

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Војна академија Универзитета одбране у Београду



Назив студијског програма: Војноиндустријско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Наоружање

Предмет: Производне технологије

Број индекса: 520/2011

Александра Н. Орешчанин

**Обрада метала резањем са минималном количином средства за хлађење и
подмазивање**

Дипломски рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. **др Богдан Недић - ментор**
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____



Основне студије: **Војноиндустријско инжењерство**

Студијско подручје (усмерење): **Наоружање**

Име и презиме: **Александра Орешчанин**

Број индекса: **520/2011**

ПРИЈАВА ДИПЛОМСКОГ РАДА

Тема рада: **Обрада метала резањем са минималном количином средства за хлађење и подмазивање**

Задатак: У оквиру дипломског рада потребно је извршити прикупљање и систематизацију података о савременим системима за хлађење и подмазивање (СХП) у обради метала резањем. Посебну пажњу у раду посветити хлађењу са компримованим ваздухом ("сува обрада") и хлађењу са минималном количином средства за хлађење и подмазивање. Анализирати могућност примене средства за хлађење и подмазивање са нанофлуидима. У посебном делу рада извршити моделирање једног уређаја за пословање са СХП.

Дипломски рад треба да садржи следеће целине:

1. Уводна разматрања,
2. Савремени системи за хлађење и подмазивање
3. Примена компримованог ваздуха за обраду резањем,
4. Примена СХП са нанофлуидима,
5. Пример пројектовања уређаја за пословање са СХП,
6. Закључци
7. Литература.

Ментор:

Др Богдан Недић, редовни професор

Крагујевац, 25.04.2020.

Резиме

Средства за хлађење и подмазивање побољшале су у многим сегментима обраде метала резањем. Развојем технологија било је све потребније укључивање поменутих средстава како због бољег квалитета обраде, тако и због заштите алата и обрадног материјала. Такође, било је неопходно наћи баланс између економије и заштите животне средине и оператера. У том циљу су креирани системи за хлађење компримованим ваздухом и хлађење минималним коришћењем средстава за хлађење и подмазивање. У време напредне технологије, последњих година развијене су течности које у себи садрже наночестице, поред базног средства за хлађење и подмазивање. Нанофлуиди заузеле су посебно место при употреби код обраде метала резањем. Смањењем количине течности, смањују се и потребни системи за допремање тих средстава. Посебна пажња посвећена је нанофлуидима и системима који их примењују. Принцип *CAD* пројектовања извршног елемента *MQL* система приказан је на крају рада.

Кључне речи: средства за хлађење и подмазивање, минималне количине средстава за хлађење и подмазивање, обрада метала резањем, системи за допремање средстава, нанофлуиди, наночестице, *MQL* систем.

Abstract

Coolants and lubricants have improved in many segments of metalworking by cutting operation. With the development of technology, it was increasingly necessary to include aids for better quality of processing, as well as protection of tools and processing materials, but it was also necessary to find a balance between the economy and environmental and operators protection. According, compressed air - cooling systems and cooling with minimal use of coolants and lubricants agents have been created. In the age of advanced technology, nanoparticle-containing fluids have been developed in recent years, in addition to the base coolants and lubricants. Such liquids - nanofluids have taken a special place when it is use in metal processing by cutting. By reducing the amount of fluid, the systems who transport these funds are also size - reduced. Special attention is paid to nanofluids and the systems that apply them. The principle of *CAD* design of the executive element *MQL* system is shown at the end of the paper.

Key words: coolants and lubricants, minimum quantities of coolants and lubricants, metal cutting, cutting systems, nanofluids, nanoparticles, *MQL* system.

САДРЖАЈ

1. Увод.....	2
2. Савремени системи за хлађење и подмазивање.....	4
2.1. Сува обрада и употреба минималне количине средстава за хлађење и подмазивање	7
2.2. Типови MQL система	7
3. Примена компримованог ваздуха за обраду резањем	13
3.1. Хлађење компримованим ваздухом	16
3.2. Хлађење маглом	17
4. Примена СХП са нанофлуидима	19
4.1. Методе производње нанофлуида.....	20
4.2. Процеси машинске обраде и примена нанофлуида у операцијама резања метала	22
4.3. Топлотна проводљивост материјала примењених у СХП	24
4.4. Нанофлуиди различитих састава и њихов утицај на алат и обрадак.....	25
5. Пример CAD пројектовања извршног елемента система за минималне употребу СХП	28
Моделирање MQL инјектора употребом CAD софтвера CATIA V5.....	30
6. Закључак	38
7. Литература.....	40

1. Увод

Обрада метала резањем је један од највише коришћених производних процеса за израду, обраду и монтажу делова врло сложених конфигурација од којих се захтева висока тачност облика и димензија као и висок квалитет обрађених површина. Данас, сви обрадни процеси треба да задовоље строжије захтеве производње који укључују продуктивност, ефикасност, квалитет обраде, као и поузданост, потрошњу енергије и еколошке стандарде. [1]

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.

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. [2]

Израда одређеног предмета састоји се од више операција обраде, поступака 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 трења, ослобађа се топлота која утиче на физичке, хемијске, механичке и остале карактеристике алата и предмета обраде. [3]

У производну индустрију уведена су средства за хлађење и подмазивање (СХП) како би се побољшале карактеристике триболошких процеса присутним на контактним површинама алата и предмета обраде приликом обраде резањем. [4]

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 помичних брзина. Температуре у зони резања које се постижу у овим условима скраћују век трајања алата, утичу на тачност димензије и интегритет површине обрађеног комада. Коришћењем СХП-а тежи се смањивању негативног утицаја 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 повећава век трајања алата и побољшава карактеристике финалног производа.

Поред позитивних карактеристика СХП-а, постоје негативни ефекти на човека и околину. Услед високе стопе коришћења средстава и несавесно одлаганих материја у околину, довело је до невероватно много штетних дејстава, самим тим нужно је пронаћи нова ефикаснија решења. [5]

Како би се задовољиле потребе тржишта, без смањења резултата како техничког решења и профита, како би се обрадили захтевни материјали и смањили трошкови у смислу набавке, коришћења и каснијег одлагања средстава за хлађење и подмазивање, применом нових технологија и метода настоји се у коришћењу истих, у знатно мањим количинама. [6]

Хлађење компримованим ваздухом и хлађење са минималном количином средства за хлађење и подмазивање, омогућавају редукцију топлоте у зони резања допуштајући оператерима да оптимизују процес обраде. Њиховим коришћењем, могуће је 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. [7]

Погоршање површинске храпавости је директно везано уз трошење алата. Век трајања алата односно његово трошење је јако осетљиво на промене услова резања, стога 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 полу суву 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. [8]

Машинска обрада метала резањем је најзаступљенији вид коришћења обраде метала у свим сегментима индустријске производње. У овом случају, СХП имају веома важну улогу у минимизирању времена процеса производње, финансијску уштеду и потрошњу енергије. У овом раду описан је значај обраде резањем и примена минималних количина средстава за хлађење и подмазивање као и утицај истих на радни алат и обрадни предмет. Додатно, илустроване су погодности карактеристика нанофлуида.

У другом поглављу представљени су савремени системи за хлађење и подмазивање, развој и употреба суве обраде и минималних количина средстава за хлађење и подмазивање, начине довођења у зону резања и њихове разлике. Треће поглавље садржи опис примене компримованог ваздуха и хлађење маглом. Четврто поглавље детаљно описује СХП са нанофлуидима, методе производње нанофлуида, процесе обраде резањем и коришћење нанофлуида, као и утицај на алат и обрадак, математички облик одвођења топлоте по Њутновом закону, његове добре особине и графички приказане упоредбе са основним СХП – ом, односно минималним количинама средстава. У петом поглављу приказан је пример CAD пројектовања извршног елемента система за употребу минималне количине СХП-а.

2. Савремени системи за хлађење и подмазивање

Средства за хлађење и подмазивање (СХП) су комплексне мешавине супстанци, које се константно мењају услед хемијских, физичких и микробиолошких фактора, тиме значајно утичући на одвијање технолошких поступака. Истраживања и употреба првих флуида за поступке обраде метала датирају средином XVIII века. Проучавање утицаја флуида на редукацију трења између алата и материјала и одвођење топлоте је био примаран током првих истраживања. Највећи напредак у развоју СХП - а дошло је за време Прве индустријске револуције, коришћењем парних машина, и наставак развоја узлазном путањом током Друге индустријске револуције. На **слици 2.1.** приказан је хронолошки развој средстава за хлађење и подмазивање.

	Подстицаји	Утицаји на састав СХП-а
< 1800 г.	потражња за машинским металима	Развој првих средстава на природној бази (биљна и животињска уља)
1800 - 1899	Индустријализација (машине и алати) Употреба минералних уља	Замена природних компоненти са минералним уљима Прва истраживања везана за својство подмазивања примењеног средства
1900 - 1999	Побољшани алати Напредни алати и машине Масовна производња	Додавање хемијских супстанци у циљу побољшања техничких перформанси Примена хлорованих спојева, борне киселине и осталих штетних супстанци Редуковање количине минералних уља у СХП-у (повећањем цене сирове нафте)
2000 - данас	Прописи Енергетска ефикасност и искоришћеност материјала	Забрана и елиминација хлорованих супстанци и осталих штетних адитива Процене одрживости примењиваних СХП-а Процене истраживаних примењиваних СХП-а

Слика 2.1. Хронолошки развој средстава за хлађење и подмазивање [10]

Технолошке функције СХП-а су:

- подмазивање површина алата на којима се развија трење (предња и задња површина резног алата)
- хлађење алата и обратка, чиме се спречава повећање температуре, успорава трошење алата и омогућава обрада већим брзинама
- одвођење (испирање) одвојених честица и прашине с алата и обратка, чиме се редукује трошење алата и побољшава квалитет обрађене површине
- смањење силе резања
- антикорозиона заштита – заштита обрађене површине од штетног деловања околине.

Начини довођења СХП – а:

- слободни млаз
- под ниским притиском
- под високим притиском
- компримованим ваздухом.

Флуиди који се примењују у поступцима обраде метала класификују се на основу различитих критеријума као што су: састав (базно средство), производни процес (флуиди за поступке резања/одвајања, флуиди за поступке обликовања деформисањем, флуиди за поступке брушења итд.) и количина флуида (конвенционалне обраде, обраде са минималним количинама средстава за хлађење и подмазивање – енгл. *minimum quantity lubrication MQL*, или „суве“ обраде енгл. – *DRY cutting* итд.)

Према саставу СХП делимо на средства на бази воде чија је примарна функција хлађење алата и обратка и средства на бази уља чија је примарна функција подмазивање контактних површина. Средства на бази воде деле се још на емулзије (мешавине воде и уља у односу 95% : 5%) и водене растворе. Због тога што су веома нестабилне, емулзије се редовно стабилизују емулаторима који се састоје од липофилног и хидрофилног дела и на тај начин омогућавају ефикасно распршивање уљаних капљица у води. **Табела 1.** приказује упоређивање средстава на бази воде и средстава на бази уља. [10]

Табела 1. упоређивање средстава на бази воде и средстава на бази уља [10]

Компонента	Количина(%)		
	Водени раствори	Емулзије (5%)	Средства на бази уља
Моторно уље	-	3,5 - 4,0	75 - 100
Емулгатори	-	0,5 - 1,0	-
Везива	-	0,05 - 0,25	-
рН раствори	5	-	-
Инхибитори корозије	10	0,25 - 0,50	0 - 5
Антифрикциони додаци	4	0 - 0,5	5 - 20
Биоциди	2	/	-
Антиоксиданси	-	-	0 - 2
Побољшивачи подмазивања	9	-	0 - 10
Вода	70	95	-

2.1. Сува обрада и употреба минималне количине средстава за хлађење и подмазивање

MQL, такође позната и као микромазива, или најближе сувој обради, је последња генерација технологије доношења течности на површине алата и метала при обради резањем. Коришћењем ове технологије, мала количина течности, када је правилно селектована и примењена, може направити знатно побољшање рада алата. У стандардним операцијама које користе велике количине течности за хлађење, смањење количина се прилагођавају одређеним материјалима и захтеваном доприносу при обради. Код *MQL*, важне су и секундарне карактеристике, односно утицај на околину. Оне укључују безбедност (људски контакт и природу), биоразградивост, оксидацију и безбедно складиштење. Ово је веома битно, јер мазиво мора бити компатибилно са околином, због дугорочне употребе у малим количинама.

Код *MQL*-а, подмазивање се постиже различитим мазивима, док се минимално хлађење постиже компримованим ваздухом који доспева до алата и обрадног дела. Поред тога, *MQL* редукује термички удар и може повећати интегритет површине (смањена храпавост) обрадног материјала при обради алатима високог притиска.

2.2. Типови *MQL* система

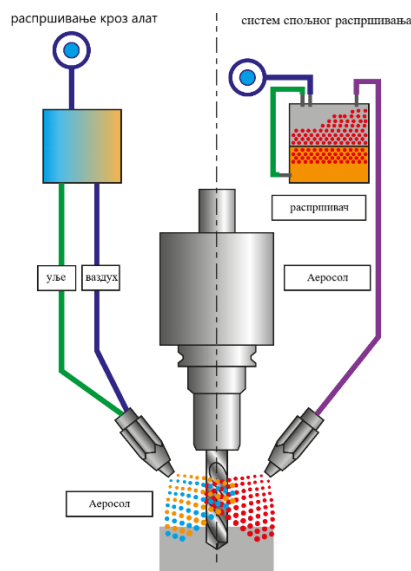
Постоје два основна типа на које можемо поделити *MQL* системе:

- систем спољног распршивања и
- распршивање кроз алат.

Такви системи приказани су на **слици 2.2**. Систем спољног распршивања састоји се од резервоара са расхладном течношћу повезана цевима са једном или више млазница. Систем се може налазити у близини машине или на машини и има независно подесив проток ваздуха и притиска за избалансирано довођење расхладних средстава. Повољан, преносив и подесив за скоро све машинске операције. Систем распршивања кроз алат је доступан у две конфигурације, засноване на методи стварања магле (ваздух и уље). Први је спољно мешање или једноканални систем. Овде се уље и ваздух мешају споља и провлаче кроз вретено и алат до зоне сечења. Предност оваквог система је једноставност и ниска цена. Погодни су за накнадну уградњу на постојеће машине са високим притиском, захваљујући могућности хлађења алата. Лаки су за коришћење, нема критичних делова унутар вретена. Недостатак је што се магла подвргава дисперзији и одвајању током путовања кроз цев. Да би се смањио губитак уљаних капљица, користи се магла сачињена од релативно ситних честица, која често ограничава количину подмазивања која се може испоручити до зоне сечења и последично утиче на перформансе процеса сечења.

Друга конфигурација чини систем унутрашњег мешања или двоканални систем. У двоканалном систему најчешће се две паралелне цеви проводе кроз вретено да би се уље и ваздух довели до унутрашњег мешања у близини држача алата на коме се ствара магла. Овакав систем захтева посебно дизајнирано вретено. Такав систем има мању дисперзију и мањи губитак капљица од једноканалног система односно спољашњег мешања. Такође имају већу брзину подесивости алата између резова или испоруке магле приликом сечења.

Међутим, систем је теже одржавати, јер су најбитнији делови смештени унутар вретена. Такви системи приказани су на **слици 2.** [11]



Слика 2.2. *MQL* системи: систем спољног распршивања и распршивање кроз алат [11]

Иако доприноси значајним побољшањима у поступцима обраде материјала, присутност и примена СХП – а са собом доноси значајне ризике. Негативне последице примене СХП – а су:

- могућност стварања диоксида (једињења на бази хлора)
- штетно дејство на здравље (карциноми, кожна обољења, респираторне болести, алергијске реакције, проблеми са очима итд.)
- штетно дејство на околину
- штетно дејство на машине и алате
- већи трошкови одржавања
- опасност од пожара (СХП који садрже уље)
- микробиолошка контаминација (СХП који садрже воду).

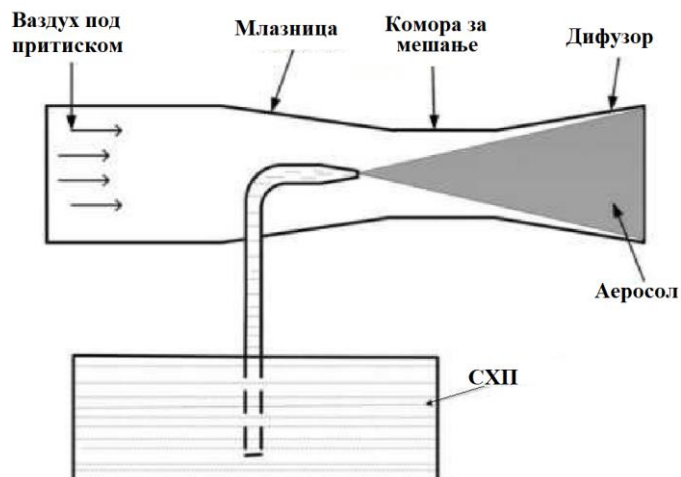
Одржавање и коришћење СХП – а представља велики изазов с еколошког и економског аспекта. Последњих пар деценија донесени су многи прописи у погледу заштите околине и очувања здравља, које ограничавају или у потпуности забрањују примену одређених хемијских супстанци (нпр. испарљивих једињења, биоцида итд.) борна киселина, аминокиселине и хлорисани производи били су веома примењивана једињења, али када је откривено да могу узроковати разне здравствене проблеме брзо су се нашли на листи забрањених супстанци. Иако се тежи максималном смањивању количине, савремени СХП и даље садрже високе количине штетних адитива. [10]

Због штетних последица примене СХП – а дошло је до убрзаног развоја *Dry* и *MQL* система. Примена *Dry* и *MQL* система представља алтернативу овом проблему, због тога што се користе минималне потребне количине за хлађење и подмазивање, најчешће под високим притиском. Захваљујући одличној способности подмазивања и биоразградивости, код *MQL* система највише се примењују биљна уља и етри. Упоређујући количине средстава код *MQL* система и класичних система где се СХП користе обилно, уочава се значајна редукција примењиваног средства. Наиме, просечни протоци код *MQL* система су $q = 50 \text{ ml/h}$, док је код класичних система тај износ доста већи нпр. $q = 150 \text{ l/h}$. Предности примене *MQL* система су вишеструке: здравија околина, већа сигурност при коришћењу, смањен штетан утицај на људски организам, мања потрошња уља и енергије, лакша рециклажа честица, мањи трошкови одржавања алата, већа постојаност алата и већа продуктивност. *Dry* и *MQL* системи могу се користити код обраде са алатима дефинисане геометрије резног дела, док код обраде где резна оштрица није геометријски дефинисана долази до пуно веће деформације, што води до већег трења, а самим тим и до развијања пуно већих температура, па је примена СХП – а неопходна. **Слика 2.3.** Зависност коришћења СХП – а и начина обраде [10]



Слика 2.3. Зависност коришћења СХП – а и начина обраде [10]

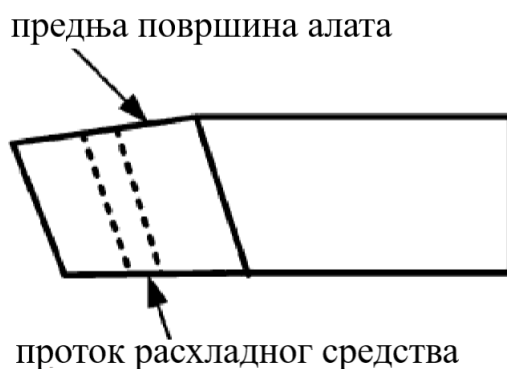
Функционалност и ефикасност *MQL* система може се унапредити специјалним средствима побољшаних карактеристика као што су нпр. нанофлуиди. Конвенционални системи допремања великих количина СХП – а до контактних зона веома су неефикасни, јер СХП тешко могу допрети до најкритичнијих зона. Пуно ефикаснија метода је примена „магле“ тј. аеросола у ваздуху (честице СХП – а распршене у ваздуху) под високим притиском. Таква метода се редовно примењује код *MQL* система. Код такве методе користи се ејектор – распршивач који помоћу компримованог ваздуха распршује честице уља. На **слици 2.4.** шематски је приказано допремање СХП – а код *MQL* система [10]



Слика 2.4. Шематски приказ довођења СХП-а код MQL - а [10]

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. [9]

Постоји и други начин достављања расхладне течности кроз алат у зону високих температура резања. Слика 2.5. 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.



Слика 2.5. Шематски приказ довођења СХП-а кроз алат [10]

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 - 500 ml/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 [9],
- 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. [9]

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. 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. [12]

Производи израђени уз коришћене *MQL* - а су били једнаког или бољег квалитета од производа направљених конвенционалном мокром обрадом с пуно већим количинама средстава за хлађење и подмазивање. Експерименти спроведени при операцији обимног глодања (енгл. *End mill*) уз *MQL* као резултат дају 30 - 40 % дужи век трајања алата и 20 - 30 % мању резултујућу силу у поређењу са конвенционалним хлађењем. [13]

MQL техника се показала успешном из перспективе века трајања алата, квалитета обрађене површине и ефикасног избегавања појаве заосталог напона при обради легуре титанијума. [14]

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. [15]

Истражен је утицај *MQL* - а 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* - а температура била 1000 °C. Разлика температуре од 60 °C је еквивалентна разлици брзине резања од 50 m/min. Захваљујући блажем ефекту хлађења, температуре у зони резања ипак расту у односу на конвенционалну мокру обраду. [16] Тиме се поставља питање о саставу гасова који емисијом одлазе у атмосферу, а настају услед изложености одређене количине СХП - а нанесеног *MQL* техником још већим температурама него код конвенционалне мокре обраде.

Компримовани ваздух путује млазницом и долази до зоне мешања. Због суженог пресека у зони мешања долази до смањења притиска тј. статички притисак је нижи од атмосферског што за последицу има стварање вакуума помоћу којег се СХП усисава из распршивача.

На слици 2.6. приказан је један од начина добаве СХП – а код *MQL* обраде путем три млазнице. Флуид добављен кроз млазницу 1 служи како би се редуковало трење између алата и обратка, како би се смањило трошење материјала са доње површине алата (eng. *Flank Wear*). Флуид добављен кроз млазницу 2 поспешује формирање одвојене честице, али и одвођење топлоте из смицајуће зоне, док флуид добављен кроз млазницу 3 одводи топлоту из зоне контакта предње површине алата и одвојене честице. Систем добаве СХП – а помоћу спољних млазница је релативно учинковит, иако је пуно практичнији начин добављања унутрашњим каналима направљеним у самом алату. [17]



Слика 2.6. *MQL* обрада са добављањем СХП-а помоћу три млазнице [17]

3. Примена компримованог ваздуха за обраду резањем

Важност примене хлађења при машинској обради је неоспорна. Средства за хлађење продужују век трајања алата и побољшавају квалитет површине обратка. Обе карактеристике имају значајну улогу код финалног квалитета производа, интегритета површине и дужину употребе. Из тог разлога, већина машина поседује прилично једноставне системе за допремање средстава за хлађење. Иако ови системи нуде адекватне услове за хлађење и подмазивање при многим машинским обрадама, ефекат се може додатно побољшати, нарочито у случају тврдых материјала, као што су легуре титанијума. Такво побољшање нуди метод примене компримованог ваздуха – хлађење под високим притиском (eng. *high-pressure cooling* – *HPC*), између осталог. Тренутне студије указују на то да постоји више бенефита примене компримованог ваздуха у зони резања. Позитивни ефекти хлађења добро су познати дуго времена. На почетку двадесетог века *F. Taylor* доказао је способност повећања брзине резања без утицаја на алат, већ применом средстава за хлађење. Од тада се разматра побољшање средстава за хлађење и подмазивање. У зависности од изабране методе обраде радног дела, његових компоненти, разматра се неколико метода:

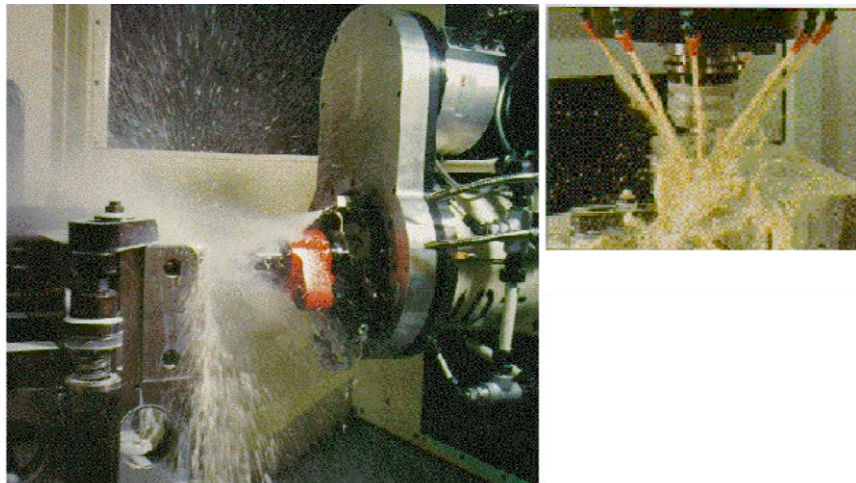
- са „влажним“ хлађењем и подмазивањем – под ниским притиском (енгл. *low pressure* - *LP*)
- под високим притиском – (енгл. *High-pressure cooling* - *HPC*)
- веома високи притисак - (енгл. *Ultra-highpressure cooling* - *UHPC*)
- минималне количине средстава за хлађење и подмазивање – (енгл. *minimum quantity lubrication* - *MQL*)
- „сува“ обрада резањем без коришћења компримованог гаса – (енгл. *dry cutting*)
- средње сува обрада са коришћењем компримованог гаса
- криогено хлађење – (енгл. *Cryogenic cooling*) [18-20]

Шема поделе метода при обради резањем приказана је на **слици 3.1**.



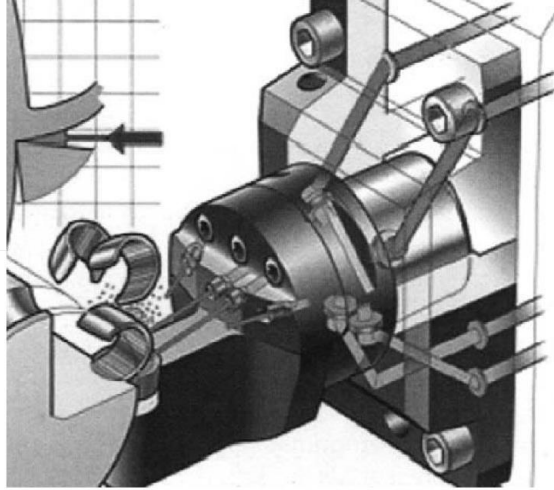
Слика 3.1. Методе хлађења и подмазивања при машинској обради резањем [20]

Њихове могућности се могу огледати у побољшањима процеса. Најчешће употребљавани метод је убризгавање течности или ти влажно сечење. Течност се убризгава под притиском од 0,6 – 1 МПа кроз спољашњу доводну цев. Температура се редукује око 15 % у односу на суво резање. Ова врста технике хлађења, ефикасно довођење средства у зону резања омета стварање паре у непосредној близини обратка и одрезаног слоја са површине. Иако је најједноставнији вид хлађења, са еколошке стране и аспекта здравствене заштите доводи се до развоја технике обраде са минималним количинама средстава за хлађење и подмазивање - *minimum quantity lubrication (MQL)*. Овај метод карактерише апликација минималне количине воде и раствореног уља при убризгавању под високим притиском у зону резања. [21]



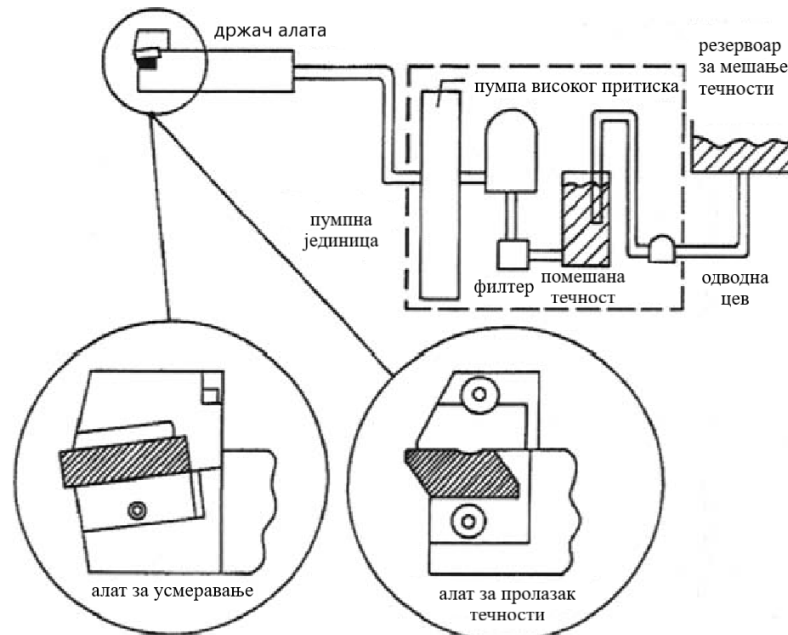
Слика 3.2. Убризгавање течности под високим притиском [21]

- Течност под високим притиском се убризгава кроз млазницу веома великом брзином у зону резања
- Веома је ефикасно при уклањању честица - струготине из зоне резања, ефикасно за примене код обрада метала великих брзина укључујући брушење
- Течност се прикупља, филтрира и упумпава назад до млазнице за убризгавање
- Средство за хлађење убризгава се под високим притиском и до 1000 bar - а (200 bar - а је максимални притисак који се користи за обраду титанијума). Скраћује се размак између алата и обратка, што спречава оштећења алата и површине од струготина.
- *The Jetbreak system*, приказан на слици 3.3. састоји се од посебно усмерене млазнице, која може бити састављена са алатом, према томе, средство за хлађење доводи се кроз конус млазнице и усмерено је према ивици сечива како би се формирао хидраулични клин између струготине и површине на којој остаје струготина.
- Већином се примењује на машинама за резање са вертикалним алатом и машинама за глодање.



Слика 3.4. Средство за хлађење под високим притиском – систем назван *Jetbreak* [22]

- Омогућава велику брзину протока средства за хлађење од 122 m/s и притиском од 110 bar – а на површину између алата и струготине.
- Систем се састоји из пумпе, ценовода потребног за транспорт течности и држача алата кроз који средство за хлађење може да прође и усмери проток средства за хлађење под високим притиском до радне површине. Систем је приказан на сл. 3.5.



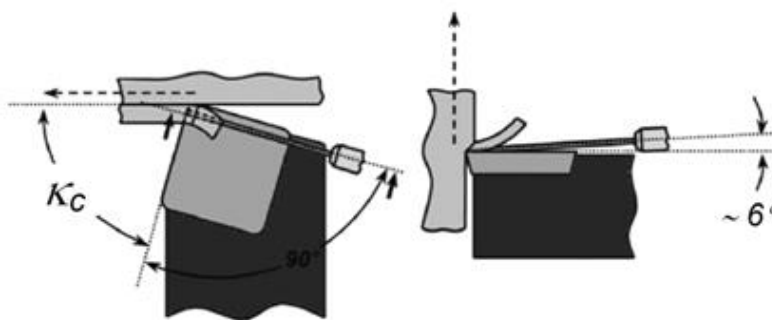
Слика 3.5. Систем за убризгавање СХП – а – *Hyperson* [22]

3.1. Хлађење компримованим ваздухом

При машинској обради, на формирање струготине у великој мери утиче топлота и трење у контактної зони између површине алата и површине обрадног материјала. При резању тешко обрадивих материјала, утицај топлоте може довести до високих температура и структурних промена обрадног материјала. Термички утицај углавном зависи од могућности хлађења и подмазивања, као и од максималне температуре достигнуте у зони сечења. Конвенционално хлађење није довољно ефикасно да спречи екстремне термичке услове у зони резања, посебно код обраде напредних материјала. У поређењу са стандардним хлађењем, идеја је да се млаз високог притиска убризга у зону резања. Машина треба бити опремљена опремом која укључује пумпу високог притиска, цев и спољну млазницу фиксирану поред држача алата. Пумпа снабдева филтрирану воду или емулзију.

Млаз се може допремити на два начина:

- Спољном млазницом. Млаз се убризгава директно између струготине и површине обратка или се може усмеравати на размак између бочне стране и обратка.
- Кроз алат. Течност се убризгава кроз алат помоћу малих пупа на уметку.



Слика 3.6. Илустрација убризгавања течности под високим притиском [57]

Допремање млаза високог притиска између струготине и површине обратка смањује дужину њиховог контакта. С друге стране, до зоне резања се може доћи убризгавањем расхладне течности испод бочне стране алата. Овакав процес је најефикаснији за редуковање температуре у зони резања, али нема утицаја на ломљивост струготине. На слици приказани су правци наношења млаза високог притиска у зону резања, под угловима од 90 степени и 6 степени.

Експерименти су извршени при резању, убризгавањем под притиском од 80 до 380 МПа. Млаз је директно примењен у зони између радне површине и алата. Утврђено је да хлађење високим притиском побољшава квалитет завршне обраде. При високом притиску, примећено је да млаз дубље продире до зоне резања, што смањује жилавост прелома материјала, што резултира ефикасним ломљењем струготине. Међутим, резултати су приказали убрзану стопу трошења зареза на керамичким алатима.

Када је челик у питању, може се утицати на формирање струготине. Забележено је значајно смањење температуре у зони резања и храпавости површине услед примене

високог притиска за хлађење. Својства материјала одређују да ли се мора користити висок притисак да би се постигао најбољи ефекат хлађења при резању челика мање чврстине са карбидним алатима.

У последњој деценији створена је расхладна течност на воденој основи под притиском је усмерена у зону резања спољном млазницом под притиском до 20 МПа. Испитивање је извршено на легурама никла и титанијума. Смањена је дужина контакта између струготине и алата, што доприноси смањењу температуре. Доказано је да се при свим брзинама сечења век алата повећава када се користи хлађење високим притиском до 15 МПа. Међутим, када је притисак повећан са 15 на 20,3 МПа, радни век алата се знатно смањио, последицом ерозије алата.

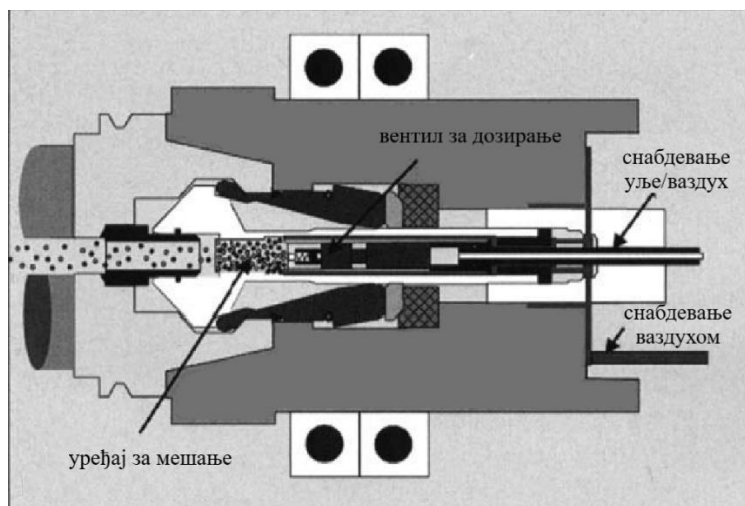
Анализа постојеће обраде резањем открила је технолошки раскорак. Обрада чврстог челика са карбидним алатом при уобичајеним брзинама испуњава овај неуспех. Ова обрада је могућа допремањем емулзије на бази биљног уља за хлађење при смањеним протоцима већим од 50 МПа. [57]

3.2.Хлађење маглом

Карактеристике хлађења маглом:

- Хлађење маглом при обради материјала резањем (у магли су помешани уље и ваздух)
- Обично се употребљава при великој брзини резања и када је одрезана струготина релативно мале величине;
- Потребна је добра вентилација при употреби због негативног утицаја на здравље оператера;
- Примењује се мала количина мазива;

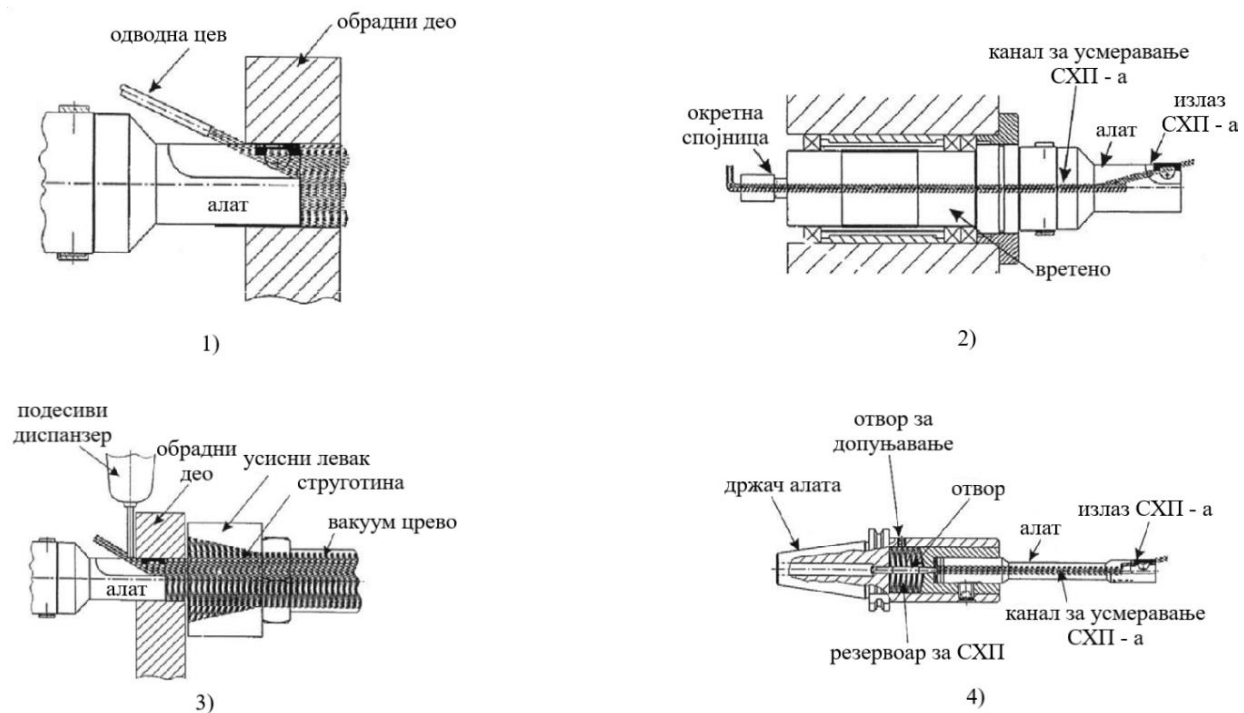
На **слици 3.6.** приказан је умањен систем за хлађење маглом.



Слика 3.7. Умањен систем подмазивања (апликација магле) [22]

Мале честице уља снабдеване помоћу пумпе са микро-дозером кроз капиларну цев помешане са ваздухом и усмерене у правцу резног алата кроз вретено.

Различите варијанте снабдевања СХП - а до зоне резања



Слика 3.8. Различите варијанте снабдевања мешавине уља/ваздуха [22]

- 1) спољним довођењем до алата
- 2) кроз резни алат
- 3) истовремено довод и одвод уља/ваздуха
- 4) снабдевање из резервоара уграђеног у алат. [22]

4. Примена СХП са нанофлуидима

Од недавно, нанотехнологија заузима важну улогу у пољима процеса преноса топлоте и развијању изузетног напретка у примени СХП - а. Једна од најпоузданијих примена нанотехнологије је производња честица високе топлотне проводљивости и мешањем базног СХП – а формирају се тзв. нанофлуиди. Додавањем наночестица базним течностима показује се као невероватно побољшање топлотних својстава основних СХП – а. Нанотехнологија знатно је побољшала пренос топлоте у течностима коришћеним за хлађење и подмазивање при машинској обради стварањем иновативне течности – нанофлуида. Самим тим, довело је до смањења опреме за пренос течности и уштеду енергије. [23]

Револуција нанотехнологије, њене јединствене особине припале су главном фокусу даљег развоја. Овај драматични раст произишао је из мултипликација у различитим областима живота: медицини, пољопривреди, инжењерству и индустрији. Нанотехнологија, проучава утицај величина честица материјала. Технике производње засноване на нанотехнологији, могу се произвести наночестице неких тврдых материјала као што су алуминијум и титанијум оксид који имају релативно високу топлотну проводљивост. Реч „нано“ је дефинисана као један милијардити део метра или 10^{-9} m. **Слика 4.1.** приказује компарацију величина материјала од највеће скале до најмање или наноскале. [24]



Слика 4.1. Компарација величина ствари од већег ка мањем [24]

Мешањем наночестица са основним СХП – ом, формира се колоидни раствор у стабилној вези, тиме се њиховим додавањем СХП – у ниске топлотне проводљивости повећавају карактеристике топлотне проводљивости. Као новији резултат нанотехнологије, оваква креирана течност позната као нанофлуид, има нову карактеристику преноса топлоте. [25]

Нанотехнологија се широко користи у разним инжењерским применама, као обећавајућа алтернатива за уштеду енергије и смањење трошкова производње инжењерских постројења. Ова важна примена представљена је редуковањем честица на величину наночестица и њиховим мешањем са течностима ниских топлотних проводљивости, да би се добила добра врста течности позната као нанофлуид. [26]

Уз напредовање нанотехнологије и њене способности да повећа перформансе машинске обраде, настала је течност – нанофлуид. Она се састоји од основног СХП – а ниске топлотне проводљивости, углавном воде и уља и чврстим наночестицама високе топлотне проводљивости. Стога, нови флуид одн. нанофлуид има високу карактеристику одвођења топлоте у односу на основни СХП. Нанофлуид је течност у којој су честице величине нанометра, суспендоване у основној течности, формирајући колоидни раствор. Најчешће су направљене од метала, оксида метала, карбида или угљеникове наноцеви (енгл. *carbon nanotube* - *CNT*), док основне течности укључују воду, етилен, гликол и уље. [27]

Нанофлуиди имају својства која их чине потенцијално корисним при преносу топлоте, у употреби код микроелектронике, горивих ћелија, фармацеутских процеса, хибридних мотора, хлађења мотора, такође код фрижидера, хладњача, промене топлоте код брушења, машинских обрада и смањење температуре димних гасова у котлу. [28]

4.1. Методе производње нанофлуида

Нанофлуиди се производе техникама: методом „једног корака“, методом „два корака“ и друге технике са иновацијама. Да би се избегло таложење наночестица током машинских операција, могу им се додати површински активне материје. Први корак пре било какве примене је припрема нанофлуида, потребан је фокус корисника како би се стекла оптимална фаза стабилности. Колоидна теорија каже да седиментација у суспензијама престаје када су честице испод критичног радијуса услед супротстављања равнотежи сила гравитације. Наночестице мањих величина могу бити боље при различитим применама. Међутим, чешће стварају гомилу на радној површини. Стога, добијање стабилног нанофлуида са оптималним пречником и концентрацијом честица, сматра се великим изазовом за истраживаче. [29-30]

Метода „два корака“

Ова метода је уобичајена при производњи нанофлуида. Наночестице различитих нанофибера, укључујући наноцеви или друге наноматеријале, прво се производе физичким или хемијским процесима од 10 до 100 nm. Затим се нанопрах дисперзује у основни СХП, помоћу интензивног узбуђавања магнетних сила, ултразвучног узбуђавања, високог смицања при мешању до хомогенизовања куглица. Последица великих површина и површинских активности, наночестице имају тенденцију да се гомилају, што негативно утиче на стабилност нанофлуида. Како би се избегао тај ефекат, додају се активне материје. Многи истраживачи су учествовали у стварању ове методе. [31-32]

На слици 4.2. приказан је блок дијаграм припреме методе два корака [32]



Слика 4.2. Блок дијаграм припреме методе „два корака“ [32]

Метода „једног корака“

Процес у коме истовремено се стварају и дисперзују честице у основни СХП чиме се може редуковати нагомилавање наночестица. Овакав метод ствара стабилнији нанофлуид, без високих трошкова поступака. [33-36]

Остале методе са иновацијама

Истраживачи су стварали друге методе како би добили нове методе нанофлуида са релативно високим карактеристикама и већом стабилношћу. Једна од развијених метода је синтезе бакарних нанофлуида. Ова метода може се синтетизовати новом претходном трансформацијом помоћу ултразвучног и микроталасног зрачења. Развијен је монодисперزيونи колоидни раствор са племенитим металима, употребом методе фазног преноса. Коришћена је водено-органска метода фазног преноса за припрему наночестица злата, сребра и платине растворљивих у води. [37] Методом фазног преноса такође се користи у припреми стабилних нанофлуида на бази керозина. Истраживање је показало да синтетизовани нанофлуиди, њихова проводљивост и стабилност могу бити побољшани. [38-41]

4.2. Процеси машинске обраде и примена нанофлуида у операцијама резања метала

Машинска обрада је главни производни процес који повећава већину трошкова производа. На економичност обраде утиче често мењање алата за резање због трошења алата. Пуно параметара утиче на стање резног алата, а највидљивије су силе резања и температуре. Стога је одувек била потреба да се развију одговарајуће методе за смањење трења и температуре које прате операцију резања метала. Примена течности за хлађење и подмазивање (СХП) истакнута је међу таквим методологијама. Спречава термичко ширење обратка, постиже се боља површинска обрада производа и најважније продужава век трајања алата. Недавна достигнућа у нанотехнологији показала су да СХП новије генерације које садрже наночестице, префериране су за побољшање преноса топлоте и триболошких својстава при следећим машинским обрадним операцијама. [40-42]

Стругање

Стругање представља процес производње цилиндричних компоненти на стругу (нпр. осовине, игле, нити). Поред тога, могу се извести и ефекти као што су сужење, поравнање или додавање угла. Може се рећи да је стругање један од најважнијих процеса у прерађивачкој индустрији. [43] При стругању, алат путује дуж осе ротационог радног дела и истовремено уклања материјал са површине обратка у облику струготине. Стални контакт између алата, обратка и струготине ствара велике количине топлоте. Уклањање ове топлоте је неопходно, па тако и коришћење СХП средстава. Последњих година пуно средстава је уложено у истраживање најоптималнијих течности при обради метала (нпр. синтетичка уља), а све више преовлађује развој нанофлуида. **Слика 4.3.** Приказује процес стругања са наношењем СХП. [44]



Слика 4.3. Стругање са употребом СХП – а [44]



Слика 4.4. Глодање са применом СХП [45]

Глодање

Глодање представља поступак обраде способан за производњу различитих облика који укључују равне површине, прорезе и контуре. Глодалица користи сечиво са више зуба на стационарном радном комаду. Сваки зуб сечева купу свој део материјала са површине радног комада. Глодалице се могу поделити у три групе: хоризонталне, вертикалне и универзалне. СХП додају се током глодања ради смањења температуре у зони сечења, повећања квалитета површине обратка и радног века алата. **Слика 4.4.** Приказује операцију глодања са применом СХП - а. [45]

Бушење

Поступак израде рупе у обратку. Алат за резање је спирално ребрасти алат са две или више симетричних сечних ивица познатих као бушилице. Бушилице разних пречника могу да створе округле рупе различитих величина и дубина у обратку. Развртање, забушивање, проширивање, упуштање и урезивање навојака такође се изводе бушилицом. Значајна топлота и температура настају као резултат контакта између бушилице и обратка. Због тога се СХП примењује за ефикасно уклањање топлоте и температуре чиме се спречава прегоривање бушилице и смањивања квалитета алата. **Слика 4.5.** Приказује операцију бушења са применом СХП - а. [46]



Слика 4.5. Бушење са применом СХП - а. [46]



Слика 4.6. Брушење са наношењем СХП - а. [47]

Брушење

Поступак обраде радног комада који захтева високу тачност и глатку површинску обраду, ниских толеранција. Користи се точак са сечивима различитих облика и величина. Брушење се одвија великом брзином кретања алата, мале помичне брзине, резултат је висока температура између обратка и алата. Изазов код брушења је контрола ове резултирајуће високе температуре како би се спречило прегоривање радног комада и бруснице. Познато је да на квалитет површине код брушења негативно утиче произведена топлота. Применом СХП – а у зону резања спречавају се негативни ефекти. Истраживање је показало да већи фактор топлотне проводљивости и конвекције имају нанофлуиди. **Слика 4.6.** Приказује операцију брушења са наношењем СХП - а. [47]

4.3.Топлотна проводљивост материјала примењених у СХП

Топлотна проводљивост чврстих тела већа је од основних течности за пренос топлоте. На пример, топлотна проводљивост бакра у околини температуре је око 700 пута већа од воде и 3000 пута већа од моторног уља. Због својих нано структурних карактеристика, нано материјали показују појачана својства (попут механичких, термичких, физичких и хемијских), феномене и процесе у односу на класичне материјале.

Математички израз Њутновог закона хлађења боље описује карактеристике нанофлуида:

$$Q = hA\Delta T$$

где су: Q - брзина преноса топлоте, h - топлотни коефицијент

A - површина преноса топлоте, T – резултована разлика температура

Из ове једначине следи: повећање преноса топлоте у нанофлуидима Q може бити постигнуто: (I) повећањем h , (II) повећањем A , и (III) повећањем ΔT .

Стратегија повећања топлоте A и ΔT , не може се користити у неким операцијама при машинској обради и резања метала. Побољшање преноса топлоте овим применама постиже се повећањем топлотног коефицијента h , па је могуће побољшати транспортне карактеристике материјала за пренос топлоте. Топлотни коефицијент може се повећати побољшањем својстава СХП – а за дату методу преноса топлоте што је веома важно код примене нанотехнологије. Поред конвенционалних адитива који се често додају СХП - у ради побољшања специфичних својстава, коефицијент преноса топлоте може се побољшати додавањем чврстих честица (нано-честица). Материјали који се обично користе као наночестице укључују хемијски стабилне метале (нпр. злато, бакар), оксиде метала (нпр. алуминијум, силицијум-диоксид, цирконијум, титанијум), оксидну керамику (нпр. Al_2O_3 , CuO), карбиде метала (нпр. SiC), нитриде метала (нпр. AlN , SiN) и угљеник у различитим облицима (нпр. дијамант, графит, фулерен). Користе се и угљеникове наноцеви (CNT) због њихове значајне високе топлотне проводљивости у уздужном (аксијалном) правцу.

Због тога су у овом раду анализирана недавна достигнућа у примени нанофлуида као расхладних течности, начинима производње нанофлуида, примени нанофлуида у различитим поступцима обраде и резања метала. [47]

4.4. Нанофлуиди различитих састава и њихов утицај на алат и обрадак

Коришћењем одговарајућих технологија, научници су дизајнирали нанофлуиде пажљиво одабраних комбинација наночестица и основног СХП - а. Припремљени нанофлуиди коришћени су као СХП при машинској обради како би се проценио утицај на параметре као што су сила резања, храпавост површине, температура, количина и дебљина струготине и хабање алата.

Нанофлуид који садржи наночестице алуминијум оксида Al_2O_3 (1% по запремини основног СХП - а), лубрикант за подмазивање и воду, показао је побољшани ефекат хлађења и подмазивања, како и смањивање силе резања за 52,6 % и времена обраде 29,5 % на трајање обраде од 300 секунди у поређењу са сувом обрадом или са стандардним СХП - ом. Такође, храпавост је смањена 64,3 % у односу на суву обраду и 28,6 % са обичним СХП – ом. [48]

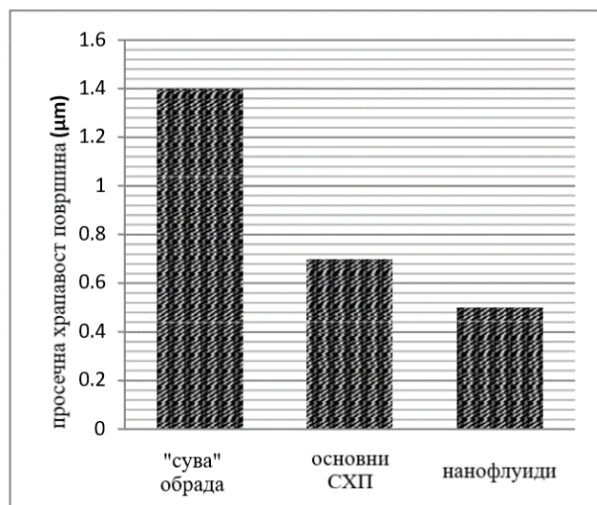
Сprovedена студија о перформансама при употреби нанофлуида при бушењу метала са *MQL* техником, где је течност састављена додавањем 4 % Al_2O_3 по запремини основног СХП – а. Уочене су побољшане карактеристике СХП – а, смањена је тангенцијална сила бушења и храпавост површине за 55 % при сувој обради и 33,3 % са основим СХП – ом. [49] Развијени нанофлуид који у своју структуру укључује наночестице графита (0,0 %, 0,1 %, 0,3 % и 0,5 % по маси) у основном СХП – у. Ова течност је коришћена у експерименту при сувој обради или *MQL* код брушења обратка. Експеримент је показао да повећањем наночестица графита доводи до бољих перформанси флуида, позитивно утиче на силу резања, смањење температуре, храпавости површине и хабање алата. [50]

Такође, експеримент са синтетизованим наночестицама сребра у основном СХП – у, код брушења показује да су сила резања, температура врха алата и храпавост површине знатно смањени. Сила резања смањена је за 8,8 % и храпавост површине за 7,5 %. [51]

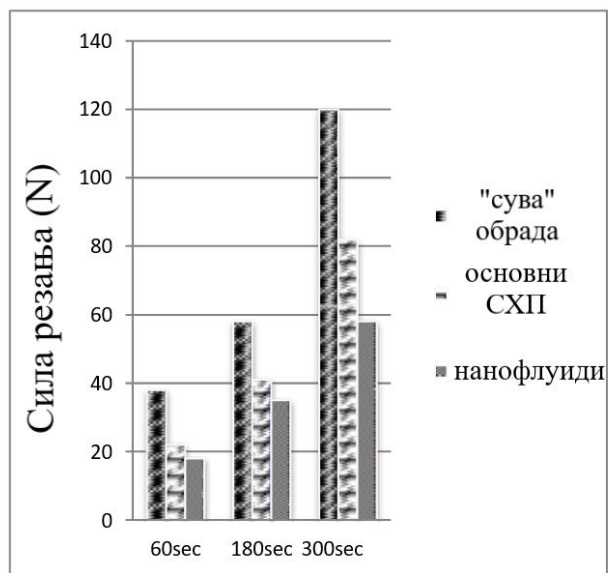
Истраживање које представља експерименталну студију о појачавању ефекта додавањем наночестица Al_2O_3 у основни СХП, при обради резањем и коришћењем *MQL*, резултат доказује да се смањује нестабилност резног алата, температура алата, хабање и храпавост површине обрадног дела. Повећањем процентног удела Al_2O_3 изнад 5 %, имало је негативне ефекте на перформансе флуида. [52]

Резултат коришћења Al_2O_3 у основном СХП – у, код операције брушења смањује ефекте бочног трошења за 21 % и стварање пукотина на обратку 23 % у поређењу са сувом обрадом и обичним СХП – ом. [53]

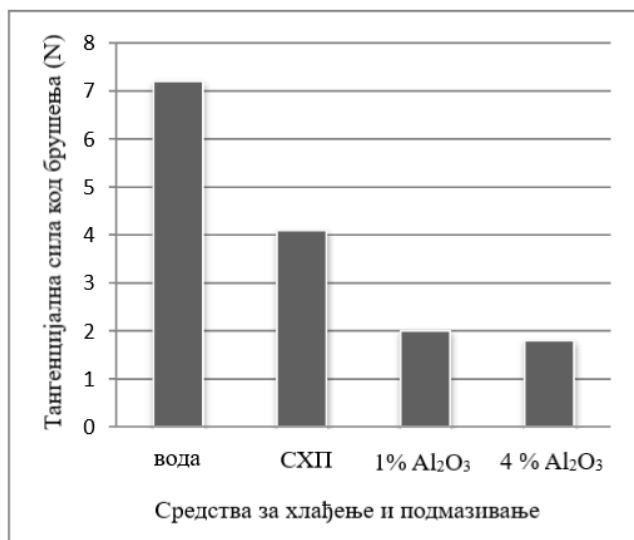
Следећи графикони приказују упоређивање утицаја количине и састава коришћених СХП - а на површину обратка, силе резања и силе које утичу на алат, при одређеним временским операцијама измереним у секундама. [54]



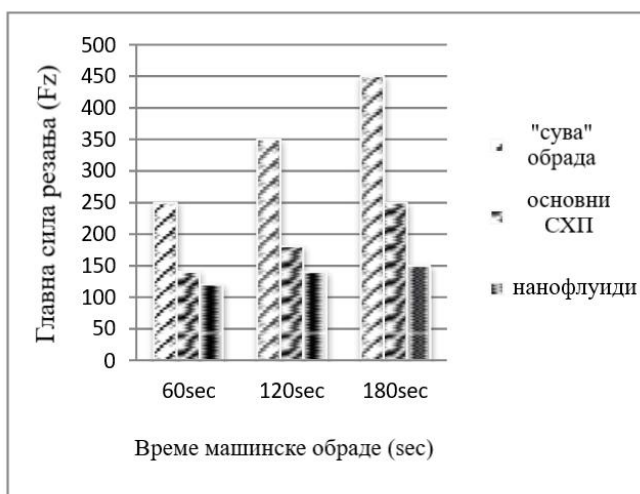
Слика 4.7. Просечна храпавост површина (μm) при сувој обради, основном СХП – у и са нанофлуидима [54]



Слика 4.8. Сила резања (N) у току времена обраде од 60 секунди, 180 секунди и 300 секунди при сувој обради, основном СХП – у и са нанофлуидима [54]



Слика 4.9. Тангенцијална сила резања код брушења (N) при коришћењу воде, основног СХП – а, нанофлуидом са 1 % Al₂O₃ и 4 % Al₂O₃ [54]

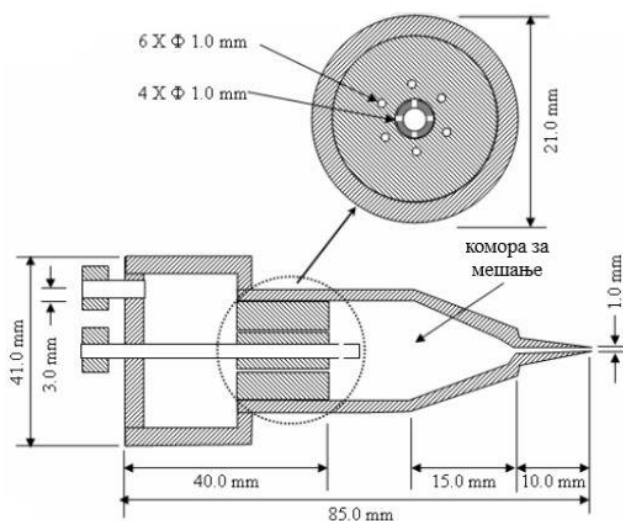


Слика 4.10. Главна сила резања (Fz) у току времена обраде од 60 секунди, 120 секунди и 180 секунди при сувој обради, основном СХП – у и са нанофлуидима [54]

5. Пример CAD пројектовања извршног елемента система за минималне употребу СХП

Употреба *CAD* (енгл. *Computer Aided Design - CAD*) софтвера за потребе конструисања је постала свакодневни процес. Заправо, при развоју производа, *CAD* софтвери су основни и неизоставни алат који читавом процесу даје флексибилност. Коришћењем *CAD* софтвера остварује се велики број предности. Једна од њих је повећана продуктивност тј. брзина. Она обухвата аутоматизацију рутинских послова ради повећања креативности, коришћење већ постојећих модела стандардних делова и облика. Још једна од предности је подршка изменама на конструкцији. Нема потребе за поновним цртањем свих делова после сваке измене, као и чување претходних конструкционих интеракција. У предности спада и комуникација са другим тимовима инжењера, са другим софтверима, као и са маркетингом. [55]

Пројектовани систем за довођење *MQL* користи се за довод ваздуха под притиском од 10 bar - а. Ваздух високог притиска из компресора улази у две коморе, тј. комору са ваздухом и комору за мешање. Комора за течност на дну је спојена са комором за мешање, која има два отвора кроз који течност и ваздух улазе у комору за мешање. Ваздух улази у комору за мешање кроз 6 рупа пречника 1 mm, а течност се доводи кроз 4 рупе истог пречника. Систем је шематски приказан на **слици 5.1.** ваздух и течност мешају се у комори за мешање, тако да се добијени *MQL* снабдева великом брзином кроз млазницу у зону резања. *MQL* млаз се допрема до врха алата за резање, под углом од 15 степени, чиме се постиже да течност дође најближе могуће између алата и струготине. Млаз се углавном користи и за спречавање наслага струготине и заштите бочне површине, како би се омогућио бољи квалитет производа. Начин постављања приказан је на **слици 5.2.**



Слика 5.1. Шематски приказ система за довођење *MQL* – а



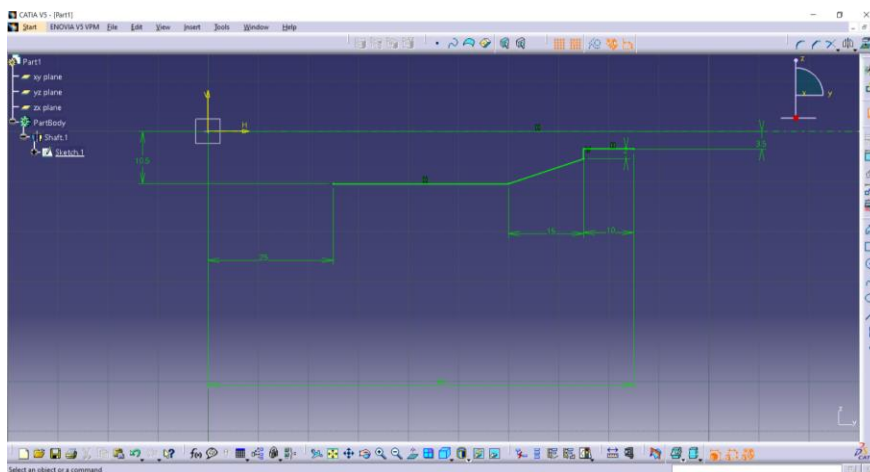
Слика 5.2. Пример постављања система за довођење *MQL* – а [56]

Један од циљева овог рада се огледа у примени *CAD* софтверских алата при процесу конструисања за развој геометријског модела као основе за даљи развој производа, анализу, синтезу и све остале могуће употребе истог. Кроз њега, у контексту примене савремених метода и софтверских алата, приказан је принцип креирања геометријског модела (извршни елемент система за довођење *MQL* – а), применом једног од најзаступљенијих програмских пакета за *3D* моделирање *CATIA V5*.

Моделирање MQL инјектора употребом CAD софтвера CATIA V5

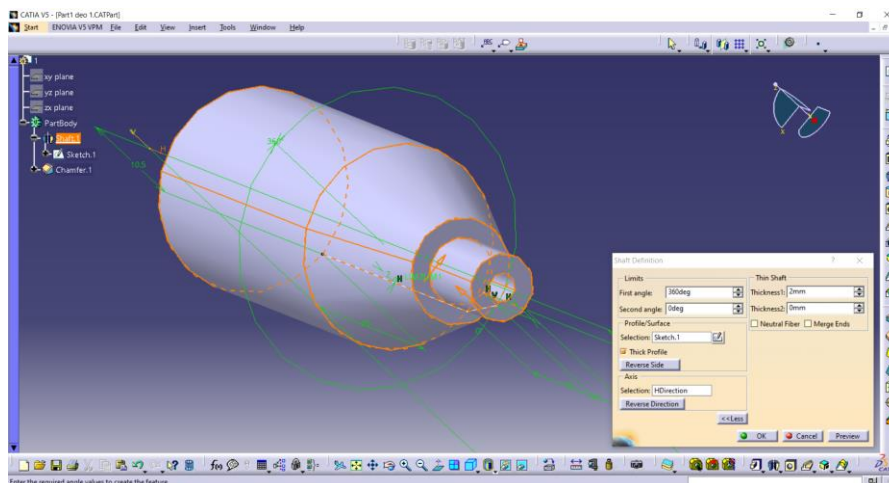
Да би се започело са моделирањем, потребно је дефинисати елементе склопа и њихове димензије. Како би квалитет производа био што већи, пожељно је прикупити што више информација о њему, где ће се користити, материјали који се употребљавају и брзина обраде. На следећим сликама приказан је процес моделирања MQL инјектора.

У *Part Design* врши се одабирање равни у ком се црта скица на опцији *Sketch*. Задавањем спољних контура *Centered Rectangle* коришћењем *Profile* дефинише се облик предњег дела одн. коморе за мешање. Како би одредили око које осе ће се замишљени профил направити потребно је задати осу додавањем испрекидане линије *Axis*. Скица би по правилу требала бити ограничена опцијом *Constraint* (слика 5.3.)



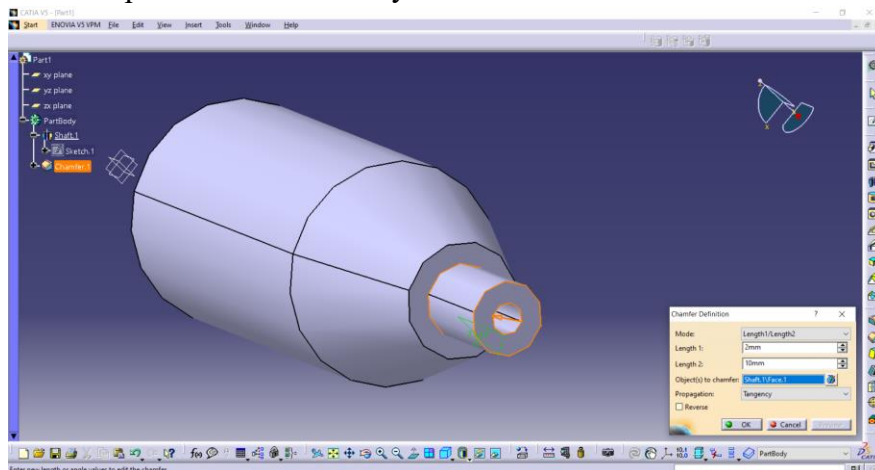
Слика 5.3. Полазна скица при моделирању предњег дела млазнице

Када је скица дефинисана у потпуности командом *Exit workbench* и изабрати *Shaft* додавањем угла 360 степени, *First angle* дебљине 2 mm *Thickness1*, добија се део као на слици 5.4.



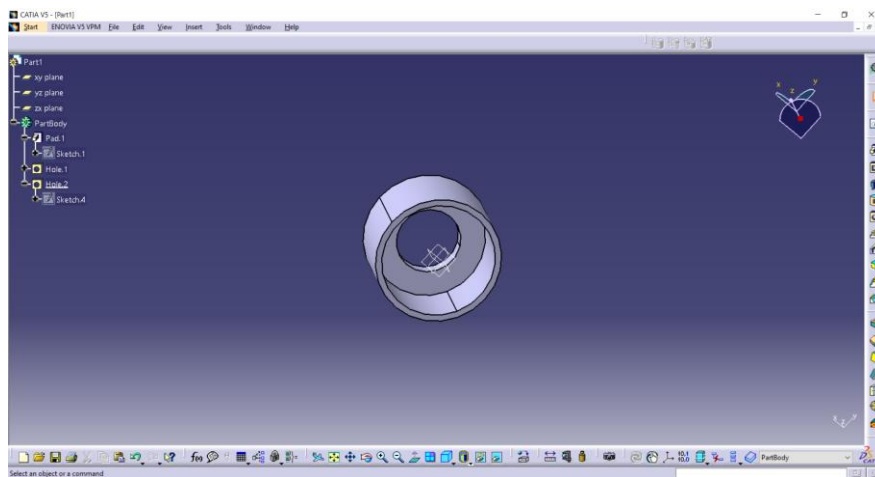
Слика 5.4. Комора за мешање добијен додавањем угла и дебљине

Коришћењем команде *Chamfer Definition*  предњем делу се дефинише облик, тако што се тангенцијално уклони материјал дужине од 10 mm и ширине 2 mm. **Слика 5.5.** овим је први део склопа завршен и може се сачувати као *Part1*.



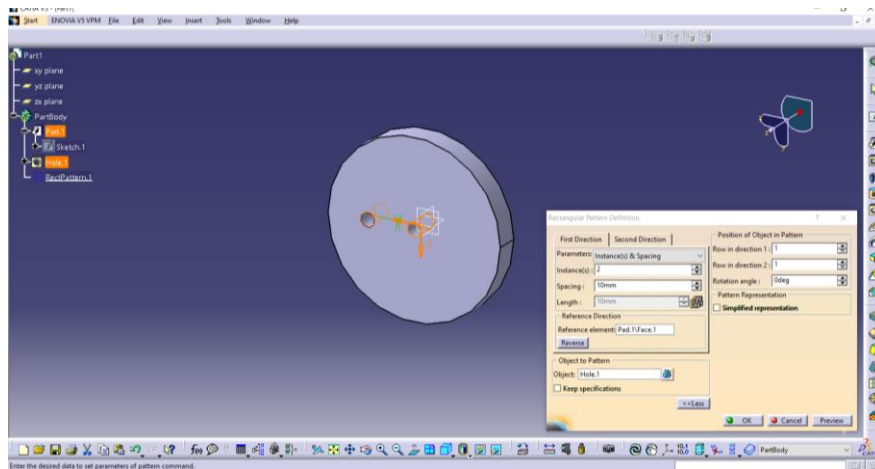
Слика 5.5. дефинисање облика најужег дела

Следећи део – комора за флуид (слика 5.6.) израђује се у истом окружењу, цртањем кружнице - *Circle*  и додавањем материјала опцијом *Pad* . Након тога израђује се рупа командом *Hole* .



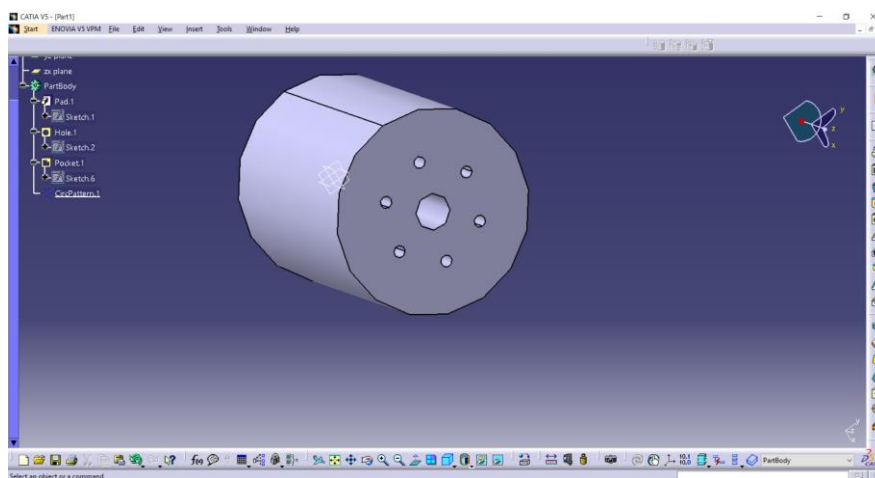
Слика 5.6. Комора са ваздухом

Да би се комора затворила потребно је изградити поклопац који има два отвора са навојем кроз које се убацују млазнице. Кружни поклопац пречника 37 mm, дебљине 5 mm опцијом *Pad* . Командом *Hole* , израђује се рупа од 3 mm, дубине 5 mm са навојем дефинисаним *Thread Definition*. Следећи отвор истих димензија добија се командом *Rectangular Pattern Definition* .



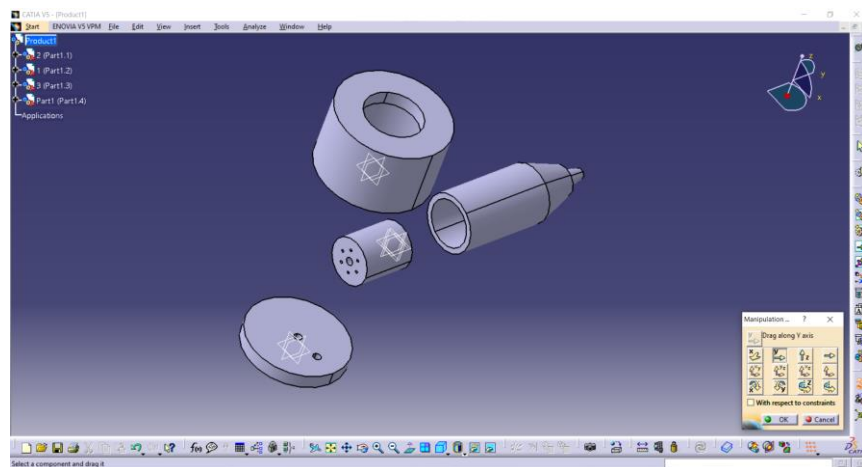
Слика 5.7. Поклопац коморе за ваздух

Следећи део кружног облика ширине 19 mm, опцијом *Pad* дужине 20 mm. У средини потребно је израдити рупу са навојем пречника 3 mm кроз коју пролази млазница до коморе за мешање. Такође, шест рупа пречника 1 mm добијене су командом *Circular Pattern Definition*. Рупе служе за проток ваздуха из коморе за ваздух до коморе за мешање. Слика 5.8.

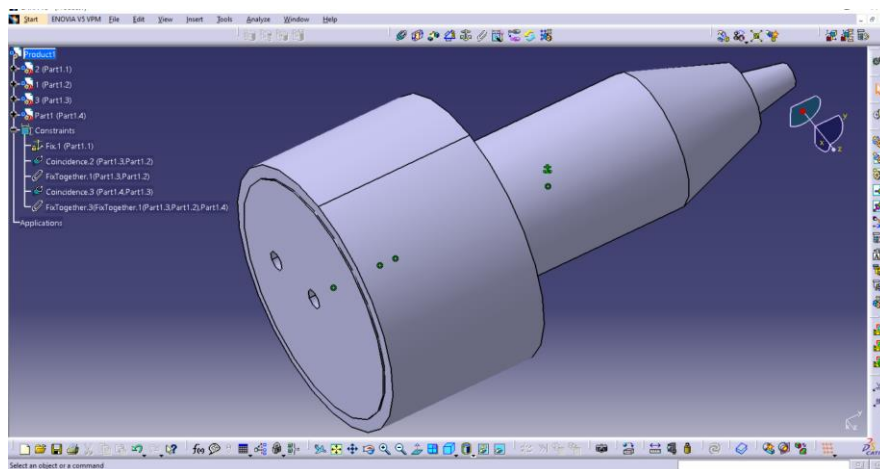


Слика 5.8. Унутрашњи део кроз који пролази млазница

У *Assembly Desing* сви делови претходно сачувани увозе се кликом на *Existing Component*, па на *Product1* чиме се отвара фолдер са сачуваним деловима. Како би се јасно видели сви делови, командом *Explode* делови се расчлане са почетне тачке. *Manipulation* служи да се делови усмеравају по осама хуз. Тиме је олакшана припрема за даље састављање у овом програму. Делови између себе фиксирају се командом *Fix Component*, њихове површине *Fix Together* и осе кружних отвора *Coincidence Constraint*. Сlike 5.9. и 5.10. приказују растављене и састављене делове.

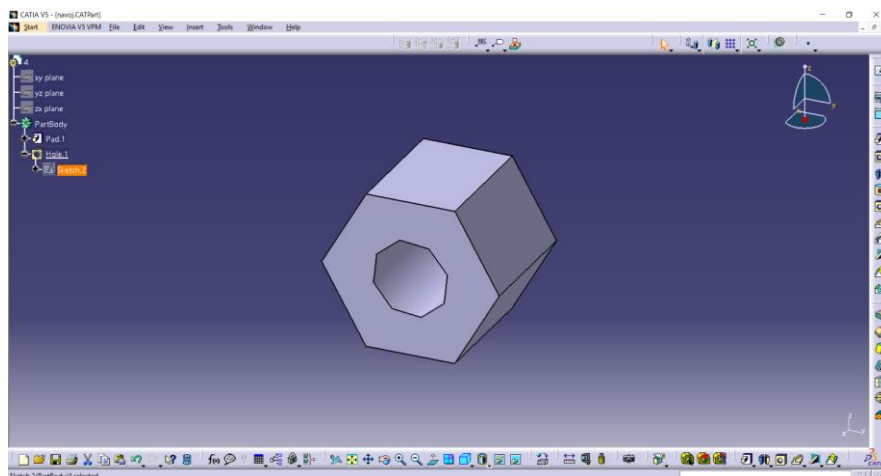


Слика 5.9. Додати делови у *Assembly Desing*



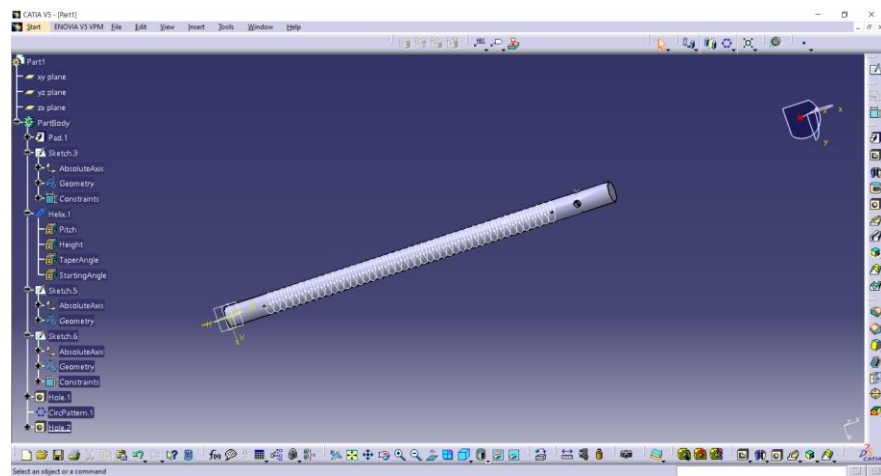
Слика 5.10. Склоп делова у *Assembly Desing*

Следећи битан део овог MQL система је млазница. Млазница се састоји из два дела, цеви са навојем и завртњем. У *Part Design* , у опцији *Sketch*  црта се скица. Завртањ облика шестоугла црта се опцијом *Hexagon* , задавањем ширине од 6 mm и командом *Exit workbench*  одабраном опцијом *Pad*  задаје дужина 5 mm. Командом *Hole* , израђује се рупа од 3 mm, дубине 5 mm са навојем дефинисаним *Thread Definition*. **Слика 5.11.** Завртањ са навојем.



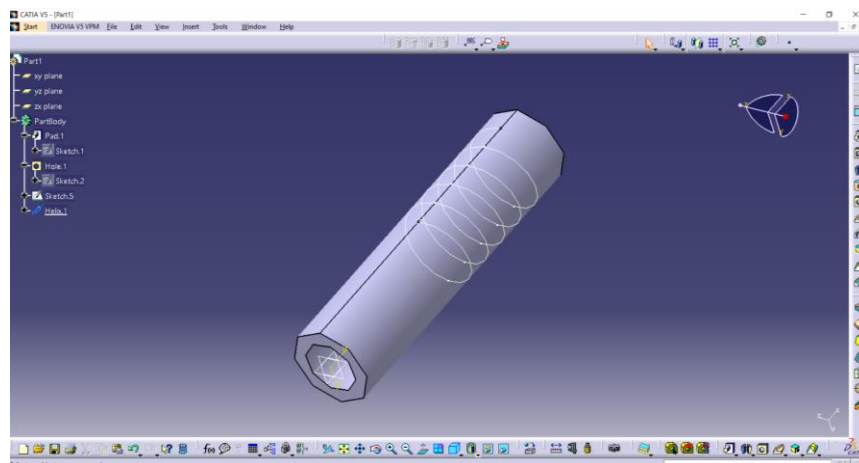
Слика 5.11. Завртањ са навојем

У истом окружењу цртањем кружнице пречника 3 mm и опцијом *Pad*  задаје се дужина од 50 mm, на дужини од 6 mm поставља се референтна тачка *Point By Clicking*  од које се израђује навој командом *Helix*  дуг 45 mm. Како би флуид био распршен у комори за мешање потребне су четири рупе од 1 mm на предњем делу цеви. Једна рупа добија се командом *Hole* , а остале три опцијом *Circular Pattern Definition* . Слика 5.12. приказује дужу млазницу овог система.



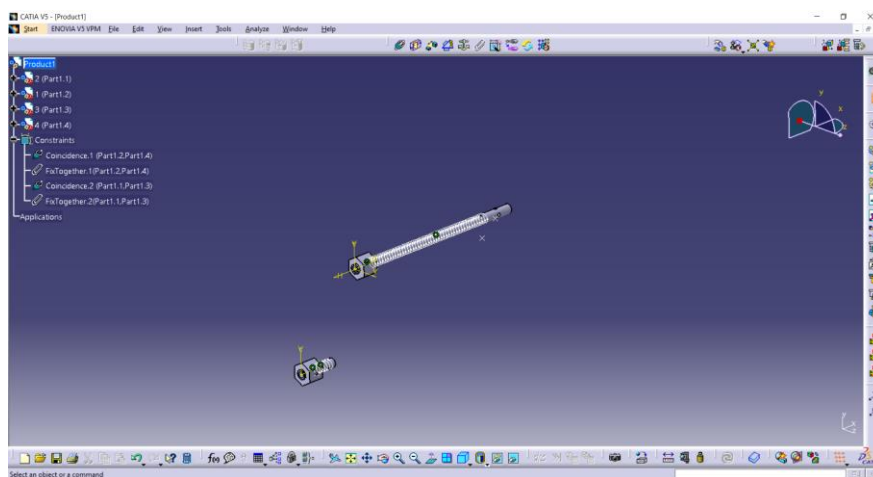
Слика 5.12. Цев која допрема течност у комору за мешање

Слика 5.13. приказује краћу цев која допрема ваздух под високим притиском у комору за ваздух. Цев дужине 12 mm и истог пречника као дужа цев.



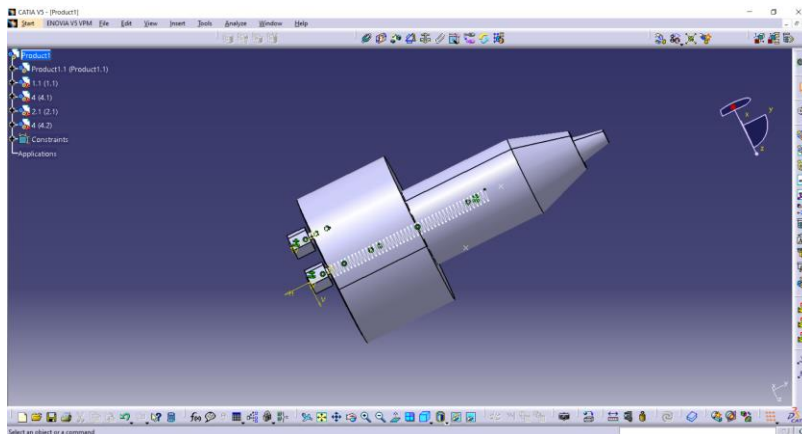
Слика 5.13. Цев за довођење ваздуха под високим притиском

У *Assembly Desing* делови који сачињавају млазнице увозе се кликом на *Existing Component*, па на *Product1*. Из отвореног фолдера се делови увозе у програм. Командом *Explode* невидљиви делови се појављују. *Manipulation* усмеравају се делови. Фиксирани су кружни отвори селектовањем оса и кликом на опцију *Coincidence Constraint*. Њихове површине спојене су командом *Fix Together*. Слика 5.14. приказује састављене делове млазница.



Слика 5.14. Млазнице за довођење ваздуха и течности

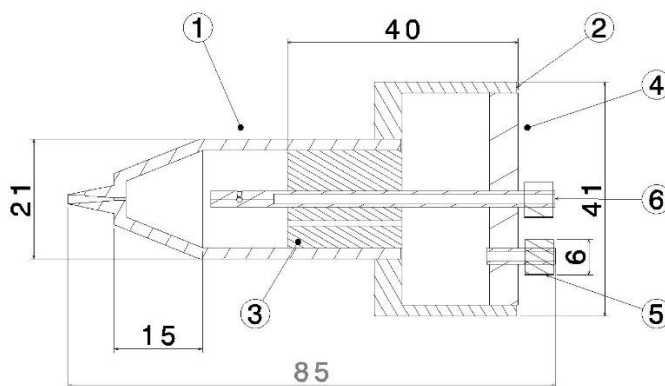
Слика 5.15. *MQL* систем. Спајањем свих делова у *CAD* – у, настаје систем за пословање са СХП – ом. Овакав систем веома је једноставан за коришћење, лако је преносив и подесив на машинама. Иако мале димензије, правилним усмеравањем у зону резања постиже се висока заштита алата од високих температура, струготина има маљу тенденцију за гомилањем, постиже се висок квалитет обраде са малом количином *MQL* – а.



Слика 5.15. *MQL* систем

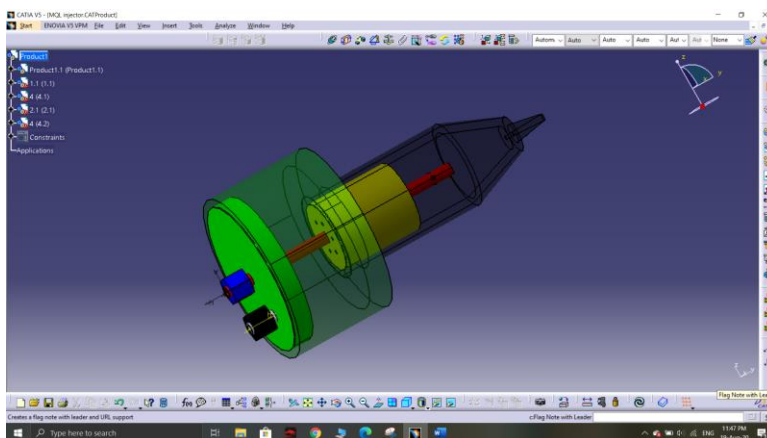
Уздужни пресек *MQL* инјектора приказан је на **слици 5.16.** делови склопа обележени су следећим бројевима:

1. Комора за мешање СХП - а
2. Комора за ваздух
3. Подсклоп са рупом за млазницу и рупама за пренос ваздуха
4. Поклопац коморе за ваздух
5. Навој за причвршћивање млазнице
6. Млазница за допремање уља/ваздуха



Слика 5.16. Уздужни пресек *MQL* систем – а

На слици 5.17. приказан је 3D модел. У окружењу *Assembly Desing* , у опцији *Graphic Properties* додате су различите боје делова и прозирност у процентима, како би се видела унутрашњост склопа и њихов међусобни положај.



Слика 5.17. 3D MQL систем

6. Закључак

Тема овог рада била је прикупљање података и разматрање примене минималних количина средстава за хлађење и подмазивање при обради метала резањем. Сува обрада или коришћење минималних количина за хлађење и подмазивање доказали су своја побољшана дејства при обради метала резањем у односу на конвенционалне начине. Заштита алата од прегревања, продужење века трајања алата, повећање продуктивности и површински квалитет обрадног дела итд. Све ове карактеристике доводе до високе продуктивности и економичности. Међутим, с друге стране коришћењем ових средстава негативно се утиче на екологију и оператере који их користе. Неправилно складиштење и несавесно одлагање, доводи до загађења, а директан утицај има на човеково здравље у виду респираторних обољења и општећење коже. Да би се минимизовали овакви фактори, прописани су закони који се морају поштовати приликом употребе.

Убризавање СХП – а под високим притиском у зону резања, добија се оптимално решење, јер се користе минималне количине, циљају директно у зону резања и тиме спречавају распршивање у околину, а температура радног алата и обратка смањује. Правилним усмеравањем, добија се идеални резултат, побољшана површина обратка и економичност обраде.

Даље усавршавање СХП - а модерним технологијама створени су нанофлуиди који у себи поред базног средства за хлађење и подмазивање садржи наночестице различитих метала који су веома добри проводници топлоте, нпр. као што су бакар, титанијум, сребро, злато итд., оксиди метала, карбиди или угљеникове наноцеви, док базно средство укључује воду, етилен, гликол и уље. Правилном комбинацијом наночестица са базним СХП – ом, формира се идеално средство за хлађење при обради резањем.

Истраживањем оваквих нанофлуида, и упоређивањем са другим средствима за хлађење и подмазивање закључује се знатно смањење параметара као што су сила резања, храпавост површине, температура, количина и дебљина струготине и хабање алата. Како је потребна мања количина течности, настоји се и смањивању система који их транспортују у зону резања. Тако су *MQL* системи смањених димензија постали пожељни, ради једноставнијег преношења, руковања, усмеравања и одржавања.

Моделиран је *MQL* ињектор употребом *CAD* софтвера *CATIA V5*, где се посебним млазницама допремају ваздух и уље до коморе за мешање у близини алата. Овакав систем унутрашњег мешања има мању дисперзију и одвајање приликом путовања кроз цев, за разлику од другог типа - систем спољног распршивања, где се СХП меша у посебном резервоару и допрема до алата млазницом, што знатно утиче на перформансе процеса обраде.

Пројектовани систем има мању дисперзију и мањи губитак капљица. Такав систем је теже одржавати, јер су најбитнији делови смештени унутар система. Дизајниран је да се може преносити и брзо подешавати у близини алата, што му додатно даје предност у односу на други систем. Анализом већег броја различитих дизни, пројектован је један од повољнијих, код ког је примећен значајни допринос обради резањем.

На основу овог истраживања могу се извући следећи закључци:

- код *MQL* обраде перформансе резања су побољшане и одржавају оштрину резних ивица алата смањењем температуре при интеракцији алата и струготине.
- убризгавање *MQL* – а омогућава видно смањење трошење алата, продужени век алата и побољшану завршну обраду површине у поређењу са сувом обрадом и основним СХП – ом при обради челика
- побољшање површине и тачност димензија побољшани су углавном захваљујући смањењу хабања и оштећења на врху алата применом *MQL* – а. Такво смањење трошења алата огледа се или као продужавање века алата или повећање продуктивности, омогућујући већу брзину сечења и смањење електричног напајања.

Исплативост коришћења система са унутрашњим мешањем СХП - а, огледа се у квалитету добијеног финалног производа. Мања површинска оштећења приликом обраде гарантују дужи век трајања, што је веома важно са дугорочног аспекта. Такође, постигнут је оптимални резултат, мала количина течности за хлађење и подмазивање са наночестицама, при чему је постигнута најбоља обрада метала и заштита радног алата, заштита оператера и мања количина штетних материја одлази у околину.

7. Литература

- [1] Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet, *Obrada metala rezanjem - teorija, modeliranje i simulacija* (Metal cutting - theory, modelling and simulation), https://www.researchgate.net/profile/Gordana_Globocki_Lakic, приступљено 25.06.2020.
- [2] B. NEDIĆ M. LAZIĆ, *PROIZVODNE TEHNOLOGIJE OBRADA METALA REZANJEM*
- [3] S. Sokolović, *Tehnologija proizvodnje i primene tečnih maziva*, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološki fakultet, 1998
- [4] V. Savić, *Tribologija i podmazivanje*, Ikos Novi Sad, 1995.
- [5] J.P. Byres, *Metalworking fluids (second edition)*, Taylor & Francis Group, CRC Press, 2006
- [6] D. M. Lewis, E. Janotka, M. P. M. Whitmer, T. A. Bledsoe, *Detection of microbial antigens in metal working fluids*, *Intern. Biodeterio. Biodegradati*, 2001.
- [7] S. Kalpakjian, S.R. Schmid, *Manufacturing Engineering and Technology*, Pearson Education, Prentice Hall, 2010.
- [8] R. Rakic, Z. Rakic, *Tribological aspects of the choice of metalworking fluid in cutting processes*, *Journal of Materials Processing Technology*, 2002.
- [9] E. Brinksmeier, A. Meyer, Housman – A.G. Cordes, C. Herrmann: *Manufacturing Techology Metalworking Fluids – Mechanisms and Performance*, 2015.
- [10] T. Udiljak, *Oblikovanje deformiranjem i obrada odvajanjem čestica – predavanja, 2014/2015*.
- [11] Aleksandar Filipovic and David A. Stephenson, “Minimum Quantity Lubrication (MQL): Applications in Automotive Power-Train Machining”, *Machining Science and Technology*, Vol. 10, pp: 3-22., 2006.
- [12] U.S. Dixit, D.K. Sarma, Davim J.P. *Environmentaly Friendly Machining, Chapter 2 – Machining with Minimal Cutting Fluids*, 2012.
- [13] D. Dubzinski, A. Devillez, A. Moufk, D. Larrouquere, V. Zerrouki, J. Vigneau, *A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy*, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2004.
- [14] L.R. Silva, M.F. Mattos, L.V. Amaral, E.C. Correa, J.R. Brandao, *Behavior of surface integrity on cylindrical plunge grinding using different cooling systems*, *Materials Research Vol. 14*, 2011.
- [15] V.S. Sharma, M. Dogra, N.M. Suri, *Cooling techniques for improved productivity in turning*, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2009.
- [16] D.U. Braga, A.E. Diniz, G.W.A. Miranda, N.L. Coppini, *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.
- [17] E. Brinksmeier , A. Walter, R. Janssen, P. Diersen, *Aspects of Cooling Lubrication Reduction in Machining Advanced Materials*, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2000.

- [18] <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-015-7878-4>, приступљено, 30.07.2020.
- [19] A.R. Machado, J. Wallbank, *The Effect of Extremely Low Lubricant Volumes in Machining*, Wear, 1997.
- [20] D. Fratila, *Evaluation of near-dry machining effects on gear milling process efficiency*, Journal of Cleaner Production 17, 2009.
- [21] T. Walker, *The MQL handbook – A guide to machining with Minimum Quantity Lubrication*, Unist, Canada, 2015.
- [22] Prof. Dr. S. Engin KILIÇ, Atılım University Department of Manufacturing Engineering, - predavanja, 4/16/2020.
- [23] De Gruyter, Editors: J. Paulo Davim, *Metal Cutting Technologies: Progress and Current Trends, Edition: 1st, Chapter: 3*, 2016.
- [24] K. Weinert, I. Inasaki, J.W. Sutherland, T. Wakabayashi, *Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication*, CIRP - Anals, Manufacturing Technology Vol. 53, 2004.
- [25] N. Bozorgan, M. Shafahi, *Performance evaluation of nano - fluids in solar energy: A review of the recent literature*. Micro and Nano Systems Letters., 2015.
- [26] S. Witharana, I. Palabiyik, Z. Musina, Y. Ding, *Stability of glycol nanofluids — The theory and experiment*. Powder Technology, 2013.
- [27] S. Jailani, G.V. Franks, T.W. Healy, *The potential of nanoparticle suspensions: Effect of electrolyte concentration, particle size and volume fraction*. Journal of the American Ceramic Society, 2008.
- [28] W. Yu, X.A., Huaqing, *Review on nano-fluids: Preparation, stability, mechanisms, and applications*. Journal of Nanomaterials, 2012.
- [29] A. Quddoos, A. Anand, G.K. Mishra, P. Nag, *Nano - fluids: Introduction, preparation, stability analysis and stability enhancement techniques*, 2012.
- [30] E.T. Neto, E.P.B. Filho, *Preparation methods of nano-fluids to obtain stable dispersions*. In: 13th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering; December 5–10, 2010.
- [31] D. Micha, L. Marcin, D. Grzegorz, G. Andrzej, *Preparation of metal oxide-water nanofluids by two-step method*. Prosimy Cytowa Jako : Inżynieria I Aparatura Chemiczna S. Nerella, NV. Sudheer, VS. Bhramara, 2012.
- [32] S. Mukherjee, S. Paria, *Preparation and stability of nano - fluids — A review*. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. 2012;9:63-69, 2012.
- [33] X. Wei, L. Wang, *Synthesis and thermal conductivity of microfluidic copper nano-fluids*. Particuology.; 8:262-271, 2010.
- [34] H.T. Zhu, CY. Zhang, YM. Tang, JX. Wang, *Novel synthesis and thermal conductivity of CuO nano-fluid*. Journal of Physical Chemistry C. 111:1646 -1650, 2007.
- [35] Y. Chen, X. Wang, *Novel phase- transfer preparation of monodisperse silver and gold nanoparticles at room temperature*. Materials Letters, 62: 2215-2218, 2008.
- [36] X. Feng, H. Ma, S. Huang, et al. *Aqueous-organic phase transfer of highly stable gold, silver, and platinum nanoparticles and new route for fabrication of gold nanofilms at the oil/water interface and on solid supports*. Journal of Physical Chemistry B. 110:12311-12317, 2006.

- [37] L. Wang, J. Fan, *Nano-fluids research: Key issues*. *Nanoscale Research Letters*., 2012.
- [38] K. Sodavadia & A. Makwana, *Experimental investigation on the performance of coconut oil based nano fluid as lubricants during turning of AISI 304 austenitic stainless steel*. *Int. J. Advance Mechanical Engr.*, 55-60., 2014.
- [39] N. Saravanakumar, L. Prabu, M. Karthik & A. Rajamanickam, *Experimental analysis on cutting fluid dispersed with silver nano particles*. *J. Mech. Sci. and Techn.*, 645- 651., 2014.
- [40] A. Shokrani, V. Dhokia, P. Muñoz - Escalona & S. Newman, *State-of-the-art cryogenic machining and processing*. *Int. J. Com. Integrated Man*, 616-648., 2013.
- [41] D. Setti, S. Ghosh & P. Rao, *Application of nano cutting fluid under minimum quantity lubrication (MQL) technique to improve grinding of Ti-6Al-4V alloy*. *Proceedings of World Acad. Sci., Engg. Tech.*, 512-516., 2012.
- [42] M. Razfar, *Principles of Machining*. Tehran, Iran: Amirkabir University of Technology Press, 2010.
- [43] J. Romano, J. Parker & Q. Ford, *Application opportunities for nanoparticles made from the condensation of physical vapors*. *Adv. Pm. Part*, 12-13., 1997.
- [44] Y. Yang, Z. Zhang, E. Grulke, W. Anderson & G. Wu, *Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nano-fluids) in laminar flow*. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 1107–1116., 2005.
- [45] D. Yoo, K. Hong & H. Yang, *Study of thermal conductivity of nanofluids for the application of heat transfer fluids*. *Thermochimica Acta*, 66-69., 2007.
- [46] W. Yu, D. France, J. Routbort & S. Choi, *Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements*. *Heat Transfer Engineering*, 432-460., 2008.
- [47] W. Yu, H. Xie, L. Chen & Y. Li, *Investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluid*. *Thermochimica Acta*, 92–96, 2009.
- [48] S. Khandekar, M. Sankar, V. Agnihotri & J. Ramkumar, *Nano-cutting fluid for enhancement of l cutting performance*. *Materials and Manufacturing Processes*, 2012.
- [49] D. Setti, Ghosh S & P. Rao, *Application of nano cutting fluid under minimum quantity lubrication (MQL) technique to improve grinding of Ti-6Al-4V alloy*. *Proceedings of World Acad. Sci., Engg. Tech.*, 512-516, 2012.
- [50] M. Prasad & R. Srikant, *Performance evaluation of nano graphite inclusions in steel*. *Int. J. Res. Engr. and Techn*, 2013.
- [51] N. Saravanakumar, L. Prabu, M. Karthik & Rajamanickam, *A Experimental analysis on cutting fluid dispersed with silver nano particles*. *J. Mech. Sci. and Techn.*, 645- 651., 2014.
- [52] K. Shailesh, *Application of Nano-fluid Lubrication during Machining of Aero engineering Grade Stainless Steel*. Odisha India: M.tech Thesis, submitted to the Department of Mechanical Engineering National Institute of Technology Rourkela 769008., 2015.
- [53] K. Ramesh, J. Prathap & P. Padmanabhan, *Experimental investigation of tool wear in turning of inconel718 material*. *Int. Conf. on Emerging Engr. Trends and Sci.*, 1-6., 2016.

- [54] L. Mayur & S. Borse, *Effect of Nano fluid in High Speed Machining of Metals: A review. Int. J. Scientific Res. & Dev.*, 2016.
- [55] Горан Девеџић, „CAD/CAM“ *технологије*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2006.
- [56] N. R. Dhar, *EFFECT OF MINIMUM QUANTITY LUBRICATION (MQL) BY WATER SOLUBLE CUTTING FLUID ON TOOL WEAR, SURFACE ROUGHNESS AND DIMENSIONAL DEVIATION IN TURNING STEEL*, Bangladesh University of Engineering and Technology, 2007.
- [57] D. Kramar, J. Kopa, High Pressure Cooling in the Machining of Hard-to-Machine Materials, *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering* 55(2009)11, 685-694, 2009.