

# Sustavi hlađenja reznog alata

---

Grđan, Martin

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:347622>

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

**Martin Grdan**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Damir Ciglar, dipl. ing.

Student:

Martin Grđan

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Damiru Ciglaru na mentorstvu, pomoći, te svom prenesenom znanju tokom studija koje sam upotrijebio za izradu ovog rada.

Također, zahvaljujem se mojim najbližima, obitelji i djevojci, na svom ukazanom povjerenju i podršci i motivaciji tokom školovanja i studija.

Martin Grđan



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske 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: 602 – 04 / 24 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 24 –	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Martin Grđan** JMBAG: **0035232569**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Sustavi hlađenja reznog alata**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Cutting tool cooling systems**

Opis zadatka:

Zbog kontakta i trenja reznog alata i obratka, te reznog alata i odvojenih čestica, nastaje štetna toplina koja uzrokuje smanjenje vijeka trajanja reznog alata. Zbog toga je česta primjena rashladnog sredstva, ali njegova zadaća nije samo hlađenje, već se pod pojmom rashladno sredstvo zapravo podrazumijeva sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje, odnosno uobičajena je skraćenica SHIP. Iako su danas materijali oštrica reznih alata vrlo kvalitetni i podnose visoke temperature, samo hlađenje alata nije toliko važno, te se obrada vrši bez primjene SHIP-a (suha obrada) ili s minimalnom primjenom SHIP-a.

U radu je potrebno iz dostupne literature opisati različite vrste i načine dovođenja SHIP-a u zonu rezanja kod različitih postupaka obrade odvajanjem čestica. Posebni osvrt u radu treba dati na korištenje SHIP-a kod postupaka dubokog bušenja, ali i kod drugih postupaka obrade odvajanjem čestica, gdje se rashladno sredstvo dovodi kroz rezni alat.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

24. 4. 2024.


Datum predaje rada:

2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.  
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.  
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc.  Ciglar

Predsjednik Povjerenstva:

  
prof. dr. sc. Damir Godec

## SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA.....	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY.....	VIII
1. UVOD.....	1
2. OBRADA ODVAJANJEM ČESTICA.....	2
3. PROBLEMI KOD OBRADE ODVAJANJEM ČESTICA.....	4
3.1. Stvaranje topline pri obradi odvajanjem čestica.....	4
3.1.1. Metode mjerenja nastale topline tokom obrade.....	6
3.2. Posljedice stvaranja odvojene čestice.....	6
4. O SHIP-u I NJEGOVA ULOGA.....	8
5. VRSTE SHIP-a PO SASTAVU.....	10
5.1. Čista ulja.....	10
5.1.1. Mineralna ulja.....	10
5.1.2. Biljna ulja.....	12
5.1.3. Životinjska ulja.....	12
5.2. Emulzije.....	13
5.2.1. Vodotopiva ulja.....	13
5.2.2. Sintetičke tekućine.....	13
5.2.3. Polu sintetičke tekućine.....	15
6. KONVENCIONALNE TEHNOLOGIJE PRIMJENE SHIP-a.....	17
6.1. Hlađenje poplavljanjem.....	17
6.2. Hlađenje maglom.....	18
6.3. HPC tehnologija.....	19

---

6.4. Hlađenje stlačenim zrakom .....	20
7. ALTERNATIVE KONVENCIONALNIM NAČINIMA PRIMJENE SHIP-a .....	22
7.1. Suha obrada .....	23
7.2. MQL metoda .....	23
7.2.1. Ionske tekućine .....	25
7.2.2. Kruta maziva.....	25
7.2.3. Nano tekućine .....	26
7.3. Kriogeno hlađenje.....	29
7.3.1. Kriogeno hlađenje tekućim dušikom .....	30
7.4. Hibridna obrada .....	31
8. DOVOĐENJE SHIP-a KROZ ALAT U ZONU REZANJA .....	33
8.1. Dovod SHIP-a kod dubokog bušenja.....	33
8.1.1. SLD sustav.....	34
8.1.2. STS sustav .....	35
8.1.3. DTS sustav.....	36
8.2. Dovod SHIP-a kod tokarenja .....	37
8.3. Inovacija dovoda SHIP-a kroz držač alata .....	38
9. ODRŽAVANJE SHIP-a.....	39
9.1. Centrifugiranje.....	40
9.2. Filtriranje.....	40
9.3. Obiranje.....	41
9.4. Sjedinjivanje .....	41
10. ZAKLJUČAK.....	42
LITERATURA.....	43

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Podjela postupaka odvajanjem čestica [2] .....	3
Slika 2. Zone deformacije pri zahvatu alata i obratka [3].....	4
Slika 3. Raspodjela odlaska topline na elemente sustava obrade [3] .....	5
Slika 4. Usporedba oštećenja površine obratka pravilnim i nepravilnim česticama [5] .....	7
Slika 5. Parametri odabira SHIP-a [6].....	8
Slika 6. Uporaba SHIP-a ovisno o omjeru hlađenje/podmazivanje [2].....	9
Slika 7. INA mineralna ulja za obradu odvajanjem čestica [8] .....	11
Slika 8. INA emulzije za obradu odvajanjem čestica [12] .....	16
Slika 9. Hlađenje poplavljanjem s višestrukim mlaznicama [13] .....	17
Slika 10. Shema sustava hlađenja maglom [6] .....	18
Slika 11. Utjecaj HPC tehnologije na odvojenu česticu [14].....	19
Slika 12. Hlađenje stlačenim zrakom pomoću vrtložne cijevi [2] .....	20
Slika 13. Hlađenje stlačenim zrakom ohlađenog u Dewarovoj boci [2] .....	21
Slika 14. Nove tehnologije SHIP-a [6].....	22
Slika 15. Usporedba prednosti i nedostataka načina dovođenja SHIP-a kod obrade odvajanjem čestica [2].....	22
Slika 16. Rezultati grubosti površine ovisno o vremenu obrade čelika EN 10250 [16] .....	24
Slika 17. Djelovanje nano tekućina u zoni rezanja [19].....	26
Slika 18. Učinak nano čestica na obrađivanu površinu [17].....	27
Slika 19. Ovisnost sile rezanja i vremena obrade o vrsti SHIP-a [11] .....	28
Slika 20. Vrijednosti hrapavosti površine ovisne o vrsti SHIP-a [11] .....	28
Slika 21. Shema sustava kriogenog hlađenja [2] .....	29
Slika 22. Rezultati grubosti površine ovisno o vremenu obrade čelika EN 10083 [21] .....	30
Slika 23. Izradci (a) s kritičnim grebenima i (b) bez grebena [23] .....	31
Slika 24. Stroj za duboko bušenje [27].....	33
Slika 25. Alat za duboko bušenje u CNC tokarskom stroju [28] .....	34
Slika 26. SLD sustav kod dubokog bušenja [26] .....	34
Slika 27. STS sustav kod dubokog bušenja [29].....	35
Slika 28. DTS sustav kod dubokog bušenja [29] .....	36
Slika 29. Načini dovođenja SHIP-a [2] .....	37
Slika 30. Usporedba klasičnog i preciznog dovođenja SHIP-a na prednju površinu alata [30] .....	38



---

Slika 31. Dovod SHIP-a kroz Hi-Jet držač [31].....	38
Slika 32. Gubitci SHIP-a tokom obrade [2].....	39
Slika 33. Razne vrste papira za filtriranje [2] .....	41

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Aditivi u sintetičkim tekućinama i njihova svrha [11].....15

---

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
CNC	/	Računalno numeričko upravljanje (Computer Numerical Control)
CVD	/	Kemijsko taloženje parom (Chemical Vapor Deposition)
DTS	/	Sustav dvostruke cijevi (Double Tube System)
EP	/	Ekstremni tlak (Extreme pressure)
HPC	/	Visokotlačno rashladno sredstvo (High Pressure Coolant)
MQC	/	Minimalna količina hlađenja (Minimum Quantity Cooling)
MQL	/	Minimalna količina podmazivanja (Minimum Quantity Lubrication)
PCD	/	Polikristalni dijamant (Polycrystalline Diamond)
PVD	/	Fizičko taloženje parom (Physical Vapor Deposition)
SHIP	/	Sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje
SLD	/	Bušenje alatom s jednom oštricom (Single Lip Drilling)
STS	/	Sustav jedne cijevi (Single Tube System)
Q	J	Toplina

---

**SAŽETAK**

Ovaj radi govori o poteškoćama na koje se nailazi prilikom postupaka obrade odvajanjem čestica, te njihovim otklanjanjem pomoću primjene SHIP-a. SHIP može biti u raznim oblicima, agregatnim stanjima i sastavima, od kojih svaki ima neka posebna obilježja i područja primjene. Primjena tih reznih tekućina i ostalih oblika, moguća je na više načina. Navedeni su konvencionalni načini primjene, koji su u uporabi duže vrijeme, ali i neki alternativni načini, razvijeni u svrhu poboljšanja raznih parametara, od kojih je jedan od glavnih postizanje održive obrade u svrhu očuvanja okoliša. Osim tehnologije primjene, zadaća SHIP-a se mijenja ovisno o mjestu na, ali kroz koje se dovodi. Stavljen je naglasak na tehnologiju dovoda reznih tekućina kroz alat, te postupcima obrade kod kojih se ista primjenjuje. Posebice je razrađen postupak obrade dubokog bušenja. Na kraju su opisani neki načini održavanja i čišćenja SHIP-a tijekom i nakon uporabe.

Ključne riječi: poteškoće kod obrade odvajanjem čestica, vrste SHIP-a, tehnologije primjene SHIP-a, dovod SHIP-a kroz alat

---

**SUMMARY**

This thesis talks about the difficulties encountered during the processing by particle separation, and their elimination using the application of cutting fluids. They can be in various forms, aggregate states and compositions, each of which has some special characteristics and areas of application. Application of these cutting fluids and other forms is possible in several ways. There is a list of conventional methods of application, which have been used for a long time, but also some alternative methods, developed for the purpose of improving various parameters, one of the main of which is to achieve sustainable processing for environment protection, are listed. In addition to the application of technology, the mission of cutting fluid changes depending on the place to, but also through which it is delivered. Emphasis is placed on the technology of supplying cutting fluids through the tool, and the processing procedures in which it is applied. The deep drilling processing procedure has been specially elaborated. At the end, some cutting fluid maintenance and cleaning ways, during and after use, are described.

Key words: difficulties in processing by particle separation, types of cutting fluids, cutting fluid application technology , cutting fluid supply through the tool

## **1. UVOD**

Strojarstvo je, subjektivno i objektivno, jedna od ključnih djelatnosti i gospodarskih grana ljudskog roda, kako kroz cijelu povijest, tako i danas. Ono je upleteno u više-manje svakidašnji život pojedinca, te bez njega, slika današnje tehnologije, djelatnosti i svijeta općenito bila bi drastično drugačija.

Jedna od najstarijih grana strojarstva je strojna obrada, to jest izrada alata, proizvoda ili nečeg trećeg iz sirovog komada materijala. Strojna obrada je kroz povijest doživjela razne promjene, inovacije i otkrića, što je doprinijelo njezinoj relevantnosti i nezamjenjivosti u današnjoj industriji. Zadnjih par desetljeća sve je veći trend automatizacije pogona i isključenje čovjeka iz fizičkih poslova, pokrenut ciljevima poput smanjenja napora i opasnosti od ozljede ali i povećanja preciznosti i smanjenja grešaka, te ubrzanja proizvodnje. To je itekako primjetljivo kod strojne obrade, čiji početci su bili svi vezani i ovisili o čovjekovom baratanju alatom, a danas su najzastupljeniji CNC strojevi, štoviše sve češći su strojevi i cijela postrojenja gdje ljudska ruka nije uopće potrebna za obradu materijala.

No, razvitak procesa obrade do današnje razine bio je isprepleten mnogim preprekama i problemima. Neki od najvećih problema bili su vezani uz zagrijavanje i trošenje rezne oštrice alata, te odvođenje odvojenog materijala iz zone rezanja, koji su uklonjeni ili znatno smanjeni uvođenjem SHIP-a.

U ovom radu biti će glavna riječ o svrsi, razvoju, vrstama i tehnologijama uporabe SHIP-a, te njihovoj važnosti u suvremenim postupcima obrade odvajanjem čestica, a biti će navedene i neke najnovije tehnologije koje polako dobivaju na popularnosti i zamjenjuju konvencionalne.

---

## 2. OBRADA ODVAJANJEM ČESTICA

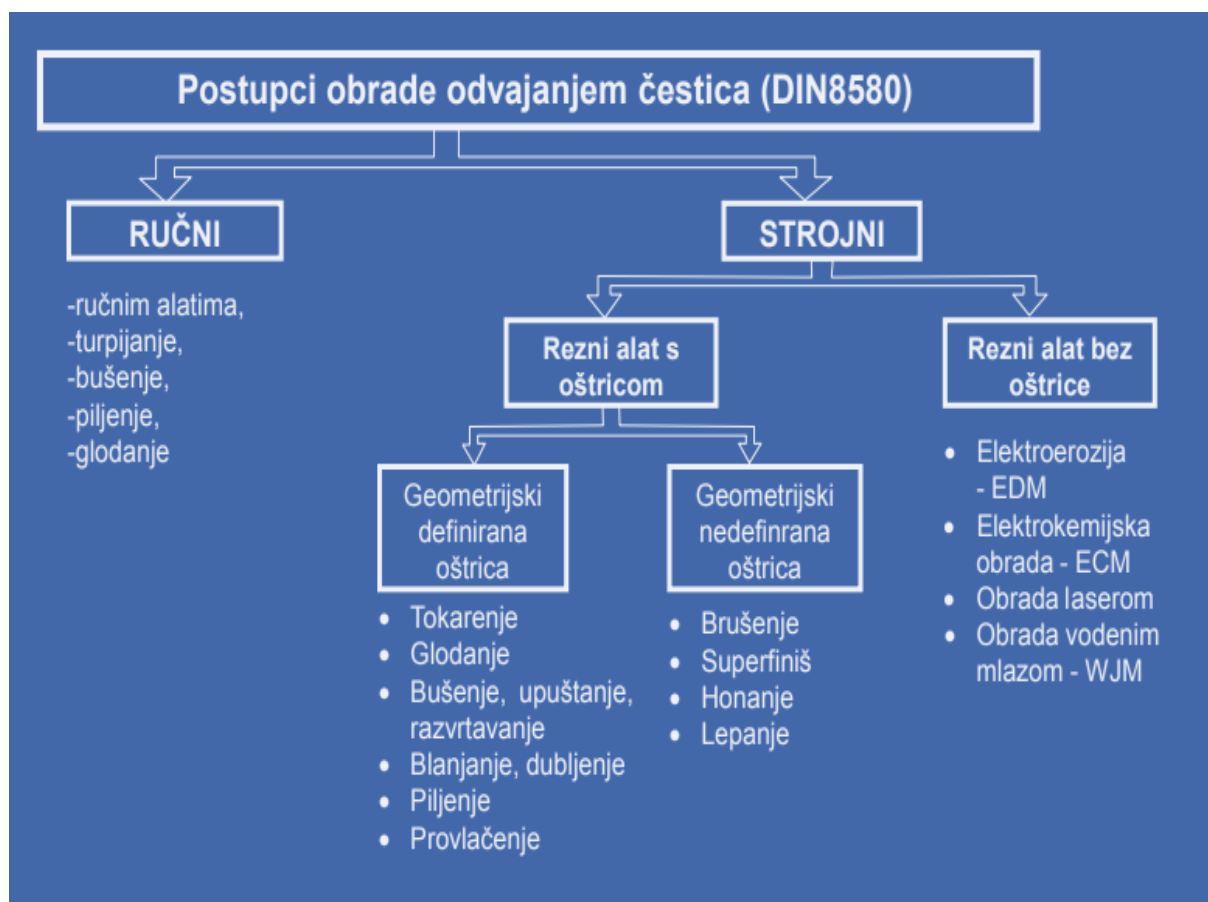
Obrada odvajanjem čestica je širok pojam koji obuhvaća mnoge i vrlo različite postupke obrade materijala u strojarstvu, podijeljene po skupinama kao na slici 1. U početku je to bila samo ručna obrada, koju je u potpunosti obavljao čovjek, a daljnjim inovacijama razvijene su brojne strojne tehnologije. Primarna svrha obrade odvajanjem čestica je oblikovanje obratka u neki komad, dio ili gotovi proizvod uklanjanjem materijala [1].

Prednosti obrade odvajanjem čestica:

- Visoka kvaliteta obrađene površine, često bez potrebe za završnom obradom
- Postizanje visoke preciznosti i uskih tolerancije
- Široka primjena (uglavnom svi materijali i dimenzije)
- Ekonomičnost pri pojedinačnoj i maloserijskoj proizvodnji
- Moguća obrada najzahtjevnijih geometrija i oblika
- Moguća automatizacija procesa
- Jedini način za formiranje oštih rubova, ravnih površina i unutarnjih i vanjskih profila

Nedostatci obrade odvajanjem čestica:

- Stvaranje i nakupljanje odvojene čestice
- Česta potreba za kombiniranjem različitih metoda za obradu jednog obratka
- CNC strojevi zahtijevaju određeno znanje za upravljanje
- Zauzimanje velike količine prostora
- Štetan utjecaj na okolinu (odvojene čestice, buka, toplina)
- Pomoćna i pripremna vremena zauzimaju velik udio ukupnog vremena rada



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



### 3. PROBLEMI KOD OBRADJE ODVAJANJEM ČESTICA

#### 3.1. Stvaranje topline pri obradi odvajanjem čestica

Zbog dodira rezne oštrice alata i obratka pri procesu obrade, oslobađa se toplina, koja ima velik utjecaj na mehanizam trošenja i vijek trajanja alata, kvalitetu i postignute tolerancije obrade, te mehanizam stvaranja odvojene čestice.

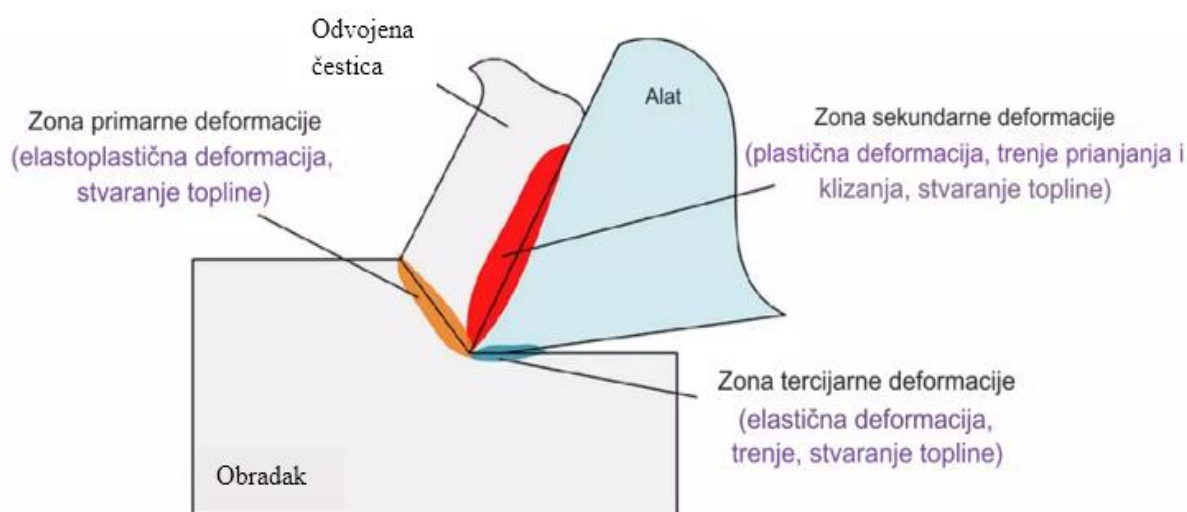
Neki od glavnih parametara koji utječu na stvaranje topline su brzina rezanja, posmična brzina, dubina rezanja, te vrsta materijala alata i obratka [2].

Jednadžba toplinske bilance (1) glasi:

Topline nastale zbog deformacije, nastalog trenja i odvojene čestice, jednake su zbroju toplina koje prijeđu na alat i obradak.

$$Q_d + Q_{tr} + Q_{oč} = Q_{al} + Q_{ob} \quad (1)$$

Kao što je vidljivo na slici 2., postoje tri glavne zone deformacije.

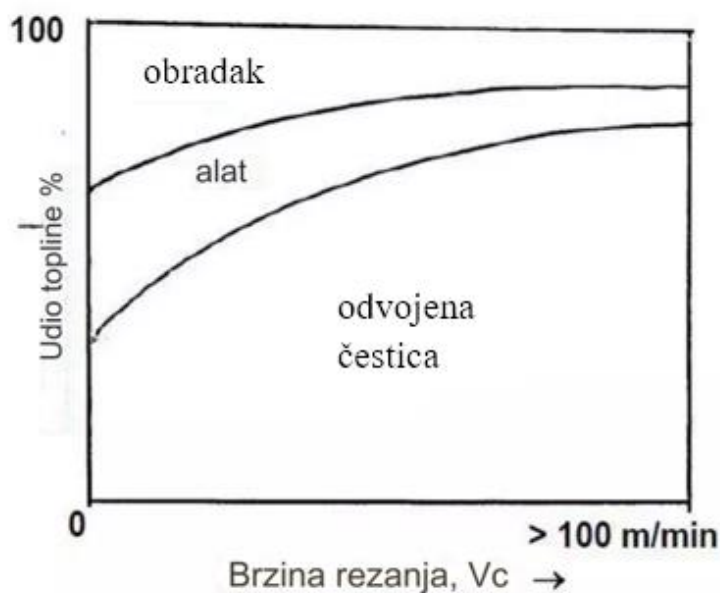


Slika 2. Zone deformacije pri zahvatu alata i obratka [3]

Prva, primarna zona, je zona u kojoj se razvija toplina nastala zbog plastične deformacije materijala obratka tokom odvajanja. Ta toplina se prenosi na odvojenu česticu i obradak, a iz slike 3. se može uočiti da povećanjem brzine rezanja povećava se i toplinski prijenos na odvojenu česticu.

Sekundarna zona označava dio dodira prednje površine rezne oštrice alata i odvojene čestice obratka. Toplina nastala u toj zoni je produkt kombiniranog istovremenog kliznog i dodirnog trenja, od kojeg veću količinu topline uzrokuje trenje prijanjanja, a na rubovima trenje klizanja zbog manjeg tlačnog naprežanja na tim mjestima. U ovoj zoni dolazi do prijenosa topline na oštricu alata budući da se odvojena čestica brže hladi od njega, što je vrlo nepovoljno za alat i zahtjeva pomnu razradu tehnologije i parametara obrade, te odabir materijala i vrste reznog alata.

Tercijalna zona obuhvaća područje oko vrha rezne oštrice alata. Ona bude često zanemarena u proračunima, no može imati velik utjecaj u određenim uvjetima. Ako je rezna oštrica nova, male su šanse za razvitak značajne količine topline, no ako je istrošena, ili veće površine, zbog visokih brzina rezanja može doći do stvaranja čak i veće količine topline nego u sekundarnoj zoni [4].



Slika 3. Raspodjela odlaska topline na elemente sustava obrade [3]

### 3.1.1. Metode mjerenja nastale topline tokom obrade

Iznos nastale topline iz tri glavne zone, uklopljen u toplinsku bilancu jed. (1) je ključan u odabiru reznog alata i njegovih parametara za proces obrade, te se zato proračunava i mjeri pomoću raznih metoda [4]:

- a) Analitički modeli - Greenove funkcije, Duhmalova super pozicija, itd.; novo razvijeni modeli koji uzimaju u obzir iznos topline i iz tercijalne zone, nedostatak im je otežana procjena toplinskog toka zbog temperaturnih vibracija koje utječu na svojstva materijala alata i obratka
- b) Numerička rješenja - metoda konačnih razlika, metoda konačnih volumena, metoda konačnih elemenata, itd.; rijetko se koriste zbog velike kompleksnosti
- c) Empirijske korelacije - zahtijevaju manje podataka i računanja od analitičkih metoda, ograničene u uporabi kod kompliciranijih slučajeva, poput onih s postojanjem SHIP-a u obradnom procesu
- d) Inverzna metoda – trenutno glavni model mjerenja topline, rezultati se dobivaju preko simulacija koje se provode pomoću komercijalnih softvera (ANSYS, COMSOL, ABAQUS, itd.), mogućnost nalaženja više rješenja za jedan problem
- e) Eksperimentalne metode – tehnike mjerenja pomoću kondukcije ili zračenja (novija tehnologija koristi infracrveno zračenje koje daje precizna mjerenja, ali je vrlo skupo)

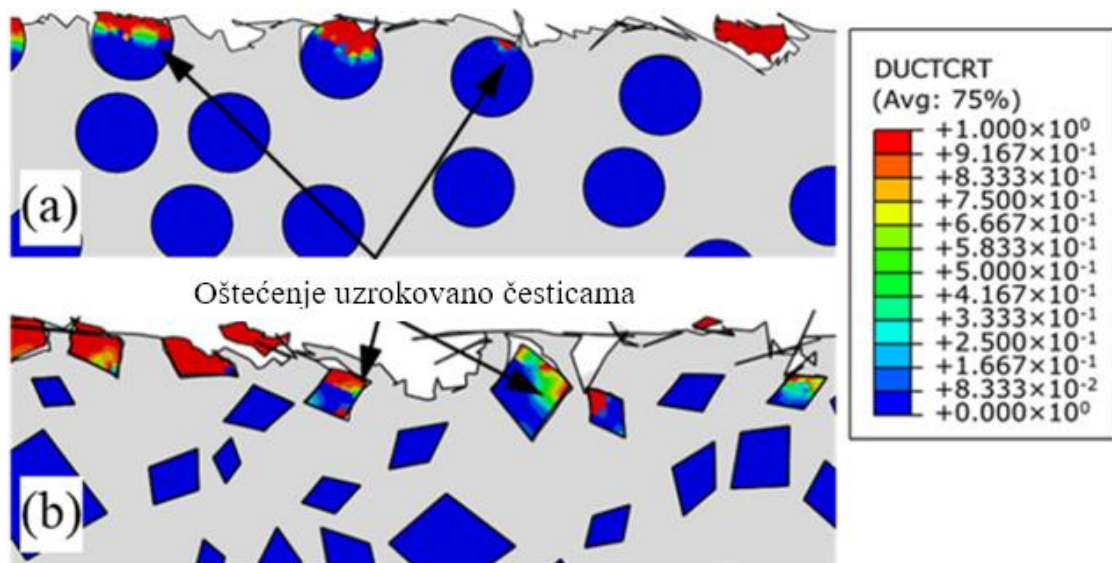
### 3.2. Posljedice stvaranja odvojene čestice

Odvojene čestice su nezaobilazan produkt tokom obrade, s kojima dolaze sljedeće negativne pojave [3]:

- Nečistoće - odvajanjem materijala s površine obratka, stvara se prašina i druge nečistoće koje ulaze u kontakt između rezne oštrice alata i obratka, te smanjuju kvalitetu obrade i preciznost, a povećavaju trošenje alata. Također otežavaju radniku ili sensorima uvid u tijek obrade, čime razne pogreške i nepravilnosti mogu biti previđene. Posljedice ne utječu samo na konačan proizvod, već i na čovjeka i okolinu. Duljom izloženošću zrakom punom prašine i ostalih štetnih produkata, radniku i drugima u okolini se može ozbiljno oštetiti zdravlje, poput problema s dišnim putevima i vidom. Obradom drvenih sirovaca, obavezna je razrada tehnologije odvođenja odvojene čestice, tj. piljevine, zbog

velikog omjera površine i volumena vrlo su sklone zapaljenju, što je u nekim slučajevima dovelo do požara i eksplozija u postrojenjima

- Čestice nepravilnih i oštrih oblika - porastom temperature u zoni rezanja, odvojene čestice poprimaju nepravilne i oštre oblike, čime mogu oštetiti alat i površinu obrade, što je vidljivo na slici 4. Također se zbog visoke temperature mogu prilijepiti za oštricu alata, čime se dodatno smanjuje kvaliteta obrade

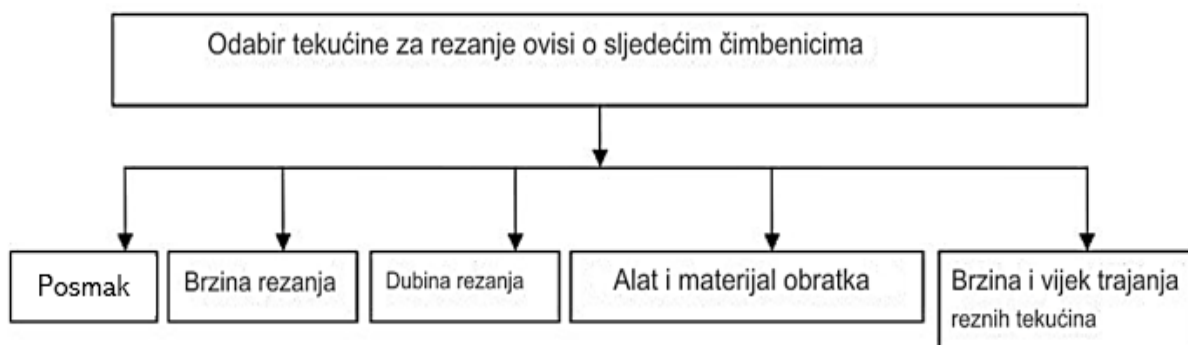


Slika 4. Usporedba oštećenja površine obratka pravilnim i nepravilnim česticama [5]

- Korozija - materijal poput željeza lako hrđa i oksidiranje površinskih slojeva koji se obrađuju otežava daljnju obradu tako što se troši alat, smanjuje kvaliteta svojstava materijala i povećavaju naprezanja i nepravilnosti tokom obrade

#### 4. O SHIP-u I NJEGOVA ULOGA

SHIP je uobičajena i često korištena kratica za sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje. Ta sredstva imaju brojne pozitivne utjecaje na strojnu obradu, uz pravilno raspisanu tehnologiju. Na slici 5. prikazani su neki od najbitnijih parametara po kojima se odabire vrsta SHIP-a koji je prikladno koristiti.



Slika 5. Parametri odabira SHIP-a [6]

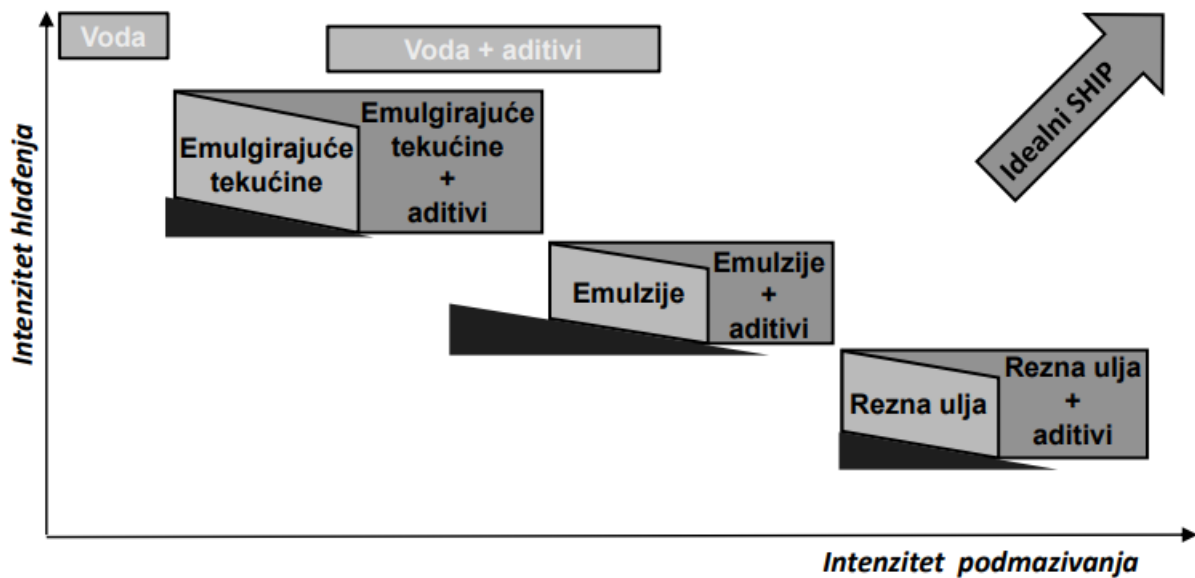
Uporaba SHIP-a je primarno fokusirana na obrade reznim alatima s oštricom, kod kojih dolazi do kontakta između rezne oštrice i površine obratka.

Glavne zadaće tih tekućina su hlađenje i podmazivanje površine obratka i oštrice alata tokom procesa obrade. Hlađenjem i podmazivanjem se smanjuje učinak abrazije i adhezije (pri niskim brzinama rezanja), čime se povisuje kvaliteta obrađene površine, produljuje vijek trajanja alata i smanjuju naprezanja i sile rezanja.

Također, bitna funkcija SHIP-a je odvođenje prašine i prljavština s mjesta obrade, čime se smanjuje vrijeme čišćenja alata i povisuje kvaliteta obrade. Većinom je potrebna uporaba SHIP-ova koja pružaju zaštitu od korozije, budući da se većinom obrađuju metalni materijali. SHIP može utjecati na proces i intenzitet loma, tj. vrstu oblika odvojene čestice.

Odabir specifične vrste SHIP-a ovisi o svrsi kojoj je namijenjen, kao što prikazuje slika 6., a neka općenita svojstva kojima se odlikuju su prema literaturi [6]:

- Niska viskoznost (dobro čisti površinu obrade od taloga i prašine)
- Visoka točka zapaljenja (smanjen rizik od požara)
- Velika specifična toplina
- Niska površinska napetost
- Nizak koeficijent trenja
- Stabilnost pri visokim temperaturama (slabo isparavanje, dug vijek trajanja)
- Visoka toplinska vodljivost (brzo odvođenje topline s alata i obratka)



Slika 6. Uporaba SHIP-a ovisno o omjeru hlađenje/podmazivanje [2]

## 5. VRSTE SHIP-a PO SASTAVU

Gledano po sastavu, SHIP-ovi se mogu podijeliti u dvije glavne kategorije, koje čine čista ulja i emulzije [6].

### 5.1. Čista ulja

Sredstva na bazi ulja imaju primarnu svrhu podmazivanja površine alata i obratka, a sekundarna zadaća im je (djelomično) hlađenje. Koriste se za manje brzine obrade.

#### 5.1.1. Mineralna ulja

Mineralna ulja su najčešće korištena sredstva za hlađenje i podmazivanje u strojnoj obradi. Dobivaju se destilacijom sirove nafte, a sastoje se pretežno od zasićenih ugljikovodika C15-C50. To su bezbojne i bezmirisne tekućine, netopive u vodi i alkoholu. Ta vrsta ulja je jedna od najranijih upotrebljivanih sredstava za podmazivanje općenito. Odlikuje ih dobra viskoznost, sposobnost smanjenja trenja i zaštita od korozije. Jeftina su i široko dostupna. Parafinsko ulje je najčešće korišten tip mineralnog ulja. Neka mineralna ulja dostupna na tržištu mogu se vidjeti na slici 7.

Tehnički nedostaci su im visoka zapaljivost, te lošija sposobnost hlađenja prvi većim brzinama rezanja i višim temperaturama. No, njihov veći problem su nedostaci vezani uz odlaganje jer su štetna po okoliš i vode zbog poteškoća u razgradnji. Uz to, tijekom obrade formiraju se dimovi i pare koje su štetne po čovjekovo respiratorno zdravlje [7].



### INA REZANOL NMP HD 32 BKK

Visokoučinkovito ulje za srednje i teške uvjete primjene i teškoobradive metale. Osobito se preporuča za primjenu u automatima jer osim dobrih svojstava obrade podmazuje i cijeli stroj uključujući i hidrauličke sustave.



### INA REZANOL AMS 10 BKK

Mineralno aktivno ulje posebne aditivacije s povećanim sadržajem masne komponente za duboko bušenje, profilno brušenje, finalnu obradbu čelika i lijevanih metala gdje se traži manja viskoznost.



### INA REZANOL AMS 20 BKK

Mineralno aktivno ulje posebne aditivacije s povećanim sadržajem masne komponente za duboko bušenje, profilno brušenje, finalnu obradbu čelika i lijevanih metala gdje se traži manja viskoznost.



### INA REZANOL A HD 43 BKK

Visokoučinkovito ulje za provlačenje i rezanje navoja kod najteže obradivih legiranih čelika. Prikladno je za izvlačenje i prešanje te hladno kovanje.

**Slika 7. INA mineralna ulja za obradu odvajanjem čestica [8]**



### 5.1.2. Biljna ulja

Biljna ulja se uglavnom sastoje od triglicerida (glicerola s tri masne kiseline). Najčešće korištena biljna ulja za podmazivanje su ulja visokog oleinskog sadržaja od uljane repice, suncokretovog, sojinog ili ricinusovog ulja. Ulje uljane repice sadrži 40–45% ulja, sjemenke suncokreta sadrže 40% ulja, a soja 20% ulja. Trenutno se većina biljnih ulja iz ovih izvora pretvara u metil estere masnih kiselina, u biološkom pogledu spadaju u bio dizelska goriva. Soja se najviše uzgaja u Sjedinjenim Američkim Državama, a biljna ulja proizvedena od soje su stoga i najzastupljenija upravo tamo. Ulje uljane repice, suncokreta i soje većinom sadrži oleinsku i linolensku kiselinu, iako se omjeri razlikuju. Oleinska kiselina ima 18 ugljikovih atoma i jednu dvostruku vezu, dok linolenska kiselina ima 18 ugljikovih atoma i dvije dvostruke veze. Ovo ulje se dodatno pročišćava ekstrakcijom otapalom kako bi se uklonili nepoželjni sastojci i produžio vijek trajanja biljnog ulja.

Biljna ulja imaju izvrsna svojstva podmazivanja, visoke indekse viskoznosti, visoke točke zapaljenja, biorazgradiva su i obnovljiva, u usporedbi s većinom ostalih sredstava pokazuju superiornije izmjere kvalitete obrađene površine, te su općenito male toksičnosti zbog čega ih se sve više koristi u raznim industrijama, pa tako i u obradi odvajanjem čestica. Međutim, stabilnost na oksidaciju je niska zbog prisutnosti dvostrukih (nezasićenih) veza. Ako se ne obrađuju, brzo oksidiraju, što dovodi do povećanja viskoznosti i polimerizacije, stvarajući površinu sličnu plastici. Rješenje tog problema je kemijska modifikacija biljnih ulja s vodikom, koja poboljšava njihovu stabilnost na oksidaciju. Biljna ulja imaju ograničena svojstva tečenja na hladnoći. Točka izlivanja na bazi biljnih ulja poboljšava se dodavanjem depresora ili dodavanjem druge osnovne tekućine s boljim svojstvima točke izlivanja. U slučaju biljnih ulja, druga osnovna tekućina obično je nekakav sintetički ester [9].

### 5.1.3. Životinjska ulja

Pod životinjska ulja spadaju masti iz životinja poput krava i svinja. Vrlo su otporne na velike temperature obrade, te pokazuju vrlo dobra svojstva podmazivanja. Mala učestalost u čistom stanju zbog nestabilnosti (velik broj mogućih kemijskih reakcija), manje dostupnosti, teže aplikacije i održavanja, te uskog područja uporabe [10].

## **5.2. Emulzije**

Voda kao zasebna tvar sadržava odlična svojstva odvođenja topline. No, zbog loših svojstava podmazivanja i sklonosti stvaranju korozije, mora se pomiješati s nekim drugim tvarima koja to nadoknađuju. Budući da se voda i ulja ne mogu izmiješati sama od sebe, potrebno je posebno sredstvo emulgator, koje s njima čini tekućinu zvanu emulzija. Emulgatori smanjuju površinske napetosti tekućina jer sadrže hidrofobne i hidrofilne molekule [11]. Hidrofobne molekule privlače molekule ulja, a hidrofilne molekule vode, te na kraju reakcije nastaje stabilna emulzija.

Sredstva na bazi vode se koriste u primarnu svrhu hlađenja, a sekundarno podmazivanja dijelova procesa obrade.

### **5.2.1. Vodotopiva ulja**

Vodotopiva ulja su ulja koja se mogu miješati s vodom, pomoću emulgatora i drugih aditiva. Mliječne su boje, niske cijene, imaju bolju sposobnost hlađenja od čistih ulja, pogotovo na većim brzinama obrade, te pružaju zaštitu od korozije. Imaju široku uporabu, mogu se koristiti za obradu željeznih i neželjeznih metala tokom malih i srednjih brzina obrade. Slabije podmazuju od čistih ulja, no imaju šire područje uporabe od njih zbog aditiva koje sadrže. To su aditivi poput EP aditiva za otpor na visoke tlakove i sredstva za vlaženje, koje smanjuje površinsku napetost tekućine, te ona može lakše i bolje prodrijeti do uskih i malih prostora [11].

Nedostaci su im stvaranje otrovne magle, osjetljivost na tvrdu vodu (voda s visokim sadržajem otopljenih minerala) i pjenjenje zbog sklonosti mikrobiološkoj kontaminaciji. Uz to, nakon korištenja vodotopivih ulja, nastaje sloj kontaminiranog ulja koje je nepoželjno i potrebno je očistiti površine od njega. Stoga, troškovi i kompleksnost održavanja su poprilično visoki.

### **5.2.2. Sintetičke tekućine**

Pod ovu kategoriju spadaju emulzije na bazi ulja, ali bez udjela mineralnih ulja i nafte.

Opći sastav uključuje alkalne organske i anorganske spojeve uz dodatak inhibitora. Uglavnom se isporučuju u koncentriranom obliku, koji je potrebno razrijediti vodom za formiranje gotovog SHIP-a. Ove tekućine su pogodne za operacije pri većim brzinama obrade, te mogu

biti podvrgnute visokim temperaturama zbog izvrsnog svojstva hlađenja. Imaju dobra antikorozivna svojstva, ali su toksične i poprilično skupe [6]. Široko su upotrebljive zbog raznih aditiva s kojima ih je moguće modificirati, a neki najčešći od njih su vidljivi u tablici 1.

Sintetičke rezne tekućine dijele se u tri podskupine [11]:

a) Jednostavna sintetička ulja

Uporabljiva su za lakše postupke obrade odvajanjem čestica, poput brušenja.

b) Složena sintetička ulja

Pod njih spadaju sintetička maziva koja se koriste za srednje i teže postupke obrade, s većim parametrima brzine i posmaka obrade. Mogu se pomiješati s jednostavnim sintetičkim uljem, da se dobije prozirni SHIP, čime se poboljšava preglednost obradnog procesa radniku koji radi na stroju.

c) Emulzijska sintetička ulja

To su emulzije u koje se nadodaju aditivi radi poboljšanja svojstava. Zbog toga imaju bolju kombinaciju svojstava podmazivanja i hlađenja od ostalih sintetičkih ulja, pogotovo tokom težih i zahtjevnijih procesa obrade. Olakšavaju obradu teško obradivih materijala, te zbog odlične postojanosti na visokim temperaturama, visoko temperaturnih legura. Uglavnom su polu-prozirne ili neprozirne.

Tablica 1. Aditivi u sintetičkim tekućinama i njihova svrha [11]

Kemijski aditivi	Funkcija
Nitriti i amini	Zaštita od hrđe
Fosfati i borati	Omekšivač vode
Glikoli	Poboljšano miješanje
Nitrati	Za stabilizaciju tekućine ako su prisutni nitriti
Sredstva za vlaženje i sapuni	Poboljšano podmazivanje
EP aditivi	Poboljšana postojanost pri visokim tlakovima, bolja mazivost
Biocidi	Zaštita od bakterija

### 5.2.3. Polu sintetičke tekućine

Za razliku od sintetičkih, polu sintetičke tekućine sadrže mineralno ulje u sastavu, točnije od 2% do 30%. Ostatak čine sintetičke otopine, emulgatori i aditivi. Odlikuju se dobrim svojstvima hlađenja i vlaženja oštrice alata i obrađivane površine, imaju bolja antikorozivna svojstva i manje su toksična od sintetičkih tekućina [6]. Nisu najbolji izbor za obradu kompleksnijih metala poput nehrđajućih čelika, jer naspram mineralnih, biljnih i sintetičkih ulja, slabije sprečavaju trošenje rezne oštrice alata. Neki proizvodi dostupni na trenutnom tržištu prikazani su na slici 8.



### INA Sint B

Sintetička EP tekućina za hlađenje i podmazivanje u operacijama tokarenja, glodanja, rezanja navoja, dubokog bušenja, provlačenja, izvlačenja i profilnog brušenja teškoobradivih željeznih, obojenih i drugih materijala. Primjenjuje se i pri operacijama odrezivanja ingota te deformiranja kao što su duboko vučenje lima, savijanje i dr. S vodom stvara stabilne i prozirne otopine.



### INA HSP Plus

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 i u konvencionalnim obradbenim strojevima.



### INA BU 7

Emulgirajuća tekućina koja s vodom stvara stabilnu mliječnu emulziju. Služi za obradu čelika, željeza i obojenih metala kod operacija brušenja, tokarenja kao i na automatima.

Slika 8. INA emulzije za obradu odvajanjem čestica [12]

## 6. KONVENCIONALNE TEHNOLOGIJE PRIMJENE SHIP-a

Postoje mnoga rješenja u pogledu dovođenja SHIP-a u zonu rezanja i obrade materijala tokom obrade odvajanjem čestica.

U konvencionalne tehnologije spadaju:

- Hlađenje poplavljanjem
- Hlađenje maglom
- HPC tehnologija
- Hlađenje stlačenim zrakom

### 6.1. Hlađenje poplavljanjem

Ovaj način primjene SHIP-a je primarno fokusiran na hlađenje, a sekundarno na podmazivanje tokom obrade. Najčešće se koristi na CNC strojevima.

Tekućina se dovodi kroz mlaznicu ili više njih, u obliku kontinuiranog, slobodnog mlaza u područje vrha rezne oštrice alata radi odvođenja toplote i smanjenja trošenja alata, vidljivo na slici 9.



Slika 9. Hlađenje poplavljanjem s višestrukim mlaznicama [13]

Klasično hlađenje poplavljanjem je jedan od najboljih načina u pogledu brzine i intenziteta hlađenja, no ima brojne nedostatke. Troškovi obrade su visoki zbog velike potrošnje SHIP-a, prosječna količina potrošnje kod obrada s zahvatom jedne rezne oštrice je oko 10 litara u minuti, dok kod operacija s više reznih oštrica (zubi) u zahvatu potrošnja može biti i daleko veća. Zbog tolike potrošnje tekućine, nastaju problemi s odlaganjem i štetnim utjecajem na okoliš.

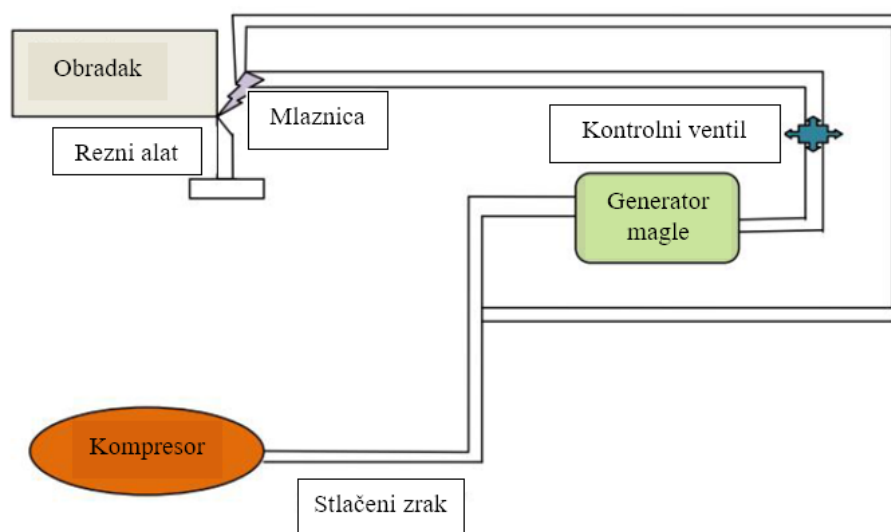
Hlađenje poplavljanjem se često izvodi pod tlakom od 300 kPa naviše, pri kojem se postiže najbolje hlađenje, posebice u zazoru između oštrice alata i obratka.

Pri manjim brzinama obrade, uporaba tehnike poplavljanjem doprinosi smanjenju površinske hrapavosti i pod površinskih oštećenja. Nije prikladna primjena kod većih brzina obrade zbog stvaranja mjehurića koji sprečavaju prijenos topline s alata i obratka na SHIP [6].

## 6.2. Hlađenje maglom

Kod tehnologije hlađenja maglom, sredstva za hlađenja na bazi vode su raspršivana kroz mlaznicu visokom brzinom, zajedno sa stlačenim zrakom, u svrhu dobivanja SHIP-a u obliku magle. Time se dobije odlično sredstvo za odvođenje topline i poboljšanje vijeka trajanja oštrice alata, bez problema odlaganja i zagađivanja okoliša.

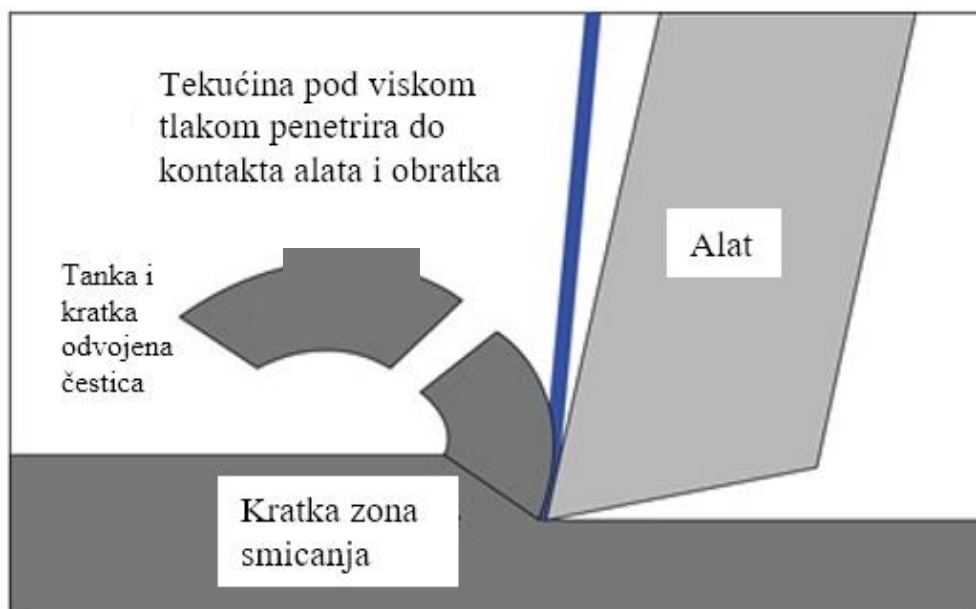
Koriste se u procesima obrade kod kojih podmazivanje nije potrebno, a često i nepoželjno. Lakše je za održavanje i čišćenje naspram tehnike poplavljanjem, te je puno manja potrošnja rashladnog sredstva (50 do 500 mililitara u minuti), a time i troškovi [6]. Lošija je kod primjene obrade teško obradivih materijala poput nehrđajućeg čelika i titanija. Dijelovi sustava hlađenja maglom prikazani su na slici 10.



Slika 10. Shema sustava hlađenja maglom [6]

### 6.3. HPC tehnologija

HPC je skraćenica za High Pressure Cutting (Rezanje pod visokim tlakom). Ovom tehnologijom obrađuju se materijali visoke tvrdoće uz prisustvo tekućih SHIP-a vrlo visokih tlakova, kao što i sam naziv govori. Efektivna je u smanjenju trošenja rezne oštrice alata, povišenju produktivnosti, te reduciranju troškova proizvodnje. Odlikuje se dobrim svojstvima hlađenja i podmazivanja, te posjeduje mogućnost kontroliranja oblika nastale odvojene čestice, ovisno o tlaku i protoku mlaza tekućine. U usporedbi s tehnikom poplavljanja i ostalim tehnikama s niskim tlakom primjenjivanja, u kojima su odvojene čestice duguljastog i cjevastog oblika, kod HPC su one vrlo kratke i oblika iglica, kao na slici 11. Promjenom oblika i smanjenjem veličine odvojenih čestica, olakšano je ispiranje istih s područja obrade, a postojanost rezne oštrice poboljšana je za do 20% [6].



Slika 11. Utjecaj HPC tehnologije na odvojenu česticu [14]

HPC prodire dublje u kontakt između obratka i reznog alata, čime pruža snažnije hlađenje od ostalih konvencionalnih tehnologija, pogotovo kod teže obradivih materijala, poput titana. Naspram suhe obrade odvajanjem čestica (bez SHIP-a), HPC tehnologija na visokim tlakovima (oko 100 bar) produljuje vijek uporabe alata za do čak 9 puta.

Potrebni su posebni propisi i mjere zaštite radnog mjesta i radnika zbog rukovanja s ekstremno visokim tlakovima [14].

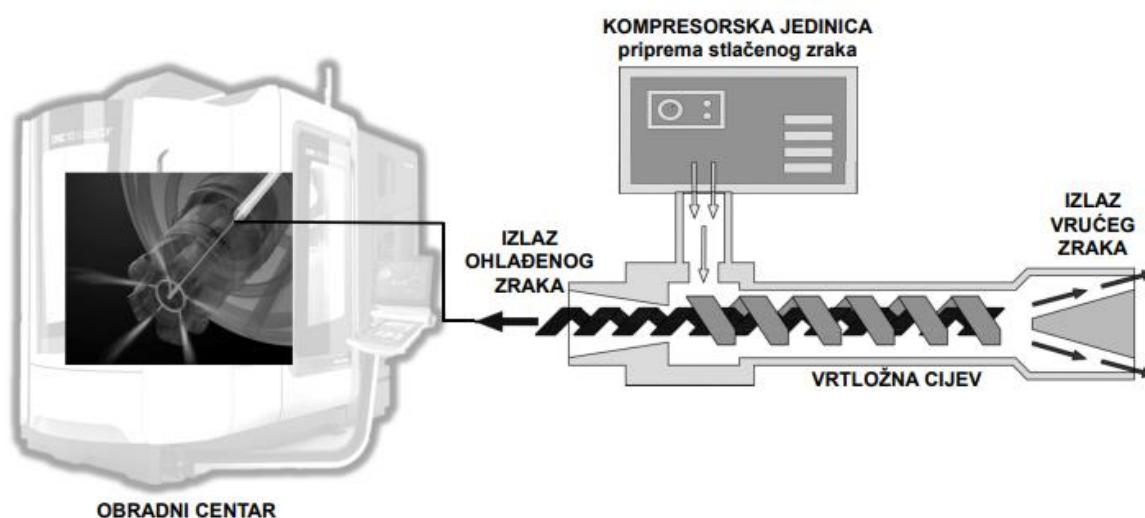


## 6.4. Hlađenje stlačenim zrakom

Ova tehnika je jedna od najbrže rastućih u zadnje vrijeme, ona biva sve više zastupljena u strojnoj obradi zbog mnogih pozitivnih strana. Koristi stlačeni zrak kao sredstvo za hlađenje, čime pokazuje puno bolja svojstva hlađenja od suhe obrade, te puno bolja ekološka i ekonomska svojstva od konvencionalnih načina primjene SHIP-a. Pogodan je za obradu teško obradivih materijala poput titana i nehrđajućeg željeza. Budući da je glavni medij zrak, nema nikakvih problema s odlaganjem i skladištenjem istog, te s obzirom da je vrlo lako dostupan, cijene nabave su neznatne naspram ostalih tehnologija. Također nema nikakvih štetnih posljedica po radnika i ostale u okolini. Sve to ga čini vrlo privlačnom opcijom u procesima obrade kod kojih je bitno snažno hlađenje i odvođenje odvojenih čestica, bez potrebe za podmazivanjem.

Nedostatak mu je, da naspram rashladnih tekućina, zrak ipak ima puno manju specifičnu toplinu, te ne može rashladiti kontakt obratka i alata brzo kao one. Nema vrlo široko područje primjene zbog nedostatka svojstva podmazivanja. Isto tako, budući da je to relativno nova tehnologija, postoji još potrebe za istraživanjima i uhodavanjem iste u pogonima [15].

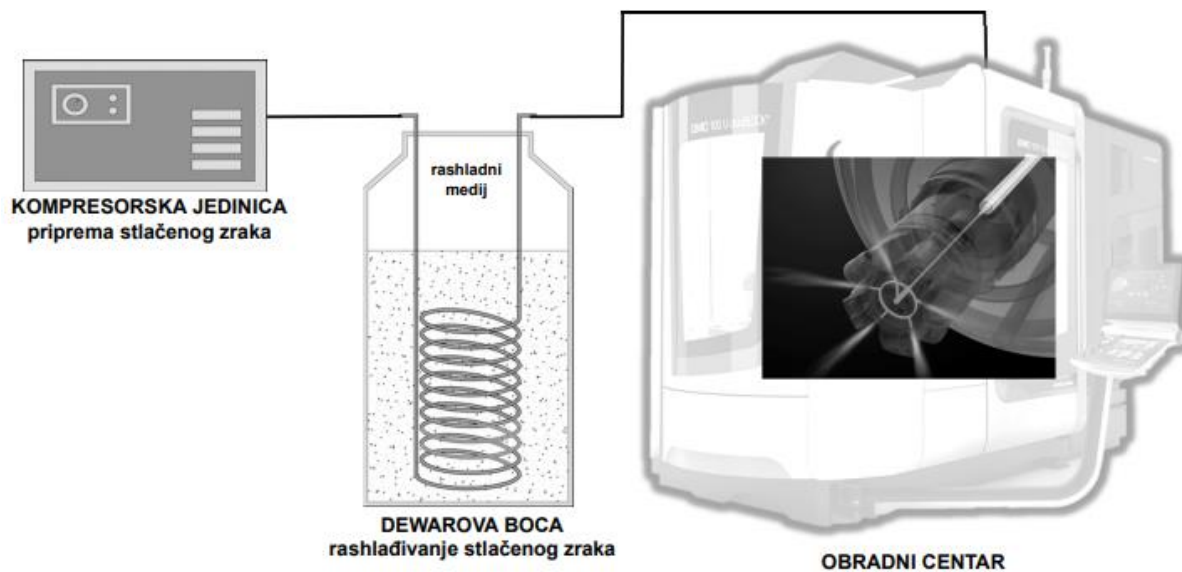
Najčešća primjena stlačenog zraka je preko vrtložne cijevi, kao na slici 12. Poznata i kao Ranque-Hilschova vrtložna cijev, to je mehanički uređaj koji koristi stlačeni zrak u svrhu generiranja struja hladnog i toplog zraka iz jednog izvora. Dovođenjem stlačenog zraka u cijev, on se unutar nje spiralno okreće, što rezultira odvajanjem zraka na temelju temperature. Na jednom kraju cijevi se skuplja hladni zrak, dok se na drugom topli zrak izbacuje van u atmosferu.



Slika 12. Hlađenje stlačenim zrakom pomoću vrtložne cijevi [2]

Drugi način primjene je adijabatsko hlađenje, gdje se zrak hladi tijekom procesa ekspanzije bez dovođenja topline iz okoline. Prikladan je za situacije u kojima je potrebno brzo smanjiti temperaturu oštrice alata.

Još jedan način primjene, prikazan na slici 13., je korištenje tekućeg dušika ili helija u Dewarovoj boci za hlađenje zraka, te služi za postizanje ekstremno niskih temperatura [2].

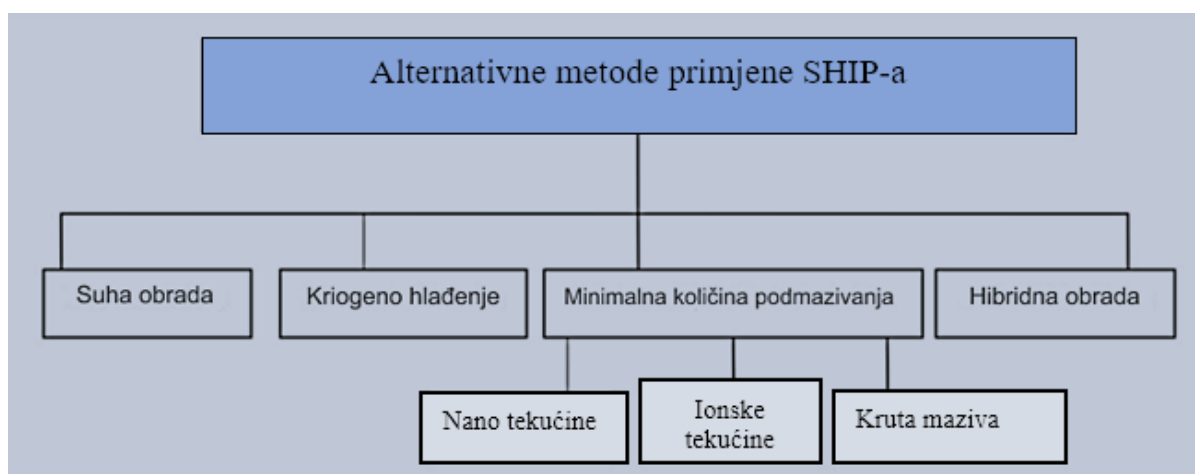


Slika 13. Hlađenje stlačenim zrakom ohlađenog u Dewarovoj boci [2]

## 7. ALTERNATIVE KONVENCIONALNIM NAČINIMA PRIMJENE SHIP-a

Zbog nedostataka konvencionalnih načina, posebice u ekološkim pogledima, razvijene su neke nove alternativne tehnologije dovođenja SHIP-a, a glavna podjela istih je vidljiva na slici 14.

Svaki od njih ima svoje prednosti i mane, te svoja područja aplikacije [2]. Sažetak svojstava i usporedba alternativnih načina primjene SHIP-a navedeni su na slici 15.



Slika 14. Nove tehnologije SHIP-a [6]

	Učinci hlađenja i podmazivanja	Konvencionalni način hlađenja	Suha obrada	MQL	Kriogena obrada	Kombinirana obrada
Primarno	Hlađenje	Dobro	Loše	Dobro/Loše	Odlično	Odlično
	Podmazivanje	Odlično	Loše	Odlično	Dobro/Loše	Odlično
	Odvođenje odv. čestice	Dobro	Dobro	Dobro/Loše	Dobro	Dobro
Sekundarno	Hlađenje stroja	Dobro	Loše	Loše	Dobro/Loše	Dobro/Loše
	Hlađenje alata	Dobro	Loše	Loše	Dobro	Dobro
	Kontrola čestica	Dobro	Loše	Dobro/Loše	Dobro/Loše	Dobro
	Kvaliteta obr. pov.	Dobro	Loše	Dobro/Loše	Odlično	Odlično
	Održivost	Visoki troškovi održavanja, štetno za zdravlje	Lošija kvaliteta obrađene površine	Štetne uljne pare	Inicijalni troškovi	Inicijalni troškovi, uljne pare

Slika 15. Usporedba prednosti i nedostataka načina dovođenja SHIP-a kod obrade odvajanjem čestica [2]

## 7.1. Suha obrada

Inovacijom prevlačenja reznih oštrica alata, iste imaju sve bolja svojstva protiv trošenja i stvaranja trenja, pa je kod nekih operacija, s tako visoko kvalitetnim alatima, moguća obrada bez ikakvog sudjelovanja SHIP-a. Primjerice, pri obradi površina aluminijske i niskougljičnih čelika, većinu stvorene topline odnose odvojene čestice, a budući da su ti metali relativno mekani, trošenje reznog alata može biti svedeno na minimum. Kvaliteta i izvedivost obrade je poboljšana ako je rezni vrh prevučen PVD ili CVD tehnikama ili napravljen od nekog otpornog materijala poput PCD-a. PCD alati pokazali su se najboljima pri suhoj obradi, u smislu trošenja alata, hrapavosti obrađene površine i obliku stvaranja odvojene čestice.

Dok primjerice, obrada dubokih provrta nije posebice izvediva, zbog prekomjernog trošenja alata i kratkog vijeka trajanja [11].

Također, zbog lošeg odvođenja topline i manjka svojstva podmazivanja, a time pojave adhezije između prednje površine rezne oštrice i odvajanih čestica, suha obrada nije široko primjenjiva.

Obrada čvrstog materijala poput titanija je moguća ali neučinkovita pri višim brzinama obrade.

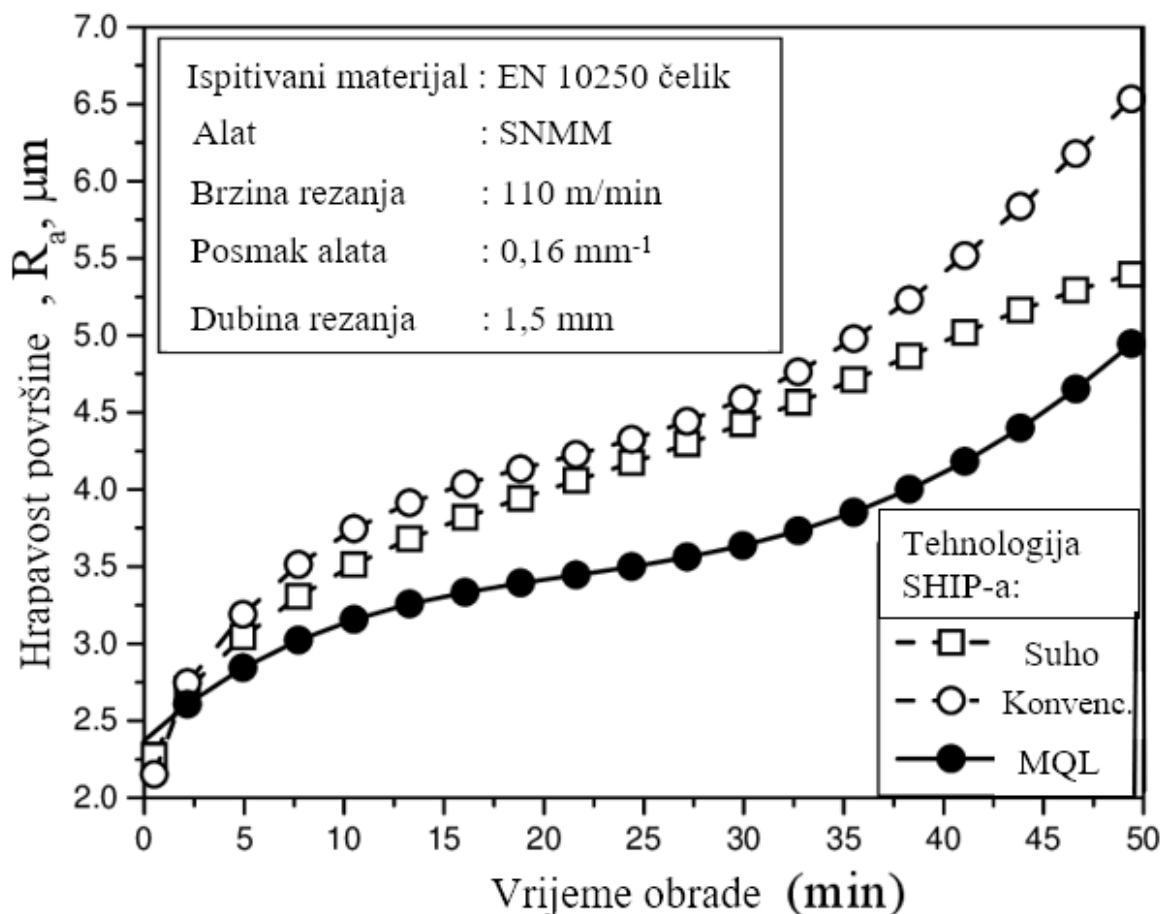
Ovaj način obrade dobiva na popularnosti i važnosti, zbog toga što nema nikakav negativan utjecaj na okoliš, za razliku od većine konvencionalnih opcija.

## 7.2. MQL metoda

MQL, punim nazivom Minimum Quantity Lubrication (Minimalna količina podmazivanja), je odlična alternativa hlađenju poplavljanjem i suhoj obradi. Glavne prednosti su dobivena kvaliteta obrađene površine i poboljšane performanse pri rezanju materijala, uz istovremeno smanjenje štetnog utjecaja na okoliš. Moguća je široka primjena, u procesima obrade odvajanjem čestica poput tokarenja, glodanja, bušenja i brušenja. Ova metoda se bazira na ubrizgavanju male količine SHIP-a na željeno područje uz pomoć komprimiranog zraka pri brzinama od oko 100 m/s, u obliku ultra finih kapljica. Prosječna potrošnja SHIP-a kod ove metode iznosi oko 50 ml/h obrade. Česta sredstva koja se upotrebljavaju su biljna ulja, zbog njihove biorazgradivosti, dok su zadnjih godina u primjeni mjesto našle sintetičke tekućine. Najbolji rezultati obrade se postižu tekućinama koje sadrže dobra svojstva podmazivanja, uz visoku specifičnu toplinu radi bržeg i većeg intenziteta hlađenja [11].

Postoji i MQC metoda, to jest Minimum Quantity Cooling (Minimalna količina hlađenja), koja je više fokusirana na hlađenje, a za rashladno sredstvo koriste se emulzije. Provedeno je

ispitivanje obrade tokarenjem čelika EN 10250 temeljno na ovisnosti grubosti obrađene površine o vremenu obrade, pomoću uporabe suhe obrade, obrade konvencionalnim tekućinama, te MQL metodom. Na slici 16., na kojoj su vidljivi i parametri obrade, krivulja pokazuje da lošije rezultate grubosti obrađene površine pokazuje obrada uz dodatak konvencionalnih tekućina, dok su vidljivo najbolje rezultati postignuti uporabom MQL metode [16].



Slika 16. Rezultati grubosti površine ovisno o vremenu obrade čelika EN 10250 [16]

Neki od izazova MQL-a uključuju teško filtriranje fine maglice i slabiju evakuaciju odvojene čestice u usporedbi konvencionalnim metodama uporabom tekućina. Ovi problemi mogu se djelomično riješiti korištenjem dodatne mlaznice za ispuhivanje zraka.

### **7.2.1. Ionske tekućine**

Pod ionske tekućine spadaju soli koje su u tekućem stanju u uvjetima od sobnih temperatura do otprilike 100 °C, čija atomska građa je sačinjena od organskih kationa i anorganska aniona.

Ovo je jedna od najnovijih tehnologija primjene SHIP-a. Zbog visokih cijena, rijetko se primjenjuju kao zasebna sredstva, pa se primjenjuju u niskoj koncentraciji u kombinaciji s baznim uljima, čime se poboljšavaju uporabna svojstva.

Naspram suhe obrade, uporabom ionskih tekućina smanjuje se trošenje rezne oštrice alata za do 60%, a naspram MQL tehnologija s SHIP-om na bazi vode, za do 15% [6].

### **7.2.2. Kruta maziva**

Tribološka svojstva MQL metode bivaju zahvaćena prije hlađenja i podmazivanja zbog naglog isparavanja SHIP-a u zoni rezanja. Neka kruta maziva su: MoS<sub>2</sub> (molibdenov disulfid), WS<sub>2</sub> (volframov disulfid), grafita, HBN (heksagonalni borov nitrid), TiC, TiN, TiB<sub>2</sub> (titanijev borid), BO (borov oksid), te PTFE (Politetrafluoretilen; polimerna plastika sačinjena od fluora i ugljika) [6].

Aplikacija krutim mazivima se dijeli na podmazivanje čvrstim filmom, podmazivanje suhim filmom, te suho podmazivanje.

Velika prednost ovih maziva je što su postojana kod vrlo teških uvjeta obrade, te pokazuju odlične rezultate podmazivanja i odvođenja topline. Vrlo dobra primjena je kod obrada brušenjem, te urezivanjem i narezivanjem navoja.

Nedostatci su teža aplikacija od tekućih sredstava i plinova, manji intenzitet odvođenja topline od tekućina, te veće trošenje reznog alata. S obzirom na kruto stanje, ne samo da je ispiranje odvojenih čestica slabo, već se one još dodatno lijepe na ta sredstva, čime dolazi do potrebe za čišćenjem, filtriranjem ili brisanjem i ponovnim apliciranjem SHIP-a te vrste na željeno mjesto [17].

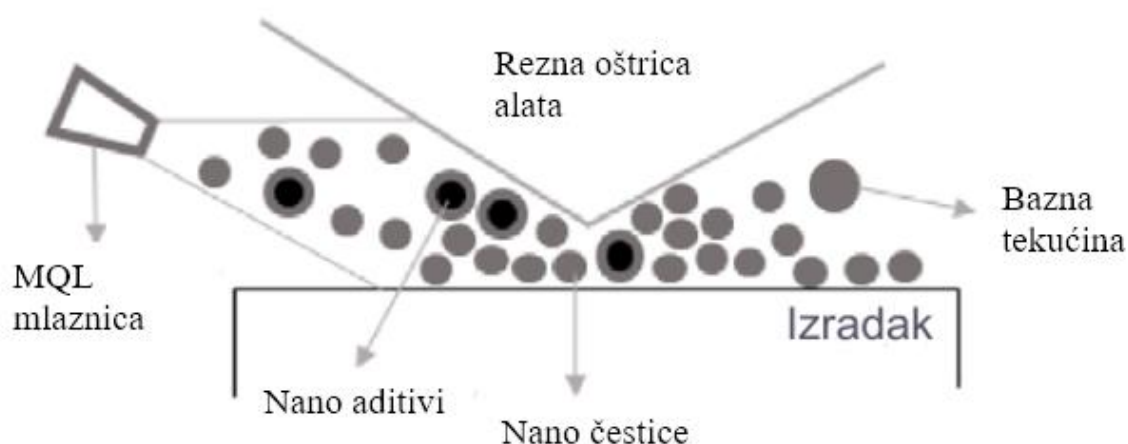
### 7.2.3. Nano tekućine

Nano tekućine su tekućine koje sadrže nano metalne (Ag, Al, Au, Cu, Si, Ni, Ti, Zn, Fe), nemetalne, ugljikove, karbidne, ili keramičke čestice suspendirane u baznoj tekućini [11].

Zadaća tih nano čestica kao SHIP pri obradi odvajanjem čestica je prijenos i raspršivanje topline iz zone rezanja, te zaštita obrađivane površine. Te čestice sadrže vrlo visok omjer površine i volumena, te su im atomi većinom locirani oko površine, a manje u jezgri, čime se poboljšava svojstvo vodljivosti topline. Zbog postojanja čestica u tekućini, dolazi do pojave Brownovog gibanja, koje opisuje nasumično gibanje čestica koje su mnogo veće od molekula i atoma, ali premalene da ih se vidi golim okom [18]. Dokazano je u brojnim istraživanjima i pokusima da Brownovo gibanje doprinosi poboljšanju toplinske vodljivosti nanofluida. Kod nano tekućina s česticama sferičnog oblika, taj efekt je još izraženiji.

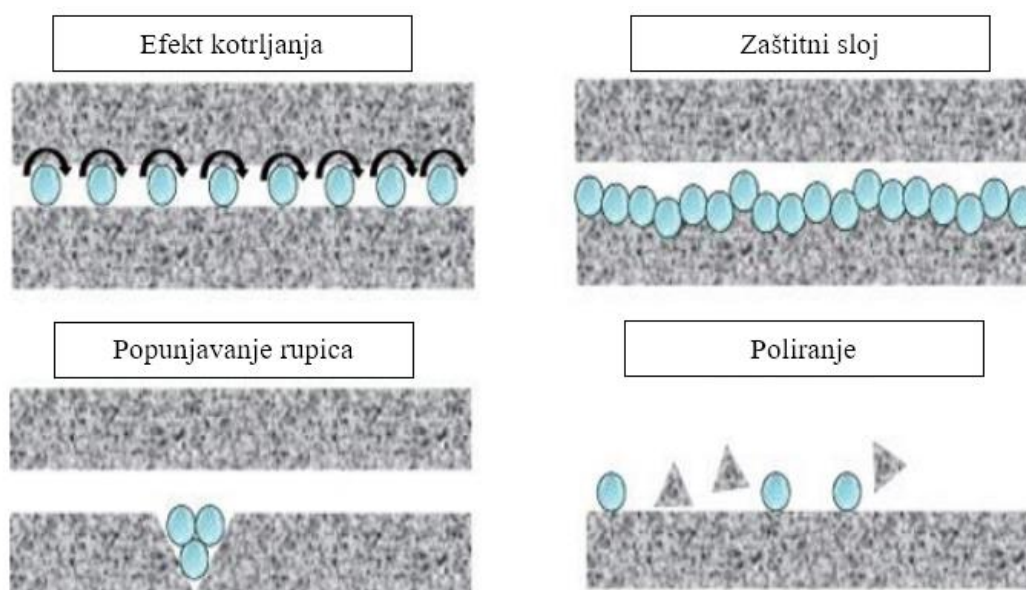
Još neke od pozitivnih strana su manja potrebna snaga za pumpanje tekućine, te ne dolazi do negativnog pada tlaka pri istom, pa je moguća primjena kroz jako male mlaznice reda veličina i do nekoliko nanometara [6].

Nano tekućine raspršivanjem iz MQL mlaznice ulaze u dodir s obrađivanom površinom, te nakon udarnog kontakta bazni fluid odvodi toplinu, podmazuje površinu i otjecanjem odlazi iz zone obrade, dok se određene nano čestice priljepljuju za obrađivanu površinu, ili obavljaju neku drugu zadaću, prikazano na slici 17. Također, postoji mogućnost dodavanja aditiva u nano tekućine, koji prilikom kontakta penetriraju u površinu obratka i prema [19] donose brojna dodatna poboljšanja.



Slika 17. Djelovanje nano tekućina u zoni rezanja [19]

Na slici 18. prikazani su neki od pozitivnih mehanizama nano čestica na površinu koja se obrađuje. Na pojavu i intenzitet ovih mehanizama moguće je utjecati parametrima kao što su oblik, dimenzije i vrste materijala koji tvore nano čestice. Naprimjer, što je čestica više sferičnog oblika, osim povećanja intenziteta Brownovog gibanja, ona sadržava i veće svojstvo kotrljanja. Što su čestice manjeg oblika, to bolje mogu zagladiti površinu popunjavajući nepravilnosti poput rupica, budući da lakše mogu ući u uske i malene prostore. Najbolje svojstvo poliranja imaju čestice sačinjene od materijala visoke tvrdoće i čvrstoće [17].

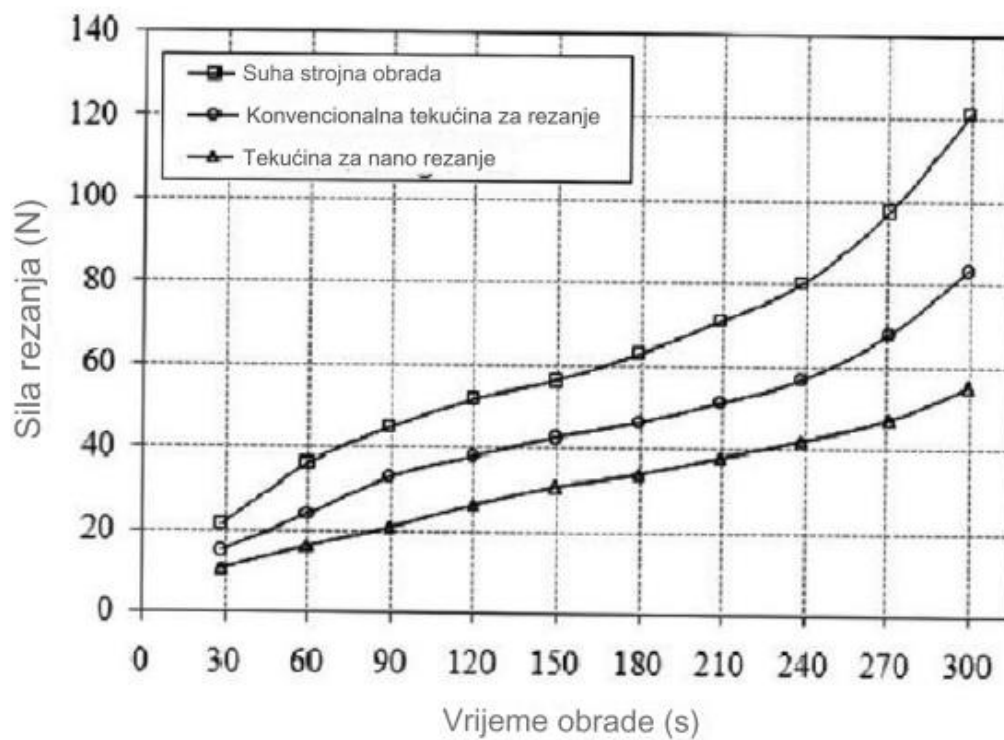


**Slika 18. Učinak nano čestica na obrađivanu površinu [17]**

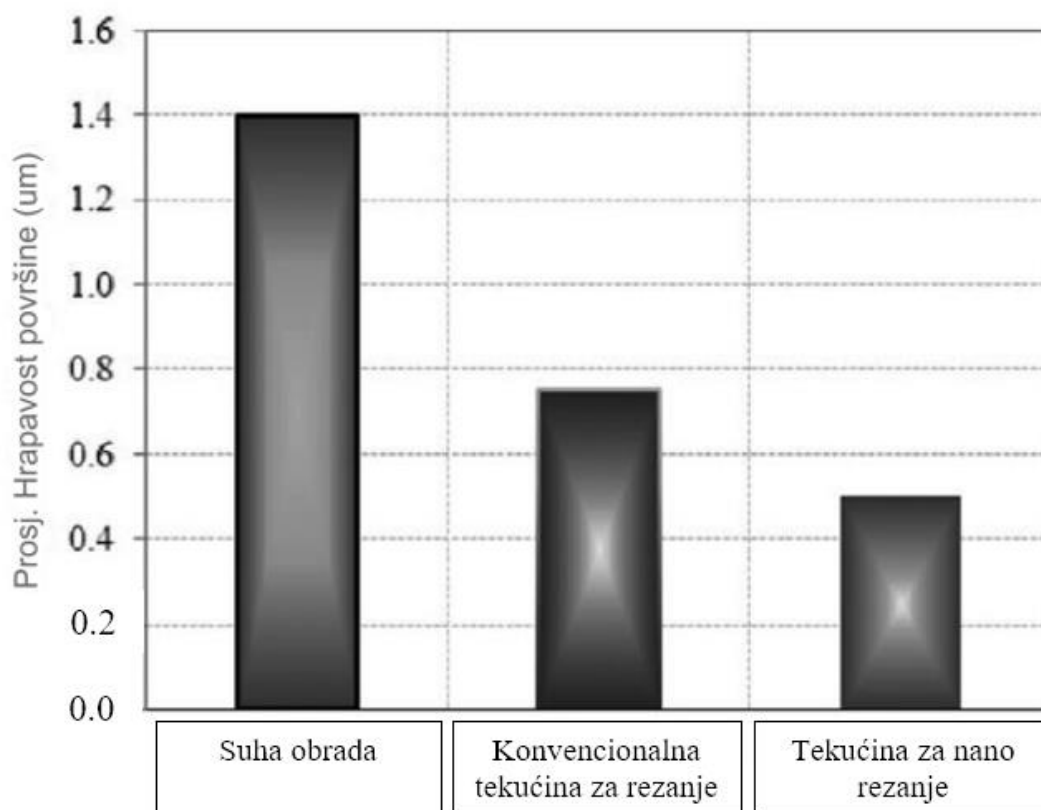
Nano tekućine sadržavaju najbolja rashladna svojstva od svih MQL metoda, ali i bolja svojstva od velike većine ostalih tehnologija SHIP-a. Tokom obrade je potrebna manja sila rezanja i dolazi do manjeg naprezanja naspram suhe strojne obrade i konvencionalnih tekućina, što je vidljivo na slici 19. Sukladno tome i trošenja rezne oštrice alata i intenzitet trenja i stvaranja topline pokazuju superiorne rezultate. Također pokazuju znatno bolje rezultate hrapavosti obrađene površine u usporedbi s istim tehnologijama, prikazano na slici 20., te su odlične za uporabu tokom obrade teško obradivih metala poput legura nikla i titana.

Nedostatci obrade nano fluidima su vrlo visoka cijena, moguće opasnosti po okolinu zbog uporabe baznih tekućina koje mogu imati štetna svojstva i poteškoće odlaganja i rastvaranja. Također, budući da je ta tehnologija relativno nova, još ju je potrebno ispitati i istražiti da bi se iskoristio maksimalan potencijal i otkrili optimalni uvjeti i parametri uporabe.





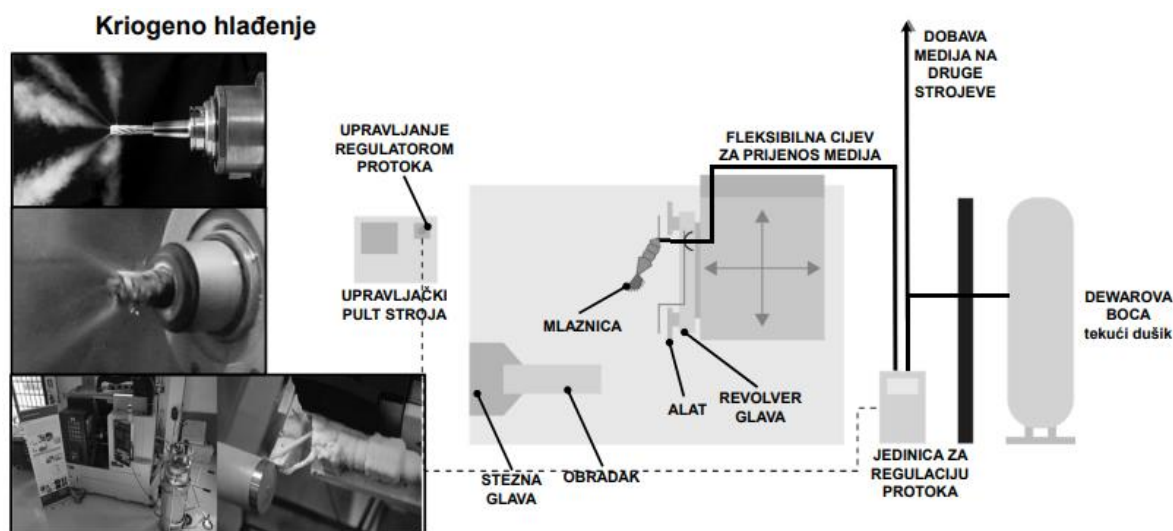
Slika 19. Ovisnost sile rezanja i vremena obrade o vrsti SHIP-a [11]



Slika 20. Vrijednosti hrapavosti površine ovisne o vrsti SHIP-a [11]

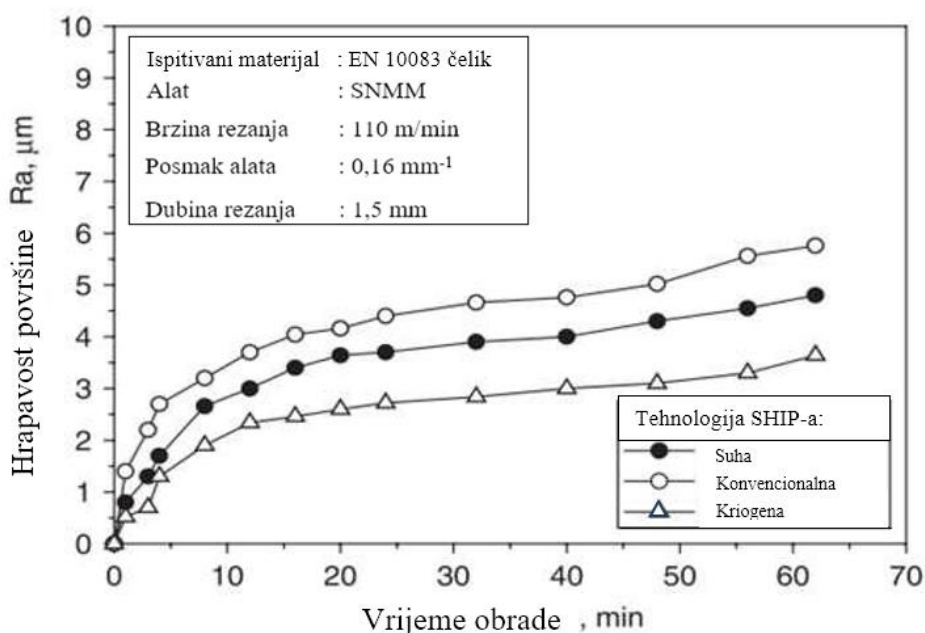
### 7.3. Kriogeno hlađenje

Tehnika pod nazivom Cryogenic Cooling (Kriogeno hlađenje) provodi se pomoću tekućeg dušika, tekućeg ugljikovog dioksida ili suhog leda ( $\text{CO}_2$  u krutom stanju), a shema kriogenog sustava prikazana je na slici 21.



Zbog jednostavnog i bezopasnog svojstva isparavanja ovih sredstava po okolinu, ona su vrlo primamljiva za uporabu u smislu ekološkog pogleda. Posjeduju vrlo snažno svojstvo hlađenja zbog ekstremno niskih temperatura, bolja od konvencionalnih metoda, što je prikazano na slici 22., te iz tog razloga ova tehnika postaje sve popularnija u industriji gdje je potrebno intenzivno odvođenje topline [20].

Nedostatci su visoka cijena kriogenih SHIP-ova, te potreba za nabavom što čišćih i pouzdanijih sredstava. Također, ova metoda ne posjeduje svojstvo podmazivanja prilikom obrade, pa ju to čini dosta limitiranom za uporabu.



Slika 22. Rezultati grubosti površine ovisno o vremenu obrade čelika EN 10083 [21]

### 7.3.1. Kriogeno hlađenje tekućim dušikom

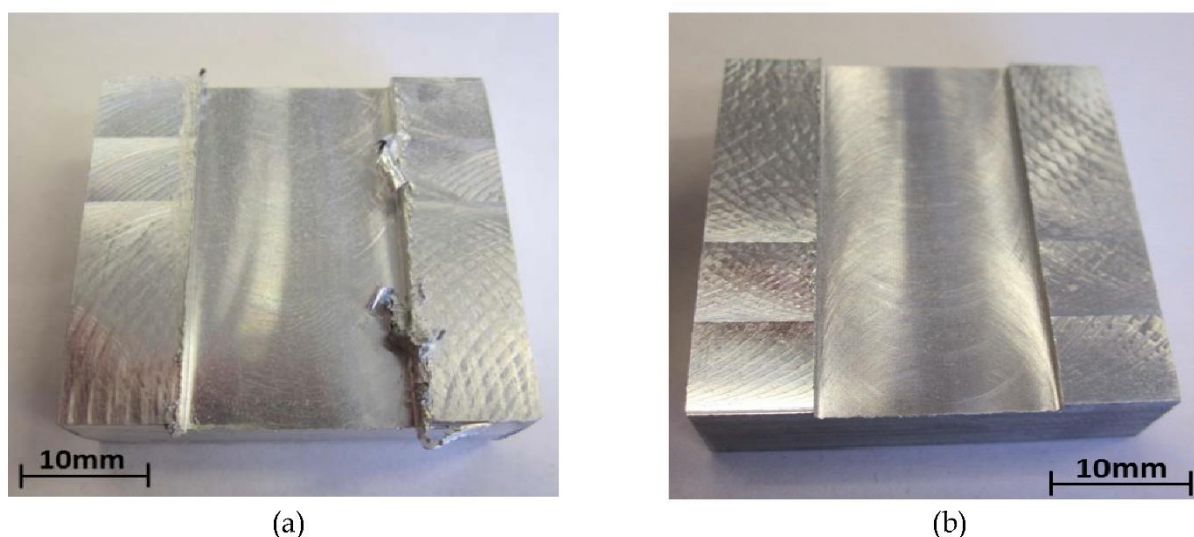
Ova tehnika se primjenjuje od 1950-ih godina, te se u zadnje vrijeme koristi sve više. Budući da dušik čini 78,1% zraka na Zemlji, on je bezopasan po okolinu i jednostavno isparava u atmosferu. Tekući dušik se tokom uporabe dovodi pri temperaturi od  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Korištenje tekućeg dušika za hlađenje ima za prednosti smanjenje temperature u zoni oko rezne oštrice alata i obratka, što rezultira smanjenjem potrošnje i oštećenja alata, te poboljšanjem kvalitete obrađene površine. U usporedbi sa suhom obradom, drastično smanjuje pojavu površinskog sloja  $\text{Fe}_4\text{N}$ , poznatijeg pod imenom bijeli sloj, koji nastaje na površini nitriranog čelika. Taj sloj je poprilično krhak i smatra se štetnim, te ga je poželjno ukloniti naknadnim poliranjem ili izbjeći njegovo nastajanje [22].

Pogodno je koristiti tekući dušik za hlađenje pri vrlo teškim uvjetima obrade, te za obradu teško obradivih materijala poput kobalt krom legura, kod kojih je, u ispitivanju naspram konvencionalnih uporaba SHIP-a, zabilježena preko 70% manja hrapavost obrađene površine, te gotovo 100% dulji vijek trajanja alata. Također, bolji je efekt odvajanja čestice, u smislu da kod kriogenog hlađenja tekućim dušikom čestice budu odvajane u obliku spiralnih trakica, što je puno bolje za materijal i obradak nego da su oštih nepravilnih i nejednakih oblika, kao kod nekih drugih sredstava [20].

### 7.3.2. Kriogeno hlađenje ugljikovim dioksidom

Uporaba ugljikovog dioksida, u tekućem ili krutom stanju (suhi led) temperature od  $-78,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ima brojna dobra svojstva, kao što su odlično uniformno hlađenje duž cijele rezne oštrice alata, značajno smanjenje trošenja alata, nema stvaranja bijelog Fe<sub>4</sub>N sloja, te produljuje životni vijek alata [20].

Jako bitna prednost je ta da na obrađivanoj površini ne ostaju grebeni, to jest greške, udubine i izdubine koje, zbog plastične deformacije pretežito duktilnih i tvrdih materijala, uz postojanja pukotina i nepravilnosti na površini ili blizu površine koja se obrađuje, nastaju tokom procesa obrade i stvaraju velike probleme u industriji obrade odvajanjem čestica. Rješavanjem tog problema, nema potrebe za kasnijom dodatnom obradom, čime se ušteduje na vremenu i novcu [23]. Slika 23. pokazuje usporedbu izratka od materijala koji je zahvaćen nastajanjem grebena (srha) tokom obrade, te izratka od materijala koji nije zahvaćen.



Slika 23. Izradci (a) s kritičnim grebenima i (b) bez grebena [23]

### 7.4. Hibridna obrada

Radi postizanja boljih efekata hlađenja i podmazivanja prilikom primjene SHIP-a, istraživači istražuju i kombiniraju dvije ili više postojećih metoda primjene zajedno. Jedna od najviše obećavajućih je spoj MQL tehnologije na bazi biljnog ulja i kriogenog hlađenja tekućim dušikom. Uporabom navedene, zabilježen je značajan pad intenziteta abrazije i stvaranja nakupljenog ruba naspram suhe obrade. Nakupljeni rub je pojava nakupine materijala na dijelu

prednje površine alata, koji se zbog velikog pritiska i topline zavari za vrh alata i čini probleme pri mnogim postupcima obrade odvajanjem čestica, poput povećanog trošenja alata, smanjenja svojstva hlađenja SHIP-a i pogoršanja kvalitete obrade. Hibridni nanofluidi, sastavljeni od 0,3% koncentracije nano čestica, pokazuju odlična generalna i uravnotežena svojstva za uporabu kao SHIP [6].

## 8. DOVOĐENJE SHIP-a KROZ ALAT U ZONU REZANJA

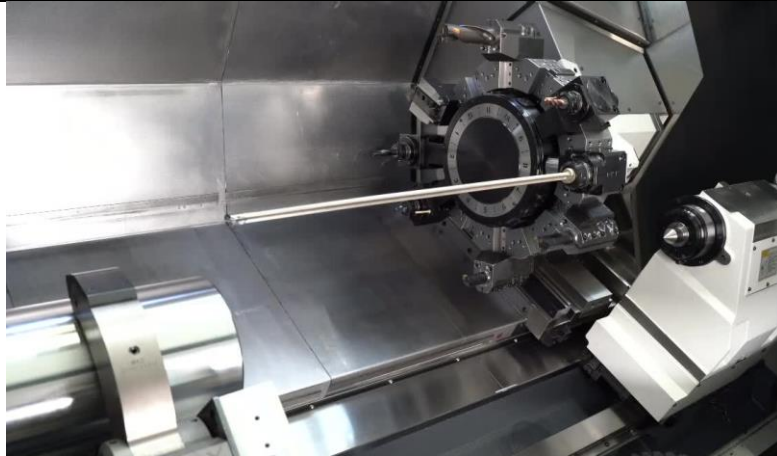
Postupci obrade odvajanjem čestica koji koriste princip dovoda SHIP-a kroz rezni alat su oni koji imaju problem s odvođenjem odvojenih čestica [24]. Najčešći razlozi tome su velike dubine prodiranja alata i uski prostori. S obzirom na to, postupci koji najviše koriste od ovog načina dovođenja sredstva su postupci bušenja, posebice duboko bušenje, ali je taj način našao svoju svrhu i kod obrade tokarenjem i glodanjem [25].

### 8.1. Dovod SHIP-a kod dubokog bušenja

Duboko bušenje je specijalni postupak bušenja, koristi se za izradu dugih i uskih provrta. Odlikuje se visokom kvalitetom obrade površine, te preciznošću i uskim tolerancijama. Alat koji se koristi su svrdla s vrlo visokom omjerom duljine i promjera, a uporaba im je u područjima poput automobilske, zrakoplovne i vojne industrije, uglavnom u svrhu izrada provrta koji služe kao prolazi za maziva do zupčanika i osovina, te za rashladne medije motora i drugih dijelova [26]. Obradu dubokim bušenjem je moguće izvoditi na posebnim strojevima namijenjenim samo za to, vidljivo na slici 24., no moguća je i uporaba na tokarskom stroju, kao na slici 25.



Slika 24. Stroj za duboko bušenje [27]

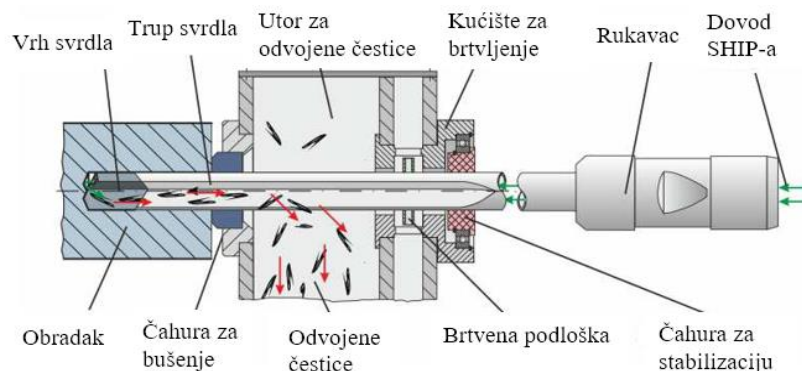


Slika 25. Alat za duboko bušenje u CNC tokarskom stroju [28]

### 8.1.1. SLD sustav

SLD sustav, u praksi se često koristi naziv Topovsko svrdlo, se odlikuje jedinstvenim asimetričnim dizajnom alata s jednom oštricom, što govori i naziv Single Lip Drilling (Bušenje alatom s jednom oštricom), čime su poboljšane performanse obrade. Asimetrični dizajn generira radialna opterećenja koja omogućuju visoku stabilnost obrade, što je posebice bitno kod velikih dubina obrade, gdje postoji visoka opasnost od savijanja svrdla. Još neke prednosti su poboljšani protok rashladnog sredstva, lakše uklanjanje odvojene čestice, te smanjenje vibracija i oštećenja alata. Moguće je bušenje manjih provrta nego kod STS postupka, ali ima manju produktivnost.

Izvodi se na specijalnim strojevima ili tokarskim strojevima, a zahtijeva vođenje alata pomoću oslonca ili vodilica zbog asimetričnosti. Isporuka SHIP-a se vrši kroz jedan ili više otvora na vrhu alata, a mješavina odvojenih čestica i rashladnog sredstva se evakuira duž utora na vanjskoj strani, s otvorima od  $110^\circ$  do  $130^\circ$ . Dijelovi SLD sustava prikazani su na slici 26.

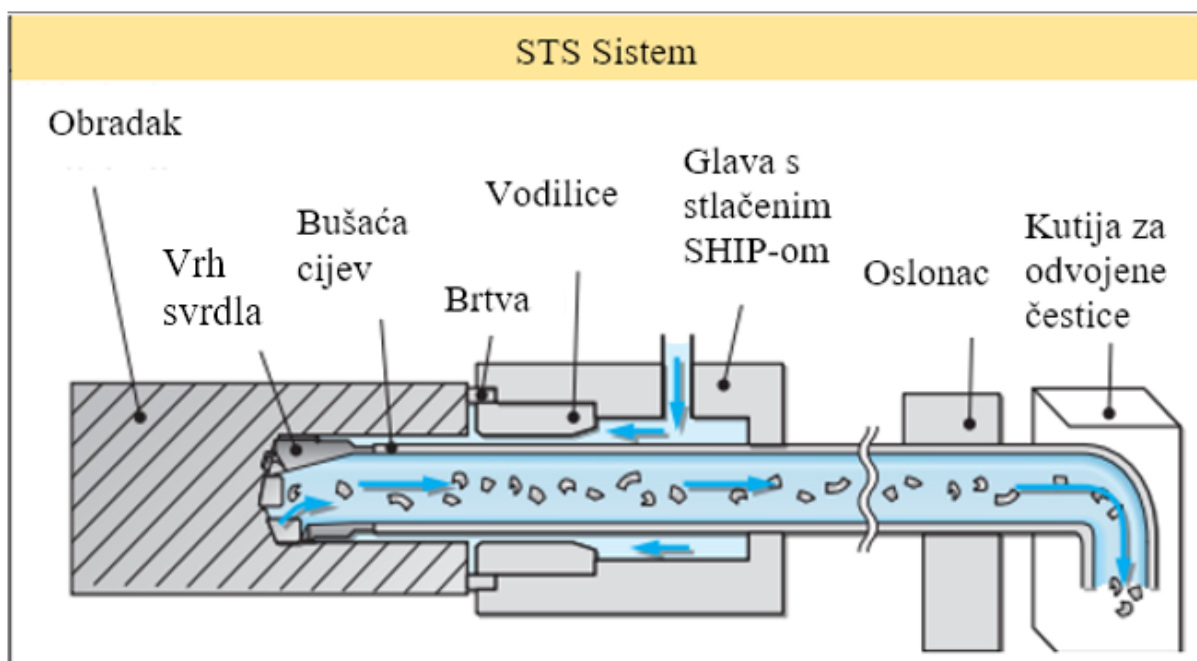


Slika 26. SLD sustav kod dubokog bušenja [26]

### 8.1.2. STS sustav

Single Tube System (Sustav jedne cijevi), prikazan na slici 27., je metoda dubokog bušenja kod koje se koristi jedan cjevasti alat. Princip ovog sustava se oslanja na visoki tlak i protok SHIP-a, te se njime omogućuje dostavu sredstva za hlađenje i ispiranje unutar cijevi, što pomaže u čišćenju radne površine od odvojenih čestica. Isto tako doprinosi održavanju optimalne temperature rada tokom obrade. Osobito se koristi kod bušenja materijala kod kojih je bitna visoka preciznost i kvaliteta obrade [29].

Zahtijeva specijalne strojeve za optimalno funkcioniranje, te je zbog toga skup i nefleksibilan.



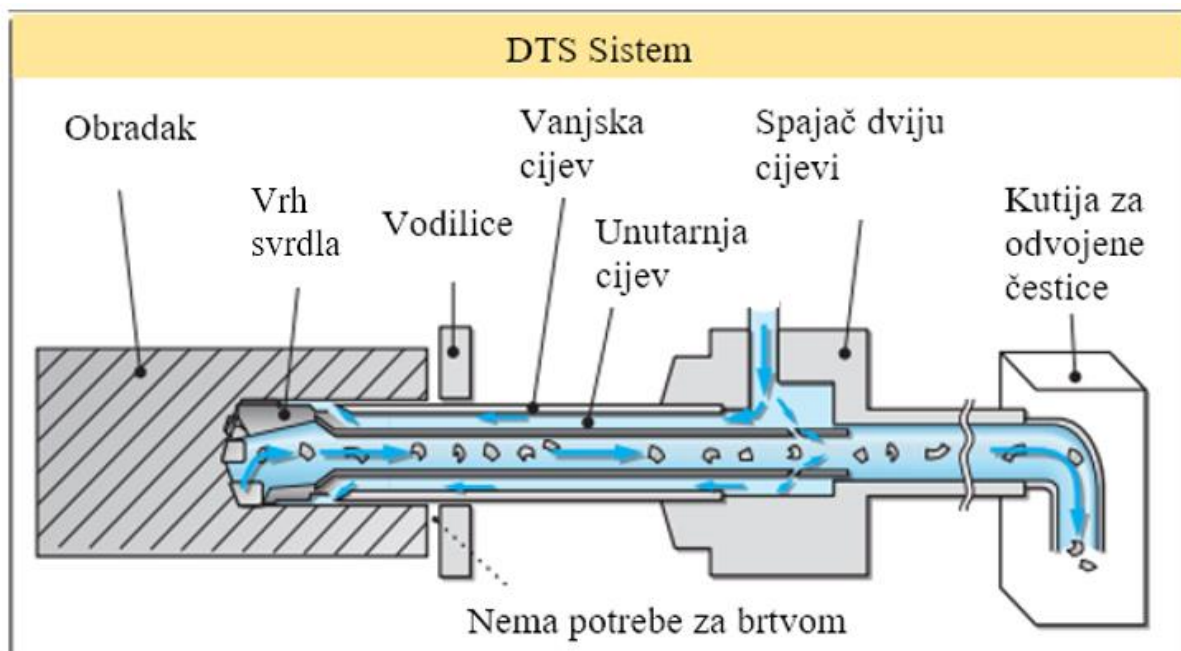
Slika 27. STS sustav kod dubokog bušenja [29]



### 8.1.3. DTS sustav

Double Tube System (Sustav dvostruke cijevi) vidljiv na slici 28., koristi cjevasti alat poput STS sustava, ali se sastoji od dviju koncentrično postavljenih cijevi. Ovdje SHIP teče kroz vanjsku cijev i izlazi kroz otvore kod vrha svrdla, u blizini reznih oštrica alata, dok se odvojena čestica odvodi iz zone rezanja kroz unutarnju cijev alata. Ovaj sustav omogućuje stvaranja vakuumu na izlazu, što doprinosi kvaliteti odvajanja čestica i smanjenju pritiska pri otvoru.

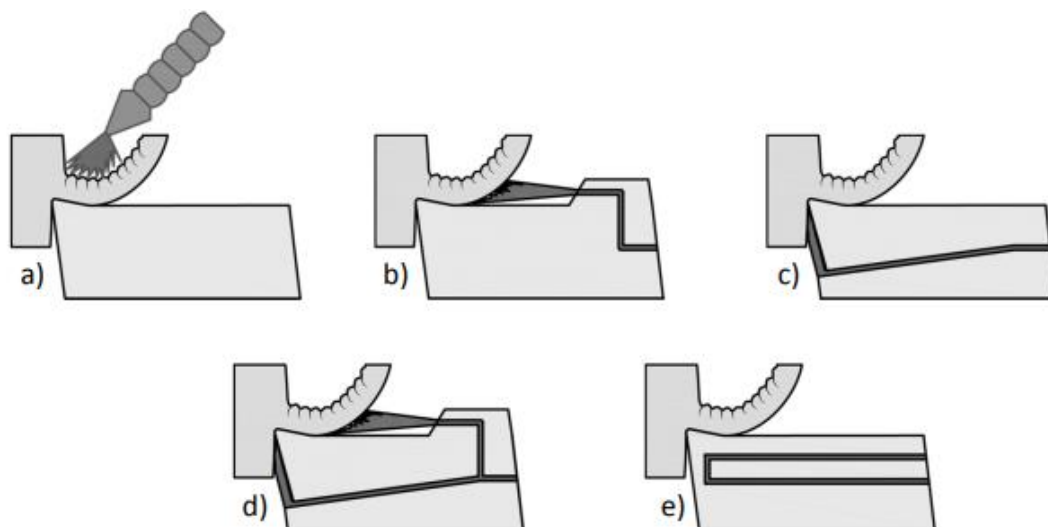
Za razliku od STS sustava, moguća je i pogodna uporaba na konvencionalnim strojevima za obradu poput tokarilica, što znači da je fleksibilniji, lakše i više primjenjiv u raznim industrijama, te nema potrebe za kupovinom posebnog stroja za izvođenje operacije [29].



Slika 28. DTS sustav kod dubokog bušenja [29]

## 8.2. Dovod SHIP-a kod tokarenja

SHIP se kod obrade tokarenjem može dovesti do mjesta dodira alata i obratka na više načina. Prikazani su na slici 29., a glavna podjela je na dovođenje SHIP-a izvana i kroz alat.



Slika 29. Načini dovođenja SHIP-a [2]

Načini dovođenja sredstva (SHIP-a) kroz alat mogu biti:

- Dovođenje na prednju površinu rezne oštrice, na slici 29. b) - dobro hlađenje i podmazivanje prednje površine alata, hlađenje zone odvajanja čestica i ispiranje rezne površine od istih, moguća manipulacija oblikom odvojene čestice. Novo razvijena tehnologija preciznog dovođenja, prikazana na slici 30., usmjeruje mlaz SHIP-a direktno na područje odvajanja čestice s prednje strane rezne površine alata, te je moguća uporaba pod vrlo visokim tlakom za poboljšane dimenzije i oblik odvojenih čestica
- Dovođenje na stražnju površinu rezne oštrice, na slici 29. c) - odlično hlađenje vrha rezne oštrice alata i stražnje površine, bolji vijek trajanja alata od dovođenja SHIP-a na prednju površinu, nema utjecaj na odvođenje i oblik odvojene čestice i ispiranje rezne površine, nikakvo ili loše podmazivanje
- Istovremeno dovođenje na prednju i stražnju površinu rezne oštrice, kao na slici 29. d) - kombinacija najboljih svojstava prva dva načina, kompleksnija izvedba i veća cijena
- Dovođenje i odvođenje unutar alata bez kontakta s obratkom, prikazano na slici 29. e) - koristi se samo u procesima gdje je potrebno hlađenje alata, bez ikakvog podmazivanja, ispiranja i utjecanja na oblik odvojene čestice



**Slika 30. Usporedba klasičnog i preciznog dovođenja SHIP-a na prednju površinu alata [30]**

### **8.3. Inovacija dovoda SHIP-a kroz držač alata**

Budući da je dovođenje SHIP-a kroz alat moguće primijeniti samo na nekim procesima obrade, osmišljena je inovacija dovoda kroz držač alata, koja omogućuje širu i jednostavniju primjenu.

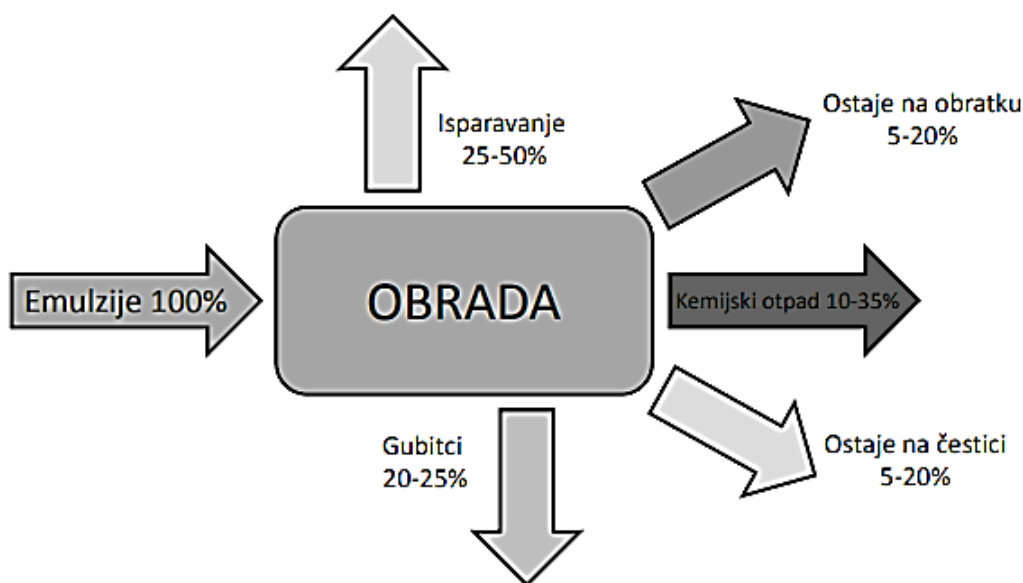
Ako stroj na sebi nema provrt za dovod SHIP-a, ili postojeći nije prikladan za alat koji se želi koristiti, moguće je primijeniti Hi-Jet držač, koji se spoji u držač stroja, te kao na slici 31., preko sebe iz vanjskog izvora dovodi sredstvo u alat. Predstavlja vrlo ekonomski povoljno rješenje, budući da umjesto potrebe za cijelim novim strojem, može se kupiti samo taj nastavak. Moguća je primjena za razne procese obrade, poput bušenja i glodanja [31].



**Slika 31. Dovod SHIP-a kroz Hi-Jet držač [31]**

## 9. ODRŽAVANJE SHIP-a

Tokom uporabe SHIP-a, oni bivaju izloženi raznim uvjetima, te je cilj kupca i korisnika istih, da im s vremenom svojstva i kvaliteta padaju što manje, te da im je vijek uporabe što duži. Isto tako je poželjna pametna uporaba sredstava s ciljem smanjenja potrošene količine i maksimalnog iskorištenja SHIP-a. Neki od generalnih gubitaka SHIP-a su isparavanje medija u atmosferu, ostajanje određene količine na obratku i radnoj površini stroja, te brojni drugi gubitci, koji su navedeni na slici 32.



Slika 32. Gubitci SHIP-a tokom obrade [2]

Kako bi se produžio životni vijek SHIP-a i mogućnost njegove uporabe, te odgodila potreba dubinskog čišćenja SHIP sustava u alatnom stroju, provode se razne tehnologije čišćenja i održavanja [2].

Najzastupljenije metode su centrifugiranje, filtriranje, obiranje, te sjedinjivanje. Za svaku od tih metoda potrebno je koristiti dodatan filter papir, za odvajanje najvećih i najopasnijih neželjenih čestica.

## 9.1. Centrifugiranje

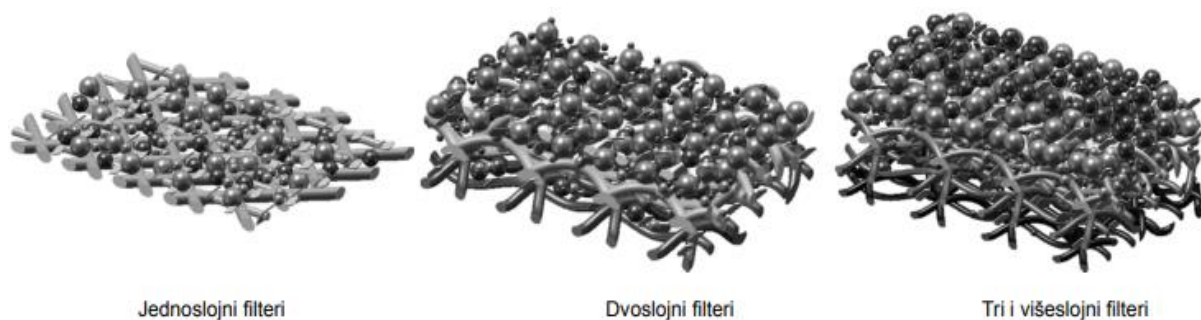
Visoko brzinski centrifugalni separatori pomoću centrifugalne sile odvajaju reznu tekućinu od čvrstih neželjenih čestica. Odvajane čestice bivaju pritisnute uz stijenku separatora, te odlagane ručno ili automatiziranim putem iz uređaja. Odvajaju i najmanje čestice koje kontaminiraju tekućine, do redova veličina koje ni najbolji filteri ne mogu odvojiti. Centrifugalna sila također odvaja i neželjene tekućine od SHIP-a, koja su došla na mjesto obrade vanjskim, nenamjernim putem. Budući da su te neželjene novonastale tekućine slabijih molekularnih veza nego SHIP, vrši se odvajanje pod određenom vrijednošću centrifugalne sile, pri kojima se one izbacuju, a prvotna čista rezna tekućina biva netaknuta. Omogućavaju čišćenje velike količine tekućine odjednom [32]. Ovi separatori se ugrađuju u sklop stroja, te omogućuju kontinuirano čišćenje SHIP-a tokom obrade, bez zaustavljanja radnog procesa.

Investicija u takav stroj je na prvi pogled visoka, no visokom efektivnošću i malim troškovima upravljanja, ukupan rezultat na kraju je prilično ekonomičan.

## 9.2. Filtriranje

Proces čišćenja SHIP-a filterima uglavnom podrazumijeva odvajanje neželjenih čestica pomoću mrežastog papira, kroz koji čestice ne mogu proći. Papir je nakon uporabe potrebno baciti na za to predviđeno mjesto, te zamijeniti novim. Ovakva tehnika zahtijeva vrlo male početne investicije, no zahtijeva razrađeno rješenje odlaganja korištenih papira, koje kod velike uporabe može dovesti do visokih troškova održavanja. Budući da kroz mrežicu filter papira prolazi sva tekućina, a s njom i bakterije i gljivice, potrebno je koristiti sredstva za uklanjanje istih. Filtere je potrebno provjeriti i nadgledati zbog mogućih grešaka u proizvodnji, te oštećenja tokom filtriranja. Još jedan od nedostataka je što je najbolja mogućnost filtracije čestica reda 10  $\mu\text{m}$ , dok centrifugom mogu biti uklanjane i čestice manje veličine [32].

Razvijene su neke nove tehnologije filtriranja SHIP-a poput uporabe dvoslojnih, troslojnih i višeslojnih papira, prikazanih na slici 33., koji omogućuju do 50% manju potrošnju filter papira i kvalitetnije pročišćavanje tekućina [2].



Slika 33. Razne vrste papira za filtriranje [2]

### 9.3. Obiranje

Obiranje se izvodi s ciljem pokupljanja nastalog neželjenog sloja ulja na površini SHIP-a. Ono se izvodi pomoću alata kao što su krpe, te specijalna užad, diskovi i boce, na koje se taj neželjeni sloj lovi i time odvaja [32]. Korišteni alat se zatim stavlja u stroj za čišćenje koji ga priprema za ponovnu upotrebu i sakuplja ulje.

Ova metoda nije najpostojanija, ovisi o vrsti ulja koje se želi odvojiti, te odvaja i određen postotak vode iz baznog SHIP-a zajedno s njim. Moguća je primjena samo u određenim slučajevima, budući da se njom ne odvajaju krute čestice.

### 9.4. Sjedinjivanje

Sjedinjivači su uređaji koji provode proces sjedinjivanja malih kapljica u zajedničke, veće kapljice. Nakon formiranja velikih kapljica neželjenih tekućina, one se odvajaju od SHIP-a pomoću gravitacije. Kompleksnost instalacije i uporabe ovih uređaja je malena, početna investicija je niska, ali nije moguće odvajanje krutih čestica, to jest da bi se uopće proces sjedinjivanja proveo, tekućina prvo mora biti dobro očišćena od čestica nekom drugom metodom. Također, provedba sjedinjavanja može biti otežana ili potpuno onemogućena ako su prisutni neki aditivi u SHIP-u [32].

## 10. ZAKLJUČAK

S obzirom na sve zahtjevnije količine i izgleda proizvoda, potrebni su što kvalitetniji, brži i efikasniji načini proizvodnje u postupcima obrade odvajanjem čestica. Primjena SHIP-a omogućuje upravo to, te s obzirom na veliki broj različitih materijala i scenarija primjene u današnjoj industriji, razvijaju se razne tehnologije primjene. Kod konvencionalnih tehnologija primjene najzastupljenija su ulja koja imaju odlična svojstva podmazivanja, te emulzije na bazi vode u svrhu hlađenja alata i obratka. Sve, od količine potrošnje, temperature primjene, jakosti protoka, te brojni drugi parametri primjene SHIP-a ovise o parametrima, uvjetima i ciljevima obrade kod koje ga se želi primijeniti. U današnje vrijeme u svijetu se sve više važnosti pridaje ekološkom očuvanju, pa skladno tome, stavlja se sve veći naglasak na postizanje održivih postupaka obrade. Tome pridonosi razvoj i uporaba novih tehnologija primjene SHIP-a koje teže manjoj količini potrošnje sredstava, boljim svojstvima razgradnje i manjem utjecaju na okolinu. Suha obrada je danas moguća i izvediva radi novo razvijenih kvalitetnih materijala koji čine rezne oštrice ili kojima se oštrice prevlače. Različiti načini dovođenja SHIP-a do zone rezanja i površine obrade, sa sobom nose razne prednosti i nedostatke, te je bitno dobro proračunati najprikladniji način, u pogledu efektivnosti, kvalitete i ekonomičnosti. Najkvalitetniji način dovoda SHIP-a u pogledu hlađenja i podmazivanja je kroz alat, budući da ga hladi duž cijele oštrice iznutra, te se dovodi direktno na mjesto obrade, koje je često vrlo teško dostupno izvana. Postupci obrade koji najviše prosperiraju od tog izuma, su postupci bušenja, kod kojih je prije toga bilo vrlo izazovno obrađivati duboke i uske provrte, pogotovo kod dubokog bušenja. Također, dovod SHIP-a kroz alat omogućuje efikasno odvođenje čestice iz zone rezanja. Samo zato što SHIP često služi kao sredstvo za čišćenje, ne znači da se on isto ne može zaprljati i pokvariti. Zbog toga je potrebno obratiti veliku pažnju na uvjete u kojima se oni nalaze i načine održavanja s obzirom na njih, da bi im se omogućio što duži vijek trajanja, te što kvalitetnije djelovanje u obavljanju svojih zadaća. Treba provjeravati jesu li onečišćeni vanjskim česticama, je li im se promijenio kemijski sastav utjecajem nekog drugog medija izvana, da li rade na prikladnoj temperaturi i da li ima dovoljno količine u sustavu za podmazivanje na alatnom stroju.

Daljnji razvoj vrsta i načina primjena SHIP-a u strojarstvu je neophodan i nezaobilazan, te znanstvenici i istraživači teže spajanju raznih postojećih tehnologija u svrhu dobivanja što kvalitetnijih rezultata u svim pogledima.

**LITERATURA**

- [1] D. Ciglar, Predavanja iz kolegija Oblikovanje deformiranjem i obrada odvajanjem, dio obrada odvajanjem, ak.god. 2023./2024.
- [2] M. Klaić, Predavanja iz kolegija Postupci obrade odvajanjem, ak.god. 2023./2024.
- [3] <https://www.slideshare.net/slideshow/heat-in-metal-cutting-69830681/69830681> (pristupljeno 03.08.2024.)
- [4] <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-022-08720-4> (pristupljeno 03.08.2024.)
- [5] <https://www.mdpi.com/2072-666X/12/8/953> (pristupljeno 03.08.2024.)
- [6] <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2631-8695/abeca0> (pristupljeno 03.08.2024.)
- [7] <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/mineral-oil> (pristupljeno 04.08.2024.)
- [8] <https://www.ina-maziva.hr/cista-ulja-za-obradbu-metala-c61> (pristupljeno 04.08.2024.)
- [9] [https://www.academia.edu/27404823/cants\\_Lubr\\_Introduction\\_to\\_Properties\\_and\\_Performance](https://www.academia.edu/27404823/cants_Lubr_Introduction_to_Properties_and_Performance) (pristupljeno 06.08.2024.)
- [10] [https://www.jchemrev.com/article\\_188241.html](https://www.jchemrev.com/article_188241.html) (pristupljeno 06.08.2024.)
- [11] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447922001411> (pristupljeno 06.08.2024.)
- [12] <https://www.ina-maziva.hr/vodomjesljive-tekucine-za-obradbu-metala-c63> (pristupljeno 06.08.2024.)
- [13] <https://www.haascnc.com/productivity/chip-and-coolant-management/high-pressure-cool.html> (pristupljeno 09.08.2024.)
- [14] <https://www.productionmachining.com/articles/high-pressure-coolant-improves-profits-and-productivity-> (pristupljeno 09.08.2024.)
- [15] [https://www.researchgate.net/publication/289996026\\_Cooling\\_Systems\\_Based\\_on\\_Cold\\_Compressed\\_Air\\_A\\_Review\\_of\\_the\\_Applications\\_in\\_Machining\\_Processes](https://www.researchgate.net/publication/289996026_Cooling_Systems_Based_on_Cold_Compressed_Air_A_Review_of_the_Applications_in_Machining_Processes) (pristupljeno 10.08.2024.)
- [16] <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/83017> (pristupljeno 10.08.2024.)
- [17] <https://digitalcommons.aaru.edu.jo/cgi/viewcontent.cgi?article=1093&context=erjeng>
- [18] <https://www.britannica.com/science/Brownian-motion> (pristupljeno 13.08.2024.)
- [19] [https://www.researchgate.net/publication/326809766\\_Towards\\_Sustainable\\_Machining\\_of\\_Inconel\\_718\\_Using\\_Nano-Fluid\\_Minimum\\_Quantity\\_Lubrication](https://www.researchgate.net/publication/326809766_Towards_Sustainable_Machining_of_Inconel_718_Using_Nano-Fluid_Minimum_Quantity_Lubrication) (pristupljeno 14.08.2024.)



- [20] <https://www.researchgate.net/publication/342521256> A Review on Different Cooling Lubrication Techniques in Metal Cutting (pristupljeno 14.08.2024.)
- [21] <https://www.researchgate.net/publication/323252485> The effect of cryogenic cooling on surface roughness of titanium alloy A review/figures?lo=1 (pristupljeno 15.08.2024.)
- [22] <https://www.bodycote.com/technical-glossary/white-layer/> (pristupljeno 16.08.2024.)
- [23] <https://www.intechopen.com/chapters/46639> (pristupljeno 20.08.2024.)
- [24] <https://www.cnccookbook.com/cnc-coolant-system-mist-high-pressure-through-spindle/> (pristupljeno 20.08.2024.)
- [25] <https://lubecogreenfluids.com/exploring-the-diverse-methods-of-cutting-fluid-application/> (pristupljeno 20.08.2024.)
- [26] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007850618301550> (pristupljeno 22.08.2024.)
- [27] <https://www.imsaitaly.com/en/deep-hole-drilling-machines/> (pristupljeno 22.08.2024.)
- [28] <https://www.cmz.com/en/deep-hole-drilling/> (pristupljeno 22.08.2024.)
- [29] <https://www.iscar.com/eCatalog/Ecat/datafileENM/INFO/DDRILL10-C.pdf> (pristupljeno 23.08.2024.)
- [30] <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/general-turning/how-to-apply-coolant-and-cutting-fluid-in-turning> (pristupljeno 26.08.2024.)
- [31] <https://www.bigdaishowa.com/en/blog/coolant-delivery-has-come-long-way> (pristupljeno 29.08.2024.)
- [32] <https://www.alfalaval.us/media/stories/machinery-manufacturing/the-4-most-common-cleaning-methods-for-cutting-fluids> (pristupljeno 30.08.2024.)