

# Primjena rashladnih sredstava kod obrade odvajanjem čestica

---

Župan, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:378514>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-17**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering  
and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Luka Župan**

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof.dr.sc. Damir Ciglar

Student:

Luka Župan

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad radio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru prof.dr.sc. Damiru Ciglaru na izuzetnoj pomoći pri pisanju ovog rada. Svojom pristupačnošću, razumijevanjem i bogatom literaturom koju mi je priložio učinio je pisanje ovog rada jednostavnim i zanimljivim.

Također se zahvaljujem svojoj obitelji koja je bila puna podrške i motivacije u dosadašnjem dijelu studiranja.

Luka Župan



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **LUKA ŽUPAN** Mat. br.: 0035193519

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PRIMJENA RASHLADNIH SREDSTAVA KOD POSTUPAKA OBRADJE ODVAJANJEM**

Naslov rada na engleskom jeziku: **APPLICATION OF CUTTING FLUIDS IN MATERIAL REMOVAL PROCESSES**

Opis zadatka:

Obzirom da zadaća rashladnog sredstva nije samo hlađenje, pod pojmom rashladno sredstvo se zapravo podrazumijeva sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje. Iako je danas česta takozvana „suha obrada“, još uvijek je kod postupaka obrade odvajanjem čestica primjena rashladnih sredstava opravdana.

U radu je potrebno iz dostupne literature opisati različite vrste i načine dovođenja rashladnih sredstava u zonu rezanja kod postupaka obrade odvajanjem čestica. Posebni osvrt u radu treba dati na suhu obradu, obradu s minimalnom primjenom sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje, te Kriogenu obradu.

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Zadatak zadao:

  
Prof.dr.sc. Damir Ciglar

Rok predaje rada:

1. rok: 24. veljače 2017.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.

3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.

2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.

3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

v.d. predsjednika Povjerenstva:

  
Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

**SADRŽAJ:**

POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	IV
SAŽETAK .....	V
1.UVOD .....	1
2. POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM ČESTICA.....	3
2.1. Podjela postupaka obrade .....	3
2.2. Gibanja na alatnim strojevima .....	4
2.3. Geometrija reznog alata .....	5
2.4. Prednosti i nedostaci ooč.....	7
3. TOPLINSKE POJAVE KOD POSTUPAKA OOČ.....	8
4. SREDSTVA ZA HLAĐENJE, ISPIRANJE I PODMAZIVANJE.....	10
4.1 Primjena i karakteristike SHIP-a .....	10
4.2 Utjecaj SHIP-a na okoliš i čovjeka.....	15
4.3. Troškovi uporabe SHIP-a.....	20
5. SUHA STROJNA OBRADA.....	21
5.1. Suvremeni rezni materijali.....	24
6. OBRADA S MINIMALNOM PRIMJENOM SHIP-a.....	28
7. KRIOGENA OBRADA.....	32
7.1. Karakteristike dušika .....	33
7.2. Proizvodnja tekućeg dušika .....	35
7.3. Kriogena strojna obrada.....	36
8. ZAKLJUČAK.....	38
LITERATURA .....	39

## POPIS SLIKA

<b>Slika 1.</b> Tok materijala kroz proizvodni sustav .....	1
<b>Slika 2.</b> Podjela postupaka obrade odvajanjem čestica .....	3
<b>Slika 3.</b> Neki od alata kod obrade odvajanjem čestica .....	5
<b>Slika 4.</b> Kutovi reznog alata.....	6
<b>Slika 5.</b> Glavni izvori topline .....	8
<b>Slika 6.</b> Raspodjela temperature u zoni rezanja.....	9
<b>Slika 7.</b> Mehanizam trošenja u ovisnosti o temperaturi .....	9
<b>Slika 8.</b> Glodanje s vanjskom primjenom SHIP-a.....	10
<b>Slika 9.</b> Relativni udio vode, emulgatora i inhibitora korozije, ulja u pojedinim vrstama SHIP-a.....	12
<b>Slika 10.</b> SHIP kroz spiralno svrdlo .....	14
<b>Slika 11.</b> SHIP kroz tokarski nož .....	14
<b>Slika 12.</b> Shema gubitaka SHIP-a tijekom obrade .....	16
<b>Slika 13.</b> Primjer zagađenja nekontroliranim SHIP-om .....	17
<b>Slika 14.</b> Opasnosti za kožu radnika pri radu sa SHIP-om.....	19
<b>Slika 15.</b> Primjeri kožnih oboljenja izazvanih SHIP-om .....	19
<b>Slika 16.</b> Struktura troškova izrade glave motora.....	20
<b>Slika 17.</b> Prednosti djelovanja razvojem suhe obrade.....	21
<b>Slika 18.</b> Prednosti suhe obrade .....	22
<b>Slika 19.</b> Zavisnost primjene SHIP-a o postupku obrade .....	23
<b>Slika 20.</b> Primjeri alata za suho glodanje .....	23
<b>Slika 21.</b> Primjeri alata za suho glodanje .....	24
<b>Slika 22.</b> Tokarski nož s reznom pločicom od cermeta .....	25
<b>Slika 23.</b> Rezna pločica s reznim vrhom od CBN-a.....	26
<b>Slika 24.</b> Rezni alati od PCD-a.....	27
<b>Slika 25.</b> Shematski prikaz dobave SHIP-a kod MQL .....	28
<b>Slika 26.</b> Rezni alat s unutarnjom dobavom SHIP-a .....	29
<b>Slika 27.</b> Shematski prikaz eksterne MQL jedinice kod obrade tokarenja.....	31
<b>Slika 28.</b> Dewar-ove posude tvrtke Day-Impex Ltd .....	32
<b>Slika 29.</b> Fazni dijagram dušika .....	33
<b>Slika 30.</b> Sastav zraka .....	34
<b>Slika 31.</b> Postrojenje za proizvodnju dušika .....	35

**Slika 32.** Postavke opreme za kriogenu obradu..... 36



**POPIS TABLICA**

<b>Tablica 1.</b> Zadaci, zahtjevi i očekivani rezultati primjene SHIP-a .....	11
<b>Tablica 2.</b> Pregled tržišta sredstava za hlađenje ispiranje i podmazivanje u Europi .....	15

## SAŽETAK

Obrada odvajanjem čestica je jedna od najvažnijih proizvodnih tehnologija u modernoj industriji. Većina metalnih dijelova raznih strojeva, aparata i konstrukcija dobiva svoj konačni oblik, tražene dimenzije i odgovarajuću kvalitetu obrađene površine pomoću te tehnologije.

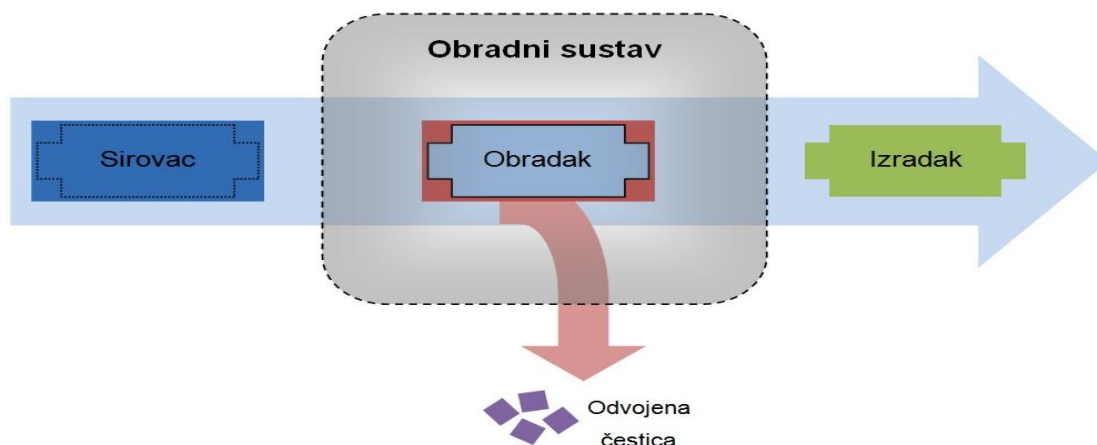
U uvodnom dijelu rada dane su kratke podjele kod obrade odvajanjem čestica (postupci, gibanja, alati). Zatim je spomenut nastanak štetne topline koja se pojavljuje zbog trenja između alata i obratka, a to je uzrok plastične deformacije i ubrzane istrošenosti alata i samim time gubi se na kvaliteti obrađene površine. Iz tog razloga se kod postupaka obrade odvajanjem čestica koristi rashladno sredstvo. Njegova zadaća nije samo hlađenje, već se pod tim pojmom zapravo podrazumijeva sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje (SHIP).

U radu su iz dostupne literature opisane različite vrste i načini dovođenja rashladnih sredstava u zonu rezanja kod postupaka obrade odvajanjem čestica. Posebni osvrt u radu posvećen je suhoj obradi, obradi s minimalnom primjenom sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje te kriogenoj obradi. To su nove vrste hlađenja koje čine temelj suvremenog održivog razvoja i cilj im je postizanje visokih performansi u obradi odvajanjem čestica uz povećanje sigurnosti i smanjenje troškova kao i uklanjanje negativnog utjecaja rashladnog sredstva na ljude i okoliš

## 1.UVOD

Brzi razvoj tehnologije i sve veća konkurencija na svjetskom tržištu nameću vrlo oštre zahtjeve prema proizvodnji u strojarstvu. U industrijskoj proizvodnji je cilj dobiti gotove i polugotove proizvode pretvaranjem sirovog materijala pomoću strojeva. Utjecaj recesije na privredu i proizvodnju je svakim danom sve veći, a industrijska proizvodnja ima jako veliki utjecaj na razvoj cjelokupnog društva i pojedinca u državi, stoga je posve jasno da je neophodno pokrenuti i razvijati industrijsku proizvodnju. Zadatak suvremene proizvodnje je ekonomična izrada proizvoda projektiranog oblika, dimenzija i propisane kvalitete te njegova pravovremena isporuka kupcu. Za zadovoljavanje tih zadataka potrebno je dobro poznavanje strojarskih tehnologija, a posebno tehnologije obrade odvajanjem čestica.

Obrada odvajanjem čestica je jedna od najvažnijih proizvodnih tehnologija u industriji koja u nekim razvijenijim državama čini blizu 30% ukupnog BDP-a. Danas se još uvijek oko 80% svih dijelova strojeva obrađuje postupcima obrade odvajanjem čestica. To je tehnologija koja se sastoji od niza različitih postupaka. Kreće se od početnog volumena od kojeg se odstranjuje određena količina materijala u obliku odvojenih čestica, a sve u svrhu izrade odnosno formiranja gotovog izratka. Obrada odvajanjem čestica se obavlja na alatnom stroju s unaprijed određenim alatima, kako bi se dobio proizvod propisane kvalitete u što kraćem vremenu. Izrada nekog predmeta ili dijela stroja sastoji se od više operacija obrade, a tu spadaju postupci kao što su odrezivanje, glodanje, tokarenje, blanjanje, bušenje, brušenje itd. Slika 1. prikazuje tok materijala kroz obradni odnosno proizvodni sustav.



**Slika 1.** Tok materijala kroz proizvodni sustav [1]

Na slici 1. vidi se da je sirovac u postupku formiranja izratka u proizvodnom sustavu zapravo početni komad materijala prije obrade (šipka, ploča, odljevak, otkivak...). Obradak je isti taj komad stegnut na alatnom stroju, dok je izradak komad nakon obrade, odnosno nakon skidanja s alatnog stroja. Nastala odvojena čestica nema neku vrijednost, ali ju je potrebno na odgovarajući način zbrinuti.

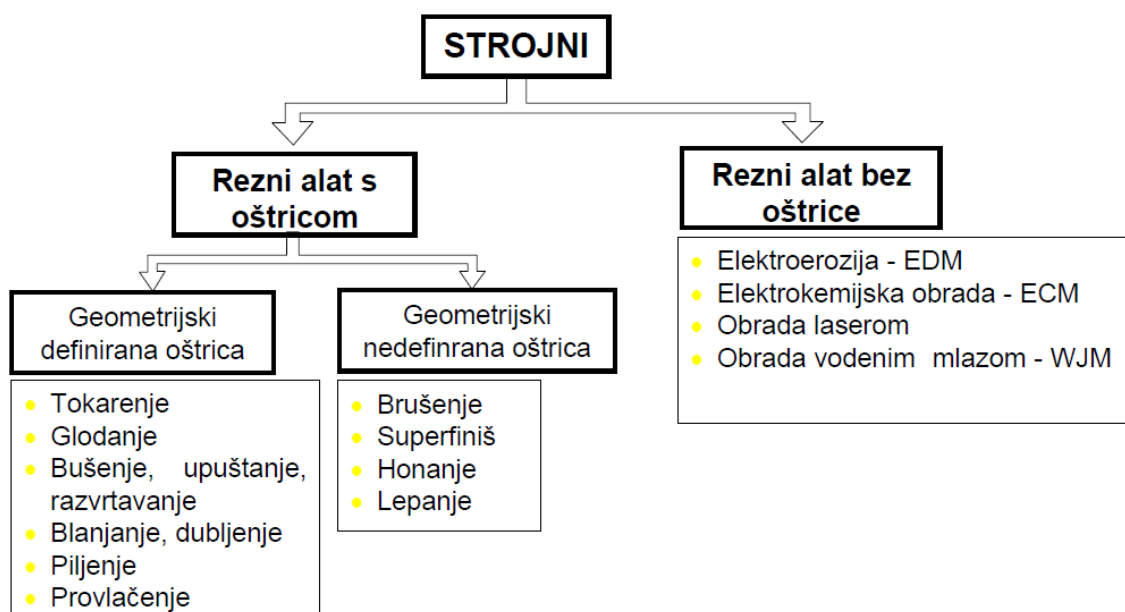
Višim vrijednostima parametara rezanja kod postupaka nudi se mogućnost postizanja veće produktivnosti, ali to naravno ima i svoje nedostatke: rizik za pogoršanje kvalitete površine i smanjenje vijeka trajanja reznog alata zbog povećanog stvaranja topline. Toplina uzrokuje povećano trošenje i deformaciju alata, a stvara se zbog plastične deformacije sloja materijala koji se reže i zbog trenja na mjestima dodira alata i odvojenih čestica te alata i obratka.

Zbog svih ovih navedenih rizika i nedostataka kod obrade odvajanjem čestica koriste se sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje (SHIP). Tržišni zahtjevi za tim sredstvom su svakim danom sve veći što dovodi do mogućih ekoloških katastrofa zbog štetnih posljedica na čovjeka i okoliš. Današnji razvoj novih tehnologija je nemoguć bez udovoljavanja velikim zahtjevima zaštite okoliša. Teško je naći dostojnu zamjenu za SHIP koja će davati zadovoljavajuće rezultate u smislu tehničke izvedbe i profita, ali i zamjenu koja neće biti štetna za okoliš.

## 2. POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM ČESTICA

### 2.1. Podjela postupaka obrade

Kao što je rečeno izrada nekog predmeta ili dijela stroja izvodi se prema tehnološkom procesu koji se sastoji od više operacija obrade. Obrada odvajanjem čestica prvo se dijeli na ručne (piljenje, glodanje, turpisanje) i na strojne postupke. Strojni postupci mogu se podijeliti na obradu s reznim alatom s oštricom (obrada rezanjem) i na obradu bez čvrste oštrice (bez dodira s obratkom). Dalje se obrada reznim alat s oštricom dijeli na odvajanje alatom s geometrijski definiranom oštricom (tokarenje, bušenje, upuštanje, glodanje, piljenje) i na odvajanje alatom s geometrijski nedefiniranom oštricom (brušenje, honanje, lepanje i superfiniš). Na slici 2. je detaljnije prikazana ta podjela postupaka obrade odvajanjem čestica.



**Slika 2.** Podjela postupaka obrade odvajanjem čestica [1]

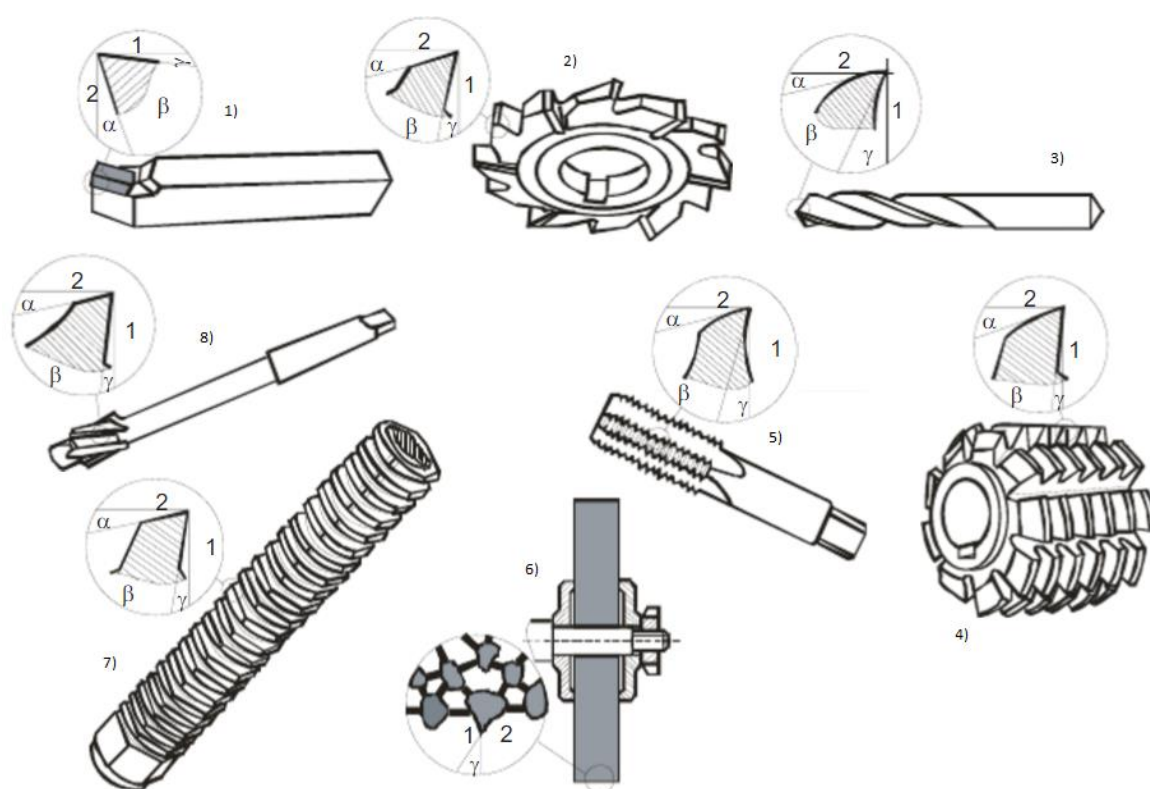
## 2.2. Gibanja na alatnim strojevima

Općenito, gibanja mogu biti rotacijska odnosno kružna i pravocrtna odnosno translacijska. Mogu se obavljati kontinuirano (neprekidno) i diskontinuirano (s prekidima). Kada se govori o gibanjima na alatnim strojevima, treba razlikovati dvije vrste, a to su: glavno i pomoćno gibanje.

- 1) **Glavno gibanje** ( $v_c$ ) je definirano brzinom rezanja, a to je ono gibanje kojim se stvara odvojena čestica. Na glavno gibanje se troši najveći dio snage, a na većini alatnih strojeva to gibanje je kontinuirana rotacija koju ovisno o vrsti stoja izvodi obradak ili rezni alat.
  
- 2) **Pomoćna gibanja** su sva ostala gibanja koja omogućavaju obradu, a sama ne vrše odvajanje čestice. Treba razlikovati dvije vrste pomoćnog gibanja:
  - a) **Posmično gibanje** ( $v_f$ ) je definirano posmičnom brzinom, a to je ono gibanje koje osigurava stalnost (kontinuitet) odvijanja procesa obrade. Na njega se troši manji dio ukupne snage stroja, a na većini alatnih strojeva to gibanje je kontinuirana translacija koju ovisno o vrsti stoja izvodi obradak ili rezni alat ili oboje.
  
  - b) **Dostavno gibanje** ( $a_p$ ) je definirano zauzimanjem dubine rezanja te gibanjem izvan obrade koje služi za primicanje i odmicanje reznog alata obratku ili obrnuto. Na većini alatnih strojeva to gibanje je kontinuirana translacija koja je zapravo posmično gibanje kod kojeg nema kontakta reznoga alata i obratka.[2]

### 2.3. Geometrija reznog alata

U procesu rezni dio alata s reznim klinom prodire u materijal obratka i pritom se odvaja odvojena čestica. Odvojena čestica se odvaja reznim klinom koji ima rezu oštricu. Rezni klin je dio reznog dijela alata koji se nastavlja u dršku alata. Drška alata služi za pričvršćivanje alata na stroj. Isti je pristup i kod drugih alata samo je razlika u geometrijskom obliku. Na slici 3. prikazani su neki od alata kod obrade odvajanjem čestica.



**Slika 3.** Neki od alata kod obrade odvajanjem čestica [3]

Na slici 3. nalaze se:

- 1) Tokarski nož
- 2) Glodalo
- 3) Svrdo
- 4) Odvalno glodalo
- 5) Ureznik
- 6) Brusna ploča
- 7) Provlakačica
- 8) Upuštal

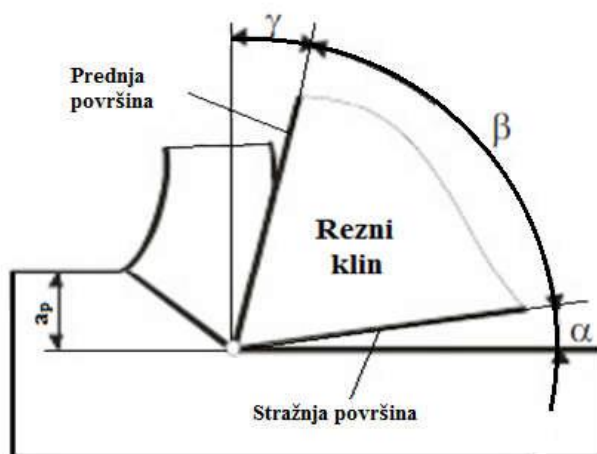
Zadatak svakog alata za obradu odvajanjem čestica jest da ispuni dva osnovna uvjeta:

- 1) skinuti određeni sloj materijala s obratka uz nastojanje da se skine što veća količina u jedinici vremena
- 2) osigurati potrebne dimenzije i odgovarajuću geometriju obratka, ali uz traženu kvalitetu obrađene površine i minimalne troškove obrade [4]

Odabir materijala reznog alata je od iznimne važnosti jer se time može značajno utjecati na troškove proizvodnje. Najčešći materijali reznog dijela alata u postupcima obrade odvajanjem čestica su brzorezni čelici, tvrdi metali, metalokeramika, rezna keramika i supertvrđi rezni materijali (bornitrid i dijamant). Naime, neki od tih materijala su jako skupi pa se najčešće alati od tvrdog metala prevlače tvrdim prevlakama i postiže se površinski sloj s ciljem zaštite od vanjskih utjecaja i povećanja otpornosti na trošenje. Postupci koji se koriste za prevlačenje su fizikalno (Physical Vapour Deposition - PVD), kemijsko (Chemical Vapour Deposition - CVD) te kemijsko s plazmom (Plasma-CVD-PA-CVD).

Svaki geometrijski definiran rezni alat je određen s tri osnovna kuta, a prikazuje ih slika 4:

- 1) Prednji kut  $\gamma$  – naziva se kut između prednje površine i ravnine, okomite na ravninu rezanja, postavljenu kroz glavnu reznu oštricu
- 2) Stražnji kut  $\alpha$  – naziva se kut između stražnje površine i ravnine rezanja
- 3) Kut klina  $\beta$  – mjeri se između prednje i stražnje površine [5]



**Slika 4.** Kutovi reznog alata [3]



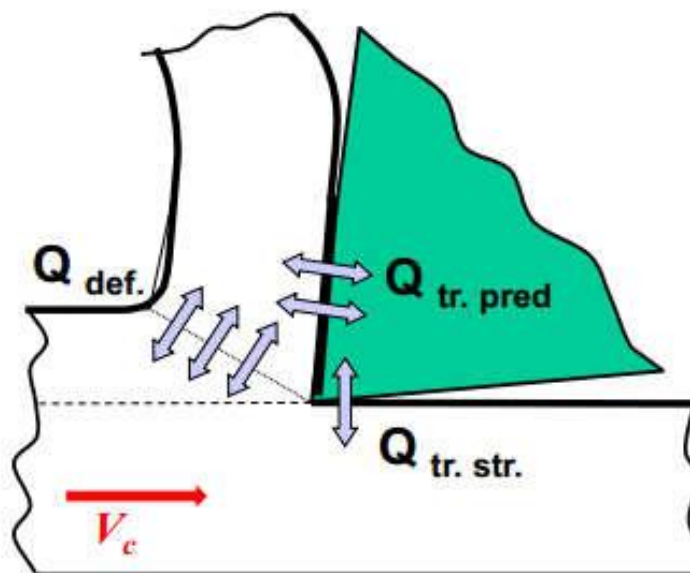
## 2.4. Prednosti i nedostaci ooč

Obrada odvajanjem čestica u većini slučajeva nije najjeftinija i najbrža tehnologija kojom bi se neki dio mogao napraviti, ali u jako puno slučajeva se nijednom drugom metodom ne može postići toliko dobra kvaliteta obrađene površine i uska tolerancija bez naknadnih završnih operacija. To je najbolji i jedini način da se formiraju oštri rubovi, ravne površine, unutarnji i vanjski profili te jedini način oblikovanja otvrdnutih (kaljenih) i krtih materijala. Može se primijeniti kod gotovo svih poznatih materijala i moguće je obrađivati i najsloženije oblike površina. Neki od nedostataka su: generiranje odvojene čestice, činjenica da je ponekad za formiranje jednog elementa obratka potrebno primijeniti više postupaka obrade i alatnih stojeva te veliki udio pomoćnih i pripremnih vremena (vrijeme zahvata alata i obratka je ponekad manje od 10% ukupnog vremena protoka pozicije) [1]

### 3. TOPLINSKE POJAVE KOD POSTUPAKA OOČ

Poznato je da dovedena energija u procesu obrade odvajanjem čestica skoro u cijelosti prelazi u toplinsku energiju. Od toga oko 20 do 30% odlazi na alat i obradak što stvara njihovo neželjeno zagrijavanje. Kod obratka nastaju toplinske deformacije tj. netočnost dužinskih mjera i slabija kvaliteta obrade, a kod alata brže istrošenje, povećanje otpora rezanja, vibracije itd. [5] Količina generirane topline u zoni obrade razmjerna je brzini rezanja i čistom vremenu obrade ili radu deformiranja i radu trenja na prednjoj i stražnjoj površini alata.

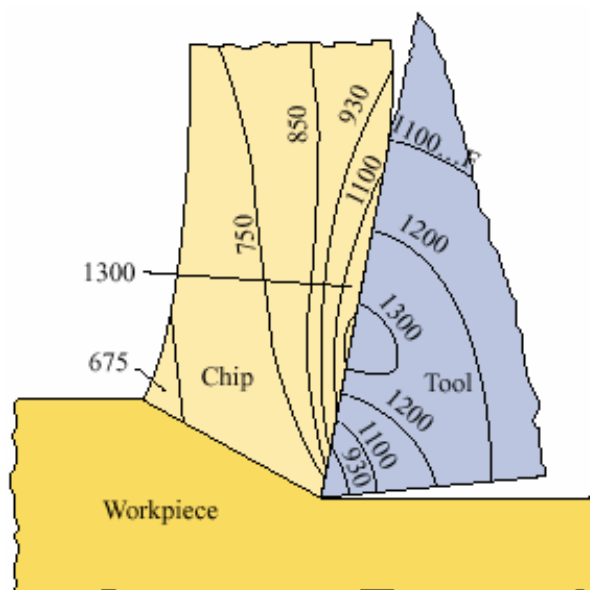
$$Q_{uk} = F \cdot v \cdot t = Q_{def} + Q_{tr}$$



**Slika 5.** Glavni izvori topline [2]

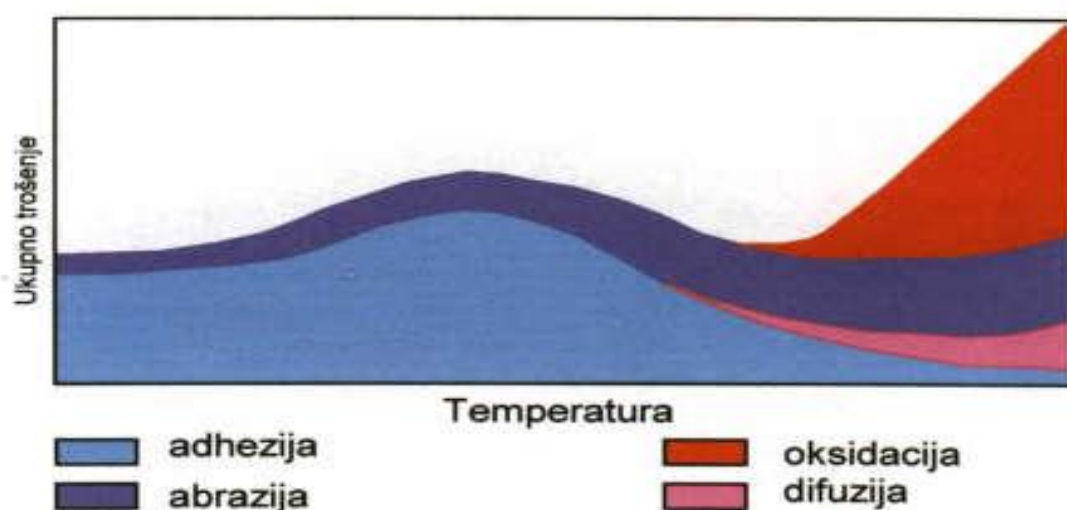
Osnovni izvori topline u procesu odvajanja čestica su kao što se vidi na slici 5: plastična deformacija  $Q_{def}$ , trenja na mjestu dodira odvojene čestice s prednjom površinom alata  $Q_{tr. pred}$  i trenje na površini dodira obratka sa stražnjom površinom alata  $Q_{tr. str.}$ . Toplina koja nastaje prenosi se na odvojenu česticu, obradak, alat, okolnu sredinu i SHIP, ako se on koristi. [2]

Slika 6 prikazuje da se na alatu u zoni rezanja nije najviša temperatura na vrhu alata nego nekoliko milimetara iznad vrha. To se događa zbog trenja između odvojene čestice i alata, i to je najčešće mjesto na kojemu dolazi do trošenja alata.



**Slika 6.** Raspodjela temperature u zoni rezanja [1]

Taj negativni utjecaj topline koja se generira u reznj zoni minimizira se upotrebom SHIP-a i tako se sprječava postizanje kritične temperature nakon koje alat ulazi u fazu brzog trošenja. Primjenom SHIP-a snižava se temperatura alata, obratka i alatnog stroja, a povećava se kvaliteta obrađene površine i postojanost alata. [5] Kada postoji velika adhezija između alata i obratka SHIP je neophodan za sprječavanje trošenja alata. Mehanizmi trošenja adhezija i abrazija su mehanička oštećenja i javljaju se uglavnom pri niskim temperaturama obrade, a oksidacija i difuzija su oštećenja uslijed kemijskog djelovanja između alata i obratka koja su karakteristična za povišene temperature kao što pokazuje slika 7.

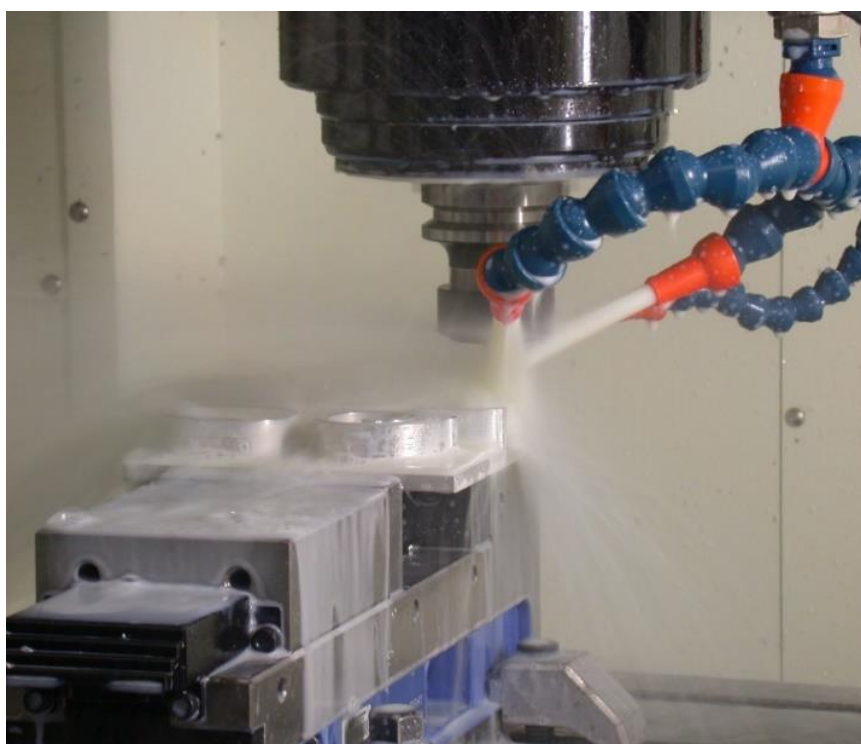


**Slika 7.** Mehanizam trošenja u ovisnosti o temperaturi [1]

## 4. SREDSTVA ZA HLAĐENJE, ISPIRANJE I PODMAZIVANJE

### 4.1 Primjena i karakteristike SHIP-a

Sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje (SHIP) su tekućine kojima je glavna zadaća, ali ne i jedina, hlađenje i podmazivanje alata i obratka u zoni obrade gdje se sve većim brzinama rezanja povećava generirana količina topline. Jednako su važni i ostali zadaci SHIP-a u obradi odvajanjem čestica kao što su ispiranje (odvođenje) odvojene čestice i čestica nastalih zbog trošenja alata iz zone obrade, čišćenje radnog mjesta, kratkotrajna zaštita obratka od korozije te povezivanje i odvođenje sitnih čestica i prašine kod brušenja. Hlađenjem se iz zone rezanja odvodi toplina, a podmazivanjem se smanjuje trenje između alata i obratka. Na slici 8. prikazano je glodanje s vanjskom primjenom SHIP-a.



**Slika 8.** Glodanje s vanjskom primjenom SHIP-a [5]

SHIP mora imati dobra rashladna i/ili podmazujuća svojstva. Kod rashladnih svojstva osim hlađenja mora imati veliku specifičnu toplinu, tj. veliki toplinski kapacitet, veliku toplinsku provodnost i malu viskoznost (zbog lakšeg dovođenja u zonu obrade). Podmazujućim svojstvima primjenom SHIP-a cilj je stvaranje uljnog filma između

obratka i alata smanjujući trenje. Zbog visokih površinskih tlakova i temperatura pod kojima se SHIP dobavlja taj uljni film se kida pa se zbog toga dodaju razni aditivi. Osim toga mora imati dobra svojstva antikorozivne zaštite, ne smiju biti opasna po ljude, moraju biti razgradivi, što otporniji na starenje i da nemaju neugodan miris. Svi zadaci, zahtjevi i rezultati primjene SHIP-a su u tablici 1.

**Tablica 1.** Zadaci, zahtjevi i očekivani rezultati primjene SHIP-a [5]

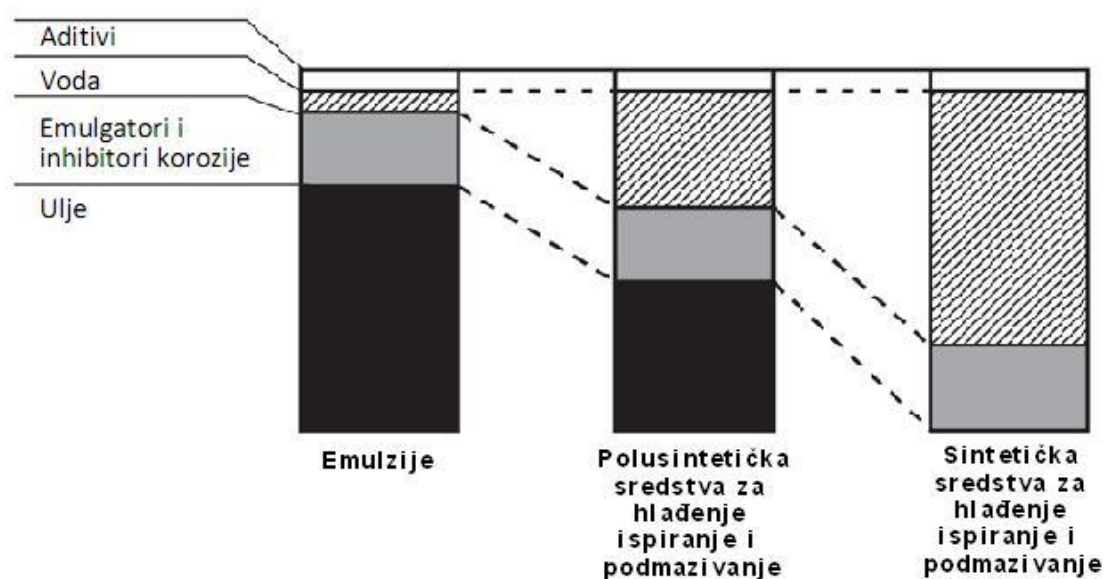
Zadaci SHIP-a	Zahtjevi na SHIP	Rezultati primjene SHIP-a
hlađenje zone obrade odvođenjem topline	dobra rashladna i/ili podmazujuća svojstva	veća postojanost alata
podmazivanje-smanjenje trenja u zoni obrade	dobro svojstvo antikorozivne zaštite	veće vrijednosti parametara obrade (brzine, posmaka)
ispiranje odvojenih čestica (duboko bušenje) te zaštita od korozije	da nisu opasna po ljude i da su ekološki pogodna (razgradnja itd.)	manje zagrijavanje obratka, alata i stroja (veća kvaliteta obrade: hrapavost i točnost)
Čišćenje rupica poroziteta za smještaj odvojenih čestica (honanje, brušenje)	da nemaju neugodan miris	manje sile i snaga obrade tj. manja utrošena energija
vezanje prašine kod obrade sivog lijeva	da su što otpornija na starenje	manji troškovi obrade

Danas se kod strojne obrade prema [6] koristi četiri vrste SHIP-a:

- 1) ULJA - Tu spadaju mineralna, biljna i životinjska ulja, te njihove mješavine, kao i sintetička ulja. Koriste se pri manjim brzinama rezanja gdje nema značajnog porasta temperature. Smanjuju adheziju i abraziju.
- 2) EMULZIJE - Sastoje se od ulja koje služi za pospješivanje podmazivanja, te od vode, emulgatora i ostalih aditiva. Uloga emulgatora je da održava ulje u sitnim kapljicama u vodi. Koriste se pri obradi visokim brzinama rezanja gdje postoji znatan porast temperature budući da imaju karakteristike odličnih toplinskih prijenosnika zbog velikog sadržaja vode.
- 3) POLUSINTETIČKA SREDSTVA ZA HLAĐENJE, ISPIRANJE I PODMAZIVANJE - To su kemijske emulzije koje sadrže malu količinu mineralnih ulja razrijeđenu u vodi i obogaćenu aditivima.

- 4) **SINTETIČKA SREDSTVA ZA HLAĐENJE, ISPIRANJE I PODMAZIVANJE** -  
To su sredstva potpuno sintetičke osnove s aditivima, pomiješane u vodi bez prisutnosti ulja.

Neki od aditiva za poboljšavanje svojstava SHIP-a koji se mogu navesti su emulgatori koji omogućavaju miješanje mineralnog ulja s vodom i smanjuju površinske napone u emulziji, polarni aditivi koji povećavaju svojstva podmazivanja, EP aditivi koji daju SHIP-u svojstva za izdržavanje visokih tlakova pri obrade te dodaci koji sprječavaju maglu u emulziji, usporavaju procese starenja i kvarenja sredstva te sprječavaju pjenu u emulziji. Na slici 9. prikazana je pojedina vrsta sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje te udjeli sastojaka od kojih su napravljeni.



**Slika 9.** Relativni udio vode, emulgatora i inhibitora korozije, ulja u pojedinim vrstama SHIP-a [6]

Jedno od maziva koja se koriste u Hrvatskoj je INA BU Biosint HSP prema katalogu proizvoda INA Maziva [18] i njegove karakteristike su:

Emulgirajuća tekućina za obradbu metala pri visokim brzinama i tlakovima. Pomiješana s vodom stvara radne biostabilne emulzije. Zbog visoke stabilnosti i niskog pjenjenja osobito su primjenjive u modernim CNC strojevima, pri

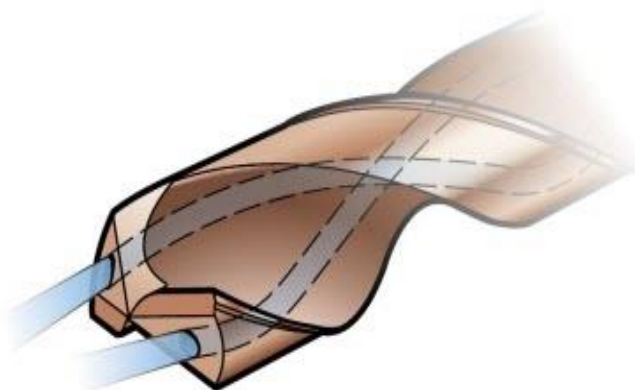
visokobrzinskim operacijama, pri hlađenju kroz alat a isto tako u konvencionalnim obradnim strojevima. Preporučuje se za obradbu željeznih materijala različitim vrstama operacija od brušenja do dubokog bušenja, a može se primijeniti i za obradbu obojenih metala.

Postoje četiri načina dovođenja SHIP-a u zonu rezanja:

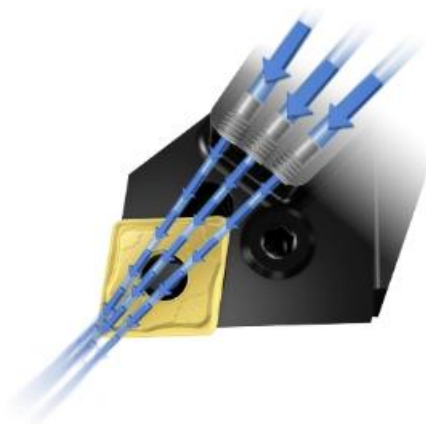
- 1) SLOBODNI MLAZ – Hlađenje prednje površine alata slobodnim mlazom je najčešći i najrašireniji način dobave SHIP-a. Količine tekućine se kreću od 10 l/min kod tokarenja s jednom oštricom do 22 l/min kod glodanja gdje je obrada s više oštrica u zahvatu. Brzina kojom se odvaja odvojena čestica u prosjeku je veća za 30 % korištenjem ovog načina, a i vijek trajanja alata je skoro dvostruko duži. Tlakovi koji se koriste kod obrade odvajanjem čestica su između 7 i 140 bar-a i služe samo za efikasno odvođenje odvojene čestice iz zone rezanja. Prema [2], točnost obrađivanja površine poboljšava se za jednu do dvije klase, smanjuje se i sila rezanja smanjuju se za 15-20%, a potrebna snaga za 20-30% u odnosu na odvajanje čestica bez hlađenja. [2]
- 2) POD NISKIM TLAKOM – U nekim literaturama ova metoda naziva se „maglica“ i koristi se kada je potrebno da se omogući bolja vidljivost obratka pri obradi. Kod ove metode koriste se vrste SHIP-a bazirane na vodi (emulzije, polusintetička i sintetička sredstva) pod niskim tlakovima od 0.6 do 6 bar-a. Rasplinuta emulzija se stvara u komorama za miješanje u koje se dovodi zrak pod tlakom od 2-4 bar-a i tekućina.raspršena tekućina izlazi iz komore za miješanje brzinom od 200-300 m/s. Efikasnost hlađenja ovakvog načina dovođenja SHIP-a je nešto slabiji ali prednost je u tome što para prodire u najnepristupačnije dijelove obrade. Upotrebom ove metode postoji opasnost po zdravlje operatera koji udiše sitne čestice SHIP-a u zraku. [2]
- 3) VISOKOTLAČNI SUSTAVI – hlađenje tekućinom dovedenom pod viskom tlakom zahtjeva zaštitu radnog prostora. Prema [1], tlakovi kod načina dovođenja SHIP-a u zonu rezanja kreću se od 5500 kPa (55 bar) pa sve do 35000 kPa (350 bar) i daju SHIP-u svojstvo lomitelja odvojene čestice. Da bi se izbjegla oštećenja na obratku veličina čestica u SHIP-u ne smije biti veći od

20  $\mu\text{m}$  prema literaturi [7]. Ovaj način hlađenja pokazuje najveću efikasnost kod teško obradivih materijala.

- 4) DOVOĐENJE SHIP-a KROZ ALAT – Danas se sve više koristi dovod SHIP-a kroz alat odnosno kroz posebne otvore za bolju dobavu rashladne tekućine direktno u zonu rezanja. Na slikama 10 i 11 prikazano je dovođenje sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje kod spiralnog svrdla i tokarskog noža. Ovom metodom SHIP se dovodi od spremnika (s pumpom) na stroju kroz metalne i ojačane plastične i gumene cijevi, a dalje do same zone obrade vodi se pomoću posebnih zglobnih fleksibilnih crijeva. [2]



**Slika 10.** SHIP kroz spiralno svrdlo [8]



**Slika 11.** SHIP kroz tokarski nož [8]



## 4.2 Utjecaj SHIP-a na okoliš i čovjeka

Sve više pažnje posvećuje se SHIP-u u smislu zaštite okoliša. Zabrinutost u vezi štetnih kemikalija SHIP-a na okoliš i zdravlje radnika počelo je početkom 60-ih godina prošlog stoljeća što je dovelo do jako strogih zakona kojih su se proizvođači morali pridržavati. Prema [1] bez obzira na povoljno djelovanje na postojanost alata, SHIP-ovi s dodacima klora se više ne upotrebljavaju zbog dokazanog kancerogenog djelovanja na čovjeka. Konvencionalne emulzije sa sobom nose nekoliko ekoloških problema:

- 1) SHIP se pri povišenim temperaturama razgrađuje u plinove štetne za okoliš
- 2) problem zbrinjavanja potrošenog SHIP-a jer je opasan za vode i tlo
- 3) nastanak bakterija u SHIP-u dovodi do bioloških opasnosti za radnike

Prema podacima iz znanstvenog rada [9] prikazanih u Tablici 2. vidljivo je da se u Europi prodaje 5,2 milijuna tona svih sredstava za hlađenje i ispiranje godišnje. Od toga se 22% odnosi na Njemačku što predstavlja enormnu količinu otpada koji se treba zbrinuti, a ujedno i potencijalnu prijetnju ljudskom zdravlju i okolišu.

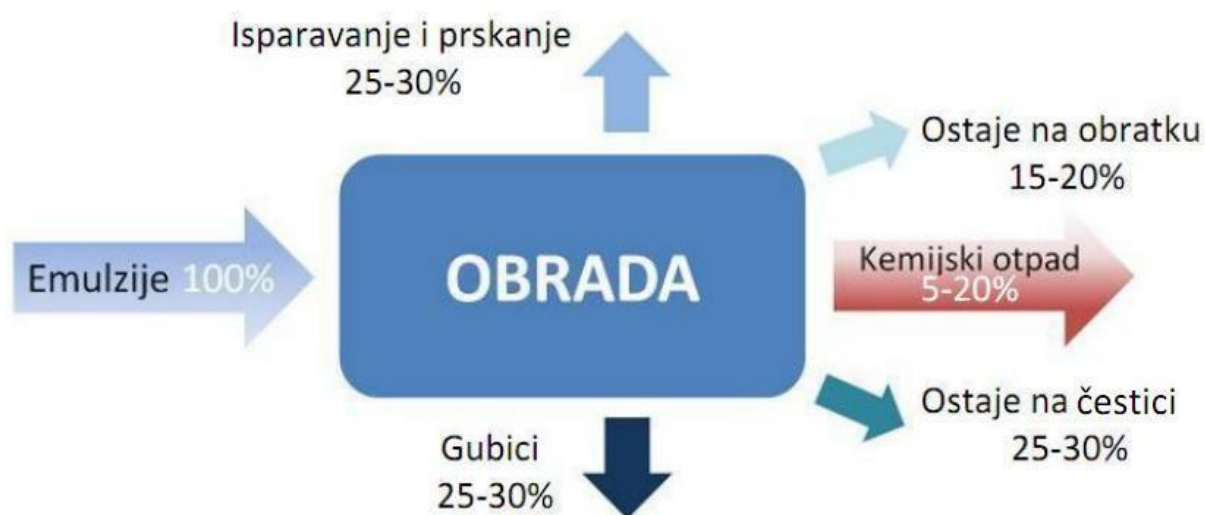
**Tablica 2.** Pregled tržišta sredstava za hlađenje ispiranje i podmazivanje u Europi [9]

Grupe sredstava za hlađenje i podmazivanje		Prodaja u Njemačkoj (t/god)	Prodaja u EU (t/god)
Sve vrste maziva		1 146 844	5 200 000
SHIP za strojnu obradu		78 877	360 000
1.	Bez miješanja s vodom (ulje)	48170	220 000
2.	Miješanje s vodom	30707	140 000
Emulzije dobivene na bazi SHIP-		~770 000	~3 500 000
Ukupna količina SHIP-a		~820 000	~3 700 000

Gubici sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje u proizvodnom sustavu stvaraju se na više načina:

- isparavanjem
- količinom sredstva koje ostaje na obratku, dijelovima alata ili samoj odvojenoj čestici
- kroz sustave pod pritiskom

Javljaju se i gubici uzrokovani neosiguranim istjecanjem u raznim fazama koji su potencijalno opasni za čovjeka i za sustav u kojem se nalazi. Prethodno navedenim načinima se prema literaturi [10], gotovo 30 % godišnje korištenih količina SHIP-a iznosi iz sustava.



**Slika 12.** Shema gubitaka SHIP-a tijekom obrade [11]

Slika 12. prikazuje da je gubitak sredstava za hlađenje, ispiranje i podmazivanje u procesu obrade isparavanjem i prskanjem 25-30%, gubitci ostajanja SHIP-a na obratku i odvojenoj čestici iznose oko 40-50%, a 5-20% postaje kemijski otpad te su 25-30% ostali gubici prema literaturi [11].

Brojna se pitanja postavljaju u vezi tretiranja i odlaganja velikih količina iskorištenog SHIP-a kojeg proizvodna industrija ostavlja jer je to potencijalno opasni otpad kao što je vidljivo na slici 13. Emulzija se odvaja te nastaju dvije faze: uljna i vodena. Uljna faza se spaljuje u posebnim industrijskim spalionicama, a vodena koja sadrži u sebi ulje se šalje dalje u postrojenja za obradu kanalizacijskog otpada.



**Slika 13.** Primjer zagađenja nekontroliranim SHIP-om [12]

Tehnike koje se koriste za zaštitno tretiranje prije odlaganja su:

- ultrafiltracija
- floatacija
- evaporacija
- kemijsko razdvajanje emulzije i precipitacija
- centrifugalno razdvajanje i toplinska obrada

Sljedeće točke se moraju riješiti da bi se riješilo pitanje proizvodnje SHIP-a bez štetnog utjecaja na okoliš:

- Sastojci SHIP-a ne smiju imati negativni utjecaj po zdravlje operatera ili okoliša
- Tijekom korištenja SHIP ne smije proizvoditi nečistoće niti smije imati negativni utjecaj na komponente ili brtve radnog alata
- Zona obrade ne smije biti potopljena nego se mora minimizirati korištenje SHIP-a što je više moguće, pogotovo za vanjsku uporabu
- Poželjno je kontinuirano praćenje SHIP-a i obradne okoline pomoću senzora
- Uz potrebno održavanje SHIP-a, ukupna količina ulja i vode potrebnih za emulziju može biti smanjena što bi vodilo do velike uštede

Tijekom rada je spomenuto da sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje spadaju u tvari koje mogu biti opasne po zdravlje ljudi. Njihovo korištenje i rukovanje mora biti pod nadzorom jer mogu uzrokovati teška oboljenja od različitih bolesti i alergijskih reakcija. Prvenstveno se reakcije javljaju u neposrednim kontaktima čovjeka sa SHIP-om. Od štetnih utjecaja na čovjekovo zdravlje mogu se navesti stvaranje nitrozamina kod sredstva za hlađenje koji ima kancerogena svojstva, efekt uljnih para, bolesti kože uzrokovane direktnim kontaktom sa sredstvima za hlađenje, baktericidni efekt povezan s aditivima koji su dodani sredstvima za hlađenje, čestice teških metala prisutne u aditivima, toksičnost za reprodukciju i drugi. Direktni doticaj kože radnika sa sredstvima za hlađenje, ispiranje i podmazivanje dovodi do gubitka sebuma, prirodnog ulja u koži koji izlučuju žlijezde lojnice. Dodatnu opasnost predstavlja lužnatost ( $\text{pH} > 9$ ) SHIP-a, opasnost od bakterijskih i gljivičnih oboljenja, alergije uzrokovane aditivima, kao i mikro ozljede uzrokovane odvojenim česticama te mekana koža kao posljedica vlažne okoline kao što je prikazano na slici 14. [13]

- **Opasnost za kožu**

**Lužnatost**

Lužine (pH > 9)

**Infekcije**

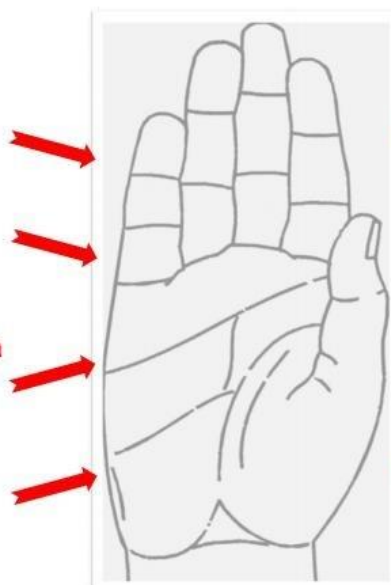
Bacteria, fungus,

**Gubitak prirodnog ulja**

Tenzidi i ulja  
Razni aditivi

**Mekana koža**

Uzrokovana vlažnom okolinom



**Mikro-ozljede**

Uzrokovane odvojenom česticom



**Alergije**

Uzrokovane aditivima (npr. biocidi, tenzidi) ili kobalt i nikel od obradaka

**Slika 14.** Opasnosti za kožu radnika pri radu sa SHIP-om [13]

U opisu proizvoda u tehničkom listu moraju biti navedene sve opasnosti i način rukovanja ovim sredstvima. U Njemačkoj je 50% svih operatera oboljelo od nekih vrsta kožnih bolesti uzrokovanih korištenjem SHIP-a. Godišnje se prema [1] zbog tih oboljenja izgubi jedan milijun smjena. Na slici 15 prikazani su primjeri kožnih oboljenja izazvanih SHIP-om

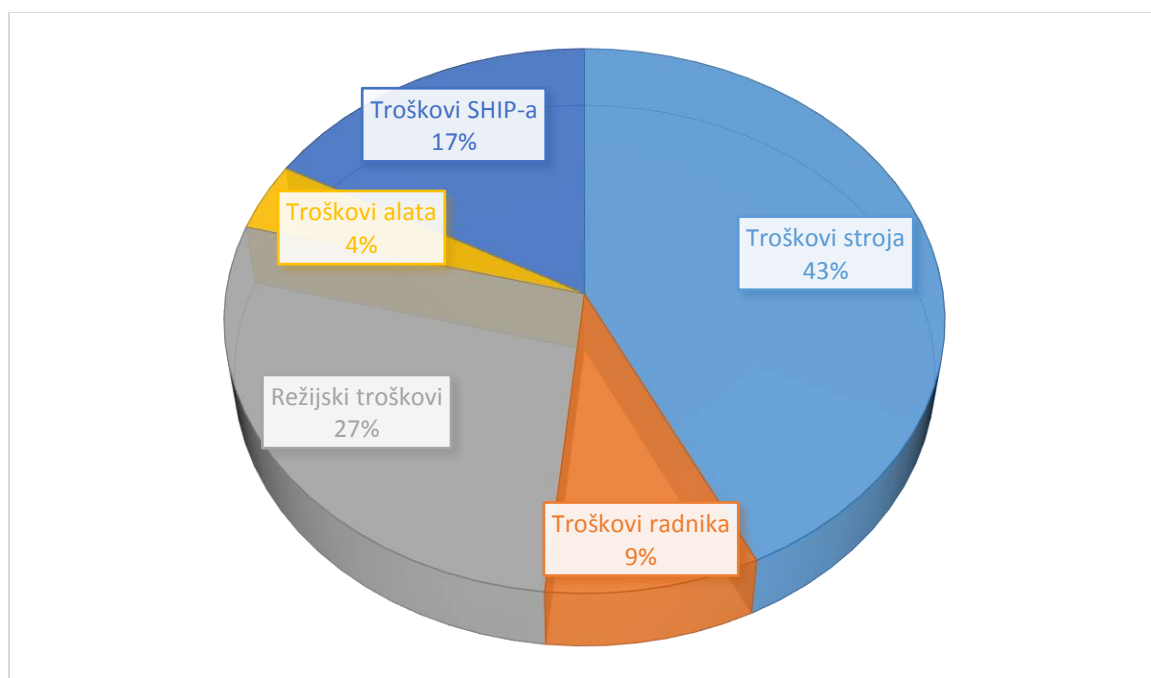


**Slika 15.** Primjeri kožnih oboljenja izazvanih SHIP-om [1]

### 4.3. Troškovi uporabe SHIP-a

Troškovi korištenja SHIP-a u strojnoj obradi su vrlo visoki i zbog sve strožih zakona kojima se regulira čistoća okoliša sve više rastu. Prema literaturi [14], na području Sjedinjenih Američkih Država koristi se više od 100 milijuna galona SHIP-a godišnje, a cijena za nabavu i recikliranje istoga iznosi približno 48 milijardi dolara godišnje. U Njemačkoj se koristi 75,500 tona te se vrijednosti kreću u visini od preko 650 milijuna, a u Japanu nešto više od 880 milijuna dolara.

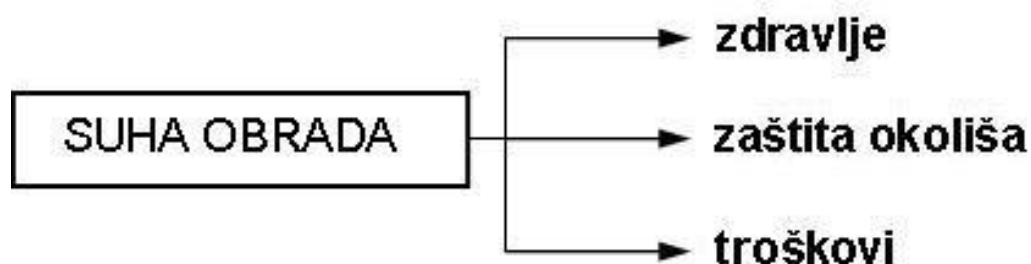
Na slici 16. prema literaturi [5] prikazana je struktura troškova izrade glave motora. Vidljivo je da su troškovi SHIP-a od 17% vrlo visoki: 2 puta veći od troškova radnika i 4 puta veći od troškova alata. Zbog toga je korištenje SHIP-a vrlo skupo i tu postoje velike mogućnosti za racionalnost i uštede. Kada se dodaju poteškoće oko razgradnje i zbrinjavanja rabljenih SHIP-a (za tonu plaća se 700 do 900 eura).



**Slika 16.** Struktura troškova izrade glave motora [5]

## 5. SUHA STROJNA OBRADA

Industrije se suočavaju s visokim političkim pritiskom i strogim zakonima zbog problema uzrokovanih korištenjem prirodnih resursa i zagađenjem okoliša. Većina industrija koristi SHIP kada njihovo korištenje nije potrebno. Razvoj ekološke svijesti kao i sve veća briga o zdravlju čovjeka natjerali su industriju da polako počne izbjegavati sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje u postupcima strojne obrade. Upravo iz tih razloga postupci bez korištenja SHIP-a (suhe obrade) zadnjih godina postaju sve popularniji. SHIP korišten u strojnoj obradi prema literaturi [5] zauzima 17% proizvodnih troškova što vodi prema značajnim uštedama korištenjem suhih obrada. Kod suhe obrade umanjuje se opasnost od zagađenja okoliša i zdravlje čovjeka te nema razgradnje i zbrinjavanja SHIP-a, time se smanjuju troškovi proizvodnje kako je prikazano na slici 17. Uklanjanjem SHIP-a iz strojne obrade dolazi do povećanja temperature zbog trenja, a to može prouzročiti ubrzano trošenje alata, zaostala naprezanja na obratku, manju točnost obrade jer se zagrijani alat deformira te nakupljanje odvojene čestice na alatu i na obratku.



**Slika 17.** Prednosti djelovanja razvojem suhe obrade [1]

Treba naznačiti da jako puno prednosti koje donosi SHIP u strojnoj obradi neće biti dostupne te će suha obrada biti prihvatljiva tek kada se izjednači kvalitetom i vremenom strojne obrade s obradom korištenjem SHIP-a.

Kako bi se omogućila uspješna suha strojna obrada obavezno je uvođenje detaljnih analiza i prilagođavanje obradnih parametara, reznih alata, alatnih stojeva te proizvodnog režima. Proces suhe obrade mora biti dizajniran tako da se minimiziraju sile rezanja i poveća brzina rezanja čime bi se toplina koja se zadržava na obratku smanjila.



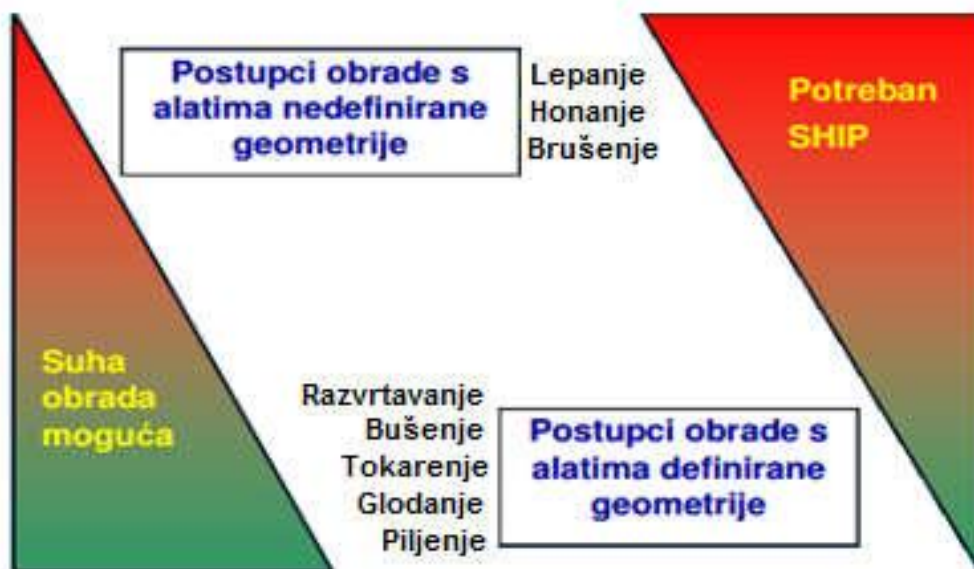
Kao što je vidljivo iz slike 18, postoji više razloga zašto je uvedena suha obrada. Osim već nabrojanih, kao što su ekološki, zdravstveni, zakonski i ekonomski, tu je povećanje imidža tvrtke zbog korištenja novih tehnologija što se svakako postiže korištenjem suhe obrade. Isto tako smanjeno korištenje sredstava za hlađenje, ispiranje i podmazivanje poboljšava uvjete rada u proizvodnim prostorijama te čini radnike zadovoljnima i samim time se poboljšavaju rezultati rada.



**Slika 18.** Prednosti suhe obrade [1]

Suha obrada se povezuje s visokobrzinskom obradom. Kod obrade velikim brzinama SHIP nema nikakvog utjecaja jer on u zoni rezanja ispari i u principu nema svojstvo hlađenja. Tada samo uzrokuje toplinske šokove na oštrici kod ulaza i izlaza oštrice iz zahvata. Na slici 19. prikazano je kako je suha obrada moguća samo kod postupaka obrade s alatima definirane geometrije kao što su bušenje, tokarenje, glodanje, piljenje. Dok kod postupaka obrade s nedefiniranom geometrijom dolazi do velikih deformacija što vodi do većeg trenja, a samim time i povišenih temperatura. U tim postupcima SHIP je neophodan jednako kao i u postupcima obrade superlegura i titana visokobrzinskom obradom.





**Slika 19.** Zavisnost primjene SHIP-a o postupku obrade [1]

Glodanje i tokarenje su operacije koje je najlakše izvesti bez dodatka SHIP-a. Moderni zamjenjivi umetci su potpuno sposobni za suhu obradu. Razvoj materijala alata, posebno prevlake od cementiranih karbida, je doveo do korištenja pločica koje podnose povišene temperature strojne obrade jer imaju veću otpornost prema plastičnoj deformaciji i termičkom pucanju. Povišena temperatura obrade kod suhe obrade može biti i pozitivan faktor ako je materijal alata ispravno određen. Većina novih prevlaka su razvijene u skladu s potrebama suhe obrade. Primjeri alata za suho glodanje prikazani su na slici 20. [8]



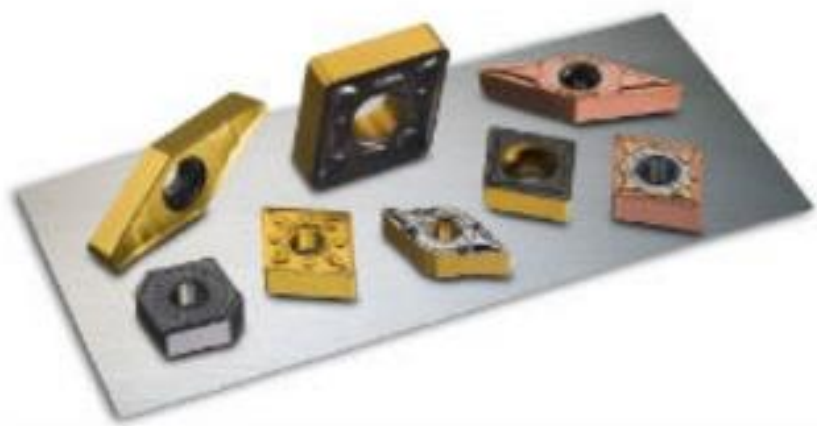
**Slika 20.** Primjeri alata za suho glodanje [8]

Suho bušenje je najkritičnija strojna obrada. SHIP-u kod bušenja nije primarni zadatak hlađenje i podmazivanje nego odvođenje odvojene čestice iz zone rezanja. Brzine i dubine rezanja su visoke koristeći moderna svrdla, ali to je jedino moguće uz efikasno odvođenje odvojene čestice. SHIP se dobavlja kroz alat u zonu obrade. Tlak u sustavu treba se nadzirati isto kao i protok, a prema literaturi [8] preporučeni su minimalan protok i tlak.

## 5.1. Suvremeni rezni materijali

### 1. Cementirani karbidi

Cementirani karbid prikazan na slici 21 ima jedinstvenu kombinaciju visoke čvrstoće i dobre tvrdoće koja zadovoljava sve potrebe strojne obrade. To je jedan od najuspješnijih kompozitnih materijala u inženjerstvu ikad proizvedenih. Ključan faktor kod cementiranog karbida je mogućnost mijenjanja svoje konstitucije tako da mijenjajući fizička i kemijska svojstva osigurava maksimalnu otpornost trošenju, deformiranju, koroziji i oksidaciji. Može biti proizveden u raznim oblicima i veličinama jer se za izradu ovog materijala koriste procesi praškaste metalurgije kod koje se metalni tvrdi materijal sintetizira na visokim tlakovima i temperaturama s kobaltom kao vezivom. Najveća prednost ovog materijala je otpornost prema povišenim temperaturama. [15]



**Slika 21.** Primjeri alata za suho glodanje [8]

## 2. Cermeti

Cermet (metalokeramika) je tvrdi metal koji ima tvrdi fazi od 70%  $Al_2O_3$  + 30% TiC, TiN, TiC+TiN, NbC, a vezanu (matrix) od Ni, Co ili Mo. Dakle, to je keramika u metalnoj veznoj fazi. Otkriven je 1950. godine, a šira upotreba počela je 1970. godine. Dobiva se sintetiziranjem i kemijski je stabilan. Ima visoku toplinsku čvrstoću, stabilnu reznu oštricu i otpornost na trošenje te nisku sklonost adheziji prema čeliku. Zbog dobre žilavosti cermeti su se po svojstvima pomaknuli u područje tvrdih metala. Na slici 22 prikazan je tokarski nož sa reznom pločicom od cermeta. Najviše se primjenjuju za fino i srednje tokarenje i glodanje čelika i čeličnog lijeva s visokim brzinama rezanja gdje konkurira tvrdim metalima. [5]



**Slika 22.** Tokarski nož s reznom pločicom od cermeta [8]

### 3. Rezna keramika

Razlika između rezne keramike i tvrdog metala je ta što rezna keramika nema metalnu veznu fazu. Radna temperatura je 1400 °C. Osnovni razlog zašto rezna keramika nije brzo uvedena u obradu je njena krtoš što alat čini lako lomljivim. Zbog toga se istraživanja kod rezne keramike usmjeravaju na poboljšavanje žilavosti. Pri obradi reznom keramikom ne koristi se SHIP zbog njene osjetljivosti na termošokove. Putem raznih modifikacija teži se apsorpiranju energije loma, gdje se kroz stvaranje mikropukotina te usmjeravanje i grananje pukotina nastoji smanjiti brzinu njihovog širenja. [5]

### 4. Kubični bornitrid (CBN)

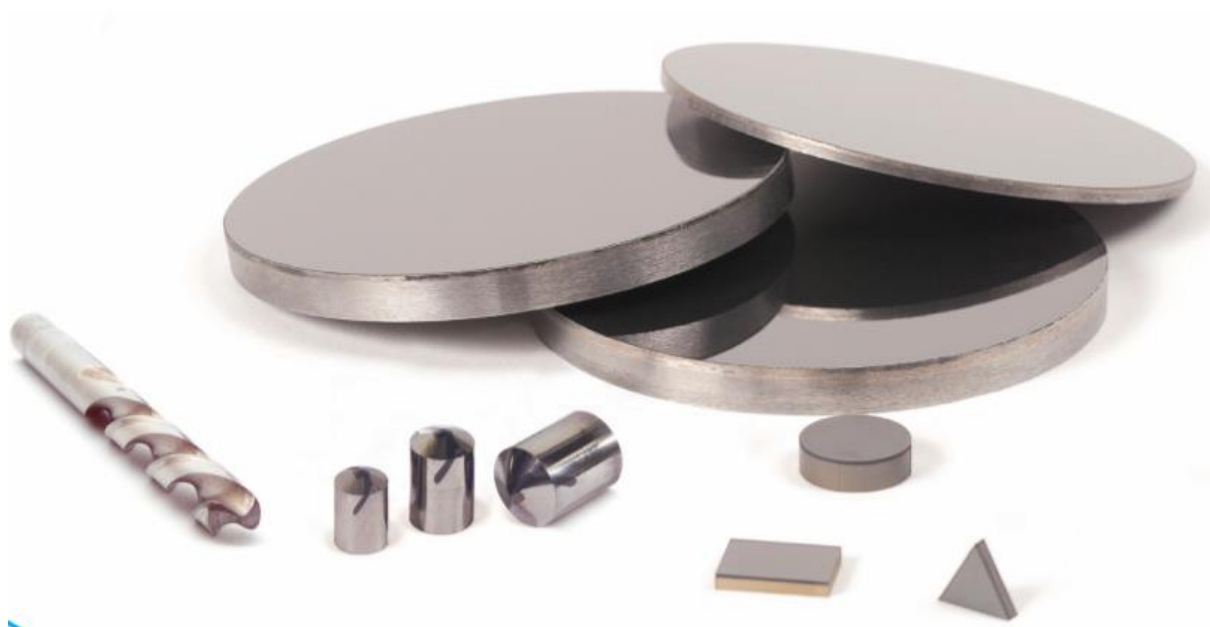
Bornitrid (BN) je kemijski spoj bora i dušika. Polazni materijal za dobivanje CBN-a je mekana heksagonalna modifikacija bornitrida (h-BN) iz kojeg se sintezom na temperaturi od 1500 do 2000 °C i tlaku od 5 do 9 GPa dobiva kubični bornitrid (CBN). Po tvrdoći je drugi poznati materijal u svijetu, odmah iza dijamanta. Važna svojstva CBN-a su visoka tvrdoća, visoka provodljivost topline i bolja kemijska postojanost nego kod dijamanta. Toplinska stabilnost mu je do cca. 1550 °C. CBN se koristi kao abrazivni materijal. Slika 23 prikazuje reznú pločicu s reznim vrhom od CBN-a [5]



**Slika 23.** Rezna pločica s reznim vrhom od CBN-a [8]

## 5. Dijamant

Dijamant se sastoji od čistog ugljika C i najtvrdi je poznati materijal u svijetu. Tvrdi je oko 5 puta od tvrdog metala i ima 40 puta veću postojanost. Proizvodi se kao prirodni i sintetički (umjetni) dijamant. Prirodni dijamant nastao je sintezom na dubini od 150 do 200 km ispod površine zemlje i pri udarima meteorita na površinu zemlje. Oko 80% prirodnih dijamanta su slabije čistoće i boje te se ne mogu koristiti za proizvodnju nakita, nego se koriste u industrijske svrhe. Svojstva prirodnih i sintetičkih dijamanta su približno ista i oba mogu biti monokristalni (MCD) i polikristalni (PCD). Oko 75% proizvodnje prirodnih i umjetnih dijamanta koristi se za izradu alata svih vrsta. Rezni alati od PCD-a prikazani su na slici 24. [5]

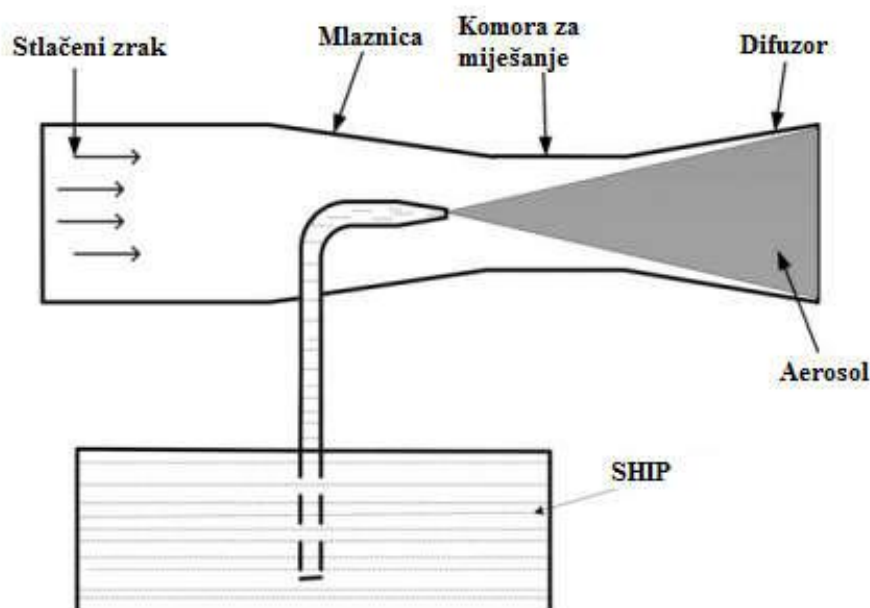


**Slika 24.** Rezni alati od PCD-a [8]

## 6. OBRADA S MINIMALNOM PRIMJENOM SHIP-a

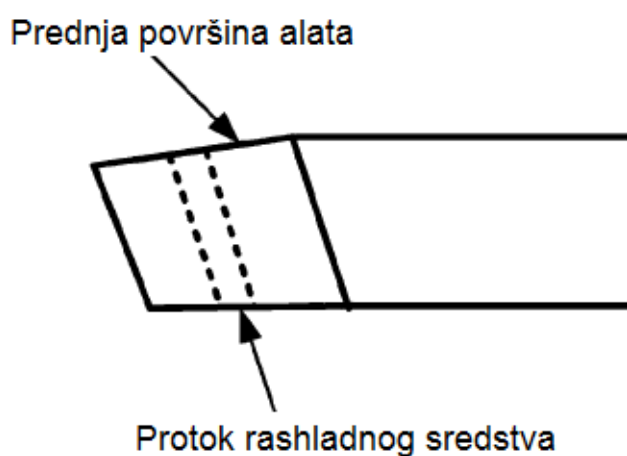
Tradicionalni način dobave SHIP-a u zonu rezanja je takav da se kontinuirano dovodi velika količina tekućine na prednju površinu alata. Takav način nije nimalo efikasan. Kao prvo, potrebna je ogromna količina sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje, a kao drugo to sredstvo nije u mogućnosti ući u zonu rezanja zbog odvojene čestice koja se generira.

Obrada minimalnom primjenom SHIP-a definira se kao strojna obrada u kojoj se mješavina zraka i minimalne količine tekućine za obradu metala disperzira u obliku aerosoli direktno u zonu rezanja pod visokim tlakom. Sustav kojim se mješavina dovodi u sebi ima ejektor gdje se komprimirani zrak koristi za raspršivanje ulja kao što je prokazano na slici 25. Ulje je u tom niskotlačnom dovodnom sustavu vođeno zrakom sve do zone rezanja. Prolaskom zraka kroz Venturijevu cijev, usko grlo oko mlaznice za pražnjenje stvara Venturijev efekt u komori za miješanje, to je zona gdje je statički tlak niži od atmosferskog (stvara se djelomični vakuum). Taj parcijalni vakuum povlači ulje gore iz spremnika gdje se ulje održava pod konstantnim hidrauličkim tlakom. Zrak prolazi kroz komoru za miješanje i raspršuje uljni tok u mikronske čestice aerosoli. Kada te čestice udaraju u mlaznicu, proizvode sprej od plinovite suspenzije nazvane „maglica“ u zoni rezanja koji služi za hlađenje i podmazivanje. Međutim, magla isto predstavlja opasnost po zdravlje operatera.



**Slika 25.** Shematski prikaz dobave SHIP-a kod MQL [16]

Postoji i drugi, već spomenuti način dobave rashladne tekućine kroz alat u zonu visokih temperatura rezanja. Slika 26. je shematski prikaz takvog alata, u kojem je rashladno sredstvo pod visokom tlakom ispušteno kroz rupu do prednje površine reznog alata. Prema literaturi [16] ovakav način dobave koristio je Wertheim prije 20 godina. Rashladno sredstvo je moguće učinkovitije dobiti u zonu rezanja nego vanjskim načinom. Tradicionalnim načinom hlađenja, visoka temperatura uzrokuje isparavanje rashladnog sredstva prije nego što ono dođe do zone rezanja. Wertheim je koristio visokotlačni sustav gdje je tlak dosegao do 25 bar-a. Takav sustav je smanjio trošenje i povećao vijek trajanja alata.



**Slika 26.** Rezni alat s unutarnjom dobavom SHIP-a [16]

Bušenjem legure čelika s alatom od prevučenog karbida, uočeno je da alat može napraviti 40 provrta pri dobavi rashladne tekućine pod tlakom od 1 bar. S tlakom od 5 bar-a vijek trajanja alata je 75 provrta, a s tlakom od 25 bar-a, ukupni broj rupa proizvedenih prije nego što je došlo do istrošenosti alata je 160. Slično istraživanje je napravljeno bušenjem visoko temperature legure, Inconel 718. Kada se koristila brzina rezanja od 30 m/min pri dubini rezanja od 0.16 mm/okretaju, vijek trajanja alata bio je 3 minute dok je korišten tradicionalni način dobave SHIP-a. Korištenjem dobave SHIP-a kroz alat pod tlakom od 16 bar-a, istim parametrima obrade, ukupni vijek trajanja alata bio je 14 minuta. Usporedbom s tradicionalnim načinom dobave, potreba za SHIP-om drastično je smanjena.

Ovisno o tipu i glavnoj funkciji rashladne tekućine, postupak se može podijeliti na:  
[16]

- MQL (Minimum Quantity Lubrication) – minimalna količina podmazivanja
- MQCL (Minimum Quantity Cooling Lubrication) – minimalna količina hlađenja i podmazivanja

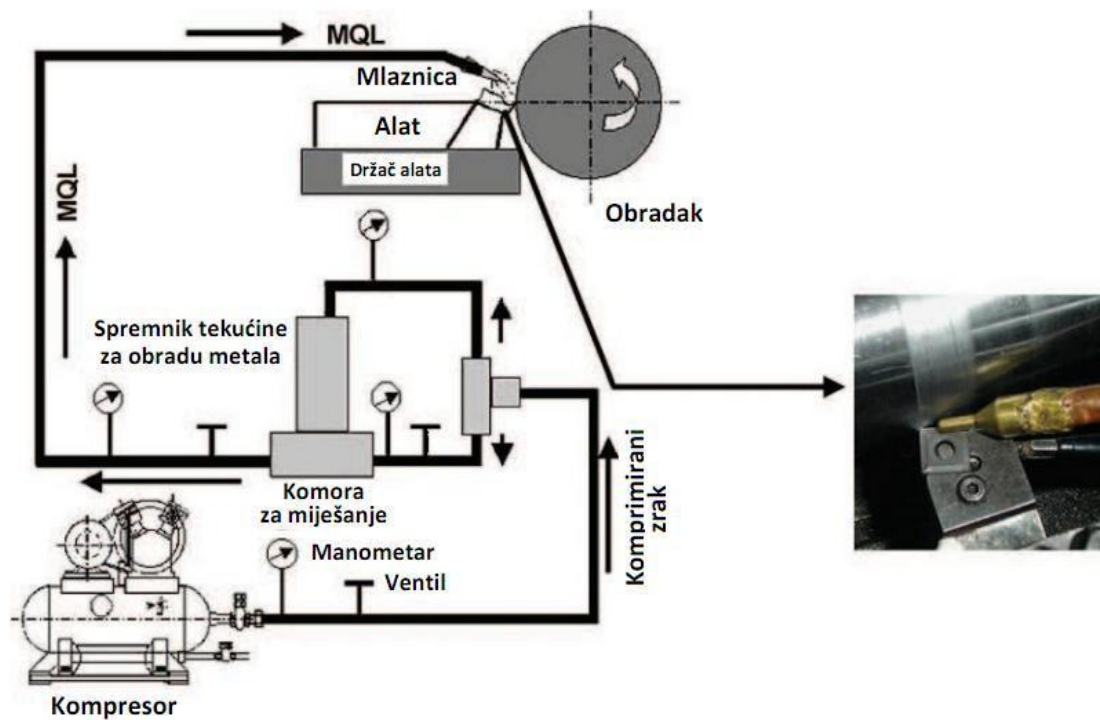
Kada je primarni zadatak sustava podmazivanje, koristi se MQL. Kada je potrebno i hlađenje i podmazivanje, to je nazvano MQCL. U postupcima MQCL, tekućina koja se najčešće koristi je ulje, dok se kod nekih obrada koriste emulzije ili voda. Ulje se može koristiti sa zrakom u obliku aerosoli ili bez zraka. U MQL i MQCL sustavima, normalna potrošnja SHIP-a je 5-50 ml/min. Dobava može biti vanjska (kroz mlaznice) ili unutarnja (kroz alat). Može biti sustav s jednim kanalom ili sa dva kanala gdje su zrak i ulje dobavljeni odvojeno. Tekućina korištena u MQL ili MQCL sustavima mora biti biorazgradiva i stabilna. Kako je potrošnja ulja puno manja, tekućina mora ostati stabilna duži period. U MQL sustavu koriste se biljna ulja i sintetički esteri. Sintetički ester ima visoko vrelište, visoku temperaturu paljenja, nisku viskoznost te ostavlja tanki sloj ulja na obratku koji služi za otpornost trošenju. Sintetički esteri su također biorazgradivi. [16]

Prednosti MQL tehnologije u odnosu na konvencionalne tehnike korištenja SHIP-a su:

- 1) Manji troškovi nabave takvih sustava
- 2) MQL tehnika koristi protok od 5-50 ml/min što je znatno manje od količina koje se koriste u tradicionalnoj obradi s istim vremenskim intervalima
- 3) Smanjeni servisni troškova u usporedbi s tradicionalnim hlađenjem
- 4) Minimalna količina SHIP-a rezultira praktično suhim obratkom, alatom i samim obradnim strojem što utječe na smanjenje troškova budući da nema više potrebe za čišćenjem istih
- 5) smanjenje troškova vezanih uz nabavu, pohranjivanje, zaštitno tretiranje i odlaganje SHIP-a
- 6) Povećanje produktivnosti



Na sljedećoj slici 27, prikazan je shematski prikaz jedne eksterne MQL jedinice kod obrade tokarenja sa svim osnovnim dijelovima. U komori za miješanje dolazi do stapanja tekućine za obradu metala i komprimiranog zraka, te se nastali aerosol odvodi dalje preko mlaznice u zonu rezanja. [17]



**Slika 27.** Shematski prikaz eksterne MQL jedinice kod obrade tokarenja [17]

## 7. KRIOGENA OBRADA

Kriogenika je područje vezano uz tehnologiju dubokog hlađenja. Tradicionalno, područje kriogenike uzeto je da počinje pri temperaturama nižim od 120 K ( $\sim -150^{\circ}\text{C}$ ). Bilo je puno nesigurnosti oko postavljanja te granice, ali ispostavilo se da je ovo najlogičnija razdjelnica kao normalna točka vrelište većine plinova koji se koriste. Najčešći kriogenici koji se koriste su helij, vodik, neon, dušik, kisik, argon, kripton, ksenon, metan, etan i propan. Ugljični dioksid je dodan na tu listu iako je potreban tlak od 50 kPa kako bi ostao u tekućem obliku. Iako naziv kriogenika zvuči kao nekakvo egzotično polje, igra jako veliku ulogu u modernoj industriji i znanosti kao npr. postrojenja za razdvajanje zraka kako bi ga razdvojili na komponente za industrijske i medicinske svrhe. Tekući helij je postao neizbježan element za hlađenje kod magnetske rezonance u modernim bolnicama, a u svemirskoj tehnologiji se tekući vodik i kisik koriste kao gorivo, za zaleđivanje i hlađenje hrane itd. [19]

Već više od jednog stoljeća, znanost i tehnologija proizvodnje niskih temperatura povezuje se sa kriogenikom. Riječ „Kryos“ ima grčki korijen i znači hladno ili zamrznuto. Sve je počelo 1877. „utrkom“ u ukapljivanju plinova i dosezanja najnižih temperatura ikada kada su švicarski fizičar Raoul-Pierre Pictet i profesor na Université de Genève Louis Paul Cailletet kao prvi započeli s uspješnim ukapljivanjem kisika. 1898. godine, škotski kemičar, fizičar i profesor na University of Cambridge James Dewar uspijeva prvi puta ukapljiti vodik.



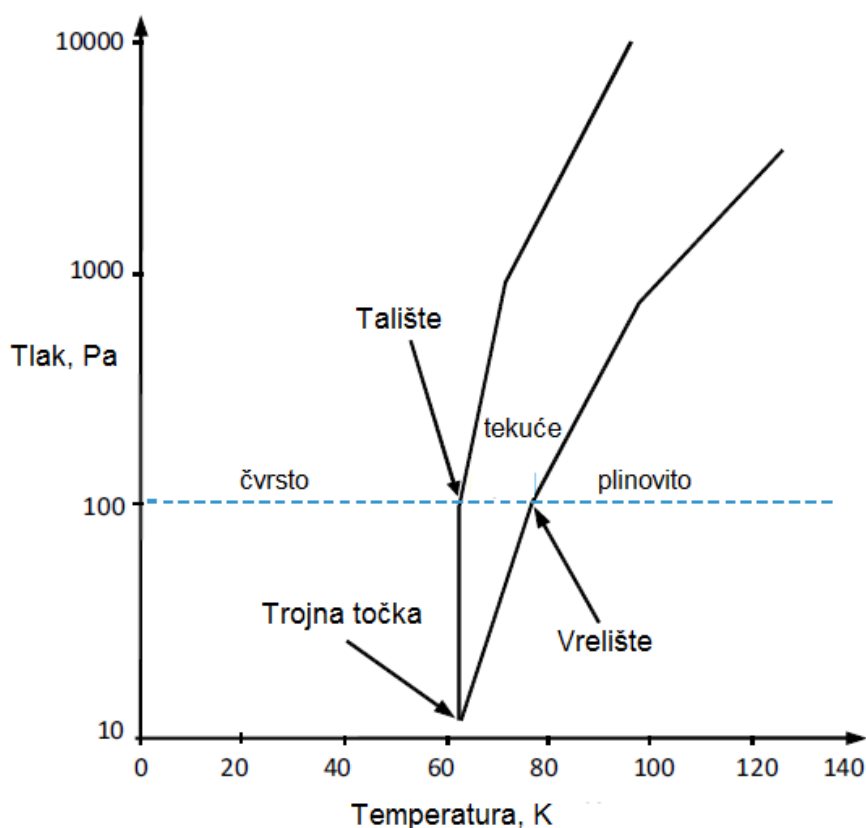
**Slika 28.** Dewar-ove posude tvrtke Day-Impex Ltd [20]

Također, on je izumio Dewarovu posudu prikazanu na slici 28, vakuumski izolirani spremnik za čuvanje kriogenih fluida koji se i danas koristi. Zadnji i najkompliciraniji plin za ukapljiti bio je helij. Ukapljen od strane Kamerlingh Onnes 1908. godine.

Korištenje kriogenika za hlađenje alata kod strojne obrade počelo je ranih 50-ih godina prošlog stoljeća. Kriogenici koji su se koristili bili su ugljični dioksid i freon koji su se nanosili na obradak prije procesa obrade. Takav način primjene rezultirao je potrošnjom pretjeranih količina kriogenih tekućina što se reflektiralo na visoke troškove zbog čega ovaj način hlađenja dugi niz godina nije bio prihvaćen u industrijskim postrojenjima. Osim toga takav način aplikacije nije pružao podmazivanje nego samo hlađenje.

### 7.1. Karakteristike dušika

Danas je proces ukapljivanja i sustav skladištenja postao pristupačniji, ali postoji i potreba za razvoj održive kriogene obrade na industrijskoj razini. [9]

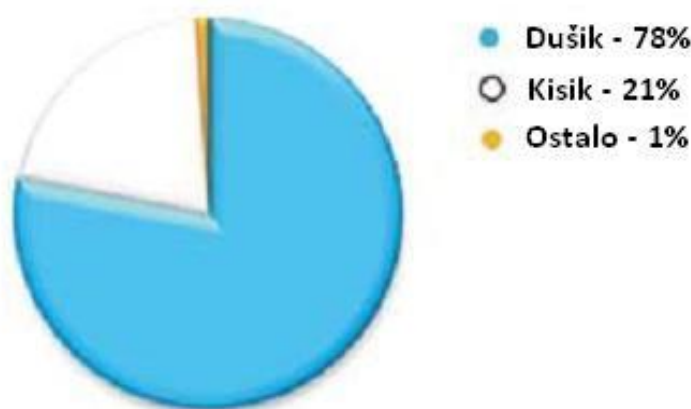


**Slika 29.** Fazni dijagram dušika [9]

Najlogičniji izbor za kriogenu obradu je tekući dušik zbog svojih dobrih svojstava. Kao što je prikazano na slici 29 talište i vrelište za dušik (pri 100 Pa) su na temperaturama od 63,3 K i 77,4 K. Trojna točka dušika pojavljuje se na atmosferskom tlaku od 12,463 Pa i temperaturi od 63,15 K.

Dušik je siguran za rukovanje, nezapaljiv je i ne izaziva koroziju. Nadalje, on je inertan, bez boje, okusa i mirisa, a dostupnošću i cjenovno je najpovoljniji kriogeni fluid i to ga čini idealnim za upotrebu u industriji. To je plin koji je lakši od zraka i njime se na relativno jeftin i siguran način mogu postići temperature hlađenja do 77 K ( $\sim -196^\circ \text{C}$ ).

Budući da se u zraku kojeg udišemo nalazi 78% dušika kao što je prikazano na slici 30, nakon upotrebe može se bezopasno pustiti u atmosferu te zbog svih navedenih pozitivnih karakteristika čini se idealnim za korištenje u obradi odvajanjem čestica.



**Slika 30.** Sastav zraka [9]

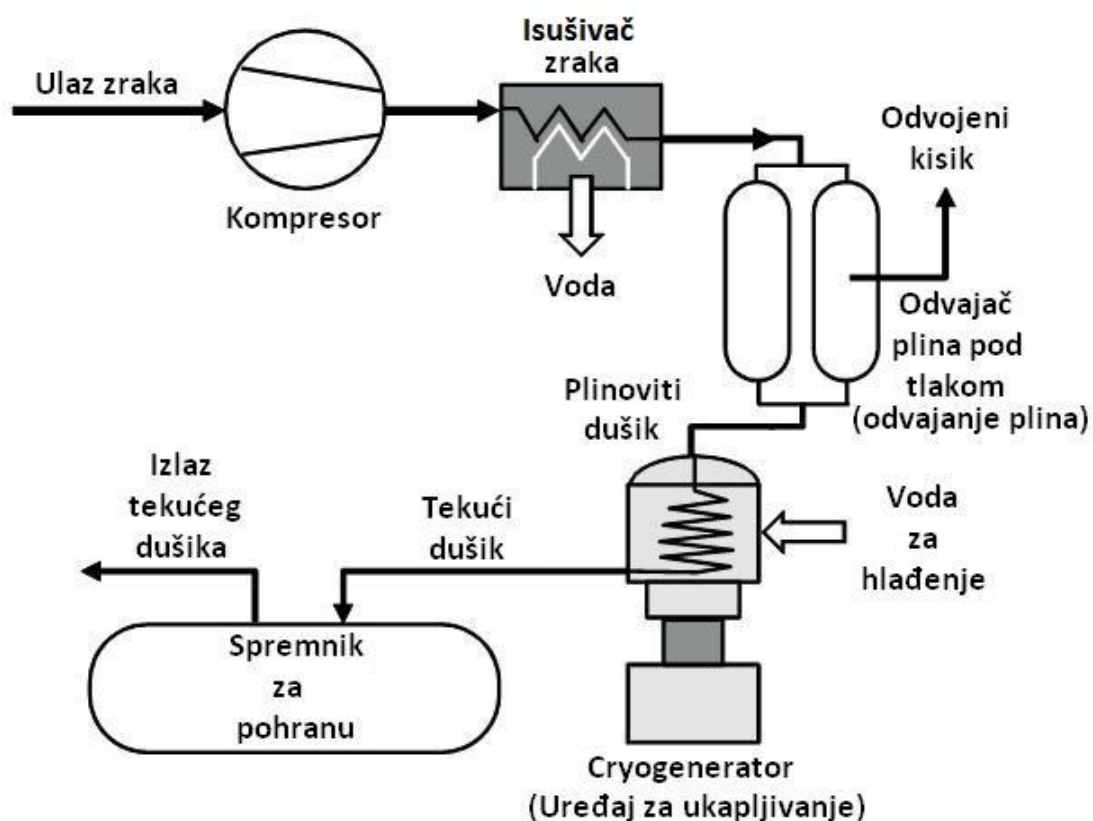
Međutim, unatoč svim povoljnim svojstvima, kod korištenja tekućeg dušika, prema [9], mora se obratiti pažnja na sljedeće:

1. Koncentrirani dušik može smanjiti udio kisika u zraku pa se stoga rad s dušikom mora odvijati u dobro ozračenom području. Preporučuje se izmijeniti zrak u prostoru šest puta na sat, kao i korištenje opreme za mjerenje udjela kisika u zraku.
2. Dušik, kao i oprema za dušik je pod visokim tlakom. Mada su tlakovi predviđeni za obradu mali treba imati adekvatnu tlačnu opremu

3. Ekspanzijom tekućeg dušika u atmosferu on naglo isparava. Ta para od dušika upija vodenu paru, što dovodi do pojave dima. Također budući da je temperatura na kojoj se nalazi dušik vrlo niska može doći do teških smrzotina pa je obavezna upotreba zaštitnih sredstava.

## 7.2. Proizvodnja tekućeg dušika

Za proizvodnju tekućeg dušika koristi se ukapljivanje zraka pomoću Joule-Thompsonov-og efekta adijabatskog hlađenja kojim se komprimirani plin naglom ekspanzijom hladi. Kako je točka vrelišta dušika na različitoj temperaturi nego točka vrelišta kisika, dušik može biti destiliran van iz ukapljenog zraka, zatim komprimiran pa opet ukapljen. Jednom kad je tekući dušik uklonjen iz komore za destilaciju, skladišten je u visokotlačnim spremnicima ili dobro izoliranim Dewer-ovim posudama.



**Slika 31.** Postrojenje za proizvodnju dušika [9]

Na slici 31 prikazano je postrojenje za proizvodnju dušika. Ako promotrimo, u procesu proizvodnje dušika postoji samo jedna ulazna jedinica, energija, dok je voda korištena kao rashladno sredstvo i vraća se u okoliš. Treba se naglasiti da kod proizvodnje tekućeg dušika nema dodatnih troškova, kao što su CO<sub>2</sub> i SO<sub>x</sub>.

### 7.3. Kriogena strojna obrada

Kriogena strojna obrada predstavlja metodu hlađenja alata i/ili obratka tijekom procesa obrade. Preciznije, radi se o dovođenju kriogenog sredstva za hlađenje i podmazivanje (umjesto sredstva na bazi ulja) u zonu rezanja na rezni alat koji je izložen najvišim temperaturama tijekom obrade ili na obradak u svrhu mijenjanja karakteristika materijala i poboljšanja parametara obrade.

Kao što je spomenuto, kriogenik koji se koristi kao sredstvo za hlađenje je tekući dušik. Kada se koristi u strojnoj obradi, kada dotakne neku površinu odmah isparava i vraća se natrag u atmosferu, ne ostavljajući nikakve kontaminirane ostatke na obratku, odvojenoj čestici, stroju ili operateru. Kriogena obrada predstavlja vrlo čistu obradu u usporedbi s tradicionalnom obradom sa sredstvima baziranim na ulju. Na slici 32 prikazana je postavka opreme za kriogenu obradu.



**Slika 32.** Postavke opreme za kriogenu obradu [9]

Potencijalne prednosti kriogene strojne obrade su:

- Održiva obradna metoda (čišća, sigurnija, prihvatljivija za okoliš i zdravlje itd.) kojom se uklanjaju brojni troškovi povezani s tradicionalnim sredstvima za hlađenje i operacije čišćenja
- Povećana brzina odvajanja materijala bez povećanja troškova trošenja i zamjene alata – povećanje produktivnosti
- Povećanje brzine rezanja bez povećavanja trošenja i zamjene alata
- Povećan vijek trajanja alata zahvaljujući manjoj abraziji i kemijskom trošenju
- Omogućena obrada tvrdih i teško obradivih materijala koji su bili mogući samo uz korištenje skupih operacija
- Površinska hrapavost je bolja
- Poboljšana kvaliteta proizvedenih dijelova
- Potencijalno niži investicijski troškovi zbog manjeg broja alata koji je potreban
- Napredak u proizvodnoj fleksibilnosti

Najveće ograničenje korištenja ove tehnike nalazi se u njenoj cijeni, što je još uvijek čini relativno nepristupačnom. Skupi sustavi za hlađenje tekućim dušikom su relativno nedostupni i ekonomski teško isplativi. [9]

## 8. ZAKLJUČAK

Suvremena industrija koja se bavi procesima strojne obrade je pod konstantnim pritiskom zbog ograničenih troškova proizvodnje i strogih zakona o očuvanju okoliša. U isto vrijeme zahtjev za kvalitetom obrade raste, isto kao potražnja za raznolikom ponudom proizvoda. Iz tih razloga traže se načini za poboljšanjem proizvodnih procesa novim metodama i uštedama kod strojne obrade. Sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje zbog svojih svojstava štetnih za okoliš i zdravlje ljudi predstavljaju problem te ih se razvojem novih metoda hlađenja pokušava zamijeniti. U radu su iz dostupne literature opisane različite vrste i načini dovođenja rashladnih sredstava u zonu rezanja kod postupaka obrade odvajanjem čestica. Iz toga se mogu vidjeti brojne prednosti korištenja SHIP-a, a isto tako i brojni nedostaci.

Današnjim razvojem materijala alata, posebno prevlaka od cementiranih karbida, dovelo je do korištenja zamjenjivih reznih pločica kojima se napravio veliki korak u pogledu suhe strojne obrade tako da je jeftinije trošiti i mijenjati pločice nego koristiti SHIP. Suha obrada se koristi samo kod velikoserijske proizvodnje, ali razvojem modernih tehnologija trebala bi se uskoro početi koristiti u maloserijskoj i srednje serijskoj proizvodnji.

Razvojem alternativnih vrsta hlađenja spomenutih u radu, kao što su obrada minimalnom primjenom SHIP-a te kriogena obrade nastoji se u skoroj budućnosti napustiti korištenje SHIP-a. To su nove vrste hlađenja koje čine temelj suvremenog održivog razvoja i cilj im je postizanje visokih performansi u obradi odvajanjem čestica uz povećanje sigurnosti i smanjenje troškova kao i uklanjanje negativnog utjecaja SHIP-a na ljude i okoliš.



## LITERATURA

- [1] Udiljak T. , Oblikovanje deformiranjem i obrada odvajanjem čestica – predavanja
- [2] Šavar Š. , Obrada odvajanjem čestica I dio, Zagreb, 1977
- [3] Nedić B. , Lazić M : Proizvodne tehnologije – Obrada metala rezanjem, predavanja, Mašinski fakultet, Kragujevac
- [4] Botički B. , Završni rad, Zagreb, 2010
- [5] Pavić A. , Tehnologija obrada odvajanjem čestica
- [6] S. J. Skerlos , PREVENTION OF METALWORKING FLUID POLLUTION: ENVIRONMENTALLY CONSCIOUS MANUFACTURING AT THE MACHINE TOOL, CHAPTER 5
- [7] [http://site.iugaza.edu.ps/sabdelall/files/2010/02/Ch22\\_Cutting-Tools\\_and\\_Cutting\\_Fluids.pdf](http://site.iugaza.edu.ps/sabdelall/files/2010/02/Ch22_Cutting-Tools_and_Cutting_Fluids.pdf)
- [8] <http://www.sandvik.coromant.com>
- [9] F. Pušavec, A. Stoić, J. Kopač - *The role of cryogenics in machining processes* - Tehnički vjesnik 16, 4 (2009)
- [10] G. Byrne, D. Dornfeld & B. Denkena - *Advancing Cutting Technology* - Laboratory for Manufacturing and Sustainability - University of California, Berkeley - Publication (2003)
- [11] Royal Haskoning - *Harmonisation of Environmental Emission Scenarios Biocides: PT 13 - Metalworking fluid preservatives - Final report* (2003)
- [12] <https://echa.europa.eu/documents/10162/fcaec4c4-6472-47a8-b1e2-7e6e9cd89206>
- [13] HENKEL - *Strojna obrada uz Multan* (2010)
- [14] S. Feng and M. Hattori - *Cost and Process Information Modeling for Dry Machining* - Publication (2000)
- [15] Cemented Carbide, Sandvik new developments and applications, [http://www2.sandvik.com/sandvik/0130/Hi/SE03411.nsf/7a5364adb7735b05412568c70034ea1b/651f6e334db04c46c125707600562c88/\\$FILE/Cemented+Carbide.pdf](http://www2.sandvik.com/sandvik/0130/Hi/SE03411.nsf/7a5364adb7735b05412568c70034ea1b/651f6e334db04c46c125707600562c88/$FILE/Cemented+Carbide.pdf)

- [16] Dixit U.S. , Sarma D.K. , Davim J.P. : Environmentaly Friendly Machining , Chapter 2 – Machining with Minimal Cutting Fluids, 2012
- [17] M. M. A. Khan, M. A. H. Mithu, N. R. Dhar - Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy steel using vegetable oil-based cutting fluid - Elsevier (2009)
- [18] INA MAZIVA - Tehnička Informacija - Tekućine i sredstva za obradbu metala (2010)
- [19] I.S. Jawahir, H.Attia, D.Biermann, J.Duflou, F.Klocke, D.Meyer, S.T. Newman, F.Pusavec, M.Putz, J.Rech, V.Schulze, D.Umbrello - Cryogenic manufacturing processes – Elsevier (2016)
- [20] <http://www.day-impex.co.uk/dilvac-dewar-flasks.html>