

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Лазар Д. Ракић

**Савремени системи за хлађење и подмазивање код
обrade метала резањем**

Завршни рад

Крагујевац, 2019.

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Индустијско инжењерство

Предмет: Производне технологије

Број индекса: 144/2012

Лазар Д. Ракић

Савремени системи за хлађење и подмазивање код обраде метала резањем

Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. др Богдан Недић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____



Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука



Основне студије: **Машинско инжењерство**

Студијско подручје (усмерење): **Индустријско инжењерство**

Име и презиме: **Лазар Ракић**

Број индекса: **144/2012**

ПРИЈАВА ЗАВРШНОГ РАДА

Тема рада: **Савремени системи за хлађење и подмазивање код обраде метала
резањем**

Задатак: У оквиру завршног рада кандидат треба да изврши прикупљање и систематизацију података везаних за савремене системе пословања са средствима за хлађење и подмазивање - СХП. Потребно је описати карактеристике и примену СХП, еколошки аспект примене СХП, утицај на човека и трошкове пословања са СХП. У посебним поглављима приказати информације о обради резањем без СХП и алтернативне - савремене поступке хлађења и подмазивања.

Завршни рад треба да садржи следеће целине:

1. Уводна разматрања,
2. Средства за хлађење и подмазивање,
3. Обрада резањем без СХП,
4. Савремени системи примене СХП,
5. Систематизација и анализа савремених система примене СХП,
6. Закључци,
7. Литература.

Ментор:

Др Богдан Недић, редовни професор

Крагујевац, 3.10.2019.

Резиме

Обрада резањем је једна од најзаступљенијих метода обраде метала у савременој индустрији. Велики број металних елемената добијају свој коначни облик обрадом резањем. Због тога је врло битно да се њом постигне задовољавајућа прецизност и квалитет обраде. Услед сувог резања, трење које настаје генерише топлоту која временом утиче на својства како предмета обраде тако и алата. Такође, услед високог коефицијента трења, алат се временом хаба и тиме даље узрокује губитак квалитета резаног дела. Због наведеног, код обраде резањем користе се средства за хлађење и подмазивање (СПХ). Поред те две основне функције, СПХ штити делове од корозије, врши испирање суготине и др. Међутим, поред позитивних СПХ има и негативне карактеристике. Пуно коштају, загађују околину и штете људском здрављу. Због тога, циљ је вратити се на суву обраду или евентуално прећи на алтернативне врсте хлађења и подмазивања. У овом раду је извршена синтеза свих основних информација везаних за наведену проблематику. На почетку су дефинисана средства за хлађење и подмазивање и приказани су основни утицаји на трошкове, околину и човека. Након тога, приказане су основе обраде без средства за хлађење као нечега ка чему друштво стреми и алтернативне врсте хлађења као тренутно решење. На крају рада извршена је анализа свремених (алтернативних) средстава за хлађење и изнети су закључци.

Кључне речи: обрада резањем, СХП, криогена обрада, минимална количина СХП, вртложна цев...

Abstract

Cutting is one of the most common metalworking methods in the modern industry. A large number of metal elements get their final shape by cutting. Therefore, it is very important to make it satisfactory precision and quality of machining. Due to dry cutting, the resulting friction generates heat which over time affects the properties of both the workpiece and the tool. Also, due to the high coefficient of friction, the tool is time consuming and thus causes a loss of quality of the cut part. Due to the above, coolant and lubricants (Metalworking fluids – MWF) are used in the cutting process. In addition to these two basic functions, MWF protects the parts from corrosion, flushes the chips, etc. However, as MWF has positive, it also has negative characteristics. Everyday usage of MWF cost a lot, pollute the environment and damage human health. Therefore, the goal is to return to dry processing or eventually switch to alternative types of cooling and lubrication. In this paper, a synthesis of all basic information related to these issues is made. Initially, MWF were defined and the main impacts on costs, environment and man were outlined. Afterwards, the basics of dry cutting are presented as something that society is aiming for in future and alternative types of MWF as the current solution. At the end of the paper, an analysis of alternative MWF was carried out together with conclusions.

Keywords: cutting, MWF, cryogenic cooling, Minimum Quantity Lubrication, vortex tube ...

САДРЖАЈ

1. УВОД.....	6
2. СРЕДСТВА ЗА ХЛАЂЕЊЕ И ПОДМАЗИВАЊЕ	8
2.1. КАРАКТЕРИСТИКЕ И ПРИМЕНА СХП-А	9
2.2. ЕКОЛОШКИ АСПЕКТИ ПРИМЕНЕ СХП-А.....	15
2.3. УТИЦАЈ СХП-А НА ЧОВЕКА.....	17
2.4. ТРОШКОВИ ВЕЗАНИ ЗА УПОТРЕБУ СХП-А	21
3. ОБРАДА РЕЗАЊЕМ БЕЗ СРЕДСТАВА ЗА ХЛАЂЕЊЕ И ПОДМАЗИВАЊЕ.....	23
4. САВРЕМЕНЕ ВРСТЕ ХЛАЂЕЊА ПРИЛИКОМ ОБРАДЕ РЕЗАЊЕМ.....	28
4.1 ХЛАЂЕЊЕ УПОТРЕБОМ МИНИМАЛНЕ КОЛИЧИНЕ СХП (ХЛАЂЕЊЕ МАГЛОМ).....	30
4.2 ХЛАЂЕЊЕ ХЛАДНИМ ГАСОМ ПОД ПРИТИСКОМ.....	34
4.3 КРИОГЕНО ХЛАЂЕЊЕ.....	37
5. СИСТЕМАТИЗАЦИЈА И АНАЛИЗА СРЕДСТАВА ЗА ХЛАЂЕЊЕ И ПОДМАЗИВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ПРОИЗВОЂАЧА.....	41
5.1 СИСТЕМАТИЗАЦИЈА И АНАЛИЗА СРЕДСТАВА ЗА ХЛАЂЕЊЕ И ПОДМАЗИВАЊЕ ПРИ МИНИМАЛНОЈ КОЛИЧИНИ	41
5.2 СИСТЕМАТИЗАЦИЈА И АНАЛИЗА СРЕДСТАВА ЗА ХЛАЂЕЊЕ ПРИ ХЛАЂЕЊУ ХЛАДНИМ ГАСОМ ПОД ПРИТИСКОМ	44
5.3 СИСТЕМАТИЗАЦИЈА И АНАЛИЗА СРЕДСТАВА ЗА ХЛАЂЕЊЕ КОД КРИОГЕНОГ ХЛАЂЕЊА	46
6. ЗАКЉУЧАК.....	48
ЛИТЕРАТУРА.....	49

1. УВОД

Обрада метала резањем (стругање, бушење, глодање...) је поступак обликовања уклањања вишка материјала механичким путем алатима најчешће знатно веће тврдоће од тврдоће материјала предмета обраде. То је технологија која се састоји од низа различитих поступака.

Сами поступци обраде метала резањем су поступци обликовања (примена облика, димензија, храпавости обрађене површине и карактеристика површинског слоја) уклањањем вишка материјала механичким дејством резног алата на предмет обраде.

Израда неког предмета обраде састоји се од више операција обраде, а ту спадају поступци као што су тестерисање, глодање, стругање, бушење, брушење итд. Услед било ког од поступака долази до механичког дејства, појављује се контакт, а услед контакта сила трења. Услед учесталог контакта при резању, тј. услед учесталог трења, ослобађа се топлота која даље утиче на физичке, хемијске, механичке и остале карактеристике алата и предмета обраде.

Самим тим, средства за хлађење и подмазивање су уведена у производну индустрију да побољшају карактеристике триболошких процеса који су увек присутни на контактним површинама алата и обратка приликом обраде резањем. Коришћењем ових средстава повећава се продуктивност, побољшава површински квалитет, смањују се трошкови и последично се укупно повећава профит. Висока продуктивност и економичност уз остваривање задатог квалитета су основе тржишне конкуритивности производне индустрије. Ови захтеви, иако растући испуњени су коришћењем великих брзина резања и посмичних брзина. Температуре у зони резања које се постижу у овим условима скраћују век трајања алата те утичу на димензијску тачност и интегритет површине обрађеног комада. Коришћењем СХП-а се настоји смањити негативни утицај топлоте која се генерише у зони резања и спречити постизање критичне температуре након које алат улази у фазу убрзаног трошења. Мало смањење температуре у зони резања увелико повећава век трајања алата и побољшава карактеристике финалног производа.

Познато је да се у циљу заштите на раду и очувања животне средине из дана у дан усавршавају правила у погледу заштите исте. Једним делом тих правила, обухваћени су негативни ефекти средстава за хлађење и подмазивање. Тржишни захтеви за све већим количинама ових средстава, као и донедавно њихово некритично коришћење довели су до забрињавајућег или сада већ застрашујућег утицаја на човека и околину. Услед хиперпродукције мултиплицирање тих ефеката у новије време, довело је до нужности проналаска нових решења.

Растуће потребе тржишта као и нови за обраду захтевни материјали, смањују профитабилност конвенционалне „мокре“ обраде захваљујући свим трошковима везаним уз средства за хлађење и подмазивање од набаве, преко коришћења до њиховог одлагања. Ипак напуштање обраде коришћењем СХП-а, која је до сада давала задовољавајуће резултате у смислу техничког решења и профита, неће бити могуће без понуде достојне замене. Такође имплементација нових начина обраде није могућа једноставним искључивањем коришћења свих врста средстава за хлађење и подмазивање јер њихову функцију би у случају одређених начина обраде и одређених материјала у том случају морала заменити нека друга технолошка решења.

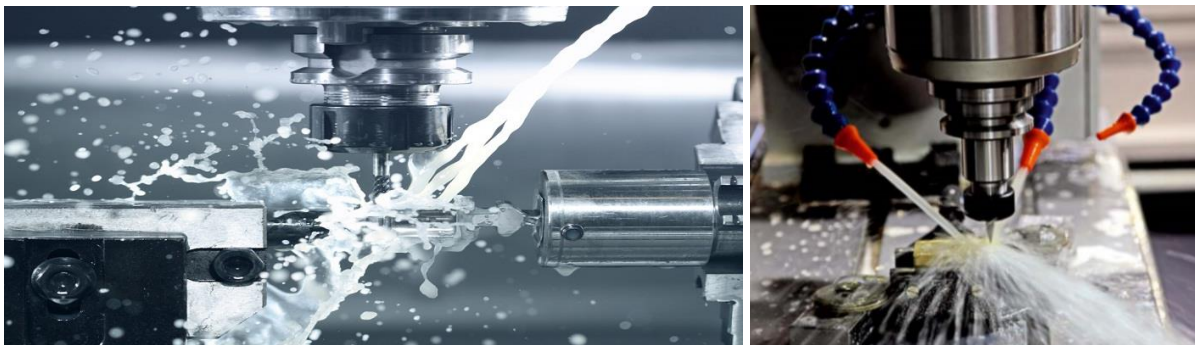
Алтернативне врсте хлађења у комбинацији с новим материјалима за израду алата и специјалним превлакама представљају подручје за проналажење адекватне замене средстава за хлађење и подмазивање што представља одређени технолошки напредак.

Алтернативне врсте попут криогеног хлађења, хлађења гасом под притиском као и употребом минималне количине СХП-а, омогућавају редукацију топлоте у зони резања допуштајући оператерима да оптимизују процес обраде с већим брзинама резања и посмацама. На овај начин је могуће задовољити еколошку страну, задржати високу продуктивност али и осигурати дужи век трајања алата и бољи квалитет површине обратка. Више вредности параметара резања нуде повећање продуктивности, али на штету квалитета површине обратка и значајног смањења века трајања алата. Погоршање површинске храпавости је директно везано уз трошење алата. Век трајања алата односно његово трошење је јако осетљиво на промене услова резања те га је тешко избећи, међутим различитим начинима хлађења зоне резања може се минимизовати. Управо је постизање једнаког века трајања алата односно једнаког времена обраде основни предуслов за пребацивање на суву или полусуву машинску обраду, пре свега материјала који су за то прикладни. Постоје материјали и поступци обраде код којих сува обрада није могућа и нужно захтевају хлађење. На пример, то вреди за обраду алуминијума због његове високе топлотне осетљивости и адхезије на алат, такође и обрада најтврђих челика представља јако захтеван процес. Обрада напредних материјала, због њиховог својстава ниске топлотне проводљивости и генерисања топлоте у зони резања, захтева ефикасно хлађење. На избор начина обраде, односно начина хлађења утичу осим материјала и сами индустријски процеси. Различити процеси обраде постављају различите захтеве за количином и избором СХП-а потребних за сигуран и задовољавајући рад за постизање успешних резултата.

У оквиру овог рада извршена је синтеза свих основних информација везаних за тему савремених - алтернативних начина хлађења металних предмета обраде и алата при обради резањем.

2. СРЕДСТВА ЗА ХЛАЂЕЊЕ И ПОДМАЗИВАЊЕ

Приликом бројних операција обраде метала резањем, као што су: стругање, бушење, брушење, глодање итд. долази до загревања и трошења површина на месту контакта алата и предмета који се обрађује. Детаљније, услед фрикције (трења) између алата и предмета обраде, долази до загревања које вишеструко може утицати на скраћење века трајања алата, смањење продуктивности машине алатке на којој се врши обрада, добијање незадовољавајућих облика и квалитета површине као и повећање потрошње енергије. Да би се смањили ови негативни ефекти код већине процеса обраде метала користе се средства за хлађење и подмазивање (слика 2.1) [1-5].



Сл. 2.1 Примена СХП средстава

Самим тим, средства за хлађење и подмазивање су уведена у производну индустрију да побољшају карактеристике триболошких процеса који су увек присутни на контактним површинама алата и обратка приликом обраде резањем. Коришћењем ових средстава повећава се продуктивност, побољшава површински квалитет, смањују се трошкови и последично се укупно повећава профит. Висока продуктивност и економичност уз остваривање задатог квалитета су основе тржишне конкурентности производне индустрије. Ови захтеви, иако растући испуњени су коришћењем великих брзина резања и посмичних брзина. Температуре у зони резања које се постижу у овим условима скраћују век трајања алата те утичу на димензијску тачност и интегритет површине обрађеног комада. Коришћењем СХП-а се настоји смањити негативни утицај топлоте која се генерише у зони резања и спречити постизање критичне температуре након које алат улази у фазу убрзаног трошења. Мало смањење температуре у зони резања увелико повећава век трајања алата и побољшава карактеристике финалног производа.

Развој и напредак обраде одређених метала је омогућен управо коришћењем СХП-а, те је њихова примена нужна за обраду материјала као што су алуминијумске легуре које имају тенденцију „лепљења“ на алат итд. Дакле коришћење СХП-а је од пресудне важности кад постоји јака адхезија између алата и струготине, код прекомерног трошења алата под условима суве обраде и када није могуће контролисати топлотну деформацију обрадка. Његова примена у производњи омогућава оптимално испуњавање захтева тржишта, али због низа негативних ефеката које ове течности имају на човека и околину, модерна производна индустрија посвећује све већу пажњу на одабир друштвено и еколошко прихватљивих средстава (енг. *Enviroment friendly*), односно оптимално напуштање њихова коришћења и преласка на суви начин обраде или коришћења неке алтернативне врсте хлађења.

2.1. КАРАКТЕРИСТИКЕ И ПРИМЕНА СХП-А

Како однос развијене топлоте и интензитета трошења код различитих обрада површина није једнак, развијено је више типова СПХ средстава са различитим степеном утицаја на процес одвођења ослобођене топлоте (хлађење) и смањење трења као главног узрока настанка топлоте (подмазивање). Дакле, СПХ има две основне функције: **хлађење** (редуковање генерисање топлоте у зони резања) и **подмазивање** (смањење трења као извора топлоте) [6,7].

Постоји и низ секундарних али не мање важних функција СХП-а као што су одвођење струготине (одсеченог дела метала, шпона), чишћење алата и обратка, продужење века трајања алата, повећање продуктивности, заштита алата од корозије, квалитетнија завршна обрада, одржавање уједначених температура унутар обратка и алата као и целокупно стварање услова за сигурно (енг. *Failure Free*) извршавање аутоматизованих операција приликом обраде метала.

Развој и историјат СХП-а пропраћен паралелно са развојем самих машина алатки (обрадних центара) приказано је у [8]. Овај кратак историјат развојаа СХП-а показује да динамика њихове технологије зависи од динамике процеса за обраду метала пројектованог са обзиром на конструкционе параметре обрадног центра. Током двадесетог века, течности за обраду метала су се развиле од једноставних уља до софистицираних технологија СХП-а на бази воде. Приликом хлађења за време машинске обраде најчешће се користе четири врсте СХП-а. Агенција за безбедност и здравље на раду америчког министарства за рад „Occupational Safety and Health Administration – OSHA“ је СХП средства поделила на [9]:

- 1) Чиста уља (енг. *Straight oils*)
- 2) Емулзије (енг. *Soluble oils*)
- 3) Полусинтетичке течности (енг. *Semi-synthetic fluids*)
- 4) Синтетичке течности (енг. *Synthetic fluids*)

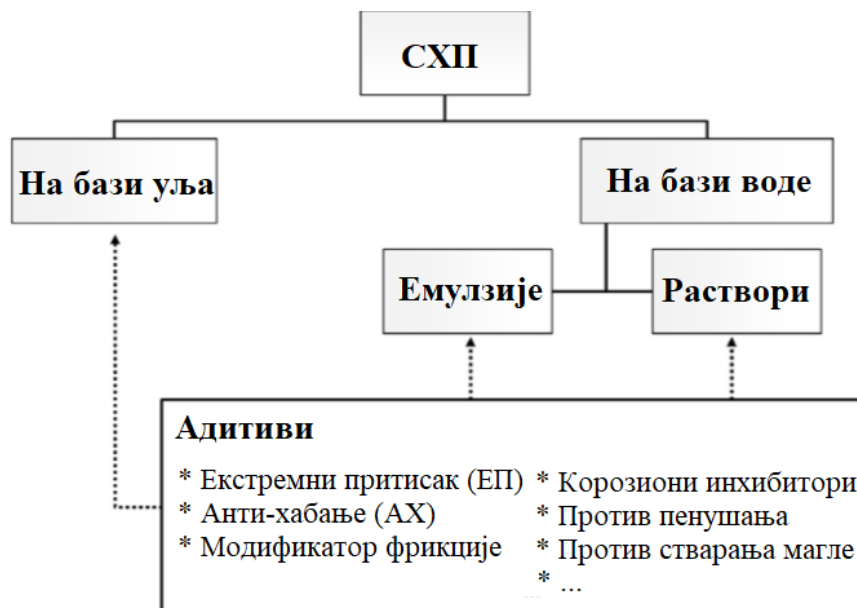
1) **Чиста уља** – укључују минерална, биљна, животињска, мешавине истих и синтетичка уља. Користе се при обради нижим брзинама резања где пораст температуре није значајан, смањујући адхезију и абразију. Чиста уља користе се кад је потребан висок степен подмазивања док се због побољшања одвођења топлоте користе уља мање вискозности (од ISO VG 15 до ISO VG 46).

2) **Емулзије** – се састоје од основног уља које осигурава својства подмазивања, воде, емулгатора који одржава уље у финим капљицама у води, те од осталих адитива. Емулзије имају карактеристике одличних топлотних преносника због великог садржаја воде те их се најчешће користи при обради високим брзинама резања где постоји значајан пораст температуре.

3) **Полусинтетици** – су хемијске емулзије које садрже малу количину минералних уља разређену у води заједно са одређеним адитивима.

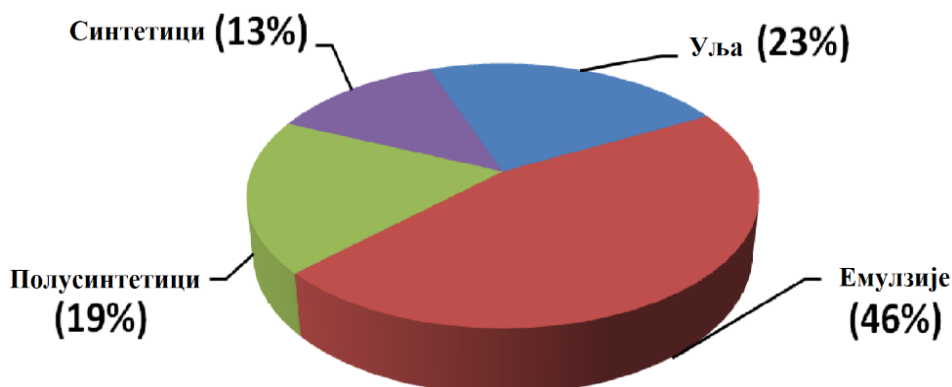
4) **Синтетици** – хемикалије са адитивима, помешане у води без присуства било које врсте уља.

Поред поменуте поделе, постоје и друге [10]. На пример, поједностављена подела СХП-а према DIN стандарду је приказана на **слици 2.2** [11,12].



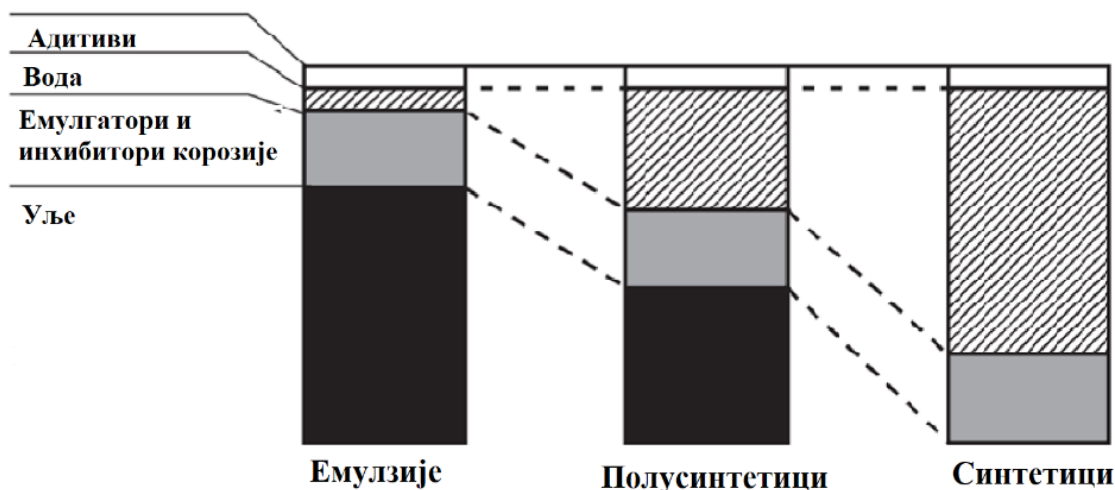
Сл. 2.2 Поједностављена подела СХП према стандарду DIN 51385

На **слици 2.3** приказана је процентуална потрошња СХП-а у САД [13,14]. У односу на горе наведене врсте, емулзије су најчешће коришћено средство за хлађење и подмазивање што се може и видети на слици. Расподела је слична и у другим водећим земљама [15] и свету [16].



Сл. 2.3 Процентуална употреба СХП у САД

Средства за хлађење и подмазивање се најчешће производе у концентрисаном облику, те се према различитим потребама разређују (**слика 2.4**). Зависно од машинске обраде и специфичних захтева исте постоје различити састави СХП-а. Тако се разликују горе наведене четири основне супстанце односно: чиста уља, емулзије, синтетичке и полусинтетичке течности.



Сл. 2.4 Релативни удео адитива, воде, емулгатора и уља у појединим врстама СХП-а

Растворна уља, полусинтетичка и синтетичка СХП средства мешају се са водом. Растворна уља и полусинтетичка средства граде са водом емулзије, док синтетичка средства граде растворе. Ове три групе се најчешће користе приликом обраде метала различитим поступцима скидања струготине. Развој и широко подручје њихове примене проистекао је из потребе за контролом висине температуре алата и радног комада у зонама контакта. Користе се у свим процесима обраде у којима су високе брзине резања и релативно ниски притисци на контактним површинама [17].

Растворна, емулзиона, уља произведена су на бази минералних уља, са уделом већим од 60% запремине. Полусинтетичке течности су такође на бази минералних уља, али је њихов удео мањи од 60% запремине, док су остале компоненте синтетичке природе. То су СХП средства широког спектра примене, јер осим изванредних карактеристика хлађења и одвођења струготине, имају и добру карактеристику подмазивања. Њихов недостатак је што због високог садржаја емулгатора имају својство делимичног емулговања лутајућих уља која су истекла из хидрауличног система за подмазивање.

Синтетичке течности не садрже минерална уља, већ су то производи на бази растворних органских и неорганских соли [17], а користе се углавном у процесима бушења када својство подмазивања није од посебног значаја

Као што је већ поменуто, поред свог основног задатка да обезбеде добро хлађење и подмазивање у зони контакта алата и металне површине која се обрађује, СХП средства имају и антикорозивну улогу као и улогу у испирању струготине. Зато, ови флуиди поред свог комплексног хемијског састава садрже емулгаторе и адитиве различите природе, као што су површински активне материје (ПАМ), антикорозивна средства, стабилизатори, биоциди, антипенушавци и друго. Адитиви који се користе за побољшавање функционалних својстава основне супстанце су: емулгатори, стабилизирајући агенси (алкохоли), адитиви за екстремне притиске, агенси против пенушања (силоксани, цинк...), инхибитори корозије (амини, амиди, нитрити), средства против трошења алата, модификатори фрикције итд. (табела 2.1) [18].

Табела 2.1 Додаци у СХП средствима

Емулгатори	Ањонски емулгатори: соли сулфонске киселине, карбонске киселине, етри фосфорне киселине, саркозин Катјонски емулгатори: соли амида масних киселина, кватернарне амонијачне соли Нејонски емулгатори: полигликол етри, алкохоли, феноли, масне киселине, масни амини
Антикорозивни адитиви	Нитри, борати, амиди и естри борне киселине, бутил бензолова киселина, карбонске и дикарбонске киселине, сулфонамидо карбонске киселине
Биоциди	Феноли, хлорфеноли, формалдехид, тиразини и деривати кватернарних амонијачних соли
ЕР Адитиви (ЕР – Extra pressure)	Полиалкиленгликоли, естри фосфорне киселине из етоксикованих алкохола, хлоровани парафини, сумпорна једињења

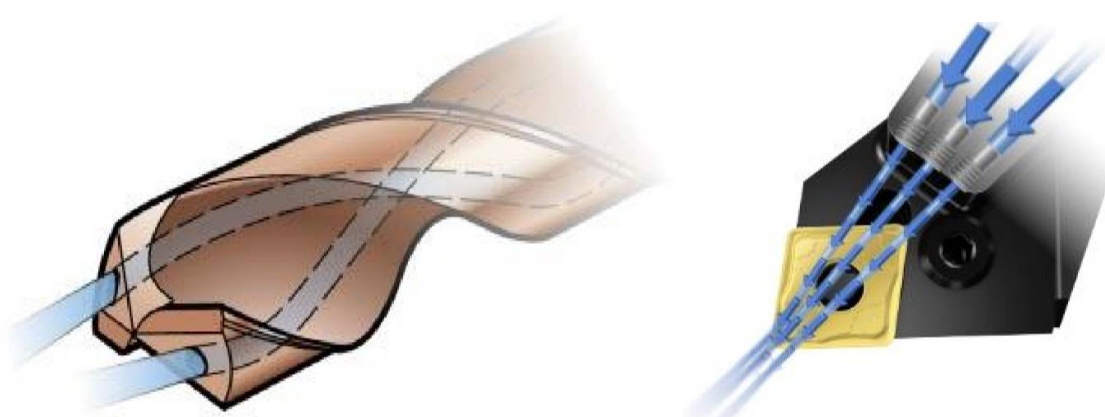
Због комплексности интеракција између СХП-а, материјала обратка, температура, времена обраде, тј. параметара резања, примена одређеног типа течности за обраду метала за поједине операције не може бити генерисане. Приоритет у смислу њихових функција зависи од планиране операције и карактеристика које се траже. Код процеса с недефинисаним резним сечивом, на пример код брушења, генерише се велика количина топлоте што захтева ефикасно хлађење. Код обраде с дефинисаним резним сечивом захтеви су другачији. Примарни задатак је хлађење контактне зоне, али и смањење адхезије и абразије при малим брзинама резања омогућавајући адекватно подмазивање. У пракси у зависности од захтева и жељеној машинској обради најчешће се користе чиста уље или емулзије. Препоруке које врсте СХП-а користити при одређеним условима и врстама обраде најчешће се односе на оне од стране многобројних произвођача СХП-а. Осим доброг избора одређене врсте СХП-а за поједину обраду, од велике важности је и адекватно наношење истог на место контакта алата и обратка, односно зону резања. Постоје четири основне методе приношења СХП-а у машинској обради и то:

1) **Прскање** – представља најчешће коришћену методу апликације СХП-а. Типични проток за ову методу јест између 10 *l/min* за алате са једном резном оштрицом (стругање) па до 225 *l/min* за алате са више резних оштрица (глодање). Код неких поступака обраде резањем као што су бушење и глодање коришћење притиска унутар система СХП-а од 700 до 14 000 кРа, служи за ефикасно одвођење струготине из зоне резања.

2) **Магла** (ваздух под притиском и мања количина течности) – омогућава довођење СХП-а до неприступачних подручја на којима се одвија обрада и бољу видљивост обратка за време резања. Учинковитост методе највећа је при коришћењу СХП-а на бази воде (емулзије, синтетици, полусинтетици) уз притисак ваздуха у размери од 70 до 600 кРа. Као недостатак методе може се издвојити мања ефикасност хлађења у односу на методу прскањем, те потреба за адекватном вентилацијом унутар обрадног центра због превенције претеране изложености оператера при удисању честица СХП-а присутних у ваздуху.

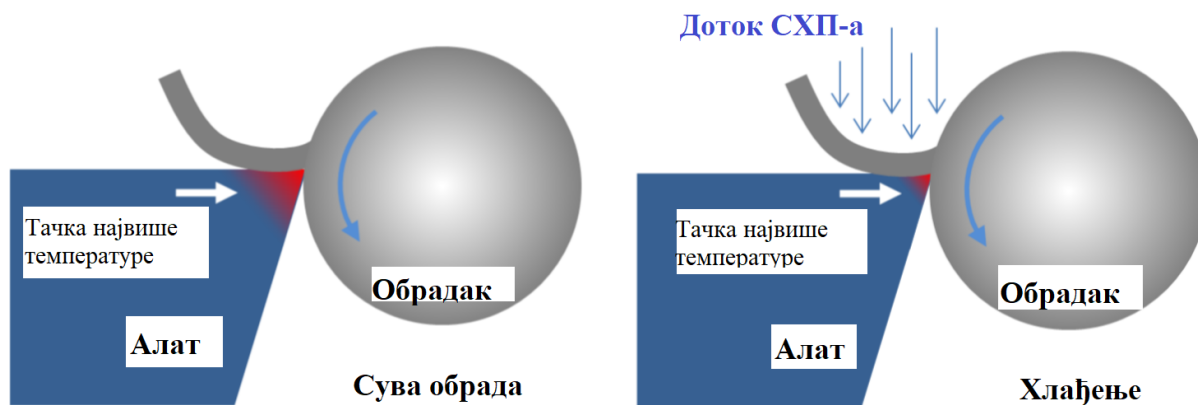
3) **Системи високог притиска** – због високе ефикасности при одвођењу топлоте из зоне резања посебно су коришћени при обради резањем. Довођење СХП-а овом методом често се одвија уз помоћ посебних млазница кроз које струји СХП под притиском од 5.5 до 35 МПа. Овако високи притисци унутар система омогућавају додатно својство СХП-а као „ломитеља“ шпона (спречавање стварања тракастог облика струготине/шпона). Важно је правилно и континуално филтрирање СХП-а како би се спречило присуство ситних честица метала унутар средства (величина честица не сме прећи 20 μm) које би могло при високим притисцима оштетити саму површину обратка.

4) **Спровођење кроз главно вретено/држач/алат** – омогућава довод СХП-а директно у зону резања што повећава ефикасност главних функција СХП-а, поготово при поступцима бушења. Као недостатак методе могу се издвојити велики трошкови улагања при набавци самог система као и високи трошкови набаве посебних алата са могућношћу провођења СХП-а кроз прихватни и резни део истих.



Сл. 2.5 Спровођење СХП кроз алат

Нажалост, у многим се производним погонима употреби СХП-а приступа потпуно некритички у смислу коришћења неодговарајуће врсте СХП-а те претеране количине истог, несразмернима са егзактним захтевима одређеног поступка машинске обраде. Једнако тако често се олако приступа и самој примени СХП-а (слика 2.6), што повлачи за собом многе проблеме као што су смањење ефикасности функција СХП-а, смањење века трајања алата, повећање храпавости обрађене површине, пад целокупне продуктивности [19]. Конкретно, на слици 2.6 је приказано погрешно довођење СХП-а које узрокује помак тачке највише температуре према врху алата што даље резултује превемени отказ алата (у односу на очекивани век трајања алата при сувој обради) [20].



Сл. 2.6 Пример погрешног довођења СХП-а у зону резања

Средства за хлађење и подмазивање уз претходно наведене темељне и секундарне функције морају имати и одређена радна својства као што су, стабилност према различитим тврдоћама воде, отпорност на развој микроорганизама као и регулација пенења и лепљења.

Осигурање ових захтева за квалитетом, произвођач поједине врсте СХП-а постиже пажљивим одабиром сировина за производњу [21]. Међутим, током процеса обраде метала одвајањем честица долази до деградације СХП-а и свако одступање од почетних радних својстава показатељ је трошења истих (табела 2.2).

Табела 2.2 Процес трошења и могуће последице коришћена деградираних емулзија

Узрок (оптерећење)	Реакција (Механизам трошења)	Учинак (Облик појаве)
Хемијска неравнотежа	Корозија	Корозија
Страно уље	Прљање	Адхезија, непрецизна обрада, лепљење, повећање концентрације, привидна привидна концентрација
Вишак Са – јона	Сапонификација	Таложјење, зачепљење
Микроорганизми	Прехрамбени ланац	Раслојавање емулзије, мирис, насlage, зачепљење
Металне честице	Абразија	Лоша обрада, трошење алата и осталих делова
Металне честице	Хемијска реакција	корозија

Осим претходно наведених узрока, на деградацију емулзије утиче и степен индустријске хигијене што обухвата хигијену људи, машина и целог погона. Пример лоше индустријске хигијене.

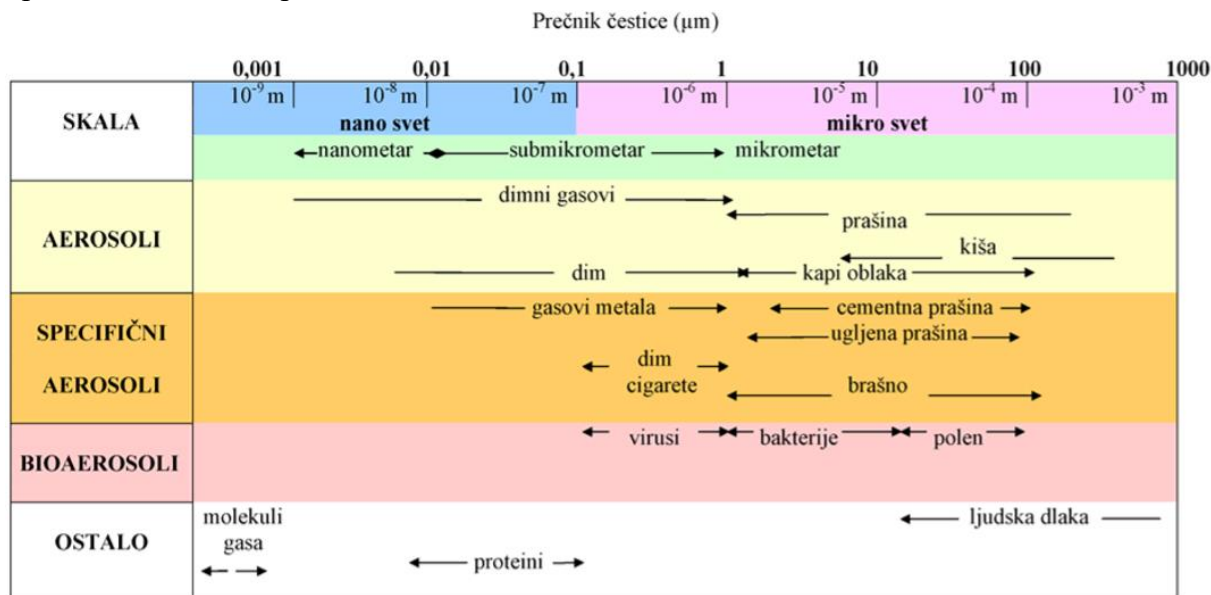


Сл. 2.7 Пример деградираних емулзија

2.2. ЕКОЛОШКИ АСПЕКТИ ПРИМЕНЕ СХП-А

Екологија, ресурси и популација могу се означити као три главна проблема са којима се суочава човечанство. Посебно проблем очувања околине, са порастом степена погоршања, постаје озбиљна претња опстанку и развоју друштва. Након што су објављени стандарди серије ISO 9000 за управљање квалитетом и осигуравање квалитета, ISO 14000 састав управљања околином и OHSAS 18001 систем управљања заштитом на раду и здрављем запослених, применити истовремено сва три стандарда унутар неког подузећа представља један од највећих изазова гледајући из перспективе инжењарства као и самог подузетништва. Производна индустрија један је од највећих извора загађивања животне средине. Према томе, максимално смањење загађивања околине са стране производне индустрије постаје један од важнијих циљева свих произвођача [22].

СПХ средства, иако имају позитивне ефекте на економичност процеса обраде метала, представљају изразито опасне материје и загађиваче како радне тако и животне средине. Зато је неопходно добро управљати СХП средствима како свежим тако и отпадним [23,24]. Један од кључних проблема код њихове употребе је сакупљање и третман отпадних СПХ средстава [25]. Други, не мање битан проблем, је контаминирање ваздуха радне средине као последица генерисања аеросола/магле у готово свим процесима обраде метала [25-29]. Важно је разумети процесе настајања аеросола, раста, стабилност и хемијску природу честица у носећем гасу, нарочито у ваздуху, као и њихов утицај на климу и здравље људи. Особине аеросола зависе од величина диспергованих честица, **слика 2.8**, [27] њихове хемијске природе и концентрације. На **слици 2.8** је приказана подела аеросола по величини.

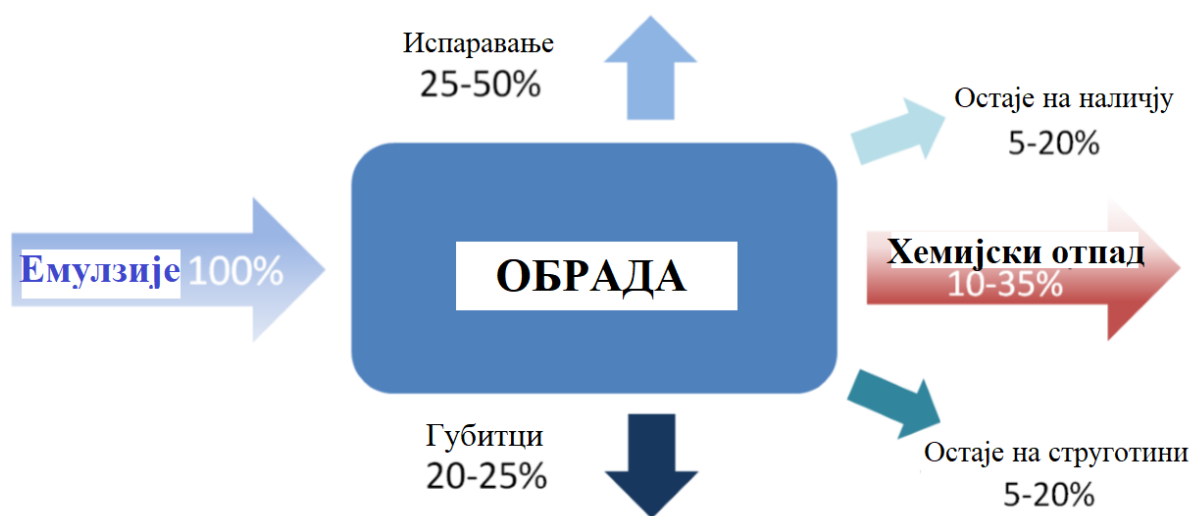


Сл. 2.8 Величине честица аеросола

Што су ситније честице аеросола, оне више угрожавају човека пошто дубље продиру у дисајне путеве где се акумулирају изазивајући алергијске реакције и друге респираторне сметње, па чак и канцер.

Недостатак СХП средстава која се користе са водом, а нарочито оних на бази уља, је ограничен век коришћења због бактериолошке разградње. Емулзије представљају идеалну средину за развој аеробних и анаеробних бактерија. Прве се множе у току рада, а друге за време мировања система за хлађење. Конвенционалан приступ овог проблема коришћењем бактерицида широког спектра показао се као неефикасан, јер бактерије временом постају резистентне. Данас се овај проблем решава производњом биостабилних емулзија, финих дисперзних система са честицама уља величине 0,05 до 1µм. Овај тип микроемулзија садржи биостабилна једињена бора (0,08 %), која имају блага асептична дејства и не уништавају микроорганизме већ успоравају њихову деобу и раст. Тако је механизам размножавања и одумирања бактерија избалансиран са равнотежним садржајем од 10^3 до 10^6 *bakterija/ml* емулзије, што је знатно мање од критичног дозвољеног броја (5×10^7 *bakterija/ml*) [17]. Ове микроемулзије добијају се комбинацијом различитих типова дисперзаната и ањонских емулгатора [1,17]. Микроемулзије са садржајем уља између 5% и 10% показују одличну отпорност на бактерије, али су, нажалост, јако осетљиве на гљиве и плесни. Уколико је садржај уљне компоненте већи од 30 % јавља се њихова бактериолошка нестабилност [1].

Средства за хлађење и подмазивање се из производног система губе на више начина: испаравањем, количинама које остају на обратку, компонентама алата или самој струготини (шпону) кад се износе из система, кроз системе под притиском (**слика 2.9**). Једнако тако постоје губитци узроковани неосигураним истицањем у разним фазама које је уједно и потенцијално опасно за човека и има негативан утицај на хидраулични притисак унутар система. Прорачуном се добија да се предходно наведеним начинима готово 30% годишње коришћених количина СХП-а износи из система [30].



Сл. 2.9 Шема губитака СХП-а у процесу обраде

Само одлагање и третирање коришћене количине СХП-а отвара бројна еколошка питања. Производна индустрија оставља за собом велике количине потенцијално опасног отпада и сусреће се с проблемом адекватног заштитног третирања и одлагања ових течности које представљају један од најкомплекснијих типова отпада [31,32]. Пажљиво пражњење тих течности кроз канализацију или отпадне воде није ни исплативо ни еколошки прихватљиво решење. Обично се емулзија одваја на уљну и водену фазу. Уље се затим спаљује у цементној индустрији или у посебним индустријским постројењима. Водена фаза, која је још увек контаминирана и садржи уље се шаље у постројења за обраду канализацијског отпада [33].

Водене фазе представљају такође потенцијално опасне течности јер након одвајања и третирања улазе у уобичајена постројења за обраду отпадних вода. Због тога је врло важан квалитет обраде односно раздвајања емулзије. Коришћени СХП представља јакو опасан отпад с високим органским садржајем, те могуће прскање, проливање или непрописно одлагање и третирање ових течности у било којој фази може загадити околину, тј. контаминирати језера, реке или подземне воде. Заштитним третирањима ових средстава се смањује негативни учинак на околину али се не може потпуно спречити могућа катастрофа. Технике које се користе за заштитно третирање пре одлагања су ултрафилтрација, флоатација, евапорација, хемијско раздвајање емулзије и преципитација, центрифугално раздвајање и топлотна обрада.

Разликују се три главна аспекта са гледишта заштите околине о којима се мора водити рачуна при коришћењу СХП-а, и то:

- а) **Контрола** (минимизација губитака),
- б) **Минимизација** утицаја изгубљеног СХП-а,
- ц) **Ефикасно прикупљање и третирање** хемијског отпада.

У питањима везаним уз околину, оправдана је забринутост јер СХП имају директан утицај на њу и представљају високу потенцијалну опасност. Статистика и подаци везано за укупне количине свих врста СХП-а од којих се одређена количина ретко или готово уопште не третирају на прописан и прикладан начин, указују на врло забрињавајуће стање. Тако на подручју западне Европе количина нетретираног СХП-а који одлази у околину одговара капацитету 12 танкера, односно једном „Еххон Valdez“ случају месечно [34]. Такви подаци су ипак довели до глобалних промена у размишљањима везаним за могуће последице утицаја СХП-а на околину у будућности.

Нигде тако драстично као у Еуропској унији (ЕУ) која је 2001 г. почела са дискусијама на ту тему да би 2006 г. коначно донела и документ под називом **REACH** (енг. *Registration, Evaluation, Authorisation and restriction of CHemicals*) што представља нови правни оквир ЕУ за хемикалије. Донешени документ тако обухвата све врсте СХП-а као и све фазе од производње, преко примене па до одлагања истог [35]. Укупна количина задовољавајуће збринутог (уклоњеног) СХП-а јест количина рециклираног или СХП-а спаљеног као гориво, и из података на подручју ЕУ она износи свега 32%, што представља забрињавајући податак [34].

2.3. УТИЦАЈ СХП-А НА ЧОВЕКА

Опште је позната чињеница да руковање СХП-ом представља ризик за здравље човека и могућност оболевања од различитих болести. То се првенствено односи на блиски контакт човека са СХП-ом. Побољшаним процесима рафинисања минералних уља и оптимизованим избором адитива, до неке мере је смањен ризик штетности за здравље човека, али ипак није уклоњен до краја. Чак, поједина СХП средства могу имати ефекте врло опасне по здравље човека [36].

Тако се могу издвојити: стварање нитрозамина код средстава за хлађење, ефект уљених пара, болести коже узроковане директним контактом са средствима за хлађење, бактерицидни ефект повезан са средствима за хлађење посредством доданих адитива, генерисање канцерогених супстанци, честице тешких метала присутне у адитивима, токсичност за репродукцију итд. Међу најчешћима се наводе болести коже које настају кад радника у току руковања с овим супстанцама (**слика 2.10**) [37,38].



Сл. 2.10 Опасности за кожу радника при раду са СХП-ом

У опису производа у техничком листу морају бити наведене све опасности и начин руковања овим средствима. У Немачкој је 50% свих оператера обољело од неких врста кожных болести узрокованих коришћењем СХП-а. На **слици 2.11** приказани су примери кожных обољења изазваних СХП-ом.



Сл. 2.11 Примери кожных обољења изазваних СХП-ом

Одређена истраживања су доказала постојање генотоксичног ефекта ових супстанци, а за неке врсте СХП-а коришћене у блиској прошлости и канцерогеног потенцијала. Експериментом на бактерији „салмонела“ доказано је постојање генотоксичног ефекта средстава за хлађење и подмазивање [39].

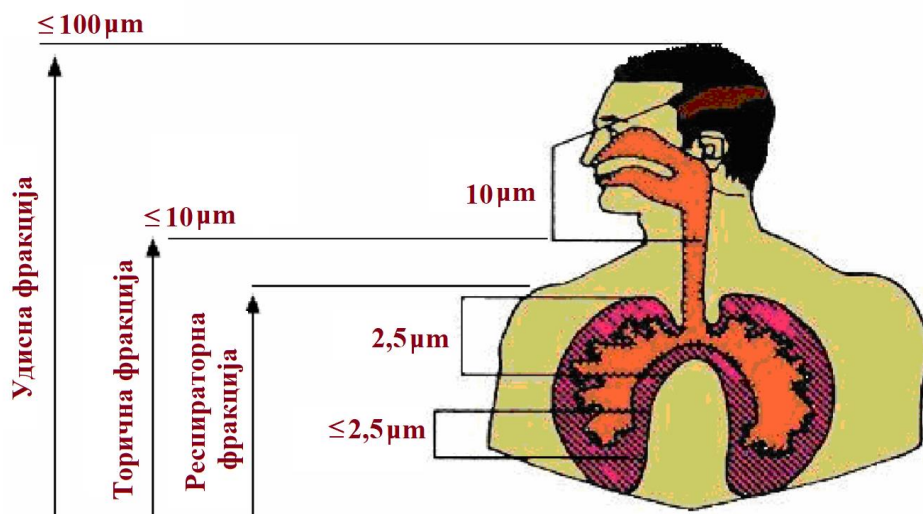
Треба посветити поажњу и формалдехидима који се ослобађају из прекурсорских супстанци, формалдехидних донора, као и оксидацији алкохола у СХП-у која може довести до ослобађања потенцијално опасних материја. Наведене материје доказано могу имати генотоксични ефект [39].

Код одређених адитива коришћених у блиској прошлости доказан је канцерогени ефект. Један од важнијих елемената из скупа адитива „цинк диалкилдитиофосфат“ и неки дуголанчани калцијумови сулфати су према европским прописима класификовани као опасни. Још многе друге супстанце су се у лабораторијским тестовима показале као опасне (иритирајуће). Биоциди као додатак основној супстанци су корисни, али се ипак поставља питање кад је њихово коришћење оправдано и у којој мери. Не постоји никакав концензус око нивоа бактерија или гљива који захтева интервенцију додавањем ових средстава у превентивне сврхе. Одлука је препуштена кориснику на темељу препоруке произвођача и искуства самог корисника. Иако се биоциди додају у малим количинама, неки од њих могу бити високо токсични. Одређени произвођачи СХП-а истичу како њихов производ погодује расту микроорганизама које дефинишу као безопасне за здравље, но без одређених доказа и података објављених у стручној литератури. Средства за хлађење и подмазивање током коришћења мењају своје карактеристике те се тиме аутоматски повећава ризик њихове штетности за околину и здравље човека. Опасност за човека представља и чињеница што су неке од ових течности које садржавају уље у високој концентрацији запаљиве.

Разорни потенцијал се може класификовати кроз неколико различитих термина за карактеризацију физикално-хемијских својстава СХП-а као што су експлозивно, изразито запаљиво, високо запаљиво и запаљиво. За токсичност СХП-а се користе термини: *врло токсично, токсично, опасно, корозивно, иритативно, канцерогено и мутагено*.

Национални институт за здравље и заштиту на раду (енг. *National Institute for Occupational Safety and Health – NIOSH*) процењује да је годишње 1,2 милиона радника укључених у обраду резањем, обраду деформисањем и осталим процесима обраде метала изложено утицају средстава за хлађење и подмазивање [40].

Национални институт за здравље и заштиту на раду представља документ о критеријумима препорученог стандарда за услове рада у индустрији машинске обраде. Исти документ даје преглед информација које се односе на негативан утицај средстава за хлађење и подмазивање и њиховим коришћењем насталог аеросола (магле), на здравље човека. Основане и доказане тврдње су да радници изложени овим средствима имају повећан ризик за развој различитих немалигних болести респираторног система као и различитих кожных обољења.

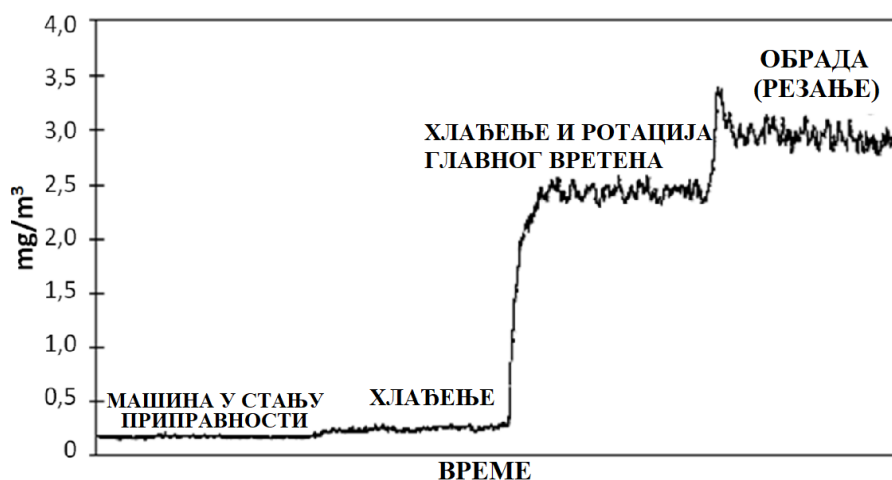


Сл. 2.12 Шематски приказ пенетрације аеросола у респираторне органе човека

Све честице ситније од 100 μm могу бити удахнуте (слика 2.12), и зову се удисна фракција (енг. *inhalable fraction*). Честице до 10 μm се задржавају у горњим дисајним путевима, док честице ситније од 2,5 μm продиру дубоко у плућа и акумулирају се у алвеолама, слика 6. Токсичне материје се често адсорбују на површини честица аеросола и тако доспевају у људски организам.

Национални институт за здравље и заштиту на раду доноси критеријуме за препоручене стандарде који би ефикасно спречили или у већој мери редуковали негативне ефекте изложености овим течностима а посебно њиховом аеросолу. Тако је предложено да изложеност аеросолу насталом применом СХП-а, буде ограничена на 0,4 mg/m^3 ваздуха за плућну масу честица 0,5 mg/m^3 за укупну масу честица, а временско-тежински просек (енг. *time-weight average-TWA*) до 10 сати на дан током дозвољених 40 сати на 7 дана.

Количина генерисане магле за време машинске обраде варира зависно од стања у којем се машина налази (слика 2.13) [20,42]. Пре саме обраде (резања) при самом укључивању хлађења заједно са ротацијом главног вретена (алата), формира се магла са количином (честицама) СХП-а од преко 2,0 mg/m^3 ваздуха што представља по човеково здравље опасну концентрацију. Такво стање захтева адекватну вентилацију унутар самог обрадног центра због превенције претеране изложености оператера при удисању честица СХП-а присутних у ваздуху.



Сл. 2.13 Количина генерисане магле (аеросола) и начини формирања исте за време различитих фаза машинске обраде

Многе раднике брине кожна изложеност овим средствима као и удисање честица њиховог аеросола (магле). Примена СХП-а при машинској обради често производи маглу која је медицински доказано повезана с развојем одређених типова тумора [43]. Ови подаци представљају коришћење средстава за хлађење и подмазивање, горућим предметом расправе с могућим бројним краткорочним и дугорочним последицама.

2.4. ТРОШКОВИ ВЕЗАНИ ЗА УПОТРЕБУ СХП-А

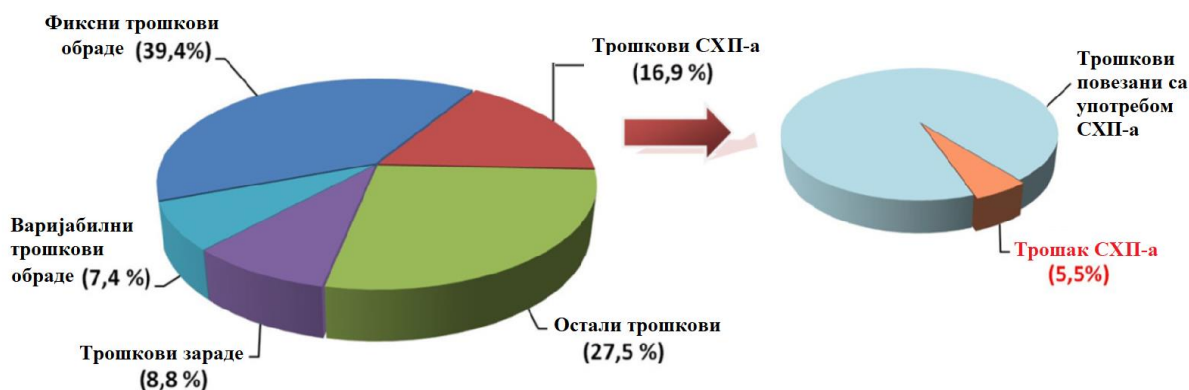
У данашње време многи подаци сведоче о растућим трошковима коришћења СХП-а, почевши од повећања укупних трошкова машинске обраде па до растуће цене третирања и одлагања коришћеног СХП-а. Прегледом количина годишње потрошње ових средстава у неким од водећих држава у погледу машинске обраде и саме цене коришћења и одлагања истих могу се утврдити размере еколошког утицаја СХП-а на околину као и економског утицаја (трошкова) СХП-а на индустрију машинске обраде или неко појединачно постројење (Табела 2.3). [44][45]

Табела 2.3 Преглед тржишта СХП-а са процењеним трошковима коришћења

ЗЕМЉА	КОРИШЋЕНА КОЛИЧИНА СХП-а	ЦЕНА КОРИШЋЕЊА СХП-а
SAD	378 000 t	48 000 000 000 \$
Germany	75 500 t	700 000 000 \$
Japan	160 000 t	900 000 000 \$

Подаци за Немачку говоре о коришћењу око 75000 тона СХП-а од којих око 28000 тона отпада на уљни концентрат који помешан са водом чини од 355000 до 947000 тона емулзија или полусинтетика. Трошкови коришћења и збрињавања СХП-а су значајни и штавише повећају се услед доношења нових закона и регулатива везаних за очување околине и људског здравља.

Међутим, у току последње деценије постало је очигледно како је често одлука о употреби СХП-а у многим постројењима (предузећима) била базирана на индустријском шаблону а не темељена на знању и квантитативним доказима. Ипак је недавно направљен помак у овој ситуацији, у смислу да је кроз многа истраживања утврђено да трошкови коришћења СХП-а износе и до 17% укупних трошкова производње (Слика 2.14), што је неколико пута већи трошак у поређењу са трошком набавке и коришћења алата који износи 2 до 4% [46-48].



Сл.2.14 Расподела трошкова машинске обраде

Индустрија Уједињеног Краљевства произведе око 400 000 тона СХП-а (СХП спреман за примену) са одлагањем процењеним на од 8 до 16 милиона фунти у 2000 години [49].

Многа истраживања показују да само мали број компанија има прецизне информације везане уз трошкове одлагања средстава за хлађење и подмазивање. Један обрадни центар поседује око 5 m^3 СХП-а док велики централни системи, за хлађење и подмазивање код великих постројења имају и до 100 m^3 СХП-а. Уобичајени временски интервал између две замене СХП-а креће се од 4 недеље за један обрадни центар, до 1 године за велико постројење.

Како би се сагледали реални укупни трошкови коришћења СХП-а, што укључује процес почевши од саме набаве СХП-а па до одлагања истог, потребно је узети у обзир све фазе животног циклуса СХП-а са детаљним трошковима сваке поједине фазе. Основне фазе животног циклуса СХП у предузећу су: залиха, дистрибуција, коришћење, одржавање (освежавање), прикупљање, залиха, третирање (прочишћивање) и одлагање (уклањање). [50].

На тај начин трошкови СХП-а могу се поделити на две компоненте, односно трошак набавке СХП-а и скривени трошак који укључује појединачно трошкове фаза животног циклуса СХП-а. Резултати спроведеног истраживања [51] су показали како однос трошка набавке СХП-а и скривених трошкова износи од 1,0:1,5 па и до највише 1,0:5,5 за неке студије, у корист скривених трошкова.

Коришћење СХП-а вероватно представља најбоље решење гледајући техничку страну и доводи до знатног напретка у производњи. Али с еколошког аспекта отвара се питање до када је напредак напредак, а када постаје ситуација у којој је пронађени лек смртоноснији од саме болести. Ово отвара изазов истраживачима у потрази за бољим решењем које ће бити технички и економски конкурентно, а неће бити претња будућности са еколошког и токсиколошког аспекта. Свакако, повратак на обраду резањем без средства за хлађење и подмазивање је увек опција. Наука у сфери материјала свакодневно чини битан прогрес и све је већа вероватноћа да ће сува обрада резањем преузети водство над обрадом резањем са СХП-ом у будућности.

3. ОБРАДА РЕЗАЊЕМ БЕЗ СРЕДСТАВА ЗА ХЛАЂЕЊЕ И ПОДМАЗИВАЊЕ

Индустријски свет се данас полако окреће сувој обради резањем. Развој еколошке свести и брига за здравље човека, као и све строжије законске регулативе све више присиљавају индустријску производњу да напусти коришћење средстава за хлађење и подмазивање и окрене се развоју и усавршавању суве обраде. Тако француска агенција за менаџмент околине и енергије - ADEME (енг. *French Agency for Environment and Energy Management*) подупире пројекат унапређења обраде теже обрадивих (енг. *Difficult-to-cut*) материјала који се претежно употребљавају за авионску и свемирску индустрију, како би се производња помакнула у смеру суве обраде која је сигурнија за околину и здравље човека и има мањи утрошак енергије [52]. Основне предности суве обраде су:

- не постојање значајног загађења атмосфере ни воде што смањује ризик за околину и за здравље човека,
- елиминација трошкова коришћења СХП-а, од почетне набаве, адаптације за правилну примену па до одлагања истих,
- елиминација остатака СХП-а на деловима машина чиме се смањује или елиминише трошак,
- олакшано чишћење машина,
- елиминација остатака СХП-а на одвојеним честицама, што смањује трошкове одлагања (збрињавања).

Зависно од врсте обратка, увођење суве обраде уместо конвенционалане мокре обраде, доводи до уштеде од око 17% укупног трошка за обраду читавог обратка. Ово је већином због елиминације коришћења средстава за хлађење и подмазивање, чишћења, одржавања и одлагања [53].

Захтеви за високом димензионом тачношћу још увек представљају значајну рестрикцију за коришћење суве обраде материјала. У случајевима кад постоји јака адхезија између алата и обратка, када је трошење алата при сувој обради прекомерно или када није могуће контролисати топлотну деформацију обратка нужно је хлађење током самог процеса. У различитим операцијама суве обраде, код којих су коришћени нови напредни материјали и пресвлаке за обраду легура од алуминијума или челика, тестови су показали позитивне резултате [54]. Да би се осигурала добра обрада и висока отпорност на трошење, материјали од којих су направљени алати морају испуњавати одређене услове. На **слици 3.1** приказани су такви алати.



Сл. 3.1 Пример изгледа алата за обраду резањем без СХП-а

Алати за суву обраду морају бити специфично дизајнирани да омогућавају малу вредност трења у зони контакта алата и обратка као и високу топлотну отпорност. Сам процес суве обраде мора бити дизајниран тако да редукује топлоту која се задржава на обратку. То се постиже смањењем сила резања и утицајем на дистрибуцију топлоте повећањем брзина резања [54].

Коришћење суве обраде у индустрији машинске обраде би објективно било продуктивније и еколошки прихватљивије, али свакако треба узети у обзир да елиминација СХП-а обухвата одсутност и свих њихових позитивних и потребних функција као што су подмазивање (смањење трења), хлађење (смањење топлоте) и елиминација струготине. Последице би у процесу суве обраде дошло до појачавања ефеката као што су адхезија, абразија, дифузија и оксидација. Код обраде великим брзинама резања утицај ових средстава за хлађење и подмазивање није евидентан или није уопште ефикасан. Зато су често сува обрада и обрада великим брзинама резања повезане [52]. Кад се ради о редукцији ових средстава и пребацивању на суву обраду, бушење је један од најкритичнијих процеса, посебно у случај дубоког бушења (Табела 3.1) [56].

Решавање овог проблема иде за тим да се све наведене функције које се губе елиминацијом коришћена СХП-а, **надоместе алтернативним начинима хлађења**, коришћењем алата израђених од нових материјала и адаптацијом њихове геометрије, као и коришћењем пресвучених алата.

Табела 3.1 Податност различитих материјала за одређене поступке суве машинске обраде

Операција	Ливено гвожђе	Обојене легуре	Конструкциони челик	Термички обрађен челик	Алуминијумске легуре
Глодање	X	X	X	X	X
Стругање	X	X	X	X	X
Бушење	X	X	Y	Y	Y
Нарезивање навоја	X	X	Y	Y	Y
Упуштање	Y	X	Y	Y	Y
Дубоко бушење	Y	Z	Y	Y	Y

X – тренутно изводиво; Y – тренутно у развоју; Z – тренутно неизводиво;

У данашње време видљив је велики напредак на подручју технологија превлака те уједно и интерес за истима на тржишту алата. Превлаке раздвајају алат од обратка и нуде у комбинацији с новим материјалима за израду алата, могућност адекватне замене СХП-а [57]. Производна индустрија је спремна прећи на суву обраду када буду за то испуњени услови и постојала прихватљива решења. Иза имплементације суве обраде на свим подручјима производње мора стајати конструкција нових алата и развој њима придружене опреме. Развој производње у смислу преласка на суву обраду морају пратити адаптирани резни алати. Идеалан материјал за израду алата уједињавао би високу тврдоћу с високом чврстоћом и хемијском стабилношћу при високим температурама, **слика 3.2**. С обзиром да тврдоћа и чврстоћа представљају супростављајуће карактеристике, не постоји нити један постојећи материјал који испуњава сва три захтева. При одабиру материјала за обраду резањем, механичке карактеристике материјала и њихово понашање би требало сагледати као функцију температуре. Добра отпорност на топлотни шок је важна карактеристика прикладног материјала [52].



Сл. 3.2 Оптималан материјал резног алата за суву обраду резањем[55]

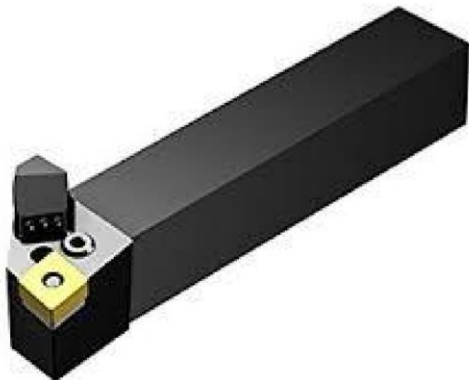
Материјали за израду алата се могу поделити на:

а) **Тврди метали са већим садржајем волфрам-карбида**; цементирано карбиди су данас најчешће коришћени материјали у изради алата за обраду резањем. Ови тврди метали су добијени прашкастим металуршким методама коришћењем примарних карбида и тврди метал. Један од најчешће употребљаваних материјала је волфрам-карбид WC (енг. *Tungsten Carbide*) који се добија синтеровањем (на високим температурама) комбинације прашкастог WC и прашкастог кобалта (Co). Два параметра, углавном однос Co и WC , и величина WC честице, контролишу, односно имају одлучујући утицај на карактеристике материјала резног алата. Тако састав у којем су WC честице велике и где је висок проценат Co гарантују високу отпорност на топлотни шок и високу жилавост. Новија достигнућа иду за тим да повећају тврдоћу материјала користећи микронске и ултрафине зрнасте легуре с WC величином честице од 0,5-0,8 μm и 0,2-0,5 μm и садржајем Co од 6-16% [58]. Услед велике цене самог материјала, од њих се углавном производе резне плочице (слика 3.3).



Сл. 3.3 Резне плочице од тврди метала са повећаним садржајем волфрам-карбида

б) **Тврди метали са повећаним садржајем титана или тантала**; растућа важност суве обраде даје нови импулс развоју ове групе. Они имају сличну структуру као и предходни. Честице тврдог материјала се налазе у матрици *Co* и *Ni*. Компоненте твдих материјала нису од *W* и *C*, већ од карбида титана (*Ti*) с различитим садржајем тантала (*Ta*), волфрама (*W*) и понекад молибдена (*Mo*). Чврстоћа се може мерити с металима предходне групе, док је отпорност на оксидацију много већа [59]. Предности ових материјала су висока тврдоћа при високим температурама и хемијска стабилност што утиче на високу отпорност на трошење и добар квалитет површине обратка. Ипак ови материјали су мање чврсти од *WC* карбида и њихова лимитираност у погледу величине посмака је евидентна. На **слици 3.4** приказан је алат са плочицом израђеном од материјала из ове групе.



Сл. 3.4 Резна плочица од тврдог метала са повећаним

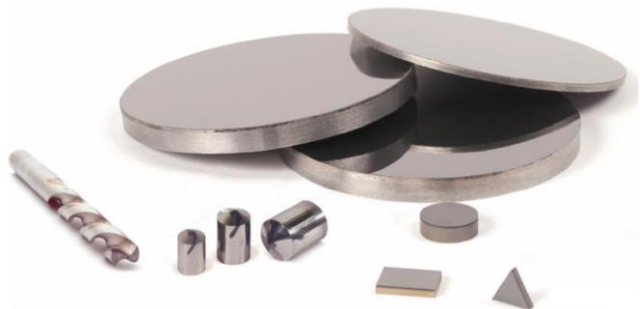
ц) **Резне- алатне керамике**; користе се две врсте керамичких композиција, које се могу поделити зависно од коришћене матрице. Алуминијум оксид, који се при високим температурама задржава у својој најстабилнијој кристалној, хексагоналној решетки, из чега произлазе различите пожељне карактеристике материјала. С друге стране је силицијум нитрид, који има добру оксидациону отпорност и захваљујући ниском коефицијенту термалне експанзије, добру отпорност на термални шок за разлику од других керамичких материјала [60]. Иновација на овом подручју су *SiC* керамике, које у комбинацији с керамичким композитима повећавају чврстоћу, топлотну проводљивост и отпорност на топлотни шок.

д) **Супертврди алатни материјал – нитрид бора**; Постоје различите кристалне структуре ових материјала. Графиту слични, нитрид бора је познат по својим својствима мекоће и својства подмазивања у супротности с кубним структурама (*CBN*) које су тврде те се користе за резне алате. *CBN* има исту структуру као и дијамант те се његове карактеристике огледају у карактеристикама дијаманта. *CBN* се по тврдоћи може сврстати одмах иза дијаманта који представља најтврђи материјал. *CBN* је синтетички материјал направљен од кубног нитрида бора и специјалног керамичког везива. Он показује високу тврдоћу и хемијску стабилност на високим температурама и до 1400 °C [52]. На **слици 3.5** приказан је изглед плочице са ивицама направљеним од кубног нитрида бора.



Сл. 3.5 Резна плочица са резним врхом од *CBN*-а

е) **Супертврди алатни материјал - Дијамант**; природни дијамант се састоји од угљеника. Монокристални дијамант је најтврђи материјал . Управо због веће чврстоће, поликристални дијамант (ПКД) има предност за израду резних алата у односу на монокристални [61]. Дијамант омогућава импресивну комбинацију хемијских, физикалних и механичких својстава, ниски коефицијент трења и топлотне експанзије, високу отпорност на корозију. Ипак и дијамант има своје недостатке, због великог хемијског афинитета угљеника и гвожђа, при обради гвоздених материјала дијамантом долази до високог степена трошења алата [52].



Сл. 3.5 Резни алати од ПКД-а

Триболошко понашање материјала, односно алата за суву обраду се може побољшати коришћењем различитих превлака. Оне између осталих чиниоца, помажу компензовати функције СХП-а, тако да контактне карактеристике и напредак трошења на контактної површини могу бити редуковани. Зависно од очекиваног механизма трошења алата, превлаке морају задовољити различите захтеве. Превлаке алата морају редуковати уклањање материјала које настаје као резултат абразионог трошења (тврде превлаке), како и адхезијског трошења, служећи као баријера између алата и обратка. Коришћењем „low friction“ превлака знатно се побољшава отпорност на трошење алата при клизању предње и стражње површине [62].

Превлаке се могу класификовати по методи наношења на:

1. **CVD** (енг. *Chemical Vapor Deposition*) – поступак хемијског наношења из парне фазе
2. **PVD** (енг. *Physical Vapor Deposition*) – поступак физикалног наношења у вакуму.

Према композицији делимо их на једнослојне и вишеслојне (слојеви превлака истих или различитих материјала) [63]. С технолошког аспекта број слојева који превлака може садржавати је неограничен, но дебљина слоја повећава радиус резне ивице. С обзиром да је оштра резна ивица од посебне важности за примену суве обраде, предност увек имају изразито танке превлаке. Нанослојне превлаке које представљају достигнуће модерне технологије, су омогућиле смањење дебљине слоја превлаке уз истовремено могућност композиције и до стотину појединачних слојева који досежу укупну дебљину не већу од око 2 - 5 μm [64].

Супернитриди који такође припадају нано композицијама су настали коришћењем високо јонизованих плазми. Они обухватају високу хемијску стабилност оксидних слојева и механичка својства тврде нитридне превлаке.

4. САВРЕМЕНЕ ВРСТЕ ХЛАЂЕЊА ПРИЛИКОМ ОБРАДЕ РЕЗАЊЕМ

Раст еколошке свести у свету, нове регулативе и пропис, економски губитци као и захтеви данашњег тржишта окренули су очи светске јавности на нужну потребу развоја и имплементације алтернативних врста хлађења у машинској обради, **слика 4.1** Тако је данас и унутар производне индустрије у фокусу заштита околине и човека па се већ говори о посебно прилагођеној машинској обради односно производњи користећи називе “*Green Manufacturing*“, “*Green Cutting*“ [65]. Водена пара и ваздух су јефтине, еколошки прихватљиве, алтернативе конвенционалне мокре обраде.



Сл. 4.1 Разлози преласка на алтернативне врсте хлађења и предности коришћења истих

Још 1990. године предложен је нови еколошки начин машинске обраде коришћењем водене паре као средства за хлађење и подмазивање [66]. Коришћење водене паре може редуковати дифузијски и адхезијски тип трошења смањујући температуру у зони резања. При примени водене паре у машинској обради, век трајања алата може се повећати за два пута у односу на суву обраду, што довољно говори о ефикасности овог типа хлађења [67]. Једнако тако постоје заговарачи унутар индустрије машинске обраде који предлажу коришћење компресованог ваздуха током обраде при великим бројевима обраћања. Коришћењем система за хлађење ваздухом дизајнираног за смањење температуре у зони контакта алата и обратка, повећава се продуктивност обраде могућношћу коришћења “бржих” параметара резања у односу на исти случај код суве обраде [55]. Примена одређених гасова као што су азот, кисеоник и угљен-диоксид смањује силе резања у односу на суву и конвенционалну обраду [68]. Техника комбинације охлађеног ваздуха и минималних количина уља, *MLQ* (енг. *Minimum Quantity Lubrication*) техника делује као ефикасно средство за хлађење и подмазивање, при температурама од 0°C, те се показала бољом у односу на суву и конвенционалну обраду [69]. Техника *MLQ* се у различитим истраживањима показала јефтинијом, здравијом и сигурнијом у односу на конвенционалну „мокру“ машинску обраду постигавши готово једнаке резултате. Посебно се у томе истиче *MLQ* техника у којој су коришћена биљна, а не минерална уља [70].

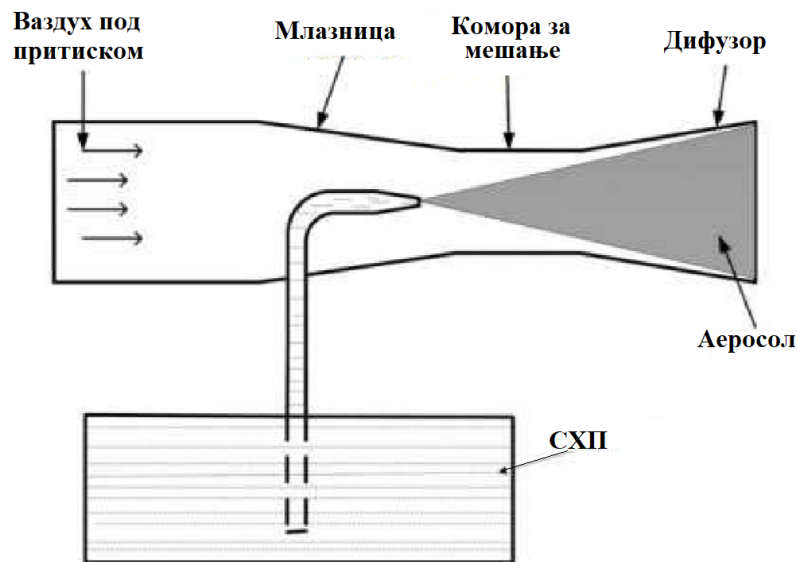
Хлађење алата омогућава редукцију топлоте у зони резања допуштајући оператерима да оптимизују процес обраде с већим брзинама резања и посмацима. На овај начин је могуће задржати високу продуктивност али и осигурати дужи век трајања алата и бољи квалитет површине обратка. Више вредности параметара резања нуде повећање продуктивности, али на штету квалитета површине обратка и значајног смањења века трајања алата. Погоршање површинске храпавости је директно везано уз трошење алата. Век трајања алата односно његово трошење је јако осетљиво на промене услова резања те га је тешко избећи, међутим различитим начинима хлађења зоне резања може се минимизовати. Управо је постизање једнаког века трајања алата односно једнаког времена обраде основни предуслов за пребацивање на суву или полусуву машинску обраду, пре свега материјала који су за то прикладни [71]. Постоје материјали и поступци обраде код којих сува обрада није могућа и нужно захтевају хлађење. То вреди за обраду алуминијума због његове високе топлотне осетљивости и адхезије на алат, такође и обрада најтврђих челика представља јако захтеван процес. Обрада напредних материјала, због њиховог својстава ниске топлотне проводљивости и генерисања топлоте у зони резања, захтева ефикасно хлађење. На избор начина обраде, односно начина хлађења утичу осим материјала и сами индустријски процеси. Различити процеси обраде постављају различите захтеве за количином и избором СХП-а потребних за сигуран и задовољавајући рад за постизање успешних резултата.

4.1 ХЛАЂЕЊЕ УПОТРЕБОМ МИНИМАЛНЕ КОЛИЧИНЕ СХП (ХЛАЂЕЊЕ МАГЛОМ)

Техника комбинације охлађеног ваздуха и минималних количина уља се може сврстати у полу суве методе хлађења. Дефинише се као обрада у којој се мале количине СХП-а дисперзују директно у зону резања. Зависно од типа и главне функције течности, средства се могу поделити на:

1. Минимална количина за подмазивање - MQL (енг. *Minimum Quantity Lubrication*)
2. Минимална количина за хлађење - MQC (енг. *Minimum Quantity Cooling*)

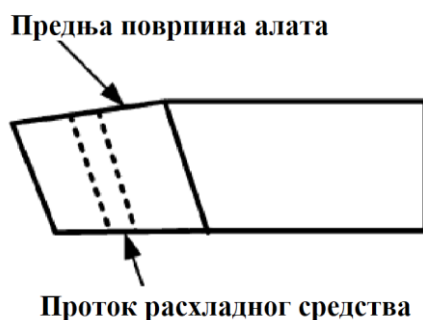
Обрада минималном применом СХП-а дефинише се као машинска обрада у којој се мешавина вазуа и минималне количине СХП дисперзује у облику аеросоли директно у зону резања под високим притиском. Систем којим се мешавина доводи у себи на ејектор где се копресовани ваздух користи за распршивање уља као што је приказано на слици 4.2. [72]



Сл. 4.2 Шематски приказ довођења СХП-а код MQL-а

Уље је у том доводном систему вођено ваздухом све до зоне резања. Проласком ваздуха кроз Вентуријеву цев, уско грло око млазнице за пражњење ствара Вентуријев ефект у комори за мешање (ствара вакуум). Тај парцијални вакуум повлачи уље горе из резервоара где се уље одржава под константним хидрауличким притиском. Ваздух пролази кроз комору за мешање и распршује уљани ток у микронске честице аеросоли. Када те честице ударају у млазницу, производе спреј од гасовите суспензије назване „магла“ у зони резања који служи за хлађење и подмазивање. Међутим, магла исто представља опасност по здравље оператера.

Постоји и други начин достављања расхладне течности кроз алат у зону високих температура резања. Слика 4.3. је шематски приказ таквог алата, у којем је расхладно средство под високим притиском испуштено кроз рупу до предње површине резног алата. Расхладно средство је могуће доставити прецизније, брже и боље у зону резања него спољним начином. Традиционалним начином хлађења, висока температура узрокује испаравање расхладног средства пре него што оно дође до зоне резања.



Сл. 4.3 Шематски приказ довођења СХП-а кроз алат

Ова техника која се данас већ увелико користи, је била први пут примењена 1970-их година у америчкој авио индустрији. Предности MQL технологије у односу на конвенционалне технике хлађења коришћењем и апликацијом СХП-а (прскање, системи са високим притиском итд.) су:

- трошкови набавке за овакве системе значајно су мањи,
- MQL техника користи проток од 50-500ml/h (најчешће око 50 ml/h) што је 3-4 пута мање од количина које се стандардно користе у конвенционалној мокрој обради у истим временским интервалима [73],
- и до 30% смањење сервисних трошкова у поређењу с конвенционалним хлађењем,
- мала количина течности или мазива резултује готово сувим обрадним делом, алатом и самим обрадним центром што у одређеној мери узрокује смањење трошкова јер нема више потребе за чишћењем истих,
- MQL техника елиминише један део трошкова везаних уз набавку, снабдевање, заштитно третирање и одлагање СХП-а,
- примена MQL-а задовољава еколошке захтеве и минимизује негативан утицај СХП-а на околину и здравље човека.

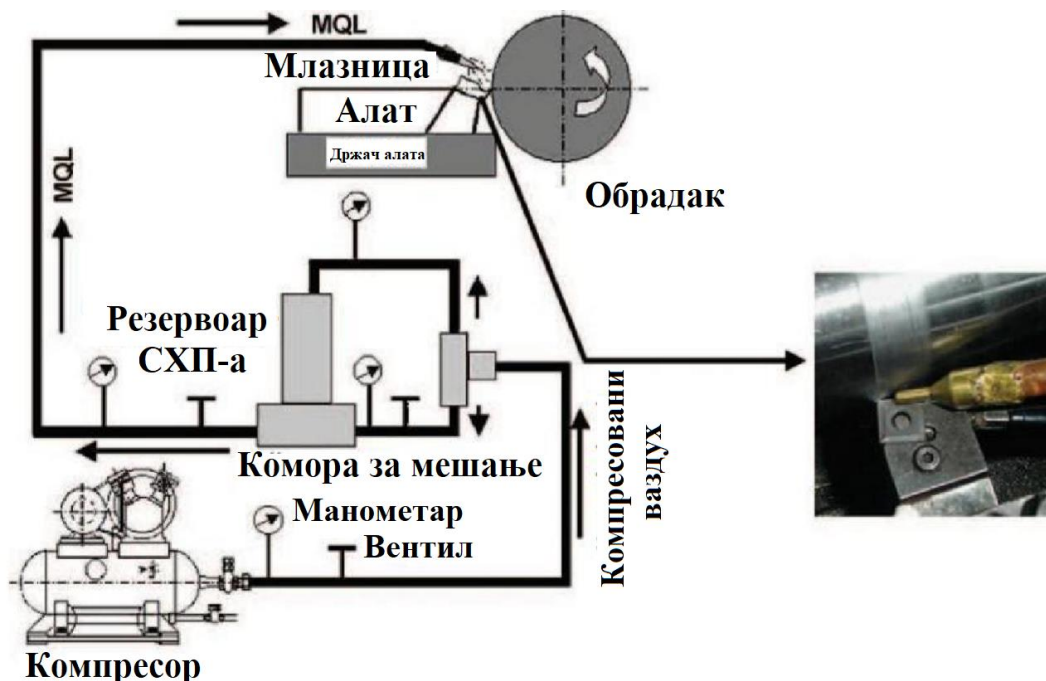
Техника MQL-а представља алтернативу између конвенционалног коришћења СХП-а и сувог начина обраде. Све строжије регулације заштите околине смањују флексибилност коришћења СХП-а и отварају простор за MQL. Упркос томе што у пракси још увек доминира машинска обрада уз коришћење СХП-а, научници указују на хитност тражења алтернатива, као што је MQL.

Волумен скинутог материјала у истим условима је једнак или већи у односу на волумене скинуте при сувој или конвенционалној мокрој обради. Просечно трошење алата је код MQL-а мање у односу на обраду при другачијим условима, захваљујући нижој температури која задржава тврдоћу алата и редукује адхезијски и дифузијски облик трошења који су јако осетљиви на температуру. Површинска храпавост се смањује захваљујући наведеној контроли температуре. Такође коришћење MQL-а омогућава смањење тангенцијалних сила резања за 24,4% у односу на „мокру“ и 32,2 % у односу на суву обраду [75]. Захваљујући снижењу температуре алата машинске обрада коришћењем MQL-а се постижу бољи резултати у смислу века трајања алата у односу на конвенционалане мокре обраде. У односу на суву обраду, MQL отвара могућност обраде материјала који нужно захтевају хлађење једнако тако поступцима зависнима о хлађењу. MQL техника може бити успешно коришћена у операцијама бушења алуминијум-силицијумских легура што је готово неизводљиво код суве обраде [76].

Производи израђени уз коришћене MQL-a су били једнаког или бољег квалитета од производа направљених конвенционалном мокром обрадом с пуно већим количинама средстава за хлађење и подмазивање. Експерименти проведени при операцији обимног глодања (енг. *End mill*) уз MQL као резултат дају 30-40% дужи век трајања алата и 20-30% мању резултујућу силу у поређењу са конвенционалним хлађењем.

MQL техника се показала успешном из перспективе века трајања алата, квалитета обрађене површине и ефикасног избегавања појаве заосталог напона при обради легуре титанијума [77]. Такође, користећи ниске протоке средстава за хлађење и подмазивање даје успешније резултате у односу на суву обраду, те да боље утиче на одређене параметре и у односу на конвенционалну мокру обраду [78]. Истражен је утицај MQL-a на смањење температуре у зони резања у односу на суву обраду. Температура алата при брзини резања од 300 m/min код суве обраде је била 1060°C, док је код примене MQL-a температура била 1000°C. Разлика температуре од 60°C је еквивалентна разлици бгзине резања од 50 m/min [75]. Захваљујући блажем ефекту хлађења, температуре у зони резања ипак расту у односу на конвенционалну мокру обраду [79]. Тиме се поставља питање о саставу гасова који емисијом одлазе у атмосферу, а настају услед изложености одређене количине СХП-а нанешеног MQL техником још већим температурама него код конвенционалне мокре обраде.

На слици 4.4, приказан је шематски приказ једне екстерне MQL јединице код обраде стругањем са свим основним деловима. У комори за мешање долази до стапања течности за обраду метала и компресованог ваздуха, те се настали аеросол одводи даље преко плазнице у зону резања [80-82].



Сл. 4.4 Шематски приказ екстерне MQL јединице код обраде стругањем

Атмосферска концентрација потенцијално опасних супстанци једнака је без обзира на емисију гасова током MQL-а, што значи да обрада у условима MQL нема значајног ефекта загађења. Ипак у поређењу с конвенционалном мокром обрадом, MQL генерише аеросол (**маглу**) оптерећену честицама СХП-а насталим машинском обрадом због начина његове примене. Такође је врло важна интеграција и контрола система за MQL у сврху успешног обављања различитих поступака обраде резањем. Потребне количине ваздуха и течности, као и компоненте везане уз алат морају бити контролисане посредством нумерички контролних јединица. Прскање лубриканта и отпуштање гаса под притиском би тебало бити избегнуто током замене алата ако се жели осигурати правилан рад MQL технике. MQL систем обично мора опслуживати више различитих алата, који заправо захтевају различите количине уља и ваздуха, чиме се показује нужност потпуне интеграције MQL система у нумеричку контролу обрадног центра [81].

Због ниске стопе коришћења укупних количина СХП-а, за MQL су врло важне карактеристике биоразградљивост, оксидациона и складишна стабилност. Лубриканти морају бити хемијски стабилни на дуже време. Контејнери за складиштење лубриканта су готово увек смештени ван, те температуре могу достићи и до 70°C или више. Како MQL системи користе мале количине лубриканта, потребно је да остану хемијски стабилни дуго времена у тим условима. Настанак хемијских промена код лубриканта је доказан тестом у којем је одређена количина лубриканта складиштена 168 сати у наведеним условима. Утврђено је повећање молекуларне тежине код одређених супстанци као знак постојећих хемијских промена. Ипак, биоразградљивост је најважнија мера процене компатибилности тих материја с околином. Основне супстанце лубриканта су минерална уља и полиалкилен гликол, који имају ниску биоразградљивост. Данас се све више користе лубриканти на бази биоразградљивих синтетичких естера [82].

Иако MQL технологија показује велики потенцијал и нуди одређене предности, постоје захтеви од велике важности који још увек нису адекватно испуњени што доводи до недостатака као што су недефинисани трошкови целокупне инвестиције и примене, непредвиђени трошкове везани уз спровођење самог процеса напајања, проблеме при наношењу у зону резања, потенцијалну високу запаљивост због ваздухом ношене металне прашине, утицаја на раднике и поузданости самог система. Једнако тако важан напор за развојем се фокусира на праћење MQL аеросола. Истраживања су показала да растућа ротациона брзина утиче на смер тока аеросола што последично формира вртлог. Раличити дизајн алата и доступности зоне резања чине додатно захтевним оптимизовање MQL напајања. Број и положај цеви за распршивање СХП-а при MQL-у такође је врло важан и има велики утицај на квалитет резултата.

4.2 ХЛАЂЕЊЕ ХЛАДНИМ ГАСОМ ПОД ПРИТИСКОМ

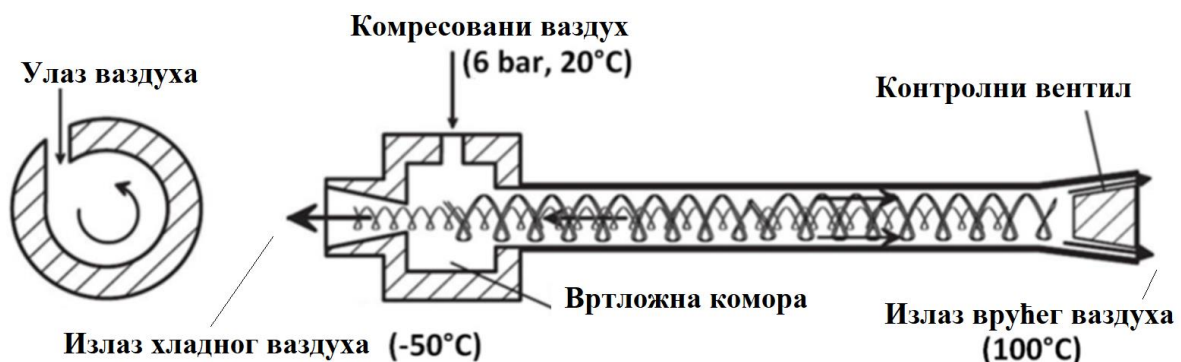
Нужан предуслов за имплементацију суве обраде је прихватљиво надомештање функција средстава за хлађење и подмазивање. Коришћењем хладног компресованог ваздуха се може заменити функција СХП-а у хлађењу алата и обратка, хлађењу струготине и елиминацији струготине из зоне резања. У односу на СХП, ова техника уз релативно мале инвестиционе трошкове знатно смањује трошкове укупне производње, а упоредо није штетна за околину и здравље човека.

У почетним истраживањима користио се само компресовани ваздух, који се у односу на воду и уље показао инфериоран [81]. Новији покушаји користе хладни компресовани ваздух који у испитивањима даје много боље резултате. Охлађени ваздух се сматра ефикасним у расипању топлоте, односно снижавању температуре у зони резања приликом машинске обраде. Хлађење хладним компресованим ваздухом најчешће се спроводи коришћењем вртложне цеви.

Вртложна цев, позната као *Ranque-Hilsch* вртложна цев (*RHvc*) је цев која омогућује раздвајање врућег од хладног ваздуха приликом протицања компресованог ваздуха кроз улазне млазнице тангенцијално у вртложну комору [83].

Вртложну цев (енг. *Vortex tube*) изумео је 1933. године француски металург и физичар *Georges Ranque*, а усавршио ју је немачки физичар *Rudolf Hilsch*. Године 1947. *Rudolf* објављује документ оргинално назван „*Wirbelröhl*“ (вртложна цев) у којем уз комплетну документацију описује конструкционе детаље везане за нараву. *Ranque-Hilsch* вртложна цев се састоји од једне или више улазних млазница, вртложне коморе, финалног ушћа за хладни ваздух, контролног вентила врућег ваздуха као и саме цеви. Специјално дизајнирана вртложна комора својом конфигурацијом заједно са ефектом компресовања, убрзава ваздух до великог броја обртаја, у неким случајевима преко милион обртака у минути [84].

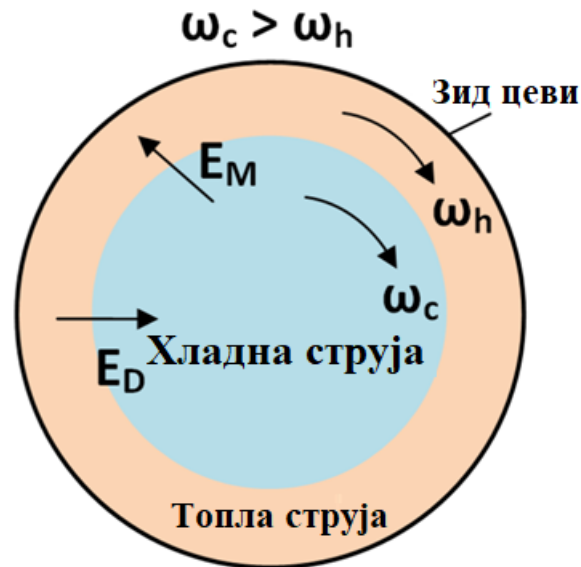
Постоје два типа протока код вртложне цеви, паралелни проток и супротни проток струјања ваздуха, **слика 4.5**



Сл. 4.5 Шематски приказ система вртложне цеви

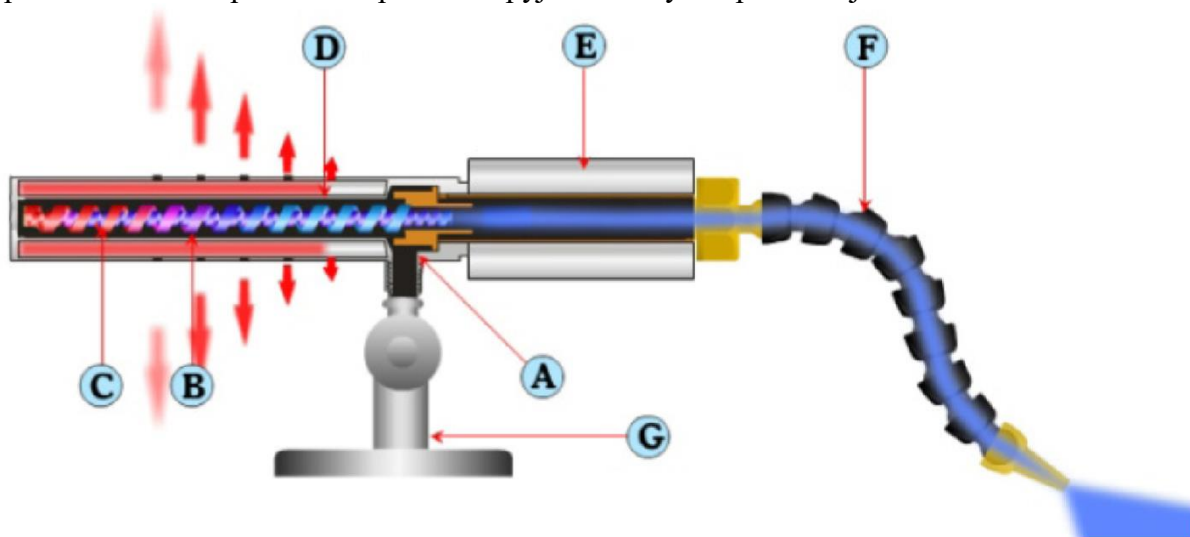
Механизам унутар система вртложне цеви може се посматрати са физичке стране, али га је као таквог тешко објаснити. Високо компресовани ваздух тангенцијалним струјањем и уласком у вртложну цев раздваја се на две слабије компресоване струје ваздуха, хладнију и топлију од околине. Хладна струја ваздуха излази из вртложне цеви кроз централно ушће крај улазних млазница док врућа струја напушта вртложну цев преко контролних вентила на дну вртложне цеви (**слика 4.5**). Центрифугално раздвајање две одвојене струје ваздуха и њихова адиабатска експанзија узрокује и енергетско одвајање у систему вртложне цеви.

Раздвајање енергије у вртложној цеви паралелног протока је приказано на **слици 4.6**. Измена енергије између топлог и хладног ваздуха је одговорна за стварање значајне температурне разлике унутар вртложне цеви. Опадање температуре у вртложној цеви услед експанзије исто је као код турбине. Код вртложне цеви не постоје ротирајући зидови као код турбине, него ротирајући слојеви флуида трењем врше измену механичке енергије [85]. Хладни ваздух радијално експандира и повећава своју обимну брзину. Тако се унурашњи слој ваздуха ротира брже него спољашњи.



Сл. 4.6 Раздвајање енергије у вртложној цијеви паралелног протока

Вртложна цев има много могућих индустријских примена, те се може користити као опрема за хлађење код CNC машина, у хладњацима, процесима грејања, итд. Висока применљивост система вртложне цеви базира се на његовој једноставности, компактности као и чињеници да је сам систем мале масе и изразито тихог начина рада. Будући да ове цеви не садрже никакве покретне делове, оне не пуцају нити су подложне трошењу што их чини једноставним за одржавање. Начин примене и принцип рада вртложне цеви паралелног протока струјења ваздуха приказан је на **слици 4.7**.



Сл. 4.7 Принцип рада вртложне цеви паралелног протока

Где су: Улаз компресованог ваздуха у вртложну комору (А), раздвајање при ротацији унутар вртложне цеви на хладну (В) и топлу (С) струју ваздуха, излаз топле струје ваздуха преко одговарајућих вентила (Д), проток хладне струје ваздуха кроз пригушницу (Е), излаз хладне струје вазду кроз флексибилну цев (Ф), магнетни држач (Г)

Резултати истраживања показују предности коришћења компресованог хладног ваздуха, најчешће у односу на суву обраду. Тако код обраде великим брзинама резања при бушењу уз хлађење коришћењем вртложне цеви може се продужити век трајања алата скоро 10 пута [86]. Примена ове технике хлађења показала је могућност редуковања температуре на средине предње површине за отприлике 7% те уједно значајно редуковање трошење оштрице алата [87]. Такође током стругања силумина А390 коришћењем вртложне цеви, остварено је значајно смањење у количини материјала скинутог с обратка који би при сувој обради заостао или стварао налепак на алату. Овакав начин хлађења има могућност редуковања површинске храпавости и генерисане заостале напоне на површини обратка при спољном уздужном брушењу цилиндричних обрадака [88].

Примена хладног ваздуха помаже снижавање топлоте на алату, струготини и обратку захваљујући топлотној конвекцији на површини истих. Због тога је коефицијент топлотне конвекције од велике важности у моделирању температура алата. Тако је тај коефицијент код хлађења СХП-ом на бази воде у распону од 103-104 W/m²K. Коефицијент топлотне конвекције за хладни ваздух први пут израчунавају у [89] и он у симулацији има вредности у распону од 50-5000 W/m²K, док у експерименту износи око 160 W/m²K за хлађење хладним ваздухом температуре до -15°C и 860 W/m²K, за хлађење хладним ваздухом температуре до -25°C [89]. У њиховом истраживању су известили како је коришћење хладног компресованог ваздуха у зависности са параметрима резања, па и код повећања брзине резања и посмака може редуковати температуре у зони резања и до 20 °C. Испитујући век трајања алата коришћењем СХП-а или хлађења хладним ваздухом утврђују како се при хлађењу компресованим хладним ваздухом остварује већа количина обрађене површине односно дужи век трајања алата [90]. Додатно, показују да коришћење хладног компресованог ваздуха доноси битно повећање века трајања алата и продуктивности [91]. Утицај хладног ваздуха, охлађеног на -4 до -25 °C под притиском од 4 bar и показали да како се снижавањем температуре ваздуха, повећава квалитет обрађене површине и смањују заостали напони унутар исте [92]. Такође су неки експерименти показали да при брзинама резања од 480m/min, где сува обрада постиже јако сиромашне резултате у завршној површинској обради због убрзаног трошења алата, обрада коришћењем хладног ваздуха је омогућавала јако добру завршну обраду [93].

4.3 КРИОГЕНО ХЛАЂЕЊЕ

Криогено хлађење је подручје везано уз технологију дубоког хлађења. Традиционално, подручје криогеног хлађења узето је да почиње при температурама нижим од 120 K ($\sim -150^{\circ}\text{C}$). Било је пуно несигурности око постављања те границе, али испоставило се да је ово најлогичнији избор јер је тачка кључања већине гасова који се користе унутар криогене области. Криогено хлађење процеса обраде метала се почело примјењивати још 1950 године. Сам поступак карактеризовао је коришћење различитих средстава попут CO_2 или фреон али уз потрошњу претераних количина криогених течности због неефикасног начина наношења у зону резања. То се одразило високим трошковима због чега се дуги низ година овај начин хлађења није прихватио као ефикасна метода у индустријским постројењима.

Данас када је производња и складиштење течног азота приступачнија и када постоје ефикаснији начини наношења у зону резања постоји потреба али и нужност за унапређење и развој криогеног хлађења на индустријском нивоу. Почетна испитивања су показала да комбинација криогеног хлађења и прикладних нових алата и технологија даје боље резултате од стандардне конвенционалне обраде [50,94].

ИСТОРИЈСКИ РАЗВОЈ

Већ више од једног века, технологија производње ниских температура повезује се са криогеником (енг. *Cryogenics* – „*The science and art of producing cold*“) . Реч „*Криос*“ има грчки корен и значи хладно или замрзнуто. Све је почело 1877. „трком“ између физичара у промени агрегатног стања гасова у течност и достизања најнижих температура икада. Када су Швајцарски физичар *Raoul-Pierre Pictet* и професор *Louis Paul Cailletet* на женевском универзитету (*Université de Genève*) као први започели са успешном кондензацијом кисеоника. Шкотски хемичар, физичар и професор, *James Dewar*, 1898. године, на Кембриџу (*University of Cambridge*) успева први пут кондензовати водоник. Један од његових изума који се користи и дан данас је *Dewarov*-а посуда [51,94] (**слика 4.8**) која се користи за чување криогених флуида. Њен главни атрибут је вакумска изолација где се топлота одводи/доводи само зрачењем и путем топлотних мостова.



Сл. 4.8 Пример Dewar-ове посуде фирме Day-Imrex Ltd

Задњи и најкомпликованији гас за кондензацију био је хелијум. Њега је први пут кондензовао *Kamerlingh Onnes* 1908. године. Као што је речено, коришћење криогеника за хлађење алата код машинске обраде почело је раних 50-их година прошлог века. Криогеници који су се користили били су угљен диоксид и фреон који су се наносили на обрадак пре процеса обраде. Такав начин примене резултовао је потрошњом претераних количина криогених течности што се рефлектовало на високе трошкове због чега овај начин хлађења дуги низ година није био прихваћен у индустријским постројењима. Осим тога такав начин апликације није пружао подмазивање него само хлађење.

КРИОГЕНА ТЕХНОЛОГИЈА

Експериментални и аналитички резултати потврђују да криогена технологија обраде има добар потенцијал за смањење трошкова и побољшање конкурентности, смањење потрошње сировина, смањење отпада, мањи утицај на околину и људе, испуњавајући услове одрживости (економске, социјалне и еколошке) у односу на конвенционалне поступке обраде. Постоје бројна испитивања утицаја криогеног хлађења на обраду температурно постојаних материјала са високим температурама топљења који се данас све чешће користе у хемијској, медицинској, грађевинској и највише авио индустрији [59]. Најчешћи криогеници који се данас користе су хелијум, водони, неон, азот, кисеоник, аргон, криптон, ксенон, метан, етан и пропан. Угљен диоксид је додат на ту листу иако је потребан притисак од 50 kPa како би остао у течном облику. Иако назив „криогеника“ звучи као некакво егзотично поље, игра јако велику улогу у модерној индустрији и знаности као нпр. постројења за раздвајање ваздуха како би га раздвојили на компоненте за индустријске и медицинске сврхе. Течни хелијум је постао неизбежан елемент за хлађење код магнетне резонанце у модерним болницама, а у свемирској технологији се течни водоник и кисеоник користе као гориво, за залеђивање и хлађење хране итд. [60,94].

Хлађење течним азотом је еколошки сигурна алтернатива стандардној емулзионој обради. Течни азот охлађен на -196°C се наноси у зону резања. Азот безбедно испарава у ваздух без додатних течности за одлагање. Одвојене честице обрађиваног материјала које остају након обраде овом техником, немају на себи уља и могу се рециклирати као обични метал. Течни азот апсорбује топлоту, брзо испарава и формира заштитни слој делујући тиме као средство за подмазивање.

Корист хлађења течним азотом је већа код обраде мањим брзинама резања, јер тада већи део контакта струготина - алат остаје по својој природи еластичан и омогућава ефикаснију пенетрацију течности у зону контакта. Ефект хлађења течним азотом се смањује с повећањем брзине резања. Томе је узрок да код великих брзина резања контакт струготина-алат има тенденцију да постане потпуно пластичан те тиме спречава пенетрацију течним азотом у врућу зону резања. Доказано је да примена ове технике хлађења смањује трошење алата и знатно продужује век трајања алата. Резултати показују да је при обради глодањем најтврђег челика пресвученим карбидним алатом, брзином резања 100 m/min и дубином реза од $0,5\text{ mm}$, век трајања алата $13,45\text{ min}$ док је у истим условима уз примену течног азота, век трајања алата $57,45\text{ min}$. То показује да хлађење течним азотом повећава век трајања алата за 4,27 пута [60,94].

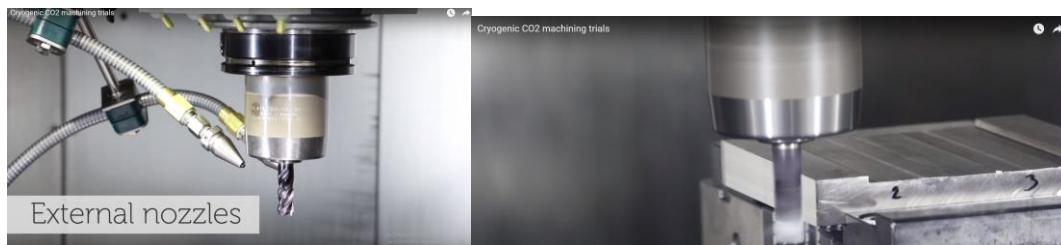
Резултати такође показују да при обради Ti-6Al-4V легура користећи непресвучени WC алат са 70 m/min брзином, посмаком од 0,2 mm/o и дубином реза од 2mm, примена течног азота смањује ширину појаса трошења на леђној површини за 3,4 пута у односу на суву обраду и 2 пута у односу на емулзиону [61]. Овакво деловање течни азот постиже редукујући топлоту у зони резања чиме се смањују температурно осетљиви механизми трошења као дифузија и адхезија [62]. Разлика између максимално постигнутих температура у зони резања између криогеног начина хлађења и суве обраде могу износити и до 300°C (већа температура одговара сувој обради).

Надаље постоји повећање површинске храпавости од 16 μ m упоређујући обраду хлађењем течним азотом у односу на суву обраду [63]. Силе резања су такође код криогеног хлађења мање него код суве обраде, захваљујући nižем коефицијенту трења у зони контакта алата и обратка у подручју предње површине. Примена течног азота омогућава ефикасну контролу температуре у зони резања па тиме продужава век трајања алата и побољшава квалитет обрађене површине. Одређена истраживања показују да сува обрада конвенционалним алатима без превлака у условима коришћења течног азота резултује 55% редукијом кратерског трошења и 30% редукијом вредности ширине појаса трошења на задњој површини алата. Коришћење овог начина хлађења односно подмазивања успешно продужује век трајања алата уз минималан ризик за околину и здравље човека. Највеће ограничење коришћења ове технике хлађења се налази у њеној цени.

ПРИМЕР ПРИМЕНЕ КРИОГЕНОГ ХЛАЂЕЊА КОД ОБРАДЕ СТРУГАЊЕМ

Примена криогеног хлађења (криогене обраде) при обради стругањем представља методу хлађења алата и/или обратка током процеса обраде. Другим речима, ради се о довођењу криогеног средства за хлађење и подмазивање (уместо средства на бази уља) у зону резања на резни алат који је изложен највишим температурама током обраде или на обрадак у сврху мењања карактеристика материјала и побољшања параметара обраде.

Као што је споменуто, криогеник који се користи као средство за хлађење је течни азот који се доводи кроз алат или кроз млазнице (слика 4.9). Када се користи у машинској обради, када дотакне неку површину одмах испарава и враћа се натраг у атмосферу, не остављајући никакве контаминираних остатке на обратку, струготини, машини или оператеру. Криогена обрада представља врло чисту обраду у поређењу са традиционалном обрадом са средствима базиранима на уљу. На слици 4.10 приказана је поставка опреме за криогену обраду [94].



Сл. 4.9 Принципи довођења криогене течности у зону резања



Сл. 4.10 Поставке опреме за криогену обраду

Потенцијалне предности криогене машинске обраде су:

- Одржива обрадна метода (чишћа, сигурнија, прихватљивија за околину и здравље итд.) којом се уклањају бројни трошкови повезани с традиционалним средствима за хлађење и операције чишћења;
- Повећана брзина резања без повећања трошкова трошења и замене алата – повећање продуктивности;
- Повећање брзине резања без повећавања трошења и замене алата;
- Повећан век трајања алата захваљујући мањој абразији и хемијском трошењу;
- Омогућена обрада тврдих и тешко обрадљивих материјала који су били могући само уз коришћење скупих операција;
- Површинска храпавост је боља;
- Побољшан квалитет произведених делова;
- Потенцијално нижи иницијални трошкови због мањег броја алата који је потребан;
- Напредак у производној флексибилности.

Највеће ограничење коришћења ове технике налази се у њеној цени, што је још увек чини релативно неприступачном. Скупи системи за хлађење течним азотом су релативно недоступни и економски тешко исплативи [61,94].

5. СИСТЕМАТИЗАЦИЈА И АНАЛИЗА СРЕДСТАВА ЗА ХЛАЂЕЊЕ И ПОДМАЗИВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ПРОИЗВОЂАЧА

5.1 СИСТЕМАТИЗАЦИЈА И АНАЛИЗА СРЕДСТВА ЗА ХЛАЂЕЊЕ И ПОДМАЗИВАЊЕ ПРИ МИНИМАЛНОЈ КОЛИЧИНИ

Развојем и производњом система за хлађење употребом минималне количине СХПа бави се све већи број произвођача [95-98]. Међу њима се издваја *Unist*, као светски лидер у развоју и производњи истих. Њихови производи су базирани на 60 година искуства и континуалног усавршавања.

Потврду њиховог квалитета, кроз студију утицаја примене MQL методе на квалитет обраде, трајање алата, уштеду новца итд. спровело је немачко Министарство просвете и истраживања (енг. *The German Ministry of Education and Research (BMBF)*) кроз трогодишњи пројекат назван „Истраживање за будућу производњу“ (нем. *Forschung für die Produktion von Morgen*). У периоду од 3 године, посматрали су MQL и суву обраду. На великом броју разноврсног материјала, скоро 60 студија је спроведено у оквиру компанија попут Боша, Даимлер-Крајслера и њима сличних. У **табели 5.1** су приказани резултати истраживања [99].

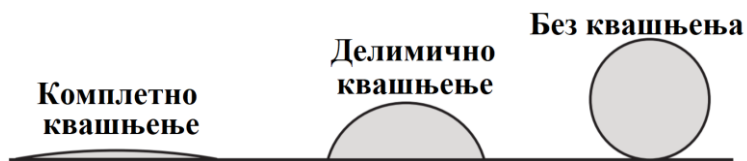
Табела 5.1 Резултати употребе MQL-а

Произвођач	Производ	Материјал	Врста обраде	Резултат
Добављач у аутоиндустрији	Кућиште гаса	Gd-AlSi-12Cu4	Глодање, бушење, развртање	Смањење цене производа за 8%
Произвођач преса за одсецање	Бушене и исечене плоче	Ск45	Глодање, бушење, развртање	Смањено је време процеса за 3min
Произвођач аутомобила	Зупчаници, мењачи	Термички обрађен Ч. 20MoCr4	Обликовање	Заштита околине, смањење цене производа за 5%
Произвођач алата	Алат	Алатни челик	Глодање, стругање	80% редукован посао одржавања и чишћења, бољи квалитет површина, мање време процесирања
Произвођач пнеуматских цилиндара	Конектор	А1 Ливени алуминијум GD – ZnAl4Cu1	Укопавање, урезивање навоја, забушивање	Чистије окружење, уштеда са искључењем СХП
Произвођач авиона	Компонента авиона	Отковак Al	Глодање	Заштита околине, мања цена машина
Произвођач турбина	Лопатице турбина	X22CrMoV 12.1, CrNi челик	Глодање	Утростручен животни век алата

Постоје разне врсте СХП-а које се могу користити у MQL методи. Сваки од СХП-а одговара одређеној врсти резања, њеним параметрима и жељеним резултатима исте. На пример, синтетички естри су пожељни за машинску обраду где је подмазивање императив, што је у случају већине материјала и операција. Ова СХП су осмишљена тако да имају малу вискозност док задржавају високу тачку кључања и запаљивости. То даје боље резултате под оптерећењем (великим брзинама резања и посмаку) и генерише мање испарења него код конвенционалних минералних уља. Додатно, примењена уља у СХП-у имају врло добру биоразградивост и веома малу токсичност. Пошто је врло мала количина уља примењена, делови се могу сматрати сувим (услов да се део сматра сувим је да је мање од 2% лубриканта присутно на струготини). Међутим, вероватно је да ће се на обратку наћи мања количина уља око резане ивице. Та мала количина уља може допринети корозионој отпорности, али може узроковати проблеме у неким секундарним операцијама.

Примена алкохола у саставном делу СПХ смањује способност за подмазивање због мале тачке запаљивости али повећава способност хлађења. Они су корисни када је потребно више хлађења него подмазивања. То је најчешће у случају када је материјал обратка такав да има природно подмазивање. Алкохоли имају јако добру биоразградивост. Токсиколошки и еколошки су безопасни. У односу на уља, при коришћењу алкохола се готово потпуно искључује остатак истих на обратку и струготини, чиме се ствара погодност за секундарне операције.

При анализи СПХ изражене су две врло важне карактеристике СПХ за примену у MQL-у: „квашљивост“ (енг. *Wetting*) и вискозност. На **слици 5.1** је дато сликовито објашњење појма „квашљивости“.



Сл. 5.1 Квашљивост

Што боље карактеристике квашљивости, боље је подмазивање. Течност која се шири по површини обрадкa боље залази у зону контакта између алата и предмета обраде. Квашење треба бити остварено и на алатау и на предмету обраде, као би оба материјала била узета у обзир. Брз начин одреживања квашљивости флуида је постављање капљице истог на жељену површину и посматрање колико добро се шири по истом. Што се боље шири, боља је квашљивост (сл. 5.1). Адитиви за висок притисак, попут сумпора, могу битно утицати на карактеристике квашљивости на различитим материјалима, те је због тога најбоље извршити наведено тестирање. На **слици 5.2** је приказан део тестирања [100].



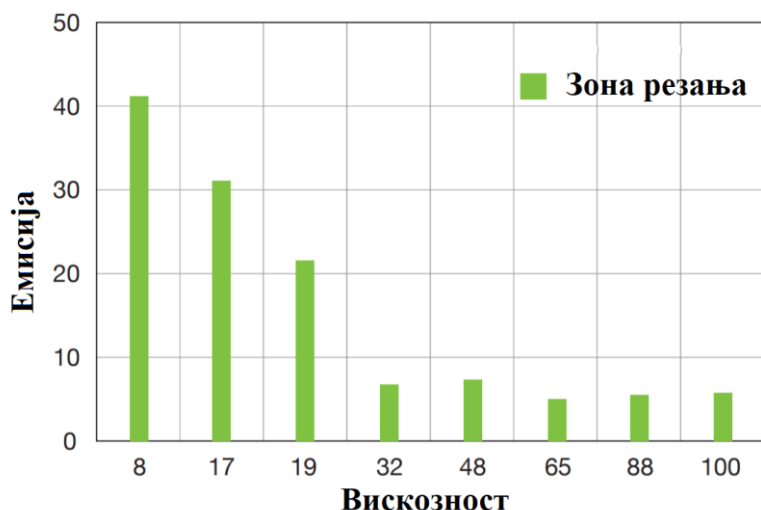
0.25 µL Water



0.25 µL 2210 EP

Сл. 5.2 Пример визуалног тестирања квашљивости СХП-а на нерђајућем челику

Са друге стране, вискозност је обрнуто пропорционална величина квашљивости. Што је боље квашење то је мања фискозност. На жалост, мања вискозност повећава теденцију стварања магле, тј. загађења оклоне са аеросолима. Како би се боље разумео поменути утицај, на **слици 5.3** дат је пример зависности емисије од вискозности при обради бушењем. Како би се емисија заржала на минимуму, Unist у свом асортиманза хлађење минималном количином, има СПХ са већом вискозношћу и тачком паљења ($>150^{\circ}\text{C}$).



Сл. 5.3 Емисија у зони резања у зависности од вискозности

Према наведеном јасно је да при избору СХП-а за MQL, потребно је да се балансира између карактеристике квашења и емисије. Поред тог да се при самом избору СПХ врши балансирање између квашења и емисије, постоји и начин балансирања у току производње али само код затворених обрадних центара - Аутоматско регулисање унутар затвореног обрадног центра на бази сензора за контролу емисије [101]. Како год, да се избор врши, висок квалитет MQL специфичних СПХ ће радити са минималним загађењем околине у односу на конценвионалне поступке хлађења и подмазивања. Неки од њих су приказани на **слици 5.4**.



Сл. 5.4 СХП за MQL

У каталогу прозивода фирми [5.1-5.4] ириказана је **систематизација** истих. Детаљно објашњење како тачно СХП са **слике 5.4** делује дато је у [101] а приказано у [102,103] заједно са специфичностима везаним за MQL обраду које су изнете у четвртном поглављу.

5.2 СИСТЕМАТИЗАЦИЈА И АНАЛИЗА СРЕДСТВА ЗА ХЛАЂЕЊЕ ПРИ ХЛАЂЕЊУ ХЛАДНИМ ГАСОМ ПОД ПРИТИСКОМ

При хлађењу гасом под притиском, основно средство у највећем броју случаја је ваздух. Примена ове методе за хлађење је заснована на употреби вртложне цеви. Суштина функционисања ове цеви је већ објашњена у поглављу 4.2. Овакав вид хлађења се најчешће додаје на суву обраду.

Систем за хлађење је врло прилагодљив и може бити постављен готово на било који обрадни центар, CNC машину или томе слично. Главне компоненте мобилног система су боца, вртложна цев и компресор [104]. Код стационарних система попут обрадних центара, чест је случај да исти поседују компресор са боцом интегрисаном у исти, те је заправо једини неопходни елемент вртложна цев.

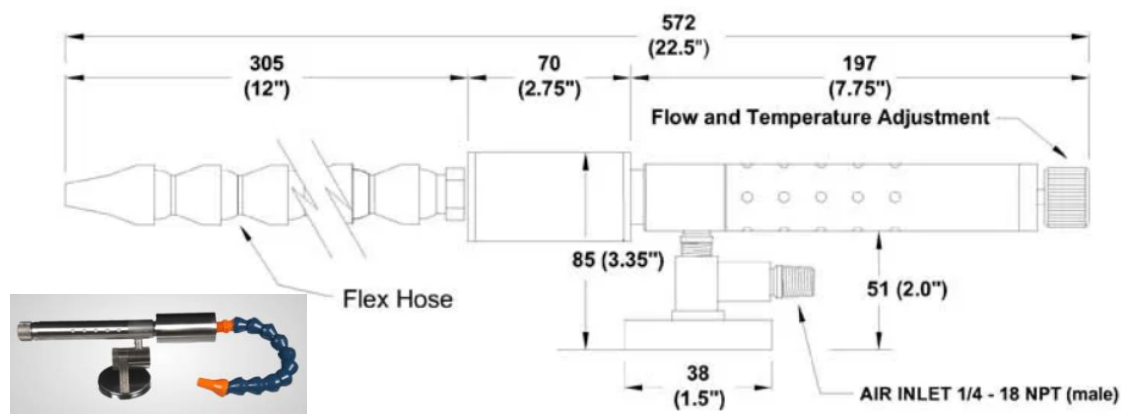


Сл. 5.5 Опрема система за хлађење ваздухом

Постоје разни произвођачи посматране опреме [105-107]. Чест је случај да се куповина исте врши раздвојено, од различитих произвођача и користити интегрисано у оквиру обрадног центра. На пример, фирме *Nexflow* и *Streamtek Corp* се баве производњом вртложних цеви за потребе разних видова обраде резањем. Интеграција на машине, начин функционисања у току саме обраде приказана је у видео снимцима креираним од стране истих фирми [108 – 111]. У оквиру њих је такође дат пример варијације њихових перформанси и набавних цена за подручје САД а у зависности од жељене величине вртложне цеви (у зависности од перформанси).

Према [111] оне варирају од 30 до 500 америчких долара у зависности од перформанси. Перформансе могу бити разне, почевши од габарита цеви, протока ваздуха, температурног интервала, притиска за који су намењене итд. У каталозима [105 , 107] у којим је извршена **систематизација** ових производа, чест је случај да се цене деле у три ранга према величини вртложне цеви: мала, средња и велика. Већина истих има већи број додатних могућности, међу којима су и варијације протока и самим тим подешавања температуре. Подешавањем вентила на крају врућег дела (дуже цеви) регулише се проток и температура на хладном крају (краћој цеви). Што више ваздуха изађе на топлој страни, редукује се проток хладног и његова температура. На слици 5.6 дат је пример мале вртложне цеви са називом „*FRIGID-X ADJUSTABLE SPOT COOLER*“ (model 56025A) произвођача *Nexflow* са својим детаљима.

FRIGID-X ADJUSTABLE SPOT COOLER - Model 56025A



Сл. 5.6 Пример мале монтажне вртложне цеви са млазницом произвођача Nexflow

Према својој спецификацији она може бити примењена за:

- Хлађење пластичних резаних обратка;
- Хлађење при зваривању;
- Хлађење ливене пластике;
- Хлађење електронских компонената;
- Хлађење при ласерској обради појединих метала.

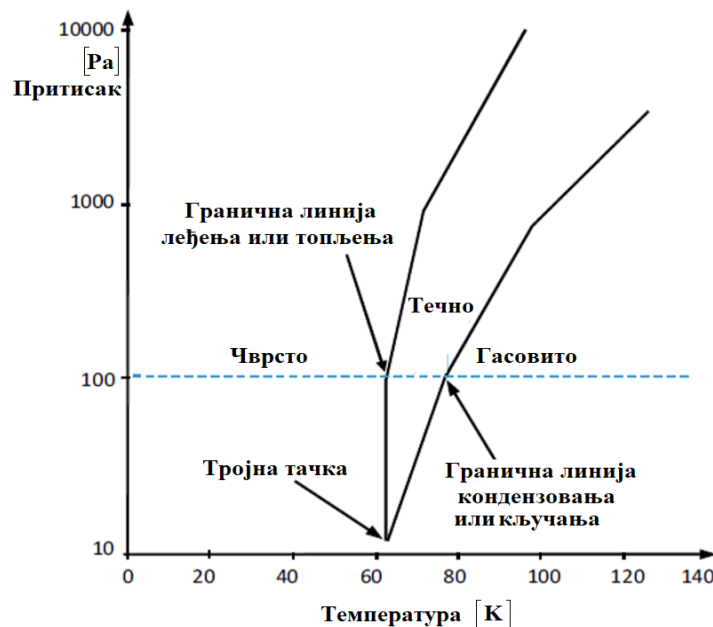
Поседује следеће карактеристике:

- Нема покретних делова;
- Нема електронике или хемикалија
- Малих габарита и масе;
- Мала цена;
- Бесплатно одржавање;
- Израђена је од трајног, нерђајућег челика;
- Могућност за подешавање температуре преко вентила;
- Могућност за примену различитих компресора.

5.3 СИСТЕМАТИЗАЦИЈА И АНАЛИЗА СРЕДСТВА ЗА ХЛАЂЕЊЕ КОД КРИОГЕНОГ ХЛАЂЕЊА

За потребе криогеног хлађења могуће је користити већи број течних гасова: хелијум, неон, кисоник, азот, угљендиоксид и др. Међу свима наведенима, гледано у односу на исплативост у погледу квалитета обраде, економску исплативост, еколошке норме, па и сама својства гаса, најоптималнији за коришћење код криогеног хлађења је азот (који је иначе саставни део ваздуха – 78%).

Као што је приказано на **слици 5.7** тачка кључања и тачка стврдавања азота (при притиску од 100 Pa) су на температурама 63,3 K и 77,4 K. Тројна тачка азота појављује се на атмосферском притиску од 12,463 Pa и температури од 63,15 K.



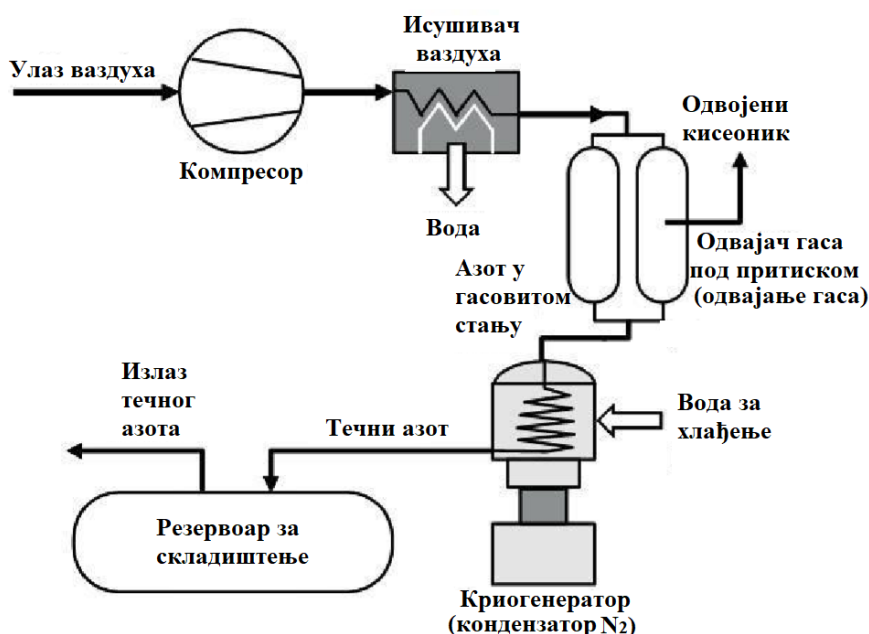
Сл. 5.7 Фазни дијаграм азота

Азот је сигуран за руковање, незапаљив и не изазива корозију. Надаље, он је инертан, без боје, укуса и мириса, а доступношћу и ценовно је најповољнији криогени флуид и то га чини идеалним за употребу у индустрији. То је гас који је лакши од ваздуха и њиме се на релативно јефтин и сигуран начин могу постићи температуре хлађења до 77 K ($\sim -196^{\circ}\text{C}$). Претежно се складишти у течном облику у *Dewar*-овим резервоарима који су приказани у поглављу 4.3.

Међутим, упркос свим повољним својствима, код коришћења течног азота, према [94], мора се обратити пажња на следеће:

- ✓ Концентрисани азот може смањити удео кисеоника у ваздуху па се зато рад с азотом мора одвијати у добро провретреном простору. Препоручује се променити ваздух у простору шест пута на сат, као и коришћење опреме за мерење удела кисеоника у ваздуху.
- ✓ Азот, као и опрема за азот је под високим притиском. Иако су притисци предвиђени за обраду треба имати адекватну опрему за рад под притиском.
- ✓ Експанзијом течног азота у атмосферу он нагло испарава. Та пара од азота упија водену пару, што доводи до појаве дима. Такође будући да је температура на којој се налази азот врло ниска може доћи до тешких опекотина па је обавезна употреба заштитних средстава.

За производњу течног азота користи се кондензатор ваздуха помоћу *Joule-Thompson*-ог ефекта адијабатског хлађења који се компресован гас наглом експанзијом хлади. Како је тачка кондензације кисоника различита од тачке кондензације азота, азот може бити дестилиран ван из течног ваздуха, затим компресован па опет кондензован. Једном када је течни азот уклоњен из коморе за дестилацију, складиштен је у резервоарима намењеним да издрже велике притиске или у претходно поменутих *Dewer*-овим резервоарима (боцама) [94].



Сл. 5.8 Шематски приказ постројења за производњу течног азота

На слици 5.8 приказано је постројење за производњу течног азота. Може се приметити да је у процесу производње азота само једна улазна јединица - енергија, док је вода коришћена као расхладно средство и враћена се у околину. Треба се нагласити да код производње течног азота нема додатних трошкова, као што су присутни припроизводњи течног CO₂ и CO_x.

Скупи системи за хлађење течним азотом су још увек јако неприступачни и економски тешко исплативи у серијској производњи металних елемената. Међутим, и ако је класификован као опасна роба, СХП (течни азот) је релативно лако купити. Произвођачи *Pixar* и *Airgas* су једни од највећих произвођача који омогућавају да се до производа дође релативно лако. Ко након куповине течног азота као таквог са све одговарајућом боцом, да би се исти имплементирао на неку радну станицу, по аналогији потребно је набавити сву опрему као што је приказано у поглављу 4.3 на примеру струга. На интернету нису јавно доступне информације о фирмама које услужно врше имплементацију целокупних система за криогено хлађење на већ постојеће радне центре итд. Доступни примери имплементације оваквих система у сврхе науке и производње унутар војне индустрије у САД, приказани су на видео снимцима [112-119]. У оквиру тих снимака се налази и историјски развој ове области.

6. ЗАКЉУЧАК

Прегледом литературе створен је увид у проблематику везану за машинску обраду резањем. Тачније, створен је увид у проблематику коришћења конвенционалног СХП-а, његове негативне утицаје на трошкове, човека и животну средину. Услед све строжијих закона о заштити животне средине, индустрија је под све већим притиском да одржава тренд континуалног развоја на свим пољима па и на пољу машинске обраде.

Другим речима, раст еколошке свести у свету, нове регулативе и пропис, економски губитци као и захтеви данашњег тржишта окренули су очи светске јавности на нужну потребу развоја и имплементације алтернативних врста хлађења у машинској обради. Тако је данас и унутар производне индустрије у фокусу заштита околине и човека па се већ говори о посебно прилагођеној машинској обради односно производњи користећи називе “*Green Manufacturing*“, “*Green Cutting*“.

Развојем алтернативних врста хлађења споменутих у раду, као што су обрада минималном применом СХП-а, криогена обрада, настоји се у скорој будућности напустити коришћене СХП-а. То су нове врсте хлађења које чине темељ савременог одрживог развоја и циљ им је постизање високих перформанси у обради одвајањем честица уз повећање сигурности и смањење трошкова као и уклањање негативног утјецаја СХП-а на људе и околну.

На основу прегледане литературе, може се утврдити како су резултати спроведених истраживања у овом подручју позитивни у смислу постојања реалне могућности да се у будућности у потпуности престане са коришћењем конвенционалних средстава за хлађење и подмазивање како би се сачувала животна средина и здравље оператера. То подразумева битан напредак који још увек треба бити постигнут на подручју израде алата и њихових превлака, као и нових еколошких прихватљивих техника хлађења и подмазивања. Напори стручњака би требали бити усмерени на проналажење адекватне замене за функције које би недостајале елиминацијом СХП, те би исте биле замењене коришћењем нових материјала алата и њихових превлака па применом алтернативних врста хлађења. Тренутно, овакав сценарио је незамислив, али растућа еколошка свеста и закони који штите радника и природу, примораће резну индустрију на корак напред ка прихватању алтернативних врста хлађења.

Додатно, експериментални резултати прегледане литературе при компарацији алтернативних врста хлађења у односу на конвенционалне показују да алтернативне технике имају висок потенцијал за смањење трошкова и побољшање конкурентности смањанjem потрошње ресурса.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] S. Sokolović, *Tehnologija proizvodnje i primene tečnih maziva*, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološki fakultet, 1998
- [2] V. Savić, *Tribologija i podmazivanje*, Ikos Novi Sad, 1995.
- [3] Доступно на: http://masinstvo.tehnickasd.edu.rs/PTS_teorija_IV.html, приступљено: 02. 09.2019.
- [4] Доступно на: <http://www.paragon-service.com/products/metalWorkingFluids.aspx>, приступљено: 02.09.2019.
- [5] Доступно на: <http://www.epoxyoil.com/shell.html>, приступљено: 22.10.2019.
- [6] Доступно на: www.osha.gov/SLTC/metalworkingfluids/metalworkingfluids_manual.html, приступљено: 02. 09.2019.
- [7] S. Kalpakjian, S.R. Schmid, *Manufacturing Engineering and Technology*, Pearson Education, Prentice Hall, 2010
- [8] Byres J.P., *Metalworking fluids (second edition)*, Taylor & Francis Group, CRC Press, 2006
- [9] Доступно на: www.osha.gov/SLTC/metalworkingfluids/metalworkingfluids_manual.html, приступљено 09.09.2019.
- [10] E. Brinksmeier, D. Mayer, A. G. Huesmann-Cordes, C. Herrmann, *Metalworking fluids – Mechanisms and performance*, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2015.
- [11] *51385 DIN - Lubricants – Processing Fluids for Forming and Machining of Materials – Terms*, Beuth – Verlag, 2013.
- [12] A. Walter, *Tribophysikalische und tribochemische Vorgänge in der Kontakt-zone bei der Zerspanung*, Shaker Verlag, Dr. – Ing. Dissertation RWTH Aachen, 2002.
- [13] Доступно на: <https://www.marketwatch.com/press-release/metalworking-fluids-market-2019-with-top-countries-data-market-size-industry-trends-growth-insight-share-competitive-analysis-statistics-regional-and-global-industry-forecast-to-2025-2019-08-20>, приступљено: 22.09.2019.
- [14] Доступно на: <https://easteconline.com/wp-content/uploads/2017/08/Brian-Hovik.pdf>, приступљено: 22.09.2019.
- [15] Доступно на: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/metalworking-fluids-market>, приступљено: 22.09.2019.
- [16] Доступно на: <https://straitsresearch.com/report/metalworking-fluids-market>, приступљено: 22.09.2019.
- [17] D. M. Lewis, E. Janotka, M. P. Whitmer M., T. A. Bledsoe, *Detection of microbial antigens in metal working fluids*, Intern. Biodeterio. Biodegradati. 2001.
- [18] V. Savić, O. Kovač, S. Sokolović, M. Kolb-Gologlavić, R. Zimakiljević, O. Nikolić, Lj. Kovač, *Obrada iskorišćenih ulja i emulzija*, Ikos Zenica, 1991.
- [19] R. Rakic, Z. Rakic, *Tribological aspects of the choice of metalworking fluid in cutting processes*, Journal of Materials Processing Technology, 2002.

- [20] Astakhov V.P., *Tribology of Metal Cutting*, Tribology and Interface Engineering Series, Elsevier Ltd., 2006.
- [21] Pedišić Lj., Pec Š., Šarić M., Sernc B, *Produženje radnog vijeka emulzija za obradu metala preventivnim održavanjem*, Goriva i Maziva. 2001.
- [22] Sheng P., Srinivasan M., *Multi objective process planning in environmentally conscious manufacturing: a feature-based approach*, Ann. CIRP 1995.
- [23] Martin Stear, *Metalworking Fluids—Clearing Away the Mist?*, Ann. occup. Hyg., 2005.
- [24] N. Canter, *Metalworking fluid mist: Strategies for Minimizing Exposure*, Tribol. Lubr. Technol. 3, 2005.
- [25] V.B. Lazarević, I.M. Krstić, Lj.M. Takić, M.L. Lazić, V.B. Veljković, *Bistrenje i filtracija suspenzije flokulisanih čestica iz hemijskog prečišćavanja otpadne vodene emulzije iz procesa obrade obojenih metala*, 2011.
- [26] D.Sokolović, D. Govedarica, *Aerosoli iz metaloprerađivačke industrije*, IV Simpozijum „Reciklažne tehnologije i održivi razvoj“, Kladovo, novembar, 2009.
- [27] D. Park, P.A. Stewart, J. B. Coble, *Determinants Of Exposure To Metalworking Fluid Aerosols: A Literature Review And Analysis Of Reported Measurements*, Ann. Occup, 2009.
- [28] A. T. Simpson, J. A. Groves, J. Unwin, M. Piney, *Mineral Oil Metal Working Fluids (MWFs)- Development of Practical Criteria for Mist Sampling*, Ann. occup. Hyg., 2000.
- [29] J.M. Dasch, J. B. D’Arcy, S. S. Kinare, Y. Yin, R. G. Kopple, S. C. Salmon, *Mist Generation from High-Speed Grinding with Straight Oils*, Tribol. Lubr. Technol, 2008.
- [30] Byrne G., Dornfeld D., Denkena B., *Advanced Cutting Technology, Laboratory for Manufacturing and Sustainability*, University of California, Berkley, 2003.
- [31] Chazal P.M., *Pollution of modern metalworking fluids containing biocides by pathogenic bacteria in France-reexamination of chemical tratements accuracy*, Eur. Journal of Epidemiology 11, 1995
- [32] Sokovic M., Mijanovic K., *Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting process*, Journal of Materials Processing Technology, 2001.
- [33] Hilal N., Busca G., Talens-Alessen F., Atkin B.P., *Treatment of waste coolants by coagulation and membrane filtration*, Chemical Engineering and Processing. 2004.
- [34] Mortier R.M., Fox M.F., Orszulik S.T., *Chemistry and Technology of Lubricants (3rd Edition)*, Springer Science+Business Media B.V. , 2010.
- [35] European Comission: EU REACH Directive, Environment Directorate General, 2006.
- [36] Bartz W.J., *Lubricants and the environment*, Tribology International 1998.
- [37] Ueno S., Shiomi Y., Yokata K.: *Metalworking fluid hand dermatitis*, Ind. Health 40, 2002.
- [38] TRGS (Technische Regeln für Gefahrstoffe) *Grenzwerte für die Luft am Arbeitsplatz “Luftgrenzwerte“ Bundesarbeitsblatt*; sowie Bundesarbeitsblatt, 2003

- [39] Alomar, A., 1994. *Occupational skin disease from cutting fluids*, Dermatologic Clinics, 1994.
- [40] Kleber M., Follmann W., Blaszkewicz M.: *Assiessing the genotoxicity of industrial cutting fluids under condition of use*, Toxicology Letters, 1994.
- [41] National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), *Criteria for a Recommended Standard – Occupational Exposure to Metalworking Fluids*, U.S. Department of health and human services, 1988.
- [42] Mackerer, C., *Health Effects of Oil Mists: A Brief Review*, Toxicology and Industrial Health, 1991.
- [43] Bergmann H., Rittel A., Iourtchouk T., Schoeps K., Bouzek K., *Electrochemical treatment of cooling lubricants*, Chemical Engineering and Processing, 2003.
- [44] Thorne, P., DeKoster, J.; Subramanian, P., *Environmental Assessment of Aerosols, Bioaerosols, and Airborne Endotoxins in a Machining Plant*, American Industrial Hygiene Association Journal, 1996.
- [45] Narutaki N., Yamane Y., Tashima S., and Kuroki H., *A New Advanced Ceramic for Dry Machining*, Annals of the CIRP, 1997.
- [46] Granger C., *Dry Machining's Double Benefit, Machinery and Producti*, Engineering 1994.
- [47] Feng S. C., Hattori M., *Cost and Process Information Modeling for Dry Machining*, Proceedings of the International Workshop on Environment and Manufacturing, 2000.
- [48] King N., Keranen L., Sutherland J., *Wet Versus Dry Turning: A Comparison of Machining Costs, Product Quality and Aerosol Formation*, SAE 2001.
- [49] Davim J.P., *Machining: Fundamentals and Recent Advances*, Springer Science+Business Media B.V. , 2008.
- [50] Hilal N., Busca G., Talens-Alesson F., Atkin B.P., *Treatment of waste coolants by coagulation and membrane filtration*, Chemical Engineering and Processing, 2004.
- [51] Pušavec F., Stoić A., Kopač J., *The role of cryogenics in machining processes*, Tehnički vjesnik, 2009.
- [52] Bierma T.J., Waterstraat F.L., *Total Cost of Ownership For Metalworking Fluids, Report of Illinois Waste Management and Research Center*, Illinois State University 2004.
- [53] Dudzinski D., Devillez A., Moufki A., Larrouquere D.: *A review of developments towarde dry and high speed machining of Inconel 718 alloy*, International Journal of Machine Tools & Manufacture (2004) 439-456
- [54] Lahres M., Doerfel O., Neumulerrr R., *Applicability of different hard coatings in dry machining an austenitic stele*, Surface and Coatings Technology, 1999.
- [55] Derflinger V., Brandle H., Zimmermann H., *New hard/lubricant coating for dry machining*, Surface and Coatings Technology Vol. 113, 1999.
- [56] Weinert K , Inasaki I., Sutherland J.W., Wakabayashi T.: *Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication*, CIRP- Anals, Manufacturing Technology Vol. 53 2004.

- [57] Schulz H., Dorr J., Rass I.J., Schulze M., Leyendecker T., Erkens G., *Performance of oxide PVD coatings in dry machinings operations*, Surface and Coatings Technology, 2001.
- [58] Tonsholf H.K., Mohlfeld A., *PVD-Coatings for wear protection in dry cutting operations*, Surface and Coatings Technology, 1997.
- [59] Dreyer K., Westphal H., Sottke V., *New Developments for Hardmetals, Cermets and Coatings in Experiment and Practice*, VDI Seminar „High performance processes in cutting“, 2000.
- [60] Porat R., Ber A.: *New approach of cutting tool material-Cermets*, Annals of CIRP 1999.
- [61] Whitney E.D.. *Ceramic cutting tools – materials, development and performance*, Noyes publications, Park Ridge, New Jersey, 2000.
- [62] Brucher M.: *CVD – Diamant als Schneidstoff*, Dissertation, Universitat Berlin (2003)
- [63] Klocke F., Krieg T.: *Coated Tools for Metal Cutting – Features and Applications*, Annals of the CIRP, 42 (1999) 515-525
- [64] Van den Berg H., Westphal H., Tabersky R., *Development and Applications of New Composite and Multilayer Coatings*, EU Conference on Hard Materials and Diamond Tooling, 2002.
- [65] Ducros C., Benevent V., Sanchette F., *Deposition, Characterization and Machining Performance of Multilayer PVD Coatings on Cemented Carbide Cutting Tools*, Surface and Coating Technology, 2003.
- [66] Hong Q., Gu L., Yu X., *The Application of Green Manufacturing Technology in Mechanical Processing*, Advanced Materials Research, 2011.
- [67] Godlevski V.A., *Water Steam lubrication during machining*, Tribologia, 1999.
- [68] Junyan L., Rongdi H., Li Z., Hongbin G., *Study on lubricating characteristics and tool wear with water vapour as coolant and lubricant in green cutting*, Wear, 2007.
- [69] Sharma V.S., Dogra M., Suri N.M., *Cooling techniques for improved productivity in turning*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2009.
- [70] Cakir O., Kiyak M., Altan E., *Comparison of gases applications to wet and dry cuttings in turning*, Journal of Materials Processing Technology 153, 2004.
- [71] Ko T.J., Kim H.S., Chung B.G., *Air-oil cooling method for turning of hardened material*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 15, 1999.
- [72] Klocke F., Eisenblatter G., *Dry Cutting*, Annals of the CIRP Vol.46, 1997.
- [73] Dixit U.S. , Sarma D.K. , Davim J.P., *Environmentally Friendly Machining* , Chapter 2 – Machining with Minimal Cutting Fluids, 2012.
- [74] Dubzinski D., Devillez A., Moufki A., Larrouquere D., Zerrouki V., Vigneau J., *A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 2004.
- [75] Silva L.R., Mattos M.F., Amaral L.V., Correa E.C., Brandao J.R.: *Behavior of surface integrity on cylindrical plunge grinding using different cooling systems*, Materials Research Vol. 14, 2011.

- [76] Sharma V.S., Dogra M., Suri N.M., *Cooling techniques for improved productivity in turning*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2009.
- [77] Braga D.U., Diniz A.E., Miranda G.W.A., Coppini N.L.: *Using a Minimum Quantity of Lubricant (MQL) and a Diamond Coated Tool in The Drilling of Aluminium-silicon Alloys*, Journal of Materials Processing Technology, 2002.
- [78] Brinksmeier E., Walter A., Janssen R., Diersen P., *Aspects of Cooling Lubrication Reduction in Machining Advanced Materials*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2000.
- [79] Machado A.R., Wallbank J., *The Effect of Extremely Low Lubricant Volumes in Machining*, Wear, 1997.
- [80] Fratila D., *Evaluation of near-dry machining effects on gear milling process efficiency*, Journal of Cleaner Production 17, 2009.
- [81] Weinert K., Inasaki I., Sutherland J.W., Wakabayashi T.: *Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication*, CIRP- Annals, Manufacturing Technology Vol. 53, 2004.
- [82] T. Walker, *The MQL handbook – A guide to machining with Minimum Quantity Lubrication*, Unist, Canada, 2015.
- [83] Hilsch R.: *The use of the expansion of gases in a centrifugal field as cooling process*, Review of Scientific Instruments Vol.18, 1947.
- [84] Pinar A.M., Uluer O., Kirmaci V.: *Optimization of counter flow Ranque-Hilsch vortex tube performance using Taguchi method*, International Journal of refrigeration Vol. 32, 2009.
- [85] Gao C.: *Experimental Study on the Ranque-Hilsch Vortex Tube*, Proefschrift, Technische Universiteit Eindhoven, 2005.
- [86] Aronson R.B., *Vortex tube: cooling with compressed air*, Machine Design 48, 1996.
- [87] Liu C., Hu R.: *Cooling air from vortex tube applied to cutting tool cooling*, Manufacturing Technology & Machine Tool 1, 1997.
- [88] Choi H.Z., Lee S.W., Jeong H.D.: *A comparison of the cooling effects of compressed cold air and coolant for cylindrical grinding with a CBN wheel*, Journal of Materials Processing Technology 111, 2001.
- [89] Liu J., Chou K.: *On temperatures and tool wear in machining hypereutectic Al-Si alloys with vortex tube cooling*, Machine Tools & Manufacture Vol. 47, 2007.
- [90] Kim S.W., Lee D.W., Kang M.C., Kim J.S.: *Evaluation of machinability by cutting environments in high-speed milling of difficult-to-cut materials*, Journal of Materials Processing Technology 111, 2001.
- [91] Nandy A.K., Gowrishankar M.C. Paul, S., *Some studies on high-pressure cooling in turning of Ti- 6Al-4V*, International Journal of Machine Tools Manufacturing. 49, 2009.
- [92] Choi H.Z., Lee S.W., Jeong H.D., *The cooling effects of compressed cold air in cylindrical grinding with alumina and CBN wheels*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 127, 2002.

- [93] Sarma D.K., Dixit U.S., *A comparison of dry and air-cooled turning of grey cast iron with mixed oxide ceramic tool*, Journal of Materials Processing Technology 190, 2007.
- [94] T.M. Flynn, *Cryogenic engineering, Second Edition Revised and Expanded*, CRYCO, New York, USA, 2005.
- [95] Доступно на: <https://unist.com/solutions/machining-cutting.html>, приступљено: 22.10.2019.
- [96] Доступно на: https://iolitec.de/en/technology/functional-fluids-additives?gclid=CjwKCAjw9L_tBRBXEiwAOWVVCbixnW1dovVOiWoDxU6HCvuYJ5_184TF7h9yrzk6nLeI-lmcBOOJchoCZ1wQAvD_BwE, приступљено: 22.10.2019.
- [97] Доступно на: http://www.lincoln-orsco.com/?utm_source=google&utm_medium=cp&gclid=CjwKCAjw9L_tBRBXEiwAOWVVCTOYxmpM_en_IU1RoLb5QnMxoTLFJDUTlehPfroeQ3wCBLdXb1l74RoCJggQAvD_BwE, приступљено: 22.10.2019.
- [98] Доступно на: https://www.nyelubricants.com/?gclid=CjwKCAjw9L_tBRBXEiwAOWVVCdLfb_M131UDCGyY_W5dqX_kXrZMCqoG0ey7ENMz_zTEAD_U_4Sz-hRoCdwUQAvD_Bw, приступљено: 22.10.2019.
- [99] Unfallversicherung, Deutsche G. "Minimum Quantity Lubrication for Machining Operations." MQL for Machining Operations. (Article), BIG/GUV-I718E, (November 2010)
- [100] Oberg, Erik, Jones D., Franklin, Horton L., Holbrook, Ryffel H. Henry, Jones D. Franklin. *Machinery's Handbook 29th Edition Toolbox*. Industrial Press, 2012
- [101] T. Walker, *The MQL handbook – A guide to machining with Minimum Quantity Lubrication*, Unist, Canada, 2015.
- [102] Доступно на: <https://www.youtube.com/watch?v=aP3glc4HoWg>, приступљено: 22.10.2019.
- [103] Доступно на: <https://www.youtube.com/watch?v=uoqDMPzSyGU>, приступљено: 22.10.2019.
- [104] B. Alsayyed, S. Aldajah, M.O. Hamdan, *Vortex Tube Impact on Cooling Milling Machining*, Proceedings of the ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE2012, USA 2012.
- [105] Доступно на: <https://www.nexflow.com/>, приступљено: 22.10.2019.
- [106] Доступно на: http://www.exair.com/index.php/buy-now/vortex-tubes-and-spot-cooling-products/adjustable-spot-cooler.html?gclid=Cj0KCQjw18XtBRDAARIsAKfwtxBk948B4dxx71Kb3gNiqlHRhaRelC2Z8rGl3LqZP3rUkFFdx83X9AaAkalEALw_wcB, приступљено: 22.10.2019.
- [107] Доступно на: <https://stream-tek.com/>, приступљено: 22.10.2019.
- [108] Доступно на: <https://www.youtube.com/watch?v=Hn8hDY4bvpI>, приступљено: 22.10.2019.
- [109] Доступно на: <https://www.youtube.com/watch?v=DevBGnT2xhI>, приступљено: 22.10.2019.
- [110] Доступно на: <https://www.youtube.com/watch?v=Lx01icLBJTo>, приступљено: 22.10.2019.

- [111]Доступно на: <https://www.youtube.com/watch?v=rTyITvHJTsQ>, приступљено:
22.10.2019.
- [112]Доступно на: <http://www.day-impex.co.uk/dilvac-dewar-flasks.html>, приступљено:
22.10.2019.
- [113]Доступно на: <https://www.youtube.com/watch?v=qfubbFtViIE>, приступљено:
22.10.2019.
- [114]Доступно на: <https://www.youtube.com/watch?v=FZ3YgPIPujM>, приступљено:
22.10.2019.
- [115]Доступно на: <https://www.youtube.com/watch?v=cd1-rkr7BEA>, приступљено:
22.10.2019.
- [116]Доступно на: <https://www.youtube.com/watch?v=FZ3YgPIPujM>, приступљено:
22.10.2019.
- [117]Доступно на: <https://www.youtube.com/watch?v=xQ9dXsd9YeI>, приступљено:
22.10.2019.
- [118]Доступно на: https://www.youtube.com/watch?v=iW_y25rfM-M, приступљено:
22.10.2019.
- [119]Доступно на: <https://www.youtube.com/watch?v=92ZZ6L6luA0>, приступљено:
22.10.2019.