća, obično iznosi oko 16 µm, ali debljina prevlake također može varirati. Brzina deponiranja zaštitnog sloja iznosi od 3 do 18 µm/h. Pomoću PVD prevlaka povećava se kemijska postojanost i otpornost na trošenje, a faktor trenja se smanjuje, toplinska otpornost se povećava te se poboljšava vizualni izgled (dobivamo na dekorativnosti). [1]

Pomoću ovih postupaka mogu se prevlačiti alati koji su inače skloni deformacijama, kao npr. svrdla i glodala, za razliku od CVD postupka. Razlog toga je što PVD prevučeni dijelovi naknadno ne moraju biti obrađeni. [1]

4.4. Plazmom potpomognuto prevlačenje u parnoj fazi

Plazmom potpomognuti CVD (PACVD-eng. Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition) postupak prevlačenja koristi se osnovnim elementima provedbe CVD i PVD postupka prevlačenja. Na taj način je omogućena niža temperatura provedbe samog postupka. PACVD postupak za zagrijavanje radnog komada i aktiviranje kemijske reakcije koristi plazmu. Postupak se odvija se na način da se energija slobodnih elektrona koristi kao reakcija za taloženje i deponiranje. Do dijeljenja plina i nastanka plazme dolazi dovođenjem električne energije pri odgovarajućem tlaku i dovoljno niskom naponu. Plinski reaktanti za vrijeme sudaranja s elektronima ioniziraju i razgrađuju se. Tada dolazi do stvaranja kemijski aktivnih iona koji se talože na površinu radnog komada nakon kemijske reakcije i na taj način tvore tanki zaštitni sloj.[11] Uobičajena primjena PACVD postupka je za nanošenje tankih filmova i prevlaka koje je teško postići klasičnim CVD ili PVD postupcima, npr. za izradbu dijamantnog filma, itd.

5. Primjena tvrdih metala

Tvrđi metali odlikuju se vrlo dobrim svojstvima (naročito tvrdoćom) te iz tog razloga nalaze široko područje primjene. Danas se upotrebljavaju pri različitim postupcima obradbe metala, kamena, plastike i drva te za konstrukcijske dijelove otporne na trošenje.

Podaci o proizvodnji tvrdih metala na svjetskoj razini pokazali su da oko 67 % proizvedenih tvrdih metala svoju primjenu nalazi u proizvodnji reznih alata za obradu metala. Dok se gotovo 13 % ukupne proizvodnje koristi za izradu alata za bušenje nafte i gradnju tunela, rudarstvo, 11 % za alate za obradu drveta, dok se tek 9 % koristi u građevinarstvu. Može se zaključiti na temelju navedenih podataka da je najzastupljenije područje primjene tvrdih metala za izradu reznih alata za obradu odvajanja čestica [7].

Na sljedećim slikama prikazane su neke od primjena tvrdih metala.



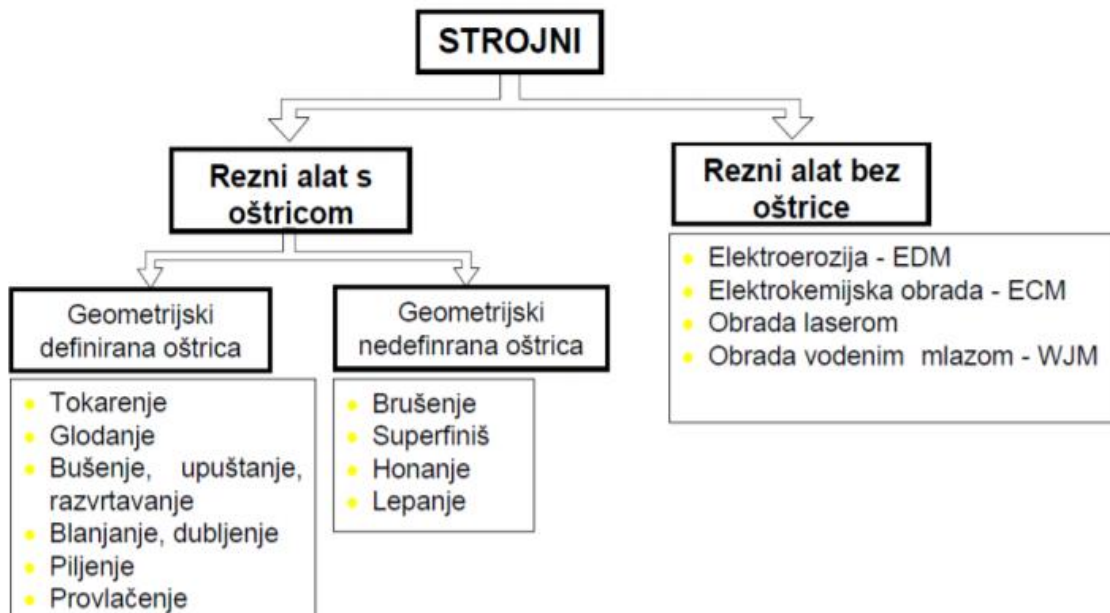
Slika 13. Rezni list kružne pile od tvrdog metala



Slika 14. Rezne pločice od tvrdih metala

6. Rezni alati za obradu odvajanja čestica

Obrada metala može se definirati kao promjena oblika, dimenzija ili svojstva metala u cilju prilagodbe za daljnju upotrebu. Obrada metala može se podijeliti na ručnu i strojnu obradu. Strojne postupke može se podijeliti na obradu s reznim alatom s oštricom (obrada rezanjem) i na obradu bez čvrste oštrice (bez dodira s obratkom). Obrada reznim alatom s oštricom dijeli se na odvajanje alatom s geometrijski definiranom oštricom (npr. tokarenje, bušenje, upuštanje, glodanje, piljenje) te na odvajanje alatom s geometrijski nedefiniranom oštricom (npr. brušenje, honanje, lepanje i superfiniš). Sljedećoj slika prikazuje prethodno navedene podjele postupaka obrade odvajanjem čestica.



Slika 15. Podjela postupaka obrade odvajanja čestica [12]

Alat je potreban kako bi se izvela obrada metala na bilo koji način. Alat je sredstvo u direktnom dodiru s predmetom koji se obrađuje. Materijali reznih alata u današnjoj industriji sežu od visokougličnog čelika pa do keramike i dijamanta. Baš zato je važno uzeti u obzir da postoje razlike između tih materijala i da je potrebno pronaći ispravan način upotrebe tih materijala.

6.1. Materijali reznih alata

Postavljaju se određeni zahtjevi na alate pomoću kojih se vrši postupak obrade odvajanja čestica. Kada je riječ o reznim sposobnostima alata sljedeće karakteristike navode se kao jedne od najbitnijih:

- Otpornost prema trošenju,
- Žilavost,
- Otpornost pri povišenim temperaturama i
- Cijena i dostupnost kod nabave. [13]

Materijali koji se najčešće upotrebljavaju za izradu reznih alata su sljedeći:

- Brzorezni čelici (HSS): čelici legirani kromom (Cr), vanadijem (V), volframom (W), kobaltom (Co) i molibdenom (Mo). Dobra otpornost pri višim temperaturama karakterizira brzorezne čelike, dok u odnosu na alatne čelike imaju 3-4 puta veće brzine rezanja.
- Tvrdi metali: sastoje se od metalnih karbida koji su nosioci tvrdoće (WC, TiC i TaC, NbC, CO) te i Ni i/ili Mo, kao veziva. Vrijednosti tvrdoće im dostižu od 1300 do 1800 HV, a pri temperaturi od 1000°C snizi se za samo 10%. Sinterirani tvrdi metali s udjelom TiC-a i pri 700°C su tvrdi od brzoreznog čelika pri sobnoj temperaturi.
- Kermet: kompozitni materijal sastavljen od metala i keramike. Izrađen s ciljem dobivanja tvrdoće i otpornosti na visokim temperaturama kakvu ima keramika te žilavosti dobivenom korištenjem metala (oksidi, boridi i karbidi). Kermet također može biti izrađen i od metalne matrice (ovisno o traženim svojstvima), ali u većini slučajeva ne sadržava više od 20% metala.
- Keramika: većinom se sastoji od aluminijevog oksida (Al_2O_3) i silicijevog nitrida (Si_3N_4). Velika tvrdoća i otpornost pri visokim temperaturama karakterizira takve rezne alate, također ne dolazi do kemijskih reakcija sa obratkom. Niska žilavost im je nedostatak.
- Dijamant: dijamant je čisti ugljik. Dijamant je pet puta je tvrdi od tvrdig metala. Vrijednosti savojne čvrstoće iznose tek 300 N/mm². Najtvrdi je rezni materijal te

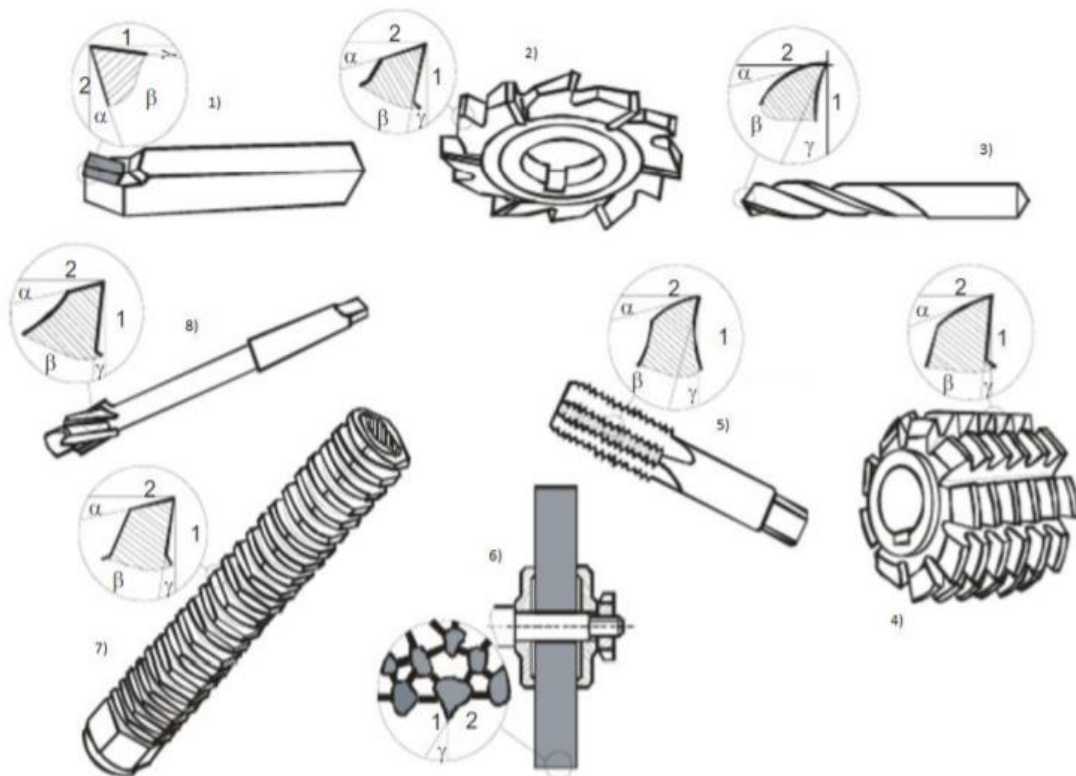
najotporniji prema trošenju. Neki nedostaci su osjetljivost na udarce i niska tlačna čvrstoća.

- Kubični bor-nitrid (CBN): drugi je najtvrdi materijal koji se koristi kao alternativa dijamantu. Razlog toga je njegova niža cijena. [13]

6.2. Geometrija reznog alata

Rezni dio alata s reznim klinom prilikom procesa obrade odvajanja čestica prodire u obrađivani materijal i pri tom dolazi do odvajanja čestice. Rezni klin dio je alata koji se nastavlja u dršku alata. Pomoću drške alata moguće je pričvršćivanje alata na stroj. Kod svih alata isti je pristup, razlika je samo u obliku geometrije. [14]

Na sljedećoj slici nalaze se neki od alata koji se koriste za obradu odvajanja čestica.



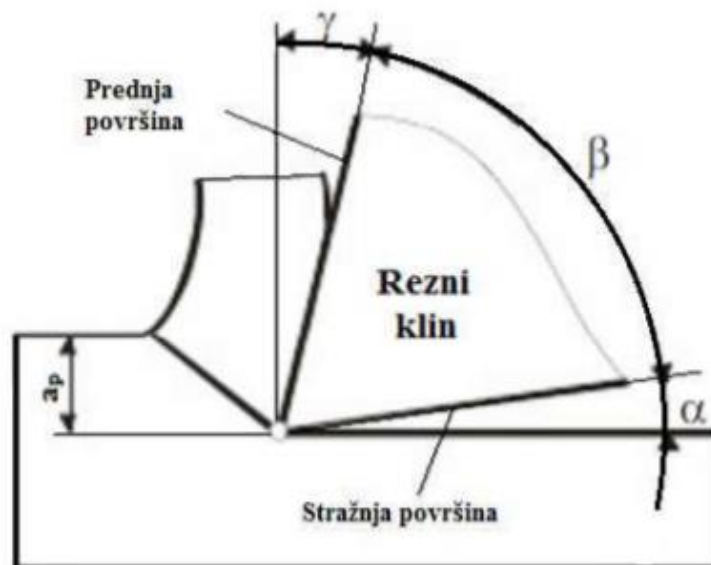
Slika 16. Neki od alata koji se koriste za OOČ [14]

Na prethodnj slici nalaze se sljedeći alati za obradu odvajanja čestica:

- 1) Tokarski nož,
- 2) Glodalo,
- 3) Svrđlo,
- 4) Odvalno glodalo,
- 5) Ureznik,
- 6) Brusnu ploču,
- 7) Provlakačicu i
- 8) Upuštalo.

Geometrijski definiran rezni alat ima tri glavna kuta, a to su sljedeći:

- 1) Prednji kut γ - kut između prednje površine i ravnine, okomite na ravninu rezanja, postavljenu kroz glavnu reznu oštricu,
- 2) Stražnji kut α – kut između stražnje površine i ravnine rezanja i
- 3) Kut klina β – kut koji se mjeri između prednje i stražnje površine. [14]



Slika 17. Osnovni kutovi reznog alata [14]

6.3. Prisutna gibanja na alatnim strojevima

Općenito, prisutna gibanja na alatnim strojevima dijele se na rotacijsko (kružno) i pravocrtno (translacijsko). Gibanja se mogu odvijati kontinuirano (neprekidno) i diskontinuirano (s prekidima). Potrebno je razlikovati dvije vrste gibanja na alatnim strojevima, a to su glavno i pomoćno gibanje.

Brzinom rezanja (v_c) definirano je glavno gibanje. To je gibanje pomoću kojeg se stvara odvojena čestica. Najveći dio snage utroši se na glavno gibanje. To gibanje je kontinuirana rotacija na većini alatnih strojeva. S obzirom na vrstu stroja izvodi je ili obradak ili rezni alat.

Sva ostala gibanja koja omogućavaju obradu su pomoćna gibanja, ali sama ne vrše odvajanje čestice. Razlikuju se dvije vrste pomoćnog gibanja, a to su sljedeća:

- Posmično gibanje definirano je posmičnom brzinom (v_f). Pomoću tog gibanja osiguran je kontinuitet odvijanja procesa obrade. Manji dio ukupne snage stroja utroši se na njega. Posmično gibanje je kontinuirana translacija na većini alatnih strojeva. S obzirom na vrstu stroja to gibanje izvodi obradak ili rezni alat ili oboje.
- Dostavno gibanje služi za zauzimanje dubine rezanja (a_p) i gibanje izvan obrade koje služi za primicanje i odmicanje reznog alata obratku ili obrnuto. Dostavno gibanje u većini slučajeva služi kao kontinuirana translacija (kod kojeg nema kontakta reznoga alata i obratka). [13]

6.4. Glodanje

Glodanje je postupak obrade odvajanja čestica kod kojeg alat obavlja glavno gibanje. Glodanje se provodi na alatnim strojevima. Najviše se provodi na glodalicama i obradnim centrima, gdje alat ima glavno (režno) gibanje koje je kružno kontinuirano. Obradak vrši posmično gibanje koje je kontinuirano. Glodalo je alat za glodanje definirane geometrije reznog dijela, s više glavnih reznih oštrica koje se nalaze na zubima glodala. Rezne oštrice periodično ulaze u zahvat s obratkom i izlaze iz njega tako da im je dinamičko opterećenje jedno od osnovnih obilježja. U zahvatu s obratkom istodobno je samo nekoliko reznih oštrica. Osnovni elementi glodala su radni dio koji sadrži zube na kojima se nalaze oštrice, stezni dio koji je predviđen za stezanje glodala, te vrat koji je spojni dio radnog i steznog dijela. Na sljedećoj slici nalaze se prethodno navedeni elementi glodala.



Slika 18. Osnovni elementi glodala

Postoji nekoliko kriterija podjele glodanja. Neke od osnovnih podjela prikazane su u sljedećoj tablici.

Tablica 3. Neke od osnovnih kriterija podjela glodanja

Način podjele	Podjela postupka glodanja
Prema kvaliteti obrađene površine	Gruba, završna i fina.
Prema kinematici postupka	Istosmjerno glodanje i protusmjerno glodanje.
Prema položaju osi glodala u odnosu na površinu koja se obrađuje	Obodno i čeono.
Prema obliku obrađene površine	Ravno (plansko), okretno, profilno, odvalno i oblikovno.

7. Eksperimentalni dio

Cilj ovog eksperimentalnog dijela rada je prikazati trošenje reznog alata od tvrdog metala s obzirom na različiti kemijski sastav i konstantne parametre obrade. Konstantnim parametrima obrade prikazat će se kako se pojedini alat troši s obzirom na kemijski sastav pri istim uvjetima obrade. Materijal koji se obrađivao izrađenim alatima je aluminij. Za potrebe ovog rada koristila su se tri ispitna uzorka tvrdih metala različitih kemijskih sastava i kvalitete. Izrada alata proveda se u tvrtci Niteh d.o.o. u Karlovcu, pomoću Wolf tehnologija pod vodstvom gospodina Tomislava Cindrića.

7.1. Specifikacija ispitinih uzoraka

Pri izradi reznih alata koristile su se tri različite submikronske kvalitete. Raspon veličina zrna kod submikronske kvalitete su od 0,5 μm do 0,8 μm . Korištene kvalitete su sljedeće :

- CTS18D (ISO 513 K20-K40) ,
- CTS20D (ISO 513 K20-K40) i
- CTS30D (ISO 513 K30-K40).

Kvaliteta CTS18D (ISO 513 K20-K40) je posebna submikronska klasa za visoku izvedbu obrade čelika, nehrđajućeg čelika i strojne obrade. U sljedećoj tablici prikazana su kemijska svojstva ove klase.

Tablica 4. Kemijska svojstva CTS18D (ISO 513 K20-K40)

Kemijska svojstva CTS18D (ISO 513 K20-K40)	
Kobalt, [%]	9 % kao vezivo
Volfram, [%]	0,95 %
Ostali dodaci	WC ravnoteža

Kvaliteta CTS20D (ISO 513 K20-K40) je posebna submikronska klasa za univerzalnu obradu legiranih i nelegiranih čelika, legura titana i legura na bazi nikla. Poboljšana žilavost osigurava smanjeni rizik od puknuća na reznim rubovima.

Tablica 5. Kemijska svojstva CTS20D (ISO 513 K20-K40)

Kemijska svojstva CTS20D (ISO 513 K20-K40)	
Kobalt, [%]	10,3 % kao vezivo
Volfram, [%]	1,2 %
Ostali dodaci	WC ravnoteža

Kvaliteta CTS30D (ISO 513 K30-K40) je posebna submikronska klasa sa vrlo visokom žilavošću za teške uvjete obrade.

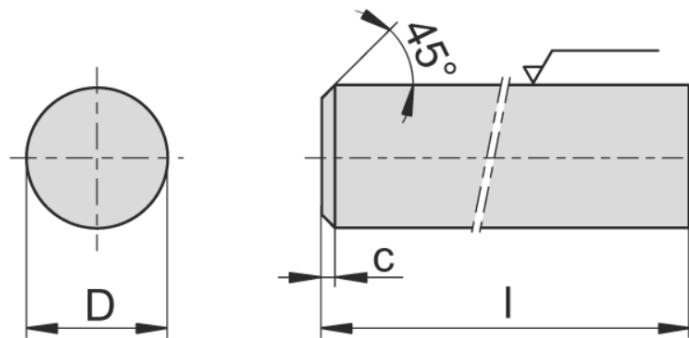
Tablica 6. Kemijska svojstva CTS30D (ISO 513 K30-K40)

Kemijska svojstva CTS30D (ISO 513 K30-K40)	
Kobalt, [%]	15 % kao vezivo
Volfram, [%]	1,65 %
Ostali dodaci	WC ravnoteža

7.2. Procesi izrade reznog alata

7.2.1. Oblik i dimenzije sirovca

Korišteni sirovci standardnih su dimenzija. Koje su prikazane u tablici. Izgled sirovca prikazan je na sljedećoj slici.



Slika 19. Standardni sirovac RGMC [12]

U sljedećoj tablici prikazane su dimenzije sirovca i njegove oznake.

Tablica 7. Standardne dimenzije sirovca [12]

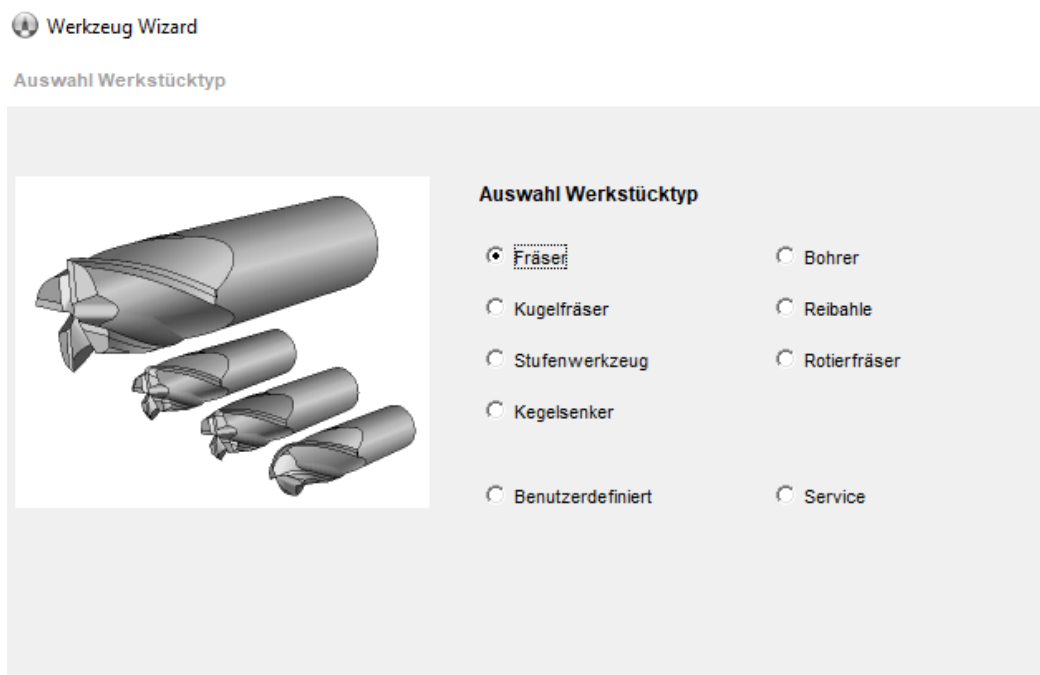
Oznake	Mjere [mm]
D - promjer	10
Tolerancijsko polje	h6
Tolerancijske granice	+0/-0.009
L - duljina	73
DIN6527	x
c - skošenje	0,8
Klasa	CTS20D

7.3. Izrada reznog alata

7.3.1. Podešavanje parametara obrade u softveru

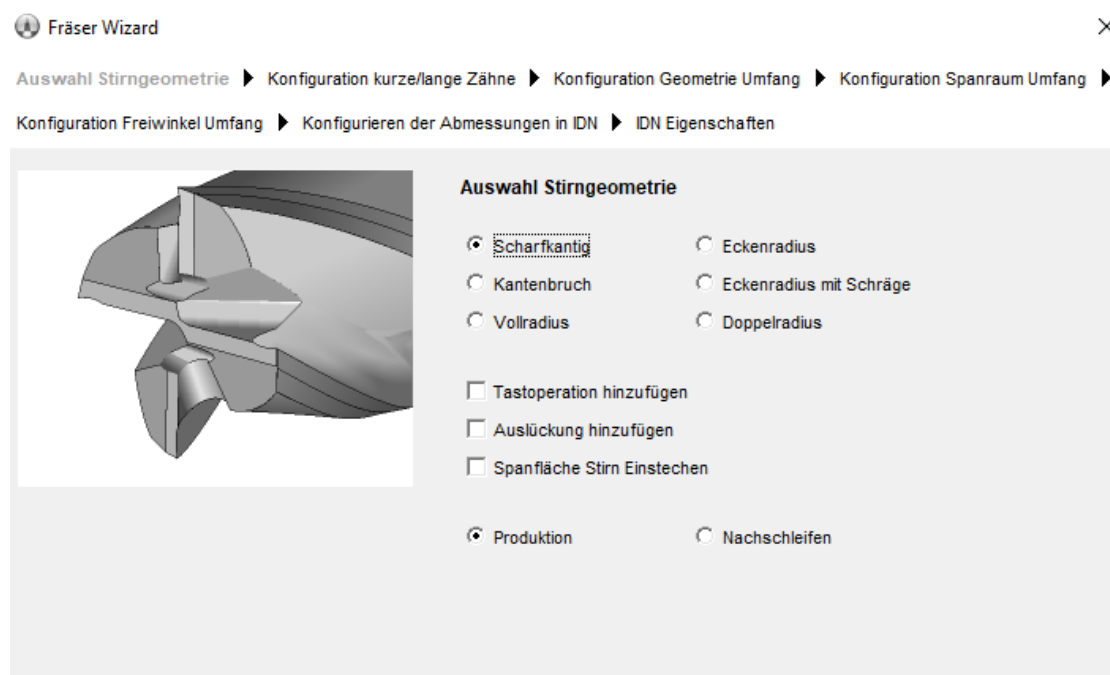
Prije samog početka izrade alata potrebno je u za to predviđenom softveru podesiti određene parametre. Softver koji se koristi zove se Helitronic tool studio. Ovaj CAD/CAM softver idealan je trenutne i buduće potrebe tržišta. Omogućuje uređivanje svih parametara alata od dizajna do proizvodnje. Koristi se za dizajn, programiranje, simulaciju i izradu rotacijski simetričnih alata i proizvodnih dijelova.

Kada se otvori softver prvi korak je odabir vrste alata. U našem slučaju to je alat za glodanje. Na sljedećoj slici prikazan je proces odabira alata.



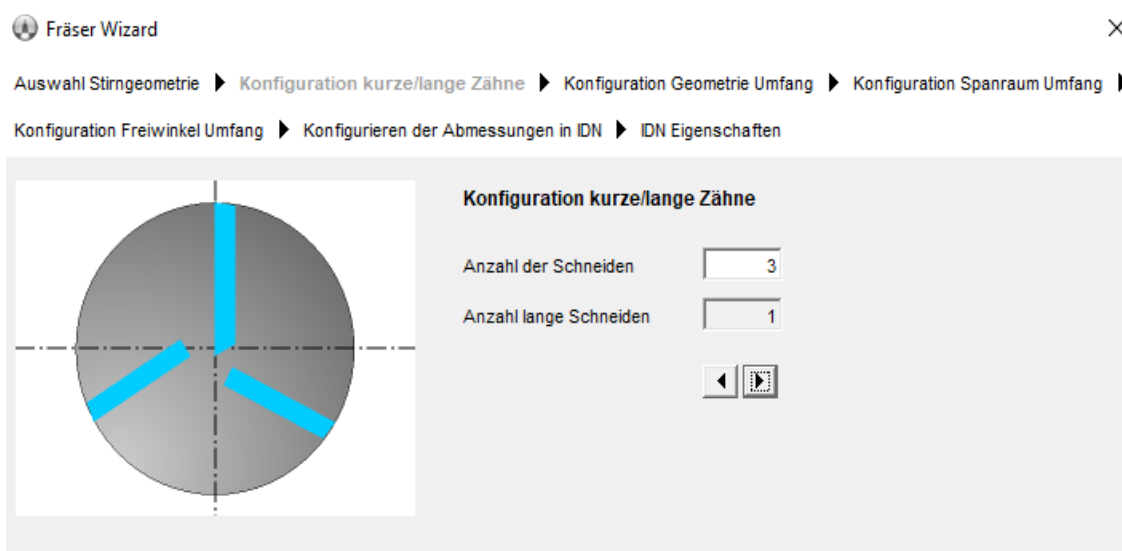
Slika 20. Biranje vrste alata

Sljedeći korak je odabir tipa čeone oštrice. Izabran je čeona oštrica oštrih rubova.



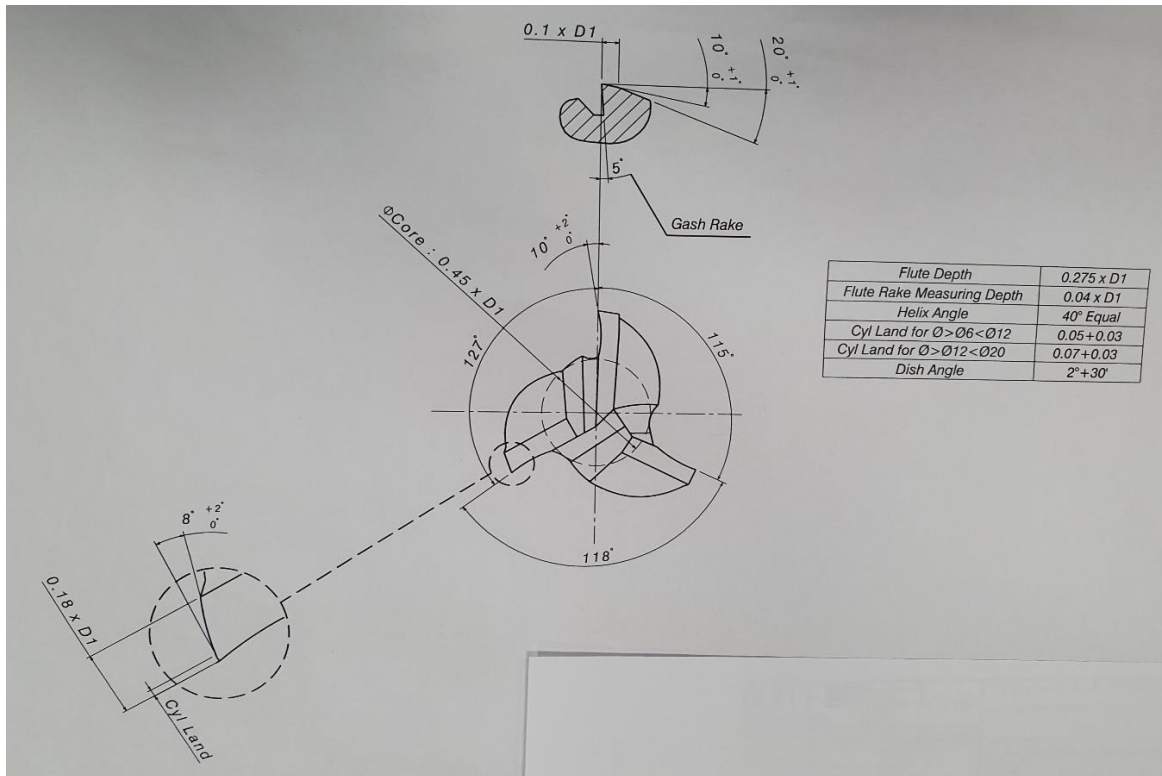
Slika 21. Odabir tipa čeone oštrice

Zatim slijedi odabir broja reznih oštrica. Broj reznih oštica ovisi o vrsti materijala koji će se obrađivati. Pošto je materijal koji se kasnije obrađuje aluminij koji je inače mekaniji, izabire se manji broj reznih oštica tako da rezni alat ima više prostora za odvojenu česticu (tj. strugotinu). U ovom slučaju je odabrani broj reznih oštrica tri.



Slika 22. Odabir broja reznih oštrica

Geometriju reznog alata postavilo se prema zadanom nacrtu reznog alata koji je već standardiziran u firmi. Geometrija ovisi o zahtjevima koji se postavljaju za određeni rezni alat. Na sljedećoj slici prikazan je nacrt sa zadanom geometrijom.



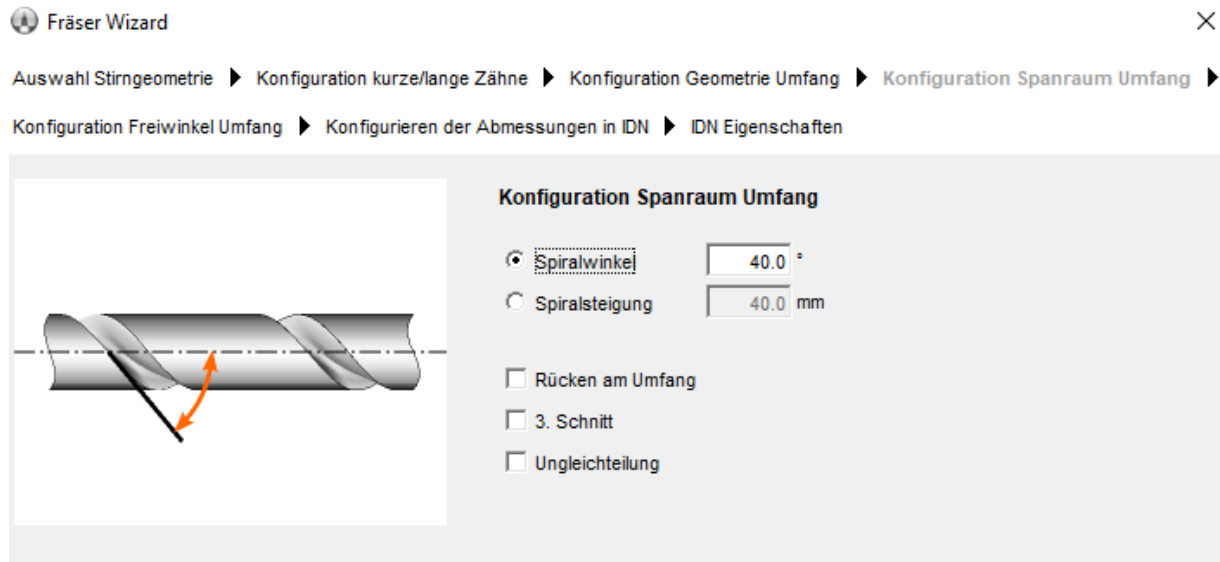
Slika 23. Nacrt reznog alata sa zadanom geometrijom

Sljedeći korak je konfiguracija geometrije promjera. Odabrana geometrija promjera je cilindrična.



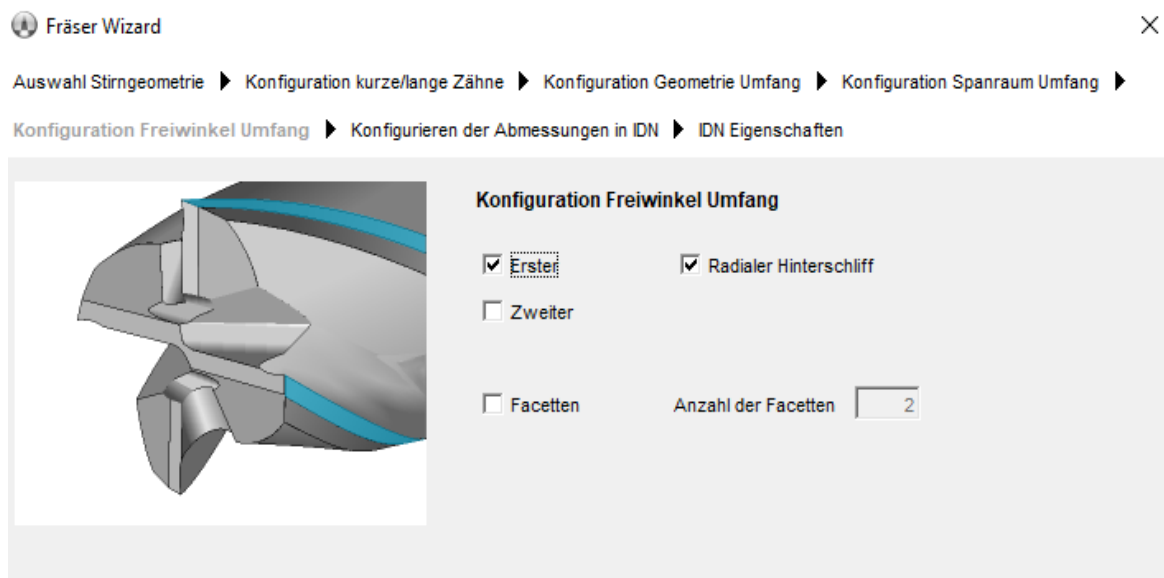
Slika 24. Konfiguracija geometrije promjera

Odabir kuta spirale je sljedeći korak. Kao što je gore navedeno kut spirale i ostala geometrija alata zadana je crtežom. Utor spirale je poliran iz razloga bolje odvodnje odvojene čestice. Što je uobičajeno kod alata za obradu aluminija.

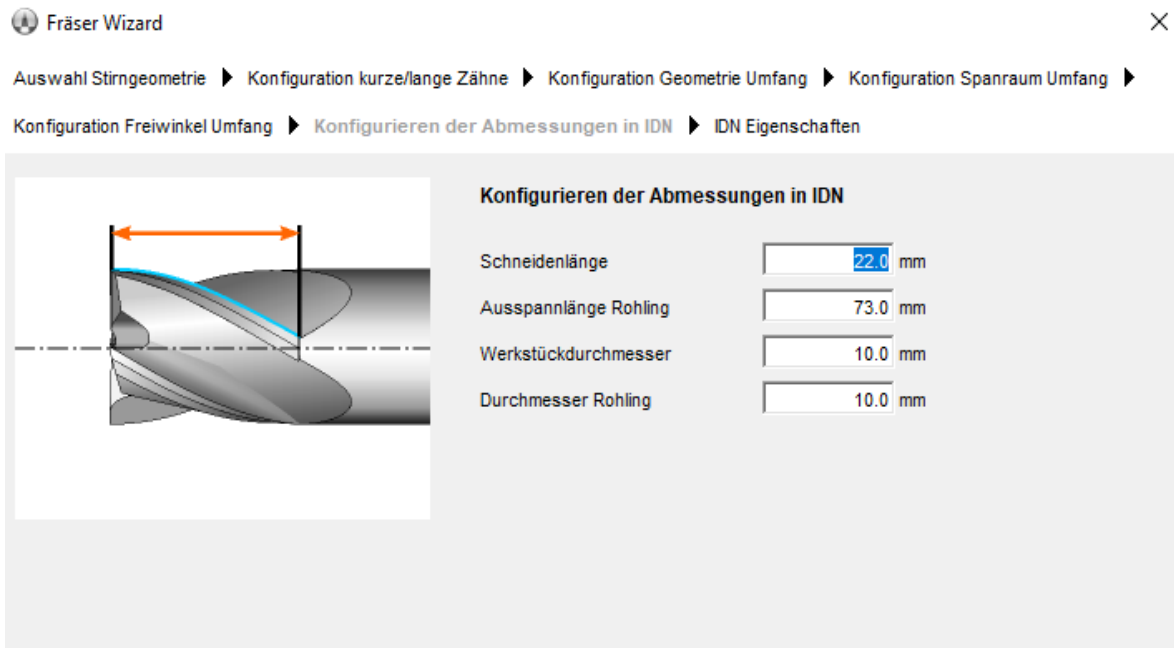


Slika 25. Odabir kuta spirale

Na sljedećim slikama prikazano je konfiguriranje promjera alata te odabir dužine i promjera reznog alata.



Slika 26. Konfiguracija promjera alata



Slika 27. Odabir dužine i promjera reznog alata

Zadnji korak je odabir smjera oštice te odabir vrste materijala. Smjer oštice je desan, u jako rijetkim slučajevima je orijentacija oštice lijeve strane. Takva orijentacija se eventualno koristi na nekim specijalnim strojevima.



Slika 28. Odabir smjera oštice i vrste materijala

Također u programu možemo vidjeti simulaciju rada obrade sirovca, od njegovog pozicioniranja, obrade, itd.

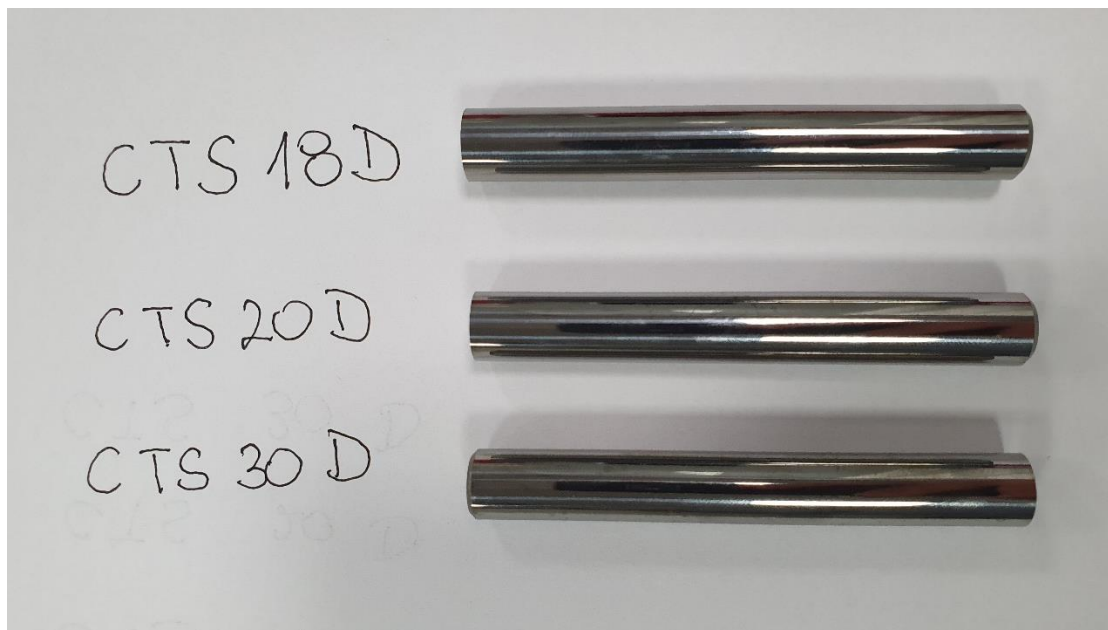
7.4. Izrada reznog alata

Nakon što su podešeni svi parametri u programu može se početi s obradom sirovca. Rezni alati izrađeni su na pet osnom CNC obradnom centru Walter HMC 400, koji je prikazan na sljedećoj slici.



Slika 29. Pet osni CNC obradni centar Walter HMC 400

Na sljedećoj slici prikazani su sirovci koji se obrađuju.



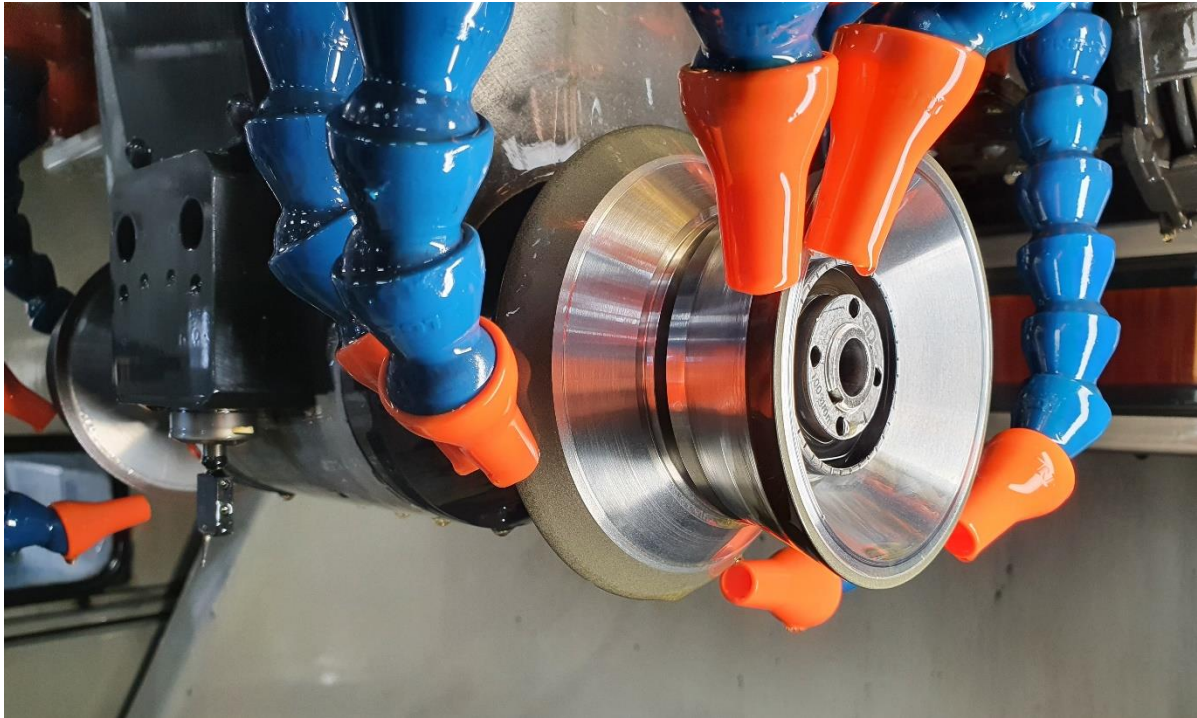
Slika 30. Sirovci za izradu reznog alata

Prvi korak je zatezanje sirovca u čeljusti te pozicioniranje sirovca prije početka obrade, kao što je prikazano na sljedećoj slici.



Slika 31. Pozicioniranje sirovca

Brusne ploče koje su korištene za izradu alata izrađene su od dijamanta. Kao što se zna dijamant je najtvrdi materijal današnjice. Dijamantne brusne ploče se uvelike razlikuju od onih klasičnih, a tehnika izrade koja uključuje upotrebu dijamanta ih čini skupljima i izdržljivijima od klasičnih. Na sljedećoj slici prikazane su korištene brusne ploče.



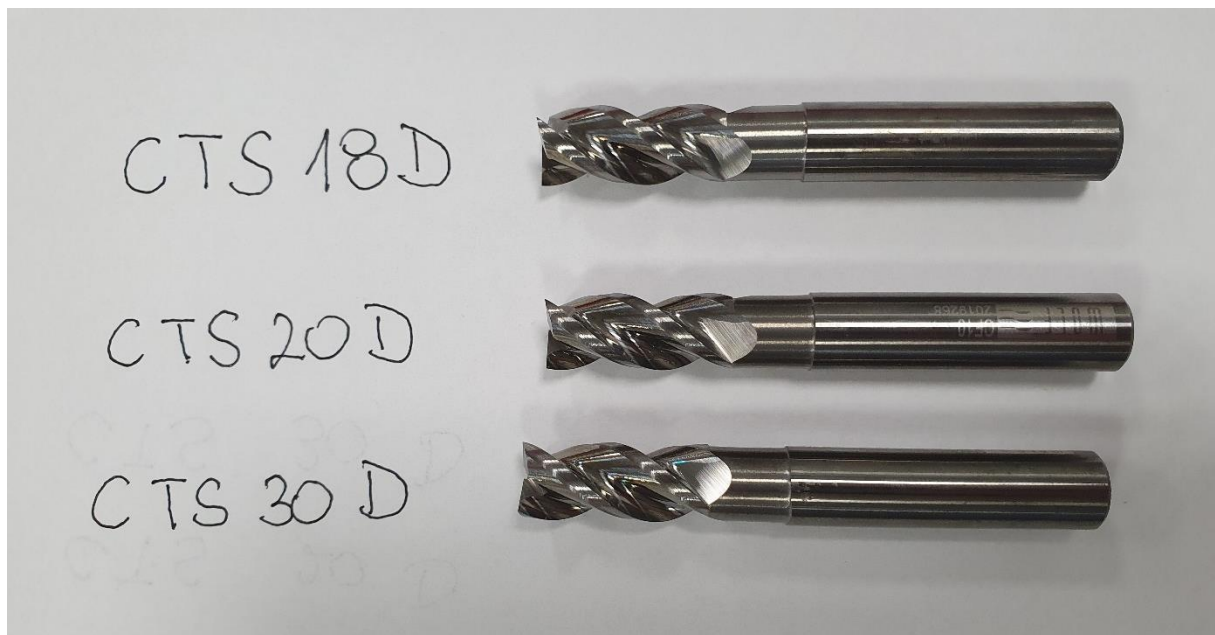
Slika 32. Korištene brusne ploče od dijamanta

Na sljedećoj slici prikazan je dobiveni rezni alat nakon završetka obrade.



Slika 33. Gotov rezni alat pri završetku obrade

Na sljedećoj slici prikazani su gotovi rezni alati.



Slika 34. Gotovi rezni alati

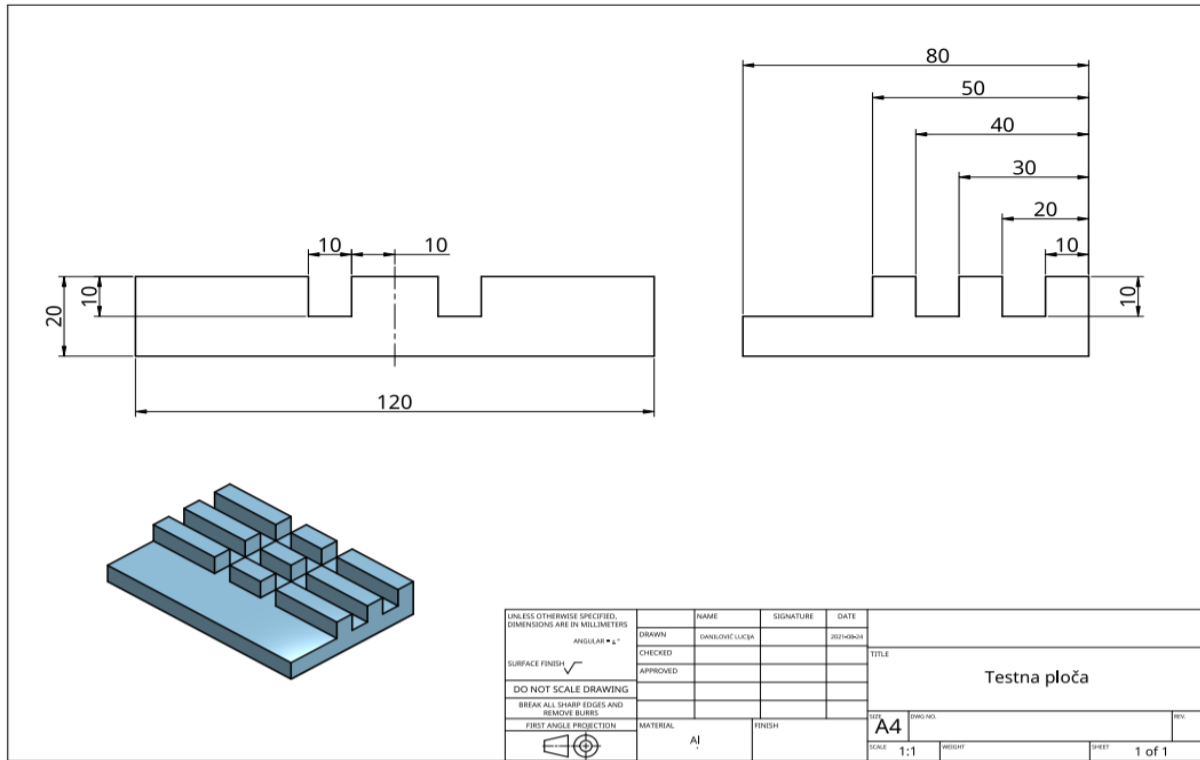
7.5. Priprema aluminijske ploče za obradu

Nakon završetka izrade reznih alata sljedeći korak je priprema testnih ploča za daljnju obradu. Dobivena svrdla koristit će se za glodanje testne ploče kako bi usporedili trošenje alata s obzirom na kemijski sastav i zadane parametre obrade. U nastavku će biti prikazana specifikacija materijala testne ploče, zadani parametri obrade te zadana putanja alata. Specifikacija materijala testne ploče koje će biti podvrgnute obradi prikazana je u sljedećoj tablici.

Tablica 8. Specifikacija testne ploče za obradu

Grupa materijala	Standardna oznaka	DIN	Vlačna čvrstoća [N/mm ²]	Tvrdoća [HB]	AISI/SAE/ASTM
Specijalne aluminijske legure	AlMgSi 0.5	3.3206	300-600	90-180	6060

Potreban G kod za glodanje testnih ploča napravljen je sa strane vanjskih suradnika tvrtke Nitech kod kojih je ispitivanje testnih ploča i napravljeno. Na sljedećoj slici prikazan je nacrt po kojem će biti zadane putanje alata.



Slika 35. Nacrt testne ploče

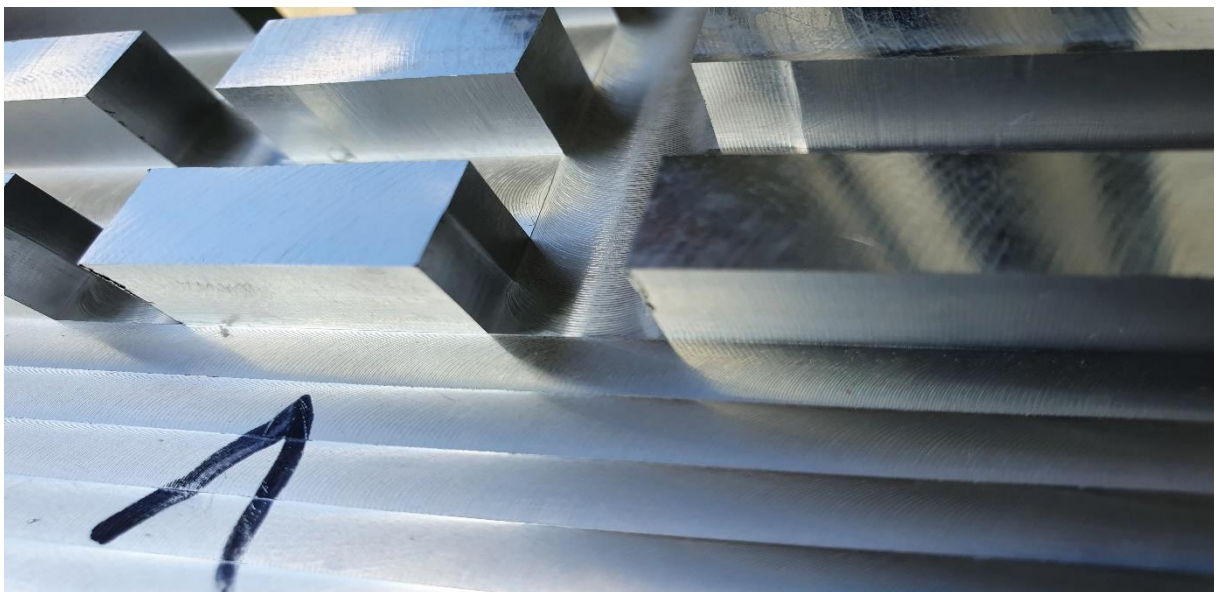
Zadani parametri obrade za testne ploče bili su sljedeći :

- Brzina rezanja $v_c=280$ m/min i
- Posmak po zubu glodala $f_z=0,1$ mm.

Definiranjem svih potrebnih parametara obrade, priprema alata i testnih ploča izvršeno je glodanje testnih ploča svrdlima od tvrdih metala.

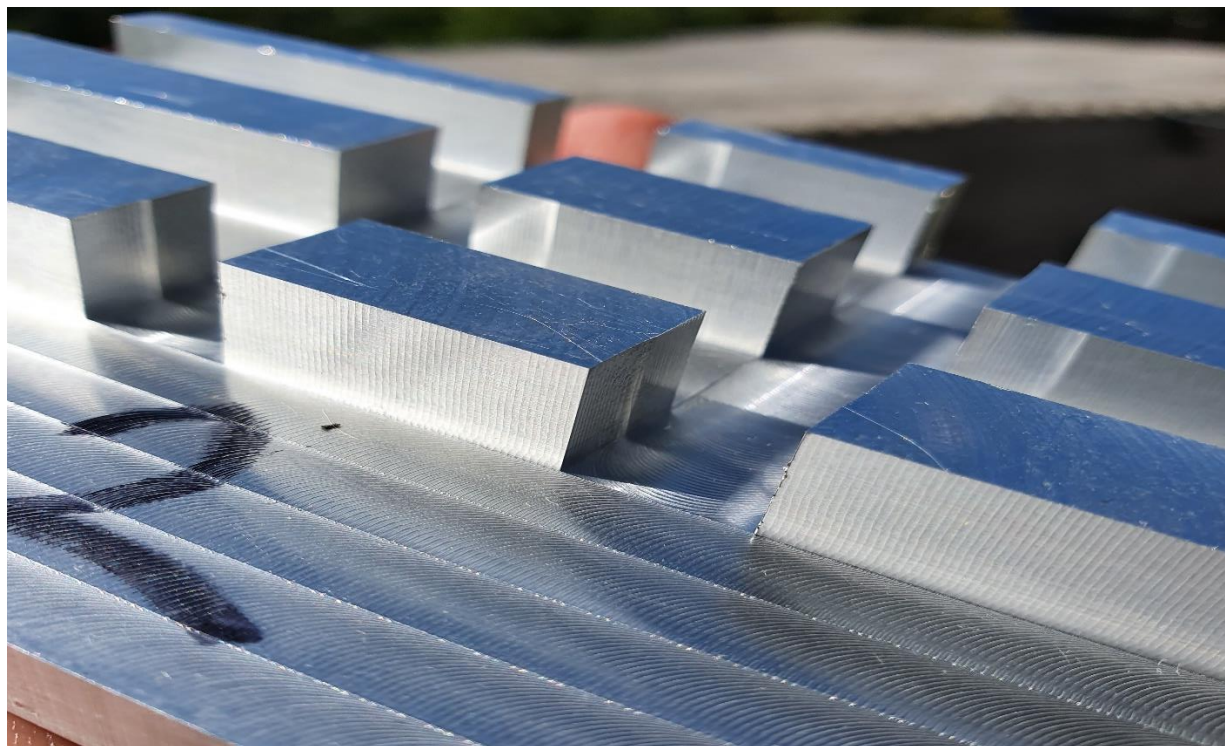
7.6. Rezultati ispitivanja

Nakon završetka obrade glodanjem usporedit će se istrošenost pojedinog reznog alata i dobivenu obrađenu površinu svake testne ploče s obzirom na to kojim je reznim alatom ispitana. Na sljedećoj slici prikazana je prva testna ploča koja je bila podvrgnuta obradi reznim alatom CTS30D.



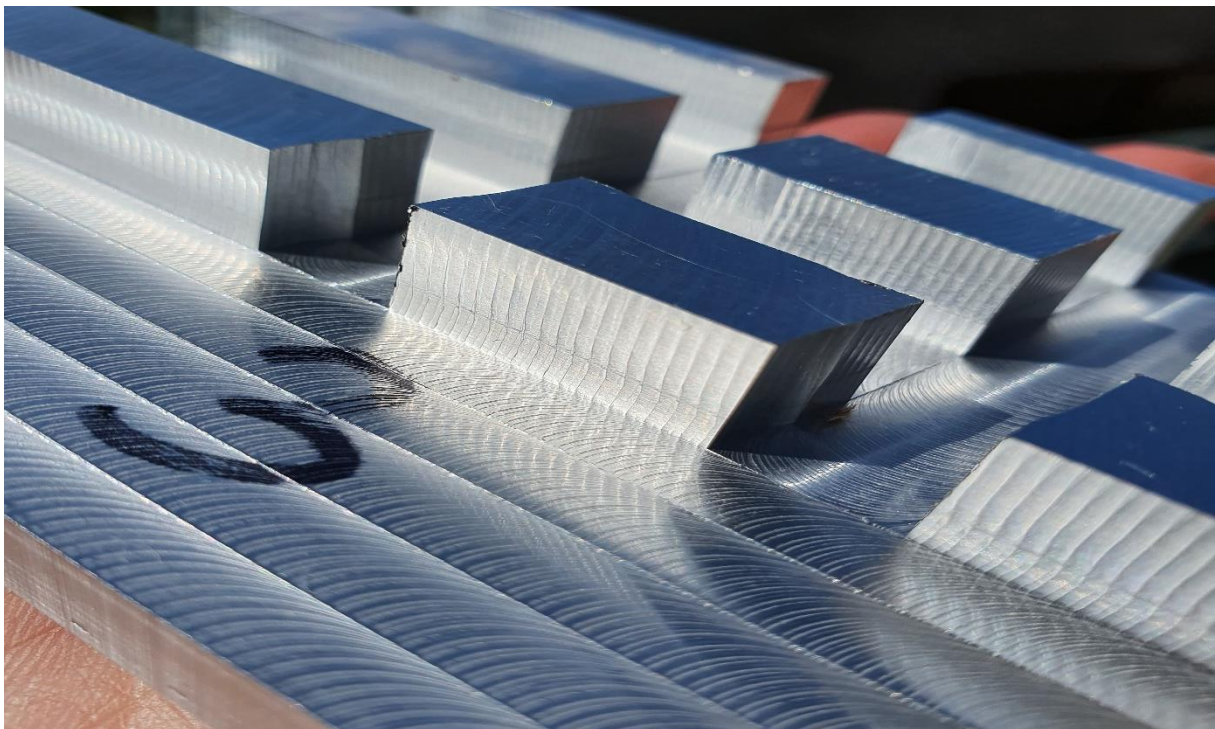
Slika 36. Testna ploča obrađena reznim alatom CTS30D

Na sljedećim slikama prikazana je druga testna ploča obrađena reznim alatom CTS20D.



Slika 37. Testna ploča obrađena reznim alatom CTS20D

Zadnja testna ploča pobrađena reznim alatom CTS18D prikazana je na sljedećim slikama.

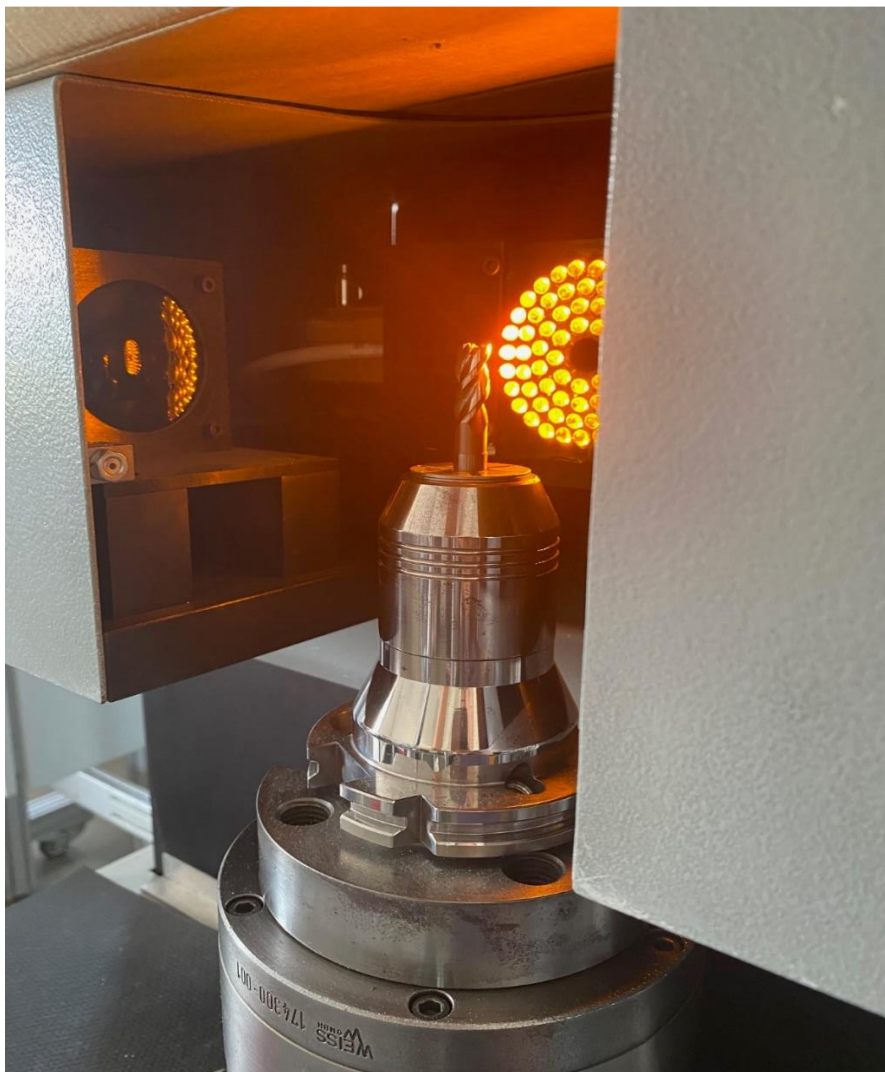


Slika 38. Testna ploča obrađena reznim alatom CTS18D

Prema priloženim slikama testiranih testnih ploča od aluminija može se vidjeti da se najfinija obrada postigla prvim reznim alatom CTS30D te da najgrublju površinu pokazuje treća testna ploča obrađena reznim alatom CTS18D.

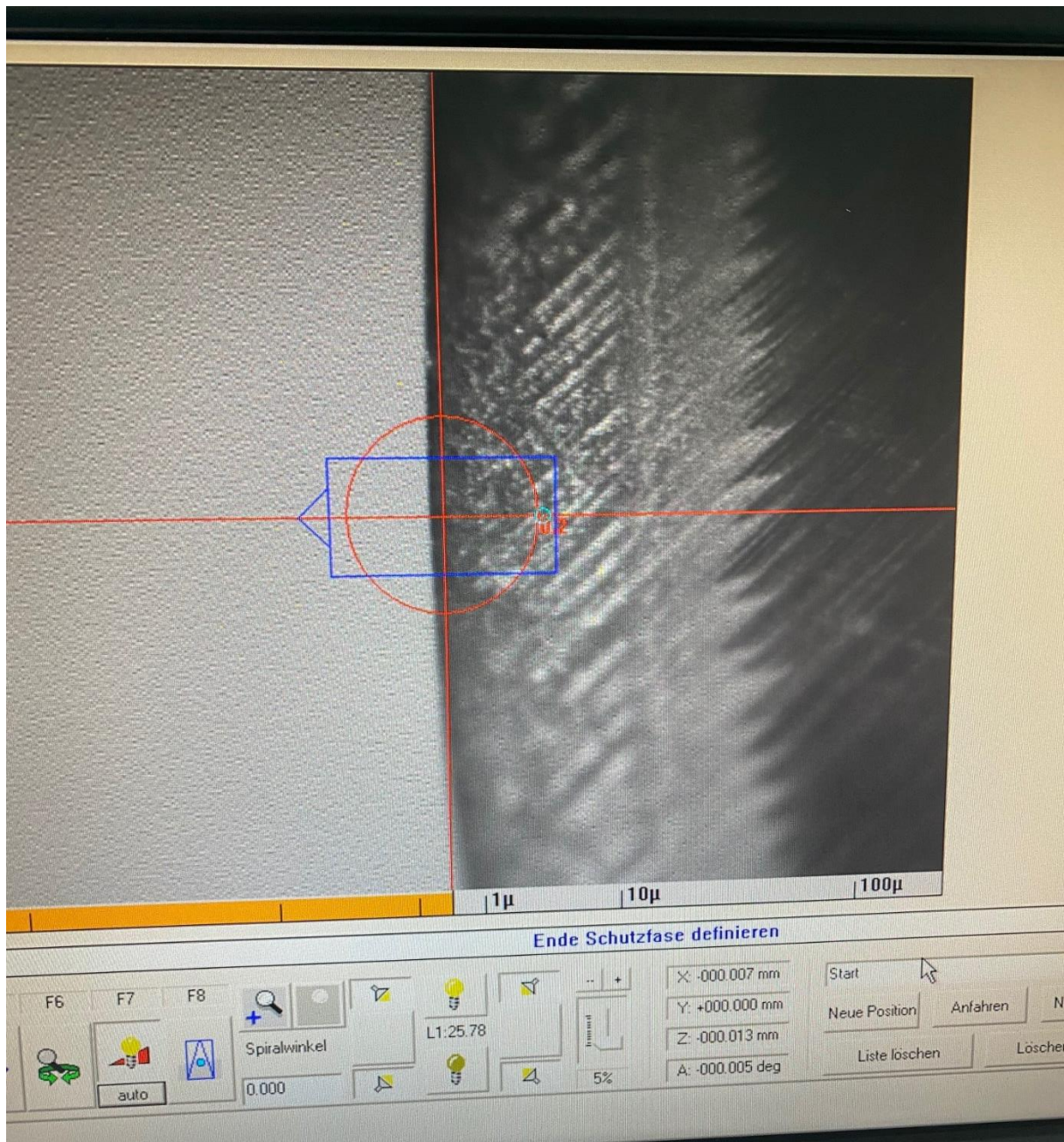
Sljedeći korak je usporedba istrošenosti pojedine oštrice reznih alata. Istrošenost reznih alata provelo se u tvrtci Nitech na uređaju VIALOG Visuelle automations-anlagen za mjerenje i izračunavanje geometrijskih parametara objekta. Uređaj sadrži osnovno tijelo, pokretni i okretni nosač za objekt, najmanje dva mobilna osjetnika za mjerenje optičke površine, najmanje dva rasvjetna uređaja dodijeljena na navedene senzore za mjerenje površine, detektore hoda i kuta raspoređene na pokretni i okretni nosač i mobilne osjetnike za mjerenje optičke površine te monitor koji se može spojiti na senzore za mjerenje površine.

Na sljedećoj slici je prikazan ispitni uzorak postavljen u uređaj za ispitivanje.



Slika 39. Rezni alat postavljen u uređaj za mjerenje i izračunavanje geometrijskih parametara

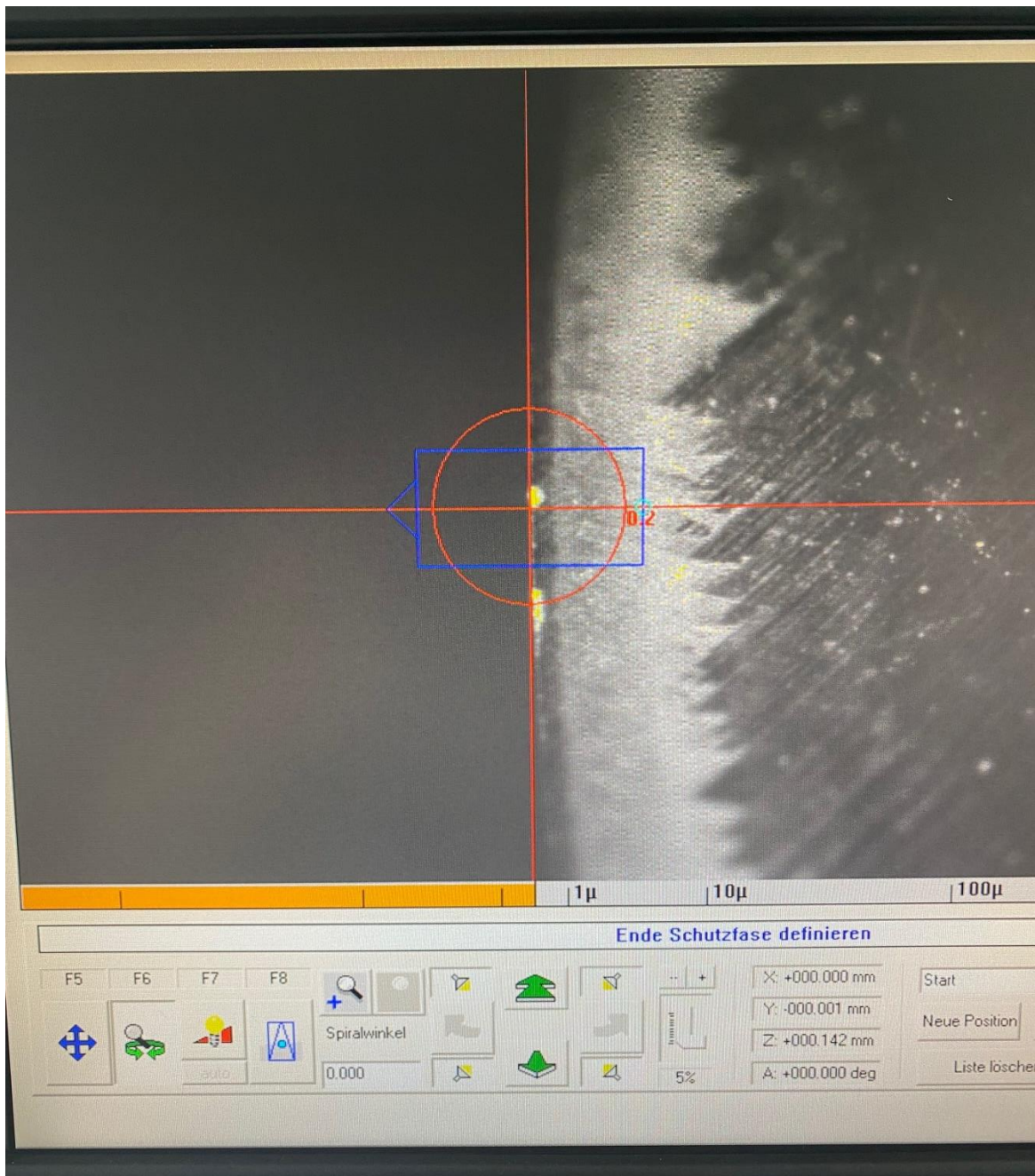
Pojedinačnim postavljanjem reznih alata u uređaj dobili smo sljedeće rezultate. Na prvoj slici prikazana je istrošenost prvog reznog alata CTS30D.



Slika 40. Istrošenost reznog alata CTS30D

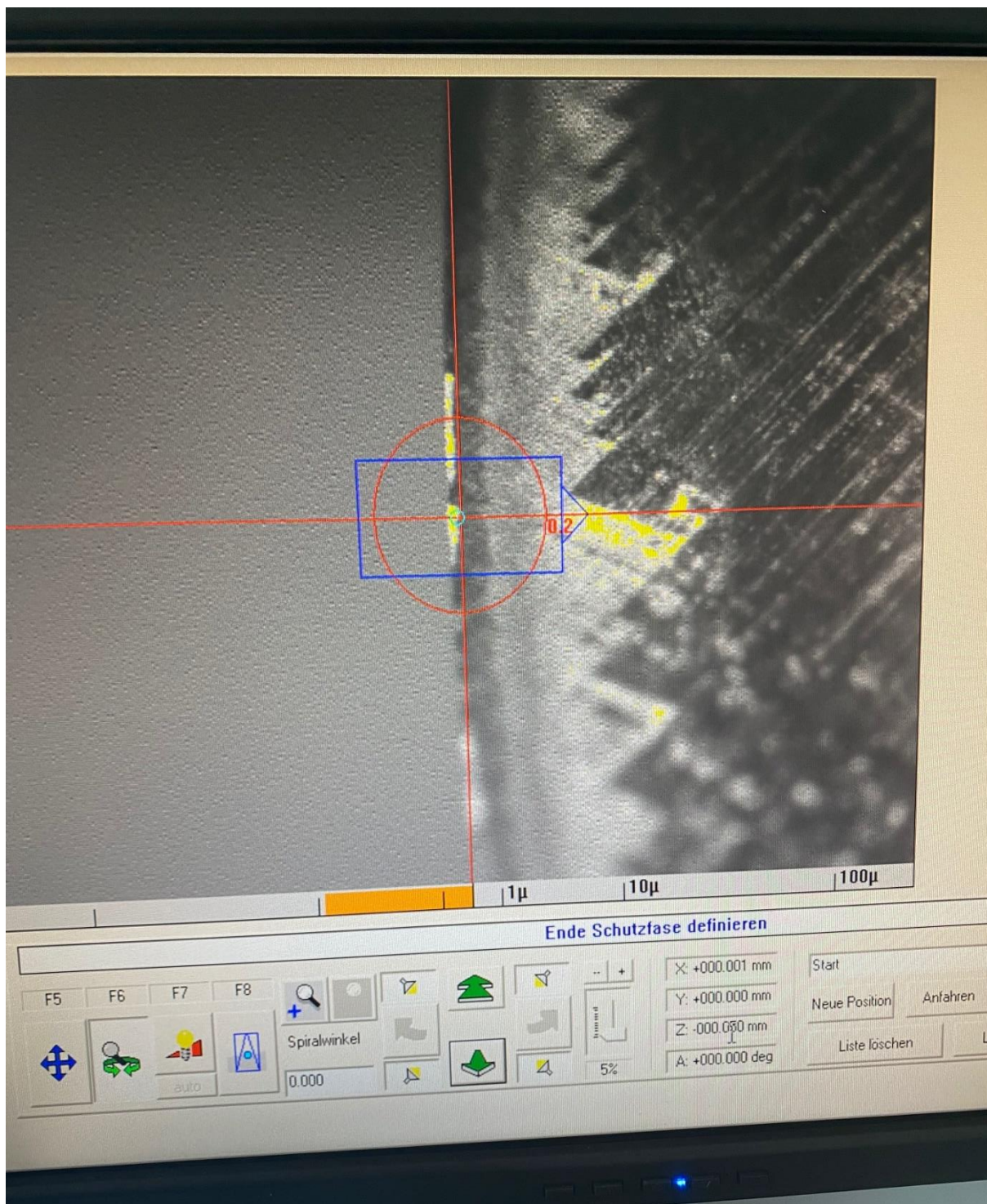
Kao što je vidljivo sa prethodne slike oštećenja na prvom reznom alatu gotovo ni nema.

Na sljedećoj slici prikazana je istrošenost reznog alata CTS20D.



Slika 41. Istrošenost reznog alata CTS20D

Može se uočiti kako je istrošenost drugog reznog alata također minimalna.



Slika 42. Istrošenost reznog alata CTS 18D

Na ovoj slici može se uočiti veću istrošenost alata naspram prve dvije slike.

7.7. Analiza dobivenih rezultata ispitivanja

Kao što se zna mikrostruktura je izuzetno bitna iz razloga što određuje mehanička svojstva materijala. U postupku izrade različiti parametri imaju izravan utjecaj na dobivenu mikrostrukturu.

Kroz eksperimentalni dio pokazalo se kako kvaliteta materijala i njegova granulacija utječu na kvalitetu dobivene obrađene površine, te na samo trošenje alata.

Vidljivo je kako se rezni alat CTS30D pokazao kao najkvalitetnija vrsta sirovine. Dobivena obrađena površina pokazala se kao najfinija, te se alat pokazao trajnim i otpornim na trošenje prilikom obrade. Istrošnost reznog alata je kao što je vidljivo sa slike 40. minimalna. Rezni alat CTS18D pokazao se najmanje trajnim i otpornim na trošenje prilikom obrade. Nakon njega je rezni alat CTS20D koji je pokazao nešto bolje kvalitete te je trajnost alata prilikom obrade duža.

8. Zaključak

Nakon provedenog eksperimentalnog dijela te na temelju proučene literature može se reći da tvrdi metali imaju vrlo dobra svojstva kao što su: visoka tvrdoća, visoka toplinska i električna vodljivost, visoka otpornost na trošenje, otpornost na koroziju itd. Zbog svojih dobrih svojstva imaju široko područje primjene od izrade reznih alata do dijelova strojeva, alata za probijanje itd.

Iz provedenog eksperimentalnog dijela zaključilo se kako kvaliteta obrađene površine te trajnost i trošenje alata ovise o kvaliteti materijala njegove granulacije. Alat CTS18D pokazao se najmanje trajnim i otpornim na trošenje. Alat CTS18D kvalitete uglavnom se koristi za obradu čelika, nehrđajućeg čelika i teško strojnih materijala (npr. titana).

Dok se alat CTS20D koristi za univerzalnu obradu legiranih i nelegiranih čelika, legura titana i legura na bazi nikla. Poboljšana žilavost osigurava smanjeni rizik od puknuća na reznim rubovima. Ovaj alat je pokazao nešto bolje kvalitete prilikom obrade.

Razlog zbog kojega se alat CTS30D pokazao najboljim bi bila njegova kvaliteta materijala najfinije granulacije koja je ujedno i vrlo visoke žilavosti te je predviđena za teže uvjete obrade gdje se obrađuju zahtjevniji i žilaviji materijali.

Literatura

- [1] VUKA – Tihana Kostadin, Interna skripta iz kolegija „Nemetalni i kompozitni materijali“
- [2] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [3] D. Ćorić: Posebni metalni materijali – III dio, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [4] Mikado H., Ishira S., Oguma N., Kawamura S., On the Short Surface Fatigue Crack Growth Behavior in a Fine-Grained WC-Co Cemented Carbide, Metals, 2017.
- [5] T. Aleksandrov Fabijanić; Razvoj referentnih pločica tvrdoće po Vickersu postupkom metalurgije praha; Doktorski rad; FSB; Zagreb; 2014.
- [6] Sandvik Hard Materials, Understanding Cemented Carbide
- [7] LJ. Slokar; Metalurgija praha i sinter materijali; Metalurški fakultet; Sisak; 2015.
- [8] M. Mitkov, D. Božić, V. Vujović; Metalurgija praha, BMG, Beograd; 1998.
- [9] M. Gojić, Površinska obradba materijala, Sisak: Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2010.
- [10] D. Krumes, Toplinska obradba, Slavonski Brod: Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, 2000.
- [11] V. Leskovšek, B. Podgornik, M. Jenko; Wear, A PACVD coating for hot-forging applications; Institute of metal and technology, Ljubljana 2009, str 453-460.
- [12] <https://e-techstore.com/EN/product/rods-p-line/end-mill-blanks/rgmc/rgmc-1000-073-cts20d%2011769718>
- [12] Udiljak T. , Oblikovanje deformiranjem i obrada odvajanjem čestica
- [13] Šavar Š.: Obrada odvajanjem čestica II dio, FSB Zagreb, 1990.
- [14] Nedić B. , Lazić M : Proizvodne tehnologije – Obrada metala rezanjem, predavanja, Mašinski fakultet, Kragujevac