

Primjena tvrdih metala za izradu mlaznica za vodeno rezanje

Biljman, Danijel

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka / Sveučilište u Rijeci**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:231:026880>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-19**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka University Studies, Centers and Services - RICENT Repository](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
Studij politehnike
Diplomski sveučilišni studij politehnike i informatike

Diplomski rad
PRIMJENA TVRDIH METALA ZA IZRADU MLAZNICA ZA
VODENO REZANJE

Rijeka, ožujak, 2022.

Danijel Biljman

SVEUČILIŠTE U RIJECI
Studij politehnike
Diplomski sveučilišni studij politehnike i informatike

Diplomski rad
PRIMJENA TVRDIH METALA ZA IZRADU MLAZNICA ZA
VODENO REZANJE

Mentor: doc. dr. sc. Mateja Šnajdar Musa, mag.ing.mech

Zadatak za diplomski rad

Pristupnik: Danijel Biljman

Naziv diplomskog rada: Primjena tvrdih metala za izradu mlaznica za vodeno rezanje

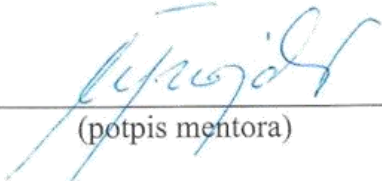
Naziv diplomskog rada na eng. jeziku: Cemented carbides as water-jet nozzle material

Sadržaj zadatka:

Napraviti pregled literature i opisati ukratko razvoj tvrdih metala, te njihovih svojstava sa naglaskom na volfram-karbid tvrde metale. Analizirati ključne karakteristike tehnologije proizvodnje tvrdih metala te analizirati različite tipove veziva koji se koriste za izradu WC tvrdih metala u široj primjeni. Usporediti svojstva, strukture i sastav različitih WC/vezivo sustava s naglaskom na postizive tvrdoće, otpornost na trošenje te kemijsku postojanost. Opisati osnove tehnologije rezanja vodenim mlazom te karakteristike materijala nužnih da bi se mogli koristiti u proizvodnji mlaznica. Opisati geometriju mlaznica za vodeno rezanje te ju povezati sa načinom proizvodnje. Navesti prednosti i nedostatke u odnosu na tradicionalne materijale mlaznica.

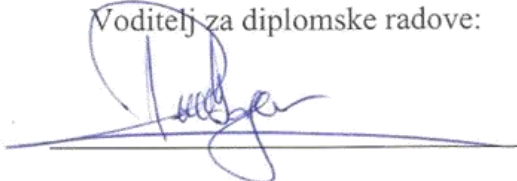
U završnom zadatku treba slijediti **Upute o izradi diplomskog rada.**

Mentor: Doc. dr.sc. Mateja Šnajdar Musa



(potpis mentora)

Voditelj za diplomske radove:



Zadatak preuzet:

SADRŽAJ

| | |
|--|-----|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | III |
| POPIS TABLICA | IV |
| SAŽETAK | V |
| SUMMARY | VI |
| 1. UVOD | 1 |
| 2. Razvoj tvrdih metala | 2 |
| 3. Volfram karbid (WC) | 4 |
| 3.1. Sinteza WC tvrdih metala | 5 |
| 3.2. Kemijska svojstva | 5 |
| 3.3. Fizička svojstva | 6 |
| 3.4. Struktura | 7 |
| 4. Proizvodnja tvrdih metala | 9 |
| 4.1. Vezivna sredstva | 11 |
| 5. WC-Co sustavi | 12 |
| 5.1. Youngov modul elastičnosti | 12 |
| 5.2. Modul smicanja | 13 |
| 5.3. Poissonov omjer | 13 |
| 5.4. Istezanje | 14 |
| 5.5. Tvrdoća | 14 |
| 6. WC-Ni sustavi | 16 |
| 6.1. Gustoća | 16 |
| 6.2. Tvrdoća i lomna žilavost | 17 |
| 6.3. Savojna čvrstoća | 18 |
| 7. WC-Fe sustavi | 20 |
| 7.1. Eta faza | 20 |
| 7.2. Tvrdoća | 21 |
| 7.3. Žilavost | 22 |
| 7.4. Otpornost na koroziju | 23 |
| 8. Rezanje vodenim mlazom (Water-Jet) | 24 |
| 8.1. Princip rada | 24 |
| 8.2. Prvi urez | 25 |
| 8.3. Sužavanje u širini reza | 26 |
| 8.4. Tlačenje vode | 27 |
| 8.5. Visokotlačne cijevi | 28 |
| 8.6. Glava za rezanje vodenim mlazom | 28 |
| 8.7. Rezanje čistim vodenim mlazom | 29 |
| 8.8. Rezanje vodenim mlazom s abrazivnim sredstvom | 30 |

| | |
|--|----|
| 9. Mlaznice | 32 |
| 9.1. Vrste mlaznica | 32 |
| 9.2. Geometrija mlaznica | 32 |
| 9.3. Trošenje mlaznica | 33 |
| 10. Metodički dio | 36 |
| 10.1. Analiza nastavnog programa srednje strukovne škole u sadržaju teme | 36 |
| 10.2. Reducirani nastavni program | 37 |
| 10.3. Priprema za nastavu | 40 |
| 11. ZAKLJUČAK | 47 |
| LITERATURA | 48 |
| PRILOZI | 50 |

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 1. α -volfram karbid u jediničnoj ćeliji [4]..... | 4 |
| Slika 2. α -WC struktura [7]..... | 8 |
| Slika 3. Faze sinteriranja [10] | 10 |
| Slika 4. Youngov modul elastičnosti WC-Co tvrdog metala [12] | 12 |
| Slika 5. Modul smicanja WC-Co [13]..... | 13 |
| Slika 6. Poissonov omjer WC-Co [14] | 14 |
| Slika 7. Tvrdća WC-Co [14]..... | 15 |
| Slika 8. Naprezanje WC-Co [14] | 15 |
| Slika 9. Gustća WC-Ni [16]..... | 17 |
| Slika 10. Tvrdća i otpornost na lom WC-Ni [17]..... | 18 |
| Slika 11. Savojna čvrstoća WC-Ni [17] | 19 |
| Slika 12. Vertikalni presjek Fe–W–C faznog dijagrama [18]..... | 21 |
| Slika 13. Tvrdća WC-Fe [18]..... | 21 |
| Slika 14. Detalji otiska u različitim zonama [19]..... | 22 |
| Slika 15. Vickers tvrdća i lomna žilavost WC-Fe [19] | 23 |
| Slika 16. Prikaz širine rezanja vodenim mlazom [21]..... | 25 |
| Slika 17. proces prvog reza [21]..... | 26 |
| Slika 18. vrste suženja kod rezanja vodenim mlazom [21] | 27 |
| Slika 19. linearna pumpa s pojačivačem [22] | 27 |
| Slika 20. rotacijska pumpa [22] | 28 |
| Slika 21. visokotlačno termoplastično crijevo [22]..... | 28 |
| Slika 22. Rezne glave [22]..... | 29 |
| Slika 23. sastavni dijelovi čistog vodenog mlaza [22] | 30 |
| Slika 24. sastavni dijelovi vodenog rezanja s abrazivom [22] | 31 |
| Slika 25. vrste mlaznica a) kontinuirana mlaznica b) diskontinuirana mlaznica sa safirnim umetkom [23]..... | 33 |
| Slika 26. utjecaj uzvodnih uvjeta na izvedbu mlaznica [24] | 33 |
| Slika 27. Oštećenja mlaznica [24]..... | 34 |
| Slika 28. Stadiji trošenja mlaznice [24]..... | 35 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Svojstva WC-a [6]..... | 7 |
| Tablica 2. Svojstva WC–Ni [16] | 17 |
| Tablica 3. Preporučeni materijali mlaznica ovisno o uvjetima rada [24] | 34 |
| Tablica 4. Učinci kvalitete vode na vijek trajanja mlaznice [25]..... | 35 |
| Tablica 5. Utjecaj veličine filtera na vijek trajanja mlaznice [25] | 35 |
| Tablica 6. Nastavni program predmeta Tehnički materijali za 1. razred [26] | 37 |

SAŽETAK

Tvrđi metali odnosno karbidi imaju veoma široku primjenu pri izradi strojnih dijelova koji moraju posjedovati izuzetno sjajna svojstva poput: žilavosti, tvrdoće, otpornosti na koroziju itd.

Važno je istaknuti da trenutačno najveći udio zauzimaju volfram karbidi na bazi kobalta kao vezivnog sredstva. Suvremena istraživanja pokušavaju u proizvodnju implementirati alternativna vezivna sredstva na bazi nikla, željeza i ostalih željeznih legura.

Mlaznice za vodeno rezanje su izložene iznimno visokim tlakovima i brzinama, stoga se u takvim uvjetima za njihovu izradu koriste tvrdi metali koji ispunjavaju tražena svojstva. U ovom radu prikazan je razvoj i proizvodnja tvrdih metala, različita vezivna sredstva tvrdih metala, različiti WC sustavi te njihova mehanička svojstva i primjena. U radu su analizirana različita vezivna sredstva tvrdih metala. Također je prikazana implementacija tvrdih metala u postupku rezanja vodenim mlazom, režimi obrade, te važna funkcija mlaznica.

Ključne riječi: tvrdi metali, WC-Co, WC, mlaznice, vodeno rezanje

SUMMARY

Hard metals, i.e. carbides, are widely used in the production of machine parts, which must have excellent properties such as toughness, hardness, corrosion resistance, etc.

It is important to point out that currently the largest share is occupied by tungsten carbides based on cobalt as a binding agent. Contemporary research is trying to implement alternative binders based on nickel, iron and other iron alloys into production.

Nozzles for water cutting are exposed to extremely high pressures and speeds, therefore, in such conditions, hard metals that meet the required properties are used for their production.

This paper presents the development and production of hard metals, various hard metal binders, different WC systems, and their mechanical properties and application. In the paper, different binders of hard metals were analyzed. The implementation of hard metals in the waterjet cutting process, processing regimes, and the important function of nozzles are also presented.

Keywords: hard metals, WC-Co, WC, nozzles, water cutting

1. UVOD

Tvrđi metali odnosno volfram karbidi na bazi kobalta (WC-Co) imaju veoma široku primjenu u globalnoj industriji za dijelove koji moraju posjedovati izuzetna svojstva tvrdoće, žilavosti, otpornosti na trošenje, koroziju itd.

U ovom diplomskom radu u 2. poglavlju analizira se razvoj tvrdih metala od njegovog patentiranja do suvremenog doba. U 3. poglavlju se analizira sinteza, struktura, kemijska i fizikalna svojstva volfram karbida (WC). 4. poglavlje se bavi prikazom proizvodnje tvrdih metala. U 5., 6. i 7. poglavlju analiziraju se različita veziva WC-a poput Co, Ni i Fe, njihova svojstva implementacija i mogućnosti optimizacije u budućnosti. U 8. poglavlju se opisuje postupak vodenog rezanja, svojstva obrade, sastavni dijelovi procesa itd. U 9. poglavlju se analiziraju svojstva i geometrije mlaznica za vodeno rezanje.

2. Razvoj tvrdih metala

Impresivna povijest i razvoj tvrdih metala započinje potragom odgovarajućeg i jeftinijeg materijala za izradu kalupa za izvlačenje od nepropusnog volframa (NS-W). Cjelokupni razvoj i istraživanje započinje nakon Prvog svjetskog rata [1].

Važno je istaknuti da je OSRAM R&D korporacija kroz različita istraživanja pokušala smanjiti krtost čistog volfram karbida (WC-a) dodavanjem najprije nikla, a ubrzo potom i dodavanjem kobalta čija je implementacija rezultirala krajnje uspješnim rezultatom. Evidentno je da ovakvi projekti usmjereni na pronalaženje rješenja za određeni problem mogu neočekivano dovesti do mnogo važnije primjene i rezultata jer je u konačnici došlo do stvaranja prvih tvrdih metala.

Klasični tvrdi metal izumljen je u korporaciji OSRAM u Berlinu, dok je sam patent izdan 1923. godine. Budući da nitko u OSRAM-u nije shvaćao značaj ovakve inovacije patent je ponuđen i prodan korporaciji Krupp uz čiji angažman je upravo i došlo do razvijanja proizvodne tehnologije, te proizvodnje tvrdih metala. Proizvodnja tvrdih metala u korporaciji Krupp doživjela je eksponencijalni rast u prije i poslije ratnom razdoblju (1935.-1945.) s početnom proizvodnjom od cca. 30 tona godišnje do čak 500 tona godišnje.

Daljnji razvoj tvrdih metala karakteriziraju druge kombinacije karbida i veziva. Metali na bazi titan karbida (TiC) ostvarili su veliki napredak u strojnoj obradi čelika uz fino zrnate tvrde metale koji su posjedovali široki spektar primjene. Tehnologije prevlačenja uvelike su povećale otpornost tvrdih metala na trošenje. S rastućom tendencijom automatizacije u obradi metala dolazi do stvaranja izmjenjivih pločica s prilično složenom geometrijom, koje su razvijene i integrirane na tokarilicama i glodalicama s računalnim numeričkim upravljanjem (CNC).

Tehnologije prevlačenja kemijskim taloženjem iz pare (CVD) i fizičkim taloženjem iz pare (PVD) uvelike su povećale otpornost tvrdih metala na habanje. Premaz višeslojnog aluminijevog oksida i dijamanta je integriran kao kompaktni nemetalni tvrdi materijali, neki od takvih materijala su kubični borov nitrid i oksid nitrid keramike.

Nakon razdoblja od gotovo 90 godina cementni karbidi su od privremenog rješenja u industriji u kojoj su primarno služili kao zamjena za dijamant u industriji rasvjete, napredovali do vrlo uspješnog i gotovo nezamjenjivog materijala u proizvodnoj industriji. Važno je istaknuti da tvrdi metali posjeduju vrlo zadovoljavajuća i izuzetna tehnološka svojstva, te da čine 36% globalne proizvodnje metalurgije praha [1].

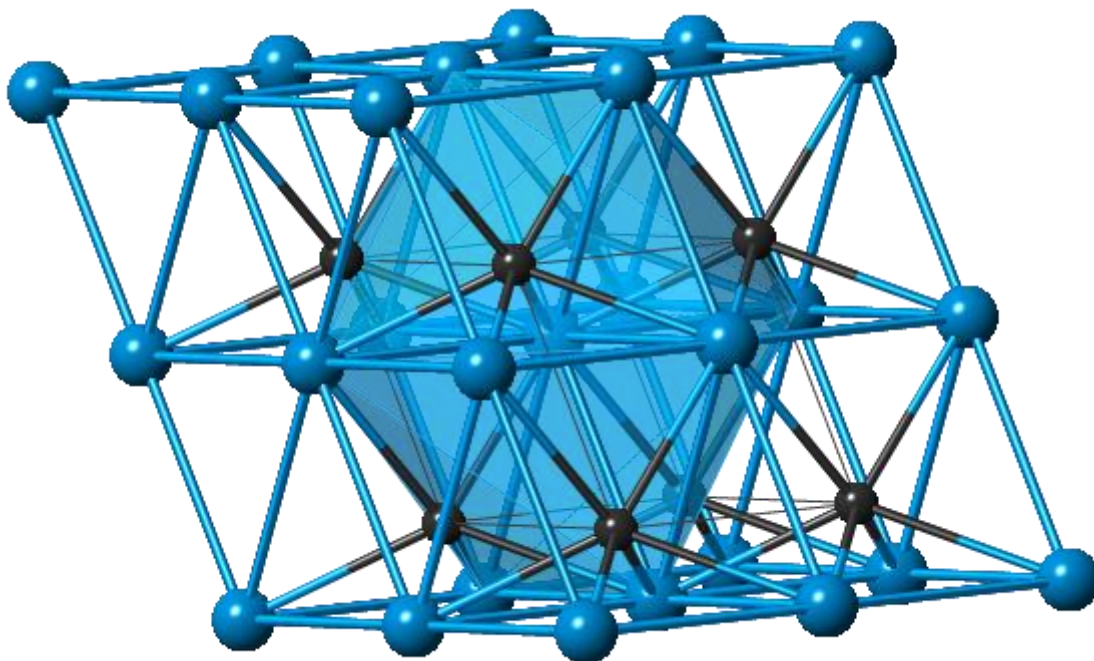
Zapanjujuća je činjenica da su istraživanja tvrdih metala od samog početka optimalno odabirala kombinaciju volfram karbida (WC) i kobalta (Co) jer danas u suvremeno doba 90 godina kasnije od navedenih prvih istraživanja nije pronađena bolja kombinacija tvrdog karbida i metalnog veziva [2].

3. Volfram karbid (WC)

Volfram karbid (WC) je kemijski spoj odnosno karbid koji sadrži jednake dijelove atoma volframa i ugljika. U svom najosnovnijem obliku volfram karbid je fini sivi prah, ali se može prešati i oblikovati u oblike sinteriranjem radi implementacije u industrijskim strojevima, alatima za rezanje, dlijetima, abrazivima, granatama za probijanje oklopa i nakitu [3].

Volfram karbid je otprilike dvostruko čvršći od čelika s Youngovim modulom od približno 530 do 700 GPa, te posjeduje dvostruko veću gustoću od čelika, odnosno nalazi se gotovo na sredini između gustoće olova i zlata.

Usporediv je s korundom ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) po tvrdoći i može se dorađivati samo abrazivima vrhunske tvrdoće kao što su: kubni bor nitrid i dijamanтни prah. Na slici 1 je prikazan WC u jediničnoj ćeliji [4].



Slika 1. α -volfram karbid u jediničnoj ćeliji [4]

3.1. Sinteza WC tvrdih metala

WC se stvara reakcijom metalnog volframa i ugljika na temperaturi između 1400°C –2000 °C. Ostale metode uključuju proces s fluidiziranim slojem niže temperature koji reagira ili na volfram ili plavi WO₃ sa smjesom CO/CO₂ i H₂ između 900°C i 1200 °C.

WC se također može proizvesti zagrijavanjem WO₃ sa grafitom izravno na 900 °C ili u vodikom na 670 °C nakon čega slijedi karburizacija u argonu na 1000 °C. Metode kemijskog taloženja iz pare uključuju:

- reakciju volframovog heksaklorida s vodikom (kao redukcijskim sredstvom) i metanom (kao izvorom ugljika) na 670 °C (943 K)



- reakciju volframovog heksafluorida s vodikom (kao redukcijskim sredstvom) i metanolom (kao izvorom ugljika) na 350 °C (623 K)



3.2. Kemijska svojstva

Općenito razlikujemo dva karakteristična spoja između volframa i ugljika, odnosno razlikujemo WC i volframov semikarbid (W₂C). Oba navedena spoja mogu biti prisutni u prevlakama, a omjeri mogu ovisiti o metodi prevlačenja.

Drugi metastabilni spoj volframa i ugljika može se stvoriti zagrijavanjem WC-a na visoke temperature pomoću plazme, te zatim gašenjem u inertnom plinu. Ovaj proces uzrokuje sferoidizaciju makrokristalnih WC čestica. Fina mikrostruktura ove faze osigurava visoku tvrdoću (2800-3500 HV) u kombinaciji s dobrom žilavošću u usporedbi s drugim spojevima volfram karbida. Metastabilna priroda ovog spoja rezultira smanjenom stabilnošću na visokim temperaturama.

Na visokim temperaturama WC se raspada na volfram i ugljik, to se događa tijekom visokotemperaturnog toplinskog raspršivanja npr. u metodi s visokoenergetskom plazmom [5].

Oksidacija WC-a počinje na 500-600 °C (773-873 K). Otporan je na kiseline reagira samo na dušičnu kiselinu (HF/HNO₃). WC također reagira s plinom fluorom na sobnoj temperaturi i sa klorom pri temperaturi iznad 400 °C (673 K), te ne reagira na suhi H₂ do njegove točke taljenja.

WC u finom prahu lako oksidira u vodenim otopinama vodikovog peroksida. Na visokim temperaturama i tlakovima reagira s vodenom otopinom natrijevog karbonata stvarajući natrijev volframat, to je ujedno i postupak koji se koristi za uporabu otpadnog cementnog karbida [5].

3.3. Fizička svojstva

Volfram karbid ima visoko talište na 2870 °C (3140 K), vrelište na 6000 °C (6270 K) pri tlaku koji je ekvivalentan jednoj standardnoj atmosferi (101,325 kilopaskala).

WC posjeduje toplinsku vodljivost od 110 W · m⁻¹ · K⁻¹ i koeficijent toplinskog rastezanja od 5,5 μm · m⁻¹ · K⁻¹.

Volfram karbid je izuzetno tvrd, te se rangira u rasponu od 9 do 9,5 po Mohsovoj ljestvici, te posjeduje Vickersovu tvrdoću od 2600 HV. WC ima Youngov modul od približno 530-700 GPa, skupni modul od 630-655 GPa i modul smicanja od 274 GPa. Krajnja vlačna čvrstoća iznosi 344 MPa, dok krajnja tlačna čvrstoća iznosi 2,7 GPa, Poissonov omjer iznosi 0,31.

Brzina longitudinalnog vala kroz tanku šipku od volfram karbida je 6220 m/s. Niski električni otpor volfram karbida iznosi oko 0,2 μΩm, taj otpor je usporediv s otporom nekih drugih metala npr. vanadij koji posjeduje približno ekvivalentan električni otpor 0,2 μΩm. U 1. tablici su prikazana svojstva WC-a [6].

Tablica 1. Svojstva WC-a [6]

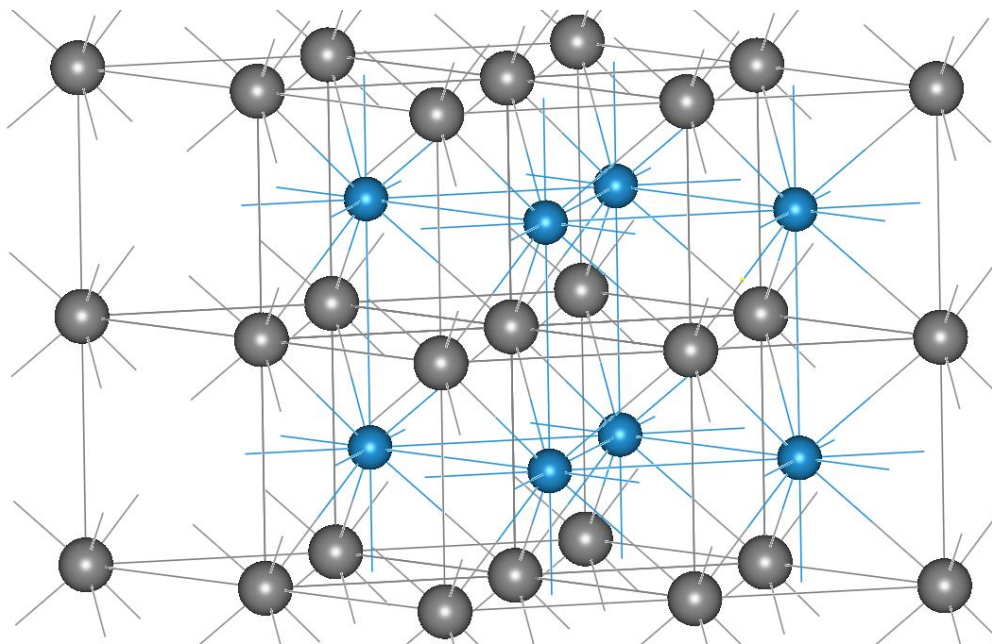
| Svojstva | |
|-------------------------------|--|
| Kemijska formula | WC |
| Molarna masa | 195.85 g·mol ⁻¹ |
| Izgled | Sivo-crna sjajna krutina |
| Gustoća | 15.63 g/cm ³ |
| Talište | 2,785–2,830 °C (5,045–5,126 °F; 3,058–3,103 K) |
| Vrelište | 6000 °C (10830 °F; 6270 K) na 760 mmHg |
| Topivost u vodi | Netopljivo |
| Topljivost | Topljiv u HNO ₃ , HF |
| Magnetska osjetljivost | 1·10 ⁻⁵ cm ³ /mol ^[3] |
| Toplinska vodljivost | 110 W/(m·K) ^[4] |

3.4. Struktura

Postoje dva oblika WC-a, heksagonalni oblik odnosno α -WC i kubični visokotemperaturni oblik, β -WC koji ima strukturu kamene soli. Heksagonalni oblik je sastavljen od jednostavne heksagonske rešetke atoma slojeva koji leže izravno jedan preko drugoga s atomima ugljika koji ispunjavaju polovicu međuprostora dajući i volframu i ugljiku pravilan trigonalni prizmatični oblik [7].

Iz dimenzija jedinične ćelije mogu se odrediti sljedeće duljine: udaljenost između atoma volframa u heksagonalno pakiranom sloju koja iznosi 291 pm, najkraća udaljenost između atoma volframa u susjednim slojevima koja iznosi 284 pm. Duljina veze volfram-ugljika je stoga usporediva s jednostrukom vezom u W (CH₃) u kojoj postoji jako iskrivljena trigonalna

prizmatična koordinacija volframa. Na slici 2 je prikazana α -WC struktura gdje su atomi ugljika sivi.



Slika 2. α -WC struktura [7]

4. Proizvodnja tvrdih metala

Sve veća upotreba alatnih materijala zahtijeva visoku cjelovitost i poboljšane performanse. Postizanje izotropne mikrostrukture koju karakterizira homogeno rasprostiranje elemenata bez segregacija od primarne je važnosti u primjeni reznih materijala [8].

Metalurgija praha omogućuje dobivanje naprednih alatnih materijala koji mogu postići vrlo visoke performanse i izdržati teške uvjete rada bez preranog kvara. Metalurgija praha može kombinirati prahove različitih priroda i karakteristika koje je teško sabiti na drugi način što rezultira proizvodnjom konačnog materijala s hibridnim ili novim svojstvima [8].

Metalurgija praha obavlja sve faze obrade u čvrstom stanju i oblikuje prah izravno u konačni ili polufinalni oblik, te se to smatra glavnom prednošću takve tehnologije. Dodatno ovom se tehnologijom mogu dobiti prašci sa značajno različitim temperaturama taljenja s različitim gustoćama. Prilikom proizvodnje tvrdih metala postoji mogućnost korištenja različitih sastojaka koji imaju ograničenu međusobnu topljivost u tekućem stanju ili u uvjetima kada tekući metal ima veliki afinitet prema vatrostalnom ili drugom sastavnom dijelu [9].

Posebno u slučaju čeličnih materijala, proizvodnja tvrdih metala dovodi do dobivanja izuzetnih ili poboljšanih svojstava koja se ne mogu postići tradicionalnim postupcima proizvodnje. Konkretno kod konvencionalne proizvedenih alatnih čelika tekući metal se ulijeva u kalup, dok se ingot kuje, te nakon toga slijedi postupak žarenja. Tijekom faze skrućivanja u konvencionalnim metodama proizvodnje ingot je pod utjecajem makro segregacije [9].

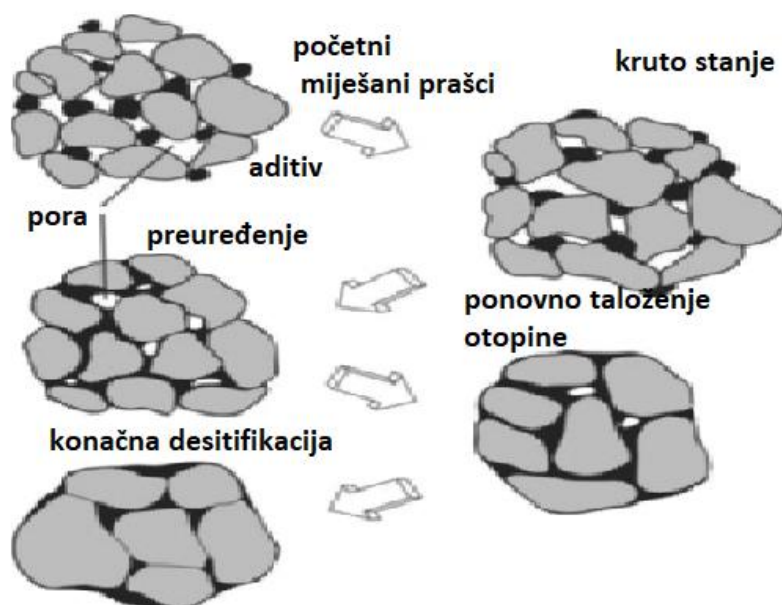
U proizvodnji tvrdih metala tekući metal se transportira kroz malu mlaznicu uz prisutnost visokog tlaka, protok tekućine se transformira u sferičnu kapljicu jednolikog sastava. Materijali prilikom skrućivanja nemaju mogućnosti segregacije. Tehnologija proizvodnje tvrdih proizvodi izotropni materijal s ujednačenom mikrostrukturom gdje se stvara fina raspodjela karbida koja doprinosi povećanju njihove otpornosti na habanje i njihovoj duktilnosti. U konvencionalno proizvedenom postupku visoka duktilnost se može postići uz neizbježni gubitak tvrdoće pa tako i otpornosti na trošenje [10].

Konvencionalna proizvodnja tvrdih metala sastoji se od: miješanja elementarnih/legiranih prahova, sabijanja smjese u kalupu i sinteriranja u kontroliranom okruženju odnosno atmosferi kako bi se čestice metalurški povezale [10].

Metalno injekcijsko prešanje je postupak koji se bavi proizvodnjom složenih oblika u velikim količinama uz korištenje finog metalnog praha debljine manje od 20 μm koji se posebno formulira s vezivom u sirovinu, koja se dovodi u šupljinu uređaja za injekcijsko prešanje. Vezivo se ekstrahira toplinskom obradom, a sirovina se sinterira. Metalno injekcijsko prešanje je slično visokotlačnom tlačnom lijevanju, ali je prešanje ograničeno na relativno male i vrlo složene dijelove. Najvažnija značajka ovog postupka povezana je s sposobnošću proizvodnje komponenti s mehaničkim svojstvima koja su usporediva s kovanim materijalima [10].

Cementirani karbidi se općenito sinteriraju postupkom sinteriranja u tekućoj fazi u temperaturnom rasponu od 1350°C do 1650°C, čime se dobiva materijal bez pora. Tijekom sinteriranja kobalt (Co) prelazi u tekuće stanje i lako se otapa s volframom (W) i karbidom koji dolaze iz volfram karbida. Istovremeno dolazi do snižavanja temperature taljenja. Razina karbida je od primarne važnosti jer može dovesti do dobivanja neželjenog spoja u sinteriranom materijalu [10].

Utjecaj tekuće faze na sinteriranje ima visoki značaj jer utječe na vrijeme sinteriranja. Potpuno zgušnjavanje konačnog proizvoda moguće je unutar jednog sata. Idealna razina tekućine u kombinaciji s visokom topljivošću krutine u tekućoj fazi kao i potpuno kvašenje između krutih i tekućih čestica najvažniji su parametri koji utječu na proces sinteriranja. Na slici 3 su prikazane glavne faze sinteriranja [10].



Slika 3. Faze sinteriranja [10]

Preuređivanje je faza u kojoj se izvršava razvoj tekućine i kvašenje čvrstih elemenata koji su uključeni u proces s ciljem stvaranja kompaktnijeg oblika. Faza ponovnog taloženja otopine uključuje reorganizaciju strukture i zarobljavanje čestica.

Valja napomenuti da pri proizvodnji tvrdih metala postoji i reaktivno sinteriranje kao jedan od inovativnih postupaka sinteriranja. Široka industrijska uporaba takve metode još uvijek nije integrirana u serijskoj proizvodnji.

Toplina koja je potrebna za sinteriranje osigurava se egzotermnom reakcijom među glavnim prahovima, a krajnji rezultat je pretvaranje zbijenih prahova u čvrsti materijal [10].

4.1. Vezivna sredstva

Konvencionalne legure tvrdih metala volfram karbida sastoje se od volfram karbida i duktilnih vezivnih sredstva. Iako se kobalt kao vezivno sredstvo izuzetno dobro vezuje sa volfram karbidom, prisutna je smanjenja otpornost na koroziju u određenim primjenama posebno u kemijskoj i prehrambenoj industriji.

Zamjena vezivnog sredstva odnosno kobalta za nikel ili za nikel i željezo se ubrzano istražuje u pokušaju da se pokušaju poboljšati svojstva veziva, te da se u isto vrijeme smanje troškovi povezani s nedovoljnom ponudom i visokom tržišnom cijenom kobalnog praha [11].

Kao glavno vezivo konvencionalnih cementiranih karbida se koristi kobalt (Co), no njegovo skladištenje je otežavajuće, te kobalt ujedno izuzetno skup. To su ujedno i jedni od glavnih razloga zašto su se istraživali potencijalni kandidati koji bi služili kao vezivno sredstvo. Kobalt je široko korišten vezivni metal za većinu primjena, ali mogu se implementirati i ostale metalne skupine poput nikla i željeza (WC–Ni, WC–Ni–Fe). Takvi oblici se koriste za specijalizirane primjene npr. u uvjetima gdje je potrebna: velika tvrdoća, otpornost na toplinu, otpornost na pucanje, otpornost na koroziju odnosno oksidaciju [11].

Legure tvrdih metala WC–Co i WC–Ni–Fe se uglavnom proizvede vakuumskim sinteriranjem uz primjenu tehnike metalurgije praha [11].

5. WC-Co sustavi

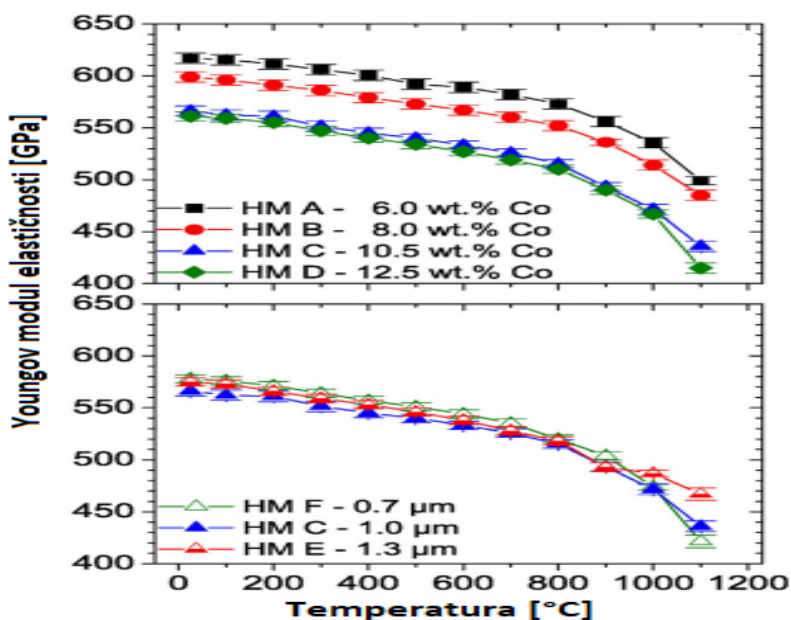
WC-Co tvrdi metal je preferirani materijal za komponente izložene trošenju i alate za rezanje u strojnoj obradi metala. Posebnu primjenu ima kod reznih pločica jer one moraju izdržati velika mehanička i toplinska opterećenja tijekom primjene. Ova opterećenja ovise o geometriji alata, parametrima rezanja poput brzine rezanja, posmaka, upotrebi ili odsutnosti maziva i materijala koji se obrađuje [12].

5.1. Youngov modul elastičnosti

Youngov modul elastičnosti (E) prikazan je na 4. slici kao funkcija temperature za WC-Co metale sa varijacijom u sadržaju Co i veličine WC zrna. Na sobnoj temperaturi E ovisi isključivo o sadržaju Co odnosno Youngov modul se smanjuje s povećanjem sadržaja Co, dok je neovisan o WC veličini zrna.

Evidentan je pad E s povećanjem sadržaja Co i njegova neovisnost o veličini WC zrna na sobnoj temperaturi. Odnosno kao što je vidljivo iz slike 4, E se smanjuje postojano s porastom temperature pokazujući izraženi pad iznad 800 °C.

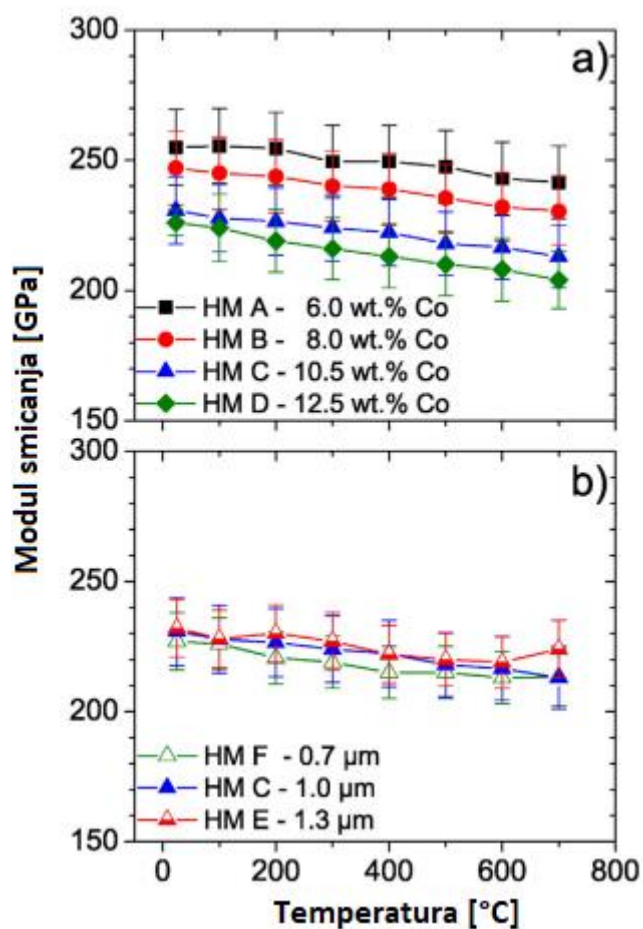
Na 800°C i 1000 °C WC-CO je pokazao E vrijednosti od 361 ± 30 GPa odnosno 193 ± 20 GPa.



Slika 4. Youngov modul elastičnosti WC-Co tvrdog metala [12]

5.2. Modul smicanja

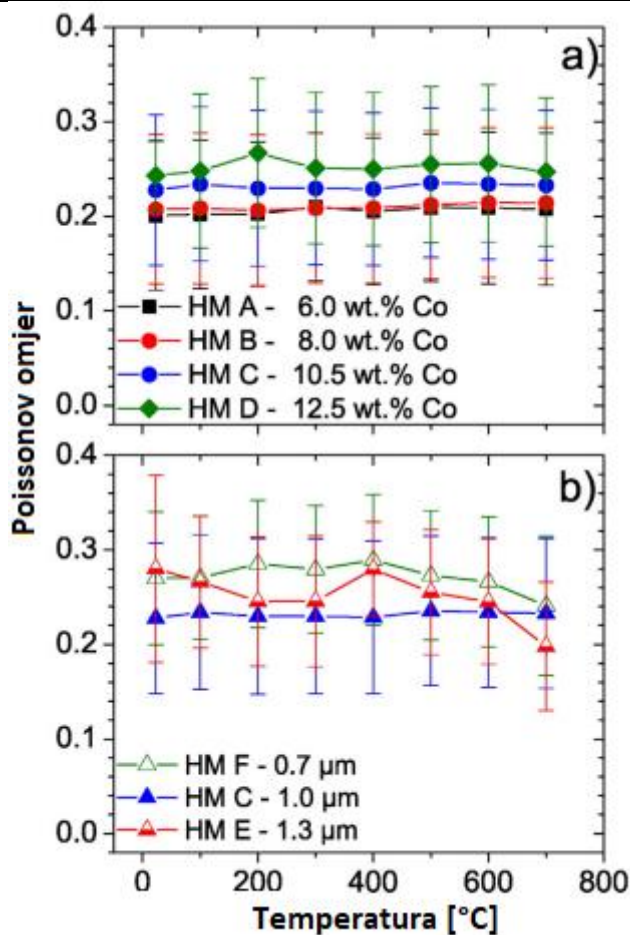
Ovisnost modula smicanja G o temperaturi za WC-Co s varijacijom u sadržaju Co i veličine zrna prikazana je na slici 5. U temperaturnom intervalu veličina WC zrna nema značajan utjecaj na G te se on smanjuje u manjoj količini s povećanjem sadržaja Co [13].



Slika 5. Modul smicanja WC-Co [13]

5.3. Poissonov omjer

Poissonov omjer ν kao funkcija temperature ilustriran je na slici 6. Na vrijednosti ν ne utječu: sadržaj Co, veličina zrna WC, niti temperatura. Sve vrijednosti WC-a su u rasponu od 0,198 do 0,280 [14].



Slika 6. Poissonov omjer WC-Co [14]

5.4. Istezanje

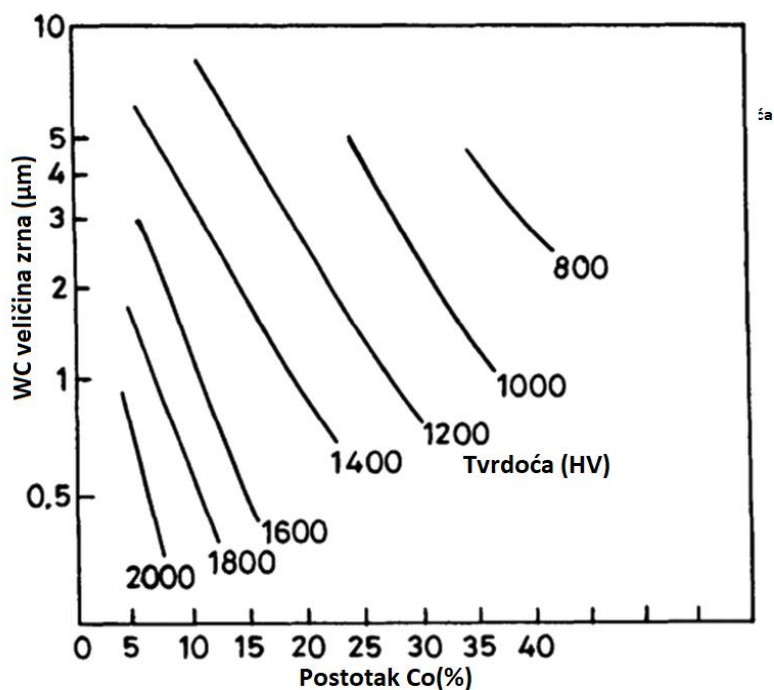
Krivulje naprezanja i deformacija za WC-Co s različitim sadržajem Co pod tlačnim opterećenjem prikazani su za temperature do 900 °C na slici 7.

Razlike u sadržaju $\text{Co} \leq 2$ ne dovode do značajnih razlika u ponašanju. WC-Co sustavi pokazuju izvanrednu otpornost na deformaciju koja se smanjuje s povećanje temperature. Na sobnoj temperaturi granica razvlačenja se kreće od 4400 do 3800 MPa, a na temperaturi od 900 °C od 750 do 620 MPa [14].

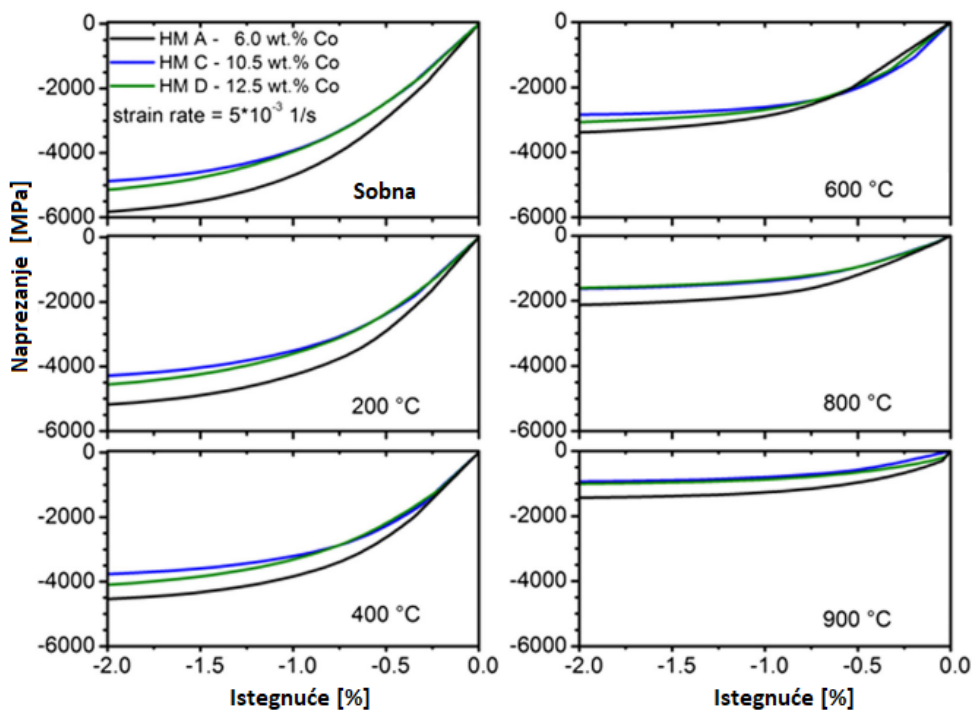
5.5. Tvrdoća

Tvrdoća WC-Co opada s porastom temperature sve do vrijednosti od 50% tvrdoće pri sobnoj temperaturi na 800 °C. Analogno tome povećanjem tvrdoće se također smanjuje granica razvlačenja na slici je prikazana tvrdoća izražena u HV. Iz slike proizlazi da udio kobalta i veličina zrna izravno utječu na tvrdoću WC-Co. Odnosno tvrdoća će biti veća ukoliko smanjimo

veličinu zrna i udio Co. Važno je istaknuti da je tvrdoća uz žilavost jedno od najvažnijih svojstva WC-Co sustava [14].



Slika 7. Tvrdoća WC-Co [14]



Slika 8. Naprezanje WC-Co [14]

6. WC-Ni sustavi

Istraživanja su pokazala da WC-Ni cementirani karbidi imaju veću otpornost na koroziju i oksidaciju nego WC-Co cementirani karbidi. Ni kao vezivno sredstvo može učinkovito smanjiti poteškoće sinteriranja i omogućuje smanjenje udjela metalnog veziva. Povećanje Ni u tekućoj fazi ubrzava kretanje WC čestica i potiče njegovu homogenu distribuciju oko WC čestica čime dolazi do ubrzavanja procesa zgušnjavanja. Na kraju se dobiva gotovo potpuno zgusnuti WC-Ni karbidni materijal. U stvarnoj industrijskoj proizvodnji Ni ima niže troškove od Co i skladišteni kapacitet Ni je mnogo veći [15].

6.1. Gustoća

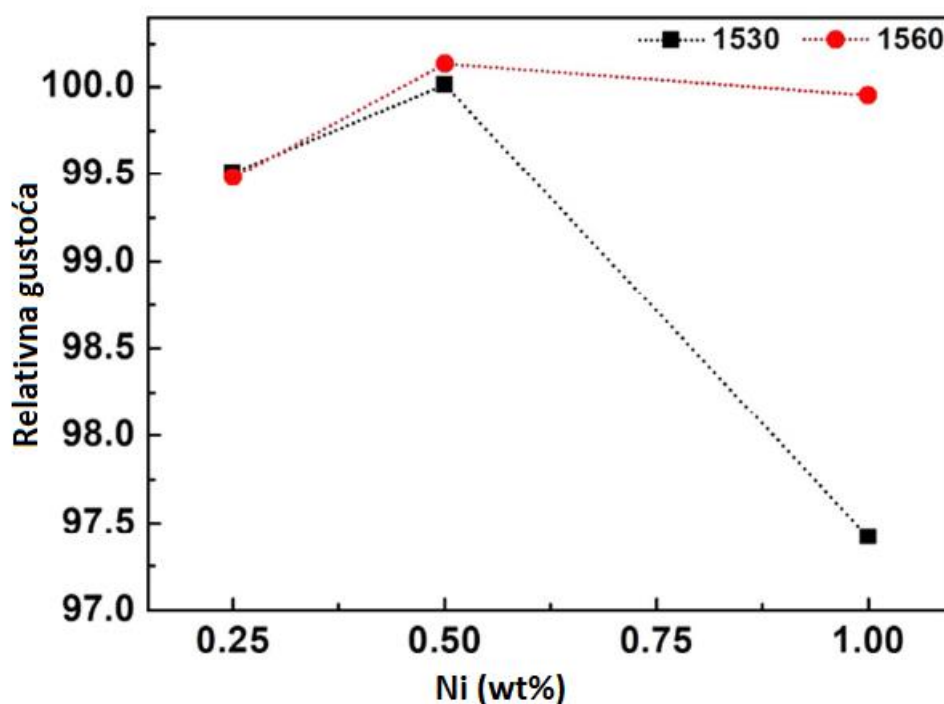
Tablica 2. prikazuje mehanička svojstva WC-Ni kompozitnih keramičkih materijala s različitim sadržajem veziva (0,25, 0,5 i 1 %). Na slici 8 može se vidjeti da Ni ima značajan utjecaj na WC sinteriranje radi postizanja visoke gustoće. Kada je sadržaj Ni 0,25%, tvrdoća, lomna žilavost i savojna čvrstoća iznose 23,90 GPa, 4,10 MPa m^{1/2}, odnosno 935,87 MPa. U slučaju povećanja sadržaja Ni, na 1%, tvrdoća, žilavost i savojna čvrstoća WCN-6 je iznosila 23,00 GPa, 4,30 MPa m^{1/2}, odnosno 1514,77 MPa [16].

To pokazuje da povećanje udjela Ni uvelike poboljšava savojnu čvrstoću WC-Ni tvrdih metala. U isto vrijeme WC-Ni tvrdi metali imaju visoku tvrdoću veću od 21,0 GPa, što je znatno više od WC-15 % Co kompozita [16].

Kada je temperatura sinteriranja 1560°C, tvrdoća WC-Ni opada s povećanjem udjela Ni, što je posljedica povećanja udjela Ni što dovodi do duljeg razdoblja sinteriranja u tekućoj fazi što rezultira smanjenjem gustoće. U isto vrijeme pokretačka sila protoka tekuće faze veziva između WC čestica obrnuto je proporcionalna veličini WC čestica. Stoga se s povećanjem temperature sinteriranja i količine veziva ubrzava preraspodjela WC čestica u tekućoj fazi i potiče rast WC čestica. Zbog rasta WC čestica dolazi do ometanja protoka tekuće faze što rezultira prisutnošću pora između WC čestica što u konačnici može smanjiti gustoću i tvrdoću [16].

Tablica 2. Svojstva WC–Ni [16]

| Numeriranje | Sastav (%) | Tvrdoća (GPa) | Lomna žilavost (Kic) | Svojna čvrstoća |
|-------------|---------------|---------------|----------------------|------------------|
| WCN-1# | WC–0.25wt% Ni | 22.50(±0.22) | 5.76(±0.37) | 1168.29(±246.28) |
| WCN-2# | | 23.90(±0.22) | 4.10(±0.21) | 935.87(±272.03) |
| WCN-3# | WC–0.5wt% Ni | 21.83(±0.05) | 4.14(±0.22) | 1225.06(±139.24) |
| WCN-4# | | 23.00(±0.22) | 5.28(±0.25) | 1396.58(±50.17) |
| WCN-5# | WC–1wt% Ni | 23.73(±0.12) | 4.38(±0.28) | 1181.17(±105.51) |
| WCN-6# | | 23.00(±0.12) | 4.30(±0.09) | 1514.77(±259.6) |



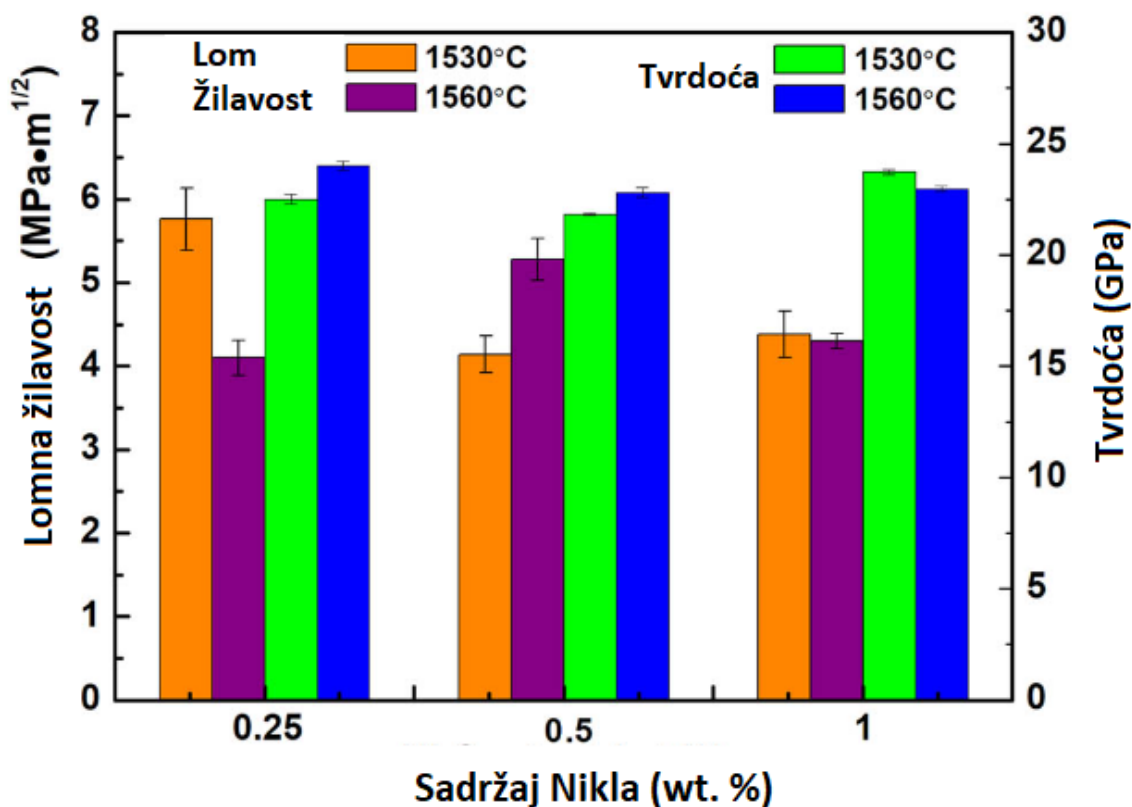
Slika 9. Gustoća WC-Ni [16]

6.2. Tvrdoća i lomna žilavost

Slika 9 uspoređuje tvrdoću i lomnu žilavost svake skupine WC-Ni kompozita. Promatrajući i analizirajući podatke o lomnoj žilavosti s grafikona, evidentno je da se lomna žilavost kompozitne keramike WC–Ni prvo smanjuje, a potom raste s povećanjem udjela Ni pri temperaturi sinteriranja od 1530°C, ali pri temperaturi sinteriranja od 1560°C lomna žilavost prvo raste, a potom opada s porastom udjela Ni. Iz toga proizlazi da sadržaj Ni i temperature sinteriranja istodobno utječe na otpornost na lom [17].

Smanjenje udjela W_2C faze je korisno za poboljšanje gustoće i performansi materijala, stoga se lomna žilavost materijala postupno povećava. Kada se udio Ni poveća s 0,25 na 0,5% wt.% masnog udjela, povećava se lomna žilavost. Kada je sadržaj Ni u fazi metalnog veziva

0,25 wt.% sinterira na 1,560°C, WC-Ni ima najveću tvrdoću od 23,9 GPa i otpornost na lom od 4,10 MPa m^{1/2}. Lomna žilavost WC–Ni sinteriranjem na 1530°C iznosi čak 5,76 MPa m^{1/2}, a tvrdoća materijala također je visoka 22,5 GPa [17].



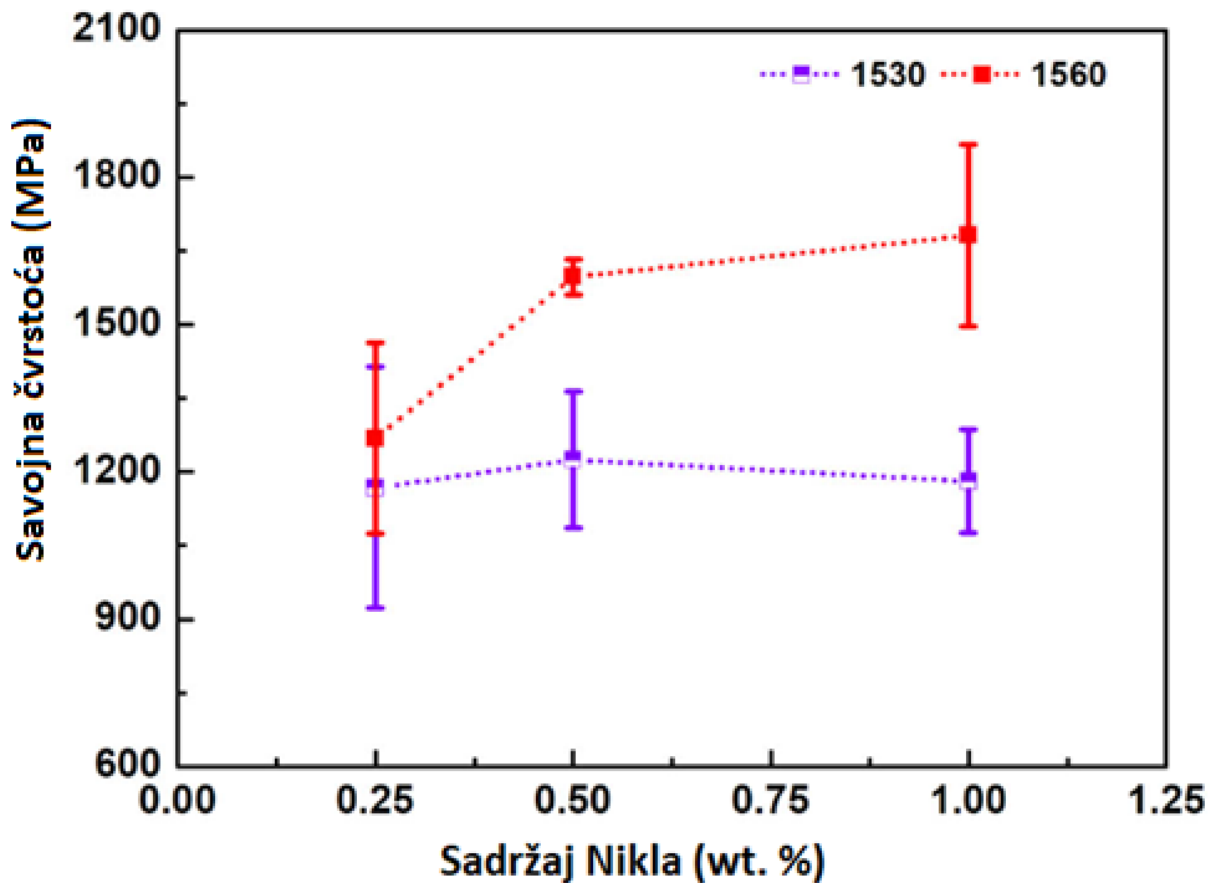
Slika 10. Tvrdoća i otpornost na lom WC-Ni [17]

6.3. Savojna čvrstoća

Slika 10 prikazuje savojnu čvrstoću svake skupine WC-Ni kompozita. Savojna čvrstoća uzorka općenito raste s povećanjem udjela Ni. Budući da će ujednačenost i kontinuitet mikrostrukture materijala utjecati na savojnu čvrstoću materijala.

Dodatak odgovarajuće količine Ni čini veličinu WC zrna ujednačenijom tako da se u konačnici poboljšava savojna čvrstoća WC-Ni. Također je lako izazvati agregaciju zbog viška Ni. WC-Ni ima najnižu vrijednost čvrstoće na savijanje na $935,87 \pm 272,03$ MPa iako sinterirana WC-Ni kompozitna keramika na 1560°C ima manju gustoću. Nasuprot tome, uzorak s WC-Ni sinteriran na 1560°C ima savojnu čvrstoću od $1514,77 \pm 259,6$ MPa, što je posljedica boljih rezultata sinteriranja u tekućoj fazi.

Međutim WC-Ni sinteriran na 1530 °C i 1560 °C postiže gotovo potpuno zgušnjavanje što učinkovito smanjuje granicu tečenja zajedno s lomnom žilavošću i povećava vrijednost savojne čvrstoće. U isto vrijeme poboljšanje Ni faze doprinosi zgušnjavanju uzoraka, a sinteriranje na visokim temperaturama stvara veliku količinu tekuće faze koja ispunjava pore što također uvelike poboljšava čvrstoću WC-a na savijanje [17].



Slika 11. Savojna čvrstoća WC-Ni [17]

7. WC-Fe sustavi

Ranije studije i istraživanja sugerirala su da zamjena Co s Fe ne obećava dobra svojstva jer dolazi do stvaranja neželjene karbidne faze M_6C ili faze slobodnog grafita tijekom toplinske obrade.

Faza slobodnog grafita negativno utječe na svojstva odnosno rezultira degradacijom mehaničkih svojstava WC tvrdih metala. Ovo neželjeno stvaranje karbida ili tkz. eta faze uglavnom se pripisuje razugljčavanju tijekom sinteriranja, te to ujedno i objašnjava nedostatak uspjeha u prethodnim istraživanjima gdje je ideja potpuna zamjena Co s Fe.

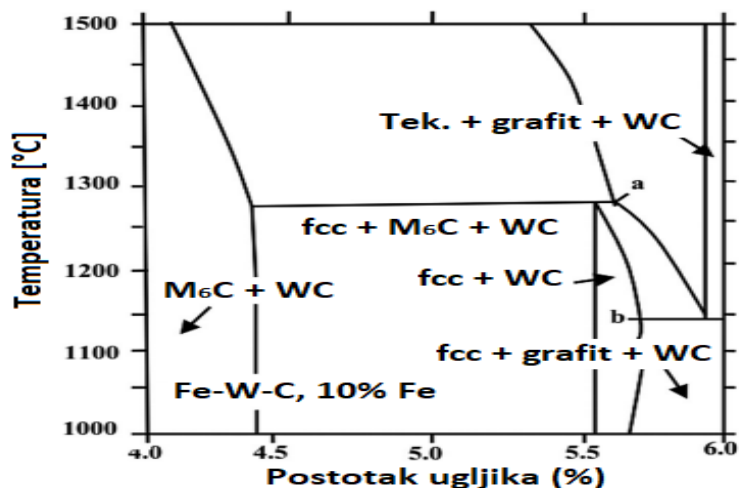
Fe kao vezivno sredstvo je u posljednje vrijeme istraživano u pojačanoj mjeri, te su ta istraživanja dokazala da potpuna zamjena Co s Fe i njegovih legura dovode do boljeg odnosa između tvrdoće/žilavosti kod tvrdih metala na bazi WC-a, te da Fe doprinosi izvanrednim poboljšanim drugim mehaničkih svojstava, ali samo u uvjetima kada je dodatak sadržaja ugljika u legurama Fe strogo kontroliran kako bi se izbjeglo stvaranje eta faze.

Nedavno je utvrđeno da je FeAl veziva imaju manju štetu na okolinu i zdravlje, te da posjeduje superiornu otpornost na oksidaciju za razliku od Co kao vezivnog sredstva u WC-Co karbidima [18].

7.1. Eta faza

Eta karbid ili faza slobodnog grafita je oblik cementiranog volfram karbida s nedostatkom ugljika koji će rezultirati tvrdim, lomljivijim dijelom od cementiranog karbida, a on je uzrokovan nedovoljnim sadržajem ugljika i lošim uvjetima sinteriranja.

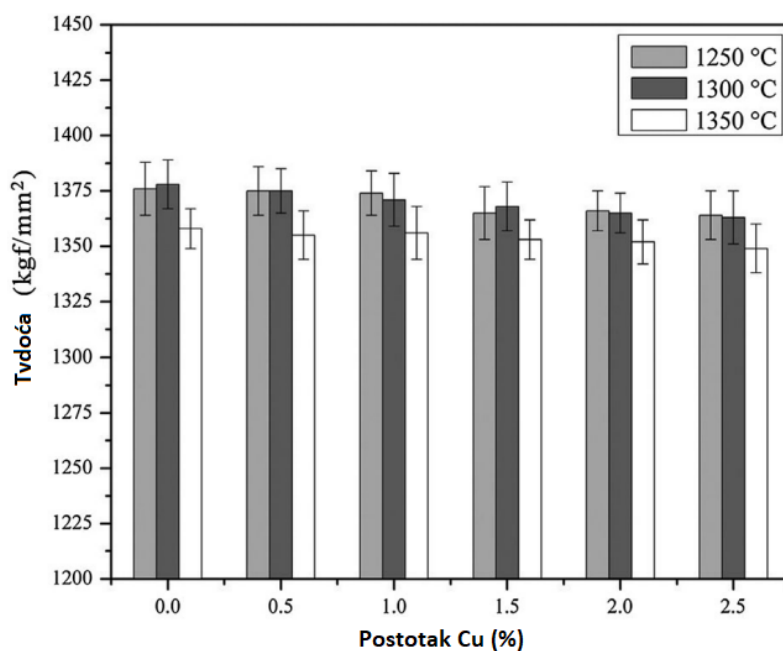
Na slici 11 je prikazan vertikalni presjek Fe–W–C faznog dijagrama. To je ujedno i najprikladniji sastav za izbjegavanje eta faze i izlučivanje slobodnog grafita [18].



Slika 12. Vertikalni presjek Fe–W–C faznog dijagrama [18]

7.2. Tvrdoća

Tvrdoća se smanjuje s povećanjem temperature sinteriranja na 1350°C što je posljedica grublje mikrostrukture uzoraka. Sama tvrdoća je nepromijenjena odnosno ne ovisi o koncentraciji Cu što utvrđuje činjenicu da je tvrdoća u velikoj mjeri određena WC-om kako je prikazano na slici 12, iz čega se zaključuje da temperatura sinteriranja ima veći utjecaj na tvrdoću od sadržaja Cu. Važno je istaknuti da WC-Fe karbidi mogu imati bolja svojstva tvrdoće od WC-Co karbida [18].

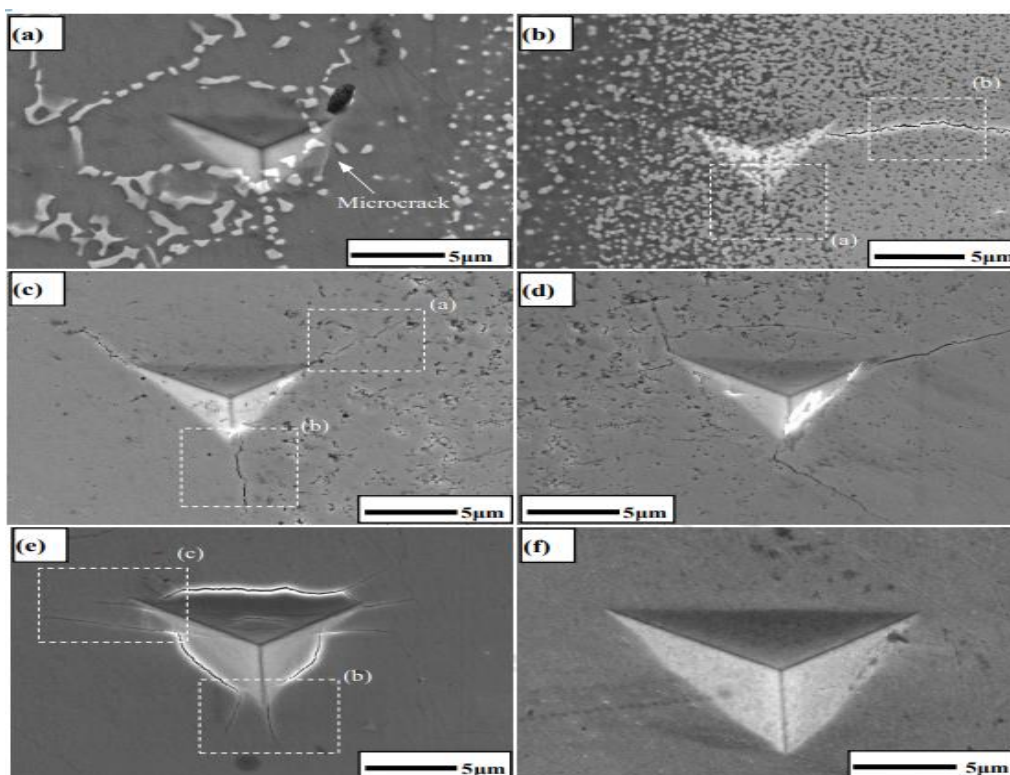


Slika 13. Tvrdoća WC-Fe [18]

7.3. Žilavost

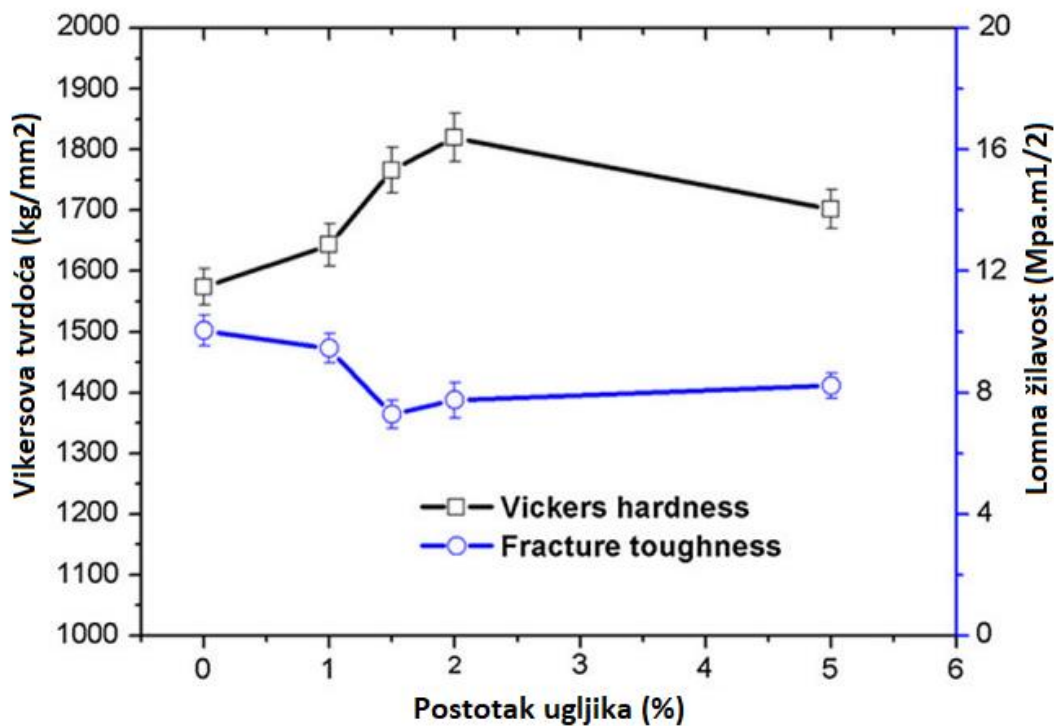
Konkretno za WC-Fe karbide žilavost ima izvanredan učinak na mehanička svojstva W-WC-Fe karbida. Stoga se žilavost WC-Fe karbida ocjenjuju na temelju duljine pukotine i prikladne primijenjene jednadžbi. Slika 12 prikazuje detalje otisaka udubljenja na različite zone odnosno područja u karbidu, ovom metodom možemo puno saznati o svojstvu žilavosti nekog materijala, taj se postupak uglavnom provodi prilikom kontrole kvalitete, istraživanja svojstva tvrdih metala sa novim alternativnim veziva itd.

Na rubu udubljenja nalazi se ispupčenje i mikropukotina što je prikazano na slici 13 a) pri primijenjenom opterećenju matrica ima veću plastičnu deformaciju što dovodi do stvaranje izbočine. Mikropukotina nastaje zbog nekonzistentnosti deformacije, te je to ujedno i međudjelovanje između matrice i WC čestica [19].



Slika 14. Detalji otiska u različitim zonama [19]

Slika 14 prikazuje Vickersovu tvrdoću i lomnu žilavost WC-Fe karbida.



Slika 15. Vickers tvrdoća i lomna žilavost WC-Fe [19]

7.4. Otpornost na koroziju

WC-Fe karbidi ne posjeduju zadovoljavajuća svojstva otpornosti na koroziju, ali to se može donekle riješiti dodavanjem vezivnih sredstva koja posjeduju otpornost na koroziju.

Važno je napomenuti da se Fe i njegove legure ubrzano istražuju, te da je izvjesno da će u skoroj budućnosti doći do rješavanja, odnosno poboljšanja željeza kao vezivnog sredstva koji će posjedovati odgovarajuća i prihvatljiva svojstva [19].

8. Rezanje vodenim mlazom (Water-Jet)

Tehnologija rezanja vodenim mlazom je jedna od najbrže rastućih tehnologija strojne obrade. Ekološki je prihvatljiva, može obraditi gotovo sve materijale. Sama tehnologija ima široki raspon implementacije, od automobilske do zrakoplovne industrije pa sve do medicinske i prehrambene industrije. Rezanje vodenim mlazom je postupak obrade koji koristi mlaz vode pod visokim pritiskom koji stvaraju pumpe. Brzina vodenog mlaza posjeduje nadzvučnu brzinu, te se koristi za oblikovanje različitih vrsta materijala. Voda pri rezanju vodenim mlazom je pod tlakom od 392 MPa i izbacuje se pomoću male precizne mlaznice. Kako voda napušta mlaznicu, dostiže brzinu koja je tri puta veća od brzine zvuka [20].

Rezanje čistim vodenim mlazom s vodom kao medijem dizajnirano je za meke materijale kao što su drvo, plastika i guma. Kada se u struju vode doda abraziv kao što je titan, nehrđajući čelik, aluminij, staklo, keramički materijal ili beton, rezanje postaje agresivnije i može rezati čak i tvrde metale [20].

8.1. Princip rada

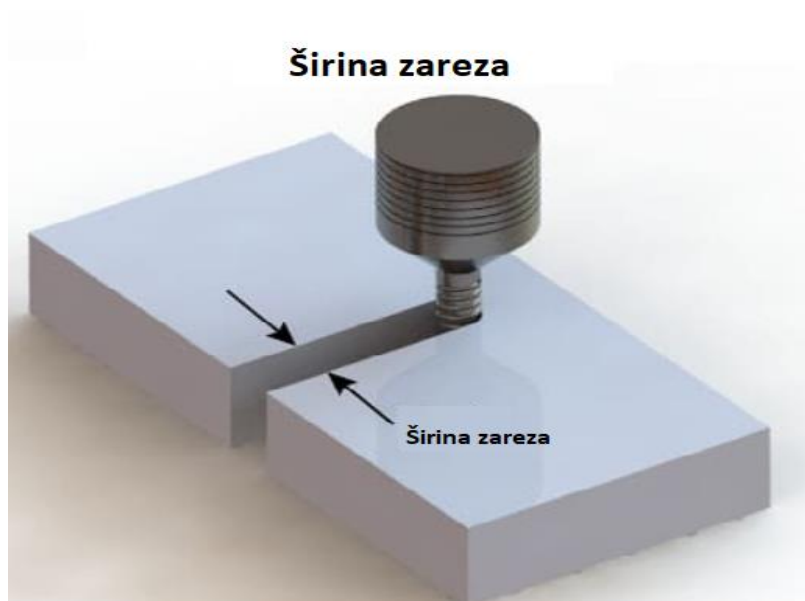
Proces rezanja vodenim mlazom može se izvršiti na nekoliko različitih načina. Većina metoda ima abraziv umiješan u vodu kako bi se čestice izbacile iz obratka. To je vrlo svestran proizvodni proces koji se može koristiti za rezanje, oblikovanje obradaka prilikom čega se zadovoljavaju tražene specifikacije.

Metoda oblikovanja koju koristi rezanje vodenim mlazom ima nekoliko prednosti u odnosu na druge postupke rezanja kao što su rezanje plazmom ili laserom. Rezanje vodenim mlazom ima veću točnost može rezati složene elemente, te toplinski osjetljive površine.

Širina zareza odnosi se na materijal koji se uklanja, te je to dio procesa rezanja. Izraz se izvorno koristio za označavanje materijala uklonjenog rezanjem. U slučaju rezanja s vodenim mlazom odnosi se na širinu mlaza koja je obično 1 mm ili manja. Unutarnji kutovi izrezani vodenim mlazom imaju radijus koji odgovara širini mlaza. Zarez ovisi o nizu čimbenika koji uključuju: debljinu materijala, vrstu materijala, kvalitetu rezanja i prirodu mlaznice vodenog mlaza [21]

Veličina zareza je važan čimbenik pri dimenzioniranju koji je nužno uzeti u obzir pri određivanju dimenzija konačnog proizvoda. Ako je debljina reza 1mm dimenzije završnog dijela potrebno je prilagoditi, odnosno nužno je uzeti u obzir širinu rezanja jer će u konačnici

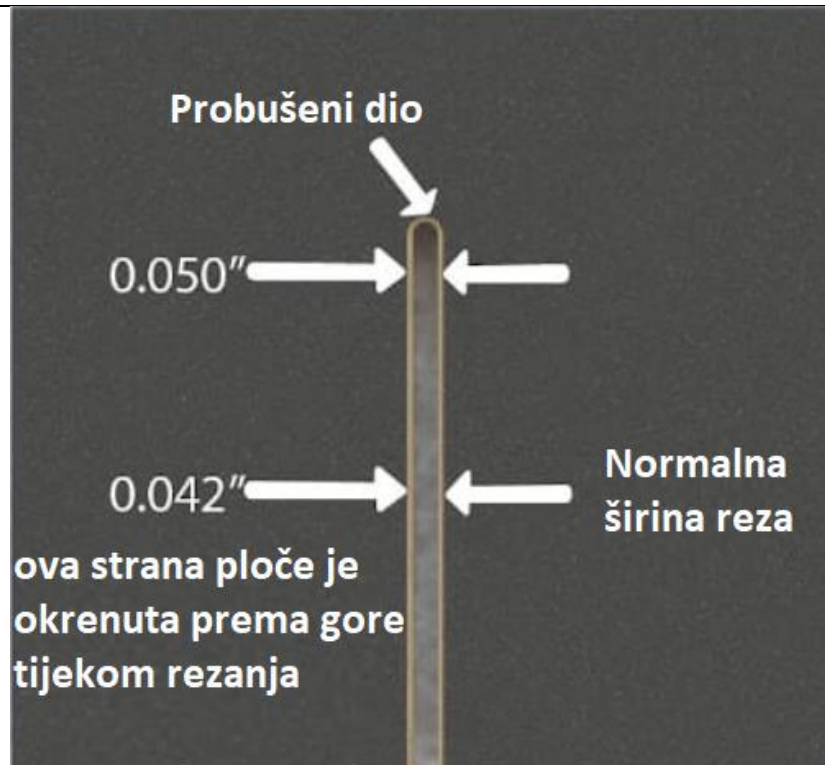
završni dio biti odmaknut za jedan milimetar. Slika 15 prikazuje je širinu zareza odnosno širinu rezanja [21].



Slika 16. Prikaz širine rezanja vodenim mlazom [21]

8.2. Prvi urez

Prvi rez napravljen s vodenim mlazom naziva se ubod koji je širi od uobičajenog zareza. Započinjanje bušenjem, te je to ujedno prvi korak u procesu rezanja vodenim mlazom. Sam proces se može izvršiti na nekoliko različitih načina, pri čemu su: stacionarne, linearne, kružne i metode niskog tlaka najčešće metode. Koja će se metoda bušenja koristiti ovisi o materijalu koji se reže i količini proizvedenog otpada. Slika 16 prikazuje proces prvog reza [21].



Slika 17. proces prvog reza [21]

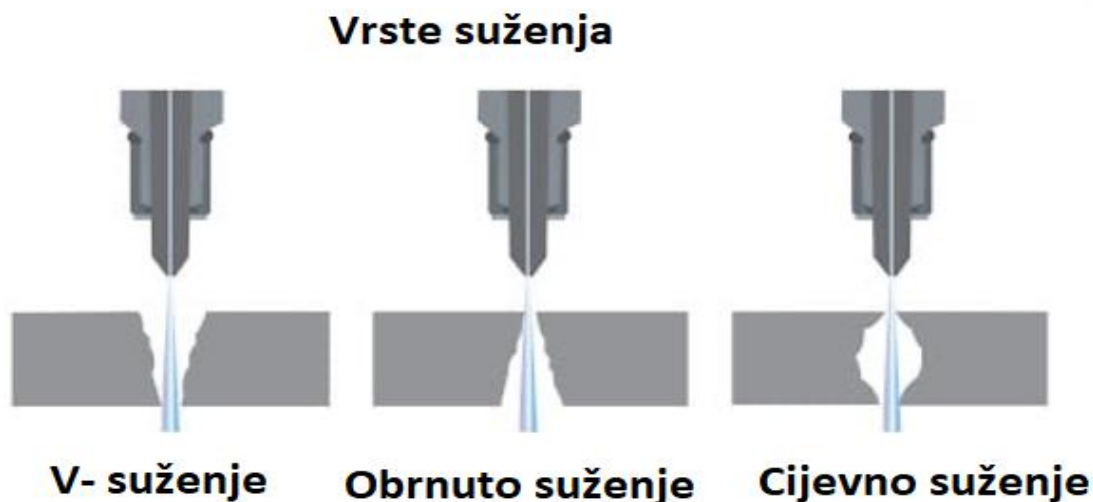
8.3. Sužavanje u širini reza

Sužavanje kod rezanja vodenim mlazom odnosi se na širinu zareza na vrhu reza i njegovu širinu na dnu. Rezovi vodenim mlazom imaju konus u obliku slova V koji nastaje jer mlaz gubi dio svoje energije dok se urezuje dublje u materijal pri čemu se više materijala uklanja na vrhu nego na dnu.

Male brzine rezanja proizvode obrnuto sužavanje gdje je širina zareza šira na dnu što je uzrokovano uklanjanjem više materijala na dnu reza. Obrnuto sužavanje može se vidjeti pri rezanju mekih i savitljivih materijala.

Suženje „cijevi“ nastaje kada je rez najširi u sredini reza što se događa kod rezanja izuzetno debelih materijala.

Za većinu rezanja sužavanje nije važno i može se koristiti kao prednost za određene poslove. U slučaju preciznih alata gdje se izrezani komadi moraju točno slagati sužavanje može izazvati problem, te ga je nužno uzeti u obzir. Na slici 17 su prikazane prethodno opisane vrste suženja.

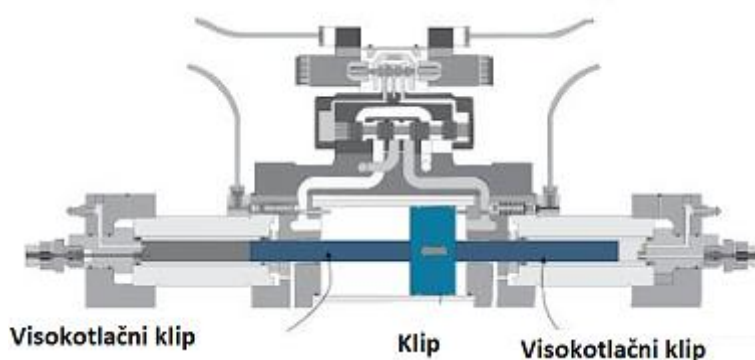


Slika 18. vrste suženja kod rezanja vodenim mlazom [21]

8.4. Tlačenje vode

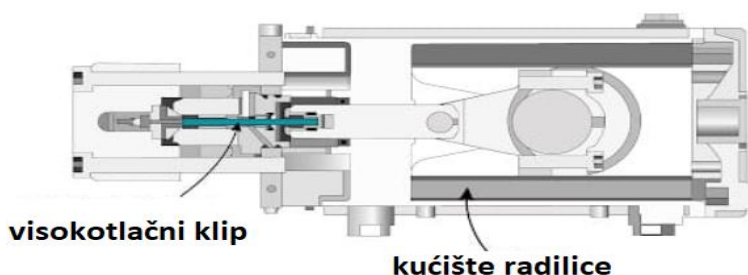
Nekoliko se metoda koristi za tlačenje vode, uključujući linearne pojačivače i rotacijske crpke s izravnim pogonom. Dvije vrste pumpi imaju motor, filtre za vodu, upravljačke sustave i senzore.

Pumpe linearnog pojačivača koriste hidrauličko ulje pod tlakom od 20 bara. Niskotlačno ulje gura klip koji ima prednju površinu 20 puta veću od površine visokotlačnog klipa koji gura vodu. Budući da je veličina niskotlačne pumpe 20 puta veća od one visokotlačne, pritisak na većem klipu se pojačava 20 puta, što daje tlak od 415 bara. Na slici 18 je prikazana linearna pumpa s pojačivačem [22].



Slika 19. linearna pumpa s pojačivačem [22]

Rotacijska pumpa s izravnim pogonom ne uključuje hidrauličko ulje. Ima električni motor koji okreće ručicu koja pokreće klipove koji stvaraju pritisak vode. Pumpe s direktnim pogonom imaju motore od 30 KS s ulazom koji dovodi vodu u pumpu. Na slici 19 prikazana je rotacijska pumpa [22].



Slika 20. rotacijska pumpa [22]

8.5. Visokotlačne cijevi

Voda pod pritiskom iz pumpe putuje kroz visokotlačne cijevi do glave za rezanje. Visokotlačne cijevi imaju izvrsnu elastičnost i vlačnu čvrstoću s iznimno glatkom unutarnjom površinom. Proizvodi se od hladno obrađenog nehrđajućeg čelika ili termoplastičnog tlačnog crijeva u veličinama od 6.5 mm do 15 mm, te dolazi u raznim duljinama kako bi odgovarao dizajnu rezača s vodenim mlazom. Na slici 20 je prikazano visokotlačno termoplastično crijevo [22].



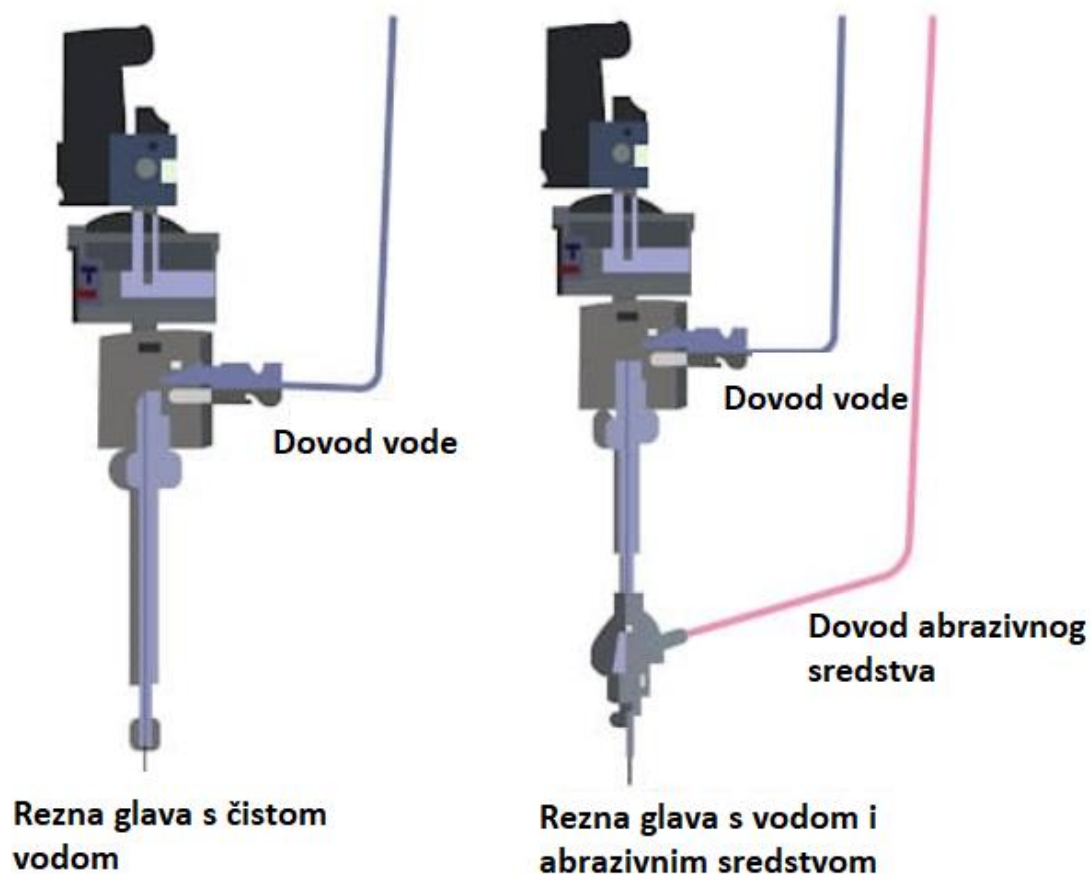
Slika 21. visokotlačno termoplastično crijevo [22]

8.6. Glava za rezanje vodenim mlazom

Voda pod pritiskom prolazi kroz otvor glave za rezanje koja je izrađena od dijamanta, rubina ili safira s rupom manjom od vrha igle. Kako voda prolazi, njezina se brzina radikalno povećava

na preko 4000 km/h. Na proces rezanja izravno utječe snaga koju daje rezna glava. Ukoliko se rezna glava preciznih alata koristi ispravno može trajati od 500 do 1000 radnih sati.

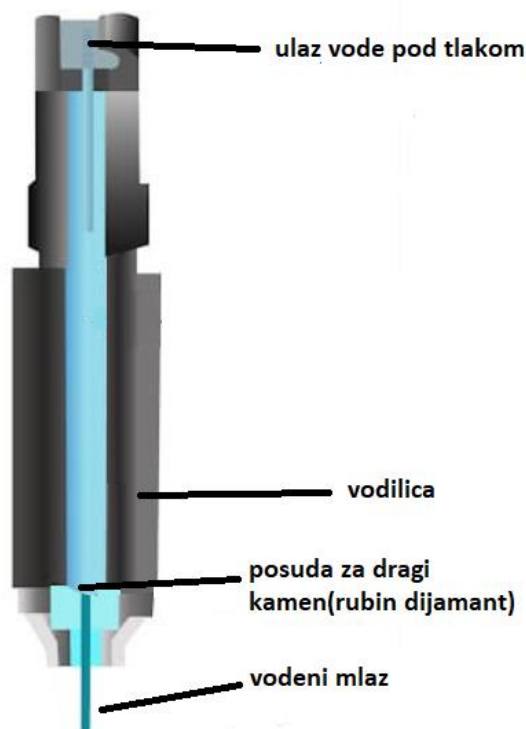
Slika 21 prikazuje rezne glave kod postupka sa i bez abraziva. Razlika između ove dvije vrste može se vidjeti u crvenoj cijevi koja nosi abraziv u strujanju vode [22].



Slika 22. Rezne glave [22]

8.7. Rezanje čistim vodenim mlazom

Rezači s čistim vodenim mlazom izvorni su oblik alata za rezanje vodenim mlazom. Koriste se zbog činjenice da stvaraju manje kondenzacije na površini obratka nego što se stvara dodirnom. Imaju tanak mlaz koji reže precizne i detaljne geometrije uz ograničen gubitak materijala. Mlaz putuje brzinom od 2450 km/h pri tlaku od 275 MPa ili brzinom od 3600 km/h pri tlaku od 413 MPa. Na slici 22 su prikazani sastavni dijelovi čistog vodenog mlaza [22].

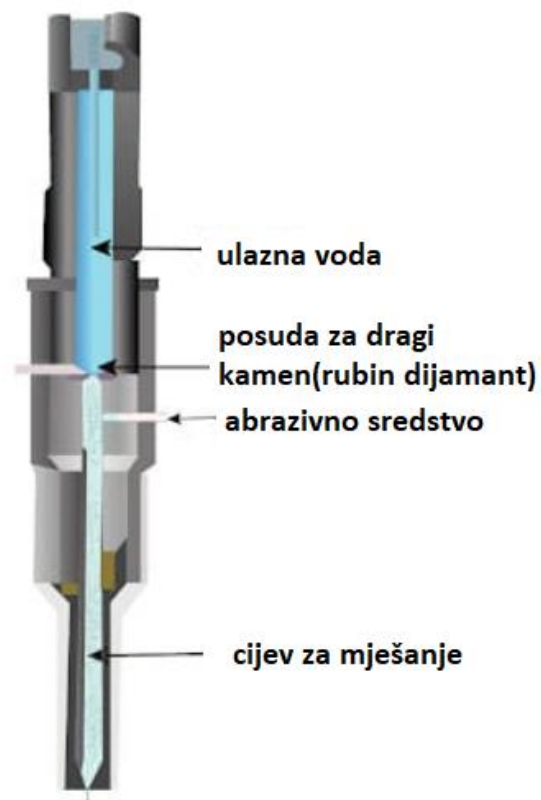


Slika 23. sastavni dijelovi čistog vodenog mlaza [22]

8.8. Rezanje vodenim mlazom s abrazivnim sredstvom

U sustavu rezanja abrazivnim vodenim mlazom abrazivni materijal se dovodi u rezu glavu gdje se na odgovarajući način miješa sa mlazom vode. Uvođenje abraziva čini mlaz „oštrijim“ te je time omogućeno učinkovitije rezanje. Dodatak abraziva čini rezač vodenim mlazom sposobnim za rezanje iznimno tvrdih materijal bez obzira na debljinu.

Kod rezača s abrazivnim vodenim mlazom mlaz ubrzava abrazivni materijal koji nagriza površinu materijala koji se reže. Abrazivni rezač s vodenim mlazom je 1000 puta jači od rezača s čistim vodenim mlazom. Mlaz je većeg promjera i može rezati materijale debljine do 250mm bez stvaranja topline ili mehaničkog naprezanja. Na slici 23 su prikazani sastavni dijelovi vodenog rezanja s upotrebom abraziva [22].



Slika 24. sastavni dijelovi vodenog rezanja s abrazivom [22]

9. Mlaznice

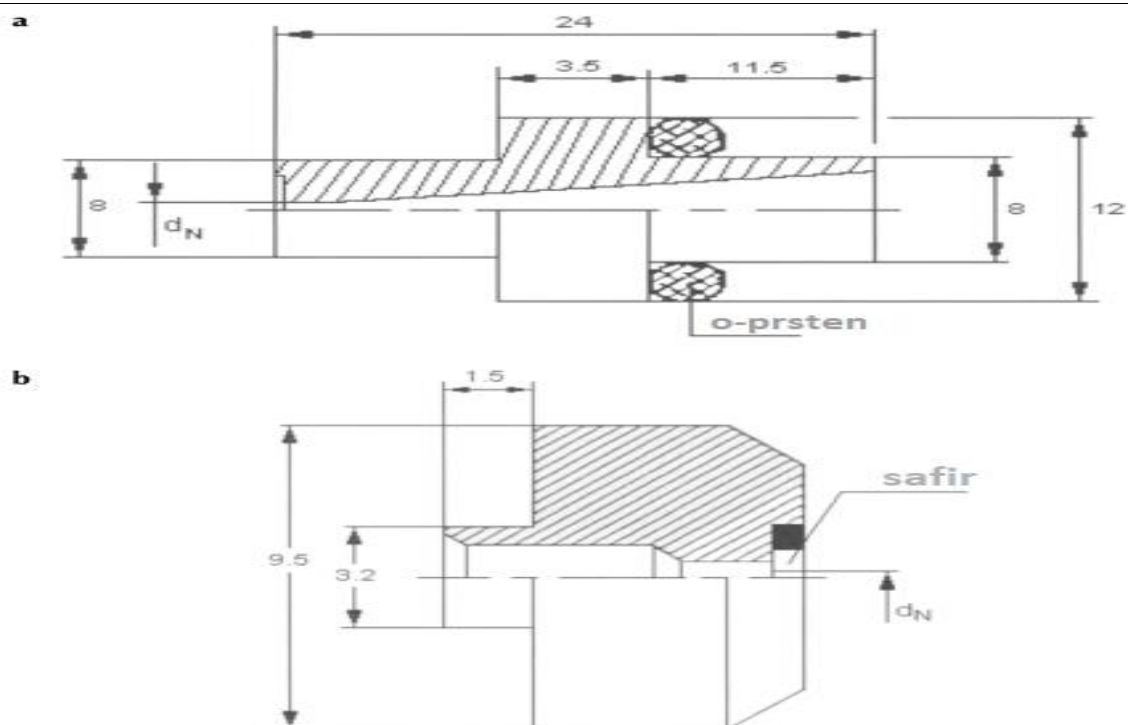
9.1. Vrste mlaznica

Mlaznica je iznimno važna komponenta bilo kojeg stroja koji koristi energiju vode. U mlaznici se potencijalna energija ulazne vode pod pritiskom pretvara u kinetičku energiju izlaznog vodenog mlaza izuzetno velike brzine. Poznati su različiti tipovi mlaznica ovisno o strojevima i konstrukciji, stoga razlikujemo:

1. mlaznice za čišćenje cijevi za radne tlakove do 250 MPa s nekoliko otvora
2. mlaznice za čišćenje cijevi za radne tlakove do 140 MPa za čišćenje cijevi velikog promjera
3. vrtložne mlaznice za radne tlakove do 75 MPa za djelomično čišćenje
4. mlaznice s okruglim mlazom s kontinuiranim kanalom protoka za povećanje radnog tlaka do 200 MPa
5. okrugle mlaznice sa safirnim umetcima za radne tlakove do 350 MPa
6. ventilatorske mlaznice za radne tlakove do 200 MPa
7. mlaznice za ubrizgavanje za radne tlakove do 400 bara za formiranje abrazivnih vodenih mlazovima

9.2. Geometrija mlaznica

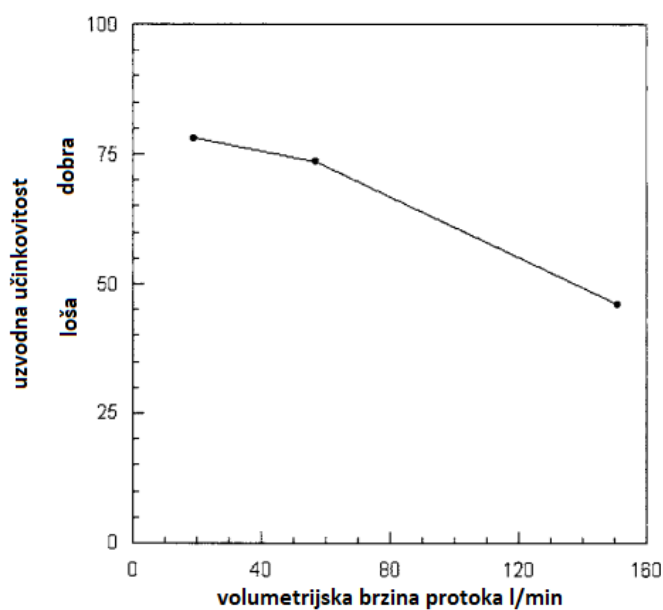
Prema geometriji razlikujemo kontinuirane i diskontinuirane mlaznice. U području radnog tlaka do MPa najčešće se koriste kontinuirane mlaznice. Konusno su oblikovane i izrađene od kaljenog čelika. U uvjetima iznimno visokih tlakova i relativno niske volumetrijske stope protoka koriste se diskontinuirane mlaznice. Karakterizira ih umetak od safira. Tipični primjeri za svaki tip prikazani su na slici 24 [23].



Slika 25. vrste mlaznica a) kontinuirana mlaznica b) diskontinuirana mlaznica sa safirnim umetkom [23]

9.3. Trošenje mlaznica

Potrebna svojstva mlaznica u velikoj mjeri ovise o različitim uvjetima primjene i uzvodnim uvjetima. Na slici 25 prikazani uzvodni uvjeti [24].



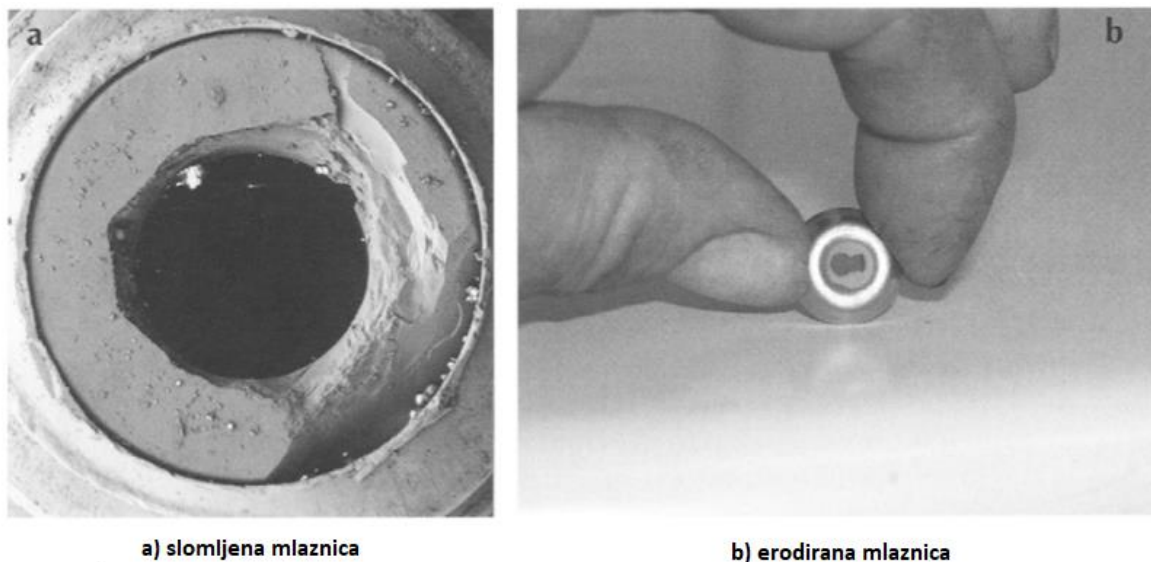
Slika 26. utjecaj uzvodnih uvjeta na izvedbu mlaznica [24]

Ovisno o volumetrijskom protoku koji isporučuje pumpa učinkovitost se može smanjiti i do 50% ako se primjenjuju loši uzvodni uvjeti. Tablica 3 navodi preporuke za odabir materijala mlaznice kao i funkcije radnih uvjeta [24].

Tablica 3. Preporučeni materijali mlaznica ovisno o uvjetima rada [24]

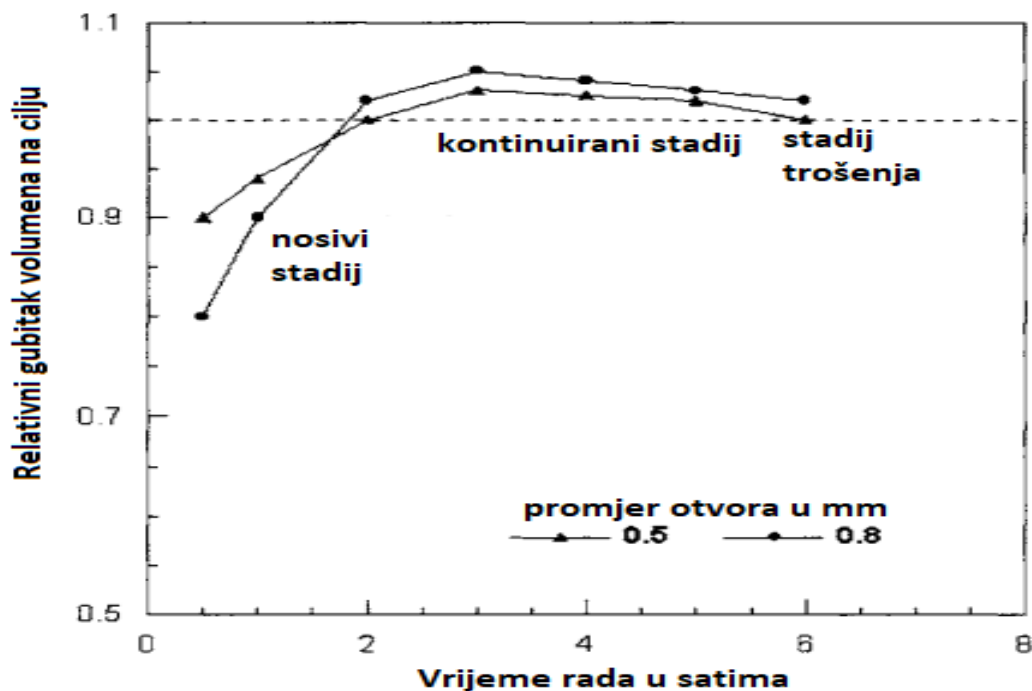
| Preporučeni materijal | Uvjeti rada |
|-----------------------|--|
| Karbid | Prljava, nefiltrirana voda; tlak ispod 140 MPa |
| Čelik | Voda filtrirana na 65 μ m ili više; tlak ispod 140 MPa |
| Safir | Voda filtrirana do 25 μ m; tlak iznad 140 MPa |

Trošenje mlaznica može u konačnici dovesti do loma tijela mlaznice ili do ravnomjernog smanjenja izlaznog promjera mlaznice. Oba slučaja su prikazana na slici 26.



Slika 27. Oštećenja mlaznica [24]

Istrošenost mlaznica ovisi o: radnom tlaku, kvaliteti vode, konstrukciji i materijalu mlaznice. Tijekom izvedbe diskontinuirane mlaznice razlikujemo tri stadija: uvodni stadij, kontinuirani stadij i stadij trošenja. Valja istaknuti da se uvjeti protoka poboljšavaju u uvodnom stadiju. Razlog su oštri kutovi unutar mlaznice, a one se troše zbog protoka vode velike brzine. Poboľšani uvjeti protoka dovode do povećanja sposobnosti uklanjanja materijala vodenim mlazom što je ujedno i prikazano na slici 27 [24].



Slika 28. Stadiji trošenja mlaznice [24]

Općenito vijek trajanja mlaznica i karakteristike trošenja su usko povezani s vrstom operativnih uvjeta rada. Istraživanja pokazuju da je sadržaj veziva najvažniji utjecajni parametar za karbidne mlaznice. Veća količina veziva će u konačnici rezultirati manjom količinom trošenja mlaznica. Izniman učinak kvalitete vode na trošenje mlaznice je istaknut u 4. i 5. tablici [25].

Tablica 4. Učinci kvalitete vode na vijek trajanja mlaznice [25]

| Obrada vode | Životni vijek mlaznice u satima |
|--------------------------------|---------------------------------|
| Voda iz slavine | 34 |
| Ionska izmjena (omekšana voda) | 78 |
| Obrnuta osmoza | 200 |
| Deionizirana voda | Više od 200 |

Tablica 5. Utjecaj veličine filtera na vijek trajanja mlaznice [25]

| Veličina filtera u μm | Životni vijek mlaznice u satima |
|----------------------------------|---------------------------------|
| 10 | 80 |
| 50 | 50 |
| 100 | 20 |

10. Metodički dio

10.1. Analiza nastavnog programa srednje strukovne škole u sadržaju teme

Tema diplomskog rada je primjena tvrdih metala za izradu mlaznica za vodeno rezanje, no u metodičkom dijelu fokusirati ću se na tvrde metale. Analizom srednjoškolskog strukovnog kurikulumu smatram da bi se tema najelegantnije mogla implementirati u nastavni program strojarskog tehničara odnosno u predmet Tehnički materijali. Strojarski tehničar usvaja teorijska znanja o različitim vrstama metala i materijala općenito, izučava njihovu primjenu, svojstva itd.

Tehnički materijali se poučavaju u 1. u 2. razredu s razlikama u fondovima sati. U 1. razredu fond sati je 70 sati godišnje dok je u 2. razredu fond sati 35, odnosno u prvom razredu učenici imaju opterećenje od 2 sata tjedno dok u drugom razredu imaju opterećenje od jednog sata tjedno.

Učenici u 1. razredu obrađuju svojstva vrste i primjenu metala, dok se u 2. razredu fokusiraju na različite tehnološke postupke u kojima se poboljšavaju svojstva metala, stoga ću temu diplomskog rada implementirati u 1. razred.

Važno je istaknuti da su različite varijacije tvrdih metala naširoko zastupljene u različitim sustavima proizvodnje, te se sama primjena i različite varijacije tvrdih metala kontinuirano istražuju i unaprjeđuju, te se opravdano može pretpostaviti da će u budućnosti tvrdi metali biti još zastupljeniji.

Upravo iz tih razloga smatram da je nužno da učenici nadodaju i ova teorijska znanja prilikom svog strukovnog obrazovanja. U trenutačnim važećim nastavnim programima nije zastupljen sadržaj iz diplomskog rada kao nastavni sadržaj.

10.2. Reducirani nastavni program

U tablici 6. je prikazan nastavni program predmeta Tehnički materijali s implementiranim dijelom iz diplomskog rada.

Tablica 6. Nastavni program predmeta Tehnički materijali za 1. razred [26]

| | |
|---|---|
| U prvom razredu polaznik će steći sljedeće ishode učenja: | 1. navesti podjelu tehničkih materijala 2. razlikovati načine dobivanja tehničkih materijala 3. koristiti standardne oznake materijala (HRN, ISO, EN) |
| Razrada | |
| Nastavne cjeline | Razrada – Nastavne teme |
| Osnove metalografije | Tehnički materijali u strojarstvu, vrste, značaj i svojstva (općenito) Osnove kristalografije Unutarnja građa čistih metala i slitina Pretvorbe kristalnih rešetki Kristalizacija i taljenje, fazni dijagrami Fe-C dijagram |
| Željezo i legure željeza | Vrste željeznih ruda Načini dobivanja željeza Vrste sirovog željeza: <ul style="list-style-type: none"> • bijelo sirovo željezo • sivo sirovo željezo Vrste ljevova: <ul style="list-style-type: none"> • sivi i tvrdi • žilavi • kovkasti • čelični • verimikularni Označavanje ljevova i izbor prema svojstvima Proizvodnja čelika - načini dobivanja Vrste čelika prema kemijskom sastavu Označavanje čelika prema HRN i EN Vrste čelika prema namjeni: <ul style="list-style-type: none"> • konstrukcijski • specijalni • alatni Izbor čelika prema određenim svojstvima i preporukama namjene Standardizacija čeličnih poluproizvoda: <ul style="list-style-type: none"> • profili • limovi • cijevi i dr. |

| | |
|---|---|
| <p>Obojeni metali i njihove legure</p> | <p>Podjela obojenih metala:</p> <ul style="list-style-type: none"> • laki • teški • plemeniti • legure obojenih metala <p>Proizvodnja, svojstva i primjena:</p> <ul style="list-style-type: none"> • bakar i legure bakra (mjed i bronce) • cink i legure cinka • olovo i legure olova • kositar i legure kositra • ležajne legure • legure za lemljenje • teški obojeni metali (Cr, Ni, Mn, Co, Mo, W, V) • aluminij i njegove legure • magnezij i njegove legure <p>Označavanje legura obojenih metala i njihov izbor prema svojstvima</p> |
| <p>Tvrđi metali na bazi volfram karbida (WC)</p> | <p>Tvrđi metali, općenita svojstva, primjena (WC) Tvrđi metali na bazi Co (WC-Co) Tvrđi metali na bazi Ni (WC-Ni) Tvrđi metali na bazi Fe (WC-Fe)</p> |
| <p>Osnove toplinske obrade</p> | <p>Definicija termičke obrade i njen značaj u strojarstvu Fazne pretvorbe kod željeza Postupci žarenja:</p> <ul style="list-style-type: none"> • normalizacijsko • rekristalizacijsko • sferoidizacijsko žarenje • žarenje za redukciju napetosti <p>Kaljenje i postupci kaljenja</p> <ul style="list-style-type: none"> • TTT dijagrami: izotermički, anizotermički • zakaljivost i prokaljivost • utjecaj ugljika • utjecaj unošenja topline <p>Popuštanje, vrste i svrha, utjecaj na žilavost Cementiranje i nitriranje, vrste, svrha (velike tvrdoće) Ostali termokemijski postupci (informativno) Izbor režima toplinske obrade i njihove ovisnosti o uporabnim svojstvima.</p> |
| | <p>Vrste, svojstva i primjena materijala:</p> |

| | |
|--|---|
| Ostali tehnički materijali | <p>Tvrđi metali i rezna keramika Materijali za brušenje i poliranje Vatrootporni materijali Polimerni materijali Kompozitni materijali Materijali za izolaciju Sredstva za hlađenje i podmazivanje Materijali za brtvljenje</p> |
| Korozija metala i zaštita | <p>Osnove korozije:</p> <ul style="list-style-type: none"> • kemijska i tehnička korozija <p>Podjela korozija prema procesu</p> <ul style="list-style-type: none"> • kemijska korozija: afinitet tvari, nastanak, brzina • elektrokemijska korozija: korozioni članak, razlika potencijala <p>Kisikova i vodikova depolarizacija Korозиjska otpornost metala (legure željeza, bakra, aluminijska i dr.) Zaštitne metalne i nemetalne prevlake:</p> <ul style="list-style-type: none"> • pocinčavanje • galvanizacija • plastifikacija <p>Električne metode zaštite:</p> <ul style="list-style-type: none"> • anodna i katodna zaštita |
| Otpad tehničkih materijala i zaštita okoliša | <p>Vrste otpada i upravljanje otpadom Mogućnost recikliranja, označavanje prema EU normama i vrste recikliranja Označavanje utjecaja proizvoda na okoliš</p> |

10.3. Priprema za nastavu

S V E U Č I L I Š T E U R I J E C I
STUDIJ POLITEHNIKE

Ime i prezime: Danijel Biljman

P R I P R E M A
Z A I Z V O Đ E N J E N A S T A V E

Škola: Tehnička škola Rijeka

Mjesto: Rijeka

Razred: 1.S

*Zanimanje: Strojarski tehničar

Nastavni predmet: Tehnički materijali

Kompleks: Tvrdi metali

Metodička (nastavna) jedinica: Tvrdi metali, svojstva, primjena, veziva (WC)

**Datum izvođenja:

**Mentor:

SADRŽAJNI PLAN

Podjela kompleksa na teme (vježbe, operacije)

| Redni broj | Naziv tema u kompleksu | Broj sati | |
|------------|--|-----------|--------|
| | | teorija | vježbe |
| 1. | Tvrđi metali, općenita svojstva, primjena, veziva (WC) | 1 | 0 |
| 2. | Tvrđi metali na bazi Co (WC-Co) | 1 | 0 |
| 3. | Tvrđi metali na bazi Ni (WC-Ni) | 1 | 0 |
| 4. | Tvrđi metali na bazi Fe (Wc-Fe) | 1 | 0 |

Karakter teme (vježbe, operacije) – metodičke jedinice

Formativni karakter – obrada sadržaja u svrhu osposobljavanja učenika u vidu opisivanja tvrdih metala, svojstva, veziva, primjene.

PLAN VOĐENJA ORGANIZACIJE NASTAVNOG PROCESA

Cilj (svrha) obrade metodičke jedinice:

Stjecanje spoznaja o tvrdim metalima na bazi volfram karbida, njihovim svojstvima, primjeni, vezivima prednostima i nedostacima.

Ishodi učenja (postignuća koja učenik treba ostvariti za postizanje cilja):

ZNANJE I RAZUMIJEVANJE (*obrazovna postignuća*):

- Opisati tvrde metale na bazi volfram karbida
- Objasniti prednosti i nedostatke tvrdih metala
- Opisati mehanička svojstva tvrdih metala
- Opisati i nabrojati različita vezivna sredstva
- Objasniti primjenu tvrdih metala

VJEŠTINE I UMIJEĆA (*funkcionalna postignuća*):

- Skicirati WC fazni dijagram
- Predstaviti vlastito kritičko mišljenje o važnosti primjene tvrdih metala

SAMOSTALNOST I ODGOVORNOST (*odgojna postignuća*):

- Argumentirano odgovarati na postavljena pitanja uz aktivno sudjelovanje u nastavi
- Suradivati s učenicima i nastavnikom

Organizacija nastavnog rada – artikulacija metodičke jedinice:

| Dio sata | Faza rada i sadržaj | Metodičko oblikovanje | Trajanje (min) |
|-----------------|---|--|-----------------------|
| Uvodni dio | -Popularno predavanje o tvrdim metalima -Motivacija učenika | -dijalog s učenicima -frontalni oblik rada | 8 |
| Glavni dio | -Obrada novog nastavnog sadržaja -Prikaz strukture WC-a -Prikaz mehaničkih i toplinskih svojstva WC karbida -Prikaz klasičnih i alternativnih veziva | -dijalog s učenicima - demonstracija -frontalni oblik rada | 30 |
| Završni dio | -Letimično provjeravanja znanja -Diskusija s učenicima | -dijalog s učenicima | 7 |

Posebna nastavna sredstva, pomagala i ostali materijalni uvijati rada:

Nastavna pomagala:

- školsko računalo
- platno
- projektor

Nastavna sredstva:

- MS PowerPoint

Korelativne veze metodičke jedinice s ostalim predmetima i područjima:

- Strojarske tehnologije

Metodički oblici koji će se primjenjivati tijekom rada:

Uvodni dio:

- Popularno predavanje o tvrdim metalima

Glavni dio:

- Obrada novog nastavnog sadržaja
- Prikaz strukture WC-a
- Prikaz mehaničkih i toplinskih svojstva WC karbida
- Prikaz klasičnih i alternativnih veziva

Završni dio:

- Letimično provjeravanje znanja
- Diskusija s učenicima

Izvori za pripremanje nastavnika:

1. Filetin, T., Kovačilek, F., Indof, J., Svojstva i primjena materijala. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.

Izvori za pripremanje učenika:

1. Franjo Toufa, "TEHNIČKI MATERIJALI 1", Školska knjiga, Zagreb, 2007.
2. Prezentacije i prilozi s predavanja

TIJEK IZVOĐENJA NASTAVE – NASTAVNI RAD**Uvodni dio:**

U uvodnom dijelu predavanja pozdravljam učenike, te počinjem diskusiju pitanjima poput: Što mislite kakvi materijali se koriste u uvjetima velikih mehaničkih opterećenja?

Nakon odgovora, ističem učenicima da se uglavnom radi o tvrdim metalima te da je to ujedno i naša današnja tema.

Potom im putem projektora projiciram videozapis strojnih elemenata koji su izrađeni od različitih varijacija tvrdih metala poput različitih reznih alata, reznih pločica za tokarenje itd.

Glavni dio:

U glavnom dijelu pokrećem PowerPoint prezentaciju, te učenicima definiram što su to tvrdi metali.

Učenicima prikazujem strukturu volfram karbida(WC), te im ističem da se radi o jednom od najtvrdijih materijala današnjice.

Ističem učenicima svrhovitost tvrdih metala, te kratki povijesni aspekt.

Nakon toga učenicima ukratko prikazujem proces proizvodnje tvrdih metala s naglaskom na WC-Co tvrde metale. Govorim da se tvrdi metali sastoje od karbida i veziva, te da se trenutačno kao vezivno sredstvo najčešće koristi kobalt, ali da se zbog visoke cijene, otežanog skladištenja i neotpornosti na koroziju istražuju i implementiraju i druga veziva primjerice: nikal, željezo i različite željezne legure, no ističem da ćemo WC s alternativnim vezivnim sredstvima detaljnije obrađivati na sljedećim predavanjima.

Učenicima potom prikazujem mehanička, toplinska svojstva tvrdih metala putem dijagrama, te ih s učenicima uspoređujem s prethodno obrađenim metalima i legurama.

Na kraju prezentacije pitam učenike ukoliko imaju eventualne nejasnoće.

Završni dio:

U završnom dijelu cilj je propitati usvojenost novog nastavnog sadržaja, to ostvarujem putem letimičnog predavanja u kojemu učenike pitam pitanja poput:

- 1.Što su to tvrdi metali?
- 2.Kakva mehanička svojstva posjeduju tvrdi metali WC-Co?
- 3.Koja su alternativa veziva?
- 4.Koje su prednosti, a koji nedostaci tvrdih metala?

Aktivnim odgovaranjem na postavljena pitanja u konačnici mogu dobiti odličnu kako bi se nagradilo njihovo zalaganje.

Izgled ploče

Tvrđi metali

Tvrđi metal- je tehnički materijal koji se odlikuje velikom tvrdoćom, osobito na visokim temperaturama, i otpornošću prema trošenju

Prednosti: Izuzetna mehanička svojstva, jedan od najtvrdih materijala

Nedostatci: Visoka cijena i otežano skladištenje kobalta

Vezivna sredstva:

- Co
- Ni
- Fe

Metalurgija praha – priprema praha, kompaktiranje, sinteriranje

11. ZAKLJUČAK

Tvrđi metali su izuzetno zastupljeni u industriji gdje su poželjna izuzetna svojstva. Kroz diplomski rad su opisana različite kombinacije veziva volfram karbida. WC-Co tvrđi metali posjeduju izuzetno dobra svojstva tvrdoće, žilavosti, otpornosti na trošenje, ali su skloni korozivnom djelovanju i imaju visoku tržišnu cijenu što ujedno i potiče na potragu za alternativnim vezivima.

Alternativna veziva poput nikla, željeza i ostalih željeznih legura posjeduju obećavajuća svojstva, ali su još nužna daljnja istraživanja i usavršavanja prije masivnije implementacije u proizvodnji.

Rezanje vodenim mlazom ima mnogobrojne prednosti u odnosu na konvencionalne načine obrade, ali je za izradu pojedinih dijelova potrebna integracija posebnih vrsta metala.

Mlaznice su jedan od najosjetljivijih dijelova sustava jer su izložene ogromnim tlakovima i brzinama strujanja fluida, te je izrazito važan odabir materijala sa dobrim mehaničkim svojstvima poput tvrdih metala na bazi WC-a.

Zahvale: Ovaj je rad djelomično poduprla Hrvatska zaklada za znanost pod brojem projekta UIP-2017-05-6538 Nanostrukturirani tvrđi metali—novi izazovi za metalurgiju praha.

LITERATURA

- [1] Hugo M. Ortner, Peter Ettmayer, "The history of the technological progress of hardmetals", Penn State University, USA, 2014.
- [2] Sarin VK, Mari D, editors. Comprehensive hard materials. Elsevier; 2014.
- [3] Pierson, Hugh O., „Handbook of Chemical Vapor Deposition (CVD): Principles, Technology, and Applications. William Andrew Inc“. 1992.
- [4] Jacobs, L.; M. M. Hyland; M. De Bonte, "Comparative study of WC-cermet coatings sprayed via the HVOF and the HVOF Process", 1998.
- [5] Blau, Peter J., „Wear of Materials“, 2003.
- [6] Pohanish, Richard P. „Sittig's Handbook of Toxic and Hazardous Chemicals and Carcinogens“, 2012.
- [7] Lackner, A. and Filzwieser A., "Gas carburizing of tungsten carbide (WC) powder", 2002.
- [8] Yankun Yang, Chaoqun Zhang, "Additive manufacturing of WC-Co hardmetals", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020.
- [9] M. Walbrühl, D. Linder, J. Ågren, A. Borgenstam, A new hardness model for materials design in cemented carbides, Int. J. Refract. Met. Hard Mater, 2018
- [10] Jonke M, Klünsner T, Supancic P, Harrer W, Glätzle J, Barbist R, Ebner R, „Strength of WC-Co hard metals as a function of the effectively loaded volume“ 2017.
- [11] Xie XC, Lin CG, Jia CC, Cao RJ, „Effects of process parameters on quality of ultrafine WC/12Co injection molded compacts“, 2015.
- [12] T. Teppernegg, „High temperature mechanical properties of WC–Co hard metals“, 2016.
- [13] H. E. EXNER, J. GURLAN, „a review of influencing some mechanical properties of tungsten carbide-cobalt alloys“, 1998.
- [14] Bingliang LIANG, Yunlong AI, „Mechanical Properties of WC-Co Cemented Carbide Prepared via Vacuum Sintering“ 2017.
- [15] E.O. Correa, J.N. Santos, „Microstructure and mechanical properties of WC Ni–Si based cemented carbides developed by powder metallurgy“, 2010.
- [16] Yang Gao, Bing-Hui Luo, „Mechanical properties and microstructure of WC-Fe-Ni-Co cemented carbides prepared by vacuum sintering“, 2017.

- [17] Sima A. Alidokht, Jacques Lengaigne, „Effect of microstructure and properties of Ni-WC composite coatings on their solid particle erosion behavior“, 2012.
- [18] O. J. Ojo-Kupoluyi, S. M. Tahir, “ Mechanical properties of WC-based hardmetals bonded with iron alloys – a review“, 2016.
- [19] Xiaolong Cai, Yunhua Xu, „Fracture toughness of WC-Fe cermet in W-WC-Fe composite by nanoindentation“, 2017.
- [20] Janet Folkes, “ Waterjet—An innovative tool for manufacturing“, 2009.
- [21] Accustream , „Abrasive Waterjet Cutting. Applications and Capability“, 2007.
- [22] Agnew, R.W., „Investigating the Effects of Abrasive Particle Size Using an Abrasive Waterjet“, 2001.
- [23] Andreas Momber, „ Hydrodemolition of concrete surfaces and reinforced concrete structures“, 2005.
- [24] OlegUrazmetov, „Investigation of the flow phenomena in high-pressure water jet nozzles“, 2021.
- [25] Jiwei Wen, „Research on the structures and hydraulic performances of the typical direct jet nozzles for water jet technology“, 2019.
- [26] Strukovni kurikulum za stjecanje kvalifikacije strojarski računalni tehničar, asoo.hr, s Interneta,https://www.asoo.hr/UserDocsImages/kurikulumi_OO/Kurikulum_Strojarski%20ra%C4%8Dunalni%20tehni%C4%8Dar.pdf, 23.7. 2022.

PRILOZI

I. CD-R disc