

Održiva obrada metala odvajanjem čestica

Bistrović Matoković, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:073651>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-03**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

ODRŽIVA OBRADA METALA ODVAJANJEM ČESTICA

Rijeka, rujan 2022.

Luka Bistrović Matoković

0117227104

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

ODRŽIVA OBRADA METALA ODVAJANJEM ČESTICA

Mentor: Doc. dr. sc. Graciela Šterpin Valić

Rijeka, rujan 2022.

Luka Bistrović Matoković

0117227104

Rijeka, 25. ožujka 2021.

Zavod: **Zavod za industrijsko inženjerstvo i menadžment**
Predmet: **Proizvodne tehnologije**
Grana: **2.11.03 proizvodno strojarstvo**

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Luka Bistrović Matoković (0117227104)**
Studij: **Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva**

Zadatak: **Održiva obrada metala odvajanjem čestica/Sustainable techniques in metal cutting**

Opis zadatka:

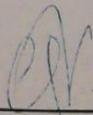
Definirati funkciju, načine dobave i podjelu konvencionalnih tekućina za obradu metala odvajanjem čestica. Konvencionalne tekućine za obradu metala na osnovi mineralnih ulja su štetne za okoliš i zdravlje ljudi te unose velike dodatne troškove u proizvodnju. Potrebno je prikazati utjecaj tekućina na zdravlje, okoliš i ekonomski utjecaj tekućina. Definirati održivu strojnu obradu metala i njezine osnovne dimenzije: ekološku, društenu i ekonomsku. Navesti i objasniti alternativne tehnike hlađenja i podmazivanja za održivu strojnu obradu metala odvajanjem čestica. Prikazati praktične primjere usporedbe primjene konvencionalne obrade i alternativnih tehnika hlađenja i podmazivanja za obradu metala odvajanjem čestica.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Luka Bistrović Matoković

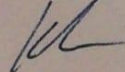
Zadatak uručen pristupniku: 15. ožujka 2021.

Mentor:



Doc. dr. sc. Graciela Šterpin Valić

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:



Prof. dr. sc. Kristian Lenić

IZJAVA I ZAHVALA

Ja, Bistrović Matoković Luka, izjavljujem da sam ovaj završni rad, predan Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci pod nazivom ODRŽIVA OBRADA METALA ODVAJANJEM ČESTICA, izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom preddiplomskog sveučilišnog studija strojarstva i navedenu literaturu.

Želio bih se zahvaliti svojoj mentorici doc. dr. sc. Gracielu Šterpin Valić na izuzetnoj pomoći, uloženom vremenu i trudu prilikom pisanja ovog rada. Svojim razumijevanjem, pristupačnošću i znanjem uvelike mi je olakšala izradu završnog rada.

Zahvaljujem se svojoj obitelji na pružanju potpore i davanju motivacije tijekom trajanja navedenog studija.

Luka Bistrović Matoković

Rijeka, rujan 2022.

SADRŽAJ

1.	UVOD	1
2.	OBRADA ODVAJANJEM ČESTICA	2
2.1.	Općenito o obradi	2
2.2.	Podjela postupaka i gibanja alata.....	3
2.3.	Vrste i materijali reznih alata.....	7
2.4.	Toplinske pojave.....	12
3.	SREDSTVA ZA HLAĐENJE, ISPIRANJE I PODMAZIVANJE (SHIP)	14
3.1.	Primjena i funkcija SHIP-a.....	14
3.2.	Vrste SHIP-a.....	16
3.3.	Načini dobave SHIP-a	17
3.4.	Utjecaj SHIP-a na okoliš i zdravlje čovjeka.....	18
3.5.	Ekonomski aspekt uporabe SHIP-a	21
4.	ODRŽIVA STROJNA OBRADA METALA	23
4.1.	Primjena minimalne količine tekućine za obradu metala MQL/MQCL	26
4.1.1.	Napredne MQL/MQCL metode	27
4.2.	Kriogena obrada	30
4.3.	Biorazgradiva ulja.....	32
4.4.	Suha strojna obrada	34
4.4.1.	Hlađenje komprimiranim zrakom primjenom vrtložne cijevi.....	36
5.	USPOREDBA KONVENCIONALNIH I ALTERNATIVNIH METODA HLAĐENJA ...	38
5.1.	Troškovna analiza primjenom emulzije i hlađenja vrtložnom cijevi	38
5.2.	Energetska usporedba različitih metoda hlađenja i njihov utjecaj na okoliš.....	42
6.	ZAKLJUČAK	47
7.	LITERATURA.....	48
8.	POPIS SLIKA	52
9.	POPIS TABLICA.....	53
10.	POPIS OZNAKA I KRATICA	54

11.	SAŽETAK.....	57
12.	SUMMARY	58

1. UVOD

Napretkom tehnologije i znanosti od sredine 20. stoljeća sve više je prisutna strojna obrada materijala. Razvoj strojeva sposobnih za obavljanje sve složenijih radova uvjetovan je zahtjevima što veće produktivnosti, povećanja kvalitete obrade i sve složenijim i teže obradivim proizvodima. Povećanjem broja stanovništva, a samim time i povećanjem broja potrebnih dobara, raste potreba i za sve većom količinom proizvoda, pa stoga imamo veći udio strojeva i robota u samoj proizvodnji koji ne samo da mogu posao obaviti brže i efikasnije, nego to čine ekonomičnije i preciznije, ali zbog samih postupaka obrade rade posredno ili neposredno više štete u odnosu na ručni rad. Povećanje kvalitete u masovnoj proizvodnji strojnih dijelova riskantan je izazov kada se uzmu u obzir troškovi i utjecaj na okoliš. Vijek trajanja alata, reciklaža materijala, potrošnja energije i zagađenje okoliša su čimbenici koji izravno ili neizravno povećavaju troškove tijekom različitih operacija obrade. Obrada koja je u ekološkom pogledu prihvatljiva i jeftinija i alati za obradu koji poboljšavaju morfologiju površine i povećavaju njihov životni vijek ključevi su održive strojne obrade.

Na početku rada definirano je što je to strojna obrada odvajanjem čestica, koje su prednosti i mane takve obrade, kako se dijele postupci obrade, koje se vrste alata koriste pri obradi, od kojih su materijala napravljeni i zašto, koja se gibanja i sile javljaju prilikom rezanja što posljedično prati pojavu topline koja utječe na alat/obradak. Drugi dio rada odnosi se na sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje (SHIP), zašto se koriste i koje su prednosti, kako ih dijelimo ovisno o vrsti, gdje se primjenjuju i kako utječu na proces obrade, ali i na ekonomiju i okoliš. Navedeno je što predstavlja održiva strojna obrada i koji to aspekti moraju biti zadovoljeni kako bi nešto bilo održivo. Zatim slijedi podjela alternativnih metoda hlađenja, njihov utjecaj na proces rezanja, prednosti i razlozi primjene u odnosu na konvencionalnu obradu. Na kraju rada prikazali smo primjere kako bi usporedili konvencionalne i alternativne postupke hlađenja i koje su posljedice njihove primjene ovisno o negativnom utjecaju na okoliš, ekonomskom trošku i postojanosti alata.

2. OBRADA ODVAJANJEM ČESTICA

2.1. Općenito o obradi

U pravilu se obrada na alatnim strojevima može podijeliti na strojnu obradu odvajanjem čestica i na strojnu obradu bez odvajanja čestica. Obrada odvajanjem čestica (OOČ) skup je konvencionalnih i nekonvencionalnih postupaka uklanjanja viška materijala kojima se predmetu obrade daje određeni oblik i određena kvaliteta obrađene površine [1]. S ekonomske strane se može reći da odstranjivanjem dijela materijala povećavamo tržišnu cijenu proizvoda. Takvi postupci obrade uglavnom se rade na kraju proizvodnog ciklusa nakon primarnog oblikovanja ili deformiranja. Koliko je tehnologija obrade odvajanjem čestica prisutna i isplativa govore nam podaci da je u SAD-u vrijednost obrade odvajanjem 70-100 milijardi američkih dolara. U razvijenim zemljama takva proizvodnja čini 20-30% BDP-a, dok se u samom industrijskom sektoru nalazi 15-20% radnih mjesta. Kao i svaka tehnologija, ovakva vrsta obrade ima svoje prednosti i nedostatke.

Prednosti obrade odvajanjem čestica:

- postizanje velike točnosti, uskih tolerancija i veće kvalitete obrađene površine,
- mogućnost obrade složenijih površina,
- može se primijeniti kod svih materijala,
- jedini način obrade oblikovanja krtih i otvrdnutih materijala,
- lako se može automatizirati,
- ekonomičnost kod maloserijske i pojedinačne proizvodnje,
- mogućnost obrade malih (mikro) i velikih (turbine) dimenzija obratka.

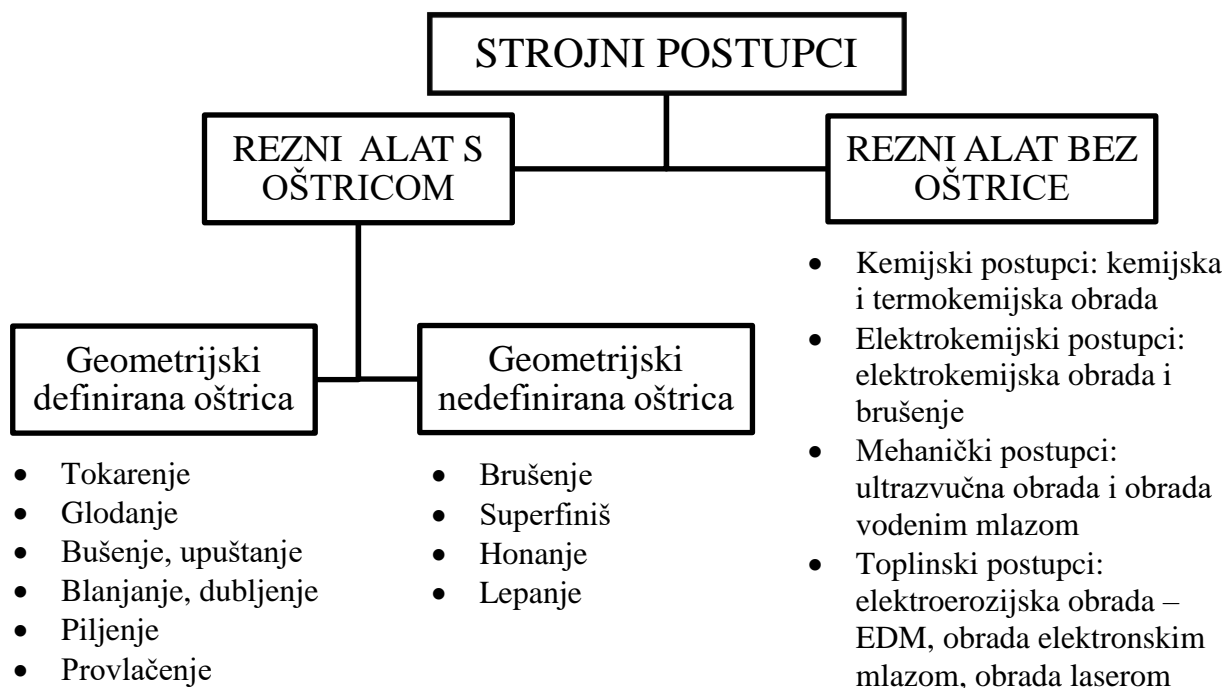
Nedostaci obrade odvajanjem čestica:

- stvaranje otpadnih čestica (strugotina) što sa sobom nosi veliku potrošnju energije i stvaranje opasnih tvari štetnih za okolinu,
- jaki utjecaj na obradni proces ima mikroklima (buka, ulje, toplina...),
- veliki dio procesa zauzimaju pomoćna i pripremna vremena pa čak i do 90%,
- potreban je veliki prostor za strojnu obradu,
- u slučaju nepravilnog izvođenja može jako oštetiti kvalitetu obrađene površine i svojstva proizvoda.

Poznavanje određenih principa obrade odvajanjem čestica i njezinih faktora utjecaja predstavlja važan preduvjet za projektiranje i izradu alatnih strojeva kojima će se postići optimum proizvodnje, dostići tražena kvaliteta i točnost obrađenog materijala, projektirati obradni sustav i proizvodni proces koji će tok proizvodnje voditi što ekonomičnijim putem. Zato se danas većinom koriste obradni strojevi (centri) sa računalno numeričkim upravljanjem ili CNC (engl. *Computer Numerical Control*) upravljanjem gdje se uz posebno generirane kodove, preko računalne jedinice, daje naredba stroju kako i na koji način vršiti obradu dijela.

2.2. Podjela postupaka i gibanja alata

Obrada odvajanjem čestica može se podijeliti na ručne postupke i strojne postupke od kojih ćemo se orijentirati na strojni dio. Postupke strojne obrade odvajanjem čestica možemo podijeliti na konvencionalne ili one postupke gdje je alat (s čvrstom oštricom) u kontaktu sa obratkom i na nekonvencionalne odnosno one postupke u kojima alat nema čvrstu oštricu niti je u kontaktu sa obratkom. Na slici 2.1. prikazana je detaljnija raspodjela postupaka strojne obrade.

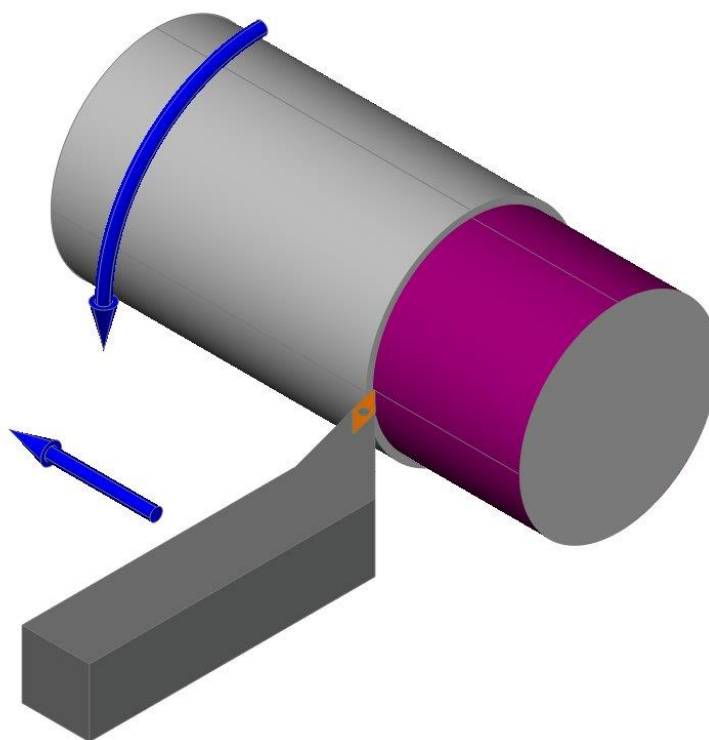


Slika 2.1. Podjela postupaka strojne obrade odvajanjem čestica [2]

Tri najčešće korištena postupka su:

1) Tokarenje,

To je postupak obrade gdje se skidanjem čestica proizvode rotacijske površine obratka. Postiže se na tokarskom alatnom stroju primjenom tokarskog noža. Glavno gibanje preuzima obradak stegnut u steznu glavu koji se kontinuirano rotira, dok je posmično gibanje pravocrtno i njega vrši sami alat. Glavne karakteristike ove vrste obrade su konstantna debljina neodrezane strugotine te kontinuirani rez. Ovisno o načinu stezanja obratka, tokarilice imaju mogućnost i obrade dijelova koji nisu simetrični kao što je npr. koljenasto vratilo. Osnovne operacije koje se mogu izvesti na tokarilicama su uzdužna vanjska i unutarnja obrada, čeona obrada, odrezivanje, zabušivanje i bušenje, narezivanje i urezivanje navoja. Tri osnovna parametra obrade tokarenjem su brzina rezanja v_c [m/min], posmak po okretaju obratka f_n [mm/okr.], te dubina rezanja a_p [mm]. Nadalje, postupke tokarenja možemo podijeliti prema više kriterija ovisno o proizvedenoj kvaliteti površine (grubo i završno), prema kinematici postupka (uzdužno i poprečno), prema položaju obrađene površine (vanjsko i unutarnje), te prema obliku obrađene površine (okruglo, poprečno, profilnim alatom, konusno, kopirno... itd.). Postupak uzdužnog tokarenja prikazan je na slici 2.2. gdje strelice pokazuju smjer gibanja alata/obratka.



Slika 2.2. Uzdužno tokarenje [3]

2) Glodanje,

Postupak kojim se dobivaju ravne i zakrivljene plohe odnosno proizvoljni oblici. Ovdje glavno gibanje ima alat, koji se kontinuirano rotira dok je pomoćno gibanje proizvoljnog smjera, kontinuirano i vrši ga obradak. Jedna od glavnih karakteristika ove obrade su promjenjiva debljina neodrezane strugotine te prekinuti rez. Alat za glodanje je glodalo sa više reznih oštrica smještenih na obodu glodala odnosno na zubima. Ovisno o smjeru obrade razlikujemo istosmjerno glodanje i protusmjerno. Istosmjerno se koristi kod većih dubina rezanja te ono ima bolju kakvoću i veću brzinu rezanja dok se protusmjerno koristi kod manjih. Glavni parametri obrade kod glodanja su brzina rezanja v_c [m/min], posmak f [mm] i dubina rezanja a_p [mm], gdje izbor tih parametara ovisi o čimbenicima kao što su vrsta materijala koja se obrađuje, geometriji i tipu alata, broju zuba, tipu oštrice alata, kategoriji obrade, traženoj točnosti i kvaliteti, itd. S obzirom da su osnovne operacije obrada ravnih površina, obrada kanala i žljebova, obrada profila različitih geometrijskih oblika te obrada zupčanika, obradu glodanjem možemo podijeliti u tri osnovna tipa i to su obodno glodanje, čeonno glodanje i kombinirano glodanje, slika 2.3.



Slika 2.3. Tri osnovna tipa obrade glodanjem [3]

3) Bušenje.

Postupak gdje se alatom (svrdlom) na bušilicama, tokarilicama ili glodalicama, buši ili proširuje provrt različitih dubina kako neprolaznih tako i prolaznih provrta. Laički rečeno se govori o izradi okruglih rupa. Glavno gibanje kod bušenja je kružno i ostvaruje ga alat koji je stegnut u radno vreteno, ali on također vrši i pomoćno gibanje koje je pravocrtno te je okomito orijentirano u odnosu na obradak. Osnovni parametri obrade bušenjem su brzina rezanja v_c [m/min], posmak

po okretaju obratka f_n [mm/okr.], te dubina otvora L [mm]. Bušenje karakterizira promjenjiva brzina rezanja duž oštrice alata i promjenjivi kutovi rezanja duž glavne oštrice, otežano odvođenje strugotine i otežano dovođenje rashladne tekućine odnosno SHIP-a, te mala krutost cijelog sustava. Postoje i specijalne bušilice koje služe za duboko bušenje elemenata čija je dužina pet puta veća od njegovog promjera. Najpoznatiji tip takvog bušenja je bušenje topovskim svrdlom. Primjer bušenja na CNC alatnom stroju je prikazan na slici 2.4.



Slika 2.4. Bušenje svrdlom [4]

Gibanja u obradi rezanjem:

Dva su tipa gibanja, translacijsko ili pravocrtno gibanje i rotacijsko ili kružno gibanje od kojih oba tipa mogu biti kontinuirana ili diskontinuirana gibanja. Nadalje, razlikujemo i gibanja na alatnim strojevima koje dijelimo na pomoćno i glavno gibanje definirano u nastavku.

1) Glavno gibanje:

- definirano je brzinom rezanja v_c ,
- gibanje koje ostvaruje rezanje i stvara se otpadna čestica ili strugotina,

- u procesima obrade se najveći dio energije troši na ovo gibanje.

2) Pomoćna gibanja su sva ostala gibanja koja ne sudjeluju u stvaranju strugotine, ali omogućavaju obradu.

a) Posmično gibanje:

- definirano je posmičnom brzinom v_f ,

- osigurava kontinuiranu obradu predmeta,

- za ovaj tip gibanja ne treba toliko snage kao za glavno gibanje i u većini slučajeva to gibanje je kontinuirana translacija koja je ovisna o vrsti stroja.

b) Dostavno gibanje:

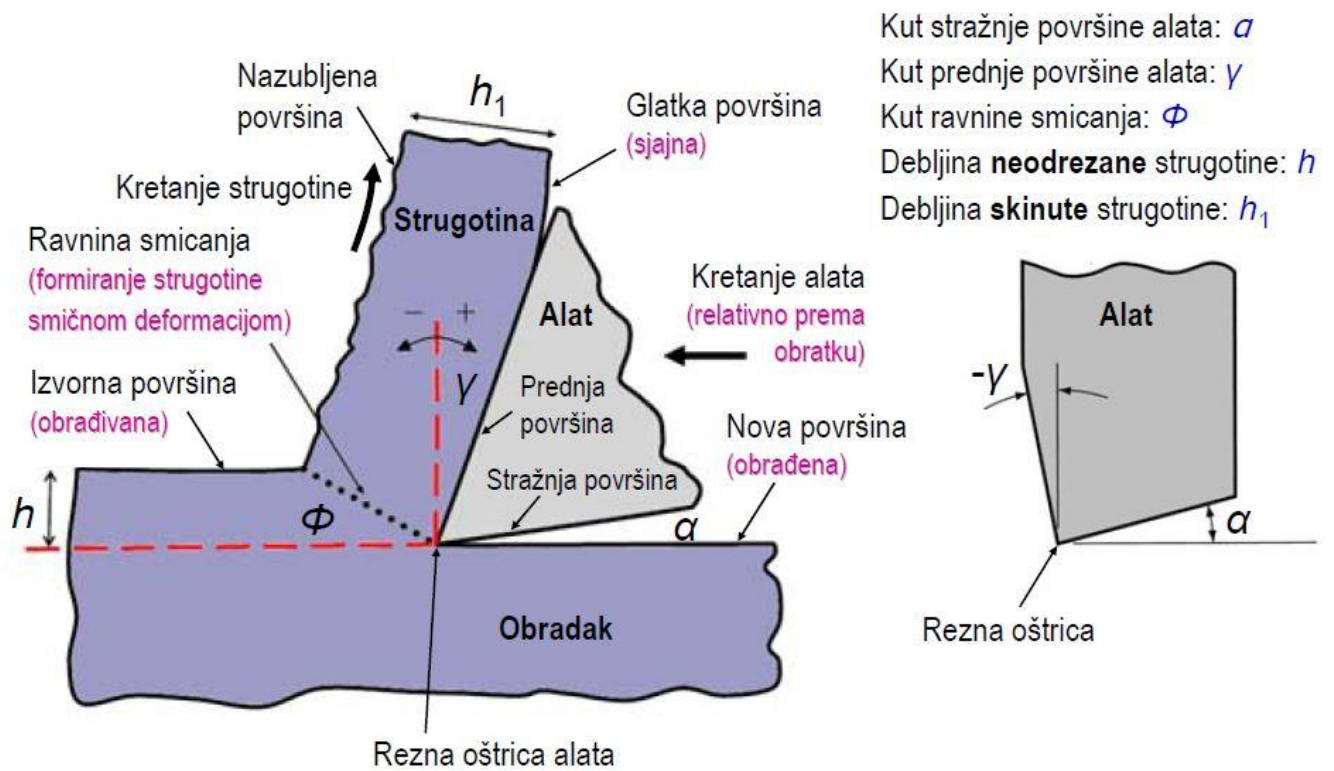
- definirano je dubinom rezanja a_p ,

- uglavnom se odnosi na gibanja izvan obrade kao što su primicanje i odmicanje te zauzimanje dubine rezanja što znači da nema doticaja sa samim obratkom.

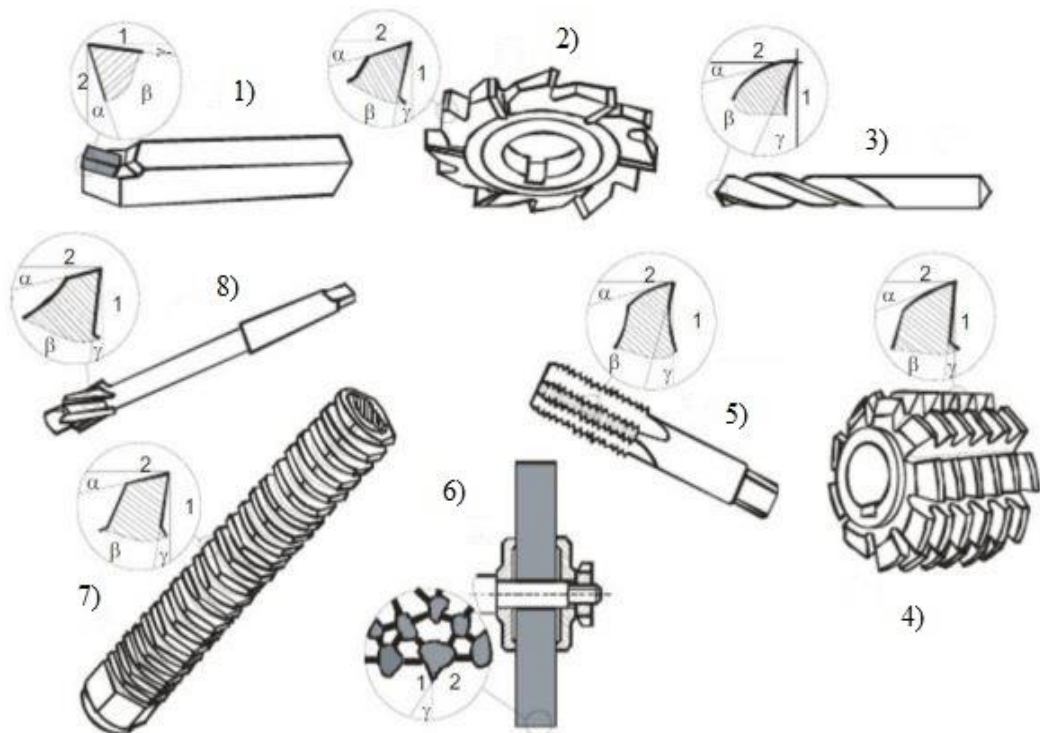
Svi navedeni parametri obrade definiraju relativno kretanje alata i obratka te njihov međusobni položaj u svakom trenutku odvijanja procesa obrade [1].

2.3. Vrste i materijali reznih alata

Glavna zadaća svakog reznog alata je za vrijeme obrade predmeta skinuti što više materijala u što kraćem vremenskom roku kako bi se ostvarile tražene dimenzije alata uz zadovoljavajuću kvalitetu tražene površine i minimalne obradne troškove. Na vrhu reznog alata nalazi se tzv. rezni klin (stavlja se u dršku ili držač alata) koji prodire u materijal te odvaja čestice materijala. Rezanjem se ostvaruje smična deformacija materijala obratka, u cilju stvaranja strugotine, na koju utječu razni faktori kao što su parametri rezanja, alatni stroj, SHIP, sami oblik strugotine, svojstva materijala alata i obratka i geometrija alata. Površine pri rezanju i proces rezanja prikazani su na slici 2.5. Rezni alati mogu biti jednorezni (sastoje se od jednog dijela) gdje se vrhom oštice alata vrši obrada, višerezni (sastoje se od drške alata i rezne pločice) gdje rezna pločica ima ulogu skidanja viška materijala te brusni rezni alati (sastoje se od neravnomjerno raspoređenih, nepravilnih oblika brusnih zrna te vezivnog sredstva). Na slici 2.6. prikazani su različiti tipovi reznih alata.



Slika 2.5. Proces rezanja [1]



Slika 2.6. Alati za obradu odvajanjem čestica [5]. tokarski nož (1), glodalo (2), svrdlo (3), odvalno glodalo (4), ureznik (5), brusna ploča (6), provlakačica (7), upuštalo (8), kut stražnje površine alata α , kut prednje površine alata γ , kut klina β , prednja površina alata (1), stražnja površina alata (2)

Odabir prikladnog alata za obradu je od iznimne važnosti jer može značajno skratiti vrijeme obrade pa samim time utjecati i na ekonomski aspekt proizvodnje. Zaposlenik koji upravlja alatnim strojem mora poznavati sve karakteristike stroja kojim će se obrađivati predmet, ali mora imati na umu koja će vrsta obrade biti jeftinija i vremenski kraća, a da se ostvari što veća produktivnost i kvaliteta. Potrebno je sa ekonomskog stajališta razmišljati kako o obradivosti tako i o postojanosti alata. Ako je postojanost alata relativno malena, veći će biti troškovi zastoja proizvodnje zbog više utrošenog vremena izmjene alata te dobave. Jednako tako, uporaba niskih brzina rezanja i posmaka će dati dugu postojanost, ali će proizvodnost biti niska. Potreban je konstantan nadzor uzroka trošenja alata, mehanizama trošenja, oblika trošenja, parametara trošenja i kriterija trošenja te razvijanje poboljšanja u cilju poboljšanja vijeka trajanja alata. Ekonomska učinkovitost proizvodnih pogona središnje je pitanje tehnologije rezanja. U tvorničkoj industriji se vrijednost proizvodima i obratcima dodaje samo tijekom trajanja stvarnog vremena rezanja. Konvencionalni procesi bili su pod strogim nadzorom sa gledišta produktivnosti, pa su se procesni lanci redizajnirali kako bi se smanjilo vrijeme propusnosti. Posljednih godina sve više je prisutan trend integriranih procesa što predstavlja nove zahtjeve za razvoj tehnologije rezanja uz održivost takve obrade.

Odabir materijala reznog alata je od velike važnosti za sami proces obrade jer može znatno utjecati na parametre rezanja što znači da ujedno utječe i na kvalitetu i ekonomske čimbenike. Važni kriteriji, osim dimenzijske kvalitete u smislu veličine i oblika, su i mehanička svojstva materijala za rezanje, primjerice visoke tvrdoće i žilavosti pri povišenim temperaturama. Čvrstoća je naznačena kritičnim faktorom intenziteta naprezanja jer ona opisuje koncentraciju naprezanja koja je potrebna na kraju pukotine za proširenje te pukotine. Pri odabiru materijala za rezanje, mehaničke karakteristike ne smiju se uzeti u obzir samo pri sobnoj temperaturi. Njihovo se ponašanje mora smatrati funkcijom temperature. Dobra otpornost na toplinski udar važna je karakteristika prikladnih materijala za rezanje. Materijali koji se koriste su uglavnom materijali na bazi ugljika (brzorezni čelici, prevučeni brzorezni čelici), karbidi, tvrdi metali, prevučeni tvrdi metali, cermet, keramike, kubični nitrid bor (CBN) i polikristalni dijamant (PCD).

Glavne prednosti brzoreznih čelika su njihova velika tvrdoća, dobra otpornost na trošenje, velika žilavost i razumni troškovi. Čvrstoća brzoreznih čelika najveća je od svih materijala za rezanje alata [6].

Karbidi se proizvode različitim metodama metalurgije praha pomoću tvrdih metalnih materijala i žilavih metala iz skupine željeza (veziva). Najčešći tvrdi metal je volframov karbid (WC) koji se proizvodi pri visokim temperaturama sintezom volframovog karbida u prahu s kobaltom u prahu. Ako su dimenzije čestica volframovog karbida velike i ako je veliki postotak kobalta to daje veliku otpornost na udarce i veliku udarnu štetu. Što su sitnije čestice manje se kobalta koristi pa materijal postaje tvrdi i otporniji na habanje stoga se treba odrediti uporaba reznog alata u ovisnosti o materijalu obratka.

Klasična upotreba suhe obrade dovodi do potrebe za izradu alata od cermeta. U načelu, cermet ima sličnu mikrostrukturu kao i konvencionalni alati od karbida. On sadrži različite čestice tvrdog materijala u vezivnom sredstvu od kobalta i nikla. Prednosti cermeta su visoke vrijednosti tvrdoće pri povišenim temperaturama koje omogućavaju velike brzine rezanja i kemijska stabilnost koja utječe na visoku otpornost na trošenje kao i na kvalitetu površine obratka.

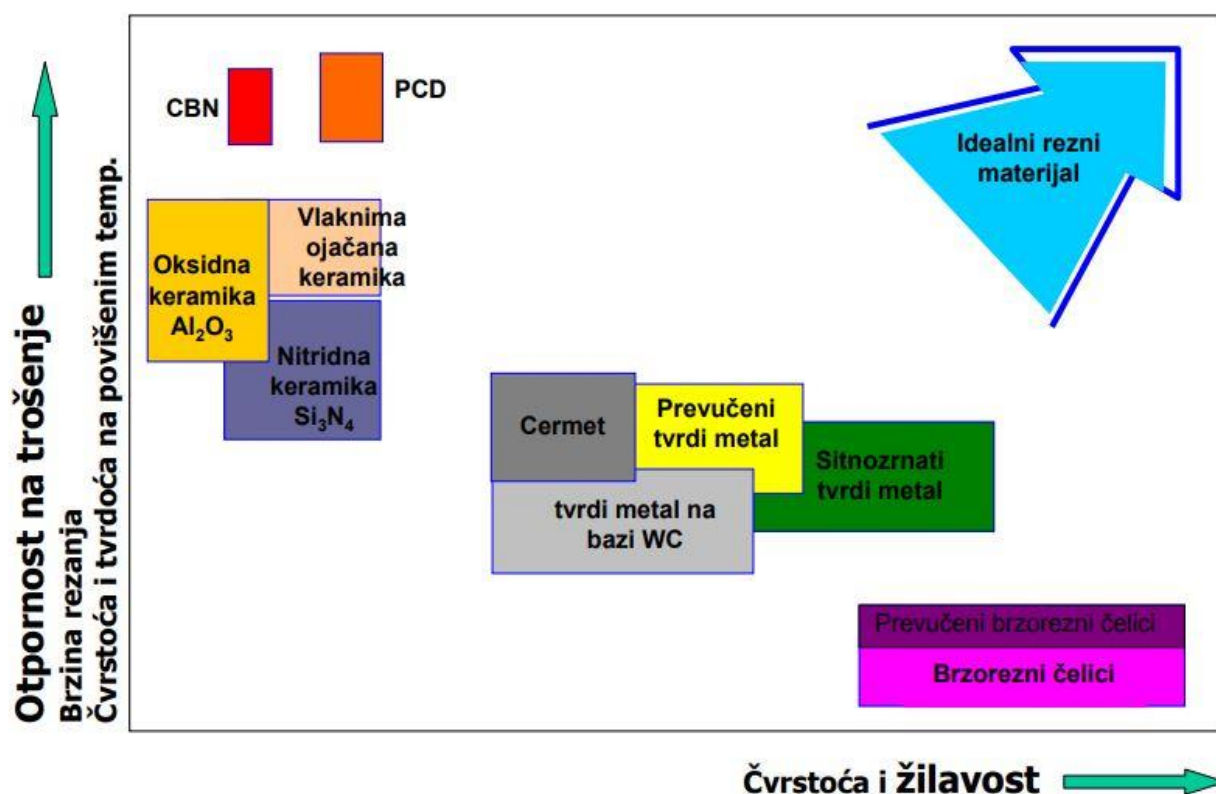
Od keramičkih materijala za rezne alate koriste se dvije vrste kompozitnih materijala. Prvi je aluminijev oksid koji sadrži jake ionske međuatomske veze što dovodi do željenih materijalnih svojstva. Može postojati u nekoliko različitih kristalnih faza, ali se sve one vraćaju u stabilnu heksagonalnu strukturu pri povišenim temperaturama što je pogodno za rezanje obratka. Kombinacijom s drugim tvrdim materijalima mijenjaju mu se mehanička svojstva ovisno o svrsi. Drugi materijal je silicijev nitrid koji ima visoku temperaturnu čvrstoću, otporan je na puzanje i oksidaciju. Pošto ima niski toplinski koeficijent širenja daje dobru otpornost na toplinski udar za razliku od većine drugih keramičkih materijala.

Kubični borov nitrid ili skraćeno CBN, ima kubičnu strukturu koja je veoma tvrda i abrazivna. Pošto je strukturno veoma sličan dijamantu ima i jako veliku tvrdoću (drugi najtvrdi materijal). Sastoji se od zrna bor nitrida i keramičkog veziva što doprinosi velikoj tvrdoći i manjoj kemijskoj otpornosti na trošenje. Pokazuje izrazito dobre rezultate kod obrade kaljenih materijala i sivog lijeva.

Dijamanti se mogu proizvesti sintezom atoma ugljika pod ekstremno visokim tlakom i temperaturom. Za materijal alata se uglavnom preferira polikristalni dijamant ili PCD zbog veće žilavosti naspram MCD-a ili monokristalnih dijamanta iako oni imaju najveću tvrdoću. Također

dijamant ima veoma nizak koeficijent trenja i toplinskog širenja, veliku čvrstoću i veliku otpornost na kemijsku eroziju, ali zbog velikog kemijskog afiniteta ugljika i željeza, obradom željeznih materijala dolazi do visokih stopa trošenja alata.

Usporedba različitih materijala u ovisnosti o njihovim fizikalnim svojstvima prikazana je na slici 2.7. Iz slike možemo vidjeti da idealni rezni materijal treba imati jako visoku otpornost na trošenje i veliku čvrstoću i žilavost, ali u stvarnosti takvi materijali za izradu alata ne postoje.



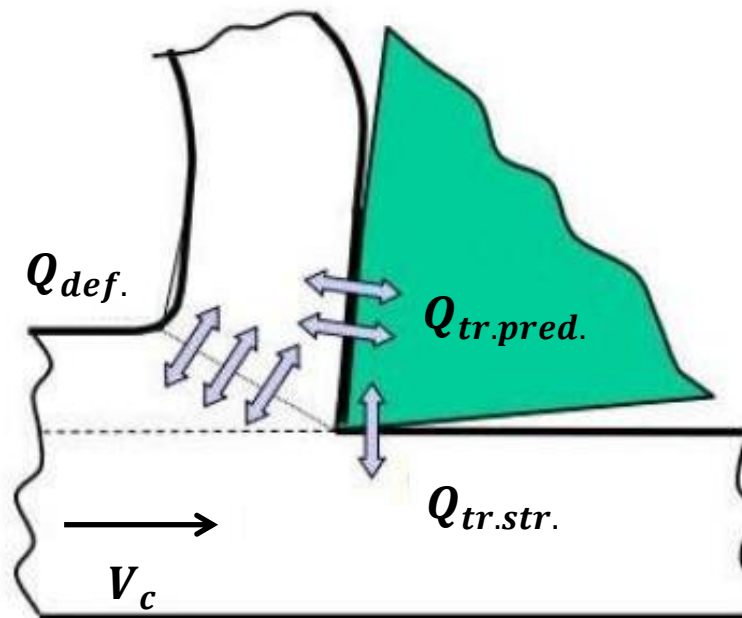
Slika 2.7. Usporedba materijala reznih alata ovisno o svojstvima [6]

Kako su neki od spomenutih materijala relativno skupi, uglavnom se koriste tvrdi metali koji su prevučeni prevlakama. Koliko je takav proces raširen govori i podatak da je skoro 80% reznih alata prevučeno. Prevlaka služi kao površinski vanjski sloj koji djeluje kao zaštita od vanjskih utjecaja, pa je s time povećana otpornost na trošenje alata. Tipične prevlake su: TiC, TiN, TiCN, CrN, Al_2O_3 [7].

2.4. Toplinske pojave

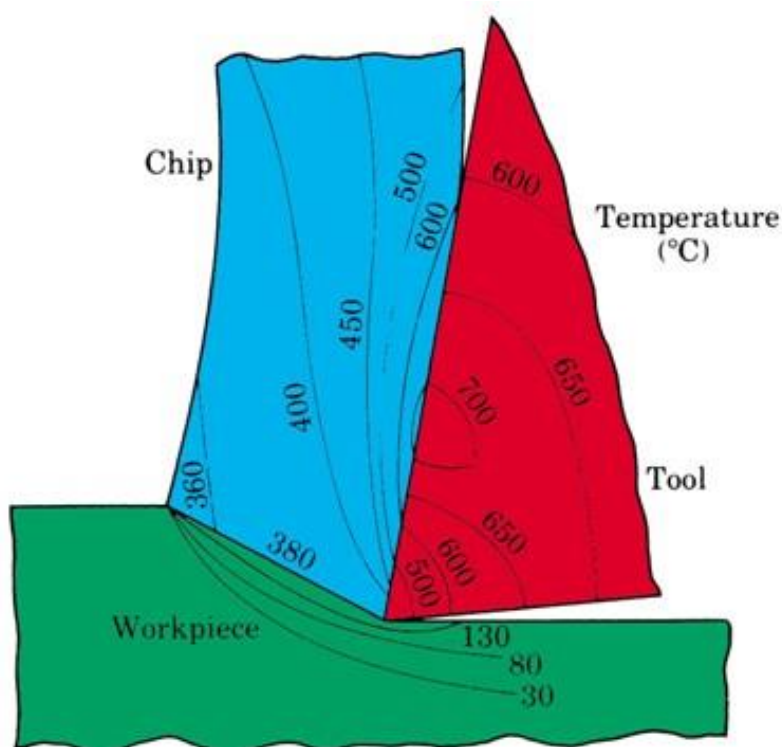
Obradu odvajanja čestica s reznim alatom uvijek prati stvaranje topline. To se događa zbog međusobnog kontakta obratka i alata. Promatranjem i analizom se zaključilo da se skoro sva energija koja se dovodi i upotrebljava za rezanje pretvara u toplinsku energiju. Većina te topline, oko 75%, stvara se u ravnini smicanja zbog unutarnjeg trenja. Kod obratka nastaju toplinske deformacije što rezultira netočnosti dimenzijskih izmjera i slabijoj kvaliteti obrade predmeta, a kod alata brže trošenje, povećanje otpora, smanjenje trajnosti, vibracije, itd. Vrijednost temperature ovisi o parametrima rezanja, obliku i materijalu alata, materijalu obratka te SHIP-u. Količina nastale topline u zoni rezanja razmjerna je brzini rezanja i vremenu obrade ili radu deformiranja i radu trenja na svim površinama alata [8].

Na slici 2.8. vidljivo je da toplina generirana prilikom rezanja nastaje kao posljedica plastičnih deformacija obratka $Q_{def.}$, posljedica djelovanja trenja radi dodira stražnje strane alata sa obratkom $Q_{tr.str.}$, te kao posljedica djelovanja trenja u točki dodira prednje strane alata i strugotine tj. odvojene čestice obratka $Q_{tr.pred.}$. Ukupno nastala toplina prenosi se na strugotinu, alat, obradak, na rashladio sredstvo te okolno područje.



Slika 2.8. Izvori topline prilikom rezanja [8]. toplina generirana uslijed plastičnih deformacija $Q_{def.}$, toplina koja se generira uslijed djelovanja trenja radi dodira stražnje strane alata sa obratkom $Q_{tr.str.}$, toplina koja se generira uslijed djelovanja trenja u točki dodira prednje strane alata i strugotine $Q_{tr.pred.}$.

Na slici 2.9. možemo vidjeti da se najveća temperatura ne stvara na vrhu alata nego u dodiru alata i strugotine. Na tom mjestu će i alat i obradak (zapravo odvojena čestica) imati maksimalnu temperaturnu vrijednost što nije povoljno jer tada dolazi do bržeg trošenja alata. Ako se zanemare prethodno navedeni parametri koji utječu na temperaturu rezanja može doći do nepovratnog uništenja samog obratka. Odabir reznog materijala prema materijalu obratka je veoma važan dio procesa kojim sprječavamo nastajanje neželjenih oštećenja i dodatnih neplaniranih troškova.



Slika 2.9. Prikaz temperaturnih vrijednosti u zoni rezanja [9]. chip – strugotina, workpiece – obradak, tool – alat, temperature - temperatura

3. SREDSTVA ZA HLAĐENJE, ISPIRANJE I PODMAZIVANJE (SHIP)

3.1. Primjena i funkcija SHIP-a

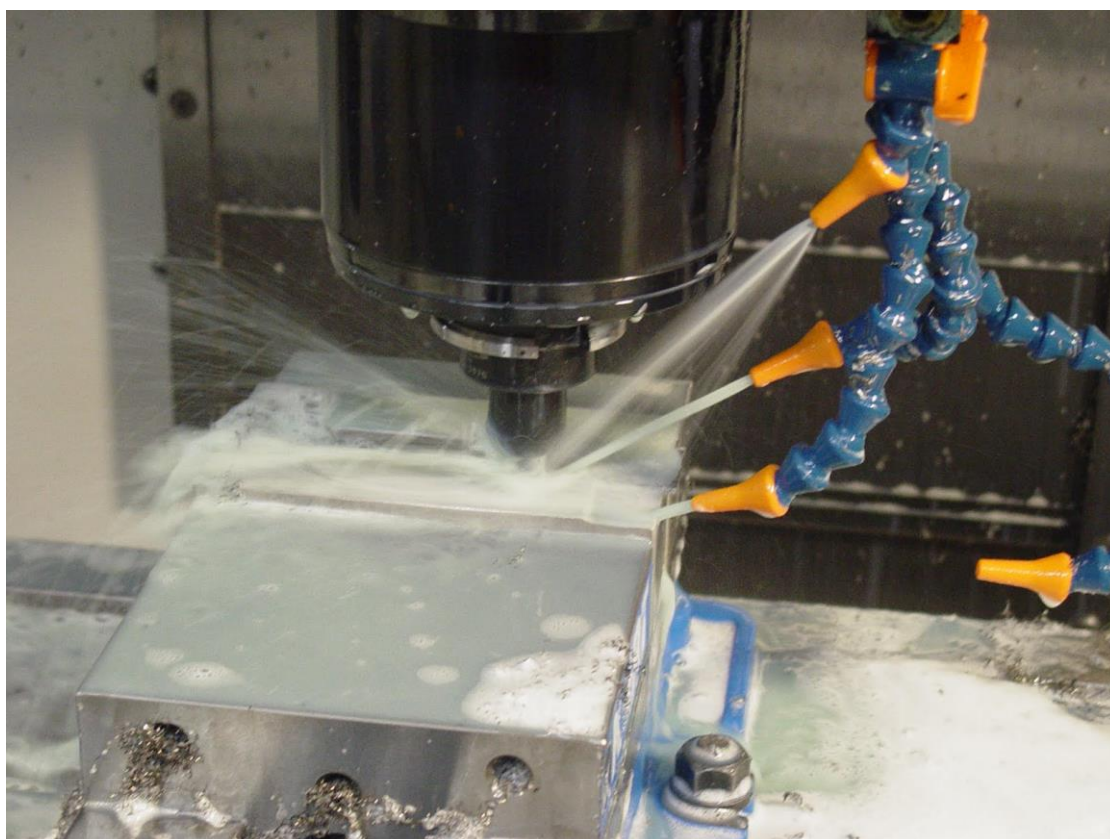
S obzirom da su brzine rezanja u zoni obrade jako velike, to prati konstantno stvaranje sve veće količine topline. Kako nebi došlo do oštećenja alata ili obratka ta se toplina mora odvoditi iz prostora rezanja za što nam služi SHIP. Njihov glavni zadatak (tablica 3.1.) je odvođenje generirane topline, ali isto tako i podmazivanje područja rezanja kako bi se smanjilo trenje između obratka i alata te ispiranje čestica nastalih zbog trošenja alata. Na taj se način smanjuju potrebna sila rezanja i snaga, a samim time i energija potrebna za odvijanje procesa. Također prouzrokuje lomljenje strugotine kako bi se ona lakše odnosila te ju ujedno i ispiru. Hlađenjem alata smanjuje se utjecaj topline tj. sprječava se dostizanje kritične temperature reznog alata nakon koje počinje faza ubrzanog trošenja. S time se produžuje vrijeme trajanja alata odnosno postojanost što rezultira visokom produktivnosti i ekonomičnosti koja je izrazito bitna u proizvodnoj industriji.

Razvojem tehnologija obrade razvili su se i mnogi načini uporabe sredstva za hlađenje pogotovo kod obrade određenih metala kao što su tvrdi čelici ili aluminijske slitine koje imaju tendenciju stvaranja priljepaka na alatu. Njegovim korištenjem omogućila se obrada različitih dijelova bez oštećenja materijala ili obratka. Svaki SHIP mora imati dobra rashladna svojstva kao što su visoki toplinski kapacitet, veliku toplinsku vodljivost i malu viskoznost kako bi se lakše dovodio u prostor rezanja. Sredstvo ne smije biti korozivno jer mu je sekundarna zadaća da spriječi koroziju stroja i obratka. Trebalo bi biti bez mirisa i antitoksičan, stabilan u uporabi i skladištenju te bi trebao omogućiti jasan pregled rada koji je izrazito poželjan u preciznom radu.

Važne karakteristike SHIP-a koje su bitne za prodor između alata i obratka su vlaženje i širenje, površinska napetost i male molekule masti. Molekule tekućine trebale bi više biti privučene površini, a ne jedna drugoj tako da se tekućina može širiti po radnoj površini i vlažiti ju. Sile površinske napetosti u tekućini i djelovanje razlike tlaka atmosfere, zbog tendencije stvaranja vakuuma pri ulasku alata u radni komad, uzrokovat će protok tekućine u međuprostor alata i obratka. Hlađenje uvijek treba biti ravnomjerno i treba početi prije prvog kontakta alata i obratka. Primjer jedne vrste dovođenja SHIP-a prilikom strojne obrade prikazan je na slici 3.1.

Tablica 3.1. Zadaci, zahtjevi i rezultati primjene SHIP-a [10]

Zadaci SHIP-a	Zahtjevi za SHIP	Rezultati primjene SHIP-a
<ul style="list-style-type: none"> - hlađenje zone obrade odvođenjem topline - podmazivanje – smanjenje trenja u zoni obrade - ispiranje odvojenih čestica te zaštita od korozije - čišćenje rupica poroziteta za smještaj odvojenih čestica - vezanje prašine kod obrade sivog lijeva 	<ul style="list-style-type: none"> - dobra rashladna i//ili podmazujuća svojstva - dobro svojstvo antikorozivne zaštite - da nisu opasna za ljude i da su ekološki pogodna (razgradnja) - da nemaju neugodan miris - da su što otpornija na starenje 	<ul style="list-style-type: none"> - veća postojanost alata - veće vrijednosti parametara obrade (brzine, posmaka) - manje zagrijavanje obratka, alata i stroja (veća kvaliteta obrade: hrapavost i točnost) - manje sile i snaga obrade tj. manja utrošena energija - manji troškovi obrade



Slika 3.1. Vanjsko dovođenje SHIP-a prilikom glodanja na CNC alatnom stroju [11]

Jedan od važnih aspekta rashladnog sredstva je i njegovo održavanje koje se često zanemaruje. Gledano sa stajališta učinkovitosti proizvodnje i higijenskih radnih uvjeta važno je obratiti pozornost na kvalitetu korištene vode, pripremu emulzije, kontrolu koncentracije emulzije, filtraciju i slično. Loše održavanje dovodi do pojave neugodnog mirisa i stvaranja bakterija koje narušavaju radno okruženje. Zato su danas prihvaćeniji centralizirani sustavi rashladne tekućine za jednostavno održavanje [12].

3.2. Vrste SHIP-a

Kako je početkom 20. stoljeća F.W. Taylor prvi put upotrijebio vodu za hlađenje procesa obrade i zaključio da se time produljuje vijek trajanja alata ili da je moguće povećati brzinu vrtnje alata za 40% od tada se u te i druge svrhe koristila velika raznolikost tekućina za rezanje [13]. Razvoj sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje uglavnom prati razvoj obradnih strojeva. Od prvih tekućina za obradu metala kao što su bili voda ili obično ulje vidimo napredak do različitih sofisticiranih metoda primjenom emulzija ili kombinacija vode sa određenim tvarima.

Podjela sredstva za hlađenje u toku strojne obrade, najčešće se dijeli na sljedeća 4 tipa:

- a) **ULJA** – u čiju skupinu spadaju mineralna, biljna, životinjska, njihove mješavine te sintetička ulja. Koriste se kod malih brzina rezanja gdje ne dolazi do velikog porasta temperature. Primarna zadaća im je podmazivanje i smanjivanje adhezije i abrazije, a sekundarna hlađenje. Za podmazivanje se obično koriste čista ulja dok se za hlađenje koriste ulja manje viskoznosti kako bi lakše i brže odvodili generiranu toplinu.
- b) **EMULZIJE** – sastoje se od ulja, kojim se ostvaruje njihova sekundarna zadaća podmazivanja, vode, emulgatora i ostalih dodanih aditiva ovisnih o materijalu izratka i alata. Ulje se zadržava u sitnim kapljicama vode pomoću emulgatora. Zbog velike količine vode sadržane u emulziji, one imaju visoki stupanj toplinske vodljivosti pa im je primarna zadaća hlađenje tokom naglog porasta temperature prilikom velikih brzina vrtnji.
- c) **POLUSINTETIČKA SREDSTVA** – uglavnom su to kemijske emulzije koje sadrže 5-50% dodanih mineralnih ulja razrijeđenih u vodi zajedno sa aditivima i kemijskim kompozitima.

d) **SINTETIČKA SREDSTVA** – kao što i ime govori to su potpuno sintetička sredstva izrađena od organskih i anorganskih soli te pomiješana sa aditivima u vodi bez prisutnosti ulja.

Razna sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje se zapravo proizvode kao koncentrat kojeg će svatko pojedinačno razrijediti te dodati zahtjevane aditive. Aditivi mogu biti alkoholi (stabilizirajući agens), siloksani ili cink diaciklofosfati (agensi protiv pjenušanja), sulfonati (surfaktanti i emulgatori), aditivi za ekstremne pritiske, amini, amidi i nitriti (inhibitori korozije), sredstva protiv trošenja alata i mikrobiocidi. Biocidi se koriste kako bi se spriječio nastanak gljivica i bakterija, dok je aditive koji u sebi sadrže kloroparafine zabranjeno koristiti. Često se u sastavu SHIP-a nalaze i male količine teških metala.

3.3. Načini dobave SHIP-a

Uz odabir prikladnog rashladnog sredstva bitan je i način dobavljanja tekućine do mjesta obrade, pa razlikujemo sljedeće pristupe:

a) **SLOBODNI MLAZ** – najčešće korištena metoda dovođenja SHIP-a vanjskim sapnicama. Protočne količine tekućine su između 10 l/min za alate s jednom oštricom do 25 l/min za alate s više oštrica. Riječ je o tzv. **mokroj obradi**. Tlakovi kod obrade odvajanjem čestica su 0,6-1 MPa. Korištenjem ove metode povećava se kvaliteta obrađene površine za barem jednu ili dvije klase, dok se sile rezanja i snaga smanjuju za otprilike 20% [14].

b) **POD VISOKIM TLAKOM** – kod ove metode je prijeko potrebna zaštita radnog prostora. Radi visoke efikasnosti prilikom odvođenja topline izrazito se koristi kod visokobrzinskih obrada. Tekućina se u zonu rezanja dovodi putem posebnih sapnica kroz koju struji pod tlakom 5,5-35 MPa u protocima 5-75 l/min. Pošto su tlakovi ovdje vrlo visoki, SHIP ovdje ima i ulogu lomitelja strugotine. Posebno je bitno kod ove metode održavanje rashladnog sredstva što se odnosi na redovitu filtraciju kako ne bi došlo do oštećenja obratka ukoliko se u tekućini nalazi velika količina sitnih čestica metala [14].

c) **AEROSOL** – često nazivana „maglica“, mješavina komprimiranog zraka i mikrokapljica ulja veličine 10-25 μm , koristi se prilikom potrebe dovođenja rashladnog sredstva do nepristupačnih mjesta i kada je potrebna bolja preglednost procesa obrade. Za ovu metodu koristi se SHIP na bazi vode (emulzije, sintetička sredstva, polusintetička sredstva) uz tlak 70600 kPa kojim se ispiru odvojene čestice. Zrak i tekućina dovode se u

prostor mješanja gdje nastaje rasplinuta emulzija. Nedostatak ove metode u usporedbi s metodom slobodnog mlaza je njezina efikasnost, ali njezina prednost je u nanošenju sredstva na teško dostupna mjesta. Kako su čestice rashlađivača veoma sitne, poput magle, postoji velika opasnost za radnika prilikom udisanja čestica [14].

3.4. Utjecaj SHIP-a na okoliš i zdravlje čovjeka

Početakom 60-ih godina prošlog stoljeća znanstvenici su počeli sve više pažnje usmjeravati prema tome kakav utjecaj i posljedice imaju rashladna sredstva, koja su u primjeni kod obrade odvajanjem čestica, na okoliš i čovjeka. Podatak koji zabrinjava je da se samo oko jedne trećine SHIP-a ekološki zbrine nakon obrade. Zato se prilikom današnje industrijske proizvodnje uzimaju u obzir smjernice nacionalnog instituta za zdravlje i zaštitu na radu prema kojima će se smanjiti uporaba konvencionalnih tekućina za obradu metala i kojima će se takve metode zamijeniti drugim alternativnim tehnikama hlađenja i podmazivanja održive strojne obrade.

Primjena konvencionalnih tekućina za obradu metala postavlja više ekoloških pitanja. Promatrajući gubitke kao što su isparavanje, nekontrolirano istjecanje i zaostale količine tekućine na obratku, alatu ili strugotini može se ustanoviti kako gotovo 30% od ukupne godišnje potrošnje tekućine za obradu metala dopijeva iz obradnog sustava u okoliš. Trenutačno se u svijetu koristi oko 2,4 bilijuna litara SHIP-a, pa uz jednostavnu računicu možemo dobiti uvid koliko toga završi u prirodi. Upravo zbog tog razloga propisani su zakoni i kazne radi nepropisnog zbrinjavanja otpada, neodržavanja higijene radnog mjesta te štetnih posljedica na okolinu. Sastav rashladne tekućine mora se propisano kontrolirati i pratiti kako je prikazano na slici 3.2. [15].



Slika 3.2. Uređaj za ispitivanje razine kontaminacije i pH vrijednosti SHIP-a [16]

Sami problem predstavlja pronalazak metoda kojima će se otpad zbrinuti jer odlaganjem otpada u kanalizacije prije dodatne obrade nije ekološki prihvatljivo. Većinom se emulzije rastavljaju na vodenu i uljnu fazu pri čemu se ulje spaljuje u cementnoj industriji dok se voda (još uvijek kontaminirana) šalje u postrojenja za obradu kanalizacijskog otpada. Također se i strugotina prije deponiranja mora ispirati.

Kako bi se ostvarilo što manje istjecanje rashladne tekućine u prirodu potrebno je odabrati prikladno skladištenje SHIP-a, odgovarajući se pripremiti prije razrjeđivanja koncentrata, održavati čistoću sredstva, kontrolirati izolaciju sredstva od okoline te zdravlje ljudi u radnom sektoru, održavati čistoću samog stroja te kontrolirati otpadni materijal prije odlaganja. Metode koje se koriste za zaštitno tretiranje prije odlaganja su ultrafiltracija, floatacija, evaporacija, kemijsko razdvajanje emulzije i precipitata, centrifugalno razdvajanje i toplinska obrada.

Nadalje, poznato je kako rukovanje rashladnim sredstvima predstavlja rizik za čovjeka. To se u prvom redu odnosi na operatera stroja. Konstantno se traže novi načini kako manje ugroziti čovjeka putem dodavanja novih aditiva ili rafinerijom mineralnih ulja. Direktna doticaj tekućine i osobe mora biti spriječen radi različitih toksičnih sastojaka u samom sredstvu kao što su nitrozamin, uljne pare, teški metali, različite bakterije,...itd. Znanstvenim istraživanjem je utvrđeno da su prijašnji aditivi korišteni u SHIP-u bili čak kancerogeni (klor parafini).

Kod čovjeka se prilikom kontakta sa SHIP-om najčešće razvija dermatitis na rukama i licu (zbog toga što sredstvo u doticaju sa kožom uništava prirodni sloj ulja na površini kože), kao što je vidljivo na slici 3.3. Rani pokazatelj dermatitisa je crvenilo i svrbež kože. Ostali simptomi koji se kasnije mogu razviti su suha koža koja puca, oticanje, bol, a u nekim slučajevima žuljevi i otvorene rane. Simptomi dermatitisa mogu biti bolni i iscrpljujući, a u nekim slučajevima mogu spriječiti operatera da obavlja zadatke. Redoviti pregledi kože trebali bi biti dio sveobuhvatnog programa zdravstvenog nadzora od strane nadležne osobe ili pružatelja zdravstvenih usluga.

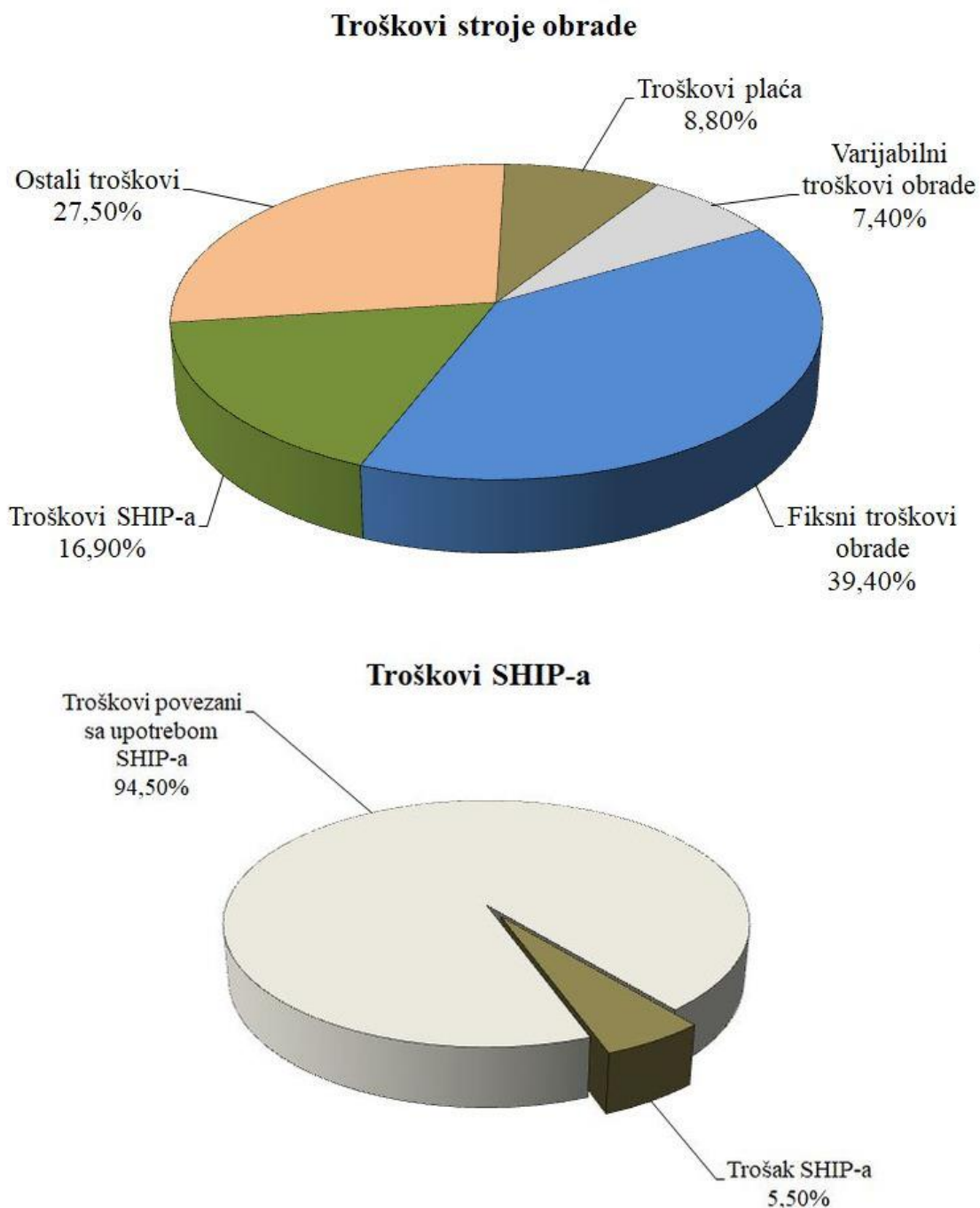


Slika 3.3. Dermatitis uzrokovan kontaktom čovjeka sa SHIP-om [17]

Drugi najčešći slučaj oboljenja je oboljenje pluća. Posljedica je konstantnog udisanja čestica sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje koje isparavaju prilikom obrade i tvore takozvanu „maglicu“. Profesionalna preosjetljivost, pneumotitis i profesionalna astma najčešće su prijavljene plućne bolesti. Od 1996. godine do 2015. godine zabilježen je porast s 2% na 45% pneumotitisa prilikom obrade dijelova. Neobjašnjiv kašalj, ponavljajuće infekcije prsnog koša, otežano disanje te gubitak tjelesne težine mogu biti rani pokazatelji razvoja bolesti pluća. Što se prije otkriju simptomi radnika, prije će se moći obustaviti njegov rad kako ne bi došlo do nepovratnog oštećenja organa. Kako bi se zaštitio čovjek svaka proizvodna firma treba imati propisanu zaštitu na radu te opremu (zaštitno odijelo, rukavice, naočale, zaštitne čizme,...) [17].

3.5. Ekonomski aspekt uporabe SHIP-a

Troškovi upotrebe konvencionalnih rashladnih sredstava relativno su visoki gdje uz kontroliranu proizvodnju koja je u skladu s održivim razvojem, cijene uporabe još više rastu. Na primjer, u SAD-u se koristi više od 378 tisuća tona SHIP-a, a cijena za nabavu i recikliranje iznosi 48 milijardi dolara godišnje. Na slici 3.4. dani su troškovi strojne obrade te troškovi vezani uz sami SHIP.



Slika 3.4. Troškovi strojne obrade i SHIP-a [18]

Iz slike vidimo da trošak same tekućine odnosno koncentrata čini tek oko 5% cjelokupnog troška vezanog za uporabu SHIP-a. Kako bi se izračunali svi troškovi moraju se uzeti u obzir sve faze i procesi kroz koje prolazi rashladno sredstvo počevši od nabave do recikliranja. To uključuje troškove nabave robe, spremanja na zalihu, distribucije u operativnom sustavu, samog korištenja sredstva i održavanja, prikupljanja SHIP-a nakon obrade, skladištenja, pročišćavanja tj. filtracije te samog odlaganja štetnog otpada. S druge strane obradom pomoću tekućina dobiva se proizvod vrlo visoke kvalitete površine obratka i smanjuje se trošenje alata (alati će imati dulji vijek trajanja) pa se dio troška kompenzira.

Na temelju prethodno navedenih posljedica koje se javljaju prilikom korištenja konvencionalnih tekućina, kao što su negativni učinci na čovjeka i okoliš te sama činjenica da su troškovi odlaganja otpada i skladištenja tekućine visoki, možemo vidjeti zašto se industrija strojne obrade metala okreće prema nekim drugim alternativnim metodama hlađenja. Upravo zbog velikih količina resursa i cijenovno opterećenih postupaka 1/3 tekućine završi u prirodi što nimalo nije u skladu sa održivim razvojem. Kako bi parametri održivog razvoja bili zadovoljeni, cilj svakog poduzeća mora biti održiva strojna obrada metala, kojom će smanjiti količinu tekućine koja se koristi ili primijeniti druge alternativne metode. Upravo zato su se razvile različite metode koje će dati istu ili čak veću proizvodnost, ali će uvelike smanjiti negativne učinke na prirodu i čovjeka.

4. ODRŽIVA STROJNA OBRADA METALA

Održiva strojna obrada metala podrazumijeva obradu metala od početnog sirovca ili poluproizvoda pa sve do gotovog proizvoda koja se obavlja na automatiziranom alatnom stroju, ali tako da ona bude u skladu sa održivim razvojem koji se mora ispuniti na ekonomskoj, društvenoj i ekološkoj razini kako bi on bio održiv (slika 4.1.). Kako bi to bilo ostvarivo, sve tri grane trebaju biti u ravnoteži jedna s drugom gdje društveno-ekološka ravnoteža mora biti prihvatljiva u svim zajednicama u globalnom smislu gdje je potrebno obratiti posljedice na okoliš. Gospodarsko-ekološka ravnoteža treba omogućiti i poticati ekonomski rast uz očuvanje okoliša dok gospodarsko-društvena ravnoteža treba težiti ravnopravnom ekonomskom rastu poduzeća i lokalnih zajednica.

Ekološki parametar održive strojne obrade uzima u obzir sve čimbenike koji utječu kako na okoliš tako i na zdravlje čovjeka. Svaki sustav, operacija ili proces obrade trebao bi se izgraditi tako da proizvodi ili koristi što manje nusprodukata štetnih za prirodu uz što veće korištenje zelene energije zbog čega se razvijaju različite strategije i planovi za očuvanje i smanjenje zagađenja okoliša, smanjenje negativnog utjecaja na klimu, savjesnu eksploataciju prirodnih resursa te za očuvanje biološke raznolikosti i biosfere.

Ekonomski parametar održive strojne obrade uzima u obzir sve troškove i izdatke tokom obrade tako da ona bude novčano te vremenski prihvatljiva i produktivna uz minimalne proizvodne troškove i maksimalno dostižnu ekonomsku efikasnost. Isto tako mora sagledati i omogućiti porast blagostanja ljudi (održavanje zaposlenja uz prihvatljive novčane prihode) te stabilnost tržišne cijene proizvoda kako bi on većini ljudi bio dostupan i prihvatljiv.

Pod društvenim aspektom održive strojne obrade treba minimalizirati negativne učinke na zdravlje pojedinca (usko vezano uz ekološki aspekt). Također, podrazumijeva se težnja k tome da svaki pojedinac ima jednaku mogućnost i pristup proizvodu, a ne samo odabrani, odnosno treba postići ravnopravnost svih ljudi. Krajnji produkt obrade treba biti i društveno i estetski prihvatljiv (izgledom ne smije vrijeđati određene skupine) kako za većinu tako i za određene manjine. Spominje se i pitanje ljuskih radnih mjesta jer što je više strojno upravljanih mjesta manje je zaposlenih ljudi (usko vezano uz ekonomski dio obrade).

Usporedbom sve bržeg razvoja novijih tehnologija i različitih načina obrade te razvoja održive obrade možemo zaključiti da održivi razvoj zaostaje odnosno koči tehnološki razvoj industrije. Današnja društvena svijest je sve više zaokupirana ostvarivanjem što većeg profita, pa makar i pod cijenu uništavanja prirode do te mjere da se ona neće biti u stanju ekološki obnoviti, pogotovo što je sve veća populacija pa samim time i potražnja, a sve je manje i manje prirodnih resursa. Upravo zato je, u svakoj grani industrije, cilj održivog razvoja smanjiti destruktivne procese štetne za okoliš te osigurati prikladnu zaštitu rada čovjeka. Kako bi se to omogućilo na globalnoj razini, sve države bi trebale tako orijentirati svoje industrije, pa su iz tog razloga Ujedinjeni narodi (UN), kao predsjedajuće tijelo za smjernice održivog razvoja, 2015. godine prezentirali dokument pod nazivom „Agenda 2030“ i postavili 17 ciljeva za održivi razvoj koji su planirani da se ostvare do 2030. godine. Prema UN-u, opći cilj održivog razvoja je dugoročna stabilnost gospodarstva i okoliša što je moguće ostvariti samo integracijom i osvješćivanjem gospodarskih, ekoloških i socijalnih problema tijekom procesa donošenja odluka. Možemo reći da bi održivi razvoj trebao osigurati rješenja u smislu zadovoljavanja ljudskih potreba, postizanja jednakosti, omogućavanja socijalne identifikacije i kulturne raznolikosti te pritom zadržati ekološki integritet, uvažavajući razvoj i zaštitu okoliša [19].



Slika 4.1. Grafikon ravnoteže parametara održivog razvoja [19]

Ekološki prihvatljiva obrada ili održiva proizvodnja ili zelena proizvodnja sinonimi su za novije proizvodne strategije kako bi se osigurala minimalna potrošnja resursa te utjecaj otpadnih i štetnih tvari na okolinu. Postoje mnogi razlozi prelaska na ovakvu vrstu obrade kao i pozitivni učinci korištenja iste (slika 4.2.). U ovu skupinu moguće je uvrstiti i promjenu sastava tekućine za hlađenje upotrebom drugačijih emulgatora i aditiva ili umjesto upotrebom mineralnih ulja štetnih za čovjeka i okoliš, korištenje SHIP-a na bazi biljnih ili esterskih ulja koja su biorazgradiva [20]. U tu svrhu su se umjesto mokrih obrada rashladnim sredstvima razvile nove tehnike hlađenja i podmazivanja kao što su:

- 1) Primjena minimalne količine tekućine za obradu metala (MQL/MQCL),
- 2) Kriogena obrada,
- 3) Biorazgradiva ulja,
- 4) Hlađenje komprimiranim zrakom vrtložne cijevi.

Navedene metode su objašnjene u nastavku.



Slika 4.2. Razlozi i profiti prelaska na alternativne vrste hlađenja [2]

4.1. Primjena minimalne količine tekućine za obradu metala MQL/MQCL

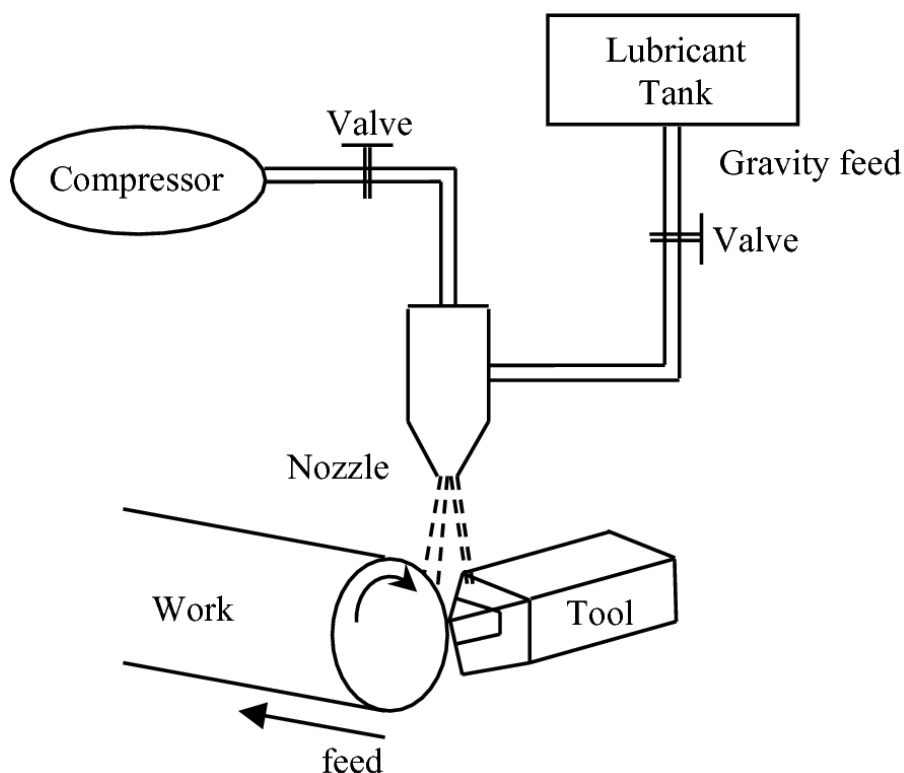
Primjena minimalne količine tekućine za obradu metala je zapravo polu suha obrada gdje se minimalna količina tekućine ravnomjerno raspršuje pod visokim tlakom u zonu rezanja, tzv. aerosol. Sustav dovođenja fluida baziran je na ejektorskom principu gdje se uz pomoć komprimiranog zraka dobivenog od kompresora, koji tokom dobave prolazi kroz venturijevu cijev, stvara polje niskog tlaka (dijelomični vakuum) koje zbog razlike u tlakovima povlači rashladnu tekućinu iz spremnika (orijentiran je tako da pod djelovanjem gravitacije sredstvo samo počinje strujati) u komoru za mješanje. Mješanjem zraka i tekućine i prolaskom kroz difuzor, smjesa zraka i sredstva se raspršuje u zonu rezanja u obliku magle. Ovisno o funkciji primjenjive tekućine razlikujemo dva tipa:

- MQL (engl. *Minimum Quantity Lubrication*) – minimalna količina tekućine za podmazivanje, slika 4.3.,
- MQCL (engl. *Minimum Quantity Cooling Lubrication*) – minimalna količina tekućine za hlađenje i podmazivanje.

Ako je primarni zadatak podmazivanje radnog obratka i alata tada se koristi MQL, a ako je potrebno povećati učinak hlađenja koriste se MQCL sustavi rashladnog podmazivanja minimalnom količinom. Tipična potrošnja tekućine ovim metodama je 5-50 mL/min. Uz mješanje tekućine sa zrakom (vanjska dobava) često se koristi i metoda dovođenja tekućine kroz sami alat (unutarnja dobava). Ovdje se također mora obratiti pozornost na sastav tekućine odnosno njezinu biorazgradivost i stabilnost radi dužeg stajanja u spremniku uslijed smanjene potrošnje. Kod MQL obrade osnovna tekućina je biljno ulje upravo zbog svoje biorazgradivosti.

Prednosti korištenja metoda sa minimalnom primjenom tekućine uključuju smanjenje troškova nabave, održavanja, recikliranja i odlaganja, manju izloženost radnog operatera rashladnom sredstvu, korištenje manjeg protoka 5-50 mL/min što u usporedbi sa konvencionalnim načinom obrade, utječe na povećanje produktivnosti. Zbog raznih dobiti ovakvog načina primjenjivanja SHIP-a, nedavna istraživanja usmjerena su prema određivanju minimalne količine tekućine za određeni proces. Utvrđeno je da se moglo iskoristiti čak 40 000 puta manje tekućine za određene operacije, u odnosu na konvencionalnu obradu, bez povećanja trenja na alatu i smanjenja vijeka trajanja alata. Ovi su rezultati bili značajno poboljšanje u odnosu na suhu obradu koja uvelike smanjuje postojanost alata. U drugom istraživanju utvrđeno je da se

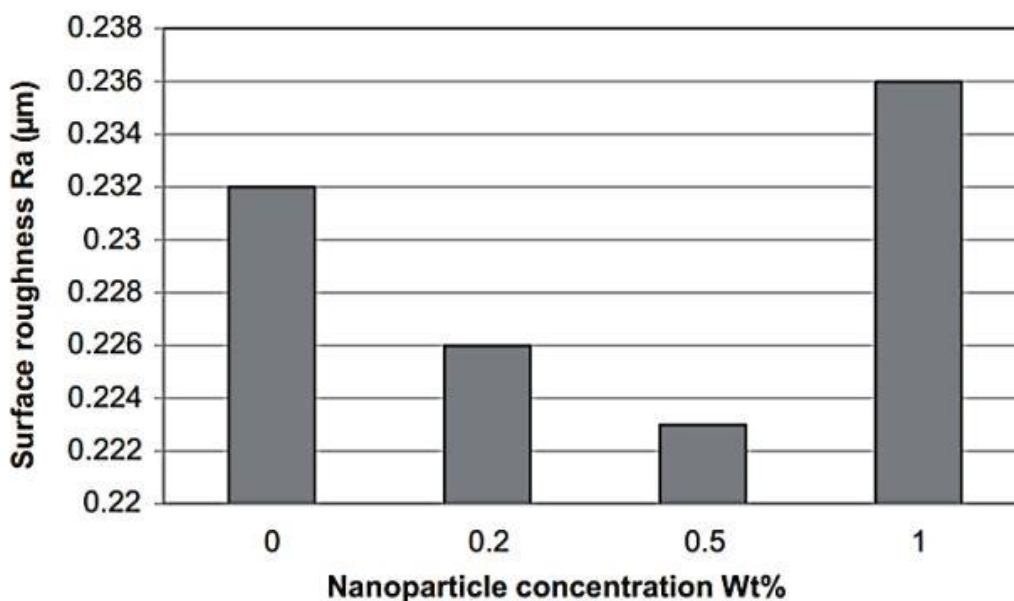
uporaba SHIP-a tijekom operacija brušenja u njemačkoj automobilskoj industriji mogla smanjiti za 90% bez povećavanja sila rezanja ili trošenja brusnih kotača [22]. Što znači, ukoliko se posveti više pažnje na upotrebu tekućine, troškovi bi se mogli dodatno sniziti što će se pozitivno odraziti na ekonomičnost same proizvodnje.



Slika 4.3. MQL princip ejektora [21]. Compressor – kompresor kojim tlačimo zrak, Valve – ventil, Lubricant tank – spremnik rashladne tekućine, Gravity feed – gravitacijski efekt kojim se tekućina dovodi u prostor mješanja, Nozzle – mlaznica, Work – obradak (rotacijsko gibanje), Tool – alat (pravocrtno gibanje)

4.1.1. Napredne MQL/MQCL metode

Nanočestice kao što su Al_2O_3 , SiO_2 , MoS_2 , TiO_2 ,..., prisutne su u određenim omjerima u biljnom ulju. Raspršuju se sa zrakom u obliku aerosola. Obrada pomoću takvih nano tekućina (bazična tekućina-ulje + nanočestice) u odnosu na korištenje čistog ulja rezultira povećanjem performansi rezanja i čak 27% većoj kvaliteti obrađene površine [23]. Iz slike 4.4. se jasno može vidjeti da nije uvijek poželjna veća koncentracija aditiva prilikom podmazivanja. Najbolje vrijednosti hrapavosti površine (najniže) dobiti ćemo korištenjem lubrikanta koji sadrži 0.5 % MoS_2 aditiva u obliku nanočestica.



Slika 4.4. Prikaz različite površinske hrapavosti u odnosu na udio MoS_2 aditiva u mazivu [24]. Surface roughness – površinska hrapavost dana u mikrometrima, Nanoparticle concentration – koncentracija nanočestica dana u postocima

Posebno zanimljiv sustav je moderni **MQL sustav "ulje na vodi"** (engl. *Oil on Water*) baziran na tankom sloju uljnog filma na kapljici vode. Kada kapljica dođe u kontakt s alatom i površinom obratka tijekom obrade, ulje se širi površinom prije samog širenja vode. Voda ovdje ima tri glavne uloge, a to su nošenje ulja do zone rezanja, širenje ulja preko površine obrade te odvođenje topline [20].

Jedna od naprednih varijanti je i minimalna količina podmazivanja upotrebom **95%-tnog etanola**. Glavna prednost upotrebe etanola u odnosu na primjenu čistog ulja ili i primjenu nanofluida (ulje + nano čestice), je u evaporizaciji odnosno isparavanju čestica etanola nakon hlađenja reznog alata čime se eliminiraju ostaci lubrikanta na reznom materijalu. Obično se čestice etanola nakon isparavanja odnose pomoću ventilatora smještenog blizu reznog mjesta [25]. Time se odстранjuju problemi recikliranja i odlaganja rashladne tekućine te dodatnog odmašćivanja obratka. Također, niska viskoznost etanola omogućuje mu dospijevanje uz sami vrh oštice reznog alata radi učinkovitijeg hlađenja i podmazivanja pogotovo pri velikim brzinama okretaja radnog vretena što nije slučaj kod emulzijskih sredstava. Iako je siguran za upotrebu prilikom rezanja raznih metala kao što su aluminij, bakar, magnezij, mjed i raznih vrsta plastike, problem upotrebe etanola je njegovo svojstvo zapaljivosti odnosno gorenja. Prilikom rezanja feroznih materijala javljaju se iskre koje lako mogu dostignuti energiju aktivacije zapaljenja etanola te time uzrokovati lančanu reakciju odnosno zapaljenje, pa se stoga treba

obratiti posebna pozornost na materijal obratka i reznog alata, a ujedno i na sigurnosnu opremu prilikom procesa rezanja [26].

Jedan od procesa hlađenja i podmazivanja je **MQCL+EP/AW** (engl. *Minimum Quantity Cooling Lubrication + Extreme Pressure/Anti-Wear additives*), odnosno upotreba minimalnih količina emulzije koje su poboljšane određenim aditivima. Uglavnom su to esteri fosforne kiseline koji pružaju zaštitu od ekstremnog trenja koje se javlja prilikom velikih sila rezanja. Obično su kemijski aktivni i glavna zadaća im je absorpcija ili reakcija sa površinama u kontaktu. Zaslužni su za stvaranje tribofilma između kontaktnih površina čime se smanjuje trenje između njih i samim time se povećava površinska kvaliteta obrađivanog dijela (i do 25% u odnosu na suhu strojnu obradu) kao i postojanost alata [27].

Primjenjiva je i **EMQL** (engl. *Electrostatic Minimum Quantity Lubrication*) metoda podmazivanja pri čemu se male količine maziva negativno nabijaju metodom elektrostatickog kontakta te se usmjeruju u područje obrade u obliku ravnomjerne, vrlo propusne i vlažne uljne magle. Treba napomenuti kako postoje i druge metode koje koriste princip elektrostatickog nabijanja od kojih je najmodernija **EHVSL** (engl. *Electrostatic High Velocity Solid Lubricant*) metoda gdje se za podmazivanje koristi kruto mazivo. Uglavnom se primjenjuje prilikom obrade teško rezivih materijala [28].

Postoje i takozvane hibridne metode podmazivanja kao što su kriogena metoda minimalne količine podmazivanja **CRYO-MQL** i metoda minimalnog podmazivanja pod utjecajem ohlađenog komprimiranog zraka **CAMQL** (engl. *Cool Air Minimum Quantity Lubrication*). CRYO-MQL metoda koristi tekući dušik ili tekući ugljikov dioksid kao rashladno sredstvo te se uglavnom koristi za obradu potrebnih dijelova u medicini i posebno u aeronautici, gdje se često obrađuju legure titanija čijom obradom se uvelike smanjuje postojanost alata, kvaliteta površine proizvoda i produktivnost. Upotrebom CRYO – MQL metode produljuje se vijek trajanja alata do 30% uz povećanje produktivnosti do čak 50%. [29,30]. CAMQL metoda izvodi se pomoću vrtložne cijevi koja je dodatno opisana u podpoglavlju 4.4.1. Iako nije istražena kao i ostale metode, ovaj princip hlađenja i podmazivanja se već pokazao kao puno bolji u odnosu na suhu obradu ili hlađenje samo sa komprimiranim zrakom. Razlog tome je efikasno odvođenje topline iz zone rezanja putem vrtložne cijevi, gdje se uz minimalno podmazivanje smanjuje trenje između površina u kontaktu kao i tangencijalne sile rezanja. U usporedbi sa konvencionalnim

procesima, ovakav pristup obradi pruža bolje ekonomsko i ekološko rješenje, pa se znanstvenici danas sve više usmjeruju na poboljšanje ovakve metode [24].

4.2. Kriogena obrada

Pojam kriogenika dolazi od grčke riječi „kryos“ što znači hladno odnosno smrznuto. Kriogena obrada je obrada u kojoj se koriste ukapljeni plinovi pri vrlo niskim temperaturama umjesto tekućina. Temperaturna granica kod koje počinje kriogeneza odnosno područje kriogenike nije točno određeno, ali se smatra da je negdje oko $-145\text{ }^{\circ}\text{C}$. U prošlosti se za kriogenu obradu koristio ugljikov dioksid CO_2 ili različiti freoni, no problem je nastao prilikom apliciranja tekućina na mjesto obrade. Vrlo brzo se odustalo od kriogene obrade pošto su ekonomski troškovi bili veliki uslijed prevelike količine rasipanja kriogeno ukapljenih tekućina. Uz to je obradak trebalo i posebno podmazivati jer se kriogenim pristupom samo hladio, a kako nisu bili razvijeni alati sa raznim prevlakama koje imaju baš tu ulogu podmazivanja jasno je vidljiv razlog odustajanja. Što se tehnologija više razvijala tako su i nedostaci upotrebe kriogenike postajali sve manji, pa se ponovo počela primjenjivati ovakva vrsta obrade. Primjer kriogene obrade dan je na slici 4.5.



Slika 4.5. Kriogena obrada glodanjem [31]

Kako se i u početku koristio ugljikov dioksid za kriogenu obradu, tako se i njegova metoda primjene usavršila, pa se danas koristi suhi led (engl. *dry ice*) odnosno CO₂ u krutom stanju. Pri rezanju koriste se male kuglice suhog leda koje mogu biti usitnjene i do ispod jednog milimetra (slika 4.6.). Prednost ove metode je u direktnoj sublimaciji (pri -78,5 °C) iz krutog u plinovito stanje zbog čega se koristi u farmaceutskoj industriji jer prilikom obrade ne kontaminira proizvod. Iako nije značajno opasan niti toksičan, treba obratiti pozornost na njegovo rukovođenje zbog iznimno niskih temperatura, ali i zbog isparavanja čestica da prilikom obrade ne bi dospio (u većim količinama) u organizam čovjeka [32].



Slika 4.6. Primjena suhog leda (dry ice) prilikom obrade (sačmarenje) [33]

Za kriogenu obradu najčešće se koristi tekući dušik LN₂ koji se pri temperaturi od -196 °C dobavlja u zonu rezanja. U doticaju sa alatom ili obratkom, koji su prilikom obrade na vrlo visokim temperaturama, tekući dušik isparava u čestice dušika koje se ispuštaju u okolinu. Dušik se ionako nalazi u sastavu zraka (78%) pa ne postoji opasnost od zagađenja zraka ili opasnost po čovjeka prilikom udisaja čestica dušika u razumnim granicama. Dušik je inertni plin, bez boje i mirisa, nezapaljivog karaktera i ne uzrokuje koroziju. Prilikom obrade svedno treba obratiti pažnju na količinu dušika u okolnom zraku jer se tokom samog procesa volumen dušika može povećati i 500% čime bi se poprilično smanjio udio kisika u okolnom zraku što nikako nije poželjno [20].

Ostali kriogenici koji se mogu koristiti su tekući helij (primjenjuje se u bolnicama tokom dobivanja slike magnetskih rezonanci), tekući vodik ili tekući kisik koji se koriste u svemirskoj industriji za zamrzavanje hrane, hlađenje ili kao gorivo i drugi [34].

Ovakav tip obrade najčešće se upotrebljava kod obrade legiranih čelika, kompozita, plastike, motora i diskova i općenito u automobilskoj, zrakoplovnoj i posebno medicinskoj industriji. Korištenjem kriogene obrade alatu se također produljuje vijek trajanja. Poboljšavaju se svojstva kao što su žilavost, tvrdoća i otpornost na trošenje. Zato su i prednosti takve obrade u smanjenju troškova u odnosu na konvencionalnu obradu prilikom nabave, zamjene i trošenja alata. Omogućene su i veće brzine rezanja što rezultira većom produktivnošću, postignuta je bolja kvaliteta površine obrađenog materijala i što je najvažnije smanjen je negativni utjecaj na okolinu. Negativne strane ove metode su nemogućnost ponovne upotrebe rashladnih sredstava te utjecaj niskih temperatura na čovjeka jer ako se ne osigura kvalitetna i prijeko potrebna zaštitna oprema lako može doći do oteklina ili smrzotina.

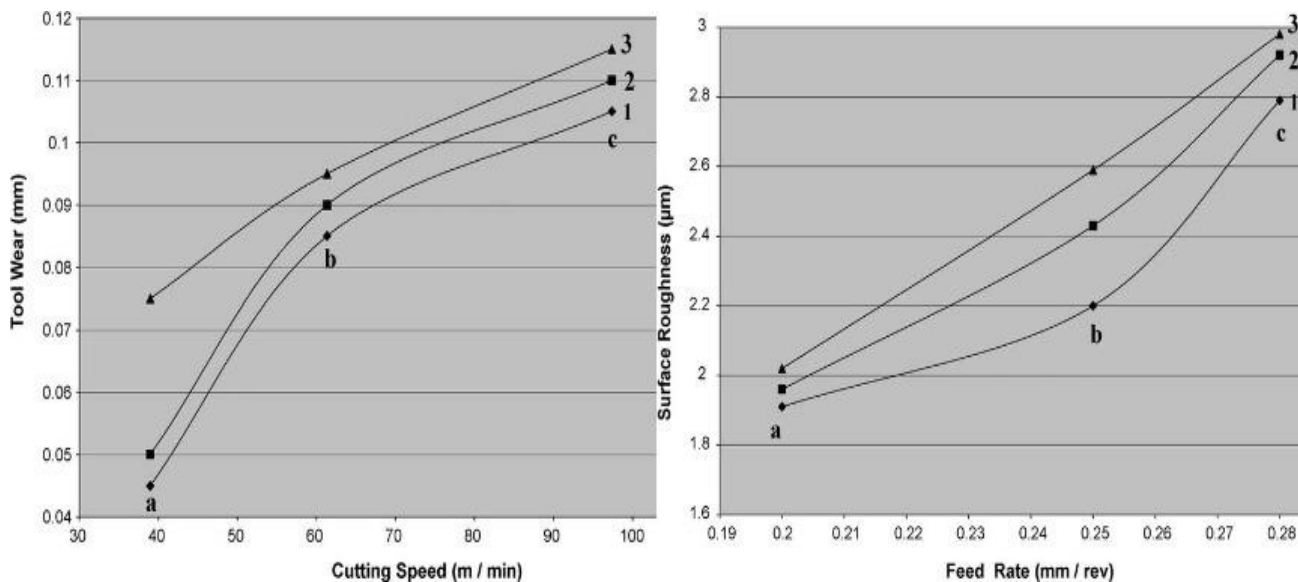
4.3. Biorazgradiva ulja

U konvencionalnoj obradi se kao sredstvo za podmazivanje općenito koriste mineralna ulja ili derivati petroleja koji imaju odlična mazivna sredstva i otpornost na koroziju, ali glavni nedostatak je njihova zapaljivost (nisu efikasni u odvođenju topline) i njihova slaba biorazgradivost što predstavlja veliki rizik od zagađenja okoliša [35]. Zbog toga su se razvile metode koje koriste biorazgradiva ulja kako bi se osigurali zdraviji uvjeti rada. Vrste biorazgradivih ulja koja se primjenjuju kod alternativnih metoda održive strojne obrade su:

- Biljna ulja,

Glavni razlog njihove primjene leži u njihovom sadržaju odnosno masnim kiselinama koje proizvode masnoću i omogućavaju stvaranje mazivnog filma visoke čvrstoće između površina što rezultira smanjenjem trenja i trošenja. Također se eksperimentalnim putem dokazalo da se temperatura rezanja smanjila za približno 50% u odnosu na konvencionalne metode [36]. Znanstvenici Xavier i Adithan su proveli usporedno istraživanje 2009. godine gdje su razmatrali učinke upotrebe različitih ulja na brzinu rezanja, postojanost alata i hrapavost površine. Kao biljno ulje koristili su kokosovo ulje uz ulje na bazi petroleja i topljivo ulje. Rezultati su pokazali

da kokosovo ulje uz to što poboljšava kvalitetu obrađene površine (smanjuje površinsku hrapavost) ono ujedno i smanjuje trošenje alata prilikom rezanja u odnosu na obradu sa ostalim prethodno navedenim uljima (prikazano na slici 4.7.).



Slika 4.7. Usporedba parametara obrade u ovisnosti o vrsti ulja [37]. kokosovo ulje (1), topljivo ulje (2), ulje na bazi petroleja (3), Tool wear – trošenje alata, Cutting speed – brzina rezanja, Surface roughness – površinska hrapavost, Feed rate – posmak po okretaju alata; a, b i c označuju referentne točke mjerenja

- Esterska ulja.

Esterska ulja su zapravo biljna ulja koja su kemijski modificirana sintetičkim poliol esterima. Kao i biljna ulja, uglavnom se koriste u MQL obradi gdje pokazuju bolje rezultate u odnosu na ulja biljnog podrijetla (bolji rezultati kod kombiniranih metoda kao npr. MQL + nano čestice). Većina esterskih ulja sadržavaju polihidrične alkohole tj. alkohole dobivene iz šećera, dok se u biljnim uglavnom nalazi glicerol. Iako su obje vrste ulja biorazgradive, sintetički esteri pružaju veći raspon razgradivosti zbog mogućnosti manipulacije njihove molekularne strukture kiselina i alkohola [38,39].

4.4. Suha strojna obrada

Razvojem globalne svijesti o štetnosti nusprodukata procesa strojne obrade, sve većim i rigoroznijim kaznama kao i općoj brizi o klimi i okolišu, industrija proizvodnje sve se više okreće suhoj obradi. Pojedine države zato su odlučile dio svojih industrija potpuno preseliti na suhu obradu kako bi potaknule i druge sudionike.

Suha obrada nije u stvari metoda hlađenja nego metoda spriječavanja nastajanja visokih temperatura korištenjem drugačijih alata i sredstava prilikom obrade. Prednosti suhe obrade su: nema zagađenja biosfere što pozitivno utječe na okoliš i čovjeka, nema troškova upotrebe SHIP-a, smanjenje sveukupnih troškova prilikom pripreme, obrade i čišćenja. Nedostaci suhe obrade se također ugledaju u izostanku SHIP-a odnosno pozitivnom učinku istoga, a to je apsorpcija generirane topline, smanjivanje trenja i ispiranje čestica. Nalaženje zamjena za te tri funkcije nije lagano. Kako bi se suha obrada mogla upotrijebiti u proizvodnji tada je potrebno imati prikladne nove rezne alate od drukčijeg materijala, modernijih prevlaka, drukčije rezne geometrije i novi koncept alatnog stroja.

Obrada bez prisutstva SHIP-a je ekološki prihvatljiva te ne šteti čovjeku i okolišu, ali kako bi se ona primjenila potrebno je promijeniti cijeli sustav obrade te same materijale alata i obratka što generira dosta troškova za već automatizirane masivne industrije. Iako se to čini neprihvatljivo ili skupo važno je napomenuti da se uvođenjem suhe obrade umjesto konvencionalne mokre obrade smanjuju ukupni troškovi obrade za 17% što znači da je prelazak na takve postupke proizvodnje veoma isplativ. Zahtjevi za dimenzijskom točnošću još uvijek predstavljaju značajnu restrikciju za uporabu suhe obrade. U slučajevima postojanja jake adhezije alata i obratka, povećanog trošenja alata ili prekomjernog pregrijavanja nužno je hlađenje tijekom procesa. Alati za suhu obradu specijalno su dizajnirani kako bi ostvarili što manje trenje u zoni rezanja. Takav optimalni rezni materijal trebao bi imati visoku tvrdoću i otpornost pri visokim tlakovima i visokoj temperaturi, visoku čvrstoću i faktor intenzivnosti naprezanja, visoku kemijsku otpornost i visoku granicu toplinskog zamora.

Postupak suhe obrade trebao bi biti orijentiran na reduciranje zadržane topline na obratku minimaliziranjem sile rezanja ili korištenjem posebnih prevlaka alata, te na podjelu topline

prilikom obrade velikim brzinama. Još uvijek nisu svi materijali niti sve operacije upotrebljivi u suhoj obradi što je prikazano u tablici 4.1.

Tablica 4.1. Prikaz izvedivosti operacija i materijala suhom obradom [22]

Operacija	Lijevano željezo	Neželjezne slitine	Konstruktivski čelik	Toplinski obrađen čelik	Aluminijske legure
Glodanje	●	●	●	●	●
Tokarenje	●	●	●	●	●
Bušenje	●	●	○	○	○
Narezivanje navoja	●	●	○	○	○
Upuštanje	○	●	○	○	○
Duboko bušenje	○	⊙	○	○	○

● Trenutno izvedivo, ○ Trenutno u razvoju, ⊙ Trenutno neizvedivo

Operacije glodanja i tokarenja su najlakše izvedive kod metode suhe obrade. Razvojem novih zamjenjivih umetaka, materijala alata te prevlaka alata od cementiranih karbida omogućilo se korištenje reznih pločica koje su u stanju podnijeti visoke temperature rezanja zbog svoje povišene otpornosti prema plastičnoj deformaciji i termičkom pucanju. Iz tablice se vidi da je najveći problem prilikom operacije dubokog bušenja. To je zato jer sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje ovdje ima primarnu i najveću ulogu u odvođenju strugotine, a podmazivanje i hlađenje je tek sekundarna zadaća.

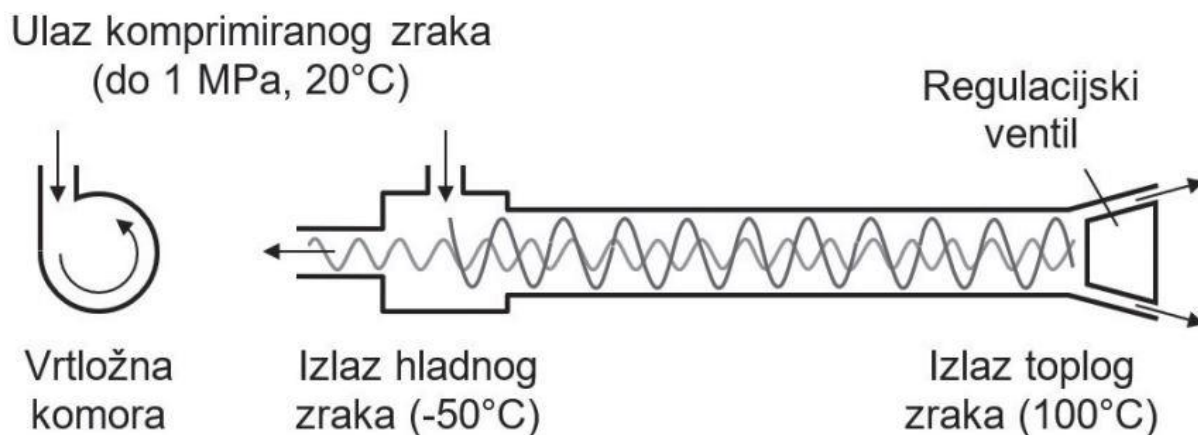
4.4.1. Hlađenje komprimiranim zrakom primjenom vrtložne cijevi

Eksperimentiranjem se pokazalo kako je hlađenje komprimiranim zrakom primjenom vrtložne cijevi, u zamjenu za SHIP prilikom hlađenja obratka i alata te ispiranja odvojene čestice, jedna od najučinkovitijih tehnika hlađenja kod obrade metala odvajanjem čestica. U odnosu na konvencionalnu obradu iziskuje manje investicijske troškove te znatno smanjuje troškove proizvodnje. Korištenjem zraka kao rashladnog medija predstavlja najčišće i ekološki najprihvatljivije rješenje. U početku se koristio samo komprimirani zrak koji je također bio bolji izbor nego voda i ulje, ali se zbog efikasnosti danas koristi hladno komprimirani zrak. Zrak lakše prodire do kontaktnih površina u zoni rezanja za razliku od kapljevina. Nedostatak ovakve metode je izostanak podmazivanja površina, ali danas se to nadomješta korištenjem modernih alata sa samopodmazujućim prevlakama.

Vrtložnu cijev izumio je francuski fizičar i metalurg Georges Joseph Ranque 1931. godine, ali je postala poznata tek 1946. godine kada ju je usavršio njemački fizičar Rudolf Hilsch. Zbog toga, česta je upotreba naziva Ranque-Hilsch vrtložna cijev [20]. Vrtložna cijev je naprava bez pokretnih dijelova koja omogućuje podjelu komprimiranog zraka na hladni i vrući, koji imaju nižu ili višu temperaturu od ulazne. Zrak se dovodi tangencijalno u odnosu na vrtložnu komoru kroz više mlaznica gdje ubrzava do visokih frekvencijskih vrtnji te se usmjerava dalje niz cijev. Kako se struje zraka nalaze u vrtlogu na njih će djelovati centrifugalna sila koja će usmjeriti topli zrak (što je zrak topliji lakše se širi, struji, odnosno ima veću brzinu strujanja) prema obodu cijevi gdje će se na kraju ispustiti putem regulacijskog ventila. Regulacijski ventil dozvoljava samo prolaz po obodu, pa se hladniji zrak (struji bliže unutarnjem dijelu cijevi) odbija od njega u suprotnom smjeru. Tokom svoga strujanja, unutarnji vrtlog zraka predaje svoju toplinu vanjskom vrtložnom strujanju što rezultira hlađenjem zraka koji izlazi na hladnom kraju cijevi [20]. Princip rada vrtložne cijevi protusmjernog protoka dan je na slici 4.8., a primjer primjene u industriji na slici 4.9.

Metoda hlađenja vrtložnom cijevi primjenjiva je kod raznih industrija kako na CNC alatnim strojevima (hlađenje motorvretena) tako i u hladnjacima, postupcima grijanja i slično. Široka mogućnost primjene rezultat je malih investicijskih troškova, male mase, kompaktnosti cijevi, jednostavnosti upotrebe, dobave i skladištenja te tihom načinu rada. Za obavljanje rada treba

imati samo komprimirani zrak odnosno kompresor kojim će se vršiti kompresija zraka, što uglavnom svaki proizvodni pogon ima.



Slika 4.8. Princip rada vrtložne cijevi protusmjernog protoka [20]

Na slici 4.8. lijevo je prikazan ulazak zraka u cijev te stvaranje vrtloga dok je desno prikazano strujanje i odvajanje hladnog i vrućeg vrtloga. Ovakav postupak se temelji na protusmjernom strujanju. Postoje vrtložne cijevi koje rade na istosmjernom ili paralelnom strujanju, ali imaju manju učinkovitost hlađenja. Za ovakvu pojavu odvajanja vrtložnih struja zraka u cijevi još uvijek nije dano fizičko objašnjenje koje bi potpuno bilo razumljivo. Zato se i fenomen koji se događa unutar vrtložne cijevi naziva Ranque-Hilsch efekt.



Slika 4.9. Primjena vrtložne cijevi u industriji [40]

5. USPOREDBA KONVENCIONALNIH I ALTERNATIVNIH METODA HLAĐENJA

5.1. Troškovna analiza primjenom emulzije i hlađenja vrtložnom cijevi

U prethodnom poglavlju spomenuto je kako u odnosu na konvencionalnu obradu primjena hlađenja vrtložnom cijevi iziskuje manje investicijske troškove te znatno smanjuje troškove proizvodnje što su dokazali znanstvenim radom Kostadin i sur. [20].

Provedeno je usporedno istraživanje o primjeni emulzije kao konvencionalnog sredstva hlađenja i primjeni alternativne metode hlađenja vrtložnom cijevi martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13. Eksperiment se provodio operacijom tokarenja šipki promjera 80 mm i dužinom prolaza 463 mm. Stroj na kojem je vršena obrada je CNC tokarilica TU 360 Prvomajska koja se nalazi u prostorijama Tehničkog fakulteta u Rijeci. Rezne pločice su od tvrdog metala SECO TP 2501 (ISO: DNMG 150608-MF-4), a držač pločica SECO PDN JL 2525M15. Procjena postojanosti alata izvršena je prema normi ISO 3685 i kriteriju istrošenosti stražnje površine alata 0,5 mm. Digitalnim mikroskopom Dino Lite Pro mjereno je trošenje alata. Za konvencionalnu mokru obradu korištena je 5%-tna emulzija (INA BU 7) s volumnim protokom od 4,8 l/min. Vrtložna cijev korištena u experimentu je Nex Flow™ Frigid-X Cooler System c/w 57025AD s protokom zraka od 708 l/min i tlakom 0,69 MPa.

Šipke su tokarene brzinom rezanja 220 m/minuti, posmakom 0,2 mm i dubinom rezanja 0,4 mm. U primjeru je stavljena upotreba alata u trajanju od 1968 sati rada godišnje. U tablici 5.1. je prikazana usporedba primjene emulzije i vrtložne cijevi. Manja vrijednost jediničnog proizvodnog troška od 7,57 kuna je postignuta primjenom hlađenja vrtložnom cijevi.

Prva kategorija je postojanost alata mjerena u min/oštrici odnosno koliko će biti vrijeme rezanja s oštricom alata do postizanja kriterija istrošenosti izraženo u minutama. Ovdje vidimo prednost korištenja alternativne metode pomoću vrtložne cijevi zbog koje se alat manje troši tokom obrade što ima pozitivan prijelaz na održivu obradu metala. Slijedi pomoćno vrijeme obrade koje je jednako za oba slučaja obrade jer se odnosi na uzimanje, stezanje, otpuštanje i otpremanje radnog komada.

Tablica 5.1. Usporedba jediničnog proizvodnog troška primjenom emulzije i vrtložne cijevi [20]

Kategorija	Emulzija	Vrtložna cijev
Postojanost alata, minuta/oštrica	1,64	2,00
Pomoćno vrijeme obrade, minuta/komad	4,60	4,60
Glavno vrijeme obrade, minuta/komad	2,67	2,67
Komadno alatno vrijeme, minuta/komad	0,81	0,67
Broj obrađenih komada po reznjoj oštrici, komad/oštrica	0,61	0,75
Trošak materijala, kuna/komad	487,78	487,78
Trošak pomoćnih poslova, kuna/komad	22,28	22,28
Trošak obrade, kuna/komad	12,94	12,94
Trošak alata, kuna/komad	38,83	31,83
Trošak rashladnog medija, kuna/komad	0,71	0,14
Trošak energije alatnog stroja, kuna/komad	0,053	0,052
Jedinični proizvodni trošak, kuna/komad	562,59	555,02

Glavno vrijeme obrade je također jednako jer su i prvom i drugom metodom korištene iste brzine rezanja. Komadno alatno vrijeme je ustvari vrijeme zamjene istrošene oštrice alata svedeno na jedan obradak. Konvencionalnom metodom se alat brže troši, tj. potrebno je češće mijenjati alat. Time je potrebno više vremena za zamjenu što znači i veći trošak u odnosu na alternativnu metodu. Broj obrađenih komada po reznjoj pločici dan je u broju komada koje oštrica reznog alata može obraditi i tu prednost imat vrtložna metoda tj. obrađeno je više komada hlađenjem sa

vtložom cijevi nego sa emulzijom dok je u oba slučaja korišten jednak materijal pa su i troškovi materijala jednaki.

Slijedi trošak pomoćnih poslova pod kojim podrazumijevamo trošak nastao uslijed vremena stezanja alata, njegovog otpuštanja i vremena utrošenog na uzimanje i pospremanje alata. Kako ova vrsta troška ne ovisi o metodi kojom će se hladiti i podmazivati zona rezanja, nego isključivo o ljudima ili stroju (za slučaj da je postupak izmjene alata automatiziran uz korištenje transfer linija) znači da će biti jednaka kod obje metode. Trošak obrade je proporcionalan glavnom vremenu obrade te je u oba slučaja jednak. Razlog tome je prethodno objašnjen kod drugih jednakosti.

Kod troška alata izraženog u kunama po komadu vidimo značajni benefit korištenja metode hlađenja vrtložnom cijevi. Takva vrsta troška je direktno ovisna o postojanosti alata, a kako će primjenom mokre obrade emulzijom alat imati manju postojanost tj. brže će se trošiti to znači češću zamjenu novim alatom što predstavlja dodatne troškove.

Trošak energije izračunat je kao zbroj troškova energije utrošene na zamjenu alata i energije potrebne za obradu. Kao što se vidi u tablici 5.1., postoji zanemarivo mala razlika pa možemo reći da su troškovi jednaki za obje metode.

Cilj održive obrade metala je postići zaštitu okoliša, zdravlje radnika i manje troškove uz potpuno napuštanje primjene rashladnog medija na osnovi ulja. Upravo je navedeno postignuto ovim istraživanjem. Troškovi koji čine trošak rashladnog medija primjenom emulzije i vrtložne cijevi detaljnije su prikazani u tablici 5.2.

Tablica 5.2. Trošak rashladnog medija [20]

Kategorija	Emulzija	Vrtložna cijev
Trošak nabave, kuna/komad	0,05	0,025
Trošak distribucije, kuna/komad	0,02 (pumpa)	0,115 (kompresor)
Trošak zbrinjavanja, kuna/komad	0,05	0,00
Trošak čišćenja radnog mjesta, kuna/komad	0,48	0,00
Trošak čišćenja strugotine, kuna/komad	0,11	0,00
Trošak rashladnog medija, kuna/komad	0,71	0,14

Prvi je trošak nabave koji je veći pri korištenju emulzije (skuplja u odnosu na vrtložnu cijev). Druga kategorija je trošak distribucije gdje je korištenje emulzije puno jeftinije prikazano po jediničnom trošku. Kako bi osigurali hlađenje hladnim komprimiranim zrakom moramo nabaviti adekvatnu opremu kako za sami proces hlađenja (vrtložna cijev) tako i za distribuciju (što uključuje kompresor, spremnik zraka, razne regulatore tlaka i ventile itd.). U početku će primjena emulzije biti jeftinija čiji troškovi nabave i zbrinjavanja iznose 4.019,26 kuna na godišnjoj razini (za promatrani alatni stroj godišnja potrošnja emulzije iznosi 800 litara) jer jednokratna investicija u hlađenje vrtložnom cijevi iznosi 4.767,31 kuna (vrtložna cijev 3.648,41 kuna; regulator tlaka, filter, manometar i crijevo 1.118,90 kuna; pogon već posjeduje kompresor za zrak). Nakon godine dana alternativno hlađenje vrtložnom cijevi postaje jeftinije jer se u postupku hlađenja koristi samo zrak.

Trošak zbrinjavanja, trošak čišćenja radnog komada i trošak čišćenja strugotine je glavni nedostatak u korištenju mokre obrade emulzijom. Nakon obrade uvijek treba slijediti odgovorno zbrinjavanje otpadne tekućine ili plinova kako na radnom komadu i strugotini tako i u prostoru gdje se obrada odvija zato što mogu biti veoma štetni za čovjeka i okoliš. Postoje strogi zakoni i procedure koje reguliraju zbrinjavanje otpada te ih se treba držati. Kod obrade pomoću hlađenja

vtložnom cijevi svi ti troškovi svedeni su na nulu. To je zato što se za hlađenje koristi komprimirani zrak koji nije štetan u doticaju sa okolinom.

Jedinični trošak ovisi i o brzini rezanja. Optimalna brzina rezanja prilikom korištenja emulzije je 270 m/min, dok je korištenjem vrtložne cijevi 248 m/min. Detaljnijom analizom dolazimo do zaključka da se pri većim brzinama rezanja isplati koristiti emulziju jer povećanjem brzine rezanja iznad 250 m/min, kod hlađenja komprimiranim zrakom postojanost alata opada, te postaje sve više neučinkovitija u odnosu na mokru obradu.

Zbrojem svih troškova vidimo da je korištenje emulzije skuplje za otprilike 7,5 kuna po komadu. Kod proizvodnje u serijama to predstavlja veliki ekonomski problem jer npr. ako se proizvodi 100 proizvoda dnevno, na godišnjoj razini to je 36 500 komada. Tada će razlika na godišnjoj razini između korištenja konvencionalne metode hlađenja emulzijom i alternativne metode hlađenja komprimiranim zrakom biti oko 250 000 kuna što je zapanjujući podatak. Korištenjem vrtložne cijevi se također postiže bolja kvaliteta površine proizvoda što svakako podiže cijenu istog pa govorimo o dodatnoj prednosti takve vrste hlađenja.

Uz veća početna ulaganja vidimo da prelazak na alternativnu metodu hlađenja ima i svakako veliku ekonomsku korist u proizvodnji koja će se naposljetku sve više i više isplaćivati u odnosu na korištenje emulzije (iznimka je kod velikih brzina vrtnje). Najvažnije je da ćemo tako zaštititi okoliš i zdravlje ljudi koji sudjeluju u obradi te na isto poticati i druge industrije.

5.2. Energetska usporedba različitih metoda hlađenja i njihov utjecaj na okoliš

Ginting Y.R. i sur. [41] su prilikom tokarenja čelika na Geoturning 250 MA CNC alatnom stroju uspoređivali metode konvencionalnog hlađenja, MQL-a i hlađenja komprimiranim zrakom putem vrtložne cijevi te kako one utječu na okolinu. Vrtložna cijev koja se koristila je Airtx Model 20008 s ulaznim tlakom od 586 kPa koja isporučuje ohlađeni zrak pri temperaturi od -15 °C. Za MQL se koristio Uni-max sustav kojim se raspršuje ulje Coolube 2210 u prostor rezanja. Ovakav sustav podmazivanja radi na principu raspršivanja ulja iz jednog izvora zraka što omogućava kontrolu i podešavanje količine isporučenog sredstva. Za

konvencionalni način podmazivanja se koristila Rocol ultra cut tekućina koja je prikladna za čelične materijale. Korišten je Sandvik alat na bazi volframovog karbida (WMNG 080408-TF IC8150 5507835). Prilikom ispitivanja sve korištene mlaznice držane su na 25 mm od obratka. Dubina rezanja iznosi 1 mm, brzina rezanja je 170 m/min i vrijeme trajanja rezanja je 4 minute. Za vrijeme konvencionalne obrade potrošnja sredstva je iznosila 12 l/min, a za vrijeme obrade MQL-om 20 ml/8 sati [41].

Za svaki postupak je mjerena utrošena snaga rezanja. Svi ulazni i izlazni podaci prilikom strojne obrade dodani su u Simapro 7.3.3 softver za određivanje stakleničkih i drugih emisija koje imaju utjecaj na okoliš prilikom procesa obrade. Snimljene ulazne i izlazne jedinice ovisile su o propisanim jedinicama relevantnih materijala u softveru ili o njegovoj emisijskoj bazi podataka. Ovdje se nije računao trošak prelaska na alternativne metode hlađenja jer postrojenja uglavnom već sadrže kompresor za komprimiranje zraka. Troškovi prilikom obrade jednog obratka dani su u tablici 5.3. [41].

Iz tablice 5.3. se vidi da će najviše energije za rezanje biti potrebno kod konvencionalne mokre obrade dok će najmanje biti potrebno primjenom metode hlađenja vrtložnom cijevi. Utrošak energije na dobavu rashladnog sredstva jedino će se javiti kod konvencionalne obrade zbog toga što se kod MQL-a i hlađenja vrtložnom cijevi, rashladna sredstva dobavljaju tlačnim djelovanjem zraka, stoga pumpe za dobavljanje nisu potrebne. Kod zadnje dvije navedene metode potreban je kompresor. Kako je prethodno navedeno, trošak nabave kompresora ovdje nije uključen, nego je u tablici prikazan utrošak energije prilikom rada kompresora. Trošak rashladnog sredstva (ovdje su se i kod konvencionalne obrade i kod MQL-a koristila ista rashladna sredstva, iste cijene) najveći je kod konvencionalne obrade jer u drugoj metodi, kako joj je i naziv, primjenjujemo male količine tekućine dok kod vrtložne cijevi koristimo samo zrak iz okoline, stoga nema troška. Trošenje alata je u ovom slučaju približno jednako u sve tri metode premda bi za ovaj kriterij najpogodnija obrada bila uz MQL. Kako se najviše količine sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje koristi kod konvencionalne obrade tako je ovdje i najveća količina sredstva koja se treba odgovorno odložiti ili ako je moguće reciklirati. Kod vrtložne cijevi, zrak se jednostavno vraća natrag u okolinu bez ikakvih štetnih utjecaja. S obzirom na navedene parametre možemo zaključiti da će troškovi biti najveći prilikom korištenja konvencionalne metode i to ponajviše zbog same količine rashladnog sredstva i odlaganja istog.

No uz količinski i energetska utrošak, u tablici 5.4. prikazana je i emisija stakleničkih plinova prilikom različitih vrsta obrade kao i cijenovni trošak.

Tablica 5.3. Energetski i količinski utrošak prilikom različitih metoda hlađenja obrade jednog obratka [41]

		KM	MQL	VC
Energija potrebna za rezanje	kWh	0,323	0,295	0,223
Energija potrebna za dobavu rashladnog sredstva	kWh	5,12E-05	0	0
Energija potrebna za komprimiranje zraka (kompresor)	kWh	0	0,051	0,072
Trošak rashladnog sredstva	gm	1,97	0,15	0
Trošak alata	gm	0,15	0,14	0,15
Trošak odlaganja rashladnog sredstva	gm	1,97	0,15	0

KM – konvencionalna metoda, VC – vrtložna cijev

Tablica 5.4. Količina emisije stakleničkih plinova i cijenovni trošak prilikom korištenja različitih metoda hlađenja [41]

	Staklenički plinovi (kg CO ₂ -ekv.)			Cijena (američki dolar)		
	KM	MQL	VC	KM	MQL	VC
Proizvodnja reznog alata	1,24E-04	1,84E-04	2,07E-04	1,84	1,6478	1,84
Proizvodnja rashladnog sredstva	8,14E-02	1,36E-04	0	4,20E-02	3,50E-03	0
Energija potrebna za dobavu rashladnog sredstva	4,53E-05	0	0	6,19E-06	0	0
Energija potrebna za komprimiranje zraka (kompresor)	0	4,35E-02	1,57E-02	0	6,08E-03	8,60E-03
Energija potrebna za rezanje	0,28	0,26	0,194	0,039	0,035	0,027
Odlaganje rashladnog sredstva	0,018	2,96E-05	0	3,03E-04	2,28E-05	0
Ukupno	0,36	0,30	0,21	1,92	1,69	1,88

kg CO₂ - ekvivalentno - emisija stakleničkih plinova mjerena po kilogramu otpuštenog ugljikovog dioksida CO₂

Vidimo da se i u ekološkom i u ekonomskom smislu isplati prebaciti na alternativne tehnike hlađenja. MQL metoda predstavlja najjeftiniji način obrade, ali poželjno bi bilo kad bi glavna stavka proizvodnje bila zdravlje čovjeka i planete, a ne dodatni profit. Koliki utjecaj odabira rashladnog sredstva ima na okolinu i koliko bi se zamjenom metoda smanjile štetne posljedice po prirodu prikazano je u tablici 5.5. Kod zamjene konvencionalne metode s MQL-om ili hlađenjem vrtložnom cijevi vidljivo je najveće očuvanje ljudskog zdravlja i iznosi gotovo 90%.

Slijedi, smanjenje eutrofikacije za 81% i 84%, smanjenje energetske zahtjeva za 32% i 45% i smanjenje globalnog zatopljenja za 21% i 45% zamjenom navedenih metoda.

Tablica 5.5. Utjecaji različitih metoda hlađenja na globalne probleme i postotak poboljšanja prelaskom na alternativne metode [41]

Utjecaj	Jedinica	KM	MQL	VC	Zamjena KM sa MQL		Zamjena KM sa VC	
					Ušteda	%	Ušteda	%
Globalno zatopljenje	kg CO ₂ -ekv.	0,38	0,30	0,21	0,08	21	0,17	45
Ukupni zahtjevi energije	MJ LHV	4,93	3,35	2,73	1,58	32	2,19	45
Eutrofikacija	kg PO ₄ -ekv.	5,26E-04	1,01E-04	8,23E-05	4,25E-04	81	4,44E-04	84
Toksični utjecaj na čovjeka	DALY	3,11E-08	4,06E-09	3,28E-09	2,70E-08	87	2,78E-08	89

MJ LHV (engl. *MegaJules Low Heat Value*) - megadžul donje ogrjevne moći, kg PO₄ – ekvivalentno - količina otpuštenog fosfata PO₄ po kilogramu u okoliš, DALY (engl. *Disability-Adjusted Life Years*) - toksični utjecaj na čovjeka mjereno u dalima (jedinica kojom se procjenjuje koliko godina će čovjek manje živjeti ako je bio izložen toksičnim tvarima)

6. ZAKLJUČAK

Kod strojne obrade odvajanjem čestica postoji puno parametara koji određuju da li će proizvodnja biti kvalitetna, ekonomski prihvatljiva, što kraćeg vremena te što jednostavnija. Jedan od bitnijih parametara je i izbor tekućine odnosno SHIP-a koji izravno utječe na troškove u proizvodnji, hrapavost površine, ali i na postojanost reznih alata. Iako su glavne prednosti rashladnih tekućina to što odvede toplinu iz zone rezanja, daju bolju kvalitetu površine obratka te produljuju vijek trajanja alata, također prouzrokuju i opasne otpadne tvari štetne za čovjeka i okolinu.

Od prve uporabe tekućina te kroz povijest, gdje je tehnologija bila dodatno potaknuta novim valom industrijske revolucije, uglavnom se gledalo na profit koji će pridonijeti strojna obrada uz upotrebu rashladnih sredstava, sve dok nisu provedena istraživanja kako ta obrada utječe na okoliš. Stoga su se razvile nove metode koje tada novčano i nisu bile prihvatljivije iako su bile "prirodnije".

Razvijanjem alata, upotrebom novih materijala, primjenjivanjem novih znanja i patenata iz područja fizike i kemije te uspostavljanjem novih smjernica za očuvanje okoliša, održiva strojna obrada metala, s kojom povezujemo alternativne metode hlađenja, dobila je zamah u razvoju i upotrebi.

U ovom radu pokazalo se na primjeru troškovne analize kod pojedinačne obrade koliku razliku u cijeni predstavlja SHIP s obzirom na različiti izbor tekućine (emulzija 0,71 kuna/komad i vrtložna cijev 0,14 kuna/komad). Kod zamjene konvencionalne metode (emulzija) s alternativnom metodom MQL i hlađenjem komprimiranim zrakom prikazana je velika zaštita ljudskog zdravlja (90%) i smanjenje globalnog zatopljenja (21% i 45%).

Zato u današnje vrijeme polako vidimo sve češće preusmjeravanje na održivu strojnu obradu koja je ne samo profitabilnija nego je i ekološki prihvatljivija. Održivi razvoj trebao bi biti implementiran u svakom procesu proizvodnje pa makar se i sveukupni profit malo smanjio jer su za razliku od proizvoda, čovjek i priroda neprocjenjivi.

7. LITERATURA

- [1] Cukor, G.: "Postupci obrade odvajanjem čestica", Proizvodne tehnologije – predavanja, Rijeka, 2019.
- [2] Udiljak, T.: "Oblikovanje deformiranjem i obrada odvajanjem čestica", Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [3] Jurković, Z.: Proizvodni strojevi, alati i naprave – predavanja , Rijeka, 2019.
- [4] Bušenje, s Interneta: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Bu%C5%A1enje>, 15. lipnja 2022.
- [5] Nedić, B.; Lazić, M.: Proizvodne tehnologije – "Obrada metala rezanjem" - predavanja, Mašinski fakultet, Kragujevac, 2007.
- [6] Škorić, S.: "Uvod u obradu odvajanjem čestica", Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2008.
- [7] Udiljak, T.: "Visokobrzinske obrade", Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [8] Šavar, Š.: "Obrada odvajanjem čestica I dio", Zagreb, 1977.
- [9] "Fundamentals of Cutting Cutting-Tool Materials and Cutting Fluids", s Interneta : <https://slideplayer.com/slide/6420351/>, 22. lipnja 2022.
- [10] Pavić, A.: "Tehnologija obrade odvajanjem čestica", Karlovac, 2013.
- [11] "Coolant control in CNC machining", s Interneta: <http://mini-cnc.blogspot.com/2010/10/coolant-control-in-cnc-machining.html>, 20. lipnja 2022.
- [12] "A seminar report on Study of cutting fluid", s Interneta: <https://pdfcoffee.com/report-on-cutting-fluids-pdf-free.html>, 25. svibnja 2022.
- [13] Wisley, F.S.; Anselmo E.D.; Alisson R.M.: "Application of cutting fluids in machining processes", Brazil, Pontifical Catholic University of Minas Gerais PUC Minas, 2001.
- [14] Šterpin Valić, G.: "Hlađenje vrtložnom cijevi u kombinaciji s MQL tehnikom podmazivanja pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika", Rijeka: Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, 2020.
- [15] Glenn, T.; Van Antwerpen, F.: "Opportunities and Market Trend in Metalworking Fluids", 2014.
- [16] s Interneta: <https://dip-slides.com/kits/88-premium-metal-cutting-fluid-bacteria-ph-tester-kit.html>, 20. lipnja 2022.

- [17] Wright, D.: "Good Practice Guide for Safe Handling and Disposal of Metalworking Fluids", 2018.
- [18] Celent. L.: "Održivost strojne obrade uz korištenje alternativnih vrsta hlađenja", Split, 2012.
- [19] Klarin, T.: "The Concept of Sustainable Development: From its Beginning to the Contemporary Issues", Zagreb International Review of Economics & Business, Vol. 21, No. 1, pp. 67-94, 2018.
- [20] Kostadin, T.; Cukor, G.; Mihalić, T.: "Primjena ekoloških načela u obradi odvajanjem čestica", UDK 621 .9:504.06, 2019.
- [21] Verme, J.K.: "Effect of Minimum Quantity Lubrication on Tool Wear and Surface Integrity During Hard Turning of EN21 Steel", 2019.
- [22] Skerlos, S.J.: "Prevention of metalworking pollution: Environmentally concious manufacturing at the machine tool", Chapter 5 , The University of Michigan at Ann Arbor, 2006.
- [23] Duc, T.M.; Long, T.T.; Tuan, N.M.: "Performance Investigation of MQL Parameters Using Nano Cutting Fluids in Hard Milling Fluids", Department of Manufacturing Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Thai Nguyen University of Technology, Thai Nguyen 250000, Vietnam, 2021.
- [24] Dragičević, M.: "The Application of Alternative Techniques for Cooling, Flushing and Lubrication to Improve Efficiency of Machining Processes", Faculty of Mechanical Engineering, University of Mostar, Bosnia and Herzegovina, 2018.
- [25] Liu, N.; Zou, X.; Yuan, J.; Wu, S.; Chen, Y.: "Performance evaluation of castor oil-ethanol blended coolant under minimum quantity lubrication turning of difficult-to-machine materials", Journal of Manufacturing Processes, Volume 58, October 2020.
- [26] Korn, D.: "Alcohol-Based Coolant Offers Environmentally Friendly Machining", s Interneta: <https://www.mmsonline.com/articles/alcohol-based-coolant-offers-environmentally-friendly-machining>, 30. lipnja 2022.
- [27] Maruda, R. i drugi: "The Effect of EP/AW Additives in Emulsion Mist on the Geometric Structure of the Machined Surface during Carbon Steel C45 Turning", Applied Mechanics and Materials Vols. 809-810 (2015.) pp 15-20, Faculty of Mechanical Engineering, University of Zielona Gora, Poland
- [28] Xu, X.; Huang, S.; Wang, M.: "A study on process parameters in end milling of AISI-304 stainless steel under electrostatic minimum quantity lubrication conditions", 2016.

- [29] Shokrani, A.; Al-Samarrai, I.; Newman, S.T.: "Hybrid cryogenic MQL for improving tool life in machining of Ti-6Al-4V titanium alloy", Journal of Manufacturing Processes, Volume 43, Part A, July 2019.
- [30] Krajnik, P.: "Transitioning to a waste-free production – international cryogenic+MQL machining activity", 2021.
- [31] Edare, Cryogenic machining, s Interneta : <https://www.edareinc.com/edare/cryogenic-machining/>, 15. lipnja 2022.
- [32] Uemoto, Y. i drugi: "Ultra Cryo-Milling with Liquid Nitrogen and Dry Ice Beads: characterization of Dry Ice as Milling Beads for Application to Various Drug Compounds", Tokyo, 2018.
- [33] s Interneta : <https://www.youtube.com/watch?v=BgELIQ8O-wk>, 25. veljače 2022.
- [34] Pušavec, F.; Stoi, A.; Kopač, J.: "The Role Of Cryogenics In Machining Processes", University of Ljubljana, 2009.
- [35] Gajrani, K.K.; Ram, D.; Sankar, M.R.: "Biodegradation and hard machining performance comparison of eco-friendly cutting fluid and mineral oil using flood cooling and minimum quantity cutting fluid techniques", Journal of Cleaner Production, Volume 165, November 2017.
- [36] Debnath, S.; Reddy, M.M.; Yi, Q.S: "Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: A Review", Journal of Cleaner Production, 2014.
- [37] Xavier M.A.; Adithan, M.: "Determining the Influence of Cutting Fluids on Tool Wear and Surface Roughness during Turning of AISI 304 Austenitic Stainless Steel", Journal of Materials Processing Technology, Volume 209, 2009.
- [38] Boubekri, N.; Shaikh, V.: "Minimum Quantity Lubrication (MQL) in Machining: Benefits and Drawbacks", Department of Engineering Technology, University of North Texas, Denton, Texas, USA, 2018.
- [39] Sen, B. i drugi: "Eco-Friendly Cutting Fluids in Minimum Quantity Lubrication Assisted Machining: A Review on the Perception of Sustainable Manufacturing", International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2019.
- [40] s Interneta: <https://www.directindustry.com/prod/itw-air-management/product-14741-2411344.html>, 14. rujna 2022.

[41] Ginting, Y.R. i drugi: "Investigation into alternative cooling methods for achieving environmentally friendly machining process", Curtin University, Perth, Western Australia 6845, 2015.

8. POPIS SLIKA

<i>Slika 2.1. Podjela postupaka strojne obrade odvajanjem čestica [2]</i>	3
<i>Slika 2.2. Uzdužno tokarenje [3]</i>	4
<i>Slika 2.3. Tri osnovna tipa obrade glodanjem [3]</i>	5
<i>Slika 2.4. Bušenje svrdlom [4]</i>	6
<i>Slika 2.5. Proces rezanja [1]</i>	8
<i>Slika 2.6. Alati za obradu odvajanjem čestica [5]</i>	8
<i>Slika 2.7. Usporedba materijala reznih alata ovisno o svojstvima [6]</i>	11
<i>Slika 2.8. Izvori topline prilikom rezanja [8]</i>	12
<i>Slika 2.9. Prikaz temperaturnih vrijednosti u zoni rezanja [9]</i>	13
<i>Slika 3.1. Vanjsko dovođenje SHIP-a prilikom glodanja na CNC alatnom stroju [11]</i>	15
<i>Slika 3.2. Uređaj za ispitivanje razine kontaminacije i pH vrijednosti SHIP-a [16]</i>	19
<i>Slika 3.3. Dermatitis uzrokovan kontaktom čovjeka sa SHIP-om [17]</i>	20
<i>Slika 3.4. Troškovi strojne obrade i SHIP-a [18]</i>	21
<i>Slika 4.1. Grafikon ravnoteže parametara održivog razvoja [19]</i>	24
<i>Slika 4.2. Razlozi i profiti prelaska na alternativne vrste hlađenja [2]</i>	25
<i>Slika 4.3. MQL princip ejektora [21]</i>	27
<i>Slika 4.4. Prikaz različite površinske hrapavosti u odnosu na udio MoS₂ aditiva u mazivu [24]</i>	28
<i>Slika 4.5. Kriogena obrada glodanjem [31]</i>	30
<i>Slika 4.6. Primjena suhog leda (dry ice) prilikom obrade (sačmarenje) [33]</i>	31
<i>Slika 4.7. Usporedba parametara obrade u ovisnosti o vrsti ulja [37]</i>	33
<i>Slika 4.8. Princip rada vrtložne cijevi protusmjernog protoka [20]</i>	37
<i>Slika 4.9. Primjena vrtložne cijevi u industriji [40]</i>	37

9. POPIS TABLICA

<i>Tablica 3.1. Zadaci, zahtjevi i rezultati primjene SHIP-a [10]</i>	15
<i>Tablica 4.1. Prikaz izvedivosti operacija i materijala suhom obradom [22]</i>	35
<i>Tablica 5.1. Usporedba jediničnog proizvodnog troška primjenom emulzije i vrtložne cijevi [20]</i>	39
<i>Tablica 5.2. Trošak rashladnog medija [20]</i>	41
<i>Tablica 5.3. Energetski i količinski utrošak prilikom različitih metoda hlađenja obrade jednog obratka [41]</i>	44
<i>Tablica 5.4. Količina emisije stakleničkih plinova i cijenovni trošak prilikom korištenja različitih metoda hlađenja [41]</i>	45
<i>Tablica 5.5. Utjecaji različitih metoda hlađenja na globalne probleme i postotak poboljšanja prelaskom na alternativne metode [41]</i>	46

10. POPIS OZNAKA I KRATICA

OZNAKA	MJERNA JEDINICA	ZNAČENJE
v_c	m/min	brzina rezanja
a_p	Mm	dubina rezanja
f	Mm	Posmak
f_n	mm/okr.	posmak po okretaju obratka
L	Mm	dubina otvora
$Q_{def.}$	J	toplina generirana uslijed plastičnih deformacija obratka
$Q_{tr.str.}$	J	toplina koja se generira uslijed djelovanja trenja radi dodira stražnje strane alata sa obratkom
$Q_{tr.pred.}$	J	toplina koja se generira uslijed djelovanja trenja u točki dodira prednje strane alata i strugotine
h	Mm	debljina neodrezane strugotine
h_1	Mm	debljina skinute strugotine
α	°	kut stražnje površine alata
γ	°	kut prednje površine alata
β	°	kut klina
ϕ	°	kut ravnine smicanja

Kratice

OOČ – obrada odvajanjem čestica

CNC (engl. *Computer Numerical Control*) – računalno numeričko upravljanje

SHIP – sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje

TFC (engl. *Traditional Flood Cooling*) – tradicionalna mokra obrada

CA (engl. *Compressed Air*) – komprimirani zrak

CBN - kubični borov nitrid

PCD - polikristalni dijamant

WC - volframov karbid

MCD - monokristalni dijamant

TiC – titanijev karbid

TiN – titanijev nitrid

TiCN – titanij-karbid-nitrid

CrN – krom nitrid

Al₂O₃ – aluminijev (III) oksid

SiO₂ – silicijev dioksid

MoS₂ – molibden disulfid

TiO₂ – titanijev dioksid

CO₂ – ugljikov dioksid

O₂ – kisik

LN₂ – tekući dušik

MLQ (engl. *Minimum Quantity Lubrication*) – minimalna količina tekućine za podmazivanje

MQCL (engl. *Minimum Quantity Cooling Lubrication*) – minimalna količina tekućine za hlađenje i podmazivanje

MQCL+EP/AW (engl. *Minimum Quantity Cooling Lubrication + Extreme Pressure/Anti-Wear additives*) - upotreba minimalnih količina emulzije koje su poboljšane određenim aditivima

EMQL (engl. *Electrostatic Minimum Quantity Lubrication*) - metoda podmazivanja pri čemu se male količine maziva negativno nabijaju metodom elektrostatičkog kontakta te se usmjeruju u područje obrade u obliku ravnomjerne, vrlo propusne i vlažne uljne magle

EHVSL (engl. *Electrostatic High Velocity Solid Lubricant*) - metoda gdje se za podmazivanje koristi kruto mazivo koje se negativno nabija metodom elektrostatičkog kontakta te se usmjeruje u područje obrade u obliku magle

CRYO-MQL - hibridna metoda kriogenog hlađenja sa minimalnom količinom podmazivanja

CAMQL (engl. *Cool Air Minimum Quantity Lubrication*) - metoda minimalnog podmazivanja pod utjecajem ohlađenog komprimiranog zraka

kg CO₂ - ekvivalentno - emisija stakleničkih plinova mjerena po kilogramu otpuštenog ugljikovog dioksida CO₂

kg PO₄ - ekvivalentno - količina otpuštenog fosfata PO₄ po kilogramu u okoliš

MJ LHV (engl. *MegaJules Low Heat Value*) - megadžul donje ogrjevne moći

DALY (engl. *Disability-Adjusted Life Years*) - toksični utjecaj na čovjeka mjereno u dalima (jedinica kojom se procijenjuje koliko godina će čovjek manje živjeti ako je bio izložen toksičnim tvarima)

11. SAŽETAK

Strojna obrada odvajanjem čestica jedan je od najraširenijih postupaka u proizvodnji radi svoje isplativosti i učinkovitosti. Zbog konstantnog pritiska tržišta za što boljom kvalitetom i što većom količinom proizvoda bitan je i kontinuirani razvoj obradne industrije i njezinih cijelina. Jednako tako, važno je i smanjiti troškove proizvodnje. Značajnu ulogu u financijskom smislu ima odabir sredstava za hlađenje, ispiranje i podmazivanje koji nam služi za postizanje bolje kvalitete obratka, osiguranje duljeg vremena trajanja alata, omogućavanje većih brzina rezanja i dr. Konvencionalne metode hlađenja i podmazivanja su veoma efikasne, ali se postavlja pitanje lošeg utjecaja koji imaju na okoliš i zdravlje čovjeka. Iz tog razloga, postupci strojne obrade se usmjeravaju prema korištenju alternativnih metoda hlađenja i podmazivanja koje će biti manje štetne za okoliš i zdravlje čovjeka, ali uz jednaku produktivnost i kvalitetu obrade. Cilj je postići maksimalno moguću održivost strojne obrade koja je u skladu sa propisanim ekološkim i financijskim kriterijima.

Ključne riječi: SHIP, konvencionalne metode hlađenja, održiva obrada odvajanjem čestica, alternativne metode hlađenja

12. SUMMARY

Machining is one of the most widespread production processes due to its cost-effectiveness and efficiency. Due to the constant pressure of the market for the best possible quality and the largest possible quantity of products, the continuous development of the manufacturing industry and its units is also important. Equally, it is important to reduce production costs. The choice of coolant (cutting fluid) plays an important role in financial terms. Their main purpose is to achieve better workpiece quality, ensure longer tool life, enable higher cutting speeds, etc. Conventional cooling and lubrication methods are very efficient, but the question arises of the bad impact they have on the environment and human health. For this reason, machining processes are directed towards the use of some other alternative methods of cooling and lubrication that will be less harmful to the environment and human health, but with equal productivity and quality of processing. The goal is to achieve the maximum possible sustainability of machining that is in accordance with the prescribed environmental and financial criteria.

Keywords: cutting fluids, conventional cooling methods, sustainable machining, alternative cooling methods