

# Hlađenje vrtložnom cijevi u kombinaciji s MQL tehnikom podmazivanja pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika

---

Šterpin Valić, Graciela

Doctoral thesis / Disertacija

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:289930>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-12**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Graciela Šterpin Valić

**HLAĐENJE VRTLOŽNOM CIJEVI U  
KOMBINACIJI S MQL TEHNIKOM  
PODMAZIVANJA PRI  
TOKARENJU MARTENZITNOG  
NEHRĐAJUĆEG ČELIKA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Rijeka, 2020.



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Graciela Šterpin Valić

**HLAĐENJE VRTLOŽNOM CIJEVI U  
KOMBINACIJI S MQL TEHNIKOM  
PODMAZIVANJA PRI  
TOKARENJU MARTENZITNOG  
NEHRĐAJUĆEG ČELIKA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor: prof. dr. sc. Goran Cukor

Rijeka, 2020.

UNIVERSITY OF RIJEKA  
FACULTY OF ENGINEERING

Graciela Šterpin Valić

**VORTEX TUBE COOLING  
COMBINED WITH MQL TECHNIQUE  
OF LUBRICATION WHEN  
TURNING OF MARTENSITIC  
STAINLESS STEEL**

DOCTORAL THESIS

Rijeka, 2020.

Mentor doktorske disertacije: prof. dr. sc. Goran Cukor,  
Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci

Doktorska disertacija obranjena je dana \_\_.\_\_.2020. na Tehničkom fakultetu  
Sveučilišta u Rijeci, pred povjerenstvom u sastavu:

1. Prof. dr. sc. Zoran Jurković
2. Prof. dr. sc. Duško Pavletić
3. Prof. dr. sc. Dražen Bajić, FESB Split

Najveću zahvalu upućujem prof. dr. sc. Goranu Cukoru na mentorstvu i stručnoj pomoći tijekom izrade doktorske disertacije. Zahvaljujem mu na prenošenju znanja i njegovih iskustava. Zahvaljujem se višem laborantu Bernardu Badurini na pomoći i strpljenju tijekom izvođenja eksperimenata u Laboratoriju za obradu odvajanjem čestica na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci. Zahvaljujem kolegi doc. dr. sc. Paulu Blecichu i profesorima dr. sc. Zoranu Jurkoviću i dr. sc. Dušku Pavletiću.

Na kraju se zahvaljujem suprugu, roditeljima i bratu na riječima podrške i razumijevanju i malenom sinu Adrianu koji je postao glavna motivacija za daljnji rad.

## SAŽETAK

Konvencionalne tekućine za obradu metala na osnovi mineralnih ulja su štetne za okoliš i zdravlje ljudi te unose velike dodatne troškove u proizvodnju. Zbog toga su i prepoznate kao glavni neodrživi element procesa strojne obrade pa se sve više razvijaju alternativne tehnike hlađenja i/ili podmazivanja. U tom smislu, jedan od razvojnih pravaca predstavlja i strategija kombiniranja različitih alternativnih tehnika koje se međusobno mogu nadopunjavati prevladavajući ograničenja svake. Ovdje je istražena primjena MQL tehnike podmazivanja u kombinaciji s hlađenjem vrtložnom cijevi kao mogućeg ekološki prihvatljivog rješenja za tokarenje martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13. Cilj je bio utvrditi tehnološku i ekonomsku održivost predloženog rješenja u usporedbi s konvencionalnom primjenom emulzije za obradu metala. MQL tehnika podmazivanja, poznata i kao gotovo suha obrada, dostavlja ekstremno male količine biorazgradive tekućine za obradu metala mjerene u mililitrima po satu u zonu rezanja umjesto korištenja konvencionalnih cirkulirajućih poplavnih sustava s emulzijom. Privlači veliku pažnju istraživača jer poštuje jedinstvenu filozofiju "više nije uvijek bolje". S druge strane, zrak kao rashladni medij je potpuno prirodan pa je ova tehnika hlađenja najčišća i ekološki najprihvatljivija. Statistička analiza rezultata eksperimenata prema Taguchijevoj metodi te u kombinaciji s entropijom ponderiranom sivom relacijskom analizom i dobivenim regresijskim modelima hrapavosti obrađene površine i postojanosti reznog alata, omogućila je izvođenje zaključaka o tehnološkoj učinkovitosti istraživanih načina hlađenja i/ili podmazivanja. Utvrđen je pozitivan utjecaj MQL tehnike podmazivanja podržane hlađenjem vrtložnom cijevi na hrapavost obrađene površine i postojanost reznog alata. Troškovna evaluacija je omogućila izvođenje zaključaka o ekonomskoj učinkovitosti. Utvrđeno je da je MQL tehnika podmazivanja podržana hlađenjem vrtložnom cijevi troškovno povoljnija u odnosu na konvencionalno hlađenje emulzijom. Zaključuje se da je prijelaz s emulzija na osnovi mineralnih ulja na kombinaciju MQL tehnike podmazivanja i hlađenja vrtložnom cijevi dobar korak prema održivom tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 koji rezultira značajnim smanjenjem ekološkog opterećenja i opasnosti za zdravlje ljudi, pri čemu može ponuditi i značajnu ekonomsku korist.

**KLJUČNE RIJEČI:** tokarenje, martenzitni nehrđajući čelik, podmazivanje minimalnom količinom, vrtložna cijev, entropijom ponderirana siva relacijska analiza, Taguchi metoda.



## ABSTRACT

Conventional mineral oil-based metalworking fluids are detrimental to the environment and human health, and they bring significant additional costs to production. As a result, they are also recognized as a major unsustainable element of the machining process, and alternative cooling and/or lubrication techniques are increasingly being developed. In this regard, one of the development directions is the strategy of combining different alternative techniques that can complement each other by overcoming the limitations of each. The application of the MQL lubrication technique in combination with the vortex tube cooling as a possible environmentally friendly solution for turning martensitic stainless steel X20Cr13 is explored herein. The aim was to determine the technological and economic viability of the proposed solution compared to the conventional application of a metalworking emulsion. The MQL lubrication technique, also known as near-dry machining, delivers extremely small amounts of biodegradable metalworking fluid, measured in millilitres per hour, into the cutting zone instead of using conventional circulating emulsion flood systems. It attracts a lot of attention of researchers because it respects the unique philosophy of "more is not always better". On the other hand, air as a cooling medium is completely natural, so this cooling technique is the cleanest and most environmentally friendly. The statistical analysis of the results of the experiments by the Taguchi method and in combination with the entropy-weighted gray relational analysis, and the obtained regression models of the surface roughness and the tool life, made it possible to draw conclusions about the technological efficiency of the studied cooling and/or lubrication methods. The positive influence of the MQL lubrication technique supported by the vortex tube cooling on the surface roughness and the tool life was determined. The cost evaluation made it possible to draw conclusions on economic efficiency. It has been found that the MQL lubrication technique supported by the vortex tube cooling is more cost-effective than conventional emulsion cooling. It is concluded that the transition from mineral oil-based emulsions to a combination of MQL lubrication and vortex tube cooling is a good step towards the sustainable turning of martensitic stainless steel X20Cr13, resulting in a significant reduction in environmental load and human health hazards, which can offer significant economic benefits.

**KEY WORDS:** turning, martensitic stainless steel, minimum quantity lubrication, vortex tube, entropy-weighted grey relational analysis, Taguchi method.

# SADRŽAJ

ZAHVALA.....	I
SAŽETAK.....	II
ABSTRACT .....	III
1. UVOD .....	1
1.1. Problem i predmet istraživanja s hipotezom .....	1
1.2. Svrha i cilj istraživanja.....	5
1.3. Kratki pregled dosadašnjih istraživanja .....	5
1.4. Znanstvene metode.....	8
1.5. Struktura doktorske disertacije.....	9
2. TEKUĆINE ZA OBRADU METALA .....	11
2.1. Stvaranje strugotine i distribucija topline .....	11
2.2. Funkcije tekućine .....	12
2.3. Načini dobave tekućine .....	14
2.4. Vrste tekućina.....	15
2.5. Utjecaj tekućina na zdravlje .....	18
2.6. Utjecaj tekućina na okoliš .....	21
2.7. Ekonomski utjecaj tekućina .....	22
3. ODRŽIVA STROJNA OBRADA METALA.....	24
3.1. Biorazgrađiva ulja .....	26
3.2. MQL/MQCL .....	27
3.2.1. Napredni MQL sustavi.....	28
3.2.2. MQL u kombinaciji s hladnim plinom.....	30
3.2.3. MQL u kombinaciji s hlađenjem vrtložnom cijevi .....	30
3.3. Kriogeno hlađenje .....	32
3.4. Suha obrada.....	33
3.5. Ekonomski i ekološki aspekti sustava hlađenja/podmazivanja.....	34
4. TEORIJSKO ISTRAŽIVANJE.....	36
4.1. Postupak tokarenja .....	36
4.2. Trošenje, kriteriji istrošenosti i postojanost reznog alata.....	39
4.3. Hrapavost obrađene površine.....	43

4.4. Martenzitni nehrđajući čelici.....	46
4.5. Taguchijeva metoda ortogonalnih planova eksperimenata .....	48
4.5.1. Analiza podataka iz Taguchijevih eksperimenata.....	50
4.5.2. Eksperiment potvrde .....	52
4.6. Entropijom ponderirana siva relacijska analiza .....	52
4.7. Višestruka linearna regresijska analiza .....	55
5. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE .....	58
5.1. Eksperimentalne postavke.....	58
5.1.1. Ispitni materijal .....	58
5.1.2. Dimenzije priprema, alatni stroj i rezni alat.....	58
5.1.3. Emulzija, MQL jedinica i vrtložna cijev.....	60
5.1.4. Mjerna oprema .....	63
5.1.5. Plan eksperimenata prema Taguchijevoj metodi .....	65
5.2. Rezultati i rasprava.....	67
5.2.1. Hrapavost obrađene površine.....	67
5.2.2. Postojanost reznog alata .....	75
5.2.3. Učinak vrtložne cijevi na snižavanje temperature .....	84
5.2.4. Analiza s obzirom na višekriterijski optimizacijski problem.....	86
6. EKONOMIJA PRIJELAZA NA ODRŽIVU OBRADU .....	92
6.1. Ekonomski model.....	92
6.1.1. Analiza jediničnog proizvodnog vremena .....	92
6.1.2. Analiza jediničnog proizvodnog troška .....	93
6.2. Troškovna evaluacija obrade.....	97
7. ZAKLJUČAK .....	105
LITERATURA.....	112
POPIS OZNAKA I KRATICA .....	123
POPIS SLIKA .....	129
POPIS TABLICA.....	132
ŽIVOTOPIS .....	134
POPIS OBJAVLJENIH RADOVA .....	135

# 1. UVOD

## 1.1. Problem i predmet istraživanja s hipotezom

Tehnologija strojne obrade metala rezanjem obuhvaća skup proizvodnih postupaka kojima se metalnom obratku daje traženi oblik, određene dimenzije i tražena kvaliteta površine skidanjem viška materijala u obliku strugotine mehaničkim djelovanjem reznog klina alata. Suvremena proizvodna strategija je usmjerena na izradu dijelova visoke kvalitete u kratkom vremenu i uz niske troškove u okviru održive obrade koja podrazumijeva energetska učinkovitost i zaštitu okoliša i zdravlja radnika. Za postizanje održive obrade je potrebno poboljšati uvjete u kojima se ona sada odvija.

Primjena nehrđajućih čelika je u velikom porastu. U ukupno proizvedenim količinama metala u svijetu zauzimaju četvrto mjesto, nakon običnog ugljičnog čelika, lijevanog željeza i aluminija. Predviđa se da će u 2020. svjetska proizvodnja sirovog nehrđajućeg čelika dostići maksimum od 54,2 milijuna tona [117].

Kombinacija izvrsne otpornosti na koroziju, estetski ugodnog izgleda i širokog raspona čvrstoće, uključivši zadržavanje čvrstoće na kriogenim i povišenim temperaturama, čini nehrđajuće čelike atraktivnim izborom za raznolike primjene: od pribora za jelo do lopatica turbina i industrijske opreme te od kirurških instrumenata i implantata do dijelova prijevoznih sredstava. Nehrđajući čelici osiguravaju dugi vijek proizvoda uz malo održavanja i mogu se u potpunosti reciklirati kada se proizvod odbaci. S druge strane, svojstva kao što su niska toplinska vodljivost, tendencija vrlo brzog deformacijskog očvršćivanja i visoka duktilnost čine ih teško obradivim materijalima kod kojih se mogu pojaviti dva glavna problema: kratka postojanost reznog alata i loša kvaliteta obrađene površine [93]. Posebno nakon toplinskog očvršćivanja martenzitnih nehrđajućih čelika, povećanje tvrdoće i čvrstoće čini obradivost još težom.

Poboljšanje obradivosti nehrđajućih čelika se obično postiže preporučenim obilnim zalijevanjem zone rezanja specijalnom tekućinom za obradu metala [18]. Ona mora osigurati hlađenje čiji učinak produljuje postojanost reznog alata smanjivanjem njegovog termokemijskog trošenja (difuzija), poboljšava dimenzijsku točnost obratka smanjivanjem

njegove toplinske distorzije i sprečava pregrijavanje obrađivane površine. U slučaju pregrijavanja, što se očituje nijansiranim obojenjem obrađene površine, otpornost na koroziju se može smanjiti. Također, tekućina za obradu metala mora osigurati podmazivanje čiji učinak smanjuje mehaničko trošenje reznog alata (adhezija i abrazija) i sprečava stvaranje naljepka na reznom alatu [6]. Pojava naljepka odnosno nakupine otvrdnutog materijala obratka na reznom alatu rezultira lošom završnom obradom (povećana hrapavost obrađene površine).

Procjenjuje se da će u 2020. tržište tekućina za obradu metala dostići 9,74 milijarde američkih dolara [66]. Međutim, treba uzeti u obzir utjecaj ovih tekućina ne samo na obrađeni dio, već i na okoliš, prvenstveno na radnu okolinu. Tekućine za obradu metala se najvećim dijelom proizvode na osnovi mineralnih ulja. Takve tekućine nisu prirodno biorazgradive i sadrže velike količine sastojaka štetnih za okoliš i ljudsko zdravlje. Stoga su klasificirane kao opasni otpad [116] i moraju se sigurno zbrinuti [36]. Troškovi zbrinjavanja mogu biti i do četiri puta veći od njihove nabavne cijene [91]. Sve navedeno identificira tekućine na osnovi mineralnih ulja glavnim neodrživim elementom procesa strojne obrade metala rezanjem [55].

Sve stroži standardi zaštite okoliša i zaštite na radu povećavaju troškove proizvodnje i prisiljavaju proizvodna poduzeća na prelazak s tekućina za obradu metala na ekološki prihvatljivije, ali istovremeno i ekonomičnije alternativne tehnike hlađenja i/ili podmazivanja. Smanjenje troškova proizvodnje očekuje se upravo zbog izostanka troškova nabave, pripreme, održavanja i zbrinjavanja uobičajenih tekućina. S obzirom na hlađenje i podmazivanje, jedan od razvojnih pravaca predstavlja strategija kombiniranja različitih alternativnih tehnika koje se međusobno mogu nadopunjavati prevladavajući ograničenja svake [15]. Tako, podmazivanje minimalnom količinom – MQL (engl. *Minimum Quantity Lubrication*), tipično 5 – 50 ml/h čistog biljnog ili sintetičkog ulja u obliku aerosola, ima lošu sposobnost hlađenja koje je važno za uspješnu obradu nehrđajućih čelika. Učinak hlađenja MQL tehnike se onda može poboljšati pomoću vrtložne cijevi [82]. To je jeftina i jednostavna naprava koja bez pokretnih dijelova razdvaja struju komprimiranog zraka s temperaturom okoline na vruću i hladnu (i do -50 °C) [13]. Zrak je potpuno prirodan i kao takav najčišći i ekološki najprihvatljiviji rashladni medij [37]. Ovakva varijanta MQL-a je poznata kao rashladno podmazivanje minimalnom količinom – MQCL (engl. *Minimum Quantity Cooling Lubrication*).

Tokarenje je jedan od temeljnih postupaka strojne obrade metala rezanjem, a služi za dobivanje pretežno rotacijskih površina (simetričnih i nesimetričnih, okruglih i ne okruglih) uporabom jednoreznog alata. U industrijama gdje su točnost oblika i dimenzija važni kao npr. u automobilskoj, a posebno za teško obradive materijale poput nehrđajućih čelika, načini smanjenja troškova obrade i poboljšanja kvalitete obrađene površine tokarenih dijelova stalnim su predmetom istraživanja [23].

Postojanost reznog alata igra važnu ulogu u ekonomiji obrade metala. Uvjeti koji daju vrlo kratku postojanost reznog alata su neekonomični jer su troškovi njegove zamjene visoki. S druge strane, uvjeti koji osiguravaju dugu postojanost reznog alata su neekonomični zbog niske proizvodnosti. Brzina skidanja materijala (volumen skinutog materijala u jedinici vremena) je pokazatelj koji izravno cilja na proizvodnost. Nadalje, hrapavost obrađene površine je široko korišteni pokazatelj njezine kvalitete. Niska hrapavost obrađene površine osigurava značajna poboljšanja triboloških svojstava, zamorne čvrstoće, otpornosti na koroziju i estetskog izgleda gotovog proizvoda [26]. Na postojanost alata, brzinu skidanja materijala i hrapavost obrađene površine najviše utječu parametri rezanja koji potpuno definiraju relativno kretanje između reznog alata i obratka. Za postupak tokarenja je onda potrebno odrediti optimalnu kombinaciju brzine rezanja, posmaka reznog alata po okretaju obratka i dubine rezanja.

Taguchijeva metoda [103] sustavne primjene ortogonalnih planova eksperimenata i njihove analize u svrhu određivanja optimalne kombinacije promatranih razina parametara je u naravi statistička i izvorno namijenjena rješavanju jednokriterijskih optimizacijskih problema. Za prevladavanje ovog nedostatka Taguchijeva metoda se onda može kombinirati sa sivom relacijskom analizom – GRA (engl. *Grey Relational Analysis*) [34] koja višekriterijske optimizacijske probleme pretvara u jednokriterijske. Izazovna situacija kod GRA je određivanje težine svakog kriterija ovisno o njegovoj relativnoj važnosti što je prepušteno subjektivnoj procjeni istraživača. Ovu problematičnu okolnost može uspješno riješiti uvođenje tehnike mjerenja entropije [80, 115] koja omogućava objektivnu procjenu pojedinačnih težina kriterija na osnovi entropije cijelog procesa.

Konačno, na raspolaganju je vrlo malo radova u kojima je MQL tehnika kombinirana s hlađenjem vrtložnom cijevi, a odnose se na tokarenje [69] i glodanje [14] aluminijske legure 6061, tokarenje komercijalnog čistog titana (razred 2) [94] i brušenje čelika Ck45 [83]. Da bi

se omogućila temeljitija procjena učinkovitosti ovakvog ekološki prihvatljivog alternativnog rješenja za hlađenje i podmazivanje u strojnoj obradi metala rezanjem, potrebno je više istraživanja koja uključuju različite materijale i postupke obrade.

Slijedom navedenog, formuliran je **problem istraživanja**:

*MQL tehnika u kombinaciji s hlađenjem vrtložnom cijevi nije aktivno zastupljena u strojnoj obradi nehrđajućih čelika rezanjem što negativno utječe na sva tri segmenta njezinog održivog razvoja – ekološki, sociološki i ekonomski.*

Sukladno problemu, **predmet istraživanja** je...

*...utjecaj MQL tehnike u kombinaciji s hlađenjem vrtložnom cijevi pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 na postojanost reznog alata, hrapavost obrađene površine i trošak obrade te u tom smislu tehnološku i ekonomsku održivost u usporedbi s primjenom emulzije za obradu metala.*

Na osnovi najvažnijih odrednica problema i predmeta istraživanja postavljena je **radna hipoteza**:

*Uvođenje MQL tehnike u kombinaciji s hlađenjem vrtložnom cijevi u postupak tokarenja martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 eliminira ekološko, zdravstveno i ekonomsko opterećenje svojstveno primjeni emulzije za obradu metala i pridonosi održivosti obrade bez žrtvovanja njezinog učinka.*

Radna hipoteza konkretizira se s četiri **pomoćne hipoteze (PH)**:

**PH 1:** Zamjena primjene emulzije za obradu metala kombinacijom MQL tehnike i hlađenja vrtložnom cijevi može dati bolje rezultate hrapavosti obrađene površine pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13.

**PH 2:** Zamjena primjene emulzije za obradu metala kombinacijom MQL tehnike i hlađenja vrtložnom cijevi može dati iste ili bolje rezultate postojanosti reznog alata pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13.

**PH 3:** Evaluacija tehnoloških učinaka za različite tehnike hlađenja i/ili podmazivanja pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 omogućava odabir optimalnog rješenja u ekološkom i tehnološkom pogledu.

**PH 4:** Kombinacija MQL tehnike i hlađenja vrtložnom cijevi pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 može, osim ekoloških i zdravstvenih, donijeti i ekonomsku korist.

## 1.2. Svrha i cilj istraživanja

Strože politike i propisi kojima se uređuje primjena, recikliranje i konačno zbrinjavanje tekućina za obradu metala značajno povećavaju trošak obrade. U tom smislu, uvođenje MQL tehnike u kombinaciji s hlađenjem vrtložnom cijevi u postupak tokarenja martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 s namjerom snižavanja troška obrade, a uz povećanje kvalitete obrađene površine i proizvodnosti, predstavlja **svrhu istraživanja**.

**Cilj istraživanja** je bio utvrditi tehnološku i ekonomsku održivost MQL tehnike u kombinaciji s hlađenjem vrtložnom cijevi pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 u usporedbi s primjenom emulzije za obradu metala. Dokazi o opravdanosti uporabe predložene alternativne tehnike hlađenja i podmazivanja predstavljat će nova saznanja za područje obrade nehrđajućih čelika.

## 1.3. Kratki pregled dosadašnjih istraživanja

MQL tehnika, poznata i kao gotovo suha obrada – NDM (engl. *Near Dry Machining*, Debnath i sur. [32]), podmazivanje malom količinom – SQL (engl. *Small Quantity Lubrication*, Sinha i sur. [97]) ili mikro podmazivanje – ML (engl. *Micro Lubrication*, Mukte i Kamde [71]), eliminira uporabu uobičajenih tekućina za obradu metala i zamjenjuje ih ekstremno malom količinom vrlo fine disperzije kapljevine u struji komprimiranog zraka (aerosol). Izvješteno je o uspješnoj primjeni MQL-a kod tokarenja (Sampaio i sur. [85]), glodanja (Uysal i sur. [107]), bušenja (Meena i El Mansori [68]) i brušenja (Hadad i Hadi [45]). MQL je rezultirao poboljšanom kvalitetom obrađene površine, boljim lomljenjem strugotine, manjom silom rezanja i dužom postojanošću alata (Sen i sur. [88], Said i sur. [84]).



Singh i sur. [95] su ustanovili da je većina istraživanja o primjenjivosti MQL-a provedena na kaljenim čelicima AISI 1040, 1045, 1060 i 4340, nikal-kromovim legurama poput Inconela 716, 718 i 800, aluminijevoj leguri 6061 i titanovoj leguri Ti-6Al-4V. Međutim, za obradu nehrđajućih čelika tokarenjem se pretraživanjem najznačajnijih bibliografskih baza (*Web of Science*, *Science Direct*, *Scopus*, *Springer Link* i *Google Scholar*) može pronaći samo sedam relevantnih istraživanja o primjeni MQL-a i niti jedno o primjeni kombinacije MQL-a s vrtložnom cijevi.

Leppert je objavio dva rada u kojima je istražio trošenje reznog alata [62] i svojstva površinskog sloja [63] pri tokarenju austenitnog nehrđajućeg čelika AISI 316L. MQL tehnika je u usporedbi s primjenom emulzije (mokra obrada) značajno smanjila adheziju materijala obratka na površine reznog alata. Također, pri niskim je posmacima MQL tehnika rezultirala nižom hrapavošću ( $Ra = 1,34 - 1,5 \mu\text{m}$ ) u odnosu na suhu ( $Ra = 1,54 - 1,82 \mu\text{m}$ ) i mokru obradu ( $Ra = 1,68 - 2,26 \mu\text{m}$ ) te homogenijom obrađenom površinom s manje oštećenja.

Dureja i sur. [38] su istraživali potencijal MQL tehnike za postupak tokarenja austenitnog nehrđajućeg čelika AISI 202 prevučenim karbidnim reznim alatom. S obzirom na trošenje reznog alata i hrapavost obrađene površine, MQL tehnika je pokazala superiornije rezultate u odnosu na mokru i suhu obradu.

Tekućine za obradu metala na osnovi biljnih ulja su otvorile put prema poboljšanju održivosti MQL tehnike jer su netoksične, obnovljive i lako biorazgradive. Elmunafi i sur. [40] su ocjenjivali učinak MQL-a s ricinusovim uljem pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika AISI 420 otvrdnutog na 48 HRC. Za brzine rezanja do 170 m/min i posmake do 0,24 mm po okretaju su postignuti bolji rezultati u usporedbi sa suhom obradom u smislu dulje postojanosti prevučenog karbidnog reznog alata, niže hrapavosti obrađene površine i manje sile rezanja.

Pereira i sur. [76] su kombinirali MQL tehniku i kriogeno hlađenje tekućim (ukapljenim) dušikom ( $\text{LN}_2$ ) odnosno ugljikovim dioksidom ( $\text{CO}_2$ ). Utvrdili su da pri tokarenju austenitnog nehrđajućeg čelika AISI 304 uporaba  $\text{CO}_2$  kao kriogenika djeluje bolje na postojanost reznog alata, silu rezanja i integritet obrađene površine nego  $\text{LN}_2$  rashladno sredstvo. Kombiniranje s MQL tehnikom je dodatno poboljšalo obradivost bez obzira na korišteni kriogenik.

Jamaludin i sur. [52] su konstruirali MQL sustav koji proizvodi ekstremno hladnu maglicu dobavom hladnog zraka ( $-13,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) i hidroskopskog ulja (100 ml/h). Pri tokarenju austenitnog nehrđajućeg čelika AISI 316, predloženi sustav može smanjiti silu rezanja za 60 N i značajno smanjiti hrapavost obrađene površine u usporedbi sa suhom obradom.

Od nedavno se u MQL tehnici koriste i nano tekućine. Tako su Singh i sur. [96] pri tokarenju austenitnog nehrđajućeg čelika AISI 304 prevučenim karbidnim alatom zabilježili smanjenje trošenja stražnje površine alata za 32,26 % u odnosu na suhu odnosno 9,68 % u odnosu na mokru obradu. Slično, u usporedbi sa suhom i mokrom obradom se hrapavost obrađene površine redosljedno smanjila za 34,72 % i 7,59 %.

Boswell [13] tvrdi da je vrtložna cijev sposobna isporučiti učinak hlađenja koji je vrlo usporediv s onim tekućina za obradu metala. Ipak, literatura o tokarenju u uvjetima hlađenja vrtložnom cijevi je rijetka. U nastavku su izdvojena četiri relevantna istraživanja.

Kostadin i sur. [57] su istraživali hlađenje vrtložnom cijevi pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 i dobili manju hrapavost obrađene površine, a time i bolju korozivsku otpornost u usporedbi s primjenom emulzije za obradu metala.

Cukor i sur. [27] su za konkretni slučaj tokarenja martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 odredili kritičnu brzinu rezanja od 248 m/min do koje hlađenje vrtložnom cijevi može ponuditi značajnu ekonomsku korist u odnosu na primjenu emulzije za obradu metala.

Liew i sur. [64] su uspoređivali trošenje reznog alata i hrapavost obrađene površine pri tokarenju dupleks nehrđajućeg čelika AISI 2205 u uvjetima hlađenja emulzijom za obradu metala odnosno vrtložnom cijevi. Utvrdili su da je trošenje reznog alata manje u slučaju primjene emulzije dok je hrapavost obrađene površine manja u slučaju primjene vrtložne cijevi.

Veić i sur. [108] su istraživali obradivost super dupleks nehrđajućeg čelika EN 1.4410 u uvjetima hlađenja vrtložnom cijevi i razvili prediktivne modele za hrapavost obrađene površine.

Za optimiranje parametara rezanja za tokarenje martenzitnih nehrđajućih čelika uspješno je bila korištena Taguchijeva metoda (Chandrasekaran i sur. [24], Sobiyi i Sigalas [99], Senthilvelan i sur. [89], Nandhakumar i Prakash [72]) odnosno Taguchijeva metoda potpomognuta sivom relacijskom analizom (Vignesh Kumar i sur. [111], Ahamed Meeran i sur. [4]). Studije su bile usredotočene na materijale AISI 410, AISI 416 i AISI 440B i uporabu TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ti(C, N, B), (Ti, Al)N, keramičkih i PcBN reznih alata u mokroj ili suhoj obradi. Za jednokriterijsko ili višekriterijsko optimiranje su bili uzeti u obzir sljedeći parametri obradivosti: hrapavost obrađene površine [4, 24, 72, 89, 99, 111], trošenje reznog alata [4, 89], vrijeme obrade [72] i brzina skidanja materijala [72, 111].

Šterpin Valić i sur. [100] su za potrebe višekriterijskog optimiranja tokarenja martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 testirali Taguchijevu metodu ortogonalnih planova eksperimenata u kombinaciji sa sivom relacijskom analizom zasnovanom na tehnici mjerenja entropije koju je predložio Wen [115]. U radu je primjena emulzije za obradu metala uspoređivana s MQL tehnikom bez i uz podršku hlađenja vrtložnom cijevi. Rezultati su pokazali poboljšanje hrapavosti obrađene površine i brzine skidanja materijala u optimalnom stanju (MQL + vrtložna cijev), ali i smanjenu postojanost reznog alata.

Konačno, pregledom literature je uočeno da u Taguchijevom ortogonalnom planu eksperimenata većina istraživača primjenjuje transformacijski omjer signal/šum – S/N (engl. *Signal-to-Noise*) na samo jednom mjerenju promatranog odziva procesa rezanja (jedna replikacija) i izvodi analizu varijance. Međutim, Taguchi [103] je preporučio transformacijski S/N omjer za objedinjavanje više mjerenja u jednu vrijednost koja onda odražava disperziju u testnim podacima. Stoga, koncept primjene transformacijskog S/N omjera na samo jednoj replikaciji, usvojen od mnogih istraživača, nema nikakve druge koristi osim dodatnog računanja. Imajući u vidu ovo zapažanje, predmetna doktorska disertacija može poslužiti kao primjer dobre prakse.

#### **1.4. Znanstvene metode**

Prilikom istraživanja, formuliranja i predstavljanja rezultata istraživanja korištene su u odgovarajućim kombinacijama sljedeće znanstvene metode: induktivna i deduktivna, metode analize i sinteze, specijalizacije i generalizacije, klasifikacije, kompilacije, komparacije, planiranja eksperimenata, mjerenja, statističke metode te metode modeliranja i optimiranja.

## 1.5. Struktura doktorske disertacije

Struktura doktorske disertacije se sastoji od sedam međusobno povezanih dijelova.

U prvom dijelu, **UVODU**, navedeni su problem i predmet istraživanja, radna hipoteza i pomoćne hipoteze, svrha i ciljevi istraživanja, znanstvene metode i obrazložena je struktura doktorske disertacije.

Drugi dio rada pod naslovom **TEKUĆINE ZA OBRADU METALA** počinje razmatranjem procesa stvaranja strugotine s pratećim toplinskim pojavama. Nakon toga su na temelju njihovih osnovnih funkcija tekućine za obradu metala definirane kao sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje. Opisani su učinci tekućina na proces rezanja, načini dobave, vrste i osnovni sastav. Posebno su istaknuti utjecaji na zdravlje i okoliš kao i ekonomski utjecaj na strojnu obradu metala rezanjem.

**ODRŽIVA STROJNA OBRADA METALA** je naslov trećeg dijela u kojem su analizirane alternativne tehnike hlađenja i/ili podmazivanja koje pridonose održivosti obrade. Posebno je naglašeno podmazivanje odnosno rashladno podmazivanje minimalnom količinom te je opisana vrtložna cijev.

Četvrti dio pod naslovom **TEORIJSKO ISTRAŽIVANJE**, posvećen je saznanjima neophodnim za pripremu eksperimentalnog dijela istraživanja i analizu dobivenih rezultata. Posebno su opisani osnovni pojmovi obrade metala tokarenjem, mehanizmi, oblici i parametri trošenja reznog alata, kriteriji istrošenosti i postojanost reznog alata, hrapavost obrađene površine i parametri hrapavosti te martenzitni nehrđajući čelici. Objašnjene su Taguchijeva metoda ortogonalnih planova eksperimenata u kombinaciji s entropijom ponderiranom sivom relacijskom analizom (TEGRA) kao pristup rješavanju problema višekriterijskog optimiranja i višestruka linearna regresijska analiza potrebna za modeliranje funkcija obradivosti.

**EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE** je naslov petog, najopširnijeg dijela u kojem su prvo opisane eksperimentalne postavke (ispitni materijal, obradni sustav, mjerna oprema i plan eksperimenata za ispitivanje obradivosti prema Taguchijevoj metodi), a zatim su predloženi rezultati istraživanja dobiveni izvođenjem dvadeset i sedam eksperimenata,

statistička analiza rezultata i matematički modeli dobiveni njihovom višestrukom regresijskom analizom. Rezultati obradivosti ispitnog materijala su raspravljani u funkciji dokazivanja radne hipoteze. Također, predloženi su rezultati eksperimenta potvrde koji je izveden s dva ponavljanja.

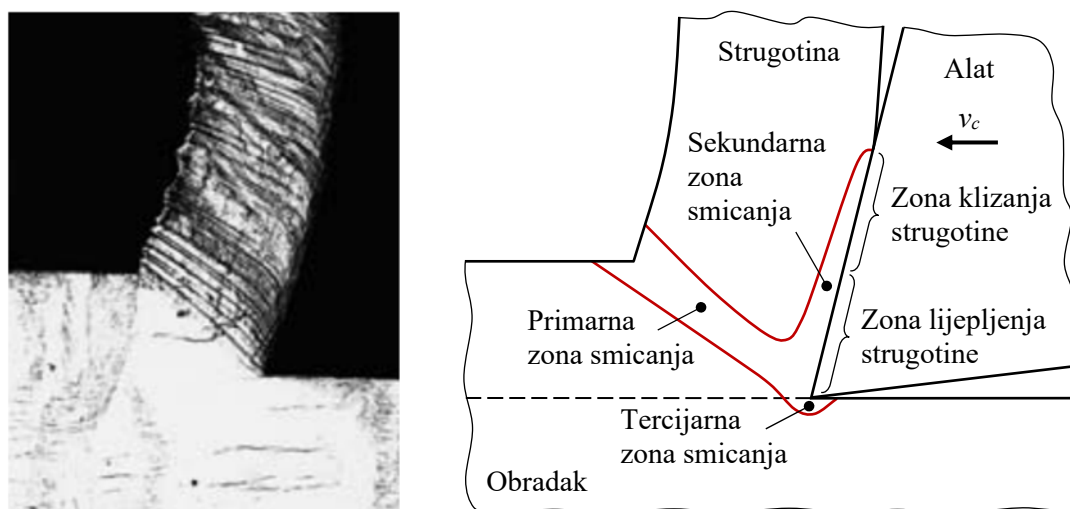
U šestom dijelu pod naslovom **EKONOMIJA PRIJELAZA NA ODRŽIVU OBRADU**, izveden je proračun jediničnog proizvodnog troška za slučaj primjene emulzije za obradu metala odnosno podmazivanja minimalnom količinom bez i uz podršku hlađenja vrtložnom cijevi. Također, argumentirana je ekonomska korist od uvođenja podmazivanja minimalnom količinom kombiniranog s hlađenjem vrtložnom cijevi.

U sedmom i posljednjem dijelu, **ZAKLJUČKU**, dana je sinteza rezultata istraživanja kojima je dokazana postavljena radna hipoteza uz iznošenje znanstvenog doprinosa, očekivane primjene rezultata i smjernica budućih istraživanja.

## 2. TEKUĆINE ZA OBRADU METALA

### 2.1. Stvaranje strugotine i distribucija topline

Za proces stvaranja strugotine su karakteristične tri zone plastične deformacije. Budući da je glavni mehanizam deformacije u tim područjima smicanje, zone se obično nazivaju primarnom, sekundarnom i tercijarnom zonom smicanja (slika 2.1).



**Slika 2.1.** Zone smicanja kod stvaranja strugotine.  $v_c$  brzina rezanja (mikrofotografija: [25])

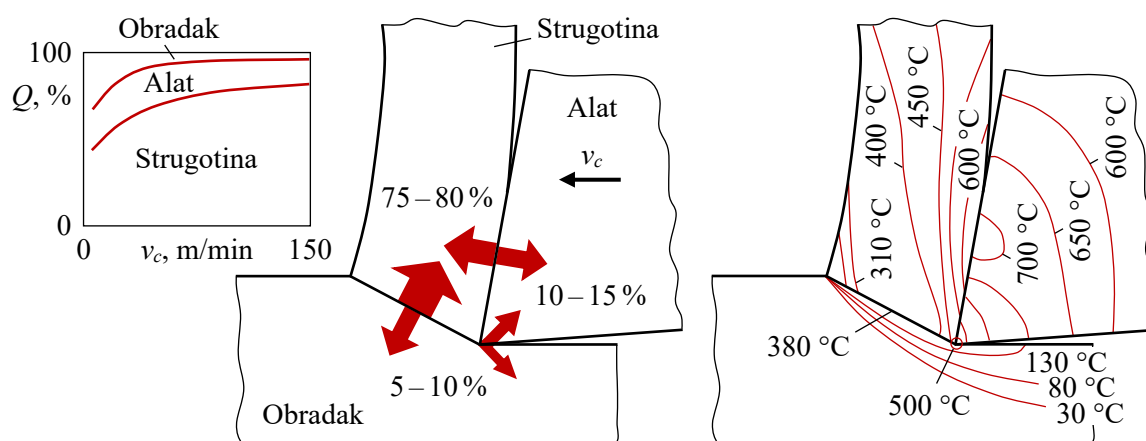
Primarna zona smicanja je prilično izrazito, usko područje u kojem se materijal obratka savija u smjeru prednje površine reznog alata, stvarajući tako strugotinu [74]. Ovdje nastaju velike smične deformacije reda veličine 1 – 3, što dovodi do neobično visokih brzina deformacije iznosa  $10^3 - 10^6 \text{ s}^{-1}$ , pri čemu porast temperature može biti veći od  $300 \text{ °C}$  [67].

Za razliku od primarne zone smicanja koja je nužna za proces stvaranja strugotine, sekundarna i tercijarna zona smicanja su nepoželjne i postoje samo zbog nedostataka reznih alata koji u praksi nisu bez trenja niti savršeno oštri. Trenje na prednjoj površini reznog alata uzrokuje dodatnu intenzivnu plastičnu deformaciju tankog sloja unutarnje strane strugotine (manje od 10 % njezine debljine) poznatom kao sekundarna zona smicanja. Deformacija može rasti i do 10, a temperatura doseći talište materijala obratka [67]. Trenje je toliko veliko da u prvom dijelu međusobnog kontakta dolazi do prijanjanja materijala tek nastale strugotine za prednju površinu reznog alata i zato se ovo područje naziva zonom lijepljenja. Posljedično, tu se odvija glavnina deformacije u sekundarnoj zoni smicanja. U drugom dijelu kontakta

strugotina počinje kliziti uzduž prednje površine reznog alata sve dok je ne napusti. Stoga se ovo područje sekundarne zone smicanja naziva zonom klizanja.

Tercijarna zona smicanja je izravna posljedica zaobljenosti rezne oštrice ili prisutnosti naljepka (slojevita nakupina otvrdnutih čestica materijala obratka na prednjoj površini reznog alata koja se ciklički formira lokalnim zavarivanjem i zatim trga). Suprotno onome što bi se moglo očekivati od imena postupka, kod obrade metala rezanjem skidanje strugotine je više oranje nego radnja rezanja. Budući da se materijal obratka drži rezne oštrice, tercijarna zona smicanja se može smatrati produženjem sekundarne, no valja napomenuti da ovdje dolazi ne samo do deformacije strugotine već i površine koju se obrađuje.

Glavnina energije utrošene za stvaranje strugotine se pretvara u toplinu. Koliki će dio generirane topline prijeći na strugotinu, rezni alat ili obradak najviše zavisi od brzine rezanja (slika 2.2). Primjerice, pri obradi čelika brzinom rezanja od 150 m/min se približno 75 – 80 % ukupne topline raspršuje u strugotini, 10 – 15 % preuzima alat, a preostalih 5 – 10 % odvodi obradak [44]. Također, najviša temperatura ne nastaje na samoj reznoj oštrici, već se nalazi približno na sredini kontakta strugotine i prednje površine reznog alata kao na slici 2.2.



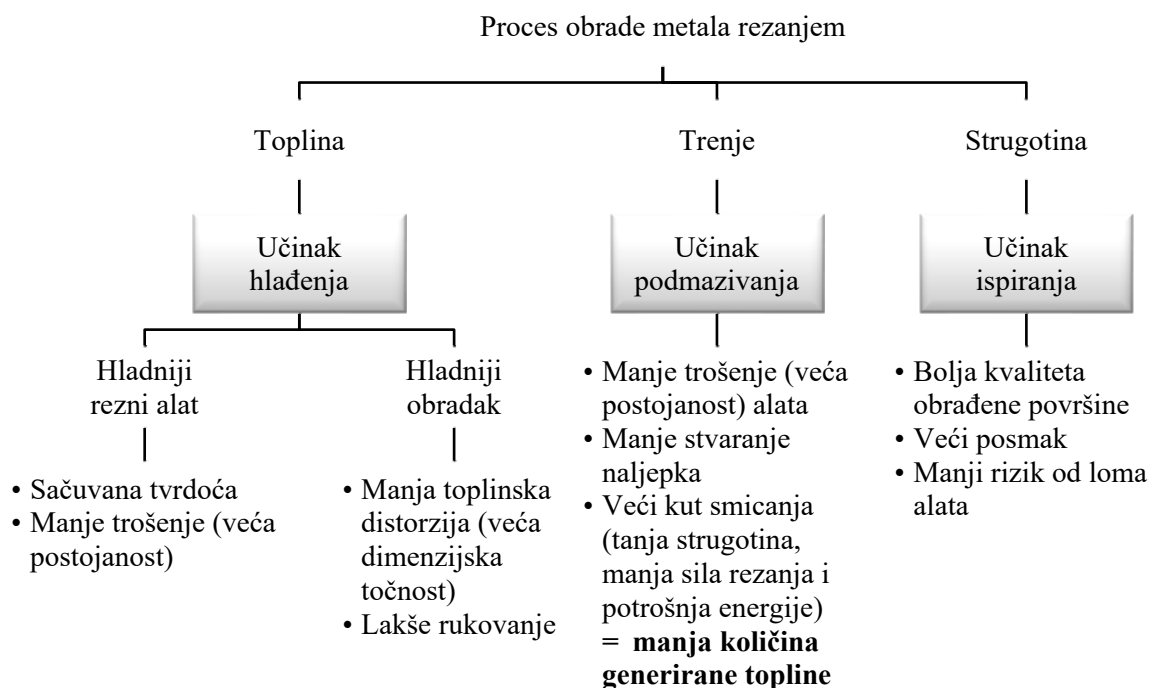
**Slika 2.2.** Distribucija topline [44] i temperaturna polja pri obradi čelika alatom od tvrdog metala [110].  $Q$  količina topline,  $v_c$  brzina rezanja

## 2.2. Funkcije tekućine

Pojava topline uzrokovana procesima smicanja i trenja pri stvaranju strugotine može značajno utjecati na ukupni rezultat strojne obrade metala rezanjem [92]. Negativni utjecaj topline se može smanjiti specijalnom tekućinom za obradu metala (engl. *metalworking fluid*) koja se

naziva i tekućinom za rezanje (engl. *cutting fluid*). Njezina uspješna primjena, osim poboljšanja kvalitete izratka, može produljiti postojanost alata za 1,2 – 4 puta, intenzivirati parametre rezanja za 20 – 60 % i povećati produktivnost za 10 – 50 % [109].

Osnovne funkcije tekućine za obradu metala su: **hlađenje** reznog alata i obratka tijekom rezanja; **podmazivanje** dodirnih površina alata sa strugotinom i obrađenom površinom; **ispiranje** strugotine i čestica nastalih zbog trošenja alata iz zone rezanja, slika 2.3. Dodatna funkcija je kratkotrajna zaštita obrađene površine od korozije. Specifično za nehrđajuće čelike, odmah nakon obrade treba ukloniti sve tragove tekućine kako bi se omogućila samopasivacija obrađene površine [18].



**Slika 2.3.** Učinci tekućine za obradu metala na proces rezanja

S obzirom na osnovne funkcije, tekućina za obradu metala se može najjednostavnije definirati kao *sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje* (SHIP). Relativna važnost osnovnih funkcija tekućine ovisi o materijalima obratka i reznog alata, postupku obrade i parametrima rezanja. Tako je hlađenje osobito važno kod obrade metala s niskom toplinskom vodljivošću (npr. nehrđajući čelici i legure titana), dok se materijali reznih alata osjetljivi na termošok ne smiju hladiti (npr. oksidna keramika). Također, hlađenje kod postupka glodanja može izazvati toplinske pukotine na reznjoj oštrici. Ispiranje strugotine iz zone rezanja je posebno važno za bušenje i obradu dubokih i uskih šupljina. Pri višim brzinama rezanja podmazivanje gubi



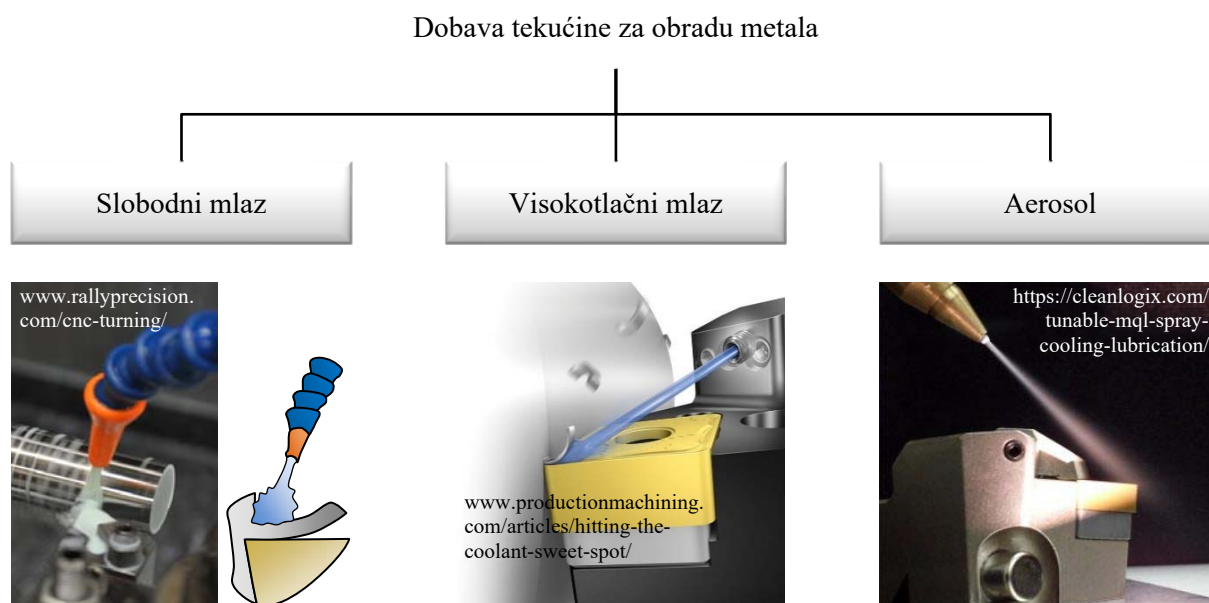
učinkovitost jer nastaje visoka temperatura koja isparava tekućinu za obradu metala prije nego može podmazati [8]. Zato je za razliku od hlađenja, podmazivanje važno samo za niske brzine rezanja i postupke obrade kao što su izrada ozubljenja, rezanje navoja, provlačenje i honanje.

### 2.3. Načini dobave tekućine

Na učinkovitost tekućine za obradu metala utječe i način dobave, slika 2.4. Najčešće se koristi niskotlačni sustav (0,6 – 1 MPa) i *vanjske* zglobno-fleksibilne cijevi za dobavu tekućine kontinuiranim **slobodnim mlazom** u obilnim količinama (obično od 10 l/min za tokarenje do 225 l/min za čeonu glodanje). Ovaj način dobave je zasnovan na tradicionalnoj pretpostavci da je veća količina poplavne tekućine (tzv. mokra obrada) bolja za proces rezanja. Hlađenje se temelji na principu kondukcije topline. Budući da poplavna tekućina za obradu metala ne doprijeva u zonu rezanja, već je u kontaktu s vanjskom stranom korijena strugotine, toplina se prenosi iz zone rezanja kroz strugotinu u tekućinu. Efikasnost ovog načina dovođenja je manja pri obradi materijala s niskom toplinskom vodljivošću kao što su nehrđajući čelici.

Učinkovitost osnovnih funkcija tekućine za obradu metala se može povećati **visokotlačnim mlazom** (engl. *high-pressure jet*). Najčešća je *interna* dobava tekućine kroz glavno vreteno/držak/alat direktno na prednju (slika 2.4), stražnju ili obje površine reznog alata istovremeno, s različitim tlakovima (5,5 – 35 MPa), protocima (5 – 75 l/min) i promjerima mlaznica (0,8 – 1,4 mm). Visokotlačni mlaz smanjuje kontaktnu površinu reznog alata i strugotine te lomi i odvodi strugotinu. Da bi se izbjeglo oštećivanje površine obratka, veličina stranih čestica (zagađivača) u visokotlačnom mlazu ne smije prelaziti 20  $\mu\text{m}$  [53]. Stoga je potrebno osigurati pravilno i kontinuirano filtriranje tekućine.

Tekućina za obradu metala se može atomizirati i dovesti u obliku **aerosola** (koji se često naziva magla) kao mješavina komprimiranog zraka i mikrokapljica ulja veličine 10 – 25  $\mu\text{m}$ . Prednosti ovog načina dobave u usporedbi sa slobodnim mlazom su minimizirana uporaba tekućine (50 – 500 ml/h) s potrošnjom gotovo bez ostatka (gotovo suha obrada) i bolje podmazivanje jer se aerosol raspršuje izravno u zonu rezanja [7]. Međutim, hlađenje koje se inače temelji na zajedničkom djelovanju prisilne konvekcije komprimiranim zrakom i isparavanja mikrokapljica ulja ima niži kapacitet, a učinak ispiranja je slabiji.



**Slika 2.4.** Načini dobave tekućine za obradu metala

## 2.4. Vrste tekućina

Najstariji dostupni objavljeni rad o tekućinama za obradu metala je iz 1868. i djelo je W. H. Northcotta [73]. Budući da je voda uzrokovala pokrivanje obratka i tokarilice hrđom već pola sata nakon uporabe, predložio je miješanje male količine prljavog ulja ili ulja koje prolazi kroz ležajeve s vodenom otopinom sode. Osim što omekšava vodu, dodavanje sode uvelike sprečava koroziju metalnih površina. Nakon što je 1883. F. W. Taylor direktnim polijevanjem vanjske strane korijena strugotine vodom uspio postići porast brzine rezanja i stoga produktivnosti za 30 – 40 % [104], već sljedeće godine napravljeni su prvi alatni strojevi za primjenu sa zajedničkim središnjim spremnikom i recirkulacijskim sustavom vodene otopine sode. U 20. stoljeću je razvoj tekućina za obradu metala brzo napredovao, osobito 1920-tih kada su se pojavila emulgirajuća ulja dobre kvalitete i kasnih 1950-tih kada su se pojavila sintetička ulja. Razvoj aditiva izvrsnih svojstava rezultirao je današnjim tekućinama složenih kemijskih sastava koje se ovisno o posebnim zahtjevima postupaka obrade značajno razlikuju.

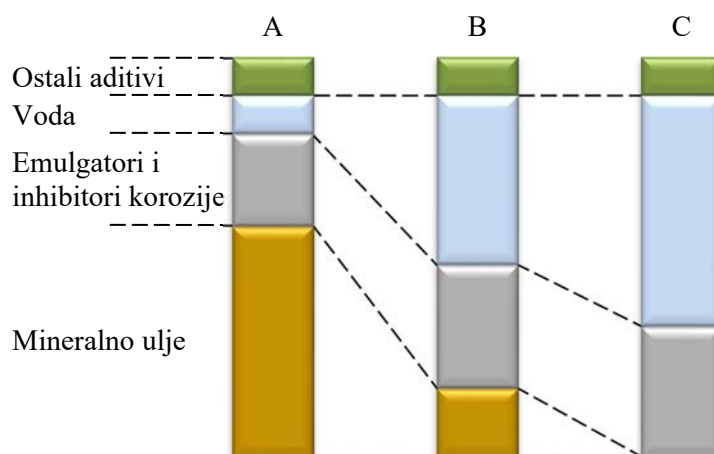
Norma DIN 51385:2013 [35] svrstava tekućine za obradu metala u tri skupine kao na slici 2.5. Tekućine koje se ne miješaju s vodom, odnosno rezna ulja, imaju prevladavajuće svojstvo podmazivanja i isporučuju se kao gotovi proizvodi. Vodomješljivi koncentрати se prije uporabe razrjeđuju vodom, a pomiješani sastojci onda mogu tvoriti emulzije, mikroemulzije ili otopine s prevladavajućim svojstvom hlađenja.



**Slika 2.5.** Klasifikacija tekućina za obradu metala prema DIN 51385:2013

Većina **reznih ulja** se sastoji od baznog ulja (sadržaj 70 – 99 %) kojem su dodani polarni aditivi za poboljšanje mazivosti, inhibitori korozije, AW (engl. *antiwear*) aditivi protiv trošenja reznog alata, EP (engl. *extreme pressure*) aditivi za ekstremno visoke tlakove i dr. Bazna ulja su najčešće mineralnog porijekla (parafinska, naftenska i sl.), a sve više se primjenjuju biljna (palmino, ricinusovo, sojino, suncokretovo i uljane repice) ili sintetička ulja (esteri i polialfaolefini). Čista rezná ulja bez aditiva se danas rijetko koriste i to eventualno za laku obradu nelegiranih čelika i obojenih metala.

Na slici 2.6 prikazani su grubi sastavi tri vrste *vodomješljivih* koncentrata: konvencionalnog emulgirajućeg, polusintetičkog emulgirajućeg i vodotopivog (sintetičkog).

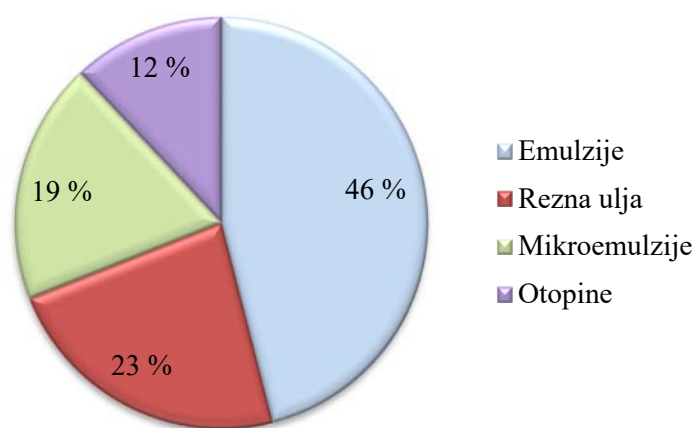


**Slika 2.6.** Sastavi vodomješljivih koncentrata tekućina za obradu metala. A konvencionalni emulgirajućí, B polusintetički emulgirajućí, C vodotopivi (sintetički)

Osnova konvencionalnih emulgirajućih koncentrata je mineralno ulje (sadržaj 60 – 85 %), a nakon miješanja s vodom daju mliječno bijele **emulzije** (dispergirane kapljice ulja promjera 1 – 10  $\mu\text{m}$  u kontinuiranoj fazi vode). Uz emulgatore za održavanje stabilnosti emulzije, komplet aditiva uključuje inhibitore korozije, AW/EP aditive, antipjenušavce, biocide i dr. Od svih vrsta tekućina za obradu metala, najviše se koriste upravo emulzije (slika 2.7). Budući da kombiniraju podmazujuća svojstva ulja s rashladnim svojstvima vode, mogu se koristiti u širokom rasponu operacija obrade rezanjem.

Polusintetički emulgirajući koncentratu sadrže manju količinu mineralnog ulja (5 – 30 %) dok se ostatak sastoji uglavnom od emulgatora i vode. Također su prisutni inhibitori korozije, biocidi i po potrebi AW/EP aditivi. Stabilna **mikroemulzija** (dispergirane kapljice ulja promjera 0,01 – 0,1  $\mu\text{m}$  u kontinuiranoj fazi vode) nastaje već tijekom same proizvodnje koncentrata. Ovisno o sadržaju emulgatora, razrijeđena tekućina je tipično poluprozirna do prozirna.

Vodotopivi koncentratu ne sadrže mineralno ulje, već se sastoje od sintetičkih komponenata i aditiva, a pomiješani s vodom daju prozirne **otopine**. Aditivi uključuju površinsko aktivne tvari za snižavanje površinske napetosti otopine, inhibitori korozije, antipjenušavce, biocide i po potrebi AW/EP aditive. U usporedbi s emulzijama i mikroemulzijama, otopine pružaju bolji učinak hlađenja.



**Slika 2.7.** Zastupljenost različitih vrsta tekućina za obradu metala u proizvodnoj praksi [3]

Sastavi tekućina za obradu metala su različiti i ovise o proizvođaču. U tablici 2.1 su sažeti osnovni sastavi različitih vrsta tekućina dok su njihova svojstva i važniji nedostaci uspoređeni u tablici 2.2.

**Tablica 2.1.** Pregled osnovnih sastava tekućina za obradu metala [58]

Sastav	Rezna ulja	Vodomješljivi koncentratu tekućina		
		Konvencionalni emulgirajući	Polusintetički emulgirajući	Vodotopivi (sintetički)
Mineralno ulje, %	70 – 99	60 – 85	5 – 30	-
AW/EP aditivi, %	< 25	< 5	< 15	< 10
Emulgatori, %	-	10 – 20	20 – 40	-
Inhibitori korozije, %	< 5	5 – 15	5 – 40	15 – 40
Ostali aditivi, %	< 5	< 5	< 10	< 5
Voda, %	-	-	30 – 50	< 60
Razrijeđene tekućine	-	Emulzije (mliječne)	Mikroemulzije (poluprozirne)	Otopine (prozirne)
Promjer kapljica ulja, μm	-	1 – 10	0,01 – 0,10	-
Omjer razrjeđivanja	-	1 : (5 – 40)	1 : (10 – 40)	1 : (10 – 40)

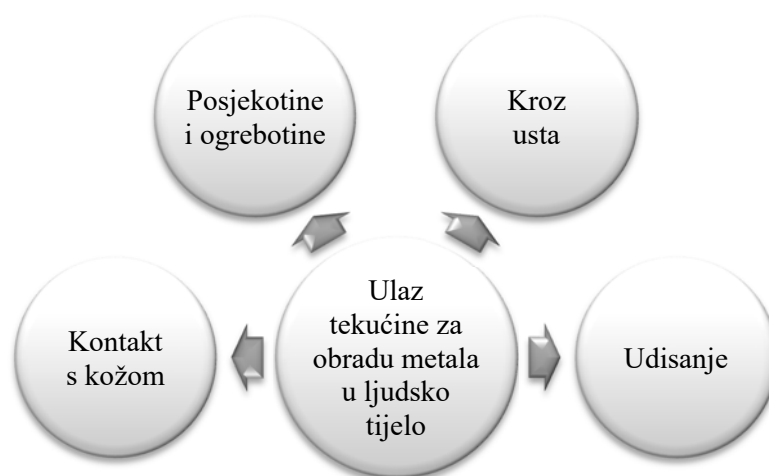
**Tablica 2.2.** Usporedba različitih vrsta tekućina za obradu metala [58]

Svojstva	Rezna ulja	Emulzije	Mikroemulzije	Otopine
Podmazivanje	■■■■■	■■	■	□
Hlađenje	□	■■■	■■■■	■■■■■
Odvođenje strugotine	■■■■■	■■■	■	□
Korozijska zaštita	■■■■■	■■	■■■	■■■
Bakterijska kontrola	■■■■	■	■■■	■■■■■
Zapaljivost	Opasnost	Ne	Ne	Ne
Važniji nedostaci	Ograničenost na niske brzine rezanja, stvaranje magle ili dima, visoka cijena	Gubici isparavanja, visoki troškovi održavanja	Sklonost pjenjenju, na stabilnost utječe tvrdoća vode, lako kontaminiranje drugim strojnim tekućinama	Lako kontaminiranje drugim strojnim tekućinama, reakcija s nemetalnim dijelovima
□ – neprikladan				
■ – stupanj prikladnosti (veći stupanj, veća prikladnost)				

## 2.5. Utjecaj tekućina na zdravlje

Primjena tekućine za obradu metala je povezana s različitim štetnim utjecajima na zdravlje. Ona može ući u ljudsko tijelo na više načina kao što je prikazano na slici 2.8. Do dodira s kožom može doći kada radnik bez zaštitnih rukavica rukuje dijelovima i reznim alatima

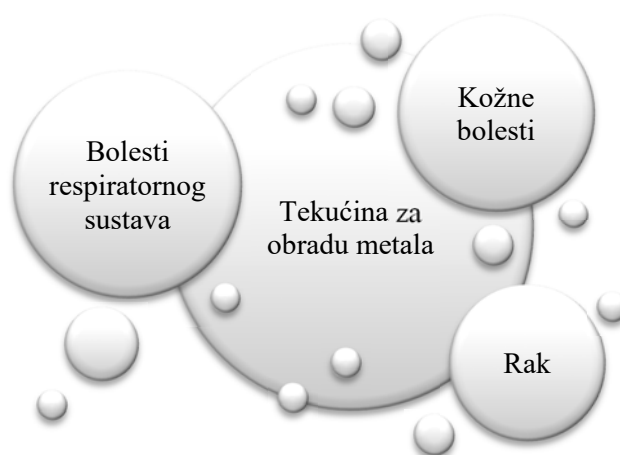
prekrivenima zaostalom tekućinom. Također, ukoliko alatni stroj nema odgovarajuću zaštitu tekućina može prskati na kožu radnika. Ako na koži postoje posjekotine ili ogrebotine, tekućina može ući u krvotok. U tijelo može ući i kroz usta ako radnik jede bez da je pravilno očistio ruke. Tekućina se većinom unosi u ljudsko tijelo udisanjem njezinog aerosola (magle). Jačina izloženosti u tom slučaju ovisi o udaljenosti između radnika i alatnog stroja, konstrukcije stroja, ventilacije itd.



**Slika 2.8.** Uobičajeni načini ulaska tekućine za obradu metala u ljudsko tijelo

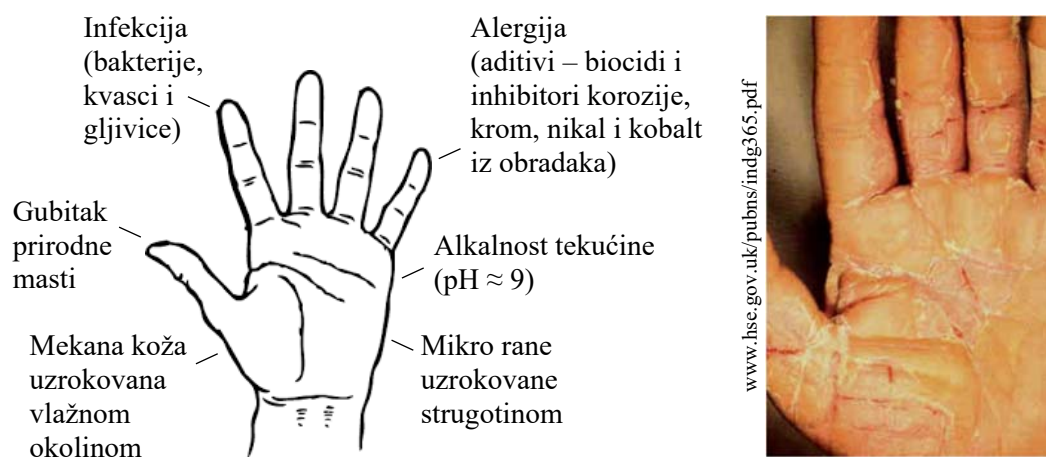
Nekoliko studija spominje štetne zdravstvene učinke tekućine za obradu metala koji se uglavnom odnose na kožne bolesti, respiratorne tegobe i rak (slika 2.9) [46, 101]. Zdravstveni učinci općenito su povezani sa samom tekućinom, različitim aditivima i mikroorganizmima. Međutim, postoje velike razlike u težini zdravstvenih problema ovisno o čimbenicima kao što su vrsta tekućine, vrsta aditiva, razina kontaminacije i trajanje izloženosti. Zdravstveni učinci tekućine mogu biti akutni, uzrokovani naglim i jakim izlaganjem u kratkom vremenu, a često su i povratni. S druge strane, kronične bolesti nastaju produljenim ili ponavljanim izlaganjem tijekom dugog vremenskog razdoblja.

Kožne bolesti su najčešći zdravstveni problemi radnika u strojnoj obradi [42]. Sve vrste tekućina za obradu metala su odgovorne za iritaciju ili oštećenje kože. Dermatitis i akne su dvije vrste kožnih bolesti koje su najčešće povezane s ovim tekućinama. Dermatitis je češći i klasificiran je kao iritantni kontaktni dermatitis ili alergijski kontaktni dermatitis. U slučaju iritantnog kontaktnog dermatitisa kožni osip se ne širi dok se kod alergijskog kontaktnog dermatitisa kožni osip može proširiti izvan područja koje je bilo u izravnom dodiru s tekućinom. Primarni uzročnici dermatitisa se mogu svrstati u tri kategorije [46]: (1) bakterije,



**Slika 2.9.** Glavni štetni zdravstveni učinci tekućine za obradu metala

kvasci i gljivice i njihovi toksični nusproizvodi; (2) senzibilizirajuća sredstva poput kroma, nikla i kobalta izlučena iz obradaka; (3) aditivi za ubijanje bakterija (biocidi) i inhibitori korozije. Dugotrajni kontakt s tekućinom za obradu metala može oslabiti prirodnu obranu kože (gubitak sebuma, prirodne masne supstance u koži koju izlučuju žlijezde lojnice). Nadalje, koža omekšava u dodiru s uljem, emulgatorima i surfaktantima (tenzidima), a alkalnost tekućine ( $\text{pH} > 9$ ) uništava kiseli zaštitni sloj kože. Stoga koža postaje osjetljivija na infekcije. Dodatnu opasnost predstavlja strugotina koja uzrokuje mikro rane i pogoršava postojeći dermatitis, slika 2.10.



**Slika 2.10.** Opasnosti za kožu ispostavljenu tekućini za obradu metala [78] i fotografija ruke zahvaćene dermatitisom

Poremećaji nalik aknama (prištićima) nastaju na područjima kože u dodiru s reznim uljima. Dijelovi tijela kao što su lice, podlaktice, bedra i noge u kontaktu s masnom odjećom mogu pokazati crvene kvрге sa žutim bubuljicama.

Brojni zdravstveni problemi se mogu povezati s udisanjem aerosola (magle) tekućine za obradu metala, poput iritacije dišnih putova, astme, bronhitisa i poteškoća s disanjem [19]. Respiratorni trakt na koji utječe tekućina uključuje nos, grlo (ždrijelo, grkljan), razne dišne putove (dušnik, bronhi, bronhiole) i plućne mjehuriće (alveole) u kojima se vrši izmjena plinova. Ozbiljne poteškoće s disanjem mogu biti uzrokovane ekstrinzičkim alergijskim alveolitisom zbog opetovanog izlaganja tekućini.

Astma se može povezati i s visokom izloženošću tekućinama za obradu metala [101] koje sadrže razne kemijske elemente, aditive i onečišćujuće tvari. Postojeća astma se može pogoršati, a izloženost tijekom dugog vremenskog razdoblja može rezultirati kroničnim bronhitisom uzrokovanim upalom glavnih dišnih putova. Kronični bronhitis može rezultirati oštećenjem rada srca i pluća. U novije vrijeme je ustanovljeno da je izbijanje preosjetljivog pneumonitisa, plućnog poremećaja, povezano s udisanjem bakterija prisutnih u tekućini [112]. Ova bolest može izazvati imunološku reakciju pluća.

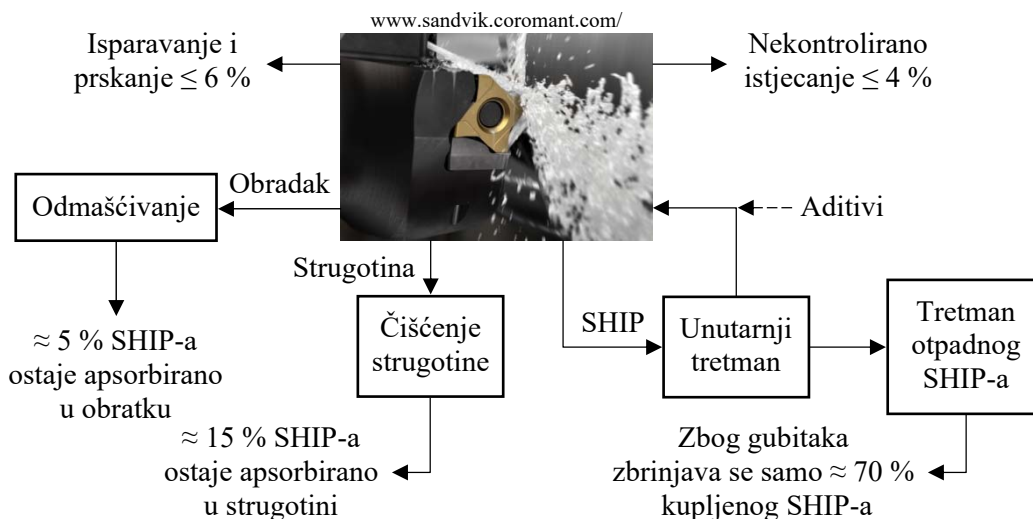
Izlaganje nerafiniranim mineralnim uljima može dovesti do raka kože, posebno na rukama i podlakticama. Pronađeni su dokazi o raku skrotuma zbog odjeće natopljene uljem i masnih krpa koje se drže u kombinezonu [46]. Također, izlaganje tekućini za obradu metala može povećati rizik od raka na grkljanu, rektumu, gušterači i mjehuru [21]. Poduzete su brojne inicijative za smanjenje rizika od raka, poput uporabe visoko rafiniranih ulja, zamjene kancerogenih kemikalija u tekućinama, dobre radne prakse i poboljšanja osobne higijene.

## 2.6. Utjecaj tekućina na okoliš

Primjena tekućine za obradu metala je povezana s onečišćenjem okoliša zbog stvaranja otrovnog otpada. U strojnoj obradi se gotovo 30 % korištene tekućine nepovratno gubi iz obradnog sustava isparavanjem, prskanjem i nekontroliranim istjecanjem s jedne i apsorpiranjem u obratku i strugotini s druge strane [20]. Na slici 2.11 je dan pregled širenja tekućine u okoliš.

Onečišćenje strugotine otežava njezino recikliranje, a obratci se često moraju očistiti prije prelaska na sljedeću operaciju obrade. Čišćenje obratka ne dodaje vrijednost i može se također dodati ukupnom opterećenju okoliša obradnog sustava.



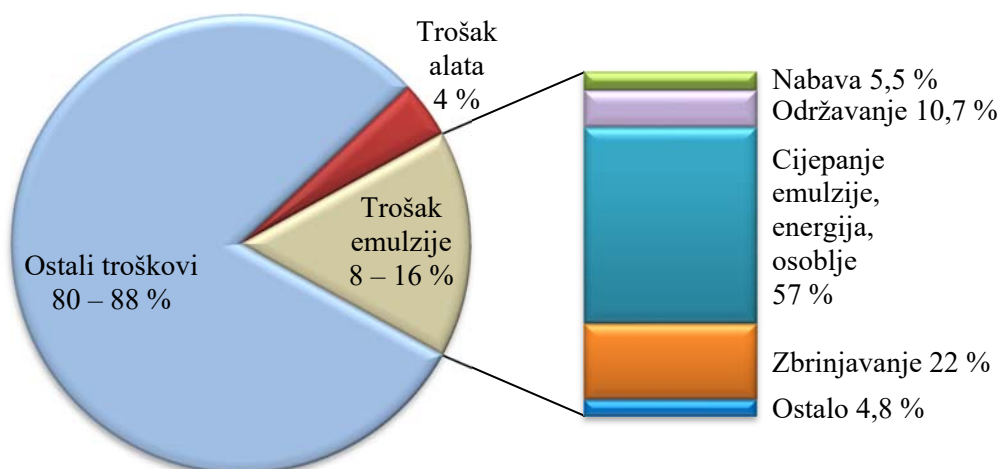


**Slika 2.11.** Gubljenje tekućine za obradu metala iz obradnog sustava

Posebni je problem dospijevanje tekućine za obradu metala u vanjski okoliš jer može zagaditi površinske i podzemne vode, uzrokovati zagađenje tla, utjecati na poljoprivredne proizvode i dovesti do onečišćenja hrane [37]. Njihovo pravilno zbrinjavanje podrazumijeva recikliranje i spaljivanje u posebnim industrijskim spalionicama.

## 2.7. Ekonomski utjecaj tekućina

Procijenjeno je da tekućina za obradu metala čini otprilike 8 – 16 % ukupnog troška proizvodnje kao što je prikazano na slici 2.12 [9]. Međutim, trošak tekućine može porasti na čak 20 – 30 % ukupnog troška prilikom obrade teško obradivih materijala [77]. S druge strane, trošak reznog alata je mnogo manji od troška tekućine i iznosi samo 4 %.



**Slika 2.12.** Troškovi primjene emulzije u strojnoj obradi metala rezanjem

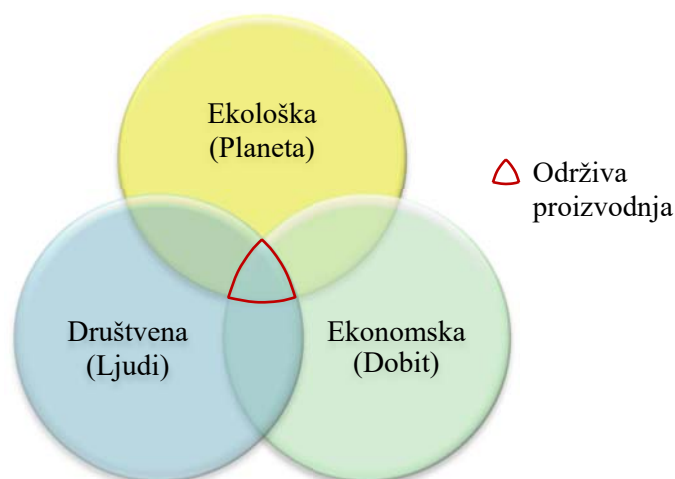
Trošak nabave tekućine za obradu metala ima beznačajnu ulogu u ukupnom trošku njezine primjene. Stvarni su troškovi uzrokovani troškom za održavanje (nadopunjavanje izgubljene tekućine, dodavanje kemijskih aditiva i dr.), visokim troškovima osoblja i ulaganjima u tehnička postrojenja za tretman potrošenih tekućina koja su povezana sa sustavima za pročišćavanje vode i posljednje, ali ne najmanje bitno, troškom zbrinjavanja koji može biti do dva ili četiri puta veći od nabavne cijene redosljedno u Sjedinjenim Američkim Državama i Europi [47].

### 3. ODRŽIVA STROJNA OBRADA METALA

Konvencionalne tekućine za obradu metala na osnovi mineralnih ulja su štetne za okoliš i zdravlje ljudi te unose velike dodatne troškove u proizvodnju. Zbog toga se javlja svijest o održivoj strojnoj obradi metala.

Općenito, "održivost" je sposobnost održavanja ravnoteže određenih procesa ili stanja u nekom sustavu. Organizacija Ujedinjenih naroda je definirala održivost kao: "Razvoj koji zadovoljava potrebe sadašnjosti bez ugrožavanja mogućnosti budućih generacija da zadovolje svoje potrebe" [1, 2]. Prema Odjelu za trgovinu, USA, *održiva proizvodnja* definirana je kao "proizvodnja primjenom procesa koji minimiziraju negativne utjecaje na okoliš, čuvaju energiju i prirodne resurse te su sigurni za zaposlenike, zajednicu i potrošače, a uz sve to su i ekonomični" [106].

Slika 3.1 prikazuje osnovne dimenzije održivosti: ekološku/planeta, društvenu/ljudi i ekonomsku/dobit. Obilježja održive proizvodnje su: ekološka prihvatljivost, niži troškovi obrade, minimalna potrošnja energije, zdravlje osoblja, smanjenje otpada i operativna sigurnost [28], slika 3.2.

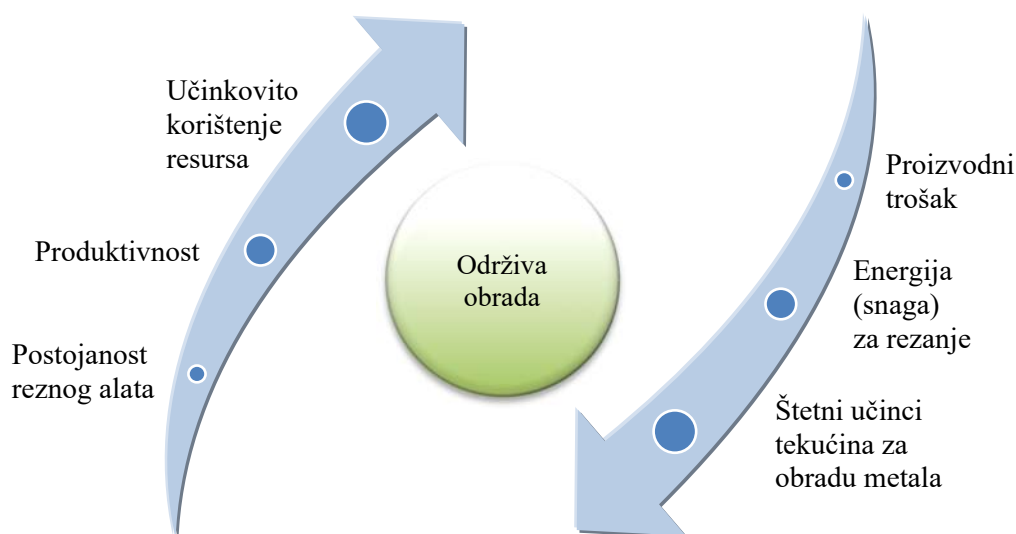


**Slika 3.1.** Osnovne dimenzije održivosti

Za postizanje održive strojne obrade metala treba poboljšati uvjete njezinog sadašnjeg odvijanja. U održivom procesu obrade postojanost reznog alata, produktivnost i učinkovito korištenje resursa će se povećati, dok će se proizvodni trošak, energija (snaga) potrebna za rezanje i štetni učinci tekućina za hlađenje i/ili podmazivanje smanjiti, slika 3.3.

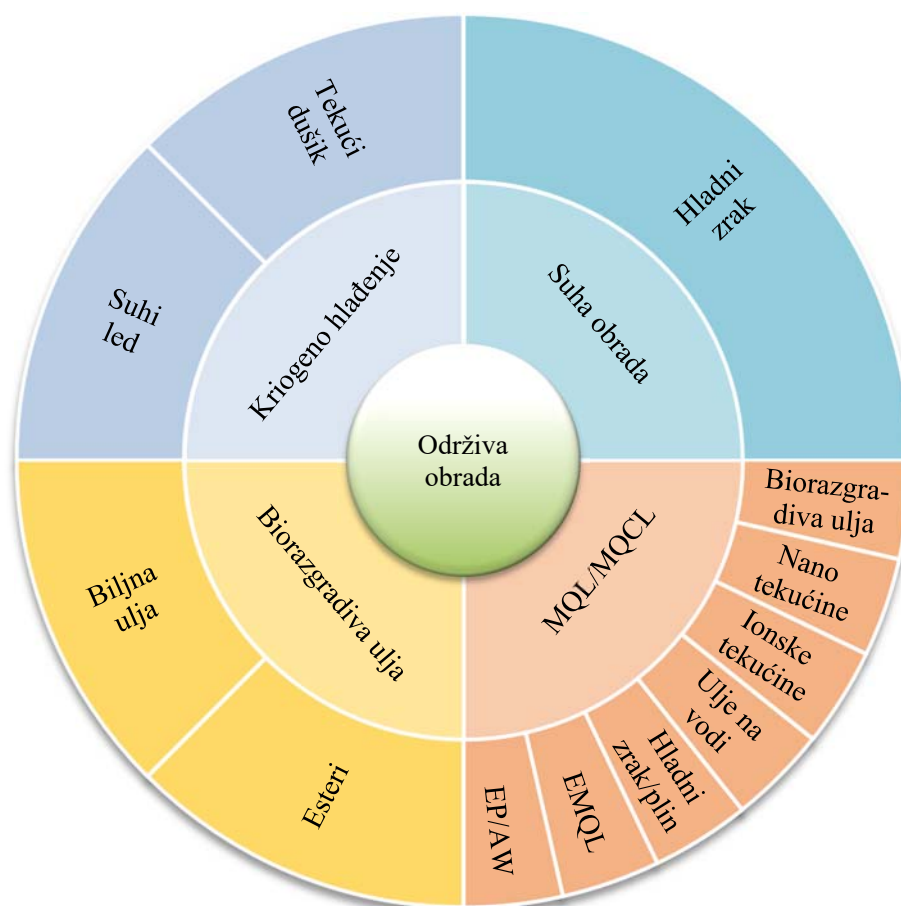


**Slika 3.2.** Obilježja održive proizvodnje



**Slika 3.3.** Model održive obrade

Proizvodna poduzeća su prisiljena na prelazak s tekućina za obradu metala na osnovi mineralnih ulja na ekološki prihvatljivije, ali istovremeno i ekonomičnije alternativne tehnike hlađenja i/ili podmazivanja zbog sve strožih standarda zaštite okoliša i zaštite na radu koji povećavaju troškove proizvodnje. Istražuju se različiti pristupi, od primjene biorazgradivih ulja, preko uporabe minimalnih količina tekućina za hlađenje i/ili podmazivanje (MQL/MQCL) pa do kriogenog hlađenja. Krajnji cilj je potpuno napuštanje tekućina u obradi metala i prelazak na suhu obradu, slika 3.4.



**Slika 3.4.** Alternativne tehnike hlađenja i/ili podmazivanja za održivu strojnu obradu metala

### 3.1. Biorazgradiva ulja

Tržište istražuje upotrebu biorazgradivih biljnih ili sintetičkih ulja kao zamjenu za naftne proizvode. Nagli rast cijena naftnih derivata, veća ovisnost o izvorima na moru, pad opsega proizvodnje i padajuće pronalaženje novih rezervi neki su od razloga za uklanjanje ulja na osnovi minerala.

Biorazgradiva ulja za obradu metala uključuju upotrebu estera i biljnih ulja koja nemaju negativne učinke na zdravlje radnika, nisu zapaljiva i smanjuju opasnost od požara, a prije svega sačinjavaju održivu obradu. Ova ulja su organska, obnovljiva, manje toksična i lakše se razgrađuju od tekućina za obradu metala na osnovi mineralnih ulja [60].

Cijena je glavna prepreka razvoju biorazgradivih ulja budući da nije konkurentna u usporedbi s cijenama mnogih mineralnih ulja na svjetskom tržištu. Biorazgradiva ulja su 1 – 8 puta

skuplja od mineralnih. Međutim, uporaba biorazgradivih ulja za obradu metala može poboljšati karakteristike obrade i povećati postojanost reznog alata. Povećana postojanost reznog alata dovodi do smanjenja proizvodnih troškova čime se istovremeno osigurava konkurentnost i udovoljava zahtjevima čistije proizvodnje [8].

Nekoliko studija pokazuje da tekućine za obradu metala na osnovi biljnog ulja mogu biti dobra alternativa konvencionalnim tekućinama. Biljna ulja imaju izvrsnu klizavost, biorazgradivost, svojstva viskoznosti i isparljivosti. Glavni im je nedostatak niska toplinska i oksidativna stabilnost, ali se to može poboljšati primjenom kombinacije kemijskih aditiva, olefina i visoko oleinskih biljnih ulja. Biljna ulja imaju niži koeficijent trenja u odnosu na mineralna ulja zbog sadržaja masnih kiselina [102] te postižu smanjenje hrapavosti obrađene površine i sile rezanja više nego primjena mineralnih i polusintetičkih ulja [22].

### 3.2. MQL/MQCL

MQL/MQCL tehnika, poznata i kao gotovo suha obrada, dostavlja u zonu rezanja vrlo male količine (potrošnja u ml/h) tekućine za obradu metala u obliku aerosola umjesto korištenja konvencionalnih cirkulirajućih poplavnih sustava kod strojne obrade metala. Privlači veliku pažnju istraživača jer poštuje jedinstvenu filozofiju "više nije uvijek bolje".

Izraz "podmazivanje minimalnom količinom" su prvi puta u literaturi spomenuli Weck i Koch 1993. vezano za podmazivanje ležajeva [114]. Na ovom tragu, prvo istraživanje MQL-a kod strojne obrade se pojavilo 1997. za brušenje [16], a kratko nakon toga i za rezanje [17].

Biorazgradivost je glavni razlog za odabir biljnog ulja kao osnovne tekućine prilikom primjene MQL tehnike. Međutim, ukoliko se svijest o zaštiti okoliša i ekološka problematika ne bi uzele u obzir, proizvodna industrija ne bi napustila konvencionalne tekućine upravo zbog visokog ulaznog troška biljnog ulja [98].

Učinak hlađenja MQL-a je zanemariv budući da se ostvaruje isparavanjem mikrokapljica ulja. Zato napredne varijante MQL-a za primjenu u strojnoj obradi metala rezanjem uključuju elektrostatički MQL odnosno skraćeno EMQL (engl. *Electrostatical MQL*), MQL sustav "ulje na vodi" (engl. *Oil on Water*) te primjenu nano i ionskih tekućina. Također, za povećavanje

učinka hlađenja se primjenjuju sustavi rashladnog podmazivanja minimalnom količinom (MQCL) koji koriste hladni zrak ispod 0 °C za formiranje aerosola ili za miješanje s aerosolom.

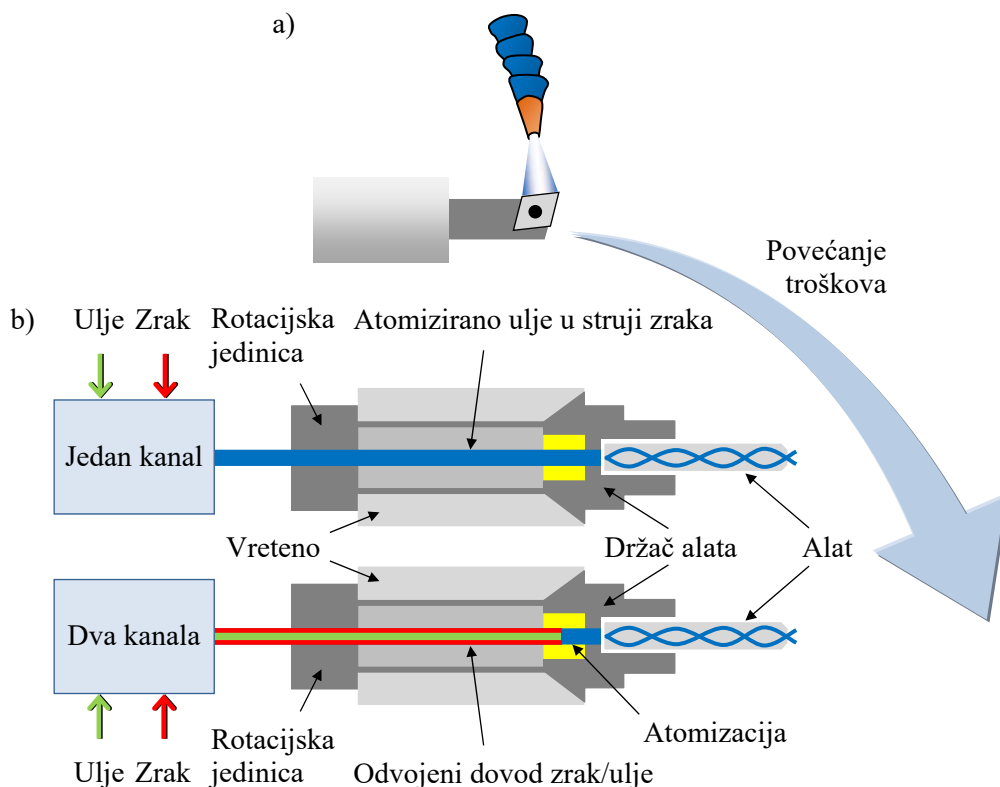
MQL/MQCL tehnika značajno smanjuje negativni utjecaj na okoliš smanjujući potrošnju tekućine za obradu metala i eliminirajući potrebu za tretiranjem, odlaganjem i zbrinjavanjem iste. Smanjena potrošnja također smanjuje opasnost po zdravlje radnika na njihovim radnim mjestima uzrokovanu emisijama tekućine u udahnutom zraku i na koži radnika. Tekućina za obradu metala se ne prelijeva i ne prska oko alatnog stroja što doprinosi manjem onečišćenju radnog mjesta i neposredne okoline. Strugotina nastala prilikom obrade metala je čista tako da se može jednostavno reciklirati.

Kapljice ulja za MQL/MQCL trebaju biti dovoljno male da uđu u zonu rezanja, ali veće od 5 do 10 µm kako ne bi zaostajale u zraku i predstavljale zdravstveni rizik za radnika [105]. Također, potreban je kompresor koji troši veliku količinu energije i tako doprinosi globalnom zagrijavanju.

Općenito, u MQL/MQCL tehnici se primjenjuju dva različita načina dovođenja (isporuke) aerosola koji se sastoji od plinovite (zrak) i tekuće (ulje) faze u zonu rezanja, vanjski i unutarnji, slika 3.5. Kod vanjskog načina aerosol se raspršuje izvana pomoću mlaznica u zonu rezanja. Postoje dvije vrste uređaja koje se razlikuju prema dovođenju aerosola: s mjernim pumpama gdje se sredstvo dovodi pomoću pneumatske mikro pumpe i s tlačnim spremnicima gdje se sredstvo istisne iz spremnika pod pritiskom. Kod unutarnjeg načina, zrak i ulje se miješaju unutar mlaznice i raspršuju u zonu strojne obrade specijalnim jednostrukim ili dvostrukim kanalima kroz otvore unutar reznog alata. Na taj je način aerosol dostupan na kritičnim mjestima tijekom cijele obrade [9]. Vanjski i unutarnji način dovođenja (isporuke) aerosola se razlikuju i cijenom zbog povećanja troškova tehnologije uređaja, slika 3.5.

### 3.2.1. Napredni MQL sustavi

EMQL sustav je razvijen kao novo ekološki prihvatljivo rješenje prilikom strojne obrade metala. Kod EMQL-a se ekstremno mala negativno nabijena količina maziva (5 – 20 ml/h) dovodi u zonu rezanja u obliku finog, ujednačenog, vrlo propusnog i mokrog aerosola. EMQL u usporedbi s MQL-om značajno poboljšava tribološke karakteristike za vrijeme glodanja

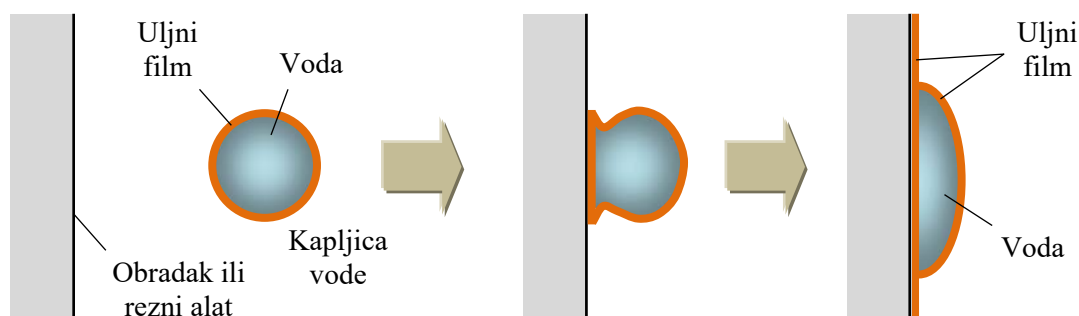


**Slika 3.5.** Dovođenje (isporuka) aerosola u zonu rezanja. a) vanjsko [8] i b) unutarnje [88]

pa se postojanost reznog alata produžuje za 73 % dok se potrošnja maziva smanjuje za 67 % [88]. Također, zbog elektrostatičke adsorpcije kapljica maziva, uporaba EMQL-a dovodi do smanjenja koncentracije kapljica koje lebde u radnom prostoru za približno 10 % u usporedbi s MQL-om, čime je smanjen njihov utjecaj na zdravlje radnika. Pri tokarenju austenitnog nehrđajućeg čelika AISI 304, EMQL obrada u usporedbi s konvencionalnom mokrom, MQL i suhom obradom znatno smanjuje trošenje alata i poboljšava kvalitetu obrađene površine [49].

MQL sustav "ulje na vodi" je zasnovan na koncepciji tankog uljnog filma na kapljici vode [39]. Kada kapljica dođe na alat ili vruću obrađivanu površinu, ulje za podmazivanje se širi po površini prije vode kao na slici 3.6. Kapljice vode obavljaju tri zadatka: nošenje ulja za podmazivanje, učinkovito širenje ulja preko površine zbog inercije i povećanje učinka hlađenja površine zbog njihove visoke specifične topline i isparavanja. Kada se koristi mala količina vode, mješavina ulja i vode uzima poželjnu konfiguraciju: ulje tvori tanki sloj oko kapljice vode i pruža učinkovito podmazivanje. U slučaju korištenja velike količine vode, voda tvori tanki sloj oko kapljica ulja smanjujući svojstva podmazivanja [65].





**Slika 3.6.** MQL sustav "ulje na vodi"

Nano čestice disperzirane u MQL osnovnoj tekućini povećavaju njezin viskozitet i posljedično vrijeme podmazivanja te su vrlo korisne za minimiziranje trenja u procesu obrade. Eksperimentalna istraživanja su pokazala da je  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nano tekućina najbolji izbor za podmazivanje u strojnoj obradi [88].  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nano čestice kružnog oblika se kotrljaju u sučelju površina reznog alata i obratka pretvarajući tako klizno trenje u kotrljajuće.

Ionske tekućine su organske soli sa niskim talištem ( $< 100\text{ }^\circ\text{C}$ ). Posjeduju izvrsna podmazujuća svojstva i nisku isparljivost. Istraživanja su pokazala da se uporabom ionskih tekućina pri MQL obradi titana trošenje reznog alata može smanjiti za 15 – 60 % u usporedbi s ostalim načinima hlađenja/podmazivanja [29]. Prilikom glodanja ugljičnog čelika AISI 1045 se došlo do zaključka da su rezultati primjene ionske tekućine u MQL obradi isti onima koji se inače postižu konvencionalnom mokrom obradom [43].

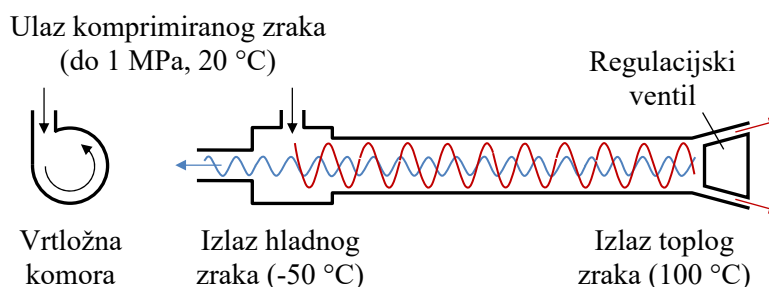
### 3.2.2. MQL u kombinaciji s hladnim plinom

Napredna varijanta MQCL sustava kombinira izvor potisnog plina (komprimirani zrak), aditive za podmazivanje (sojino ulje) i ugljični dioksid ( $\text{CO}_2$ ) u krutom (suhi led) i/ili plinovitom stanju (rashladno sredstvo) u različitim koncentracijama za dobivanje široko podesivog aerosola [5]. Sastav aerosola može biti od suhog do mokrog, temperatura od sobne do kriogene i tlak od 0,07 do 1 MPa ili više ako je potrebno.

### 3.2.3. MQL u kombinaciji s hlađenjem vrtložnom cijevi

Vrtložna cijev je mehanički uređaj koji istovremeno proizvodi hladni i topli zrak iz komprimiranog zraka. Slika 3.7 prikazuje shemu vrtložne cijevi protusmjernog protoka. Komprimirani zrak temperature okoline se tangencijalno uvodi u vrtložnu komoru cijevi kroz

jednu ili više mlaznica, ubrzava do velike frekvencije vrtnje (i do  $10^6 \text{ s}^{-1}$ ) i usmjerava niz cijev. Zbog centrifugalne sile zrak se prema regulacijskom ventilu na toplom kraju cijevi kreće njezinim obodnim područjem. Regulacijski ventil propušta manji dio vrtložne struje zraka uz samu stjenku cijevi dok se ostatak odbija kroz središnje područje cijevi u suprotnom smjeru. Na svojem putu unutar njezine vrtložne struje zraka predaje toplinu vanjskoj i uz značajan pad temperature izlazi na hladnom kraju cijevi. Hladna struja zraka može dostignuti temperaturu i do  $-50 \text{ °C}$  dok topla struja zraka može postići temperaturu od  $100 \text{ °C}$ .



**Slika 3.7.** Načelo rada vrtložne cijevi protusmjernog protoka (shema)

Vrtložnu cijev je 1931. izumio Francuz Georges Joseph Ranque, a usavršio 1946. njemački fizičar Rudolf Hilsch. Stoga je poznata i kao Ranque-Hilsch vrtložna cijev.

Hlađenje vrtložnom cijevi može kod suhe obrade zamijeniti dvije od tri temeljne funkcije tekućine za obradu metala: hlađenje alata, obratka i strugotine te odvođenje strugotine iz zone rezanja.

Tehnika hlađenja vrtložnom cijevi znatno smanjuje troškove proizvodnje. Također, većina istraživanja je pokazala da je hlađenje ohlađenim komprimiranim zrakom jedna od učinkovitijih alternativnih tehnika za hlađenje u strojnoj obradi metala rezanjem te se postupak smatra najčišćim odnosno s ekološke i zdravstvene strane najprihvatljivijim načinom hlađenja. Isparavanje rashladnog medija bez zagađenja atmosfere, čista strugotina i nepostojanje štetnog utjecaja na zdravlje čovjeka neke su od pozitivnih karakteristika ohlađenog komprimiranog zraka [30].

Postoji i izvedba vrtložne cijevi s paralelnim protokom koja nema izlaz hladnog zraka pored ulaza komprimiranog zraka. Hladni zrak izlazi kroz koncentrično smješten prstenasti izlaz u hladnom ventilu koji se nalazi na istoj strani kao i izlaz vrućeg zraka. Njezina učinkovitost je niža od učinkovitosti vrtložne cijevi protusmjernog protoka.

Ponudeno je nekoliko objašnjenja pojave radijalnog temperaturnog razdvajanja u vrtložnoj cijevi, međutim niti jedno nije u potpunosti prihvaćeno do danas. Predložene teze se mogu primijeniti samo kako bi objasnile dio ove pojave jer ne pokrivaju sve aspekte razdvajanja.

Vrtložna cijev se sastoji od jedne ili više ulaznih mlaznica, vrtložne komore, kontrolnog ventila vrućeg zraka, izlaza za hladni zrak i cijevi te upravo zbog njezine jednostavnosti, male mase i niskih investicijskih troškova ima visoku primjenjivost za hlađenje. Budući da nema pokretnih dijelova, vrtložna cijev ne puca niti je podložna trošenju što je čini jednostavnom za održavanje.

U suglasju s prethodno navedenim prednostima, istraživači su predložili kombiniranje MQL-a i hlađenja vrtložnom cijevi s prikladnom mješavinom zraka i tekućine. Međutim, dostupno je vrlo malo istraživanja o ovoj tehnici.

### 3.3. Kriogeno hlađenje

Kriogeno hlađenje podrazumijeva uporabu kriogenih tekućina umjesto konvencionalnih. Osim što se smanjuje negativni utjecaj na okoliš, učinkovito se smanjuje i temperatura rezanja. Tekući dušik LN<sub>2</sub> (točka vrelišta -195,8 °C) se smatra jednim od najprihvatljivijih rješenja kriogenog hlađenja. U literaturi za obradu metala se ovdje uključuje i tekući ugljikov dioksid CO<sub>2</sub> (točka vrelišta -78,5 °C) kao medij za hlađenje iako tehnički nije kriogena tekućina budući da se izraz "kriogeno" odnosi na tekućine koje imaju vrelište niže od -150 °C.

Dušik je siguran i nezapaljiv plin (volumni udio dušika u zraku je 78,1 %). Cijena tekućeg dušika je ograničavajući faktor za primjenu ove tehnike hlađenja jer su potrebne velike količine dušika kao i posebna oprema. Štoviše, postizanje ušteda povećanjem postojanosti reznog alata ili eliminiranjem troškova vezanih za konvencionalne tekućine ovdje nije dovoljno u usporedbi s troškom tekućeg dušika. Bez obzira na to, LN<sub>2</sub> je neškodljiv za okoliš što ovu tehniku čini privlačnom [41].

LN<sub>2</sub> se mora čuvati pri atmosferskom tlaku i niskim temperaturama u izoliranim spremnicima, dok CO<sub>2</sub> treba čuvati na sobnoj temperaturi i visokom tlaku, oko 5,5 MPa. Rashladni učinak tekućeg CO<sub>2</sub> nastaje njegovim pretvaranjem izravno na izlazu iz mlaznice u snijeg suhog leda

zbog nastalog pada tlaka. Rashladni medij koji se isporučuje u zonu rezanja tijekom kriogenog hlađenja trenutno isparava i odlazi u atmosferu ne ostavljajući kontaminirajuće ostatke na obratku, strugotini ili alatnom stroju. Osim što se eliminiraju troškovi čišćenja, eliminiraju se i troškovi zbrinjavanja što predstavlja važno poboljšanje u obradi metala.

Kriogeno hlađenje kod tokarenja dijelova od titana omogućuje minimiziranje geometrijske pogreške tijekom obrade kada su odabrane veće brzine rezanja od onih tijekom suhe obrade ili MQL obrade [50]. Tijekom tokarenja čelika AISI 52100 rezultati pokazuju značajno poboljšanje postojanosti reznog alata (i do 370 %) i smanjenje toplinskog naprežanja u usporedbi s konvencionalnom mokrom obradom [10].

### 3.4. Suha obrada

Suha obrada se smatra najodrživijim oblikom strojne obrade metala rezanjem. Njezine osnovne prednosti su:

- nema značajnog zagađenja atmosfere i vode što je povoljno za okoliš i za zdravlje čovjeka,
- eliminacija troškova korištenja tekućine za obradu metala od početne nabave do odlaganja,
- eliminacija ostataka tekućine na dijelovima stroja čime se smanjuje ili eliminira trošak čišćenja stroja i pridružena mu dodatna potrošnja energije,
- eliminacija ostataka tekućine na strugotini što smanjuje troškove odlaganja.

Dva osnovna cilja suhe obrade su postići ekološku i ekonomsku održivost. Nedostatak tekućine za obradu metala minimizira negativni utjecaj proizvodnje na prirodno okruženje i smanjuje troškove proizvodnje za 16 – 20 % uklanjanjem troškova koji se odnose na čišćenje obratka [54].

Svakako treba uzeti u obzir da eliminacija tekućine za obradu metala obuhvaća odsutnost i svih njezinih pozitivnih i potrebnih funkcija kao što su podmazivanje (smanjenje trenja), hlađenje (smanjenje generirane topline) i ispiranje strugotine iz zone rezanja što ujedno ima i negativan utjecaj na obradak, rezni alat i alatni stroj. Nedostatak tekućine može povećati temperaturu koja smanjuje karakteristike reznog alata te ujedno pogoršava mehanička svojstva obratka. Da bi se ovakav problem riješio kod primjene suhe obrade treba koristiti nove napredne materijale reznog alata, nove prevlake i odgovarajuću reznju geometriju.

### 3.5. Ekonomski i ekološki aspekti sustava hlađenja/podmazivanja

Tablica 3.1 prikazuje usporedbu troškova povezanih s različitim sustavima hlađenja/podmazivanja. Kvalitativna procjena utjecaja različitih sustava hlađenja/podmazivanja na okoliš prilikom strojne obrade metala rezanjem je prikazana u tablici 3.2.

**Tablica 3.1.** Kvalitativna procjena troškova sustava hlađenja/podmazivanja [8]

	Potrošnja tekućine	Trošak opreme	Trošak alata	Trošak čišćenja	Trošak odlaganja
Mineralna ulja	■■■■■	■■■■■	■■■	■■■■■	■■■■■
Biorazgradiva ulja	■■■■■	■■■■■	■■■	■■■■■	■■■
Nano tekućine	■■■■■	■■■■■	■■■	■■■■■	■■■■■
MQL	■■■	■■■	■■■	■■■	■■■
Kriogeno hlađenje	■■■	■■■■■	■■■	■	■
Hladni zrak/vrtložna cijev	■■■	■■■■■	■■■■■	■	■
Suha obrada	■	■	■■■■■	■	■

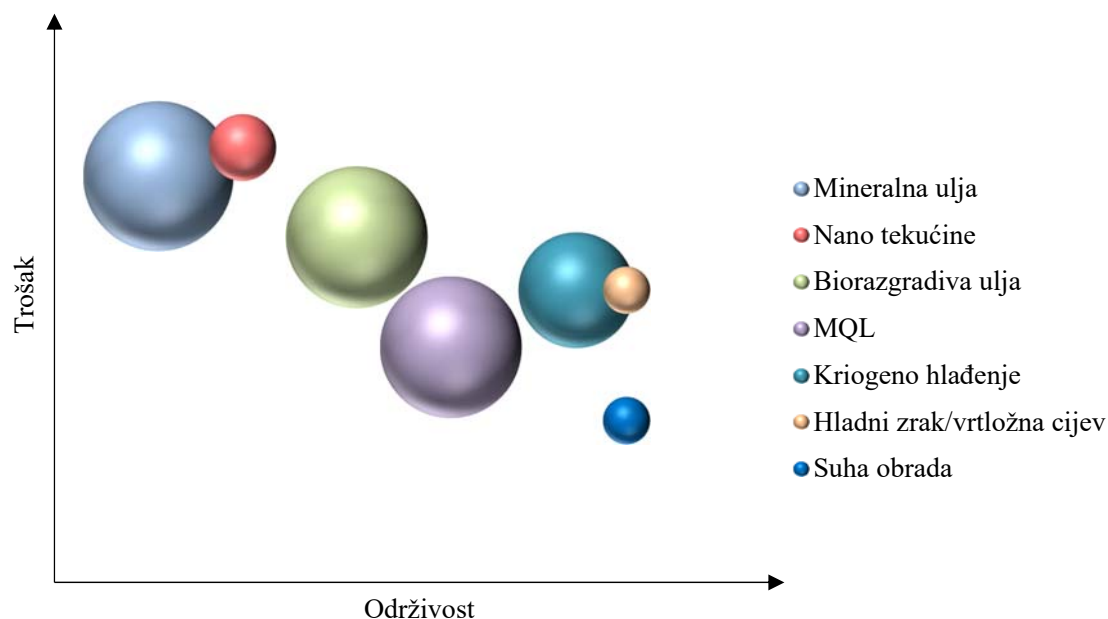
■ vrlo nisko, ■■ nisko, ■■■ srednje, ■■■■ visoko, ■■■■■ vrlo visoko

**Tablica 3.2.** Kvalitativna procjena utjecaja hlađenja/podmazivanja na okoliš [8]

	Ostatak	Gubitak iz sustava	Opasne tvari	Maglica i emisije	Opasnost po zdravlje radnika
Mineralna ulja	■■■■■	■■■■■	■■■■■	■■■■■	■■■■■
Biorazgradiva ulja	■■■■■	■■■■■	■■■	■■■■■	■■■
Nano tekućine	■■■■■	■■■■■	Nepoznato	■■■■■	Nepoznato
MQL	■■■	■■■	■■■	■■■	■■■
Kriogeno hlađenje	■	■	■	■■(1)	■
Hladni zrak/vrtložna cijev	■	■	■	■	■
Suha obrada	■	■	■	■	■

■ vrlo nisko, ■■ nisko, ■■■ srednje, ■■■■ visoko, ■■■■■ vrlo visoko, (1) vrlo nisko za LN<sub>2</sub>

Slika 3.8 prikazuje usporedbu sedam različitih sustava hlađenja/podmazivanja koji se koriste u strojnoj obradi metala rezanjem. S jedne strane, vrijednosti troška i održivosti su prikazane uzimajući u obzir kvalitativne procjene iz tablica 3.1 i 3.2. S druge strane, promjer kugle uzima u obzir potencijalnu uporabu u industriji u skladu s tehničkom izvodljivošću.



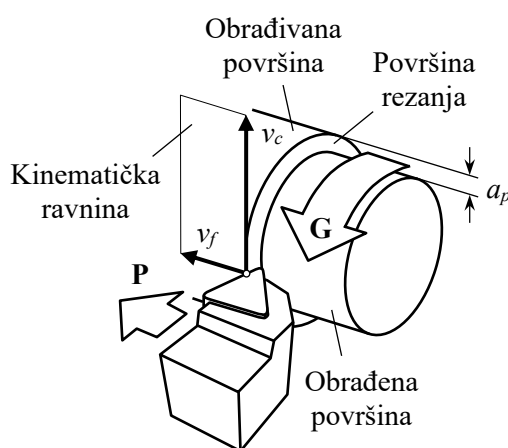
**Slika 3.8.** Troškovi sustava hlađenja/podmazivanja u strojnoj obradi kao funkcija održivosti (promjer kugle uzima u obzir potencijalnu uporabu u industriji u skladu s tehničkom izvodljivošću) [8]

S obzirom na sliku 3.8, suha obrada je najpoželjniji oblik strojne obrade metala rezanjem. Međutim, suha obrada ima određena ograničenja, posebno kod teško obradivih materijala gdje se stvara velika količina topline. S obzirom na hlađenje i podmazivanje, jedan od razvojnih pravaca predstavlja strategija kombiniranja različitih alternativnih tehnika koje se međusobno mogu nadopunjavati prevladavajući ograničenja svake. Sudeći prema slici 3.8, moguće ekološki prihvatljivo rješenje nudi kombinacija MQL-a i hlađenja vrtložnom cijevi. Preduvjet je utvrđivanje tehnološke učinkovitosti takve kombinacije za promatrani proces obrade rezanjem.

## 4. TEORIJSKO ISTRAŽIVANJE

### 4.1. Postupak tokarenja

Tokarenje je postupak obrade rezanjem pretežno rotacijskih površina (valjkasti proizvodi). Karakteristike tokarenja su konstantan presjek neodrezane strugotine i kontinuirani rez, a može biti vanjsko ili unutarnje. *Glavno gibanje* koje omogućuje stvaranje strugotine je kontinuirana rotacija obratka, slika 4.1. *Posmično gibanje* koje omogućuje s glavnim gibanjem kontinuitet stvaranja strugotine je kontinuirano pravolinijsko gibanje reznog alata u ravnini okomitoj na pravac brzine glavnog gibanja. Približno 30 % svih alatnih strojeva su tokarski, a primjenom dodatnih pogonjenih reznih alata za bušenje i glodanje, na suvremenom se tokarskom stroju može izvesti kompletna obrada nekog obratka [75].



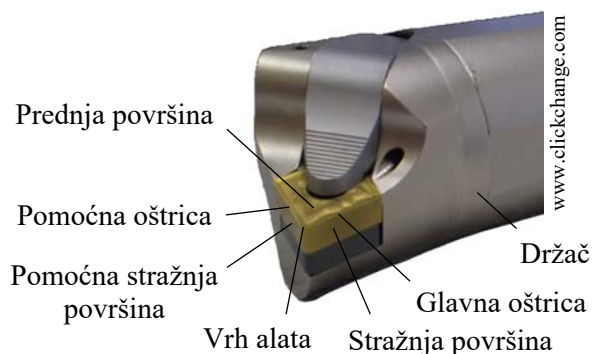
**Slika 4.1.** Gibanja alata i obratka kod tokarenja. G glavno i P posmično gibanje,  $a_p$  dubina rezanja,  $v_c$  brzina rezanja,  $v_f$  posmična brzina

Na obratku se razlikuju tri glavne površine (slika 4.1):

- *Obradivana površina* je ona površina obratka koja se uklanja obradom.
- *Površina rezanja* je površina koja nastaje uslijed djelovanja reznog klina alata i relativnog gibanja alata i obratka.
- *Obradena površina* je površina obratka nastala kao rezultat obrade.

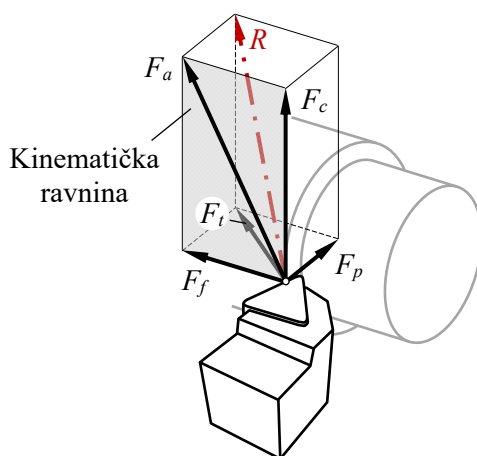
Alat za tokarenje je tokarski nož. Njegovi glavni dijelovi su geometrijski definirani rezni dio i držač koji služi za prihvat reznog dijela i pričvršćenje alata na alatnom stroju (slika 4.2). Na reznom dijelu alata se razlikuju sljedeći osnovni elementi:

- *Prednja površina* je ona po kojoj kliže strugotina.
- *Stražnja površina* je ona koja je okrenuta površini rezanja.
- *Pomoćna stražnja površina* je ona koja je okrenuta obrađenoj površini.
- *Glavna oštrica* predstavlja sjecište prednje i stražnje površine.
- *Pomoćna oštrica* predstavljaju sjecište prednje i pomoćne stražnje površine.
- Glavna i pomoćna oštrica formiraju *vrh alata* koji može biti oštar, zarubljen ili zaobljen.



**Slika 4.2.** Glavni dijelovi tokarskog noža

Vektor sile rezanja  $R$  (slika 4.3), tj. sile kojom rezni alat djeluje na korijen strugotine, rezultanta je glavne (tangencijalne) sile  $F_c$  koja djeluje u smjeru vektora brzine rezanja, posmične (aksijalne) sile  $F_f$  koja djeluje u smjeru vektora posmične brzine i pasivne sile  $F_p$  koja djeluje u radijalnom smjeru i okomita je na kinematičku ravninu. Rezultanta glavne i posmične sile je aktivna sila  $F_a$ , a rezultanta posmične i pasivne sile je odzivna sila  $F_t$ . Sila rezanja je posebno važna za analizu naprezanja u primarnoj i sekundarnoj zoni smicanja, toplinski proračun, procjenu snage rezanja i predviđanje kvalitete obrade.



**Slika 4.3.** Sustav sila kod tokarenja.  $F_a$  aktivna sila,  $F_c$  glavna (tangencijalna) sila,  $F_f$  posmična (aksijalna) sila,  $F_p$  pasivna (radijalna) sila,  $F_t$  odzivna sila,  $R$  sila rezanja



Postupak tokarenja je potpuno određen **parametrima rezanja** koji direktno utječu na njegovu ekonomičnost. Parametri rezanja su definirani kako slijedi:

- *Brzina rezanja*  $v_c$  je brzina glavnog gibanja tj. relativna brzina glavne oštrice reznog alata u odnosu na obradak. Praktično se izražava u m/min i izračunava iz izraza:

$$v_c = \frac{D\pi n}{1000}, \quad (4.1)$$

gdje je  $D$  promjer obratka na mjestu rezanja u mm i  $n$  frekvencija vrtnje glavnog vretena alatnog stroja u  $\text{min}^{-1}$ .

- *Posmak*  $f$  je pomak reznog alata po okretaju obratka u smjeru vektora *posmične brzine*  $v_f$ . Izražava se u mm i opisuje izrazom:

$$f = \frac{v_f}{n}, \quad (4.2)$$

gdje je  $v_f$  u mm/min.

- *Dubina rezanja*  $a_p$  je debljina sloja materijala kojeg se uklanja jednim prolazom reznog alata. Izražava se u mm i iskazuje izrazom:

$$a_p = \frac{D - D_1}{2}, \quad (4.3)$$

gdje je  $D_1$  promjer obratka kojeg treba ostvariti.

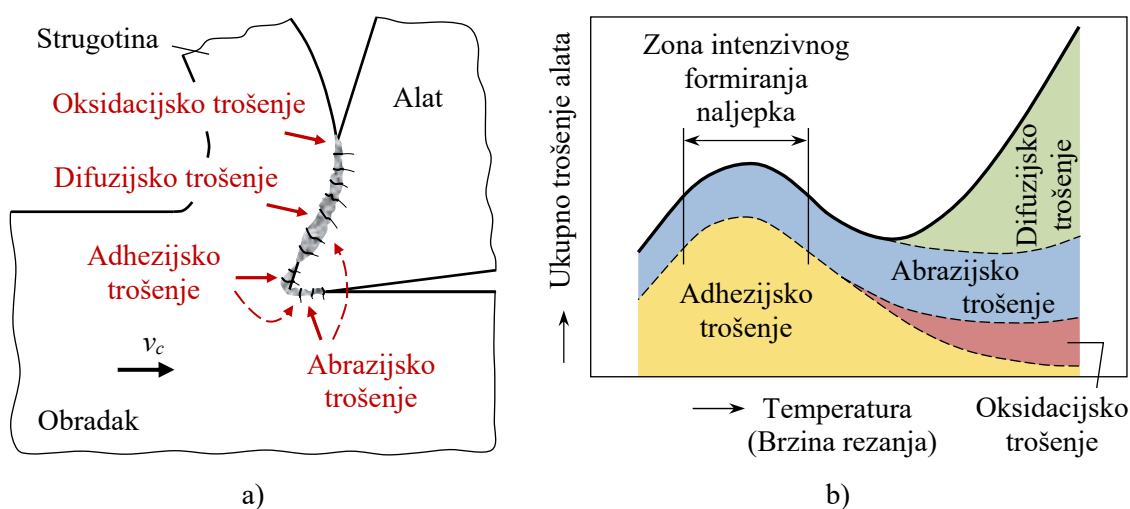
Optimiranjem parametara rezanja i izborom odgovarajućeg hlađenja i/ili podmazivanja za zadani materijal obratka može se povećati površina poprečnog presjeka neodrezane strugotine (tj. sloja obratka kojeg se skida)  $A$  u  $\text{mm}^2$  uz istu postojanost alata i kvalitetu obrađene površine. Uslijed toga se skraćuje vrijeme izrade i povećava proizvodnost pri istovremeno nižim troškovima proizvodnje po jedinici proizvoda. Izravni pokazatelj proizvodnosti je *brzina skidanja materijala* (volumen skinutog materijala u jedinici vremena)  $V_s$  u  $\text{mm}^3/\text{min}$ :

$$V_s = 1000v_c A = 1000v_c f a_p. \quad (4.4)$$

## 4.2. Trošenje, kriteriji istrošenosti i postojanost reznog alata

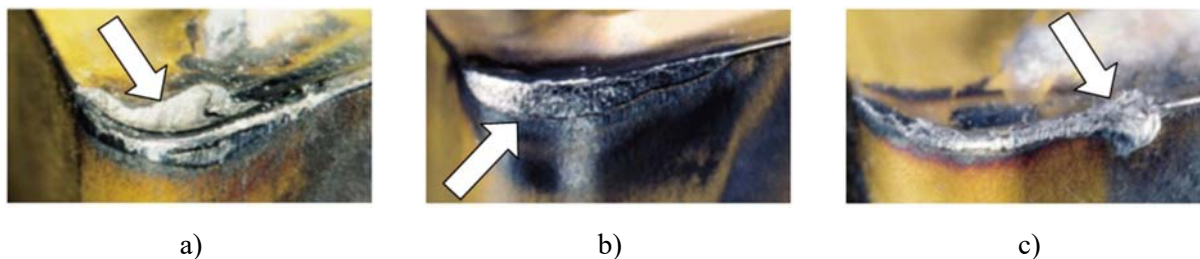
Budući da direktno utječe na kvalitetu obrađene površine i ekonomiju obrade, **trošenje reznog alata** je najčešće upotrebljavani kriterij za procjenu obradivosti materijala. Obično se definira kao *promjena oblika za vrijeme rezanja u odnosu na izvorni oblik uzrokovana progresivnim gubitkom reznog materijala* ili kao *postupak progresivnog smanjenja reznih svojstava*.

Najvažniji **mehanizmi** trošenja su adhezija, naročito uz prisutnost naljepka, abrazija, difuzija i oksidacija, slika 4.4. *Adhezijsko* trošenje je posljedica razaranja nastajućih lokalnih mikrozavara između najviših vrhova neravnina strugotine i prednje površine reznog alata. *Abrazijsko* trošenje izazivaju tvrde abrazivne faze u materijalu obratka ili slobodne tvrde čestice nastale adhezijskim trošenjem reznog alata ili razaranjem naljepka. *Difuzijsko* trošenje, tj. razmjena atoma kristalnih rešetki materijala reznog alata i obratka na kontaktnim površinama, odvija se iz područja visoke u ono niske koncentracije atoma i uglavnom uzrokuje slabljenje površinske strukture reznog alata [12]. Visoke temperature i prisustvo kisika izazivaju *oksidacijsko* trošenje koje karakterizira periodičko formiranje i razaranje krhkog oksidacijskog sloja na površini reznog alata. Koji će mehanizam trošenja dominirati najviše zavisi od temperature odnosno od brzine rezanja. Tako pri obradi čelika dijamantnim reznim alatom dolazi do njegovog trošenja na temperaturi u zoni rezanja većoj od 600 °C zbog difuzijskog prijelaza ugljika iz alata u strugotinu i obradak.



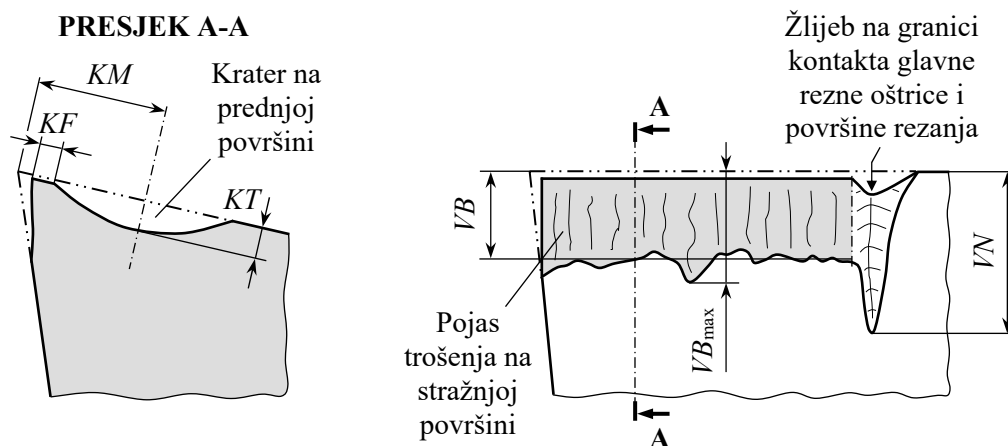
**Slika 4.4.** Mehanizmi trošenja reznog alata. a) područja adhezijskog, abrazijskog, difuzijskog i oksidacijskog trošenja, b) zavisnost mehanizama trošenja od temperature/brzine rezanja

Najvažniji **oblici** trošenja koji se manifestiraju na prednjoj i stražnjoj površini reznog alata su: *krater*, *pojas trošenja* i *žlijeb* (slika 4.5). Pojava žlijeba na granici kontakta glavne rezne oštrice i površine rezanja je uobičajena za materijale s visokim značajkama otvrdnjavanja (npr. nehrđajući čelici i toplinsko otporni nikal ili slitine kroma).



**Slika 4.5.** Glavni oblici trošenja reznih pločica. a) krater na prednjoj površini, b) pojas trošenja na stražnjoj površini, c) žlijeb na stražnjoj i prednjoj površini [87]

Stanje istrošenosti reznog alata identificira se preko **parametara** trošenja. Najviše se primjenjuju parametri trošenja prednje i stražnje površine reznog alata definirani u normi ISO 3685:1993(E) [51] (slika 4.6).



**Slika 4.6.** Parametri trošenja prednje i stražnje površine reznog alata prema normi ISO 3685:1993(E) [51].  $KF$  udaljenost fronte kratera na prednjoj površini od glavne oštrice,  $KM$  udaljenost središta kratera na prednjoj površini od početne glavne oštrice,  $KT$  dubina kratera na prednjoj površini,  $VB$  i  $VB_{max}$  srednja i maksimalna širina pojasa trošenja na stražnjoj površini,  $VN$  veličina ureznog trošenja na stražnjoj površini

Promatrajući hrapavost obrađene površine, važnije je trošenje stražnje površine reznog alata. Parametar trošenja  $VB$  se može prikazati jednadžbom:

$$VB = K v_c^{k_1} f^{k_2} a_p^{k_3} t^{k_t}, \quad (4.5)$$

gdje je  $t$  vrijeme obrade. Konstanta  $K$  i eksponenti  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  i  $k_t$  zavise od karakteristika obradnog sustava i mogu se odrediti *regresijskom analizom* rezultata eksperimenata.

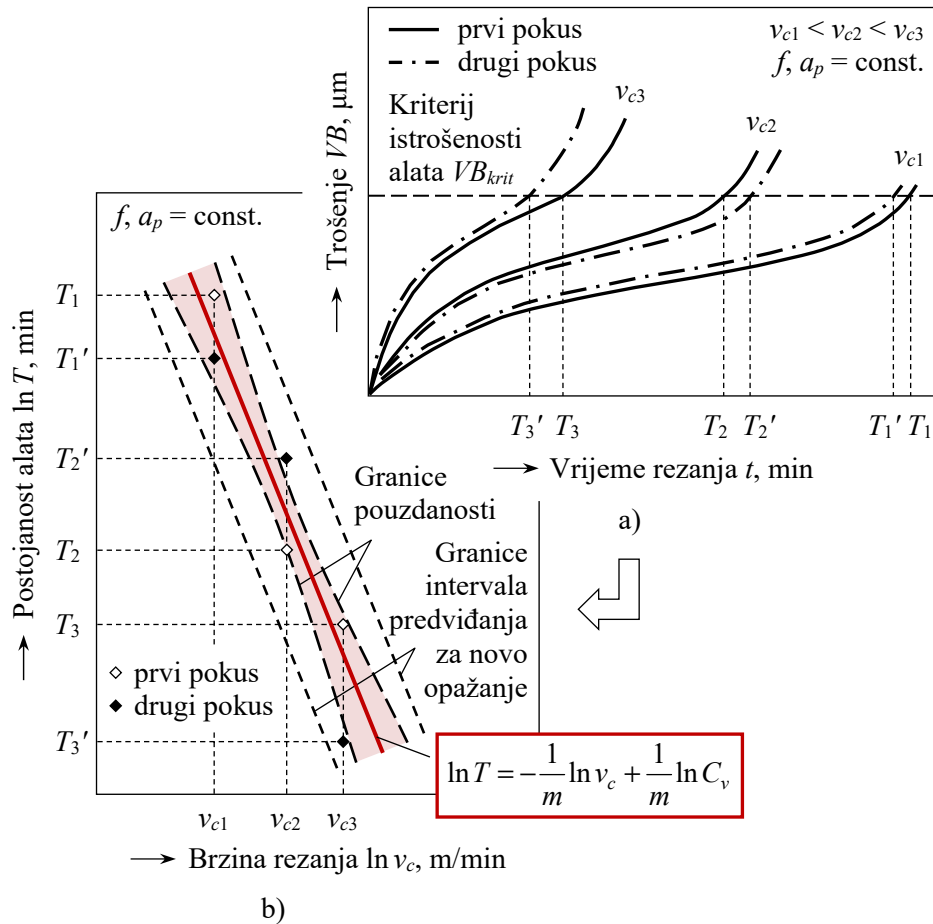
**Kriterij istrošenosti reznog alata** je zadana dopuštena vrijednost parametra trošenja ( $VB$ ,  $KT$  itd.) ili druge mjerljive veličine na obratku (točnost mjere, hrapavost obrađene površine itd.) odnosno u procesu obrade (sila rezanja, moment, snaga, vibracije itd.) povezane s trošenjem reznog alata. Kriterij istrošenosti određuje nepogodnost (ne i nemogućnost) reznog alata za daljnju obradu. Jednoznačni kriteriji istrošenosti reznog alata ne postoje, nego ovise o uvjetima obrade i proizvodnim okolnostima. U tablici 4.1 su za različite materijale reznih alata navedene smjernice za postavljanje kriterija istrošenosti.

**Tablica 4.1.** Preporučeni kriteriji istrošenosti reznog alata [51, 75]

Alat	Parametar trošenja	Obrada			
		Vrlo fina	Fina	Predzavršna	Gruba
BČ i TM	$VB$ , mm	0,1 – 0,2	0,2 – 0,4	0,4 – 0,6	0,8 – 1,0 (1,5)
Rezna keramika		0,1 – 0,2	0,25 – 0,3	0,4 – 0,5 (0,6)	
TM – kratersko trošenje	$KT$ , $KI$ , $KF$ , mm	$KT = 0,1 – 0,3 (= 0,06 + 0,3f)$		$KI = KT/KM = 0,1 – 0,4$	
			$KF = 0,02$		

**Postojanost reznog alata** je vrijeme rezanja do postizanja kriterija istrošenosti. Drugim riječima, treba odrediti vrijeme nakon kojeg daljnji rad reznim alatom više nije ekonomski opravdan.

Mjerenjem trošenja na stražnjoj površini reznog alata (parametar  $VB$ ) u vremenskim intervalima dobiva se krivulja trošenja kao na slici 4.7a. Uz nepromijenjeni posmak i dubinu rezanja, veća brzina rezanja rezultira strmijom krivuljom trošenja. Primjena kriterija istrošenosti daje podatak o postojanosti reznog alata  $T_1$ ,  $T_2$  i  $T_3$  na slici 4.7a. Trošenje je *stohastički proces* pa se ponavljanjem eksperimenata u potpuno istim uvjetima dobivaju druge krivulje trošenja i druge postojanosti  $T_1'$ ,  $T_2'$  i  $T_3'$ . Prelaskom u logaritamski koordinatni sustav se postojanosti rasipaju oko neke očekivane vrijednosti – Taylorovog pravca (F. W. Taylor, 1906. [104]), slika 4.7b.



**Slika 4.7.** Određivanje Taylorovog pravca. a) krivulje trošenja reznog alata pri konstantnim vrijednostima posmaka  $f$  i dubine rezanja  $a_p$ , b) rasipanje postojanosti reznog alata

Taylorova jednadžba postojanosti reznog alata [104] je:

$$T = C_T v_c^{k_v} \quad \text{ili} \quad v_c T^m = C_v, \quad (4.6)$$

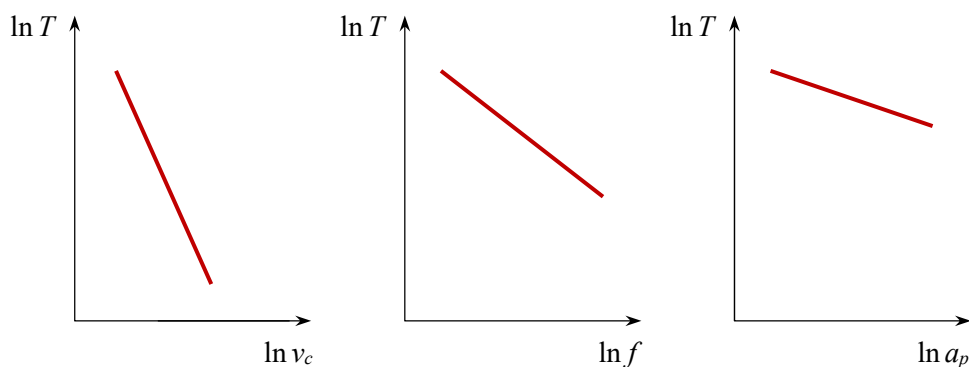
gdje su  $C_T$  i  $C_v = C_T^m$  konstante, dok je  $m = -1/k_v$  Taylorov eksponent.

Proširena Taylorova jednadžba postojanosti reznog alata osim utjecaja brzine rezanja uzima u obzir i utjecaje posmaka i dubine rezanja pa glasi:

$$T = C_T v_c^{k_v} f^{k_f} a_p^{k_a}. \quad (4.7)$$

Jednadžbe (4.6) i (4.7) mogu se izvesti iz jednadžbe (4.5) nakon uvrštavanja kriterija istrošenosti  $VB_{krit}$ .

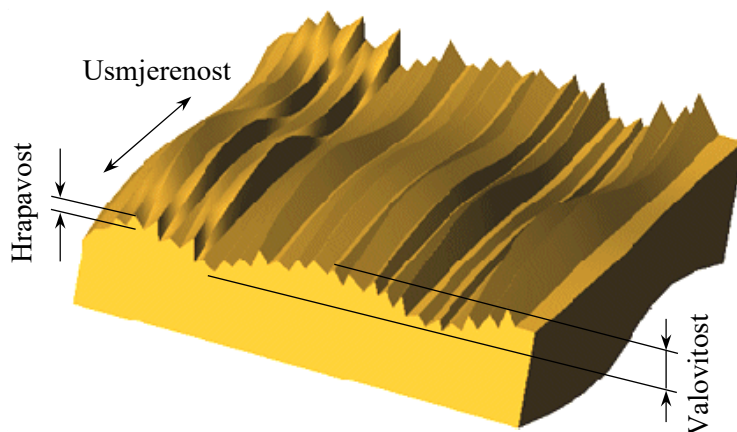
Opći oblik zavisnosti postojanosti reznog alata od parametara rezanja prikazan je na slici 4.8 u logaritamskom mjerilu. Može se zamijetiti da *najveći utjecaj na postojanost reznog alata ima brzina rezanja* (najstrmija krivulja), zatim posmak pa dubina rezanja. To znači da je u jednadžbi (4.7) onda  $k_v > k_f > k_a$ .



**Slika 4.8.** Tipične zavisnosti postojanosti reznog alata  $T$  od brzine rezanja  $v_c$ , posmaka  $f$  i dubine rezanja  $a_p$  u logaritamskom koordinatnom sustavu

### 4.3. Hrapavost obrađene površine

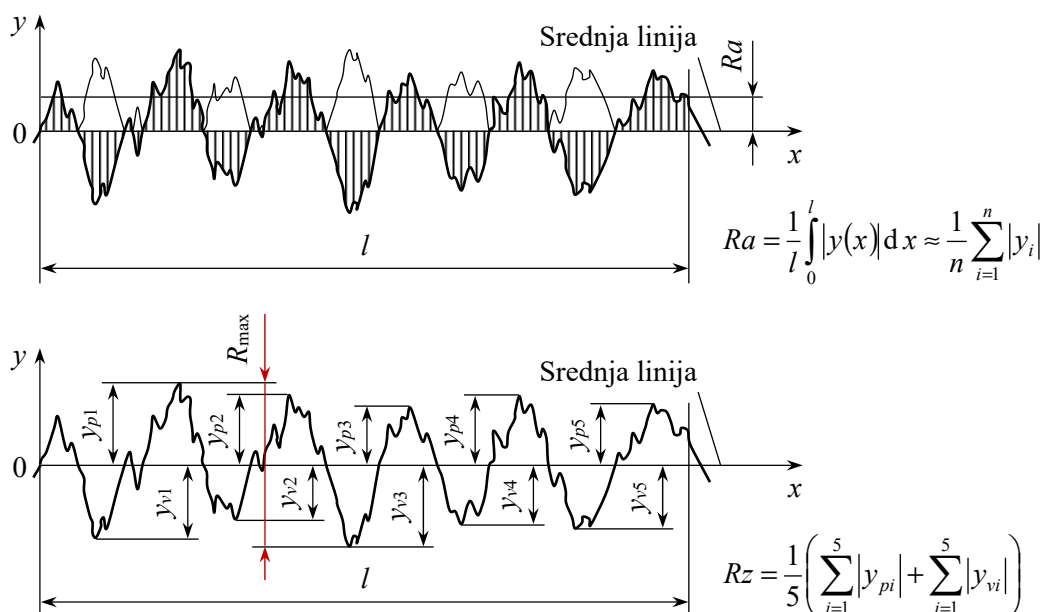
*Hrapavost obrađene površine* je sveukupnost mikogeometrijskih neravnina koje oblikuju teksturu površine u granicama odabranog isječka takve veličine da su eliminirane greške oblika i valovitosti [75], slika 4.9. Hrapavost je rezultat kontakta, relativnog kretanja i međusobnog opterećenja reznog alata i obratka tijekom procesa rezanja. Povećanjem hrapavosti smanjuje se preklop kod steznog spoja i time njegova nosivost, smanjuje dinamička izdržljivost (čvrstoća oblika), pojačava trenje i trošenje tarno (tribološki) opterećenih površina te ubrzava korozija.



**Slika 4.9.** Topografija površine

Tri osnovna parametra hrapavosti definirana normom HRN EN ISO 4287:2008/A1:2010 [48] (slika 4.10) su:

- *srednje aritmetičko odstupanje profila*  $R_a$  – aritmetička sredina apsolutnih odstupanja profila hrapavosti od srednje linije,
- *srednja visina neravnina*  $R_z$  – zbroj aritmetičkih sredina apsolutnih vrijednosti pet najvećih visina vrhova profila i pet najvećih dubina dolova profila,
- *maksimalna visina neravnina*  $R_{\max}$  – zbroj visine najvišeg vrha profila i dubine najnižeg dola profila.

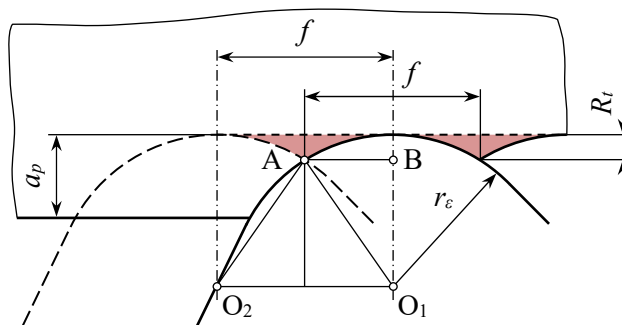


**Slika 4.10.** Određivanje parametara hrapavosti  $R_a$ ,  $R_z$  i  $R_{\max}$  unutar referentne dužine  $l$

Za približnu procjenu se uzima da je  $R_z \approx 4 R_a$  i  $R_{\max} \approx 6,4 R_a \approx 1,6 R_z$ . Različiti nepovoljni utjecaji tijekom obrade kao što su vibracije, elastične deformacije reznog alata i obratka, trošenje reznog alata i stvaranje naljepka doprinose odstupanju izmjerene hrapavosti od idealne, teorijske hrapavosti. Na slici 4.11 je prikazan model teorijske visine neravnina za tokarenje reznim alatom sa zaobljenim vrhom (najčešći slučaj). Iz analize geometrijskih odnosa slijedi da teorijska hrapavost  $R_t$  onda zavisi od kvadrata posmaka  $f$  i od korištenog polumjera zaobljenja  $r_\epsilon$  vrha reznog alata:

$$\left( \frac{f}{2} \right)^2 + (r_\epsilon - R_t)^2 = r_\epsilon^2 \Rightarrow \frac{f^2}{4} + r_\epsilon^2 - 2r_\epsilon R_t + R_t^2 = r_\epsilon^2$$

$$R_t^2 \text{ je vrlo mali i može se zanemariti} \Rightarrow R_t = \frac{f^2}{8r_\epsilon}. \quad (4.8)$$



**Slika 4.11.** Teorijska hrapavost  $R_t$  pri tokarenju (reznog alata sa zaobljenim vrhom).  $a_p$  dubina rezanja,  $f$  posmak,  $r_e$  polumjer zaobljenja vrha reznog alata

Hrapavosti obrađenih površina koje se postižu različitim postupcima obrade rezanjem su podijeljene u 12 stupnjeva, zavisno od granične vrijednosti srednjeg aritmetičkog odstupanja profila  $Ra$  (tablica 4.2). Tokarenje obuhvaća najveći interval stupnjeva hrapavosti.

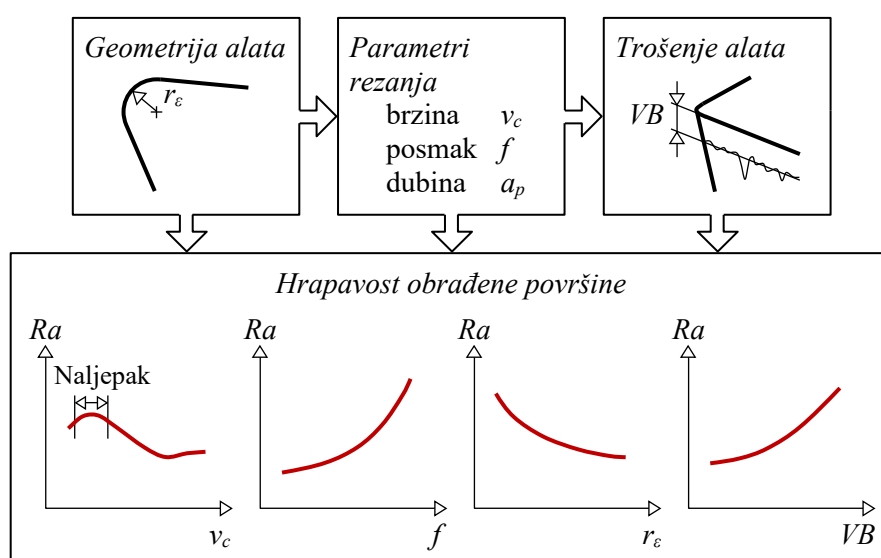
**Tablica 4.2.** Stupnjevi hrapavosti pri različitim postupcima obrade rezanjem

Stupanj hrapavosti	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12	
$Ra$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,012	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50
Piljenje													
Blanjanje													
Bušenje													
Glodanje													
Provlačenje													
Razvrtavanje													
Tokarenje													
Brušenje													
Honanje													
Poliranje													
Lepanje													
Superfinaš													

Najznačajniji utjecajni faktori na hrapavost obrađene površine su: *parametri rezanja*, *geometrija reznog alata* (posebno polumjer zaobljenja vrha) i *trošenje stražnje površine reznog alata*, slika 4.12. Kod nižih brzina rezanja se može pojaviti naljepak koji pogoršava hrapavost obrađene površine. Pri višim brzinama rezanja naljepak nestaje i hrapavost se smanjuje. Međutim, brzina rezanja se ne može povećavati neograničeno u svrhu smanjivanja



hrapavosti. Naime, zbog povećavanja brzine rezanja povećava se i temperatura rezanja. Na kritičnoj temperaturi materijal obratka omekšava i dolazi do odvijanja mikro deformacije na površini što ponovo pogoršava hrapavost [31]. Također, hrapavost se pogoršava povećavanjem posmaka ili smanjivanjem polumjera zaobljenja vrha reznog alata. Zato se preporučuje izabrati posmak koji je manji od trećine polumjera zaobljenja [86]. Dubina rezanja ne utječe na visinu i oblik neravnina, ali može biti problem ako uzrokuje podrhtavanje (samouzbudne vibracije) koje ekstremno pogoršava hrapavost. Kako se povećava trošenje alata koje isto zavisi od parametara rezanja, raste i hrapavost. Zbog toga se za završnu obradu usvaja niža vrijednost kriterija istrošenosti reznog alata.



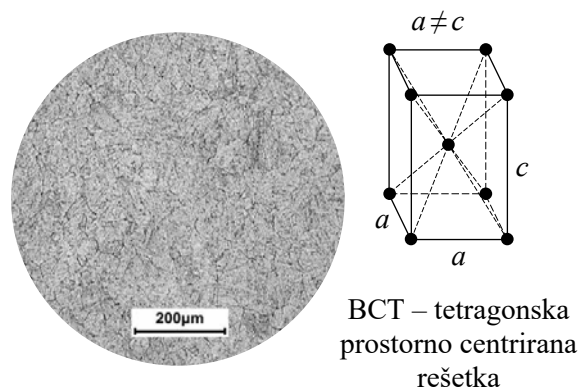
Slika 4.12. Najznačajniji utjecajni faktori na hrapavost obrađene površine

#### 4.4. Martenzitni nehrđajući čelici

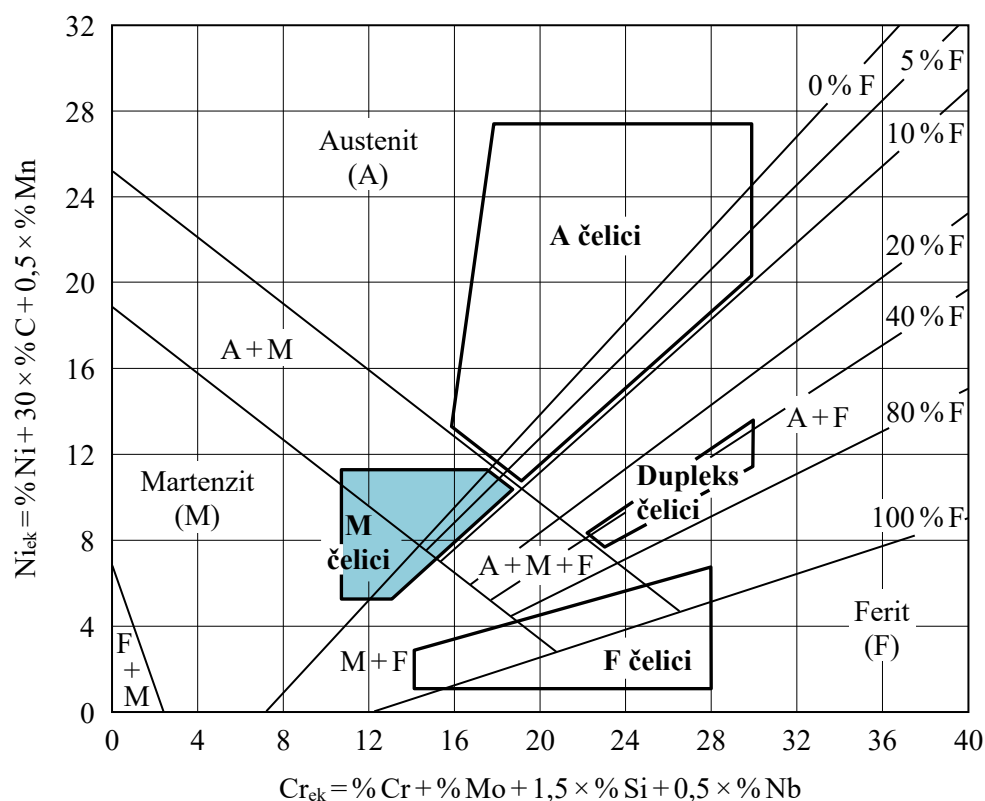
Martenzitni nehrđajući čelici se temelje na trojnom sustavu željezo-krom-ugljik (Fe-Cr-C), a također je moguće legiranje s molibdenom i niklom. Maseni udio kroma je obično 12-18 %, a ugljika 0,15-1,2 %. Martenzitna mikrostruktura (BCT rešetka, slika 4.13) nastaje alotropskom transformacijom austenita naglim hlađenjem (gašenjem) s odgovarajuće temperature. Ako ne postoji austenit na visokoj temperaturi, ne postoji ni martenzit na niskoj temperaturi. U Schaefflerovom strukturnom dijagramu na slici 4.14 je istaknuto područje smještaja martenzitnih nehrđajućih čelika.

Martenzitni nehrđajući čelici su feromagnetični. Za razliku od feritnih, austenitnih i dupleks nehrđajućih čelika, mogu se toplinski obraditi *poboljšavanjem* (kaljenje i popuštanje pri

povišenim temperaturama) i tako usporedbeno postići superiorne razine čvrstoće i tvrdoće. Zbog nižeg sadržaja kroma i višeg sadržaja ugljika su jeftiniji od drugih nehrđajućih čelika, ali i manje otporni na koroziju. Također, osjetljivi su prema vodikovoj krhkosti i imaju lošu otpornost na udarni rad loma kod sniženih temperatura [56]. Njihova mehanička svojstva i otpornost na koroziju padaju na temperaturama višim od 650 °C.



Slika 4.13. Mikrostruktura martenzitnog nehrđajućeg čelika (mikrografija: [11])



Slika 4.14. Položaj martenzitnih nehrđajućih čelika u Schaefflerovom dijagramu

Kod konstrukcijskih martenzitnih nehrđajućih čelika (sadržaj ugljika do 0,25 %) je u prvom planu otpornost na koroziju, a kod alatnih (sadržaj ugljika veći od 0,3 %) još i otpornost na

abrazijsko trošenje. Primjenjuju se za lopatice parnih, plinskih i mlaznih turbina na relativno niskim radnim temperaturama, parne cjevovode, vodne turbine, brane u kanalima sa slatkom vodom, cijevi i ventile u rafinerijama nafte, obloge valjaka za kontinuirano lijevanje i dr. Niskougljični supermartenzitni nehrđajući čelici se koriste za naftovode i plinovode. Martenzitni nehrđajući čelici s višim udjelom kroma i ugljika se koriste za kirurške instrumente, pribor za jelo, zupčanike i osovine [79].

Problemi u obradi martenzitnih nehrđajućih čelika rezanjem uzrokovani su značajnim trošenjem reznog alata izazvanog njihovom visokom tvrdoćom i vlačnom čvrstoćom. Osim toga, naklonjeni su deformacijskom očvršćivanju.

#### 4.5. Taguchijeva metoda ortogonalnih planova eksperimenata

Japanski znanstvenik G. Taguchi je predložio uporabu ortogonalnih matrica (engl. *orthogonal arrays* – OA) za planiranje eksperimenata. Glavna prednost Taguchijevih planova leži u njihovoj lakoj prilagodljivosti složenijim eksperimentima koji uključuju brojne faktore s različitim brojem razina. Pružaju željene podatke s najmanje mogućim brojem eksperimenata, a opet daju ponovljive rezultate s odgovarajućom preciznošću.

Ortogonalne matrice su djelo francuskog matematičara J. Hadamarda početkom 1897. Taguchijeve matrice su matematički identične Hadamardovim matricama; stupci i redovi su preuređeni [81]. Opisuju se oznakom:  $L_N(r^k)$ , gdje je  $N$  broj redova (eksperimenata),  $r$  broj razina i  $k$  broj stupaca (faktora). Takva matrica ima  $N - 1$  stupnjeva slobode. Neke od standardnih ortogonalnih matrica su navedene u tablici 4.3.

Kao primjer se navodi ortogonalna matrica  $L_8(2^7)$  u tablici 4.4:

- Brojevi 1 i 2 redosljedno označavaju nisku i visoku razinu faktora.
- Postoji osam eksperimentalnih ispitivanja od 1 do 8.
- Svaki stupac ima jednaki broj jedinica (1) i dvojki (2).
- Bilo koji par stupaca ima samo četiri kombinacije (1, 1), (1, 2), (2, 1) i (2, 2), što ukazuje da su parovi stupaca ortogonalni.
- Ova ortogonalna matrica se može koristiti za proučavanje do 7 faktora.

**Tablica 4.3.** Standardne ortogonalne matrice

Serijske na dvije razine	Serijske na tri razine	Serijske na četiri razine	Serijske miješanih razina
$L_4(2^3)$	$L_9(3^4)$	$L_{15}(4^5)$	$L_{18}(2^1, 3^7)**$
$L_8(2^7)$	$L_{27}(3^{13})$	$L_{64}(4^{21})$	$L_{36}(2^{11}, 3^{12})$
$L_{12}(2^{11})^*$	$L_{81}(3^{40})$		
$L_{16}(2^{15})$			
$L_{32}(2^{31})$			

\* Interakcije se ne mogu proučavati.

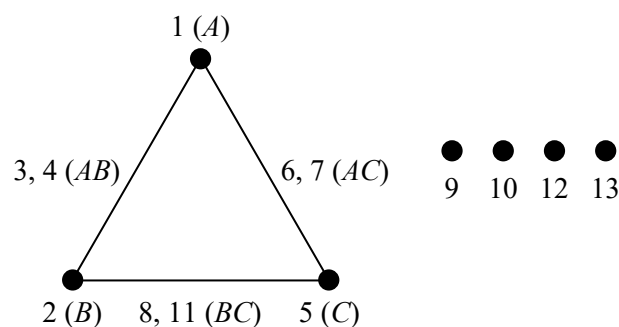
\*\* Može se proučavati jedna interakcija između faktora na 2 razine i jednog faktora na 3 razine.

**Tablica 4.4.** Standardna ortogonalna matrica  $L_8(2^7)$ 

Eksp. br.	Stupci							Rezultat
	1	2	3	4	5	6	7	
1	1	1	1	1	1	1	1	$y_1$
2	1	1	1	2	2	2	2	$y_2$
3	1	2	2	1	1	2	2	$y_3$
4	1	2	2	2	2	1	1	$y_4$
5	2	1	2	1	2	1	2	$y_5$
6	2	1	2	2	1	2	1	$y_6$
7	2	2	1	1	2	2	1	$y_7$
8	2	2	1	2	1	1	2	$y_8$

Ako se proučavaju samo glavni faktori, isti se mogu dodijeliti bilo kojim redosljedom svakom stupcu ortogonalne matrice. Ako se uz glavne faktore proučavaju i neke interakcije, treba slijediti određeni postupak. Taguchi je dao dva alata za olakšavanje dodjeljivanja glavnih faktora i interakcija stupcima ortogonalnih matrica: *linearne grafikone* i *tablice interakcija*.

Slika 4.15 prikazuje linearni grafikon interakcija na tri razine koji se može koristiti s ortogonalnom matricom  $L_{27}(3^{13})$ . Primjerice, ako su faktori  $A$  i  $B$  redosljedno dodijeljeni stupcima 1 i 2, faktor  $C$  onda treba biti dodijeljen stupcu 5, interakcija  $AB$  stupcima 3 i 4, interakcija  $AC$  stupcima 6 i 7, interakcija  $BC$  stupcima 8 i 11, a stupci 9, 10, 12 i 13 su prazni i koriste se za procjenu pogreške. Dodatne informacije o linearnim grafikonima i tablicama interakcije su dostupne u [59].



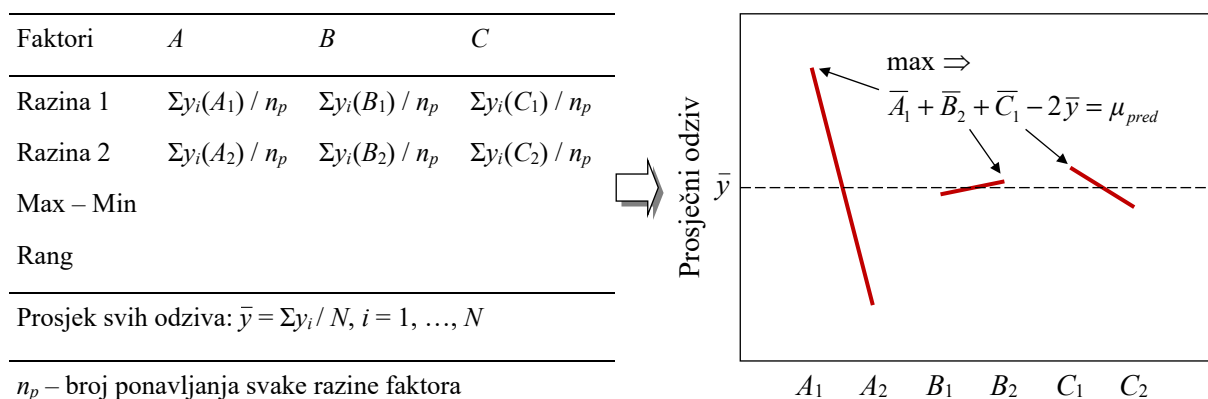
**Slika 4.15.** Standardni linearni grafikon za ortogonalnu matricu  $L_{27}(3^{13})$

Ortogonalna matrica treba imati veći stupanj slobode od onog potrebnog za planirane eksperimente. Budući da su tijekom eksperimentiranja razine postavljene samo glavnim faktorima, u ispitnom listu se mogu izostaviti interakcijski stupci. Međutim, isti su potrebni za analizu podataka. Također, eksperimente treba izvoditi slučajnim redom što se može osigurati primjenom generatora slučajnih brojeva.

#### 4.5.1. Analiza podataka iz Taguchijevih eksperimenata

Prikupljeni podaci se mogu analizirati koristeći *metodu odzivnog grafikona* ili statistički postupak *analize varijance* (ANOVA). Metodu odzivnog grafikona je vrlo lako razumjeti i za praktične (industrijske) primjene može biti dovoljna. ANOVA računa varijacije iz svih izvora, uključujući i pogrešku. Ako je zbroj kvadrata pogreške velik u usporedbi sa zbrojevima kvadrata kontrolnih faktora u eksperimentu, ANOVA zajedno s postotnim doprinosom ukazuje da odabir optimalnog uvjeta možda nije koristan. Također, ANOVA je potrebna za statističko potvrđivanje rezultata.

Za metodu odzivnog grafikona je potrebno konstruirati tablicu prosječnih odziva. Bilježi se apsolutna razlika u prosječnim odzivima dviju razina svakog faktora koja predstavlja učinak (doprinos) faktora. Razlike se rangiraju počevši od najveće razlike kao ranga 1, sljedeće najveće razlike kao ranga 2 i tako redom. Zatim se računa prosjek svih odziva i konstruira odzivni grafikon. Na temelju cilja eksperimenta, bilo minimiziranja ili maksimiziranja odziva, odabire se optimalni uvjet odnosno optimalna kombinacija razina faktora. Za minimiziranje odziva se optimalna razina svakog faktora odabire na temelju najniže, a za maksimiziranje na temelju najviše prosječne vrijednosti odziva te se zaključno predviđa optimalni odziv. Na slici 4.16 je prikazana metoda odzivnog grafikona.



**Slika 4.16.** Metoda odzivnog grafikona i optimalni predviđeni odziv (maksimiziran)

Glavni cilj analize varijance je da se iz prikupljenih rezultata dobije odgovor koliko varijacija svakog faktora utječe na ukupnu varijaciju promatranog odziva. ANOVA primjer prikazan je u tablici 4.5. Interpretacija počinje provjerom postotnog doprinosa pogreške koji ukazuje na točnost eksperimentiranja. U pravilu, ako je postotni doprinos pogreške oko 15 % ili manji, može se pretpostaviti da nijedan važan faktor nije isključen iz eksperimentiranja. Ako je viši od 50 % eksperimentiranje nije uspjelo i može se zaključiti da neki važni faktori nisu bili uzeti u obzir tijekom eksperimentiranja, uvjeti nisu bili dobro kontrolirani ili je postojala velika pogreška mjerenja. U tom slučaju eksperimentiranje treba ponoviti uključujući i nove faktore. Uz poznate vrijednosti stupnjeva slobode svakog faktora i čiste pogreške, a na osnovi

**Tablica 4.5.** ANOVA primjer

Izvor varijacije	Stupnjevi slobode	Zbroj kvadrata	Sredina kvadrata (varijanca)	F-statistika	Postotni doprinos
A	$df_A = r - 1$	$SS_A$	$MS_A = SS_A / df_A$	$F_A = MS_A / MS_E$	$PC_A = 100 SS_A / SS_T$
...	...	...	...	...	...
AB	$df_{AB} = df_A df_B$	$SS_{AB}$	$MS_{AB} = SS_{AB} / df_{AB}$	$F_{AB} = MS_{AB} / MS_E$	$PC_{AB} = 100 SS_{AB} / SS_T$
...	...	...	...	...	...
Pogreška (čista)	$df_E = df_T - \Sigma df_X$	$SS_E = SS_T - \Sigma SS_X$	$MS_E = SS_E / df_E$		$PC_E = 100 SS_E / SS_T$
Ukupno	$df_T = N - 1$	$SS_T$			

$$SS_X = \frac{\sum_{j=1}^r \left[ \sum_{i=1}^{n_p} y_i(X_j) \right]^2}{n_p} - \frac{\left( \sum_{i=1}^N y_i \right)^2}{N}, \quad X = A, \dots, AB, \dots; \quad SS_T = \sum_{i=1}^N (y_i)^2 - \frac{\left( \sum_{i=1}^N y_i \right)^2}{N}$$

$N$  – broj eksperimenata,  $n_p$  – broj ponavljanja svake razine faktora,  $r$  – broj razina

statističkih tablica za  $F$ -statistiku i razinu značajnosti (rizika)  $\alpha = 0,05$  ili  $0,01$  (5 % ili 1 %), izvodi se zaključak o značajnosti faktora. Ako je izračunata  $F$ -statistika veća od tablične vrijednosti  $F_{(\alpha, v_1, v_2)}$ , gdje je  $v_1$  stupanj slobode faktora i  $v_2$  stupanj slobode čiste pogreške, faktor je značajan. Svi faktori koji nisu značajni se okupljaju (engl. *pooling*) u zbirnu pogrešku, a na temelju značajnih faktora se predviđa optimalni odziv  $\mu_{pred}$  kao što je pokazano u dijagramu na slici 4.16.

#### 4.5.2. Eksperiment potvrde

Eksperiment potvrde se provodi primjenom optimalnih razina značajnih faktora. Iako se za neznačajne faktore može koristiti bilo koja razina, obično se i ovdje odabire optimalna. Veličina uzorka za eksperiment potvrde mora biti veća od veličine uzorka bilo kojeg eksperimenta u izvornom planu. Srednja vrijednost procijenjena iz eksperimenta potvrde  $\mu_{pot}$  se uspoređuje s predviđenim optimalnim odzivom  $\mu_{pred}$ . Rezultati eksperimentiranja su potvrđeni ako je  $(\mu_{pred} - CI) \leq \mu_{pot} \leq (\mu_{pred} + CI)$ . Dopuštena pogreška  $CI$  je:

$$CI = \sqrt{F_{(\alpha, 1, v_2)} MS_{Ez} \left( \frac{1}{n_{ef}} + \frac{1}{n_c} \right)}, \quad (4.9)$$

gdje je  $v_2$  stupanj slobode zbirne pogreške (engl. *pooled error*),  $MS_{Ez}$  sredina kvadrata zbirne pogreške i  $n_c$  veličina uzorka (broj ponavljanja) eksperimenta potvrde. Efektivni broj zapažanja  $n_{ef}$  je:

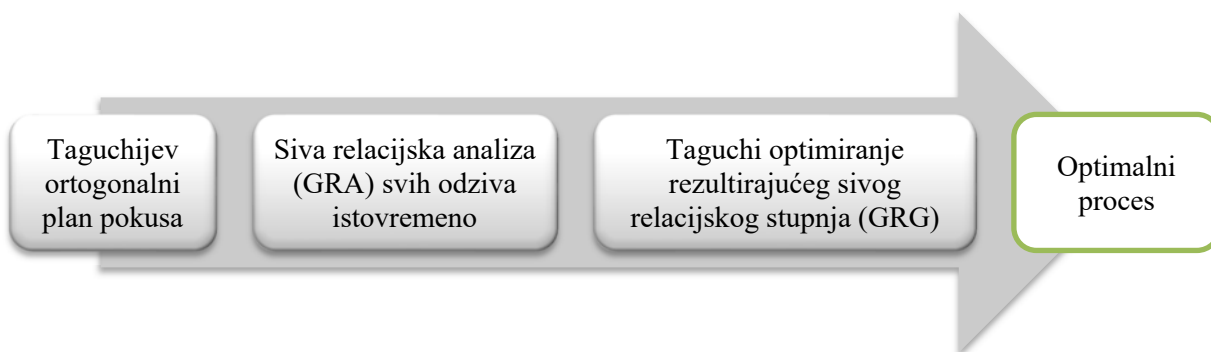
$$n_{ef} = \frac{N}{1 + z}, \quad (4.10)$$

gdje je  $z$  zbroj stupnjeva slobode faktora korištenih u  $\mu_{pred}$ .

#### 4.6. Entropijom ponderirana siva relacijska analiza

Siva relacijska analiza (GRA) je važan dio teorije sivog sustava (situacije bez podataka su crne, a one sa savršenim informacijama su bijele) koju je pokrenuo Deng 1982. [33]. GRA može pretvoriti istovremeno optimiranje više odziva procesa prema različitim kriterijima u

optimiranje samo jednog koji se naziva sivi relacijski stupanj – GRG (engl. *Grey Relational Grade*). Za optimiranje GRG-a je onda prikladna Taguchijeva metoda, slika 4.17.



**Slika 4.17.** Integrirana Taguchi GRA metoda

Obično se pri izračunavanju GRG dodjeljuje jednaka težina (relativna važnost) različitim odzivima procesa. Međutim, važno je napomenuti da jednake težine možda ne odražavaju realno važnost svakog odziva. Također, ponderiranje koje se temelji na stručnosti i prosudbi donositelja odluke je subjektivno. Objektivno ponderiranje je matematički utemeljeno. Shannonova entropija [90] je u smislu teorije vjerojatnosti definirana kao mjera nesigurnosti u informacijama. Wang i Lee [113] su Shannonov koncept proširili na uporabu entropijske mjere kao metode izračuna težina. Entropijom ponderirana GRA je detaljnije objašnjena u nastavku.

#### Korak 1. Normalizacija odziva

Različiti odzivi se mjere različitim jedinicama pa utjecaji nekih mogu ostati zanemarenima. Zato se izvorni rezultati eksperimentiranja normaliziraju u intervalu [0, 1]. Normalizirani eksperimentalni rezultati prema kriteriju "manje je bolje" – L-T-B (engl. *Lower-the-Better*) se mogu izraziti kao:

$$x_{ij} = \frac{\max y_{ij} - y_{ij}}{\max y_{ij} - \min y_{ij}}, \quad i = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, R, \quad (4.11)$$

gdje su  $y_{ij}$  izvorni podaci ( $i$ -ti eksperimentalni rezultat za  $j$ -ti odziv procesa) i  $R$  broj odziva. Za kriterij "veće je bolje" – H-T-B (engl. *Higher-the-Better*) se može primijeniti izraz:

$$x_{ij} = \frac{y_{ij} - \min y_{ij}}{\max y_{ij} - \min y_{ij}}, \quad i = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, R. \quad (4.12)$$



Korak 2. *Izračun sivih relacijskih koeficijenata*

Sivi relacijski koeficijenti – GRC-i (engl. *Grey Relational Coefficients*) se mogu odrediti kao:

$$\zeta_{ij} = \frac{\zeta}{1 - x_{ij} + \zeta}, \quad i = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, R. \quad (4.13)$$

Razlikovni koeficijent  $\zeta$  općenito ima vrijednost 0,5 odnosno  $\zeta \in [0, 1]$ . GRC određuje koliko je stvarni normalizirani eksperimentalni rezultat  $x_{ij}$  bliži referentnom ili idealnom ciljnom nizu  $x_{0j} = 1$ . Što je veća vrijednost  $\zeta_{ij}$ , to su ove dvije varijable bliže.

Korak 3. *Entropijsko ponderiranje*

a) Zbroj GRC-a za svaki odziv:

$$D_j = \sum_{i=1}^N \zeta_{ij}, \quad j = 1, \dots, R. \quad (4.14)$$

b) Entropija svakog odziva:

$$k = -\frac{1}{\ln N} \Rightarrow e_j = -k \sum_{i=1}^N \frac{\zeta_{ij}}{D_j} \ln \left( \frac{\zeta_{ij}}{D_j} \right), \quad j = 1, \dots, R. \quad (4.15)$$

Normalizacijski koeficijent  $k$  osigurava  $0 \leq e_j \leq 1$ .

c) Zbroj entropija:

$$E = \sum_{j=1}^R e_j. \quad (4.16)$$

d) Entropijska težina svakog odziva:

$$w_j = \frac{1 - e_j}{R - E}, \quad \sum_{j=1}^R w_j = 1. \quad (4.17)$$

Entropijske težine pokazuju razinu važnosti korisnih informacija. Stoga se odzivi s većom entropijskom težinom smatraju važnijim.

#### Korak 4. Izračun sivih relacijskih stupnjeva

Entropijom ponderirani GRG-i su definirani izrazom:

$$\Gamma_i = \sum_{j=1}^R w_j \zeta_{ij}, \quad i = 1, \dots, N. \quad (4.18)$$

GRG označava stupanj sličnosti između komparativnog niza i referentnog niza. Kada je GRG komparativnog niza viši, isti je sličniji referentnom nizu. Najbolji izbor predstavlja alternativa s najvišim GRG-om.

U nastavku se za Taguchijevu metodu ortogonalnih planova eksperimenata u kombinaciji s entropijom ponderiranom sivom relacijskom analizom uvodi kratica TEGRA.

#### 4.7. Višestruka linearna regresijska analiza

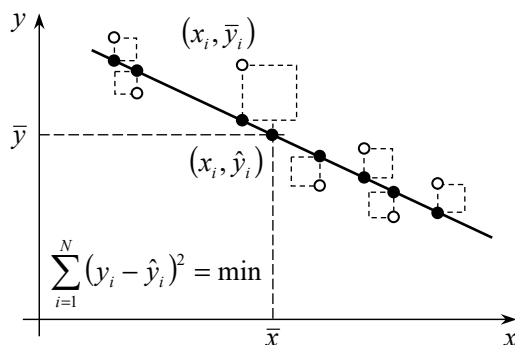
Statistička povezanost između zavisne varijable  $y$  i skupa nezavisnih varijabli  $(x_1, x_2, \dots, x_k)$  koja osim linijskih uključuje i utjecaje dvofaktorskih interakcija se može prikazati polinomom sljedećeg oblika:

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_j + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k b_{ij} x_i x_j + \varepsilon, \quad (4.19)$$

gdje su  $b_0$ ,  $b_j$  i  $b_{ij}$  nepoznati parametri (utjecaji), a  $\varepsilon$  je slučajna varijabla koja predstavlja nepoznata odstupanja od funkcionalnog odnosa i modelu višestruke regresije daje obilježje stohastičnosti. U većini statističkih programskih paketa se za procjenu  $b_0$ ,  $b_j$  i  $b_{ij}$  primjenjuje metoda najmanjih kvadrata, slika 4.18. Ako nezavisne varijable imaju različite mjerne jedinice, njihovi se procijenjeni utjecaji ne mogu međusobno uspoređivati. Stoga, za provođenje statističke analize treba nezavisne varijable linearno transformirati (normalizirati), što je poznato i kao kodiranje. Izraz za kodiranje glasi:

$$X_j = 1 + 2 \frac{x_j - x_{j\max}}{x_{j\max} - x_{j\min}}, \quad j = 1, \dots, k. \quad (4.20)$$

Prema gornjem izrazu minimalna razina varijable poprima vrijednost -1, a maksimalna 1.



**Slika 4.18.** Metoda najmanjih kvadrata.  $(x_i, y_i)$  empirijske vrijednosti,  $(x_i, \hat{y}_i)$  regresijske vrijednosti,  $(\bar{x}, \bar{y})$  koordinate sredine

Za određivanje statističke značajnosti procijenjenih parametara  $b_0$ ,  $b_j$  i  $b_{ij}$  se koristi ANOVA. Pokazatelj statističke značajnosti je  $p$ -vrijednost. Samo parametri čija je  $p$ -vrijednost niža od granične razine značajnosti tvore konačni model. Također, može se testirati i regresijski model kao cjelina pri čemu se postavlja hipoteza o (ne)postojanju linearne zavisnosti između zavisne i nezavisnih varijabli. Tada ANOVA podrazumijeva da su ukupne varijacije zavisne varijable podijeljene na dio koji se može pripisati regresiji (varijabilnost objašnjena regresijskim modelom) i ne protumačeni preostali dio koji se može pripisati slučajnim utjecajima (varijabilnost zbog pogreške). Ako je u tablici 4.6  $F$ -statistika  $>$   $F$ -značajnost, model je značajan (bitno različit od slučajnih pojava).

**Tablica 4.6.** ANOVA za model višestruke linearne regresije

Izvor varijacije	Stupnjevi slobode	Zbroj kvadrata	Sredina kvadrata (varijanca)	$F$ -statistika	$F$ -značajnost ( $Prob > F$ )
Protumačen modelom	$k$	$SS_R$	$MS_R = SS_R / k$	$F_A = MS_R / MS_E$	
Ne protumačena odstupanja	$N - (k + 1)$	$SS_E$	$MS_E = SS_E / [N - (k + 1)]$		
Ukupno	$N - 1$	$SS_T$			

Koeficijent determinacije  $R^2$  se često koristi kao pokazatelj prikladnosti regresijskog modela (mjera udjela ukupne varijabilnosti objašnjena modelom):

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} = \frac{SS_R}{SS_R + SS_E}. \quad (4.20)$$

Prema Chaddockovoj ljestvici (tablica 4.7) se model smatra prikladnijim što je  $R^2$  bliže jedinici.

**Tablica 4.7.** Chaddockova ljestvica [70]

Koeficijent determinacije $R^2$	Značenje
0	Odsutnost veze
0 – 0,25	Slaba veza
0,25 – 0,64	Veza srednje jakosti
0,64 – 1	Čvrsta veza
1	Potpuna veza

Problem statistike  $R^2$  je u tome što se uvijek povećava sa svakom novom dodanom varijablom u model, čak i ako ona nije značajna. Stoga se koristi i drugi pokazatelj  $R_{adj}^2$  (prilagođeni  $R^2$ ):

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{n-1}{n-(k+1)}(1-R^2) = 1 - \frac{n-1}{n-(k+1)} \frac{SS_E}{SS_T}. \quad (4.20)$$

Statistika  $R_{adj}^2$  je prilagođena veličini modela odnosno broju nezavisnih varijabli i općenito se neće uvijek povećavati s dodavanjem istih. U stvari, njezina će se vrijednost često smanjiti ako se modelu dodaju nepotrebne varijable (ne značajne).

## 5. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

Eksperimentalno istraživanje je provedeno u Laboratoriju za obradu odvajanjem čestica na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci.

### 5.1. Eksperimentalne postavke

#### 5.1.1. Ispitni materijal

Za ispitni je materijal odabran poboljšani martenzitni nehrđajući čelik X20Cr13 (1.4021) prema EN odnosno Č4172 prema HRN. Posebno je postojan na vodu i vodenu paru kao i na organske kiseline – octenu, mliječnu i voćnu. Primjenjuje se za izradu kirurških instrumenata (klijesta, pincete), pribora za jelo (vilice, žlice) i strojnih dijelova (osovine, stapajice, ventilni stošci, sapničke igle, turbinske lopatice, "holandski" noževi za papir) [61]. Kemijski sastav i mehanička svojstva prema atestu ispitnog materijala nabavljenog u obliku poliranih šipki prikazuju tablice 5.1 i 5.2.

**Tablica 5.1.** Kemijski sastav X20Cr13

C, %	Si, %	Mn, %	P, %	S, %	Cr, %	Ni, %
0,195	0,44	0,77	0,03	0,028	12,43	0,42

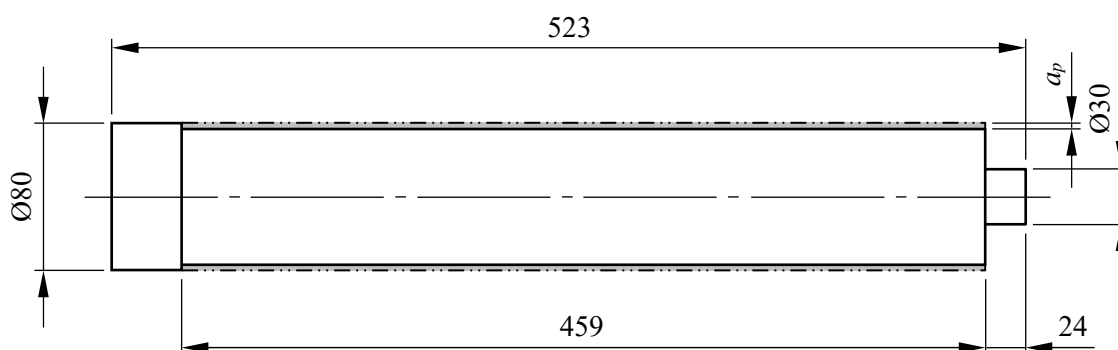
**Tablica 5.2.** Mehanička svojstva X20Cr13

Granica tečenja $R_{p0,2}$ , MPa	Vlačna čvrstoća $R_m$ , MPa	Izduženje $A_5$ , %	Kontrakcija $z$ , %	Tvrdoća HB
755,27	887,31	20,05	57,53	255

#### 5.1.2. Dimenzije priprema, alatni stroj i rezni alat

Za istraživanje su se koristile šipke  $\varnothing 80 \times 523$  mm. Kraj šipke koji se steže pinolom je bio obrađen na  $\varnothing 30 \times 24$  mm. Duljina za uzdužno tokarenje je bila 459 mm, slika 5.1.

Tokarenje se izvodilo na CNC tokarilici TU 360 Prvomajska. Tehnički podaci alatnog stroja su navedeni na slici 5.2.



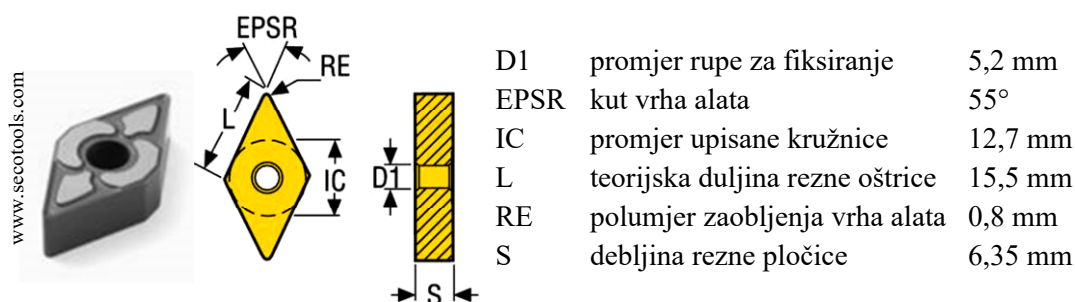
Slika 5.1. Dimenzije šipke za obradu tokarenjem

**Tehnički podaci**

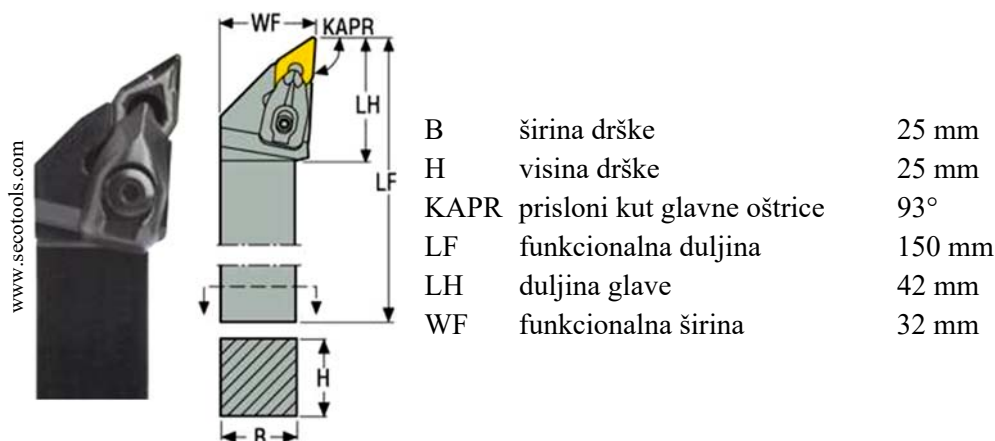
Izdanak glavnog vretena	6 DIN 55026
Provrta glavnog vretena	63 mm
Promjer stezne glave	200 mm
Najveći moment	180 Nm
Snaga	30,4 kW
Raspon broja okretaja	50 – 4000 min <sup>-1</sup>
Najveći promjer tokarenja	360 mm
Najveći promjer vrtnje	500 mm
Najveća duljina tokarenja	600 mm
Broj upravljanih osi	2
Brzi hod	10 m/min
Broj alata	12
Prihvat alata DIN 69880	Ø40 mm
Upravljanje	PHILIPS
Masa stroja	4300 kg

Slika 5.2. Laboratorijska CNC tokarilica TU 360 Prvomajska

Koristile su se Seco rezne pločice DNMG 150608-MF 4 razreda TM4000, slika 5.3. To su tvrdometalne rezne pločice na bazi volframovog karbida s prevlakom TiCN+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> koja je formirana kemijskim nanošenjem iz parne faze – CVD (engl. *Chemical Vapour Deposition*). Rezne pločice su se pričvršćivale na Seco držač DDJNL 2525M15-M, slika 5.4. Svaki se eksperiment izvodio s novom reznom oštricom.



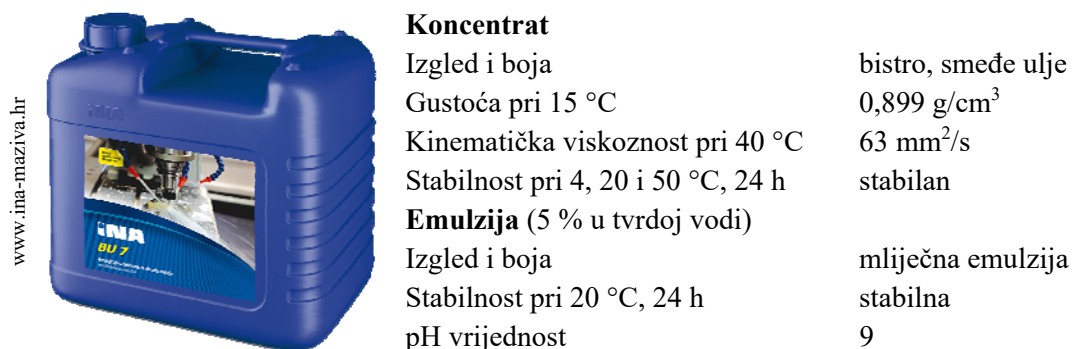
Slika 5.3. Rezna pločica DNMG 150608-MF 4 TM4000 proizvođača Seco



Slika 5.4. Držač pločice DDJNL 2525M15-M proizvođača Seco

### 5.1.3. Emulzija, MQL jedinica i vrtložna cijev

Za pripremanje emulzije se koristio INA BU 7 emulgirajući koncentrat za obradu metala proizveden iz solventno rafiniranog ulja parafinske osnove uz dodatak aditiva i emulgatora bez aromata. Koncentrat je umješavan u vodu u omjeru 1:20 (5 %). Emulzija je u zonu rezanja dovođena kroz posebni utor unutar vretena alata putem bakrene cijevi. Protok emulzije je iznosio 4,8 l/min. Svojstva koncentrata i emulzije su navedena na slici 5.5.



Slika 5.5. Opći podaci za INA BU 7

Za MQL obradu je bio na raspolaganju vanjski sustav SKF VectoLub s VE1B jedinicom koja se napaja uljem iz integriranog spremnika, slika 5.6. Komprimirani zrak potreban za rad jedinice se isporučivao klipnim kompresorom Presing B7000, slika 5.7. Dobava zraka se kontrolirala kugličnim ventilom na ulazu u jedinicu.

Komprimirani zrak koji struji kroz podnu ploču jedinice se distribuira s jedne strane na svaku mikropumpu, a s druge strane u koaksijalne izlaze da bi se koristio kao nosivi zrak. Svaki

**Tehnički podaci**

Ulazni tlak zraka	0,5 – 0,8 MPa
Protok zraka na 6 bara	170 l/min
Broj mikropumpi	2
Frekvencija mikropumpe	1 impuls/(6 s) – 3 impulsa/s
Ulje	mineralno, sintetičko ili biorazgradivo
Učinkovita viskoznost	10 – 400 mm <sup>2</sup> /s
Radna temperatura	10 – 50 °C
Kapacitet integriranog spremnika	0,3 l
Težina	1,5 kg

Slika 5.6. MQL jedinica VE1B proizvođača SKF

**Tehnički podaci**

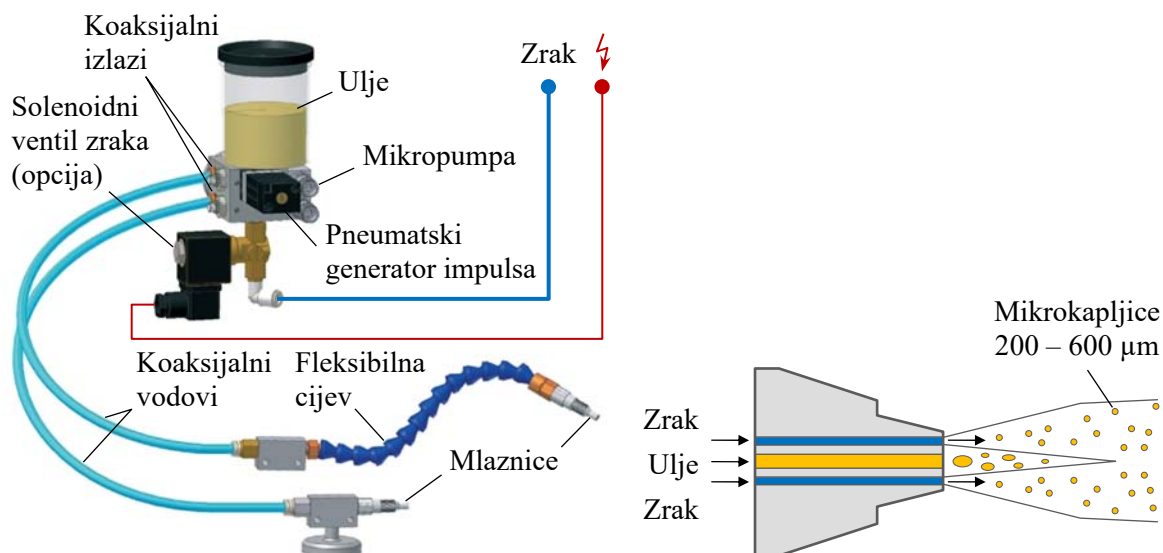
Snaga	7,3 kW
Volumen posude	500 l
Maksimalni tlak	1 MPa
Protok zraka na usisu	1210 l/min

Slika 5.7. Klipni kompresor Presing B7000

izlaz ima regulacijski ventil za podešavanje tlaka nosivog zraka, a koaksijalni vodovi su brzim priključcima povezani na izlaze. Svaka pneumatski pokretana mikropumpa isporučuje ulje (počevši od 3 mm<sup>3</sup>/impuls, brzina protoka je podesiva) kroz unutarnju kapilarnu cijev koaksijalnog voda u bifluidnu mlaznicu, slika 5.8. Vrtloženje nosivog zraka na izlazu iz mlaznice razbija ulje u mikrokapljice promjera 200 – 600 μm i prenosi ih do točke trenja kako bi se stvorio fini i homogeni podmazujući film bez stvaranja uljne magle. Na ovaj se način optimizira učinkovitost podmazivanja, smanjuje potrošnja ulja i održava sigurnost i čistoća radnog područja.

Za podmazivanje je korišteno biorazgradivo ulje LUB 200 proizvođača SKF, posebno prilagođeno za rad sa svim tipovima MQL sustava. Kemijski sastav uključuje smjesu triglicerida prirodnog porijekla i rafinirano ulje repice. Točka izlivanja odnosno temperatura ispod koje ulje gubi svojstva protoka je -21 °C.





**Slika 5.8.** Princip rada MQL jedinice VE1B proizvođača SKF

Vrtložna cijev (VC) protusmjernog protoka proizvođača EXAIR, model 3825 (slika 5.9), povezana je s MQL jedinicom u jedan sustav. Ova vrtložna cijev može proizvesti temperature od  $-34\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Sustav funkcionira na način da dovod komprimiranog zraka na sobnoj temperaturi dolazi izravno ispred MQL jedinice gdje postoje dva kuglasta ventila koja otvaraju/zatvaraju protok zraka za MQL jedinicu i vrtložnu cijev, slika 5.10. Tako je moguće primijeniti podmazivanje (MQL), hlađenje (VC) ili kombinaciju istih (MQL+VC).

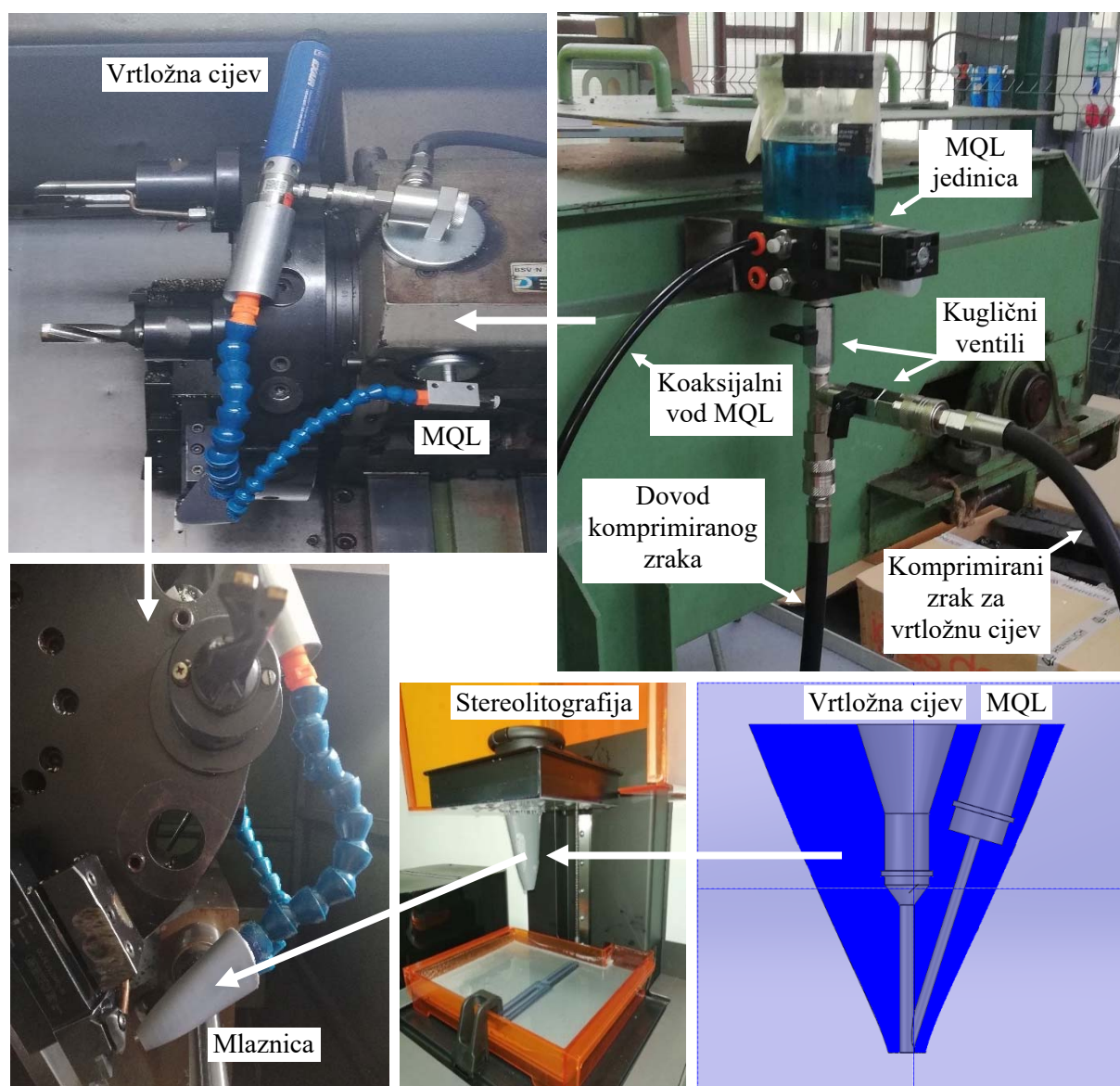
Za kombinaciju podmazivanja i hlađenja je konstruirana posebna mlaznica koja omogućuje spajanje nosivog zraka s mikrokapljicama ulja iz MQL jedinice i ohlađenog komprimiranog zraka iz vrtložne cijevi u zajednički tok prije ulaska u zonu rezanja. Mlaznica je izrađena na 3D Form 2 pisacu proizvođača Formlabs, slika 5.10. Pisač radi na principu stereolitografije koja koristi laserski uređaj za dobivanje čvrstih izotropnih dijelova iz tekuće fotopolimerne smole. Materijal od kojeg je izrađena mlaznica je standardna siva fotoreaktivna smola (engl. *Grey Resin*) koja je izvrsna za izradu sitnih detalja uz visoku rezoluciju i mat završnu obradu bez potrebe za naknadnim očvršćivanjem.



**Slika 5.9.** Vrtložna cijev EXAIR model 3825

#### Tehnički podaci

Ulazni tlak	0,69 MPa
Potrošnja zraka	708 (425, 850) l/min
Razina jakosti zvuka	73 (72, 74) dB



Slika 5.10. Integrirani sustav MQL jedinice i vrtložne cijevi

#### 5.1.4. Mjerna oprema

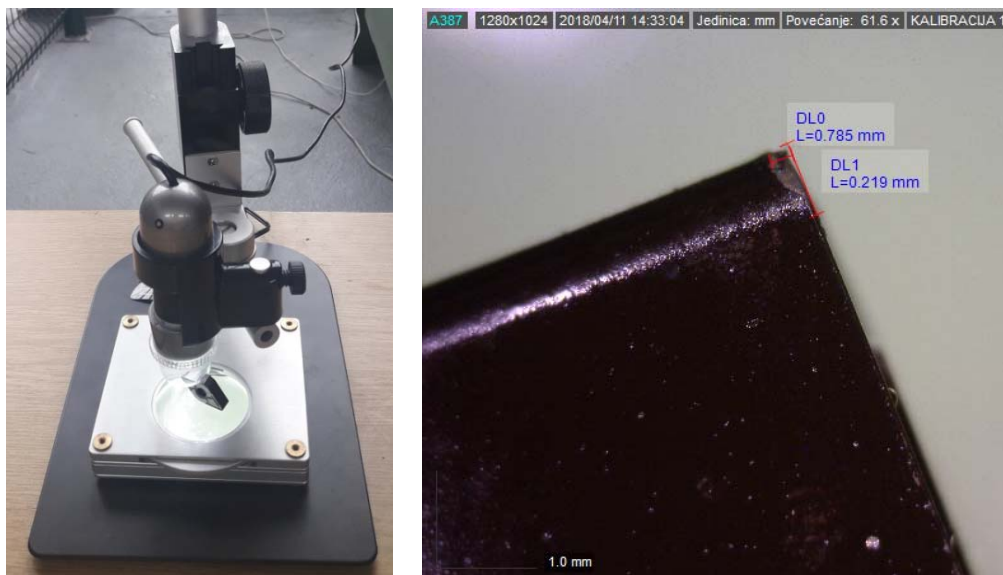
Hrapavost obrađene površine je mjerena profilometrom Hommel Tester T1000 proizvođača JENOPTIK, Njemačka. Rezultati se odmah prikazuju na ekranu i mogu se ispisati na integriranom pisaču. Parametri površinske hrapavosti se mjere prema normi HRN EN ISO 4287:2008/A1:2010 [X].

Tijekom eksperimenata je bilježeno srednje aritmetičko odstupanje profila  $R_a$  i srednja visina neravnina  $R_z$ . Kako bi se izbjegle moguće pogreške uslijed operacije ponovnog stezanja obratka, navedeni parametri hrapavosti su mjereni na obratku izravno u tokarilici, slika 5.11.



**Slika 5.11.** Profilometar Hommel Tester T1000 i mjerenje hrapavosti obrađene površine

Trošenje reznog alata je analizirano pomoću digitalnog USB mikroskopa Dino Lite Pro proizvođača AnMo Electronics Corporation, Taiwan, opremljenog kamerom. Mikroskop ima rezoluciju  $1280 \times 1024$  piksela s povećanjem do 200 puta. Rezna pločica se postavlja na postolje s pozadinskim osvjetljenjem jakosti preko 5000 mcd i ugrađenim okretljivim polarizatorom te snima kamerom. Na snimku se mjeri veličina njezinog trošenja primjenom DinoCapture softvera, slika 5.12. U provedenom je istraživanju postojanost reznog alata  $T$  procijenjena prema normi ISO 3685:1993(E) [51].



**Slika 5.12.** Digitalni USB mikroskop Dino Lite Pro i mjerenje trošenja reznog alata

Za beskontaktno mjerenje temperature korištena je termovizijska infracrvena kamera ThermaCAM S65 proizvođača FLIR Systems, slika 5.13. Temperaturno mjerno područje kamere je od  $-40$  °C do  $2000$  °C s mogućim odstupanjima  $\pm 2$  °C ili  $\pm 2$  % i daje jasne slike visoke rezolucije ( $640 \times 480$  piksela).



**Slika 5.13.** Termovizijska infracrvena kamera ThermoCAM S65

### 5.1.5. Plan eksperimenata prema Taguchijevoj metodi

Kao ulazne nezavisne varijable u proces obrade su odabrani parametri rezanja (brzina  $v_c$  u m/min, posmak  $f$  u mm i dubina  $a_p$  u mm) i način hlađenja i/ili podmazivanja (HP) (emulzija, MQL i MQL+VC). Kontrolirani odzivi procesa su: parametri hrapavosti obrađene površine  $R_a$  i  $R_z$ , oba u  $\mu\text{m}$ , postojanost reznog alata  $T$  u min i brzina skidanja materijala  $V_s$  u  $\text{mm}^3/\text{min}$ . Usvojene razine parametara rezanja su navedene u tablici 5.3.

**Tablica 5.3.** Razine ulaznih nezavisnih varijabli i kodovi za regresijsku analizu

Varijable	Razine (kodovi)		
	1 (-1)	2 (0)	3 (1)
Brzina rezanja $v_c$ , m/min	( $X_1$ ) 260	290	320
Posmak $f$ , mm	( $X_2$ ) 0,3	0,35	0,4
Dubina rezanja $a_p$ , mm	( $X_3$ ) 1	1,5	2
Način hlađenja i/ili podmazivanja (HP)	( $X_4$ ) Emulzija	MQL	MQL+VC

U plan eksperimenata treba uključiti četiri glavna faktora  $v_c, f, a_p$  i način hlađenja, svaki na tri razine i tri dvofaktorske interakcije  $v_c f, v_c a_p$  i  $f a_p$ . Svaki glavni faktor ima 3 razine – 1 = 2 stupnja slobode. Svaka dvofaktorska interakcija ima  $(3 \text{ razine} - 1) \cdot (3 \text{ razine} - 1) = 4$  stupnja slobode. Ukupno je to 20 stupnjeva slobode koji se mogu smjestiti u standardnu ortogonalnu matricu  $L_{27}(3^{13})$ . Ispravna dodjela glavnih faktora i interakcija stupcima matrice prema

Taguchiju je prikazana u tablici 5.4. Budući da svaka interakcija ima četiri stupnja slobode, treba je dodijeliti dvama stupcima. Tri slobodna stupca se onda koriste za procjenu pogreške. Također, redosljed izvođenja eksperimenata je rezultat slučajnog odabira programom Android platforme Random Generator 5.0.1.

**Tablica 5.4.** Plan eksperimenta  $L_{27}(3^{13})$ : četiri glavna faktora, tri dvofaktorske interakcije

Red. izv.	Eksp. br.	1 $v_c$	2 $f$	3 $v_c f$	4 $v_c f$	5 $a_p$	6 $v_c a_p$	7 $v_c a_p$	8 $f a_p$	9 HP	10 -	11 $f a_p$	12 -	13 -
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
20	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
5	3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1	4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
19	5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
23	6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
14	7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
26	8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
3	9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
21	10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
27	11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
6	12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
2	13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
4	14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
12	15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
22	17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
25	18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
9	19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
10	20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
15	21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
17	22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
7	23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
18	25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
13	26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
8	27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

## 5.2. Rezultati i rasprava

### 5.2.1. Hrapavost obrađene površine

Na temelju rezultata mjerenja srednjeg aritmetičkog odstupanja profila  $Ra$  (tablica 5.5) su za svaku razinu ulaznih nezavisnih varijabli izračunati prosječni odzivi kao i prosjek svih odziva (tablica 5.6). Da bi se utvrdio pojedinačni utjecaj svake varijable na  $Ra$ , provedena je analiza podataka navedenih u tablici 5.6 pomoću odzivnih grafikona na slici 5.14.

Kut nagiba linije koja povezuje prosječne odzive razina na slici 5.14 predstavlja utjecaj promatrane varijable na  $Ra$ . Može se vidjeti da posmak  $f$  ima najveći utjecaj na smanjenje  $Ra$  jer ima najveću razliku između maksimalne i minimalne vrijednosti prosječnog odziva, slijedi način hlađenja i/ili podmazivanja (HP), zatim dubina rezanja  $a_p$  i na kraju brzina rezanja  $v_c$ . Također, za postizanje najmanje vrijednosti parametra  $Ra$  (tj. najmanje hrapavosti obrađene površine), tokarenje martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 treba izvoditi uz primjenu MQL tehnike podržane hlađenjem vrtložnom cijevi i s kombinacijom  $v_c, f$  i  $a_p$  redosljedno na razinama (1, 1, 1) odnosno  $v_c = 260$  m/min,  $f = 0,3$  mm i  $a_p = 1$  mm. Međutim, točan statistički i fizikalni značaj kao i doprinos svake ulazne varijable i interakcija parametara rezanja smanjenju  $Ra$  treba utvrditi analizom varijance (ANOVA).

Za svaki su izvor varijacije u planu eksperimenta  $L_{27}(3^{13})$  prikazanog tablicom 5.4, određeni stupanj slobode  $df$ , zbroj kvadrata  $SS$ , sredina kvadrata  $MS$  (varijanca),  $F$ -statistika (izračunati omjer varijanci),  $F_{(a, v1, v2)}$ -statistika (tablični omjer varijanci) i postotni doprinos  $PC$  navedeni u tablici 5.7. Što je veći  $PC$ , to je važniji doprinos promjene veličine izvora varijacije promjeni promatranog odziva.

ANOVA rezultati u tablici 5.7 pokazuju da je postotni doprinos pogreške nizak (2,85 %) pa se može ustvrditi da nijedna važna ulazna varijabla nije isključena iz eksperimentiranja. Nadalje,  $f$ , HP,  $a_p$  i  $v_c$  redosljedno utječu na  $Ra$  s 53,66 %, 20,22 %, 5,3 % i 0,16 %. Ovime je potvrđeno da su posmak  $f$ , što je posebno važno za ovo istraživanje, način hlađenja i/ili podmazivanja dvije daleko najutjecajnije varijable na  $Ra$ . Također, varijabla  $v_c$  te interakcije  $v_c f$ ,  $v_c a_p$  i  $f a_p$  nemaju statističku i fizikalnu značajnost za  $Ra$  na razini pouzdanosti od 95 % budući da su njihove izračunate  $F$ -statistike manje od odgovarajućih tabličnih vrijednosti.

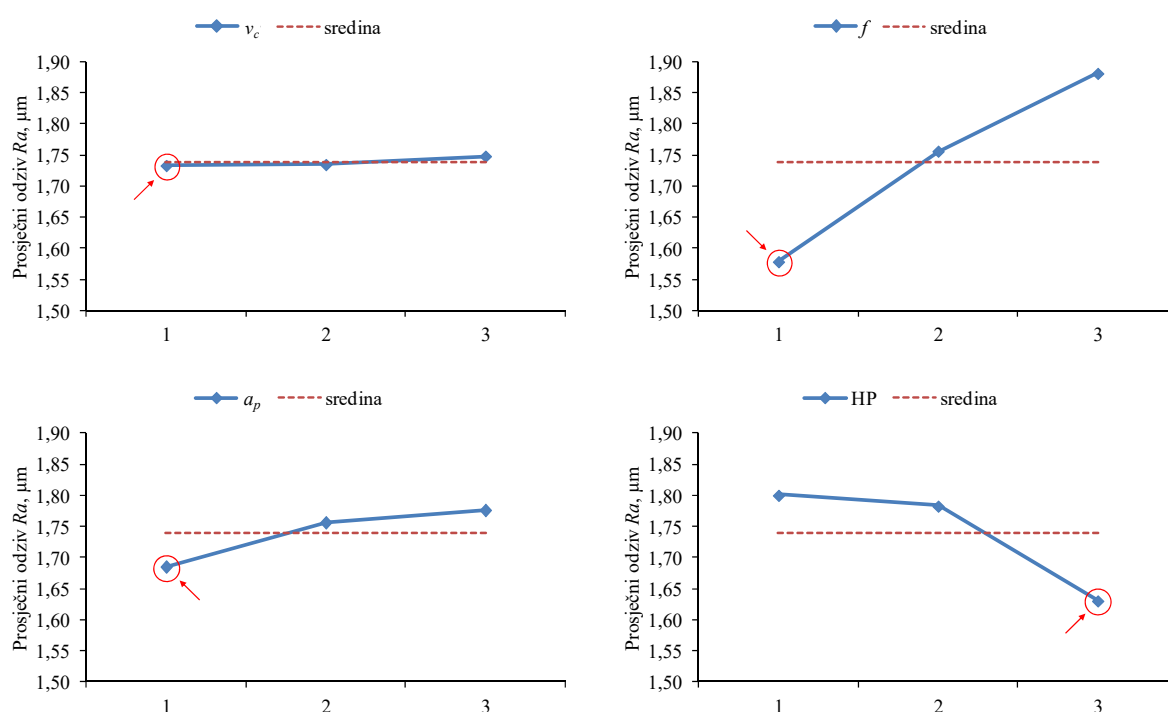
**Tablica 5.5.** Rezultati eksperimenata za hrapavost obrađene površine

Eksperiment br.	Ulazne varijable			Odzivi		
	$v_c$ m/min	$f$ mm	$a_p$ mm	HP	$Ra$ $\mu\text{m}$	$Rz$ $\mu\text{m}$
1	260	0,3	1	Emulzija	1,587	8,10
2	260	0,3	1,5	MQL	1,760	8,46
3	260	0,3	2	MQL+VC	1,343	7,15
4	260	0,35	1	MQL	1,653	8,53
5	260	0,35	1,5	MQL+VC	1,678	8,08
6	260	0,35	2	Emulzija	1,913	9,62
7	260	0,4	1	MQL+VC	1,727	8,80
8	260	0,4	1,5	Emulzija	2,016	9,31
9	260	0,4	2	MQL	1,921	9,72
10	290	0,3	1	MQL	1,544	7,61
11	290	0,3	1,5	MQL+VC	1,442	7,34
12	290	0,3	2	Emulzija	1,575	8,02
13	290	0,35	1	MQL+VC	1,592	8,06
14	290	0,35	1,5	Emulzija	1,921	9,61
15	290	0,35	2	MQL	1,953	9,42
16	290	0,4	1	Emulzija	1,825	8,86
17	290	0,4	1,5	MQL	1,916	9,67
18	290	0,4	2	MQL+VC	1,844	10,08
19	320	0,3	1	MQL+VC	1,594	7,84
20	320	0,3	1,5	Emulzija	1,623	8,30
21	320	0,3	2	MQL	1,739	8,18
22	320	0,35	1	Emulzija	1,742	9,05
23	320	0,35	1,5	MQL	1,669	7,82
24	320	0,35	2	MQL+VC	1,685	8,31
25	320	0,4	1	MQL	1,898	8,68
26	320	0,4	1,5	MQL+VC	1,777	8,28
27	320	0,4	2	Emulzija	2,007	10,87

**Tablica 5.6.** Tablica prosječnih odziva za parametar hrapavosti  $Ra$ 

Razine	Ulazne varijable			
	$v_c$	$f$	$a_p$	HP
1	1,73311	1,57856	1,68467	1,80100
2	1,73467	1,75622	1,75578	1,78367
3	1,74822	1,88122	1,77556	1,63133
Max – Min	0,01511	0,30267	0,09089	0,16967
Rang	4	1	3	2

Prosjek svih odziva: 1,73867

**Slika 5.14.** Odzivni grafikoni i optimalne razine brzine rezanja  $v_c$ , posmaka  $f$ , dubine rezanja  $a_p$  i načina hlađenja i/ili podmazivanja (HP) za minimizirani parametar hrapavosti  $Ra$ 

Za značajne ulazne varijable s obzirom na promatrani odziv  $Ra$  koje su navedene u tablici 5.7, provedena je višestruka linearna regresijska analiza u programskom paketu Microsoft Excel. Rezultati analize su prikazani u tablici 5.8. Dobiveni zbirni matematički model u kodiranom obliku koji opisuje zavisnost parametra hrapavosti  $Ra$  od posmaka ( $X_2$ ), dubine rezanja ( $X_3$ ) i načina hlađenja i/ili podmazivanja ( $X_4$ ) glasi:

$$Ra = 1,73867 + 0,15133 X_2 + 0,04544 X_3 - 0,08483 X_4. \quad (5.1)$$



**Tablica 5.7.** ANOVA rezultati za parametar hrapavosti  $Ra$ 

Izvor varijacije	Stupnjevi slobode $df$	Zbroj kvadrata $SS$	Sredina kvadrata (varijanca) $MS$	$F$ -statistika	Postotni doprinos $PC$
$v_c$	2	0,00124	0,00062	0,17*	0,16
$f$	2	0,41639	0,20820	56,54	53,66
$a_p$	2	0,04113	0,02056	5,58	5,30
HP	2	0,15688	0,07844	21,30	20,22
$v_c f$	4	0,05070	0,01267	3,44*	6,53
$v_c a_p$	4	0,05151	0,01288	3,50*	6,64
$f a_p$	4	0,03607	0,00902	2,45*	4,65
Pogreška (čista)	6	0,02209	0,00368		2,85
Ukupno	26	0,77601			

\*nije značajno;  $F_{(0,05, 2, 6)} = 5,14$ ;  $F_{(0,05, 4, 6)} = 4,53$

**Tablica 5.8.** Višestruka linearna regresijska analiza za matematički model (5.1)

Regresijska statistika					
Koeficijent korelacije $R$	0,86374	Standardna pogreška	0,09256		
Koeficijent determinacije $R^2$	0,74605	Zapažanja	27		
Prilagođeni $R^2$	0,71293				
ANOVA					
Izv. varijacije	$df$	$SS$	$MS$	$F$ -statistika	$F$ -značajnost
Regresija	3	0,57895	0,19298	22,52336	4,935E-07
Ostatak	23	0,19707	0,00857		
Ukupno	26	0,77601			

Vrijednost  $F$ -statistike u tablici 5.8 pokazuje da je matematički model (5.1) značajan na razini pouzdanosti od 95 %. Također, vrijednost koeficijenta determinacije  $R^2$  upućuje na čvrstu vezu, što znači da je matematički model (5.1) reprezentativan.

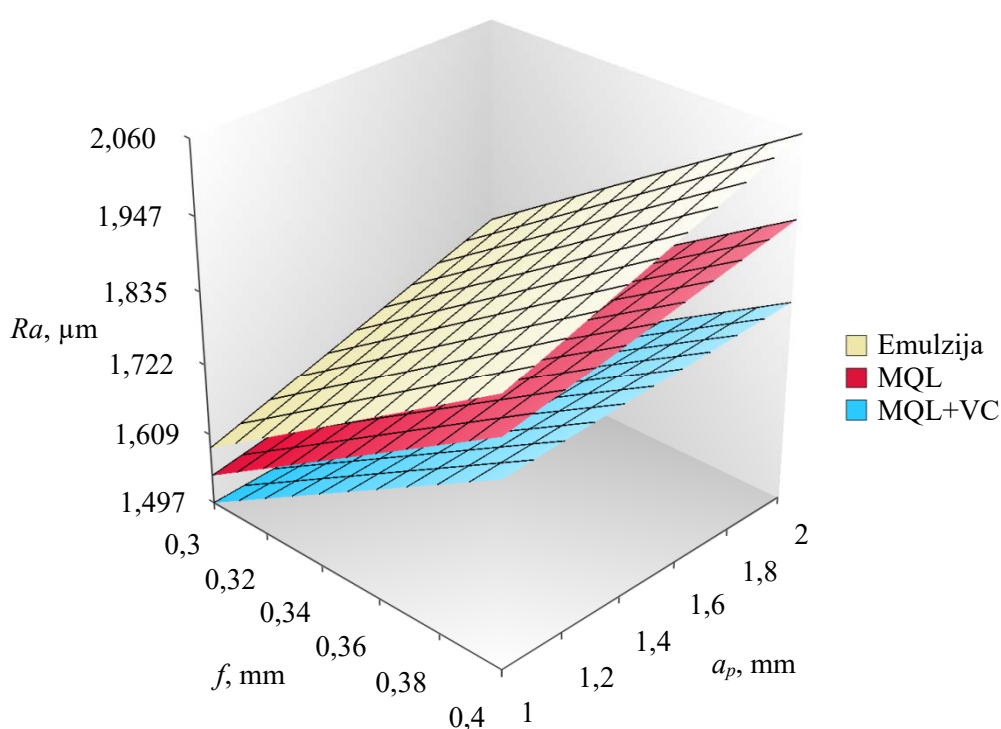
S obzirom na način hlađenja i/ili podmazivanja, dekodiranjem matematičkog modela (5.1) su dobiveni sljedeći izrazi:

$$Ra_E = 0,62783 + 3,02666f + 0,09089a_p, \quad (5.2)$$

$$Ra_{MQL} = 0,543 + 3,02666f + 0,09089a_p, \quad (5.3)$$

$$Ra_{MQL+VC} = 0,458174 + 3,02666f + 0,09089a_p. \quad (5.4)$$

Izrazi (5.2 – 5.4) su grafički prikazani na slici 5.15. Najmanja hrapavost obrađene površine pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 se postiže uz primjenu MQL tehnike podržane hlađenjem vrtložnom cijevi, zatim slijedi konvencionalna MQL tehnika, dok se najveća hrapavost postiže u uvjetima hlađenja emulzijom. Prema tome, alternativne tehnike hlađenja i/ili podmazivanja ovdje imaju prednost u usporedbi s primjenom emulzije.



**Slika 5.15.** Postizivi parametar hrapavosti  $Ra$  pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 s obzirom na različite tehnike hlađenja i/ili podmazivanja. VC vrtložna cijev,  $a_p$  dubina rezanja,  $v_c$  brzina rezanja

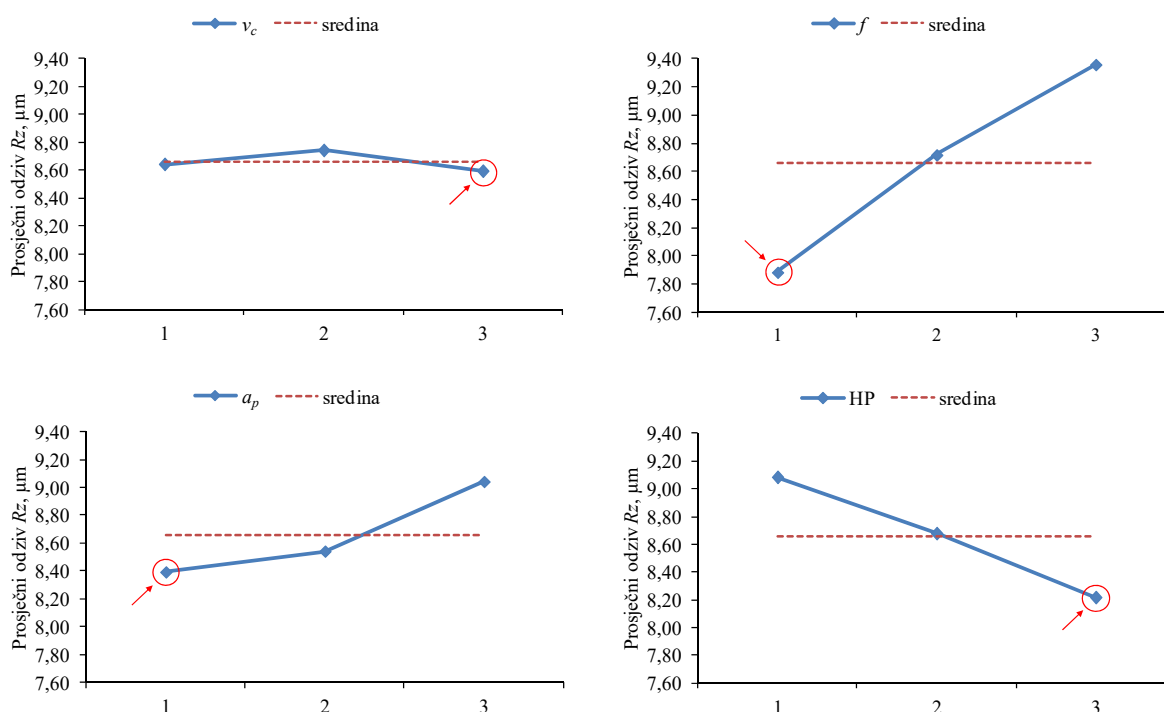
Na isti je način provedena i analiza rezultata mjerenja srednje visine neravnina  $Rz$  zabilježenih u tablici 5.5. Prosječni odzivi za parametar hrapavosti  $Rz$  su navedeni u tablici 5.9, a pripadajući odzivni grafikoni su prikazani na slici 5.16.

Odzivni grafikoni na slici 5.16 otkrivaju da posmak  $f$  ima najveću razliku između maksimalne i minimalne vrijednosti prosječnog odziva pa je njegov utjecaj na smanjenje  $Rz$  najveći, slijedi

**Tablica 5.9.** Tablica prosječnih odziva za parametar hrapavosti  $Rz$ 

Razine	Ulazne varijable			
	$v_c$	$f$	$a_p$	HP
1	8,64111	7,88889	8,39222	9,08222
2	8,74111	8,72222	8,54111	8,67667
3	8,59222	9,36333	9,04111	8,21556
Max – Min	0,14889	1,47444	0,64889	0,86667
Rang	4	1	3	2

Prosjek svih odziva: 8,65815

**Slika 5.16.** Odzivni grafikoni i optimalne razine brzine rezanja  $v_c$ , posmaka  $f$ , dubine rezanja  $a_p$  i načina hlađenja i/ili podmazivanja (HP) za minimizirani parametar hrapavosti  $Rz$ 

način hlađenja i/ili podmazivanja (HP), zatim dubina rezanja  $a_p$  i na kraju brzina rezanja  $v_c$ . Primjena MQL tehnike podržane hlađenjem vrtložnom cijevi i parametara rezanja  $v_c$ ,  $f$  i  $a_p$  redosljedno na razinama (3, 1, 1), tj.  $v_c = 320$  m/min,  $f = 0,3$  mm i  $a_p = 1$  mm, osigurava postizanje najmanje hrapavosti pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13.

ANOVA rezultati u tablici 5.10 otkrivaju da je postotni doprinos pogreške nizak (4,74 %) što znači da su eksperimentiranjem obuhvaćene sve važne ulazne varijable. Utjecaji  $f$ , HP,  $a_p$  i  $v_c$

na  $Rz$  su redosljedno 47,56 %, 16,36 %, 10,05 % i 0,5 %. Ovime je još jednom potvrđeno da su posmak i način hlađenja i/ili podmazivanja najutjecajnije varijable na hrapavost obrađene površine. Također, varijabla  $v_c$  te interakcije  $v_c f$ ,  $v_c a_p$  i  $f a_p$  nemaju značajnost za  $Rz$  na razini pouzdanosti od 95 %.

**Tablica 5.10.** ANOVA rezultati za parametar hrapavosti  $Rz$

Izvor varijacije	Stupnjevi slobode $df$	Zbroj kvadrata $SS$	Sredina kvadrata (varijanca) $MS$	$F$ -statistika	Postotni doprinos $PC$
$v_c$	2	0,10367	0,05184	0,32*	0,50
$f$	2	9,83836	4,91918	30,10	47,56
$a_p$	2	2,07967	1,03984	6,36	10,05
HP	2	3,38463	1,69231	10,36	16,36
$v_c f$	4	0,94624	0,23656	1,45*	4,57
$v_c a_p$	4	1,16059	0,29015	1,78*	5,61
$f a_p$	4	2,19310	0,54828	3,35*	10,60
Pogreška (čista)	6	0,98053	0,16342		4,74
Ukupno	26	20,68681			

\*nije značajno;  $F_{(0,05, 2, 6)} = 5,14$ ;  $F_{(0,05, 4, 6)} = 4,53$

Višestrukom linearnom regresijskom analizom (tablica 5.11) je određen zbirni matematički model u kodiranom obliku koji opisuje zavisnost parametra hrapavosti  $Rz$  od posmaka ( $X_2$ ), dubine rezanja ( $X_3$ ) i načina hlađenja i/ili podmazivanja ( $X_4$ ):

$$Rz = 8,65815 + 0,73722X_2 + 0,32444X_3 - 0,43333X_4. \quad (5.5)$$

$F$ -statistika u tablici 5.11 pokazuje da je matematički model (5.5) značajan na razini pouzdanosti od 95 %. Koeficijent determinacije  $R^2$  upućuje na čvrstu vezu, što znači da je matematički model (5.5) reprezentativan.

S obzirom na način hlađenja i/ili podmazivanja, dekodiranjem matematičkog modela (5.5) su dobiveni sljedeći izrazi:

$$Rz_E = 2,95759 + 14,7444f + 0,64889a_p, \quad (5.6)$$

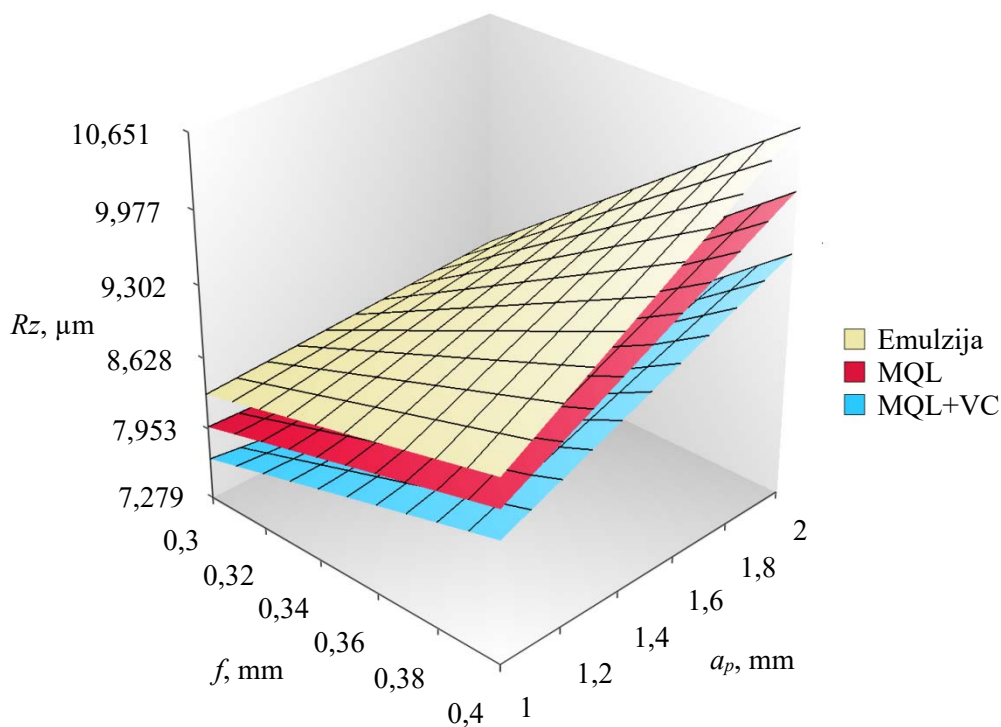
$$Rz_{MQL} = 2,52426 + 14,7444 f + 0,64889 a_p, \quad (5.7)$$

$$Rz_{MQL+VC} = 2,09093 + 14,7444 f + 0,64889 a_p. \quad (5.8)$$

**Tablica 5.11.** Višestruka linearna regresijska analiza za matematički model (5.5)

Regresijska statistika					
Koeficijent korelacije $R$	0,94764	Standardna pogreška	0,27267		
Koeficijent determinacije $R^2$	0,89801	Zapažanja	27		
Prilagođeni $R^2$	0,88471				
ANOVA					
Izv. varijacije	$df$	$SS$	$MS$	$F$ -statistika	$F$ -značajnost
Regresija	3	15,05763	5,01921	67,50689	1,49E-11
Ostatak	23	1,71008	0,07435		
Ukupno	26	16,76771			

Izrazi (5.6 – 5.8) su grafički prikazani na slici 5.17.



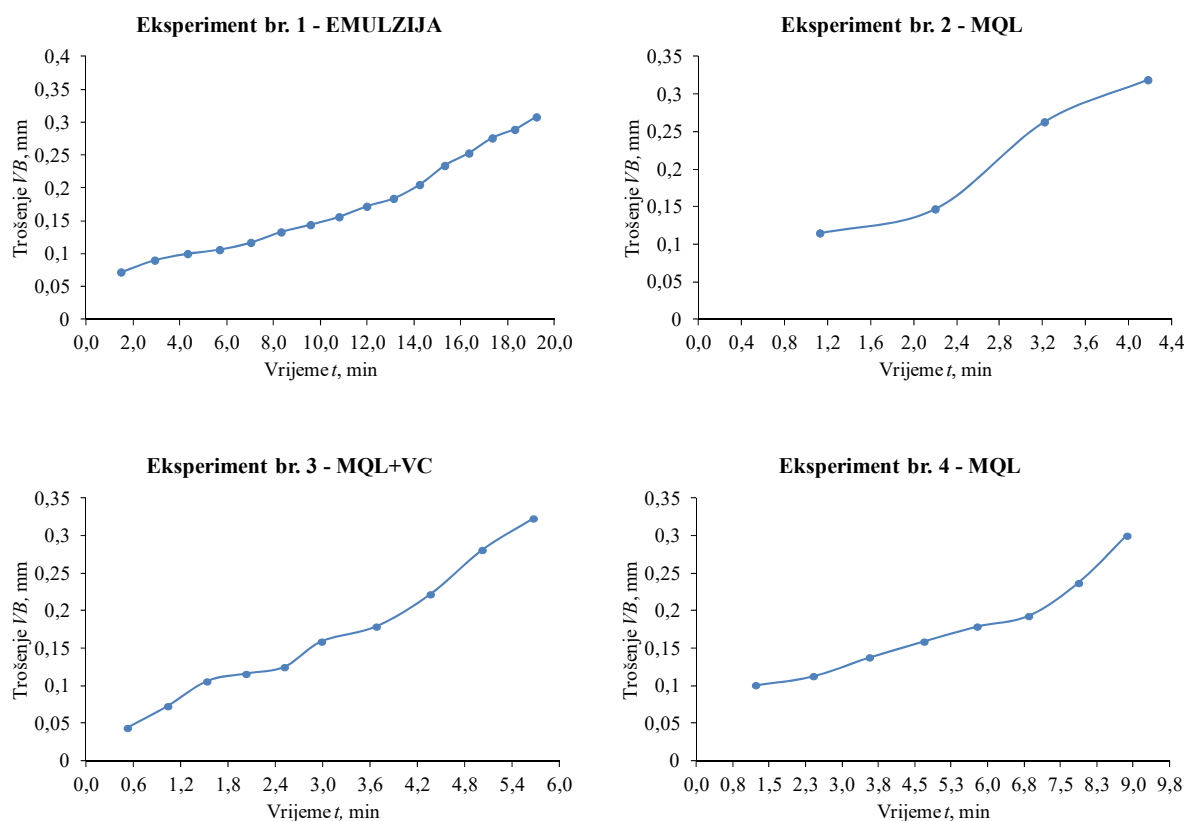
**Slika 5.17.** Postizivi parametar hrapavosti  $Rz$  pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 s obzirom na različite tehnike hlađenja i/ili podmazivanja. VC vrtložna cijev,  $a_p$  dubina rezanja,  $v_c$  brzina rezanja

Iz slike 5.17 se može zaključiti da primjena alternativnih tehnika hlađenja i/ili podmazivanja ima pozitivan učinak na hrapavost obrađene površine pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13. MQL tehnika podržana hlađenjem vrtložnom cijevi kao i konvencionalna MQL tehnika omogućavaju postizanje niže hrapavosti od one koja se s istim parametrima rezanja postiže u uvjetima hlađenja emulzijom.

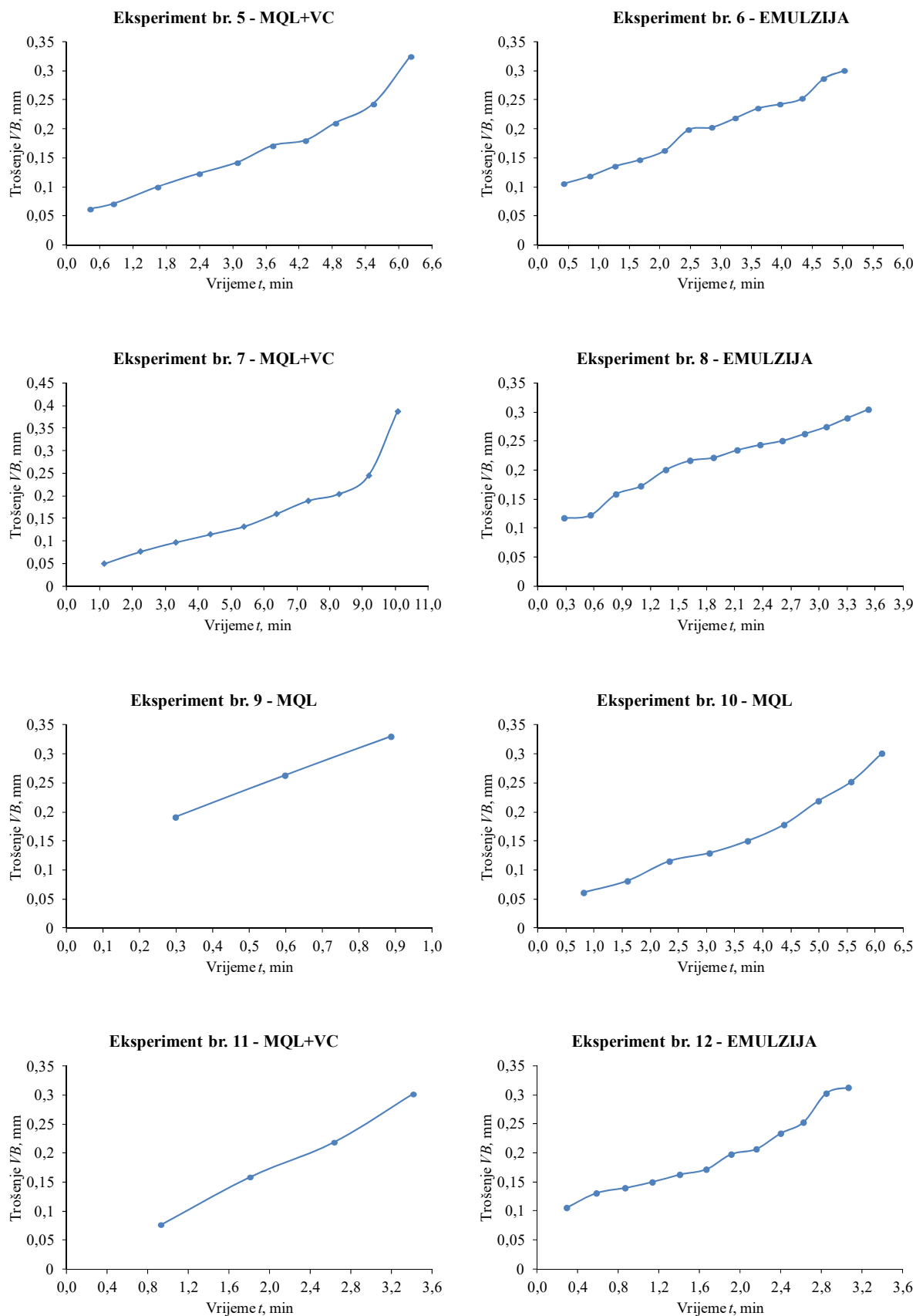
### 5.2.2. Postojanost reznog alata

U dijagramima na slikama 5.18 – 5.21 je za svaki eksperiment prikazano trošenje stražnje površine reznog alata. Za usvojeni kriterij istrošenosti  $VB_{krit} = 0,3$  mm su onda na temelju dijagrama određene postojanosti reznog alata  $T$  u tablici 5.12.

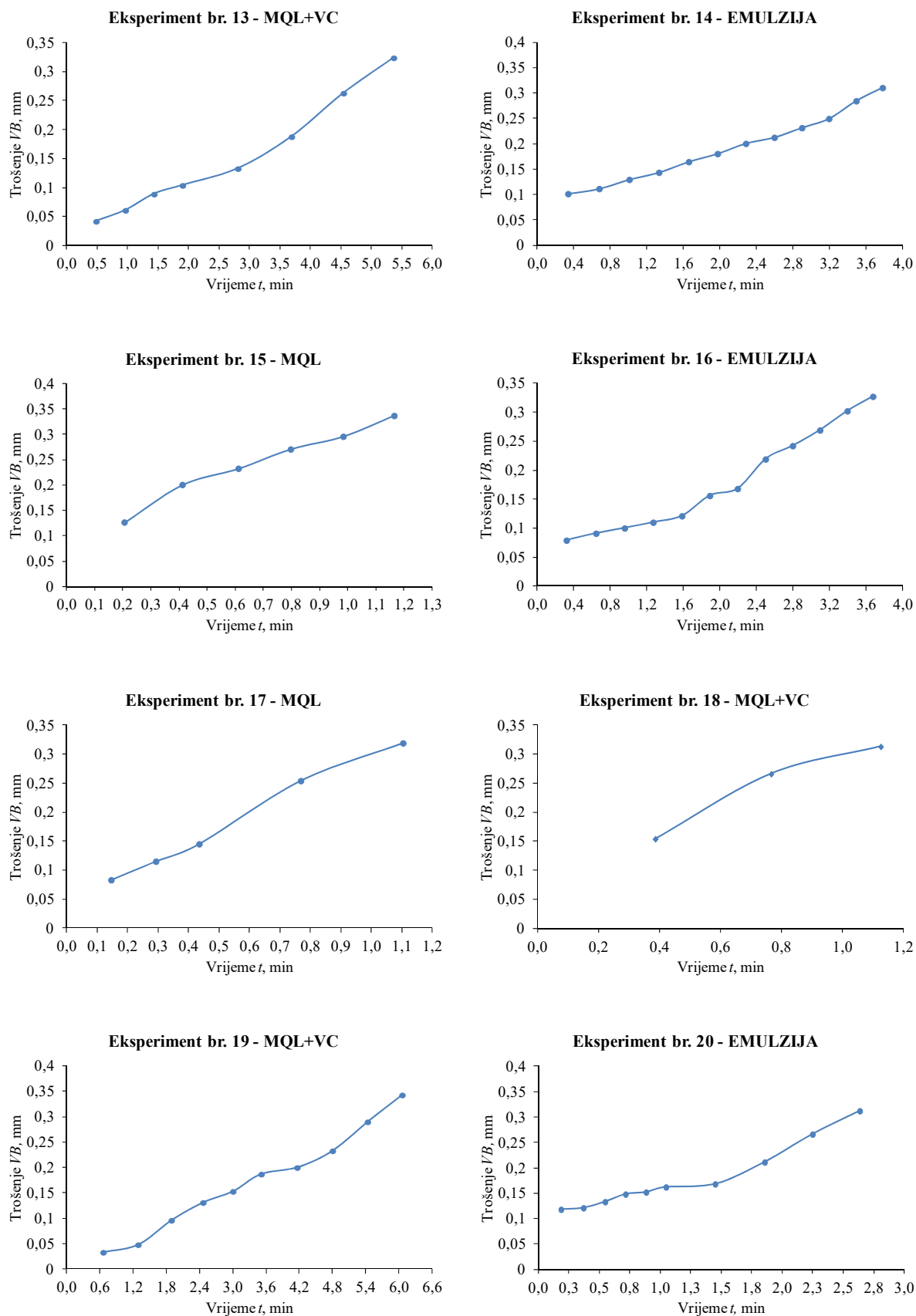
Za svaku razinu ulaznih nezavisnih varijabli su izračunati prosječni odzivi kao i prosjek odziva svih eksperimenata, tablica 5.13. U svrhu izvođenja zaključaka o pojedinačnim utjecajima ulaznih nezavisnih varijabli na  $T$ , konstruirani su odzivni grafikoni na slici 5.22. Točan statistički i fizikalni značaj te doprinos svake varijable kao i doprinos interakcija parametara rezanja povećanju  $T$  utvrđen je analizom varijance, tablica 5.14.



Slika 5.18. Dijagrami trošenja stražnje površine reznog alata: eksperimenti 1 – 4

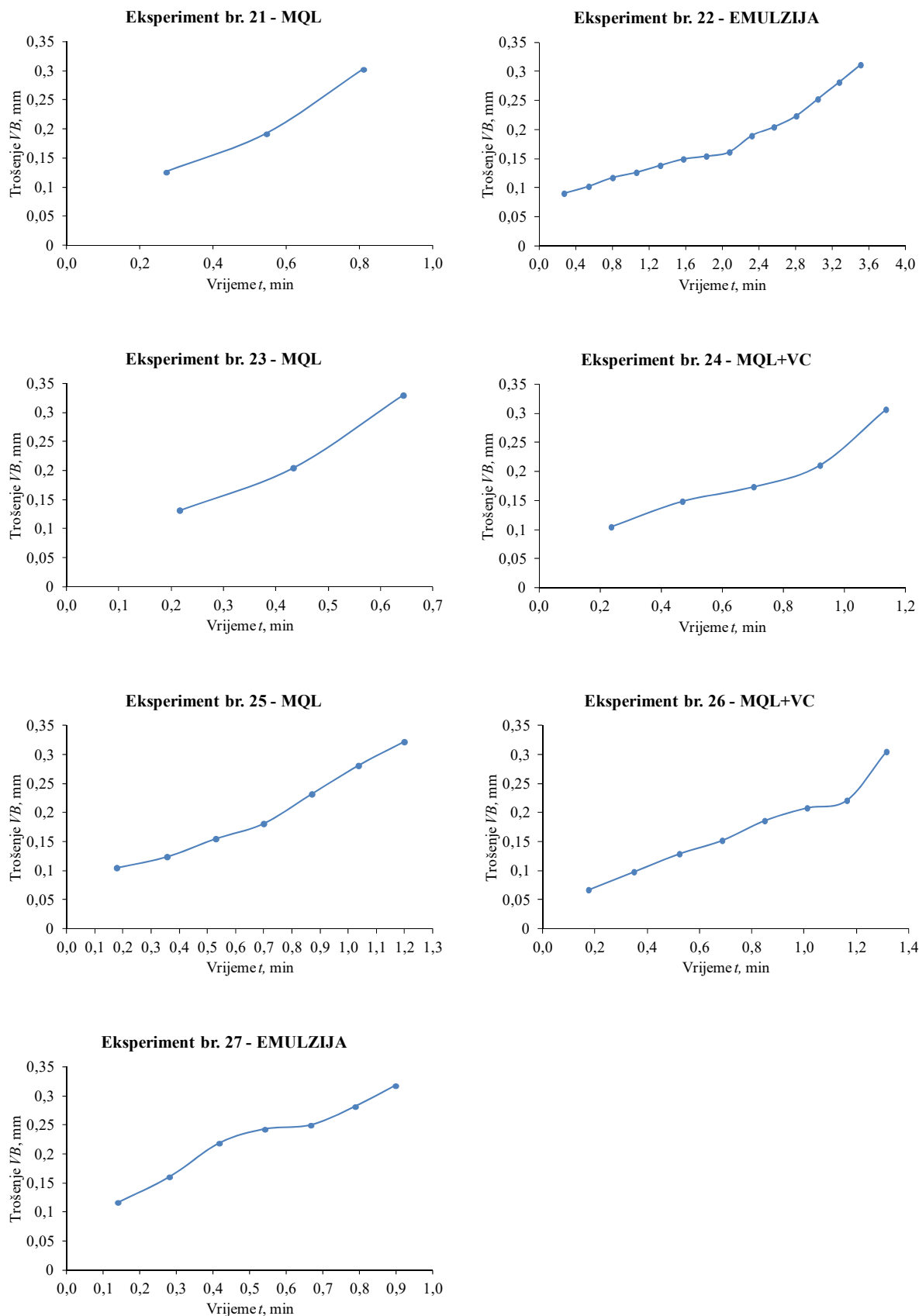


Slika 5.19. Dijagrami trošenja stražnje površine reznog alata: eksperimenti 5 – 12



Slika 5.20. Dijagrami trošenja stražnje površine reznog alata: eksperimenti 13 – 20





Slika 5.21. Dijagrami trošenja stražnje površine reznog alata: eksperimenti 21 – 27

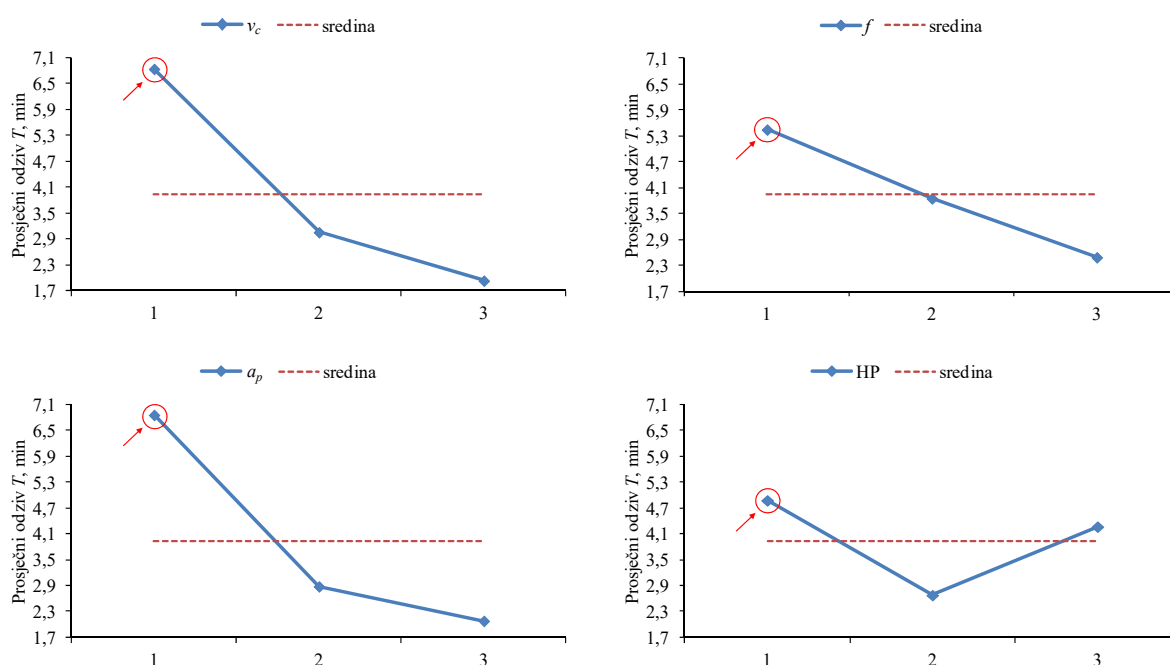
**Tablica 5.12.** Rezultati eksperimenata za postojanost reznog alata

Eksperiment br.	Ulazne varijable			HP	Odziv $T$ min
	$v_c$ m/min	$f$ mm	$a_p$ mm		
1	260	0,3	1	Emulzija	18,70
2	260	0,3	1,5	MQL	3,81
3	260	0,3	2	MQL+VC	5,35
4	260	0,35	1	MQL	8,87
5	260	0,35	1,5	MQL+VC	6,05
6	260	0,35	2	Emulzija	5,01
7	260	0,4	1	MQL+VC	9,50
8	260	0,4	1,5	Emulzija	3,50
9	260	0,4	2	MQL	0,76
10	290	0,3	1	MQL	6,10
11	290	0,3	1,5	MQL+VC	3,41
12	290	0,3	2	Emulzija	2,83
13	290	0,35	1	MQL+VC	5,05
14	290	0,35	1,5	Emulzija	3,65
15	290	0,35	2	MQL	0,99
16	290	0,4	1	Emulzija	3,38
17	290	0,4	1,5	MQL	1,05
18	290	0,4	2	MQL+VC	1,02
19	320	0,3	1	MQL+VC	5,58
20	320	0,3	1,5	Emulzija	2,55
21	320	0,3	2	MQL	0,81
22	320	0,35	1	Emulzija	3,42
23	320	0,35	1,5	MQL	0,61
24	320	0,35	2	MQL+VC	1,13
25	320	0,4	1	MQL	1,11
26	320	0,4	1,5	MQL+VC	1,31
27	320	0,4	2	Emulzija	0,85

**Tablica 5.13.** Tablica prosječnih odziva za postojanost reznog alata  $T$ 

Razine	Ulazne varijable			
	$v_c$	$f$	$a_p$	HP
1	6,83889	5,46000	6,85667	4,87667
2	3,05333	3,86444	2,88222	2,67889
3	1,93000	2,49778	2,08333	4,26667
Max – Min	4,90889	2,96222	4,77333	2,19778
Rang	1	3	2	4

Prosjek svih odziva: 3,94074

**Slika 5.22.** Odzivni grafikoni i optimalne razine brzine rezanja  $v_c$ , posmaka  $f$ , dubine rezanja  $a_p$  i načina hlađenja i/ili podmazivanja (HP) za maksimiziranu postojanost reznog alata  $T$ 

U odzivnim grafikonima na slici 5.22 se može uočiti da brzina rezanja  $v_c$  ima najveći utjecaj na povećanje  $T$  (najveća je razlika između maksimalne i minimalne vrijednosti prosječnog odziva), slijedi dubina rezanja  $a_p$ , zatim posmak  $f$  i na kraju način hlađenja i/ili podmazivanja (HP). Treba istaknuti da veći utjecaj dubine rezanja od utjecaja posmaka na postojanost reznog alata nije uobičajen. Najduža postojanost se postiže u uvjetima hlađenja emulzijom uz parametre rezanja na prvoj razini (1, 1, 1), tj.  $v_c = 260$  m/min,  $f = 0,3$  mm i  $a_p = 1$  mm. Također, prosječni odziv za emulziju je samo 12,5 % veći od onog za MQL tehniku podržanu hlađenjem vrtložnom cijevi. Budući da način hlađenja i/ili podmazivanja ima najmanji utjecaj

pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13, uvođenje MQL tehnike podržane hlađenjem vrtložnom cijevi umjesto primjene emulzije ne bi značajno utjecalo na smanjivanje postojanosti reznog alata.

**Tablica 5.14.** ANOVA rezultati za postojanost reznog alata  $T$

Izvor varijacije	Stupnjevi slobode $df$	Zbroj kvadrata $SS$	Sredina kvadrata (varijanca) $MS$	$F$ -statistika	Postotni doprinos $PC$
$v_c$	2	119,06850	59,53425	44,44	31,13
$f$	2	39,56501	19,78250	14,77	10,34
$a_p$	2	117,65743	58,82871	43,91	30,76
HP	2	23,17010	11,58505	8,65	6,06
$v_c f$	4	7,35115	1,83779	1,37*	1,92
$v_c a_p$	4	46,18746	11,54686	8,62	12,07
$f a_p$	4	21,48361	5,37090	4,01*	5,62
Pogreška (čista)	6	8,03813	1,33969		2,10
Ukupno	26	382,52139			

\*nije značajno;  $F_{(0,05, 2, 6)} = 5,14$ ;  $F_{(0,05, 4, 6)} = 4,53$

ANOVA rezultati u tablici 5.14 pokazuju niski postotni doprinos pogreške (2,1 %). Utjecaji  $v_c$ ,  $a_p$ ,  $f$  i HP na  $T$  su redosljedno 31,13 %, 30,76 %, 10,34 % i 6,06 %. Također, značajna je i interakcija  $v_c a_p$  (12,07 %) dok interakcije  $v_c f$  i  $f a_p$  nemaju statističku i fizikalnu značajnost za  $T$  na razini pouzdanosti od 95 %.

Višestrukom linearnom regresijskom analizom (tablica 5.15) je određen zbirni matematički model u kodiranom obliku koji opisuje zavisnost postojanosti reznog alata  $T$  od brzine rezanja ( $X_1$ ), posmaka ( $X_2$ ), dubine rezanja ( $X_3$ ) i načina hlađenja i/ili podmazivanja ( $X_4$ ):

$$T = 2,67889 + 1,89278 X_4^2 - (2,45444 - 0,62558 X_4) X_1 - (1,48111 - 0,81622 X_4) X_2 - (2,38667 - 0,34833 X_4) X_3 + 1,34844 X_1 X_3, \quad (5.9)$$

Vrijednost  $F$ -statistika u tablici 5.15 pokazuje da je matematički model (5.9) značajan na razini pouzdanosti od 95 %. Nadalje, vrijednost koeficijenta determinacije  $R^2$  upućuje na čvrstu vezu, što znači da je matematički model (5.9) reprezentativan.

**Tablica 5.15.** Višestruka linearna regresijska analiza za matematički model (5.9)

Regresijska statistika					
Koeficijent korelacije $R$	0,90678	Standardna pogreška	1,94360		
Koeficijent determinacije $R^2$	0,82224	Zapažanja	27		
Prilagođeni $R^2$	0,74324				
ANOVA					
Izv. varijacije	$df$	$SS$	$MS$	$F$ -statistika	$F$ -značajnost
Regresija	8	314,52470	39,31559	10,40757	2,31E-05
Ostatak	18	67,99668	3,77759		
Ukupno	26	382,52140			

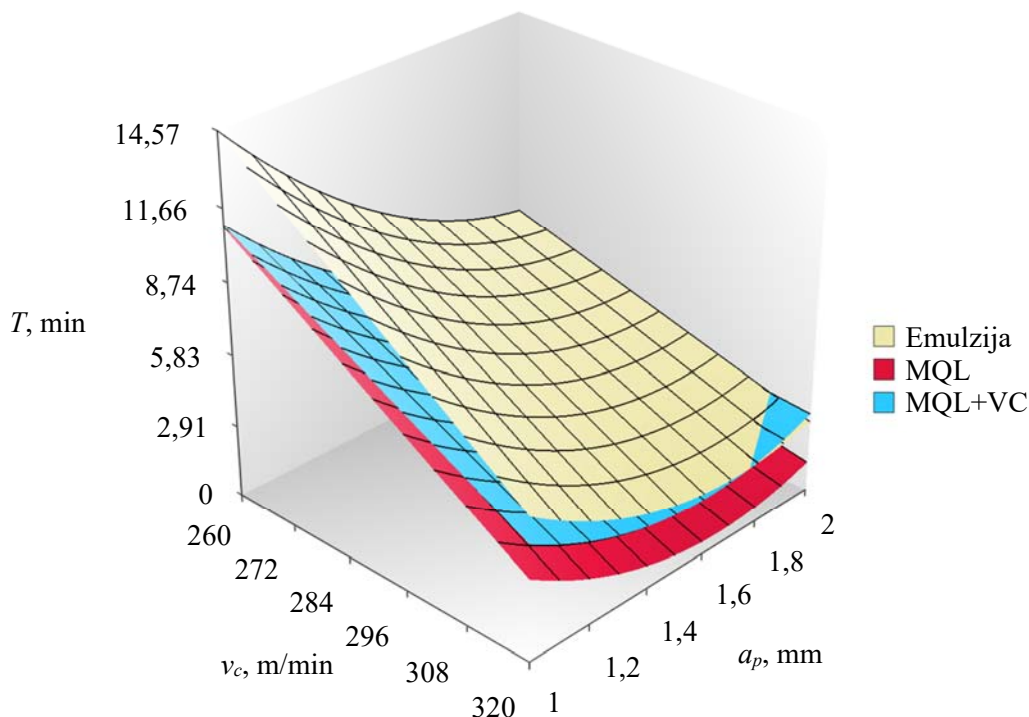
S obzirom na način hlađenja i/ili podmazivanja, dekodiranjem matematičkog modela (5.9) su dobiveni sljedeći izrazi:

$$T_E = 97,73625 - 0,23751v_c - 45,94644f - 31,5399a_p + 0,0899v_c a_p, \quad (5.10)$$

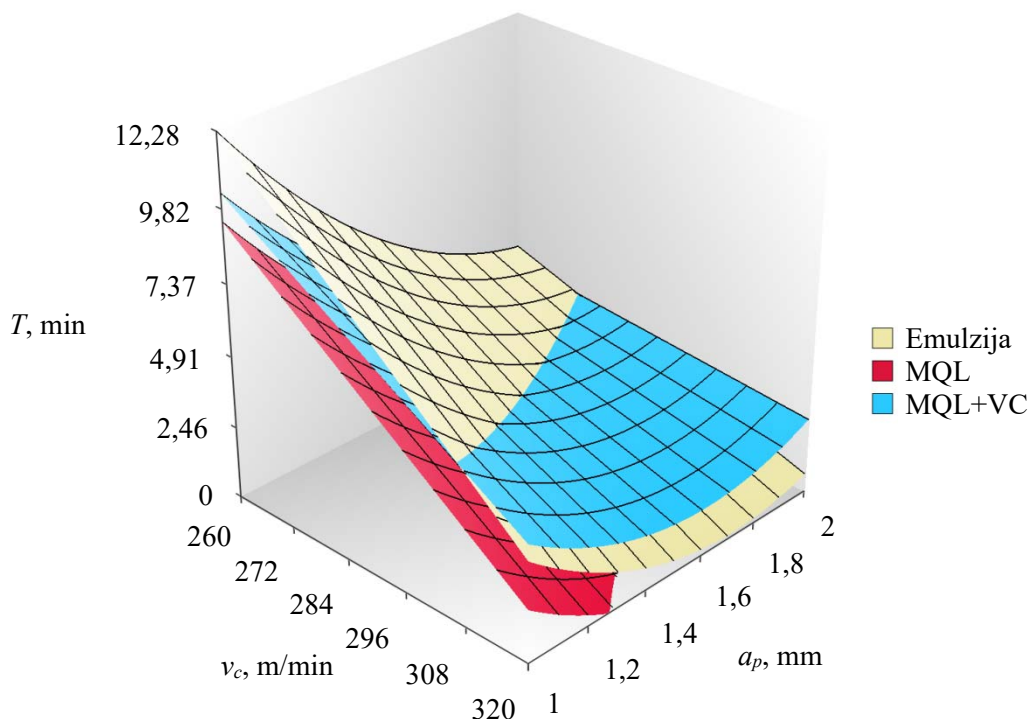
$$T_{MQL} = 83,03768 - 0,21665v_c - 29,6222f - 30,84318a_p + 0,0899v_c a_p, \quad (5.11)$$

$$T_{MQL+VC} = 72,1246 - 0,19581v_c - 13,29776f - 30,14651a_p + 0,0899v_c a_p. \quad (5.12)$$

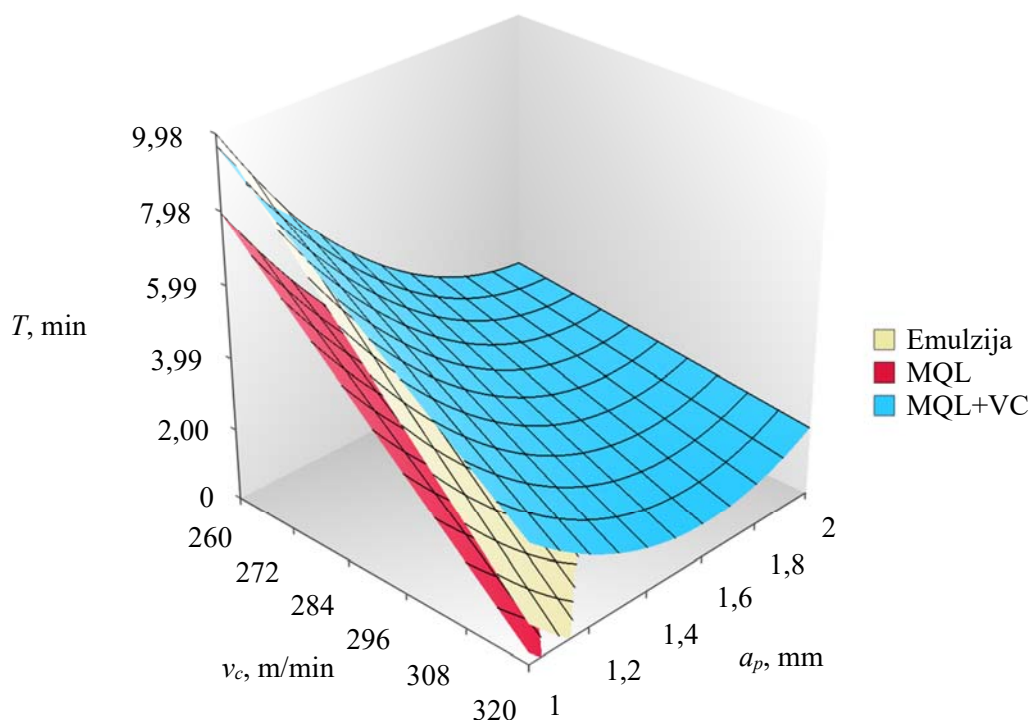
Izrazi (5.10 – 5.12) su grafički prikazani na slikama 5.23 – 5.25 u svrhu analiziranja utjecaja načina hlađenja i/ili podmazivanja na postojanost reznog alata za različite posmake. Na najmanjem posmaku se najduža postojanost reznog alata postiže u uvjetima hlađenja emulzijom za obradu metala. Međutim, kako se posmak povećava, MQL tehnika podržana hlađenjem vrtložnom cijevi progresivno preuzima primat i na najvećem posmaku daje najdužu postojanost reznog alata u usporedbi s ostalim načinima hlađenja i/ili podmazivanja. Konvencionalna MQL tehnika uvijek daje najkraću postojanost reznog alata. S obzirom na utvrđeno, MQL tehnika podržana hlađenjem vrtložnom cijevi se može preporučiti za tokarenje martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 jer ima pozitivan utjecaj na postojanost reznog alata.



**Slika 5.23.** Postiziva postojanost reznog alata  $T$  pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 s obzirom na različite tehnike hlađenja i/ili podmazivanja za posmak  $f = 0,3$  mm. VC vrtložna cijev,  $a_p$  dubina rezanja,  $v_c$  brzina rezanja



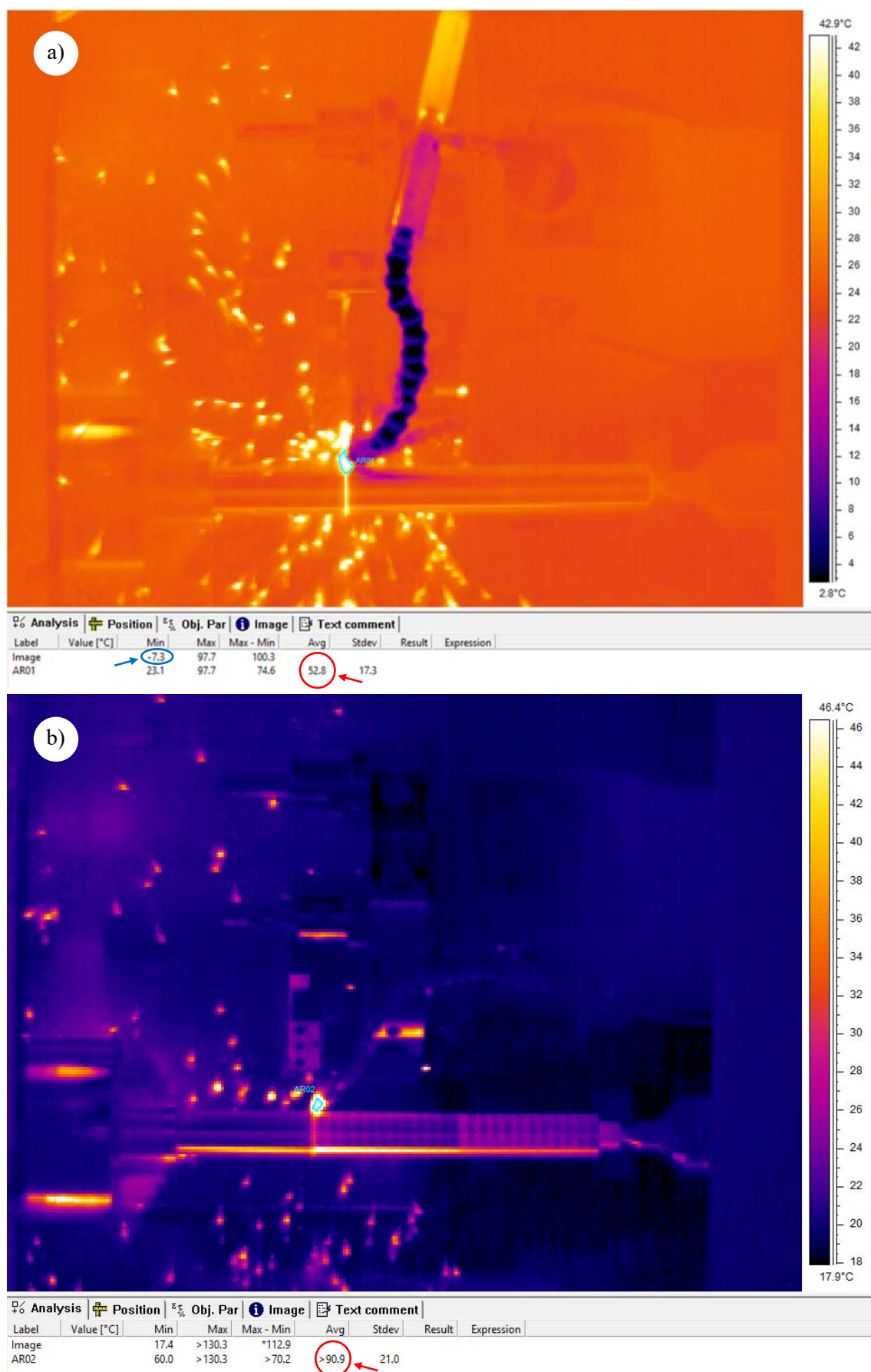
**Slika 5.24.** Postiziva postojanost reznog alata  $T$  pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 s obzirom na različite tehnike hlađenja i/ili podmazivanja za posmak  $f = 0,35$  mm. VC vrtložna cijev,  $a_p$  dubina rezanja,  $v_c$  brzina rezanja



**Slika 5.25.** Postiziva postojanost reznog alata  $T$  pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 s obzirom na različite tehnike hlađenja i/ili podmazivanja za posmak  $f = 0,4$  mm. VC vrtložna cijev,  $a_p$  dubina rezanja,  $v_c$  brzina rezanja

### 5.2.3. Učinak vrtložne cijevi na snižavanje temperature

Za hlađenje vrtložnom cijevi treba odrediti temperaturu i potrebnu količinu hladnog zraka kojeg će se dovesti u zonu rezanja. S povećavanjem protoka hladnog zraka, povećava se njegova temperatura. Pri obradi rezanjem hladni zrak treba osigurati dvije funkcije: učinkovito odvođenje strugotine i hlađenje. Ostajanje strugotine na obratku uzrokuje njezino podvlačenje ispod rezne oštrice i oštećivanje obrađene površine. Zato je odabran veći protok hladnog zraka. Za korišteni sustav vrtložne cijevi protoka 708 l/min je određen udio hladnog zraka od 80 % ulaznog protoka odnosno 566,4 l/min. Preostalih 20 % ulaznog protoka izlazi na vrućem kraju vrtložne cijevi. S radnim tlakom zraka od 0,69 MPa se onda može postići pad temperature od  $-29$  °C u odnosu na temperaturu ulaznog zraka. S obzirom na temperaturu okoline od  $21$  °C za vrijeme izvođenja eksperimenata, temperatura izlazne struje hladnog zraka je iznosila približno  $-8$  °C, slika 5.26. Postignuta prosječna temperatura na mjestu zahvata alata je iznosila  $52,8$  °C. Kod konvencionalne MQL tehnike prosječna temperatura je bila veća od  $90,9$  °C. Dakle, osim što je osigurano odvođenje strugotine iz zone rezanja, uporabom vrtložne cijevi je postignut dodatni pad temperature na mjestu zahvata za  $-38,1$  °C.



Slika 5.26. Temperature na mjestu zahvata reznog alata. a) MQL i vrtložna cijev, b) MQL



#### 5.2.4. Analiza s obzirom na višekriterijski optimizacijski problem

Optimalni način hlađenja i/ili podmazivanja i kombinacija parametara rezanja za tokarenje martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 su ovdje ustanovljeni povezivanjem Taguchijeve metode ortogonalnih planova eksperimenata i entropijom ponderirane sive relacijske analize, skraćeno TEGRA.

Tablica 5.16 prikazuje rezultate eksperimenata i izračunatu brzinu skidanja materijala prema izrazu (4.4) te njihove normalizirane vrijednosti. Također, sivi relacijski koeficijenti (GRC), entropijske težine za svaki odziv i rang za svaki izračunati sivi relacijski stupanj (GRG) su prikazani u tablici 5.17. Eksperiment pod brojem 3 je optimalan s obzirom na način hlađenja i/ili podmazivanja i kombinaciju parametara rezanja između 27 izvedenih eksperimenata jer ima najveću  $\Gamma$  vrijednost kao što je vizualizirano na slici 5.27. Prema tome, tokarenje martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 treba izvoditi uz primjenu MQL tehnike podržane hlađenjem vrtložnom cijevi i s kombinacijom  $v_c$ ,  $f$  i  $a_p$  redosljedno na razinama (1, 1, 3) odnosno  $v_c = 260$  m/min,  $f = 0,3$  mm i  $a_p = 2$  mm.

Izračunati prosječni odzivi za GRG su navedeni u tablici 5.18, a pripadajući odzivni grafikoni su prikazani na slici 5.28. Može se vidjeti da posmak  $f$  ima najveći utjecaj na istovremeno smanjenje hrapavosti obrađene površine (tj. parametara  $Ra$  i  $Rz$ ), produženje postojanosti reznog alata  $T$  i povećanje brzine skidanja materijala  $V_s$  jer ima najveću razliku između maksimalne i minimalne vrijednosti prosječnog odziva za GRG. Pokazuje se da je način hlađenja i/ili podmazivanja (HP) vrlo bitan za optimalan učinak tokarenja martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 budući da je druga varijabla po snazi utjecaja. Utjecaj dubine rezanja  $a_p$  i na kraju brzine rezanja  $v_c$  je puno manji. Ipak, točan statistički i fizikalni značaj kao i doprinos svake ulazne varijable i interakcija parametara rezanja povećanju GRG treba utvrditi analizom varijance (ANOVA).

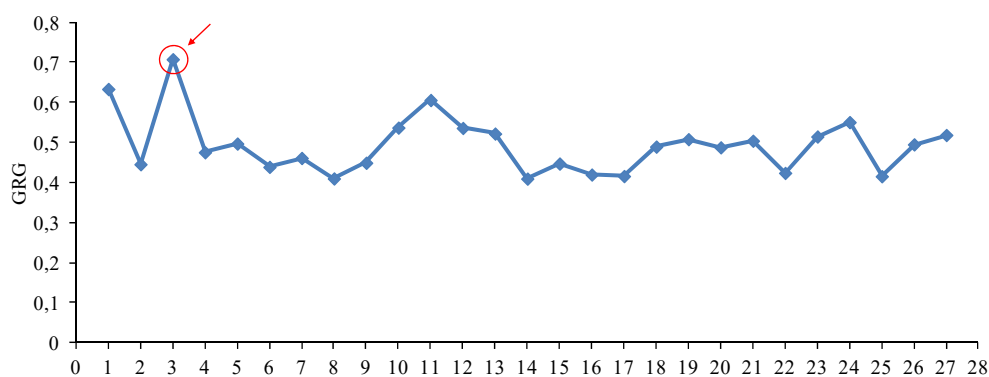
ANOVA rezultati u tablici 5.19 pokazuju postotni doprinos pogreške manji od kritičnih 15 % (10,90 %), što znači da je eksperiment dobro planiran. Posmak najviše utječe (35,98 %) na rezultat tokarenja, a slijedi način hlađenja i/ili podmazivanja (19,79 %) što je vrlo važna informacija s aspekta održivosti obrade. Brzina rezanja, dubina rezanja i interakcije parametara rezanja nemaju statističku značajnost na razini pouzdanosti od 95 % pa ih se može zanemariti.

**Tablica 5.16.** Rezultati eksperimenata i normalizirane vrijednosti: idealni ciljni niz (1, 1, 1, 1)

Eksp. br.	Odzivi				Normalizirani odzivi			
	$Ra$ $\mu\text{m}$	$Rz$ $\mu\text{m}$	$T$ min	$V_s$ $\text{mm}^3/\text{min}$	$Ra$ L-T-B	$Rz$ L-T-B	$T$ H-T-B	$V_s$ H-T-B
1	1,587	8,10	18,70	78000	0,63744	0,74462	1,00000	0,00000
2	1,760	8,46	3,81	117000	0,38039	0,64785	0,17689	0,21910
3	1,343	7,15	5,35	156000	1,00000	1,00000	0,26202	0,43820
4	1,653	8,53	8,87	91000	0,53938	0,62903	0,45661	0,07303
5	1,678	8,08	6,05	136500	0,50223	0,75000	0,30072	0,32865
6	1,913	9,62	5,01	182000	0,15305	0,33602	0,24323	0,58427
7	1,727	8,80	9,50	104000	0,42942	0,55645	0,49143	0,14607
8	2,016	9,31	3,50	156000	0,00000	0,41935	0,15976	0,43820
9	1,921	9,72	0,76	208000	0,14116	0,30914	0,00829	0,73034
10	1,544	7,61	6,10	87000	0,70134	0,87634	0,30348	0,05056
11	1,442	7,34	3,41	130500	0,85290	0,94892	0,15478	0,29494
12	1,575	8,02	2,83	174000	0,65527	0,76613	0,12272	0,53933
13	1,592	8,06	5,05	152250	0,63001	0,75538	0,24544	0,41713
14	1,921	9,61	3,65	152250	0,14116	0,33871	0,16805	0,41713
15	1,953	9,42	0,99	203000	0,09361	0,38978	0,02101	0,70225
16	1,825	8,86	3,38	116000	0,28380	0,54032	0,15312	0,21348
17	1,916	9,67	1,05	174000	0,14859	0,32258	0,02432	0,53933
18	1,844	10,08	1,02	232000	0,25557	0,21237	0,02266	0,86517
19	1,594	7,84	5,58	96000	0,62704	0,81452	0,27474	0,10112
20	1,623	8,30	2,55	144000	0,58395	0,69086	0,10724	0,37079
21	1,739	8,18	0,81	192000	0,41159	0,72312	0,01106	0,64045
22	1,742	9,05	3,42	112000	0,40713	0,48925	0,15533	0,19101
23	1,669	7,82	0,61	168000	0,51560	0,81989	0,00000	0,50562
24	1,685	8,31	1,13	224000	0,49183	0,68817	0,02875	0,82022
25	1,898	8,68	1,11	128000	0,17533	0,58871	0,02764	0,28090
26	1,777	8,28	1,31	192000	0,35513	0,69624	0,03870	0,64045
27	2,007	10,87	0,85	256000	0,01337	0,00000	0,01327	1,00000

**Tablica 5.17.** Izračunati sivi relacijski koeficijenti (GRC) i sivi relacijski stupnjevi (GRG)

Eksp. br.	GRC				GRG	
	$R_a$	$R_z$	$T$	$V_s$	$\Gamma$	Rang
1	0,57967	0,66192	1,00000	0,33333	0,63341	2
2	0,44658	0,58675	0,37790	0,39035	0,44582	20
3	1,00000	1,00000	0,40388	0,47090	0,70783	1
4	0,52049	0,57407	0,47921	0,35039	0,47553	16
5	0,50112	0,66667	0,41692	0,42686	0,49730	12
6	0,37121	0,42956	0,39784	0,54601	0,43910	21
7	0,46704	0,52991	0,49575	0,36929	0,46130	17
8	0,33333	0,46269	0,37307	0,47090	0,41018	26
9	0,36796	0,41986	0,33519	0,64964	0,44930	18
10	0,62605	0,80172	0,41788	0,34496	0,53706	5
11	0,77268	0,90732	0,37169	0,41492	0,60598	3
12	0,59191	0,68132	0,36303	0,52047	0,53621	6
13	0,57472	0,67148	0,39855	0,46174	0,52215	7
14	0,36796	0,43056	0,37539	0,46174	0,40975	27
15	0,35552	0,45036	0,33807	0,62676	0,44742	19
16	0,41112	0,52101	0,37123	0,38865	0,41990	23
17	0,36998	0,42466	0,33883	0,52047	0,41616	24
18	0,40179	0,38831	0,33845	0,78761	0,48961	14
19	0,57277	0,72941	0,40808	0,35743	0,50828	10
20	0,54582	0,61794	0,35900	0,44279	0,48783	15
21	0,45939	0,64360	0,33581	0,58170	0,50432	11
22	0,45751	0,49468	0,37184	0,38197	0,42404	22
23	0,50792	0,73518	0,33333	0,50282	0,51491	9
24	0,49595	0,61589	0,33985	0,73554	0,55076	4
25	0,37745	0,54867	0,33959	0,41014	0,41577	25
26	0,43673	0,62207	0,34216	0,58170	0,49528	13
27	0,33633	0,33333	0,33631	1,00000	0,51867	8
Entropijska težina						
	0,25345	0,22541	0,24536	0,27578		

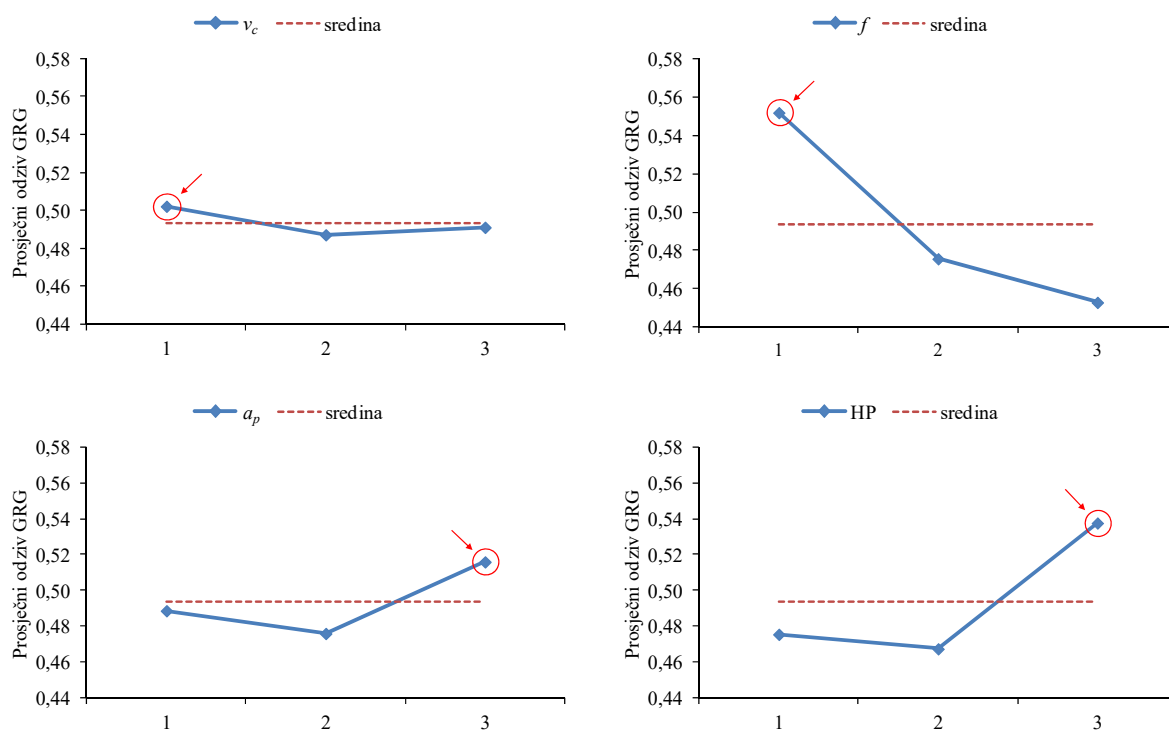


Slika 5.27. Graf sivih relacijskih stupnjeva (GRG)

Tablica 5.18. Tablica prosječnih odziva za GRG

Razine	Ulazne varijable			
	$v_c$	$f$	$a_p$	HP
1	0,50220	0,55186	0,48861	0,47545
2	0,48714	0,47566	0,47591	0,46737
3	0,49110	0,45291	0,51591	0,53761
Max – Min	0,01506	0,09895	0,04000	0,07024
Rang	4	1	3	2

Prosjek svih odziva GRG: 0,49348

Slika 5.28. Odzivni grafikoni i optimalne razine brzine rezanja  $v_c$ , posmaka  $f$ , dubine rezanja  $a_p$  i načina hlađenja i/ili podmazivanja (HP) za maksimizirani prosječni odziv GRG

**Tablica 5.19.** ANOVA rezultati za GRG

Izvor varijacije	Stupnjevi slobode $df$	Zbroj kvadrata $SS$	Sredina kvadrata (varijanca) $MS$	$F$ -statistika	Postotni doprinos $PC$
$v_c$	2	0,00110	0,00055	0,22*	0,82
$f$	2	0,04834	0,02417	9,90	35,98
$a_p$	2	0,00752	0,00376	1,54*	5,60
HP	2	0,02659	0,01329	5,45	19,79
$v_c f$	4	0,01754	0,00439	1,80*	13,06
$v_c a_p$	4	0,01358	0,00339	1,39*	10,10
$f a_p$	4	0,00505	0,00126	0,52*	3,76
Pogreška (čista)	6	0,01464	0,00244		10,90
Ukupno	26	0,13436			

\*nije značajno;  $F_{(0,05, 2, 6)} = 5,14$ ;  $F_{(0,05, 4, 6)} = 4,53$

Sud o ponovljivosti rezultata eksperimenata se donosi na temelju ANOVA tablice 5.20 u kojoj su svi neznačajni faktori i njihove interakcije okupljeni u zbirnu pogrešku. Eksperiment potvrde je proveden s optimalnom kombinacijom razina ulaznih nezavisnih varijabli određenom na slici 5.28, a izvedena su  $n_c = 2$  ponavljanja (tablica 5.21).

**Tablica 5.20.** ANOVA rezultati za GRG sa zbirnom pogreškom

Izvor varijacije	Stupnjevi slobode $df$	Zbroj kvadrata $SS$	Sredina kvadrata (varijanca) $MS$	$F$ -statistika	Postotni doprinos $PC$
$f$	2	0,04834	0,02417	8,95	35,98
HP	2	0,02659	0,01329	4,92	19,79
Pogreška (zbirna)	22	0,05943	0,00270		44,23
Ukupno	26	0,13436			

$F_{(0,05, 1, 22)} = 4,3$ ;  $F_{(0,05, 2, 22)} = 3,44$

Prema podacima iz tablice 5.18, predviđeni prosječni optimalni odziv GRG za značajne varijable iznosi:

$$\bar{F}_{pred} = \bar{f}_{(1)} + \overline{HP}_{(3)} - \bar{F} = 0,55186 + 0,53761 - 0,49348 = 0,59599.$$

Zbroj stupnjeva slobode varijabli korištenih u  $\bar{F}_{pred}$  je  $z = 2 + 2 = 4$ .

**Tablica 5.21.** Rezultati eksperimenta potvrde

Odzivi	Ponavljanje br. 1	Ponavljanje br. 2
$Ra, \mu\text{m}$	1,492	1,359
$Rz, \mu\text{m}$	7,82	7,25
$T, \text{min}$	5,05	4,10
$V_s, \text{mm}^3/\text{min}$	156000*	156000*
GRG	0,56904	0,67958
Prosjek odziva GRG: 0,62431		

\*analitički izraz

Efektivni broj zapažanja je:

$$n_{ef} = \frac{N}{1+z} = \frac{27}{1+4} = 5,4.$$

Dopuštena pogreška iznosi:

$$CI = \sqrt{F_{(0,05,1,22)} MS_{Ez} \left( \frac{1}{n_{ef}} + \frac{1}{n_c} \right)} = \sqrt{4,3 \cdot 0,0027 \cdot \left( \frac{1}{5,4} + \frac{1}{2} \right)} = 0,08919.$$

Interval povjerenja za eksperiment potvrde je:

$$\begin{aligned} (\bar{\Gamma}_{pred} - CI) &\leq \bar{\Gamma}_{pot} \leq (\bar{\Gamma}_{pred} + CI), \\ (0,59599 - 0,08919) &\leq \bar{\Gamma}_{pot} \leq (0,59599 + 0,08919), \\ 0,5068 &\leq \bar{\Gamma}_{pot} = 0,62431 \leq 0,68518. \end{aligned}$$

Budući da je uvjet zadovoljen, može se prihvatiti da su rezultati eksperimenata aditivni (utjecaji interakcija ne mogu biti dominantni) i ponovljivi.

## 6. EKONOMIJA PRIJELAZA NA ODRŽIVU OBRADU

### 6.1. Ekonomski model

#### 6.1.1. Analiza jediničnog proizvodnog vremena

Jedinično proizvodno vrijeme  $t_1$  se može raščlaniti u tri dijela:

$$t_1 = t_n + t_g + t_a, \quad (6.1)$$

gdje su:

$t_n$  – komadno neproizvodno vrijeme koje je nezavisno od parametara rezanja,

$$t_n = \frac{t_{pz}}{n_s} + t_{so} + t_p + \frac{L_{ph}}{v_{ph}} i_p, \quad (6.2)$$

$t_{pz}$  – pripremno-završno vrijeme (priprema alatnog stroja/radnog mjesta za obradu određene pozicije i vraćanje alatnog stroja/radnog mjesta u prvotno stanje po završetku iste pojavljuje se samo jednom bez obzira na veličinu serije),

$n_s$  – broj obradaka u seriji,

$t_{so}$  – vrijeme za uzimanje i stezanje te otpuštanje i otpremanje obratka,

$t_p$  – vrijeme za pozicioniranje reznog alata,

$L_{ph}$  – povratni hod reznog alata,

$v_{ph}$  – brzina povratnog hoda reznog alata (programirana),

$i_p$  – broj prolaza reznog alata,

$t_g$  – glavno vrijeme obrade (vanjsko uzdužno tokarenje),

$$t_g = \frac{L}{v_f} i_p = \frac{L}{f n} i_p = \frac{\pi D L}{v_c f} i_p, \quad (6.3)$$

$L$  – duljina prolaza koja uključuje duljinu za obradu  $l_p$  te ulazni  $l_u$  i izlazni hod  $l_i$  reznog alata ( $L = l_p + l_u + l_i$ ),

$t_a$  – komadno alatno vrijeme,

$$t_a = \frac{t_{a1}}{z_T} = t_g \frac{t_{a1}}{T}, \quad (6.4)$$

$t_{a1}$  – vrijeme za zamjenu rezne oštrice,

$z_T$  – broj obrađenih obradaka po reznoj oštrici (tj. za vrijeme njezine postojanosti).

Recipročna vrijednost jediničnog proizvodnog vremena  $t_1$  definira proizvodnost  $Q$  kao mjeru tehničke sposobnosti obradnog sustava izraženu količinom obradaka obrađenih u promatranoj operaciji i jedinici vremena:

$$Q = \frac{1}{t_1}. \quad (6.5)$$

### 6.1.2. Analiza jediničnog proizvodnog troška

Jedinični proizvodni trošak  $C_1$  se može raščlaniti na *fiksne* i *varijabilne* troškove. Fiksni troškovi, za razliku od varijabilnih, ne zavise od izbora parametara rezanja. Operativna satnica alatnog stroja  $C_{ns}$ , je važan aspekt pri određivanju dijela fiksnih i varijabilnih troškova i može se odrediti prema sljedećem izrazu:

$$C_{ns} = \frac{C_{nsg}}{FRS} = \frac{1}{FRS} (OT + K + OS + OD + TRP + BD + IT), \quad (6.6)$$

gdje su:

$C_{nsg}$  – godišnji operativni trošak alatnog stroja,

$FRS$  – godišnji fond radnih sati,

$$FRS = h_D \eta D_T T_G, \quad (6.7)$$

$h_D$  – broj radnih sati na dan,

$\eta$  – djelotvornost obradnog sustava s obzirom na nepredvidive tehnološke zastoje i osobne potrebe operatera ( $\eta < 1$ ),

$D_T$  – broj radnih dana tjedno,

$T_G$  – broj radnih tjedana godišnje,



$OT$  – godišnji otpis (ovdje prema linearnoj metodi amortizacije bez ostatka vrijednosti),

$$OT = \frac{C_{AS}}{n_g}, \quad (6.8)$$

$C_{AS}$  – nabavna cijena alatnog stroja,

$n_g$  – broj godina otpisa (= 10 godina za redovni otpis, = 5 godina za ubrzani otpis),

$K$  – godišnje kamate (anuitet prema složenom kamatnom računu),

$$K = C_{AS} (1+k)^{n_g} \frac{k}{(1+k)^{n_g} - 1}, \quad (6.9)$$

$k$  – kamatna stopa obično = 0,04 – 0,08 (4 – 8 %),

$OS$  – godišnje osiguranje,

$$OS = C_{AS} \frac{n_g + 1}{2n_g} o, \quad (6.10)$$

$o$  – stopa osiguranja obično = 0,015 – 0,03 (1,5 – 3 %),

$OD$  – prosječni godišnji trošak za održavanje (10 – 15 % nabavne cijene),

$$OD = (0,1 \dots 0,15) C_{AS}, \quad (6.11)$$

$TRP$  – godišnji troškovi radnog prostora (najam, režije za struju, vodu i sl.),

$BD$  – godišnji bruto osobni dohodak operatera,

$IT$  – godišnji indirektni (opći) troškovi (posebne naknade, administracija, radna oprema),

$$IT = (1 \dots 3) BD. \quad (6.12)$$

Bez obzira na način hlađenja i/ili podmazivanja, fiksni troškovi uključuju trošak materijala  $C_M$ , trošak sabijanja i eventualno usitnjavanja strugotine  $C_{ss}$  u svrhu njezinog lakšeg transporta i trošak komadnog neproizvodnog vremena  $C_n$  prema izrazu:

$$C_n = C_{ns} t_n. \quad (6.13)$$

U slučaju primjene emulzije, u fiksne troškove treba dodati i trošak obaveznog čišćenja obratka  $C_{co}$  kao i trošak čišćenja strugotine odmašćivanjem  $C_{cs}$  s osnovnom zadaćom pohranjivanja ostataka emulzije i pripremanja strugotine za prikupljanje i recikliranje.

U nastavku se analiziraju varijabilni troškovi po jedinici proizvoda. Trošak obrade  $C_o$  je određen izrazom:

$$C_o = C_{ns} t_g. \quad (6.14)$$

Trošak alata  $C_a$  se računa zbrajanjem troška nabave reznog alata i troška zamjene rezne oštrice prema izrazu:

$$C_a = \frac{C_{al}}{z_T} + C_{ns} t_a = \frac{t_g}{T} (C_{al} + C_{ns} t_{al}). \quad (6.15)$$

gdje je:

$C_{al}$  – nabavna cijena alata svedena na jednu reznu oštricu,

$$C_{al} = \frac{C_{pl}}{z_{pl}} + \frac{C_d}{N_{pl}}, \quad (6.16)$$

$C_{pl}$  – nabavna cijena rezne pločice,

$z_{pl}$  – broj reznih oštrica na pločici,

$C_d$  – nabavna cijena držača rezne pločice,

$N_{pl}$  – broj pritezanja reznih oštrica u radnom vijeku držača (obično 400 pritezanja).

Trošak energije alatnog stroja  $C_{er}$  se računa zbrajanjem troška energije u stanju pripravnosti (zamjena obratka i rezne oštrice) i troška energije potrebne za obradu:

$$C_{er} = c_{kWh} [P_{sp} (t_n + t_a) + P_{as} t_g], \quad (6.17)$$

gdje su:

$c_{kWh}$  – cijena kilovatsata,

$P_{sp}$  – snaga alatnog stroja u pripravnosti,

$P_{as}$  – angažirana snaga alatnog stroja za vrijeme rezanja,

$$P_{as} = \frac{v_c f a_p k_s}{\eta_s}, \quad (6.18)$$

$k_s$  – specifična sila rezanja za materijal obrade,

$\eta_s$  – stupanj iskoristivosti u zavisnosti od frekvencije vrtnje motorvretena, načina prijenosa i starosti alatnog stroja (= 0,7 – 0,85).

Emulzija za obradu metala s jedne strane unosi u proces obrade trošak uporabe s obzirom na godišnje troškove nabave i zbrinjavanja i s druge trošak distribucije. Općenito, cijena zbrinjavanja emulzije je veća ili jednaka njezinoj nabavnoj cijeni i u specijaliziranim tvrtkama iznosi 0,17 – 6,5 kn/l. Za proračunatu operativnu satnicu emulzije  $C_{nE}$ , trošak uporabe iste  $C_E$  se onda može odrediti kao:

$$C_E = C_{nE} t_g. \quad (6.19)$$

Trošak distribucije emulzije obuhvaća trošak energije pumpe  $C_{ep}$  snage  $P_p$ , zadužene za njezino cirkuliranje:

$$C_{ep} = c_{kWh} P_p t_g. \quad (6.20)$$

Potrošnja ulja za podmazivanje kod MQL tehnike je gotovo bez ostatka pa za razliku od primjene emulzije nema troška zbrinjavanja potrošenog ulja kao ni troškova čišćenja obratka i strugotine. MQL jedinica unosi u proces obrade trošak uporabe s obzirom na godišnje troškove njezinog otpisa i održavanja te nabave ulja kao i trošak distribucije komprimiranog zraka. Za proračunatu operativnu satnicu MQL jedinice  $C_{nMQL}$ , trošak uporabe iste  $C_{MQL}$  je:

$$C_{MQL} = C_{nMQL} t_g. \quad (6.21)$$

Trošak distribucije komprimiranog zraka potrebnog za rad MQL jedinice obuhvaća trošak energije kompresora  $C_{ekMQL}$  snage  $P_k$  i opisan je izrazom:

$$C_{ekMQL} = c_{kWh} P_k t_g \frac{Q_{MQL}}{Q_{dk}}, \quad (6.22)$$

gdje su:

$Q_{MQL}$  – protok zraka kroz MQL jedinicu,

$Q_{dk}$  – dobava zraka kompresorom.

Vrtložna cijev unosi u proces obrade trošak uporabe s obzirom na godišnje troškove njezinog otpisa i održavanja te trošak distribucije komprimiranog zraka. Za proračunatu operativnu satnicu vrtložne cijevi  $C_{nVC}$ , trošak uporabe iste  $C_{VC}$  je onda:

$$C_{VC} = C_{nVC} t_g. \quad (6.23)$$

Za potreban protok zraka  $Q_{VC}$  kroz vrtložnu cijev, trošak energije kompresora  $C_{ekVC}$  iznosi:

$$C_{ekVC} = c_{kWh} P_k t_g \frac{Q_{VC}}{Q_{dk}}. \quad (6.24)$$

Konačno, modeli jediničnog proizvodnog troška za tokarenje uz primjenu emulzije za obradu metala i MQL tehnike bez i uz podršku hlađenja vrtložnom cijevi se mogu redosljedno formirati u sljedećem obliku:

$$C_{1E} = (C_M + C_n + C_{co} + C_{cs} + C_{ss})_{\text{fiksni}} + (C_o + C_a + C_{er} + C_{ep} + C_E)_{\text{varijabilni}}, \quad (6.25)$$

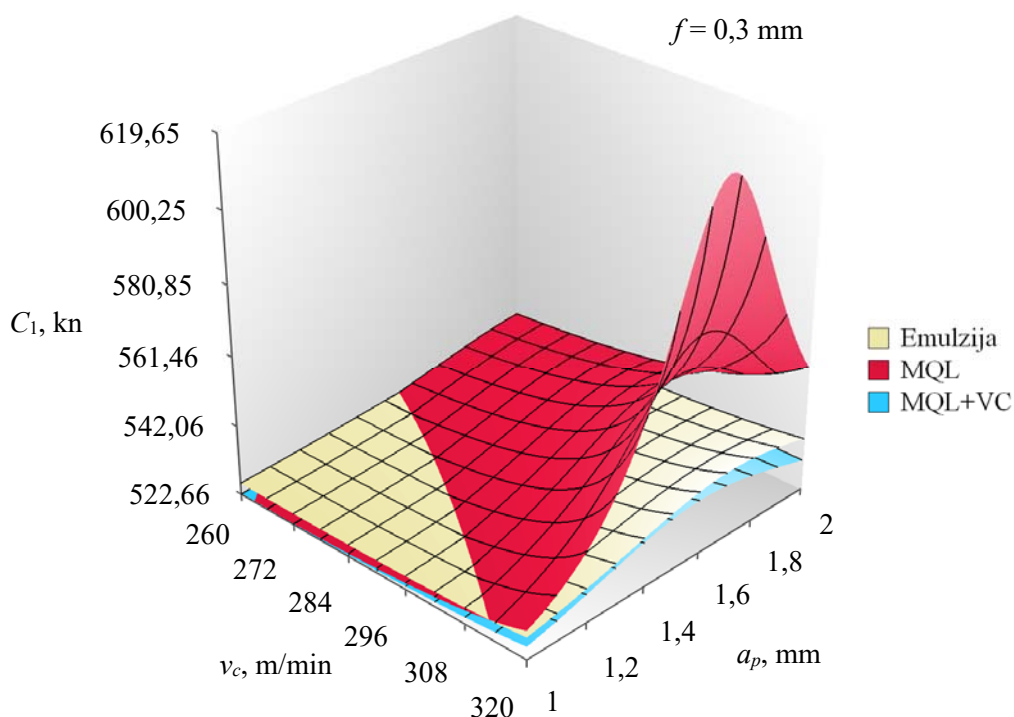
$$C_{1MQL} = (C_M + C_n + C_{ss})_{\text{fiksni}} + (C_o + C_a + C_{er} + C_{ekMQL} + C_{MQL})_{\text{varijabilni}}, \quad (6.26)$$

$$C_{1MQL+VC} = (C_M + C_n + C_{ss})_{\text{fiksni}} + (C_o + C_a + C_{er} + C_{ekMQL} + C_{ekVC} + C_{MQL} + C_{VC})_{\text{varijabilni}}. \quad (6.27)$$

## 6.2. Troškovna evaluacija obrade

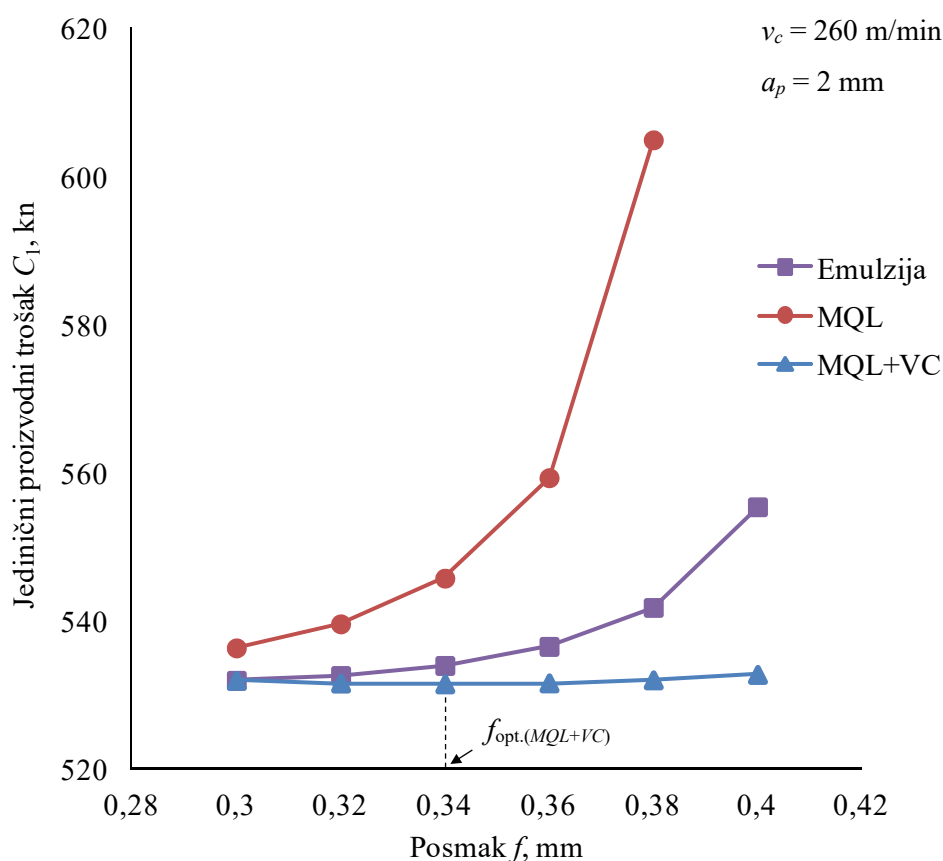
Slika 6.1 prikazuje odzivne površine jediničnog proizvodnog troška  $C_1$  pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 za različite načine hlađenja i/ili podmazivanja.

Budući da se hrapavost obrađene površine pogoršava povećavanjem posmaka, analiziran je utjecaj brzina i dubina rezanja na kretanje troška  $C_1$  uz najmanji posmak iz plana eksperimenata  $f = 0,3$  mm. U ispitivanom području parametara rezanja se najniži trošak  $C_1$  postiže MQL+VC tokarenjem, a zatim tokarenjem uz primjenu emulzije. Također, može se uočiti da je u području nižih brzina rezanja u kombinaciji s nižim dubinama rezanja MQL tokarenje troškovno povoljnije u odnosu na tokarenje uz primjenu emulzije. Međutim, izvan tog malog područja je MQL tokarenje praktično neupotrebljivo jer trošak  $C_1$  strmo raste zbog ubrzanog trošenja reznog alata i u konačnici njegovog otkazivanja. Drugim riječima, MQL tehnika ne može sama, tj. bez podrške hlađenja vrtložnom cijevi, učinkovito ohladiti rezni alat i spriječiti veliki porast temperature u zoni rezanja pri tokarenju ispitnog materijala.



**Slika 6.1.** Kretanje jediničnog proizvodnog troška  $C_1$  pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 za različite tehnike hlađenja i/ili podmazivanja. VC vrtložna cijev,  $a_p$  dubina rezanja,  $v_c$  brzina rezanja

Jedinični proizvodni trošak  $C_1$  se može odrediti i za različite posmaka kao što je prikazano na slici 6.2. Trošak  $C_1$  za tokarenje uz primjenu emulzije kao i MQL tokarenje konstantno raste s povećavanjem posmaka. I ovdje se može uočiti neadekvatnost MQL tehnike za tokarenje martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 odnosno nagli skok troška  $C_1$ . S druge strane, osim što se MQL+VC tokarenjem postiže najniži trošak  $C_1$ , isti u promatranom području posmaka vrlo malo varira: prvo blago pada do optimalnog posmaka  $f = 0,34$  mm i onda blago raste.



**Slika 6.2.** Zavisnost jediničnog proizvodnog troška od posmaka pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 za različite tehnike hlađenja i/ili podmazivanja. VC vrtložna cijev,  $a_p$  dubina rezanja,  $v_c$  brzina rezanja

Na slici 6.2 je za MQL+VC tokarenje ispitnog materijala utvrđeno postojanje optimalnih parametara rezanja s obzirom na minimalni jedinični trošak i to:  $v_c = 260$  m/min,  $f = 0,34$  mm i  $a_p = 2$  mm. U svrhu potvrđivanja zaključka o isplativosti prijelaza na održivo tokarenje, zanimljivo je izvesti troškovnu usporedbu različitih tehnika hlađenja i/ili podmazivanja s obzirom na navedenu kombinaciju parametara rezanja. Također, za određivanje postojanosti alata su korišteni izrazi (5.10 – 5.12).

Opći ulazni podaci koji su potrebni za proračun jediničnog proizvodnog troška su razvrstani u kategorije i navedeni u tablici 6.1. Potrebno je pripremiti 26 podataka iz različitih izvora. Proračun operativne satnice alatnog stroja je izveden u tablici 6.2 pri čemu je pretpostavljeno 1968 radnih sati stroja godišnje. Nadalje, u tablicama 6.3 – 6.5 su redosljedno izračunate operativne satnice za uporabu emulzije, MQL jedinice i vrtložne cijevi. Konačno, usporedba jediničnog proizvodnog troška za promatrane tehnike hlađenja i/ili podmazivanja je prikazana u tablici 6.6.

**Tablica 6.1.** Opći ulazni podaci za proračun jediničnog proizvodnog troška

<i>Podaci za operativnu satnicu alatnog stroja (osim onih ispod uz koje stoji *):</i>	
Kamatna stopa $k$ , 4 – 8 %	6
Stopa osiguranja $o$ , 1,5 – 3 %	2
Postotak troškova održavanja prema kupovnoj cijeni, 10 – 15 %	10
Postotna procjena indirektnih (općih) troškova, 100 – 300 %	200
<i>Voda:</i>	
Cijena $m^3$ vode s PDV-om, kn/ $m^3$	20,08
Fiksna mjesečna naknada za vodu s PDV-om, kn/mjeseć*	19,19
<i>Struja:</i>	
Cijena kWh s PDV-om $c_{kWh}$ , kn/kWh	0,58
Cijena radne snage s PDV-om, kn/kW*	14,50
Fiksna mjesečna naknada za struju s PDV-om, kn/mjeseć*	21,75
<i>Zrak:</i>	
Protok zraka kroz vrtložnu cijev $Q_{VC}$ , l/min	708
Dobava zraka kompresorom $Q_{dk}$ , l/min	1210
<i>Materijal i geometrija obratka:</i>	
Specifična sila rezanja za materijal $k_s$ , N/ $mm^2$	2850
Promjer obratka na mjestu rezanja $D$ , mm	80
Duljina za obradu $l_p$ , mm	459
<i>Snaga:</i>	
Instalirana snaga alatnog stroja $P_s$ , kW*	30,4
Stupanj iskoristivosti alatnog stroja $\eta_s$ , 0,7 – 0,85	0,8
Snaga alatnog stroja u pripravnosti $P_{sp}$ , kW	0,5
Snaga pumpe za emulziju $P_p$ , kW*	1
Snaga kompresora za zrak $P_k$ , kW*	7,5
<i>Alat:</i>	
Broj prolaza alata $i_p$	1
Zbrojeni ulazni i izlazni hod alata $l_u + l_i$ , mm	5
Vrijeme zamjene rezne oštrice $t_{a1}$ , min/oštrica	0,5
Nabavna cijena držača rezne pločice $C_d$ , kn	930,99
Broj pritezanja reznih oštrica u radnom vijeku držača $N_{pl}$	400
Nabavna cijena rezne pločice $C_{pl}$ , kn	142,99
Broj reznih oštrica na pločici $z_{pl}$	4

**Tablica 6.2.** Operativna satnica alatnog stroja

Nabavna cijena alatnog stroja $C_{AS}$ , kn	762.817,85
Broj godina otpisa alatnog stroja $n_g$ , godina	10
Godišnji otpis (amortizacija) $OT$ , kn	76.281,79
Godišnje kamate (anuitet) $K$ , kn	103.642,50
Godišnje osiguranje $OS$ , kn	8.391,00
Godišnje održavanje $OD$ , kn	76.281,79
Godišnji troškovi radnog prostora $TRP$ , kn	1.055,33
Godišnji bruto osobni dohodak operatera $BD$ , kn	125.307,24
Godišnji indirektni (opći) troškovi $IT$ , kn	250.614,48
Godišnji operativni trošak alatnog stroja $C_{nsg}$ , kn	641.574,12
Godišnji fond radnih sati $FRS$ , h	1968
<i>Operativna satnica alatnog stroja <math>C_{ns}</math>, kn/h</i>	326,00

**Tablica 6.3.** Operativna satnica emulzije

Godišnja potrošnja koncentrata, l	10
Nabavna cijena koncentrata, kn/l	49,90
Postotni udio koncentrata u emulziji, %	5
Godišnja potrošnja vode, l	190
Nabavna cijena vode, kn/l	0,02
Godišnja potrošnja emulzije, l	200
Nabavna cijena emulzije, kn/l	2,51
Cijena zbrinjavanja emulzije, kn/l	3,51
Godišnji trošak koncentrata, kn	499,00
Godišnji trošak vode, kn	3,82
Godišnji trošak zbrinjavanja emulzije, kn	702,00
Godišnji operativni trošak uporabe emulzije, kn	1.204,82
Godišnji fond radnih sati $FRS$ , h	1968
<i>Operativna satnica emulzije <math>C_{nE}</math>, kn/h</i>	0,61



**Tablica 6.4.** Operativna satnica MQL jedinice

Nabavna cijena MQL jedinice, kn	6.035,63
Nabavna cijena dijelova za povezivanje, kn	4.321,27
Nabavna cijena kompresora, kn (*pogon već posjeduje kompresor za zrak)	0,00*
Broj godina otpisa	5
Godišnji otpis, kn	2.071,38
Godišnje održavanje, kn	1.035,69
Godišnja potrošnja ulja, l	50
Nabavna cijena ulja, kn/l	113,62
Godišnji trošak ulja, kn	5.681,00
Godišnji operativni trošak uporabe MQL jedinice, kn	8.788,07
Godišnji fond radnih sati <i>FRS</i> , h	1968
<i>Operativna satnica MQL jedinice, <math>C_{nMQL}</math>, kn/h</i>	4,47

**Tablica 6.5.** Operativna satnica vrtložne cijevi i dodatni podaci

Nabavna cijena vrtložne cijevi, kn	4.345,65
Nabavna cijena dijelova za povezivanje, kn	1.212,65
Nabavna cijena kompresora, kn (*pogon već posjeduje kompresor za zrak)	0,00*
Broj godina otpisa	5
Godišnji otpis, kn	1.111,66
Godišnje održavanje, kn	555,83
Godišnji operativni trošak uporabe vrtložne cijevi, kn	1.667,49
Godišnji fond radnih sati <i>FRS</i> , h	1968
<i>Operativna satnica vrtložne cijevi, <math>C_{nVC}</math>, kn/h</i>	0,85
<i>Dodatni podaci:</i>	
Trošak energije kompresora za zrak $C_{ekVC}$ , kn/komad	0,06
Trošak uporabe vrtložne cijevi $C_{VC}$ , kn/komad	0,11

**Tablica 6.6.** Jedinični proizvodni trošak za različite tehnike hlađenja i/ili podmazivanja

Kategorija	Emulzija	MQL	MQL+VC
Postojanost rezne oštrice alata $T$ , min/oštrica	4,03	1,71	3,15
Komadno neproizvodno vrijeme $t_n$ , min/komad (*izmjereno)	4,50*	3,50*	3,50*
Glavno strojno vrijeme $t_g$ , min/komad	1,32	1,32	1,32
Komadno alatno vrijeme $t_a$ , min/komad	0,16	0,39	0,21
Jedinično proizvodno vrijeme $t_1$ , min/komad	5,98	5,20	5,03
Proizvodnost $Q$ , komad/min	0,17	0,19	0,20
Broj obrađenih komada po reznoj oštrici $z_T$ , komad/oštrica	3,06	1,30	2,39
Trošak materijala $C_M$ , kn/komad	487,78	487,78	487,78
Trošak komadnog neproizvodnog vremena $C_n$ , kn/komad	24,45	19,02	19,02
Trošak obrade $C_o$ , kn/komad	7,17	7,17	7,17
Trošak alata $C_a$ , kn/komad	13,34	31,44	17,10
Trošak energije alatnog stroja $C_{er}$ , kn/komad	0,16	0,15	0,15
Trošak energije pumpe za emulziju $C_{ep}$ , kn/komad	0,01	-	-
Trošak energije kompresora za zrak $C_{ekMQL}$ , kn/komad	-	0,01	-
Trošak energije kompresora za zrak $C_{ekMQL+VC}$ , kn/komad	-	-	0,07
Trošak uporabe emulzije $C_E$ , kn/komad	0,01	-	-
Trošak uporabe MQL jedinice $C_{MQL}$ , kn/komad	-	0,1	-
Trošak uporabe MQL + vrtložna cijev, $C_{MQL+VC}$ , kn/komad	-	-	0,12
Trošak čišćenja obratka od emulzije $C_{co}$ , kn/komad	0,65	-	-
Trošak čišćenja strugotine od emulzije $C_{cs}$ , kn/komad	0,30	-	-
Trošak sabijanja strugotine $C_{ss}$ , kn/komad	0,03	0,03	0,03
<i>Jedinični proizvodni trošak <math>C_1</math>, kn/komad</i>	533,90	545,70	531,44

Komadno neproizvodno vrijeme u tablici 6.6 je direktno mjereno. Ono je nešto manje kod MQL i MQL+VC tokarenja u odnosu na tokarenje uz primjenu emulzije budući da po završetku obrade nije potrebno brisanje obratka prije njegovog skidanja kao ni brisanje dijelova alatnog stroja. Osim toga, jednaka količina proizvedene strugotine rezultira jednakim troškovima vezanim za njezino sabijanje.

S obzirom na zaštitu okoliša i zdravlja radnika, poželjno je potpuno uklanjanje tekućina za obradu metala na osnovi mineralnih ulja. Osim toga, dobro došla je i ekonomska korist. Iz tablice 6.6 slijedi da postojanost reznog alata i način hlađenja i/ili podmazivanja imaju najveći

utjecaj na jedinični proizvodni trošak. Nadalje, u promatranim uvjetima se MQL+VC tokarenjem postiže 2,46 kuna manji jedinični proizvodni trošak u usporedbi s tokarenjem uz primjenu emulzije. Ova se ušteda ne čini značajnom. S druge strane, proračun je izveden za jedan obradak i na razini jednog alatnog stroja za kojeg godišnja potrošnja emulzije iznosi 200 litara. Prevedeno samo u troškove nabave i zbrinjavanja to je ekvivalent od 1.204,82 kune na godišnjoj razini. U malom proizvodnom pogonu s pet alatnih strojeva i za seriju od deset tisuća obradaka to je onda ušteda već od 30.624,10 kuna. Također, u promatranim uvjetima godišnji trošak ekološkog ulja za MQL iznosi 5.681,00 kunu. Odbivši 1.204,82 kune godišnjeg troška emulzije, razliku od 4.476,18 kuna pokriva serija od 1820 obradaka.

Za ispitivanu kombinaciju parametara rezanja, vrijeme zamjene rezne oštrice ima veći doprinos jediničnom proizvodnom trošku kod MQL+VC tokarenja nego kod tokarenja uz primjenu emulzije. Stvarno vrijeme za zamjenu rezne oštrice nije veće, ali je zbog njezinog bržeg trošenja onda broj promjena veći pa je tako veći i trošak alata. Međutim, uporaba kvalitetnijeg materijala rezne pločice može jednostavno riješiti ovaj problem i tako dodatno smanjiti jedinični proizvodni trošak.

U tablici 6.7 je analiziran doprinos medija za hlađenje i/ili podmazivanje jediničnom proizvodnom trošku. Treba istaknuti 7 puta manji trošak distribucije emulzije u odnosu na trošak distribucije komprimiranog zraka u slučaju MQL+VC tokarenja, ali je ono u konačnici ipak isplativije.

**Tablica 6.7.** Trošak medija za hlađenje i/ili podmazivanje

Kategorija	Emulzija	MQL	MQL+VC
Trošak nabave, kn/komad	0,01	0,09	0,10
Trošak održavanja, kn/komad	-	0,01	0,02
Trošak distribucije, kn/komad	0,01	0,01	0,07
Trošak zbrinjavanja, kn/komad	0,01	-	-
Trošak čišćenja obratka, kn/komad	0,65	-	-
Trošak čišćenja strugotine, kn/komad	0,30	-	-
Trošak sabijanja strugotine, kn/komad	0,03	0,03	0,03
<i>Trošak medija za hlađenje i/ili podmazivanje, kn/komad</i>	1,01	0,14	0,22

## 7. ZAKLJUČAK

U svijetu je prepoznata potreba za postizanjem ukupne održivosti industrijskih aktivnosti. Osobito proizvodni sektor koji je srž industrijske ekonomije mora biti održiv kako bi se sačuvao visoki životni standard koji su postigla industrijalizirana društva i kako bi se omogućilo društvima u razvoju da održivo postignu isti životni standard.

Strojna obrada metala rezanjem je jedan od najvažnijih proizvodnih procesa, a procjenjuje se da u razvijenom svijetu doprinosi približno 5 % BDP-a. Neizravni utjecaj ove obrade, zbog utjecaja na integritet obrađene površine, a samim tim i na vijek proizvoda, još je veći.

Za postizanje održive strojne obrade metala rezanjem treba poboljšati uvjete njezinog sadašnjeg odvijanja. U održivom procesu obrade postojanost reznog alata, produktivnost i učinkovito korištenje resursa će se povećati, dok će se proizvodni trošak, energija (snaga) potrebna za rezanje i štetni učinci tekućina za hlađenje i/ili podmazivanje smanjiti.

Konvencionalne tekućine za obradu metala na osnovi mineralnih ulja su štetne za okoliš i zdravlje ljudi te unose velike dodatne troškove u proizvodnju. Zbog toga su i prepoznate kao glavni neodrživi element procesa strojne obrade pa se sve više razvijaju alternativne tehnike hlađenja i/ili podmazivanja.

S obzirom na hlađenje i podmazivanje, jedan od razvojnih pravaca predstavlja strategija kombiniranja različitih alternativnih tehnika koje se međusobno mogu nadopunjavati prevladavajući ograničenja svake. Ovdje je istražena primjena MQL tehnike podmazivanja u kombinaciji s hlađenjem vrtložnom cijevi kao mogućeg ekološki prihvatljivog rješenja za tokarenje martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13. Cilj je bio utvrditi tehnološku i ekonomsku održivost predloženog rješenja u usporedbi s konvencionalnom primjenom emulzije za obradu metala. Sukladno navedenom, testirana je radna hipoteza da uvođenje MQL tehnike podmazivanja kombinirane s hlađenjem vrtložnom cijevi u postupak tokarenja martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 eliminira ekološko, zdravstveno i ekonomsko opterećenje svojstveno primjeni emulzije za obradu metala i pridonosi održivosti postupka tokarenja bez žrtvovanja njegovog učinka.

Eksperimentalnim istraživanjem su dobiveni rezultati hrapavosti obrađene površine i trošenja reznog alata pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 u uvjetima primjene emulzije za obradu metala te MQL tehnike bez i uz podršku hlađenja vrtložnom cijevi. Usporedivost rezultata istraživanja je omogućena uporabom identičnih elemenata obradnog sustava i parametara rezanja (brzina, posmak i dubina). Izvedeno je dvadeset i sedam osnovnih eksperimenata planiranih prema Taguchijevoj metodi ortogonalnih planova  $L_{27}(3^{13})$  i jedan eksperiment potvrde s dva ponavljanja. Zbog izbjegavanja potencijalnih pogrešaka uslijed operacije ponovnog stezanja obratka, parametri hrapavosti obrađene površine su mjereni na obratku izravno u tokarilici. Polinomski matematički modeli za opisivanje zavisnosti parametara hrapavosti od parametara rezanja s obzirom na način hlađenja i/ili podmazivanja su određeni višestrukom linearnom regresijskom analizom. Postojanost reznog alata je procijenjena prema normi ISO 3685:1993(E) iz krivulja trošenja reznog alata za kriterij istrošenosti njegove stražnje površine od 0,3 mm. Proširene Taylorove jednadžbe postojanosti reznog alata s obzirom na način hlađenja i/ili podmazivanja su također određene višestrukom linearnom regresijskom analizom. Statistička analiza rezultata eksperimenata prema Taguchijevoj metodi kao i ovdje predloženoj Taguchijevoj metodi u kombinaciji s entropijom ponderiranom sivom relacijskom analizom nazvanom TEGRA te dobiveni regresijski modeli hrapavosti i postojanosti reznog alata, omogućili su izvođenje zaključaka o tehnološkoj učinkovitosti istraživanih načina hlađenja i/ili podmazivanja. Troškovna evaluacija je omogućila izvođenje zaključaka o ekonomskoj opravdanosti uvođenja MQL tehnike podmazivanja kombinirane s hlađenjem vrtložnom cijevi u postupak tokarenja martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 umjesto primjene emulzije za obradu metala.

U nastavku su sažeti rezultati istraživanja:

- Postoji jasan dokaz o utjecaju načina hlađenja i/ili podmazivanja na hrapavost obrađene površine iskazanu srednjim aritmetičkim odstupanjem profila  $Ra$ . Posmak  $f$ , način hlađenja i/ili podmazivanja, dubina rezanja  $a_p$  i brzina rezanja  $v_c$  redosljedno utječu na smanjenje  $Ra$  s 53,66 %, 20,22 %, 5,3 % i 0,16 %. Ovime je potvrđeno da su posmak  $i$ , što je posebno važno za ovo istraživanje, način hlađenja i/ili podmazivanja dvije daleko najutjecajnije varijable na  $Ra$ . Također, varijabla  $v_c$  te interakcije  $v_c f$ ,  $v_c a_p$  i  $f a_p$  nemaju statističku i fizikalnu značajnost za  $Ra$  na razini pouzdanosti od 95 %.

- Najmanja vrijednost parametra hrapavosti  $Ra$  pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 se postiže uz primjenu MQL tehnike podmazivanja podržane hlađenjem vrtložnom cijevi, zatim slijedi konvencionalna MQL tehnika, dok se najveća vrijednost  $Ra$  postiže u uvjetima hlađenja emulzijom. Prema tome, alternativne tehnike hlađenja i/ili podmazivanja ovdje imaju prednost u usporedbi s primjenom emulzije.
- Postoji jasan dokaz o utjecaju načina hlađenja i/ili podmazivanja na hrapavost obrađene površine iskazanu srednjom visinom neravnina  $Rz$ . Posmak  $f$ , način hlađenja i/ili podmazivanja, dubina rezanja  $a_p$  i brzina rezanja  $v_c$  redosljedno utječu na smanjenje  $Rz$  s 47,56 %, 16,36 %, 10,05 % i 0,5 %. Ovime je još jednom potvrđeno da su posmak i način hlađenja i/ili podmazivanja najutjecajnije varijable na hrapavost obrađene površine. Također, varijabla  $v_c$  te interakcije  $v_c f$ ,  $v_c a_p$  i  $f a_p$  nemaju statističku i fizikalnu značajnost za  $Rz$  na razini pouzdanosti od 95 %.
- Primjena alternativnih tehnika hlađenja i/ili podmazivanja ima pozitivan učinak na hrapavost obrađene površine pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13. MQL tehnika podmazivanja podržana hlađenjem vrtložnom cijevi kao i konvencionalna MQL tehnika omogućavaju postizanje niže vrijednosti parametra hrapavosti  $Rz$  od one koja se s istim parametrima rezanja postiže u uvjetima hlađenja emulzijom.
- Utjecaji brzine rezanja  $v_c$ , dubine rezanja  $a_p$ , posmaka  $f$  i načina hlađenja i/ili podmazivanja na povećanje postojanosti reznog alata  $T$  su redosljedno 31,13 %, 30,76 %, 10,34 % i 6,06 %. Također, značajna je i interakcija  $v_c a_p$  (12,07 %) dok interakcije  $v_c f$  i  $f a_p$  nemaju statističku i fizikalnu značajnost za  $T$  na razini pouzdanosti od 95 %.
- Najduža postojanost reznog alata  $T$  se postiže u uvjetima hlađenja emulzijom. Međutim, prosječni odziv  $T$  za emulziju je samo 12,5 % veći od onog za MQL tehniku podmazivanja podržanu hlađenjem vrtložnom cijevi. Budući da način hlađenja i/ili podmazivanja ima najmanji utjecaj na  $T$  pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13, uvođenje MQL tehnike podmazivanja podržane

hlađenjem vrtložnom cijevi umjesto primjene emulzije za obradu metala ne bi značajno utjecalo na smanjivanje postojanosti reznog alata.

- Na najmanjem posmaku se najduža postojanost reznog alata postiže u uvjetima hlađenja emulzijom za obradu metala. Međutim, kako se posmak povećava, MQL tehnika podmazivanja podržana hlađenjem vrtložnom cijevi progresivno preuzima primat i na najvećem posmaku daje najdužu postojanost reznog alata u usporedbi s ostalim načinima hlađenja i/ili podmazivanja. Konvencionalna MQL tehnika uvijek daje najkraću postojanost reznog alata. S obzirom na utvrđeno, MQL tehnika podmazivanja podržana hlađenjem vrtložnom cijevi se može preporučiti za tokarenje martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 jer ima pozitivan utjecaj na postojanost reznog alata.
- Kod MQL tehnike podmazivanja podržane hlađenjem vrtložnom cijevi je postignuta prosječna temperatura na mjestu zahvata reznog alata iznosila 52,8 °C. Kod konvencionalne MQL tehnike prosječna temperatura je bila veća od 90,9 °C. Dakle, osim što je osigurano odvođenje strugotine iz zone rezanja, uporabom vrtložne cijevi je postignut dodatni pad temperature za -38,1 °C.
- TEGRA je pokazala da posmak  $f$  ima najveći utjecaj (35,98 %) na istovremeno smanjenje hrapavosti obrađene površine (tj. parametara  $Ra$  i  $Rz$ ), produženje postojanosti reznog alata  $T$  i povećanje brzine skidanja materijala  $V_s$ . Također je ustanovljeno da je način hlađenja i/ili podmazivanja vrlo bitan za optimalan učinak tokarenja martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 budući da je druga varijabla po snazi utjecaja (19,79 %) što je vrlo važna informacija s aspekta održivosti obrade. Utjecaj dubine rezanja  $a_p$  i brzine rezanja  $v_c$  je puno manji. Osim toga, varijable  $v_c$  i  $a_p$  te interakcije  $v_c f$ ,  $v_c a_p$  i  $f a_p$  nisu statistički značajne na razini pouzdanosti od 95 %.
- U ispitivanom području parametara rezanja se najniži jedinični proizvodni trošak  $C_1$  postiže tokarenjem uz primjenu MQL tehnike podmazivanja podržane hlađenjem vrtložnom cijevi, a zatim tokarenjem uz primjenu emulzije. Također, u području nižih brzina rezanja u kombinaciji s nižim dubinama rezanja je i tokarenje uz primjenu samostalne MQL tehnike podmazivanja troškovno povoljnije u odnosu na tokarenje

uz primjenu emulzije. Međutim, izvan tog malog područja je samostalna MQL tehnika praktično neupotrebljiva jer trošak  $C_1$  strmo raste zbog ubrzanog trošenja reznog alata i u konačnici njegovog otkazivanja. Drugim riječima, MQL tehnika podmazivanja ne može sama, tj. bez podrške hlađenja vrtložnom cijevi, učinkovito ohladiti rezni alat i spriječiti veliki porast temperature u zoni rezanja pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13.

- Kod određivanja zavisnosti jediničnog proizvodnog troška  $C_1$  od posmaka  $f$  pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 je samo za primjenu MQL tehnike podmazivanja podržane hlađenjem vrtložnom cijevi utvrđeno postojanje optimalnih parametara rezanja i to:  $v_c = 260$  m/min,  $f = 0,34$  mm i  $a_p = 2$  mm. Za tokarenje uz primjenu emulzije odnosno samostalne MQL tehnike podmazivanja trošak  $C_1$  konstantno raste s povećavanjem posmaka  $f$ .
- Općenito, MQL tehnika podmazivanja podržana hlađenjem vrtložnom cijevi se pokazala kao najbolji izbor. Stoga se uporaba konvencionalnih tekućina za obradu metala (emulzija) pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 može isključiti. Prijelaz s emulzija na osnovi mineralnih ulja na kombinaciju MQL-a i hlađenja vrtložnom cijevi je dobar korak prema održivoj strojnoj obradi koji rezultira značajnim smanjenjem ekološkog opterećenja i opasnosti za zdravlje ljudi, pri čemu može ponuditi i značajnu ekonomsku korist.

Iz opisanih rezultata istraživanja se može zaključiti da je postavljena radna hipoteza potvrđena i da se MQL tehnika podmazivanja podržana hlađenjem vrtložnom cijevi može preporučiti za tokarenje martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 s obzirom na sva tri segmenta održivog razvoja – ekološki, sociološki i ekonomski.

Na temelju izloženog proizlaze sljedeći znanstveni doprinosi:

- Provedba eksperimenata je omogućila razmatranje nedovoljno istražene MQL tehnike podmazivanja podržane hlađenjem vrtložnom cijevi pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13. Na temelju analize utjecaja na obradivost su definirani matematički modeli te utvrđene prednosti i moguća ograničenja.



- Istraživanje temeljeno na komparativnom pristupu je omogućilo valorizaciju učinkovitosti i održivosti MQL tehnike podmazivanja podržane hlađenjem vrtložnom cijevi u odnosu na hlađenje emulzijom na osnovi mineralnog ulja pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13.
- Rezultati usporedbe utjecaja MQL tehnike podmazivanja podržane hlađenjem vrtložnom cijevi, kao tehnologije u razvoju, i hlađenja emulzijom na tokarenje martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 su pružili saznanja koja do sada nisu zabilježena u literaturi.
- Detaljna troškovna evaluacija popraćena ekološkim i tehnološkim razmatranjima je omogućila provođenje višekriterijskog optimiranja koje je potvrdilo održivost tokarenja martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 u uvjetima MQL tehnike podmazivanja podržane hlađenjem vrtložnom cijevi, što predstavlja poseban doprinos u području strojne obrade nehrđajućih čelika.

Rezultati provedenih istraživanja bi svoju primjenu trebali pronaći u:

- proizvodnoj praksi što im daje osobitu vrijednost,
- području planiranja i optimiranja održivog procesa obrade,
- istraživanjima i razvoju održivog procesa obrade.

Prijedlozi za buduća istraživanja:

- U istraživanju je utvrđen veći utjecaj dubine rezanja od utjecaja posmaka na postojanost reznog alata što nije uobičajeno. Zbog toga je izveden novi niz petnaest eksperimenata trošenja reznog alata planiranih prema Box-Behnkenovom planu. Analiza rezultata postojanosti reznog alata (ovdje nije priložena) je ponovo pokazala veći utjecaj dubine rezanja od utjecaja posmaka. Ova pojava zahtjeva dublju analizu te se predlaže za buduća istraživanja.

- Buduća istraživanja primjene MQL tehnike podmazivanja podržane hlađenjem vrtložnom cijevi bi se također mogla proširiti i na druge postupke strojne obrade (npr. glodanje) kao i na ostale vrste nehrđajućih čelika (npr. austenitne).
- TEGRA metoda pronalazi optimalnu kombinaciju promatranih razina parametara rezanja na temelju smanjenog broja potrebnih eksperimenata. S obzirom da optimizacijske probleme povezane sa strojnom obradom metala rezanjem karakteriziraju kontinuirane diskretne varijable, za buduća se istraživanja može razmotriti mogućnost primjene netradicionalnih metoda optimiranja kao što su genetski algoritmi (engl. *Genetic Algorithm* – GA), simulirano žarenje (engl. *Simulated Annealing* – SA), optimizacija rojevima čestica (engl. *Particle Swarm Optimization* – PSO), optimizacija kolonijom mrava (engl. *Ant Colony Optimization* – ACO) i sl.

## LITERATURA

- [1] A/RES/42/187: *Report of the World Commission on Environment and Development*. United Nations General Assembly on 11 December 1987.
- [2] A/RES/60/1: *2005 World Summit Outcome*. United Nations General Assembly on 16 September 2005.
- [3] Abdelrazek, A.H., Choudhury, I.A., Nukman, Y., Kazi, S.N.: *Metal cutting lubricants and cutting tools: a review on the performance improvement and sustainability assessment*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 106, pp. 4221-4245, 2020.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-019-04890-w>
- [4] Ahamed Meeran, R., Chandrasekaran, K., Thirumalairaj, V., Radhakrishnan, R.: *Performance of tool coated with B-TiC during turning stainless steel*. Global Journal of Engineering, Design & Technology 3 (6), pp. 1-4, 2014.
- [5] Astakhov, V.P.: *Ecological machining: near-dry machining*. Machining: Fundamentals and Recent Advances, Davim, J.P. (ur.), Springer-Verlag London Limited, 2008.
- [6] Atlas Steels. *Machining of Stainless Steels*.  
<http://www.atlassteels.com.au/documents/> (pristupljeno 17.11.2019.)
- [7] Attanasio, A., Gelfi, M., Giardini, C., Remino, C.: *Minimal quantity lubrication in turning: effect on tool wear*, Wear 260 (3), pp. 333-338, 2005.  
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.04.024>
- [8] Benedicto, E., Carou, D., Rubio, E.M.: *Technical, economic and environmental review of the lubrication/cooling systems used in machining processes*. Procedia Engineering 184, pp. 99-116, 2017.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.075>
- [9] BGI/GUV-I 718 E: *Minimum quantity lubrication for machining operations*. DGUV, Berlin, 2010.
- [10] Biček, M., Dumont, F., Courbon, C., Pušavec, F., Rech, J., Kopač, J.: *Cryogenic machining as an alternative turning process of normalized and hardened AISI 52100 bearing steel*. Journal of Materials Processing Technology 212 (12), pp. 2609-2618, 2012.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.07.022>
- [11] Boniardi, M.V., Casaroli, A.: *Stainless steels*. Lucefin S.p.A., Esine (Brescia), Italy, 2014.

- [12] Boothroyd, G., Knight, W.A.: *Fundamentals of machining and machine tools (2<sup>nd</sup> edition)*. Marcel Dekker, Inc., New York, USA, 1989.
- [13] Boswell, B.: *Use of air-cooling and its effectiveness in dry machining processes*. PhD Thesis, Curtin University, Australia, 2008.
- [14] Boswell, B., Voges, E.: *The effect of combined cold air and minimum liquid cooling on end milling*. Proceedings of 2011 International Conference on Mechanical, Industrial, and Manufacturing Engineering (MIME2011), Information Engineering Research Institute, Melbourne, Australia, pp. 54-57, 2011.  
<http://hdl.handle.net/20.500.11937/25878>
- [15] Boswell, B., Islam, M.N., Davies, I.J., Ginting, Y.R., Ong, A.K.: *A review identifying the effectiveness of minimum quantity lubrication (MQL) during conventional machining*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 92 (1-4), pp. 321-340, 2017.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-017-0142-3>
- [16] Brinkmeier, E., Brockoff, T., Walter, A.: *Minimum quantity lubrication in grinding*. Technical Paper – Society of Manufacturing Engineers 97 (230), pp. X1-14, 1997.
- [17] Brockoff, T., Walter, A.: *Fluid minimization in cutting and grinding*. Abrasives 10, pp. 38-42, 1998.
- [18] BSSA: *General principles of machining stainless steels*.  
<http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=192> (pristupljeno 17.11.2019.)
- [19] Burton, C.M., Crook, B., Scaife, H., Evans, G.S., Barber, C.M.: *Systematic review of respiratory outbreaks associated with exposure to water-based metalworking fluids*. The Annals of Occupational Hygiene 56 (4), pp. 374-388, 2012.  
<https://doi.org/10.1093/annhyg/mer121>
- [20] Byrne, G., Dornfeld, D., Denkena, B.: *Advancing cutting technology*. CIRP Annals – Manufacturing Technology 52 (2), pp. 483-507, 2003.
- [21] Calvert, M., Ward, E., Schnorr, T.M., Fine, L.J.: *Cancer risks among workers exposed to metalworking fluids: a systematic review*. American Journal of Industrial Medicine 33 (3), pp. 282-292, 1998.  
[https://doi.org/10.1002/\(sici\)1097-0274\(199803\)33:3<282::aid-ajim10>3.0.co;2-w](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-0274(199803)33:3<282::aid-ajim10>3.0.co;2-w)
- [22] Cetin, M.H., Ozcelik, B., Kuram, E., Demirbas, E.: *Evaluation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure and cutting parameters in turning of AISI 304L by Taguchi method*. Journal of Cleaner Production 19 (17-18), pp 2049-2056, 2011.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.013>

- [23] Çetin, S., Kývák, T.: *Optimization of the machining parameters for the turning of 15-5 PH stainless steels using the Taguchi method*. *Materiali in tehnologije / Materials and technology* 51 (1), pp. 133–140, 2017.  
<https://doi.org/10.17222/mit.2016.007>
- [24] Chandrasekaran, K., Marimuthu, P., Raja, K., Manimaran, A.: *Machinability study on AISI 410 with different layered inserts in CNC turning during dry conditions*. *Indian Journal of Engineering & Material Sciences* 20 (5), pp. 398-404, 2013.
- [25] Childs, T., Maekawa, K., Obikawa, T., Yamane, Y.: *Metal machining: theory and applications*. Arnold, London, GB, 2000.
- [26] Çiçek, A., Kívák, T., Samtaş, G.: *Application of Taguchi method for surface roughness and roundness error in drilling of AISI 316 stainless steel*. *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering* 58 (3), pp. 165-174, 2012.  
<https://doi.org/10.5545/sv-jme.2011.167>
- [27] Cukor, G., Šterpin-Valić, G., Kostadin, T., Fabić, M.: *Sustainable turning of martensitic stainless steel*. *Transactions of FAMENA* 43 (3), pp. 1-12, 2019.  
<https://doi.org/10.21278/TOF.43301>
- [28] Davim, J.P.: *Sustainable Manufacturing*. London; Hoboken, ISTE Ltd; John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [29] Davis, B., Schueller, J.K., Huang, Y.: *Study of ionic liquid as effective additive for minimum quantity lubrication during titanium machining*. *Manufacturing Letters* 5, pp. 1–6, 2015.
- [30] De Vera, G.: *The Ranque-Hilsch Vortex Tube*. 2010.  
[https://www.academia.edu/1646175/The\\_Ranque-Hilsch\\_Vortex\\_Tube](https://www.academia.edu/1646175/The_Ranque-Hilsch_Vortex_Tube)  
(pristupljeno 17.11.2019.)
- [31] De Vos, P., Ståhl, J.-E.: *Applied metal cutting physics – best practices*. SECO TOOLS AB, Fagersta, Sweden, 2016.
- [32] Debnath S., Reddy M.M., Pramanik A.: *Dry and near-dry machining techniques for green manufacturing*. *Innovations in Manufacturing for Sustainability. Materials Forming, Machining and Tribology*, Gupta, K. (ur.), Springer, Cham, pp. 1-27, 2019.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-03276-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-03276-0_1)
- [33] Deng, J.L.: *Control problems of grey systems*. *Systems and Control Letters* 1 (5), pp. 288-294, 1982.
- [34] Deng, J.L.: *Introduction to grey system theory*. *The Journal of Grey System* 1 (1), pp. 1-24, 1989.

- [35] DIN 51385:2013: *Lubricants – Processing fluids or forming and machining of materials – Terms*.
- [36] Direktiva 2008/98/EZ Europskog parlamenta i Vijeća od 19. studenoga 2008. o otpadu i stavljanju izvan snage određenih direktiva.  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&rid=1>  
(pristupljeno: 20.11.2019.)
- [37] Dixit, U.S., Sarma, D.K., Davim, J.P.: *Environmentally friendly machining*. Springer, Boston, USA, 2012.  
<https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2308-9>
- [38] Dureja, J.S., Singh, R., Singh, T., Singh, P., Dogra, M., Bhatti, M.S.: *Performance evaluation of coated carbide tool in machining of stainless steel (AISI 202) under minimum quantity lubrication (MQL)*. International journal of precision engineering and manufacturing-green technology 2 (2), pp. 123-129, 2015.  
<https://doi.org/10.1007/s40684-015-0016-9>
- [39] Ekinović, S., Prčanović, H., Begović, E.: *Investigation of influence of MQL machining parameters on cutting forces during MQL turning of carbon steel St52-3*. Procedia Engineering 132, pp. 608-614, 2015.
- [40] Elmunafi, M.H.S., Kurniawan, D., Noordin N.Y.: *Use of castor oil as cutting fluid in machining of hardened stainless steel with minimum quantity of lubricant*. 12<sup>th</sup> Global Conference on Sustainable Manufacturing, Procedia CIRP 26, pp. 408-411, 2015.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.001>
- [41] García-Martínez, E., Miguel, V., Martínez-Martínez, A., Manjabacas, M.C., Coello, J.: *Sustainable lubrication methods for the machining of titanium alloys: an overview*. Materials 12, pp. 1-22, 2019.  
<https://doi.org/10.3390/ma12233852>
- [42] Godderis, L., Deschuyffeleer, T., Roelandt, H., Veulemans, H., Moens, G.: *Exposure to metalworking fluids and respiratory and dermatological complaints in a secondary aluminium plant*. International Archives of Occupational and Environmental Health 81 (7), pp. 845-853, 2008.  
<https://doi.org/10.1007/s00420-007-0275-z>
- [43] Goindi, G.S., Chavan, S.N., Mandal, D., Sarkar, P., Jayal, A.D.: *Investigation of ionic liquids as novel metalworking fluids during minimum quantity lubrication machining of a plain carbon steel*. Procedia CIRP 26, pp. 341–345, 2015.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.09.002>

- [44] Grzesik, W.: *Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications (2<sup>nd</sup> edition)*. Elsevier B.V., 2017.
- [45] Hadad, M., Hadi, M.: *An investigation on surface grinding of hardened stainless steel S34700 and aluminum alloy AA6061 using minimum quantity of lubrication (MQL) technique*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 68 (9-12), pp. 2145–2158, 2013.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-013-4830-3>
- [46] Health and Safety Executive: *Working safely with metalworking fluids: a guide for employees*.  
[www.hse.gov.uk/pubns/indg365.pdf](http://www.hse.gov.uk/pubns/indg365.pdf) (pristupljeno 5. 11. 2019.)
- [47] Hong, S.Y., Zhao, Z.: *Thermal aspects, material considerations and cooling strategies in cryogenic machining*. Clean Technologies and Environmental Policy 1 (2), pp. 107-116, 1999.
- [48] HRN EN ISO 4287:2008/A1:2010: *Geometrijske specifikacije proizvoda (GSP) -- Tekstura površine: Metoda snimanja profila -- Nazivlje, definicije i parametri teksture površine – Amandman 1: Broj izbrojenih izbočina (ISO 4287:1997/Amd 1:2009; EN ISO 4287:1998/A1:2009)*. Hrvatski normativni dokument.
- [49] Huang, S., Lv, T., Wang, M., Xu, X.: *Effects of machining and oil mist parameters on electrostatic minimum quantity lubrication – EMQL turning process*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology 5 (2), pp. 317-326, 2018.  
<https://doi.org/10.1007/s40684-018-0034-5>
- [50] Islam, M.N., Anggono, J.M., Pramanik, A., Boswell, B.: *Effect of cooling methods on dimensional accuracy and surface finish of a turned titanium part*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 69, pp. 2711-2722, 2013.
- [51] ISO 3685:1993(E): *Tool-life testing with single-point turning tools*. International Organization for Standardization, Geneva.
- [52] Jamaludin, A.S., Hosokawa, A., Furumoto, T., Koyano, T., Hashimoto, Y.: *Study on the effectiveness of Extreme Cold Mist MQL system on turning process of stainless steel AISI 316*. 2018 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 319 (2018) 012054.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/319/1/012054>
- [53] Kalpakjian, S., Schmid, S.R.: *Manufacturing engineering and technology (4<sup>th</sup> edition)*. Prentice-Hall, USA, 2001.

- [54] Kone, F., Czarnota, C., Haddag, B., Nouari, M.: *Modeling of velocity-dependent chip flow angle and experimental analysis when machining 304L austenitic stainless steel with groove coated-carbide tools*. Journal of Materials Processing Technology 213 (7), pp. 1166-1178, 2013.
- [55] Kopac, J., Pusavec, F.: *Concepts of Sustainable Machining Processes*. Zbornik radova TMT 2009, Mašinski fakultet u Zenici, pp. I-1-7, 2009.
- [56] Kostadin, T.: *Čelici i željezni ljevovi – Materijali II*. Interna skripta, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2017.
- [57] Kostadin, T., Cukor, G., Jakovljevic, S.: *Analysis of corrosion resistance when turning martensitic stainless steel X20Cr13 under chilled air-cooling*. Advances in Production Engineering & Management 12 (2), pp. 105–114, 2017.  
<https://doi.org/10.14743/apem2017.2.243>
- [58] Kostadin, T.: *Utjecaj hlađenja hladnim komprimiranim zrakom na korozivnu otpornost pri obradi dijelova od nehrđajućih čelika*. Doktorski rad, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2019.
- [59] Krishnaiah, K., Shahabudeen, P.: *Applied design of experiments and Taguchi methods*. PHI Learning Private Limited, New Delhi, 2012.
- [60] Krolczyk, G.M., Maruda, R.W., Krolczyk, J.B., Wojciechowski, S., Mia, M., Nieslony, P., Budzik, G.: *Ecological trends in machining as a key factor in sustainable production – a review*. Journal of Cleaner Production 218, pp. 601-615, 2019.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.017>
- [61] Kožuh, S.: *Specijalni čelici (skripta)*. Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2010.
- [62] Leppert, T.: *The effects of cooling and lubrication on tool wear in turning 316L steel*. Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Management and Service Science (MASS), IEEE, pp. 1-4, 2011.
- [63] Leppert, T.: *Surface layer properties of AISI 316L steel when turning under dry and with minimum quantity lubrication conditions*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 226 (4), pp. 617-631, 2012.  
<https://doi.org/10.1177/0954405411429894>
- [64] Liew, P.J., Hashim, U.S., Rahman, M.N.A.: *Effect of chilled air coolant on surface roughness and tool wear when machining 2205 duplex stainless steel*. Journal of Advanced Manufacturing Technology 11 (1), pp. 61-68, 2017.



- [65] Lin, H., Wang, C., Yuan, Y., Chen, Z., Wang, Q., Xiong, W: *Tool wear in Ti6Al4V alloy turning under oils on water cooling comparing with cryogenic air mixed with minimal quantity lubrication*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 81, pp. 87–101, 2015.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-015-7062-x>
- [66] Markets and Markets. *Metalworking Fluids Market*.  
<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/metal-working-fluid-market-116835111.html> (pristupljeno 17.11.2019.)
- [67] Mathew, P., Oxley, P.L.B.: *Predicting the effects of very high cutting speeds on cutting forces, etc*. Annals of the CIRP 31 (1), pp. 49-52, 1982.
- [68] Meena, A., El Mansori, M.: *Study of dry and minimum quantity lubrication drilling of novel austempered ductile iron (ADI) for automotive applications*. Wear 271 (9-10), pp. 2412-2416, 2011.  
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.12.022>
- [69] Mia, M., Singh, G., Gupta, M.K., Sharma, V.S.: *Influence of Ranque-Hilsch vortex tube and nitrogen gas assisted MQL in precision turning of Al 6061-T6*. Precision Engineering 53, pp. 289-299, 2018.  
<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2018.04.011>
- [70] Moore, D.S., McCabe, G.P., Craig, B.A.: *Introduction to the practice of statistics (8<sup>th</sup> edition)*. New York: W.H. Freeman, 2014.
- [71] Mukte, S., Kamde, S.: *A review paper on minimum quantity lubrication*. International Journal for Scientific Research & Development 4 (11), pp. 688-689, 2017.
- [72] Nandhakumar, S., Prakash, R.: *Parametric optimization in CNC turning of martensitic stainless steel 416 using Taguchi method*. Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences 2017 (Special Issue 2), pp. 193-198, 2017.
- [73] Northcott, W.H.: *A treatise on lathes and turning: simple, mechanical and ornamental*. London: Longmans, Green, UK, 1868.
- [74] Oxley, P.L.B.: *Mechanics of metal cutting for a material of variable flow stress*. Journal of Engineering for Industry 85, pp. 339-345, 1963.
- [75] Pavić, A.: *Tehnologija – Obrada odvajanjem čestica*. Veleučilište u Karlovcu, 2013.
- [76] Pereira, O., Rodriguez, A., Fernández-Abia, A.I., Barreiro, J., López de Lacalle, L.N.: *Cryogenic and minimum quantity lubrication for an eco-efficiency turning of AISI 304*. Journal of Cleaner Production 139, pp. 440-449, 2016.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.030>

- [77] Pusavec, F., Kramar, D., Krajnik, P., Kopac, J.: *Transitioning to sustainable production – part II: evaluation of sustainable machining technologies*. Journal of Cleaner Production 18 (12), pp. 1211-1221, 2010.
- [78] Rave, A., Joksč, S.: *Monitoring metalworking fluids*. Metalworking Fluids (MWFs) for Cutting and Grinding: Fundamentals and Recent Advances, Astakhov, V.P. & Joksč, S. (ur.), Woodhead Publishing Limited, 2012.
- [79] Rede, V.: *Nehrđajući čelici*. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [80] Rocha, L.C.S., de Paiva, A.P., Balestrassi, P.P., Severino, G., Junior, P.R.: *Entropy-based weighting for multiobjective optimization: an application on vertical turning*. Mathematical Problems in Engineering 2015, 11 pages, 2015.  
<https://doi.org/10.1155/2015/608325>
- [81] Ross, P.J.: *Taguchi Techniques for Quality Engineering (2<sup>nd</sup> edition)*. Tata McGraw-Hill, New Delhi, 2005.
- [82] Salaam, H.A., Taha, Z., Tuan Ya, T.M.Y.S.: *Minimum quantity lubrication (MQL) using Ranque-Hilsch vortex tube (RHVT) for sustainable machining*. Applied Mechanics and Materials 217-21, pp. 2012-2015, 2012.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.217-219.2012>
- [83] Saberi, A., Rahimi, A.R., Parsa, H., Ashrafijou, M., Rabiei, F.: *Improvement of surface grinding process performance of CK45 soft steel by minimum quantity lubrication (MQL) technique using compressed cold air jet from vortex tube*. Journal of Cleaner Production 131, pp. 728-738, 2016.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.104>
- [84] Said, Z., Gupta, M., Hegab, H., Arora, N., Khan, A.M., Jamil, M., Bellos, E.: *A comprehensive review on minimum quantity lubrication (MQL) in machining processes using nano-cutting fluids*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 105, pp. 2057-2086, 2019.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-019-04382-x>
- [85] Sampaio, M.A., Machado, A.R., Laurindo, C.A.H., Torres, R.D., Amorim, F.L.: *Influence of minimum quantity of lubrication (MQL) when turning hardened SAE 1045 steel: a comparison with dry machining*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 98 (1-4), pp. 959-968, 2018.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-018-2342-x>
- [86] Sandvik Coromant: *Modern metal cutting: a practical handbook*. Sweden, 1994.

- [87] Sandvik Coromant: *The metal cutting technology technical guide*. Sweden, 2010.
- [88] Sen, B., Mia, M., Krolczyk, G.M., Mandal, U.K., Mondal, S.P.: *Eco-friendly cutting fluids in minimum quantity lubrication assisted machining: a review on the perception of sustainable manufacturing*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, pp. 1-32, 2019.  
<https://doi.org/10.1007/s40684-019-00158-6>
- [89] Senthivelan, N., Marimuthu, P., Chandrasekaran, K.: *Machining performance of the MSS using BAlN/SiC coated tool*. International Journal of ChemTech Research 9 (5), pp. 402-407, 2016.
- [90] Shannon, C.E.: *A mathematical theory of communication*. The Bell System Technical Journal 27 (3), pp. 379-423, 1948.  
<https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- [91] Sharma, H., Sharma, M.: *Influence of Cutting Fluids on Quality and Productivity of Products in Manufacturing Industries*. International Journal of Engineering, Management & Sciences 1 (11), pp. 8-11, 2014.
- [92] Shaw, M.C.: *Metal cutting principles*. Oxford University Press, New York, USA, 1997.
- [93] Shokrani, A., Dhokia, V., Newman, S.T.: *Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 57, pp. 83-101, 2012.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.02.002>
- [94] Singh, G., Sharma, V.S.: *Analyzing machining parameters for commercially pure titanium (Grade 2), cooled using minimum quantity lubrication assisted by a Ranque-Hilsch vortex tube*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 88, pp. 2921–2928, 2017.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-016-8982-9>
- [95] Singh, T., Singh, P., Dureja, J.S., Dogra, M., Singh, H., Bhatti, M.S.: *A review of near dry machining/minimum quantity lubrication machining of difficult to machine alloys*. International Journal of Machining and Machinability of Materials 18 (3), pp. 213–251, 2016.  
<https://doi.org/10.1504/IJMMM.2016.076276>
- [96] Singh, T., Dureja, J.S., Dogra, M., Bhatti, M.S.: *Machining performance investigation of AISI 304 austenitic stainless steel under different turning environments*. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering 15 (4), pp. 5837-5862, 2018.

- [97] Sinha, M.K., Madarkar, R., Ghosh, S., Rao, P.V.: *Application of eco-friendly nanofluids during grinding of Inconel 718 through small quantity lubrication*. Journal of Cleaner Production 141, pp. 1359–1375, 2017.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.212>
- [98] Skerlos, S.J., Hayes, K.F., Clarens, A.F., Zhao, F.: *Current Advances in Sustainable Metalworking Fluids Research*. International Journal of Sustainable Manufacturing 1 (1-2), pp. 180-202, 2008.
- [99] Sobiyi, K., Sigalas, I.: *Optimization in hard turning of martensitic stainless steel using Taguchi method*. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Chemical, Civil and Environmental Engineering, pp. 111-115, 2015.  
<https://doi.org/10.15242/IIE.E0315016>
- [100] Šterpin Valić, G., Cukor, G., Jurković, Z., Brezocnik, M.: *Multi-criteria optimization of turning of martensitic stainless steel for sustainability*. International Journal of Simulation Modelling 18 (4), pp. 632-642, 2019.  
[https://doi.org/10.2507/ijssimm18\(4\)495](https://doi.org/10.2507/ijssimm18(4)495)
- [101] Sujová, E.: *Contamination of the working air via metalworking fluids aerosols*. Engineering Review 32 (1), pp. 9-15, 2012.
- [102] Syahrullail, S., Kamitani, S., Shakirin, A.: *Tribological evaluation of mineral oil and vegetable oil as a lubricant*. Jurnal Teknologi 66 (3), pp. 37-44, 2014.  
<https://doi.org/10.11113/jt.v66.2692>
- [103] Taguchi, G.: *System of experimental design: Engineering methods to optimize quality and minimize cost*. UNIPUB, White Plains, NY, 1987.
- [104] Taylor, F.W.: *On the art of cutting metals*. ASME, 1906.
- [105] Thornburg, J., Leith, D.: *Size distribution of mist generated during metal machining*. Applied Occupational and Environmental Hygiene 15 (8), pp. 618-628, 2000.
- [106] U.S. Department of Commerce: *How does commerce define sustainable manufacturing*.  
[http://www.trade.gov/competitiveness/sustainablemanufacturing/how\\_doc\\_defines\\_S\\_M.asp](http://www.trade.gov/competitiveness/sustainablemanufacturing/how_doc_defines_S_M.asp) (pristupljeno 5. 11. 2019.)
- [107] Uysal, A., Demiren, F., Altan, E.: *Applying minimum quantity lubrication (MQL) method on milling of martensitic stainless steel by using nano MoS<sub>2</sub> reinforced vegetable cutting fluid*. Procedia – Social and Behavioral Sciences 195, pp. 2742-2747, 2015.  
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.384>

- [108] Veić, M., Jozić, S., Bajić, D.: *Surface roughness modelling in super duplex stainless steel turning*. Engineering Modelling 31 (3), pp. 19-34, 2018.  
<https://doi.org/10.31534/engmod.2018.3.ri.02f>
- [109] Veldhuis, S.C., Fox-Rabinovich, G.S., Shuster, L.S.: *Coolants and lubricants in metal cutting*. Handbook of Lubrication and Tribology, Volume I: Application and Maintenance, 2<sup>nd</sup> edition, Totten, G.E. (ur.), CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA, 2006.
- [110] Vieregge, G.: *Zerspanung der Eisenwerkstoffe*. Stahleisen-Bücher 16, Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 1959.
- [111] Vignesh Kumar, V., Raja, K., Marimuthu, P., Chandrasekaran, K.: *Multi response optimization on AISI 410 and EN 19 steel in turning operation using grey relational analysis*. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research 3 (2), pp. 121-130, 2014.
- [112] Wallace, R.J., Zhang, Y.S., Wilson, R.W., Mann, L., Rossmoore, H.: *Presence of a single genotype of the newly described species mycobacterium immunogenum in industrial metalworking fluids associated with hypersensitivity pneumonitis*. Applied and Environmental Microbiology 68 (11), pp. 5580-5584, 2002.  
<https://doi.org/10.1128/AEM.68.11.5580-5584.2002>
- [113] Wang, T.-C., Lee, H.-D.: *Developing a fuzzy TOPSIS approach based on subjective and objective weights*. Expert Systems with Applications 36, pp. 8980-8985, 2009.  
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.11.035>
- [114] Weck, M., Koch, A.: *Spindle bearing systems for high-speed applications in machine tools*. CIRP Annals – Manufacturing Technology 42 (1), pp. 445-448, 1993.
- [115] Wen, K.L., Chang, T.C., You, M.L.: *The grey entropy and its application in weighting analysis*. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, IEEE, pp. 1842-1844, 1998.
- [116] 2000/532/EZ: *Odluka Komisije od 3. svibnja 2000. koja zamjenjuje Odluku 94/3/EZ o popisu otpada u skladu s člankom 1. točkom (a) Direktive Vijeća 75/442/EEZ o otpadu i Odluku Vijeća 94/904/EZ o utvrđivanju popisa opasnog otpada u skladu s člankom 1. stavkom 4. Direktive Vijeća 91/689/EEZ o opasnom otpadu (priopćena pod brojem dokumenta C(2000) 1147)*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32000D0532&rid=9> (pristupljeno: 20.11.2019.)
- [117] <https://www.hellenicshippingnews.com/record-global-stainless-steel-production-forecast-for-2019-2020/> (pristupljeno 20.11.2019.)

**POPIS OZNAKA I KRATICA**

$A$	površina poprečnog presjeka neodrezane strugotine, $\text{mm}^2$
$A_5$	izduženje, %
$a_p$	dubina rezanja, mm
$BD$	godišnji bruto osobni dohodak operatera, kn
$b_0, b_j, b_{ij}$	parametri regresijskog modela
$C_{AS}$	nabavna cijena alatnog stroja, kn
$C_a$	trošak alata po komadu, kn
$C_{a1}$	nabavna cijena alata svedena na jednu reznu oštricu, kn
$C_{co}$	trošak čišćenja obratka od emulzije, kn
$C_{cs}$	trošak čišćenja strugotine od emulzije, kn
$C_d$	nabavna cijena držača rezne pločice, kn
$C_E$	trošak uporabe emulzije po komadu, kn
$C_{ekMQL}$	trošak energije kompresora za zrak po komadu s obzirom na MQL jedinicu, kn
$C_{ekVC}$	trošak energije kompresora za zrak po komadu s obzirom na vrtložnu cijev, kn
$C_{ep}$	trošak energije pumpe za emulziju po komadu, kn
$C_{er}$	trošak energije alatnog stroja po komadu, kn
$CI$	dopuštena pogreška
$C_M$	trošak materijala, kn
$C_{MQL}$	trošak uporabe MQL jedinice po komadu, kn
$C_n$	trošak komadnog neproizvodnog vremena, kn
$C_{nE}$	operativna satnica emulzije, $\text{kn h}^{-1}$
$C_{nMQL}$	operativna satnica MQL jedinice, $\text{kn h}^{-1}$
$C_{ns}$	operativna satnica alatnog stroja, $\text{kn h}^{-1}$
$C_{nsg}$	godišnji operativni trošak alatnog stroja, kn
$C_{nVC}$	operativna satnica vrtložne cijevi, $\text{kn h}^{-1}$
$C_o$	trošak obrade po komadu, kn
$C_{pl}$	nabavna cijena rezne pločice, kn
$C_{ss}$	trošak sabijanja strugotine, kn
$C_T$	Taylorova konstanta, min
$C_{VC}$	trošak uporabe vrtložne cijevi po komadu, kn
$C_v$	Taylorova konstanta, $\text{m min}^{-1}$

$C_1$	jedinični proizvodni trošak, kn
$C_{1E}$	jedinični proizvodni trošak za obradu uz primjenu emulzije, kn
$C_{1MQL}$	jedinični proizvodni trošak MQL obrade, kn
$C_{1MQL+VC}$	jedinični proizvodni trošak MQL obrade podržane hlađenjem vrtložnom cijevi, kn
$c_{kWh}$	cijena kilovatsata, kn kWh <sup>-1</sup>
$D$	promjer obratka na mjestu rezanja, mm ili zbroj sivih relacijskih koeficijenata
$D_T$	broj radnih dana tjedno
$D_1$	promjer obratka kojeg treba ostvariti, mm
$df$	stupanj slobode
$E$	zbroj entropija odziva
$e$	entropija odziva
$F$	varijabla Fischerove razdiobe
$F_a$	aktivna sila, N
$F_c$	glavna (tangencijalna) sila, N
$F_f$	posmična (aksijalna) sila, N
$F_p$	pasivna (radijalna) sila, N
$FRS$	godišnji fond radnih sati, h
$F_t$	odrivna sila, N
$f$	posmak reznog alata po okretaju obratka, mm
$f_{opt.}$	optimalni posmak reznog alata po okretaju obratka, mm
$h_D$	broj radnih sati na dan, h
$IT$	godišnji indirektni (opći) troškovi, kn
$i_p$	broj prolaza alata
$K$	konstanta u jednadžbi trošenja alata, mm <sup>-2</sup> ili godišnje kamate (anuitet), kn
$KF$	udaljenost fronte kratera na prednjoj površini alata od glavne oštrice, mm
$KI$	indeks kraterskog trošenja na prednjoj površini alata
$KM$	udaljenost središta kratera na prednjoj površini alata od početne glavne oštrice, mm
$KT$	dubina kratera na prednjoj površini alata, mm
$k$	kamatna stopa, % ili broj faktora ili normalizacijski koeficijent
$k_a$	eksponent dubine rezanja u proširenoj Taylorovoj jednadžbi postojanosti alata
$k_f$	eksponent posmaka u proširenoj Taylorovoj jednadžbi postojanosti alata
$k_s$	specifična sila rezanja za materijal obrade, N mm <sup>-2</sup>
$k_t$	eksponent vremena u jednadžbi trošenja alata
$k_v$	eksponent brzine rezanja u Taylorovim jednadžbama postojanosti alata

$k_1$	eksponent brzine rezanja u jednadžbi trošenja alata
$k_2$	eksponent posmaka u jednadžbi trošenja alata
$k_3$	eksponent dubine rezanja u jednadžbi trošenja alata
$L$	duljina prolaza alata, mm
$L_{ph}$	povratni hod alata, mm
$l$	referentna dužina, mm
$l_i$	izlazni hod alata, mm
$l_p$	duljina za obradu, mm
$l_u$	ulazni hod alata, mm
$MS$	sredina kvadrata (varijanca)
$m$	Taylorov eksponent
$N$	broj eksperimentalnih opažanja ili mjerenja
$N_{pl}$	broj pritezanja reznih oštrica u radnom vijeku držača
$n$	frekvencija vrtnje motorvretena, $\text{min}^{-1}$
$n_c$	veličina uzorka eksperimenta potvrde
$n_{ef}$	efektivni broj zapažanja
$n_g$	broj godina otpisa alatnog stroja
$n_p$	broj ponavljanja razine faktora
$n_s$	broj obradaka u seriji
$OD$	prosječni godišnji trošak za održavanje, kn
$OS$	godišnje osiguranje, kn
$OT$	godišnji otpis (amortizacija), kn
$o$	stopa osiguranja, %
$P_{as}$	angažirana snaga alatnog stroja za vrijeme rezanja, kW
$P_k$	snaga kompresora za zrak, kW
$P_p$	snaga pumpe za emulziju, kW
$P_s$	instalirana snaga alatnog stroja, kW
$P_{sp}$	snaga alatnog stroja u pripravnosti, kW
$PC$	postotni doprinos, %
$Q$	postotak količina topline, % ili proizvodnost, komad/min
$Q_{dk}$	dobava zraka kompresorom, l/min
$Q_{MQL}$	protok zraka kroz MQL jedinicu, l/min
$Q_{VC}$	protok zraka kroz vrtložnu cijev, l/min
$R$	rezultirajuća sila rezanja, N ili broj odziva



$R^2$	koeficijent determinacije
$R_{adj}^2$	prilagođeni koeficijent determinacije
$Ra$	srednje aritmetičko odstupanje profila, $\mu\text{m}$
$R_m$	vlačna čvrstoća, MPa
$R_{max}$	maksimalna visina neravnina profila, $\mu\text{m}$
$R_{p0,2}$	granica tečenja, MPa
$R_t$	teorijska hrapavost kod tokarenja, $\mu\text{m}$
$Rz$	srednja visina neravnina profila, $\mu\text{m}$
$r$	broj razina
$r_\epsilon$	polumjer zaobljenja vrha alata, mm
$SS$	zbroj kvadrata
$T$	postojanost rezne oštrice alata, min
$T_G$	broj radnih tjedana godišnje
$TRP$	godišnji troškovi radnog prostora, kn
$t$	vrijeme, min
$t_a$	komadno alatno vrijeme, min
$t_{a1}$	vrijeme za zamjenu rezne oštrice, min
$t_g$	glavno vrijeme obrade, min
$t_n$	komadno neproizvodno vrijeme, min
$t_p$	vrijeme za pozicioniranje alata, min
$t_{pz}$	pripremno-završno vrijeme, min
$t_{so}$	vrijeme za uzimanje i stezanje te otpuštanje i otpremanje obratka, min
$t_1$	jedinično proizvodno vrijeme, min
$V_s$	brzina skidanja materijala, $\text{mm}^3 \text{min}^{-1}$
$VB$	srednja širina pojasa trošenja na stražnjoj površini alata, mm
$VB_{krit}$	kriterij istrošenosti alata, mm
$VB_{max}$	maksimalna širina pojasa trošenja na stražnjoj površini alata, mm
$VN$	veličina ureznog trošenja na stražnjoj površini alata, mm
$v_c$	brzina rezanja, $\text{m min}^{-1}$
$v_f$	posmična brzina, $\text{mm min}^{-1}$
$v_{ph}$	brzina povratnog hoda alata (programirana), $\text{mm min}^{-1}$
$w$	entropijska težina odziva
$z$	kontrakcija, % ili zbroj stupnjeva slobode
$z_{pl}$	broj reznih oštrica na pločici

$z_T$  broj obrađenih komada po reznoj oštrici

### Grčka slova

$\Gamma$	sivi relacijski stupanj
$\alpha$	razina značajnosti (rizika)
$\varepsilon$	pogreška
$\zeta$	razlikovni koeficijent
$\eta$	djelotvornost obradnog sustava
$\eta_s$	stupanj iskoristivosti alatnog stroja
$\mu_{pot}$	srednja vrijednost procijenjena iz eksperimenta potvrde
$\mu_{pred}$	predviđeni optimalni odziv
$\xi$	sivi relacijski koeficijent
$\pi$	Ludolfov broj = 3,141592(6535...)
$\nu_1, \nu_2$	redosljedno stupnjevi slobode u brojniku i nazivniku $F$ -statistike

### Kratice

ANOVA	analiza varijance (engl. <i>Analysis of Variance</i> )
AW	aditivi protiv trošenja (engl. <i>Antiwear</i> )
BCT	tetragonska prostorno centrirana rešetka (engl. <i>Body-Centered Tetragonal</i> )
CNC	računalno numeričko upravljanje (engl. <i>Computer Numerical Control</i> )
CVD	kemijsko nanošenje iz parne faze (engl. <i>Chemical Vapour Deposition</i> )
DIN	njemačke norme ili institut za norme – <i>Deutsches Institut für Normung</i>
E	emulzija
EMQL	elektrostatičko podmazivanja minimalnom količinom (engl. <i>Electrostatic Minimum Quantity Lubrication</i> )
engl.	engleski
EP	aditivi za ekstremno visoke tlakove (engl. <i>Extreme Pressure</i> )
GRA	siva relacijska analiza (engl. <i>Grey Relational Analysis</i> )
GRC	sivi relacijski koeficijent (engl. <i>Grey Relational Coefficient</i> )
GRG	sivi relacijski stupanj (engl. <i>Grey Relational Grade</i> )
HB	tvrdća prema Brinellovoj metodi
HP	hlađenje i/ili podmazivanje

---

HRN	hrvatske norme
H-T-B	veće je bolje (engl. <i>Higher-the-Better</i> )
ISO	Međunarodna organizacija za normizaciju (engl. <i>International Organization for Standardization</i> )
L-T-B	manje je bolje (engl. <i>Lower-the-Better</i> )
ML	mikro podmazivanje (engl. <i>Micro Lubrication</i> )
MQCL	rashladno podmazivanje minimalnom količinom (engl. <i>Minimum Quantity Cooling Lubrication</i> )
MQL	podmazivanja minimalnom količinom (engl. <i>Minimum Quantity Lubrication</i> )
NDM	gotovo suha obrada (engl. <i>Near Dry Machining</i> )
OA	ortogonalna matrica (engl. <i>Orthogonal Array</i> )
OoW	tanki uljni film na kapljici vode (engl. <i>Oil-on-Water</i> )
opt.	optimalni
S/N	omjer signal/šum (engl. <i>Signal-to-Noise</i> )
SHIP	sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje
SQL	podmazivanje malom količinom (engl. <i>Small Quantity Lubrication</i> )
TEGRA	Taguchijeva metoda ortogonalnih planova eksperimenata u kombinaciji s entropijom ponderiranom sivom relacijskom analizom
VC	vrtložna cijev

**POPIS SLIKA**

<b>Slika 2.1.</b>	Zone smicanja kod stvaranja strugotine .....	11
<b>Slika 2.2.</b>	Distribucija topline i temperaturna polja pri obradi čelika alatom od tvrdog metala .....	12
<b>Slika 2.3.</b>	Učinci tekućine za obradu metala na proces rezanja.....	13
<b>Slika 2.4.</b>	Načini dobave tekućine za obradu metala.....	15
<b>Slika 2.5.</b>	Klasifikacija tekućina za obradu metala prema DIN 51385:2013 .....	16
<b>Slika 2.6.</b>	Sastavi vodomješljivih koncentrata tekućina za obradu metala.....	16
<b>Slika 2.7.</b>	Zastupljenost različitih vrsta tekućina za obradu metala u proizvodnoj praksi .	17
<b>Slika 2.8.</b>	Uobičajeni načini ulaska tekućine za obradu metala u ljudsko tijelo.....	19
<b>Slika 2.9.</b>	Glavni štetni zdravstveni učinci tekućine za obradu metala .....	20
<b>Slika 2.10.</b>	Opasnosti za kožu izpostavljenju tekućini za obradu metala i fotografija ruke zahvaćene dermatitisom .....	20
<b>Slika 2.11.</b>	Gubljenje tekućine za obradu metala iz obradnog sustava .....	22
<b>Slika 2.12.</b>	Troškovi primjene emulzije u strojnoj obradi metala rezanjem.....	22
<b>Slika 3.1.</b>	Osnovne dimenzije održivosti .....	24
<b>Slika 3.2.</b>	Obilježja održive proizvodnje .....	25
<b>Slika 3.3.</b>	Model održive obrade.....	25
<b>Slika 3.4.</b>	Alternativne tehnike hlađenja i/ili podmazivanja za održivu strojnu obradu metala .....	26
<b>Slika 3.5.</b>	Dovođenje (isporuka) aerosola u zonu rezanja .....	29
<b>Slika 3.6.</b>	MQL sustav "ulje na vodi" .....	30
<b>Slika 3.7.</b>	Načelo rada vrtložne cijevi protusmjernog protoka (shema) .....	31
<b>Slika 3.8.</b>	Troškovi sustava hlađenja/podmazivanja u strojnoj obradi kao funkcija održivosti.....	35
<b>Slika 4.1.</b>	Gibanja alata i obratka kod tokarenja.....	36
<b>Slika 4.2.</b>	Glavni dijelovi tokarskog noža.....	37
<b>Slika 4.3.</b>	Sustav sila kod tokarenja.....	37
<b>Slika 4.4.</b>	Mehanizmi trošenja reznog alata.....	39
<b>Slika 4.5.</b>	Glavni oblici trošenja reznih pločica.....	40
<b>Slika 4.6.</b>	Parametri trošenja prednje i stražnje površine reznog alata prema normi ISO 3685:1993(E).....	40

<b>Slika 4.7.</b> Određivanje Taylorovog pravca.....	42
<b>Slika 4.8.</b> Tipične zavisnosti postojanosti reznog alata $T$ od brzine rezanja $v_c$ , posmaka $f$ i dubine rezanja $a_p$ u logaritamskom koordinatnom sustavu.....	43
<b>Slika 4.9.</b> Topografija površine .....	43
<b>Slika 4.10.</b> Određivanje parametara hrapavosti $R_a$ , $R_z$ i $R_{max}$ unutar referentne dužine $l$ ....	44
<b>Slika 4.11.</b> Teorijska hrapavost $R_t$ pri tokarenju (rezni alat sa zaobljenim vrhom).....	43
<b>Slika 4.12.</b> Najznačajniji utjecajni faktori na hrapavost obrađene površine .....	46
<b>Slika 4.13.</b> Mikrostruktura martenzitnog nehrđajućeg čelika.....	47
<b>Slika 4.14.</b> Položaj martenzitnih nehrđajućih čelika u Schaefflerovom dijagramu.....	47
<b>Slika 4.15.</b> Standardni linearni grafikoni za ortogonalnu matricu $L_{27}(3^{13})$ .....	50
<b>Slika 4.16.</b> Metoda odzivnog grafikona i optimalni predviđeni odziv (maksimiziran).....	51
<b>Slika 4.17.</b> Integrirana Taguchi GRA metoda .....	53
<b>Slika 4.18.</b> Metoda najmanjih kvadrata .....	56
<b>Slika 5.1.</b> Dimenzije šipke za obradu tokarenjem .....	59
<b>Slika 5.2.</b> Laboratorijska CNC tokarilica TU 360 Prvomajska .....	59
<b>Slika 5.3.</b> Rezna pločica DNMG 150608-MF 4 TM4000 proizvođača Seco.....	59
<b>Slika 5.4.</b> Držać pločice DDJNL 2525M15-M proizvođača Seco .....	60
<b>Slika 5.5.</b> Opći podaci za INA BU 7 .....	60
<b>Slika 5.6.</b> MQL jedinica VE1B proizvođača SKF.....	61
<b>Slika 5.7.</b> Klipni kompresor Presing B7000 .....	61
<b>Slika 5.8.</b> Princip rada MQL jedinice VE1B proizvođača SKF .....	62
<b>Slika 5.9.</b> Vrtložna cijev EXAIR model 3825 .....	62
<b>Slika 5.10.</b> Integrirani sustav MQL jedinice i vrtložne cijevi .....	63
<b>Slika 5.11.</b> Profilometar Hommel Tester T1000 i mjerenje hrapavosti obrađene površine	64
<b>Slika 5.12.</b> Digitalni USB mikroskop Dino Lite Pro i mjerenje trošenja reznog alata.....	64
<b>Slika 5.13.</b> Termovizijska infracrvena kamera ThermoCAM S65 .....	65
<b>Slika 5.14.</b> Odzivni grafikoni i optimalne razine brzine rezanja $v_c$ , posmaka $f$ , dubine rezanja $a_p$ i načina hlađenja i/ili podmazivanja (HP) za minimizirani parametar hrapavosti $R_a$ .....	69
<b>Slika 5.15.</b> Postizivi parametar hrapavosti $R_a$ pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 s obzirom na različite tehnike hlađenja i/ili podmazivanja.....	71
<b>Slika 5.16.</b> Odzivni grafikoni i optimalne razine brzine rezanja $v_c$ , posmaka $f$ , dubine rezanja $a_p$ i načina hlađenja i/ili podmazivanja (HP) za minimizirani parametar hrapavosti $R_z$ .....	72

<b>Slika 5.17.</b> Postizivi parametar hrapavosti $R_z$ pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 s obzirom na različite tehnike hlađenja i/ili podmazivanja.....	74
<b>Slika 5.18.</b> Dijagrami trošenja stražnje površine reznog alata: eksperimenti 1 – 4.....	75
<b>Slika 5.19.</b> Dijagrami trošenja stražnje površine reznog alata: eksperimenti 5 – 12.....	76
<b>Slika 5.20.</b> Dijagrami trošenja stražnje površine reznog alata: eksperimenti 13 – 20.....	77
<b>Slika 5.21.</b> Dijagrami trošenja stražnje površine reznog alata: eksperimenti 21 – 27.....	78
<b>Slika 5.22.</b> Odzivni grafikoni i optimalne razine brzine rezanja $v_c$ , posmaka $f$ , dubine rezanja $a_p$ i načina hlađenja i/ili podmazivanja (HP) za maksimiziranu postojanost reznog alata $T$ .....	80
<b>Slika 5.23.</b> Postiziva postojanost reznog alata $T$ pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 s obzirom na različite tehnike hlađenja i/ili podmazivanja za posmak $f = 0,3$ mm.....	83
<b>Slika 5.24.</b> Postiziva postojanost reznog alata $T$ pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 s obzirom na različite tehnike hlađenja i/ili podmazivanja za posmak $f = 0,35$ mm.....	83
<b>Slika 5.25.</b> Postiziva postojanost reznog alata $T$ pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 s obzirom na različite tehnike hlađenja i/ili podmazivanja za posmak $f = 0,4$ mm.....	84
<b>Slika 5.26.</b> Temperature na mjestu zahvata reznog alata .....	85
<b>Slika 5.27.</b> Graf sivih relacijskih stupnjeva (GRG).....	89
<b>Slika 5.28.</b> Odzivni grafikoni i optimalne razine brzine rezanja $v_c$ , posmaka $f$ , dubine rezanja $a_p$ i načina hlađenja i/ili podmazivanja (HP) za maksimizirani prosječni odziv GRG .....	89
<b>Slika 6.1.</b> Kretanje jediničnog proizvodnog troška $C_1$ pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 za različite tehnike hlađenja i/ili podmazivanja ..	98
<b>Slika 6.2.</b> Zavisnost jediničnog proizvodnog troška od posmaka pri tokarenju martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 za različite tehnike hlađenja i/ili podmazivanja.....	99

**POPIS TABLICA**

<b>Tablica 2.1.</b>	Pregled osnovnih sastava tekućina za obradu metala .....	18
<b>Tablica 2.2.</b>	Usporedba različitih vrsta tekućina za obradu metala.....	18
<b>Tablica 3.1.</b>	Kvalitativna procjena troškova sustava hlađenja/podmazivanja.....	34
<b>Tablica 3.2.</b>	Kvalitativna procjena utjecaja hlađenja/podmazivanja na okoliš .....	34
<b>Tablica 4.1.</b>	Preporučeni kriteriji istrošenosti reznog alata.....	41
<b>Tablica 4.2.</b>	Stupnjevi hrapavosti pri različitim postupcima obrade rezanjem.....	45
<b>Tablica 4.3.</b>	Standardne ortogonalne matrice.....	49
<b>Tablica 4.4.</b>	Standardna ortogonalna matrica $L_8(2^7)$ .....	49
<b>Tablica 4.5.</b>	ANOVA primjer.....	51
<b>Tablica 4.6.</b>	ANOVA za model višestruke linearne regresije.....	56
<b>Tablica 4.7.</b>	Chaddockova ljestvica .....	57
<b>Tablica 5.1.</b>	Kemijski sastav X20Cr13 .....	58
<b>Tablica 5.2.</b>	Mehanička svojstva X20Cr13 .....	58
<b>Tablica 5.3.</b>	Razine ulaznih nezavisnih varijabli i kodovi za regresijsku analizu.....	65
<b>Tablica 5.4.</b>	Plan eksperimenta $L_{27}(3^{13})$ : četiri glavna faktora, tri dvofaktorske interakcije.....	66
<b>Tablica 5.5.</b>	Rezultati eksperimenata za hrapavost obrađene površine.....	68
<b>Tablica 5.6.</b>	Tablica prosječnih odziva za parametar hrapavosti $Ra$ .....	69
<b>Tablica 5.7.</b>	ANOVA rezultati za parametar hrapavosti $Ra$ .....	70
<b>Tablica 5.8.</b>	Višestruka linearna regresijska analiza za matematički model (5.1) .....	70
<b>Tablica 5.9.</b>	Tablica prosječnih odziva za parametar hrapavosti $Rz$ .....	72
<b>Tablica 5.10.</b>	ANOVA rezultati za parametar hrapavosti $Rz$ .....	73
<b>Tablica 5.11.</b>	Višestruka linearna regresijska analiza za matematički model (5.5) .....	74
<b>Tablica 5.12.</b>	Rezultati eksperimenata za postojanost reznog alata .....	79
<b>Tablica 5.13.</b>	Tablica prosječnih odziva za postojanost reznog alata $T$ .....	80
<b>Tablica 5.14.</b>	ANOVA rezultati za postojanost reznog alata $T$ .....	81
<b>Tablica 5.15.</b>	Višestruka linearna regresijska analiza za matematički model (5.9) .....	82
<b>Tablica 5.16.</b>	Rezultati eksperimenata i normalizirane vrijednosti: idealni ciljni niz (1, 1, 1, 1).....	87
<b>Tablica 5.17.</b>	Izračunati sivi relacijski koeficijenti (GRC) i sivi relacijski stupnjevi (GRG).....	88

---

<b>Tablica 5.18.</b> Tablica prosječnih odziva za GRG .....	89
<b>Tablica 5.19.</b> ANOVA rezultati za GRG .....	90
<b>Tablica 5.20.</b> ANOVA rezultati za GRG sa zbirnom pogreškom .....	90
<b>Tablica 5.21.</b> Rezultati eksperimenta potvrde .....	91
<b>Tablica 6.1.</b> Opći ulazni podaci za proračun jediničnog proizvodnog troška.....	100
<b>Tablica 6.2.</b> Operativna satnica alatnog stroja .....	101
<b>Tablica 6.3.</b> Operativna satnica emulzije .....	101
<b>Tablica 6.4.</b> Operativna satnica MQL jedinice .....	102
<b>Tablica 6.5.</b> Operativna satnica vrtložne cijevi i dodatni podaci .....	102
<b>Tablica 6.6.</b> Jedinični proizvodni trošak za različite tehnike hlađenja i/ili podmazivanja	103
<b>Tablica 6.7.</b> Trošak medija za hlađenje i/ili podmazivanje.....	104



## ŽIVOTOPIS

Graciela Šterpin Valić je rođena 27. kolovoza 1989. u Rijeci. Završila je osnovnu školu u Dražicama i Prvu sušačku hrvatsku gimnaziju u Rijeci. Prediplomski sveučilišni studij strojarstva na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci upisuje 2008. i završava 2011. obranom završnog rada Proizvodnja zavarene konstrukcije temeljne ploče glavnog brodskog dvotaktnog dizel motora pod vodstvom mentora izv. prof. dr. sc. Duška Pavletića te stječe akademski naziv sveučilišna prvostupnica (baccalaurea) inženjerka strojarstva. Iste godine upisuje Diplomski sveučilišni studij strojarstva također na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci kojeg završava 2013. obranom diplomskog rada Projekt tehnološkog procesa poklopca cilindra pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Mladena Perinića i izv. prof. dr. sc. Zorana Jurkovića te stječe akademski naziv magistra inženjerka strojarstva. Tijekom studiranja polaže sve propisane ispite za stjecanje Europske računalne diplome (ECDL). Posjeduje certifikat SolidWorks Associate (CSWA).

U listopadu 2013. zapošljava se na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci na Zavodu za industrijsko inženjerstvo i management kao zamjena na radno mjesto asistenta s punim radnim vremenom na Katedri za mjernu tehniku i sustave kvalitete te upisuje Poslijediplomski doktorski studij iz tehničkih znanosti, polje strojarstvo (modul proizvodno strojarstvo). U studenom 2014. prelazi na radno mjesto asistenta s punim radnim vremenom na Katedri za proizvodne tehnologije i Katedri za proizvodnu opremu i robotiku gdje i danas radi. Izvodi auditorne i laboratorijske vježbe iz kolegija Proizvodne tehnologije, Proizvodni strojevi, alati i naprave, CNC/NC obradni strojevi i Tehnologija obrade II te sudjeluje u znanstveno-istraživačkom radu. Od listopada 2016. je voditeljica Laboratorija za plastičnu obradu i obradne strojeve na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci.

Autorica je ili koautorica nekoliko stručnih i znanstvenih radova u domaćim ili stranim znanstvenim i stručnim časopisima odnosno prezentiranih na znanstvenim skupovima. U sklopu Ceepus stipendije boravi na Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru. U svrhu istraživanja za potrebe doktorskog rada posjećuje Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu.

Aktivno se služi engleskim jezikom. Udata je i majka jednogodišnjeg sina Adriana.

## POPIS OBJAVLJENIH RADOVA

1. Vale, F., Pavletić, D., Šterpin, G., Perinić, M.: *Measuring of sand core casting with 3D digitalisator*. Proc. of 4<sup>th</sup> Int. Conf. "Mechanical Technologies and Structural Materials" MTSM 2014, Croatian Society for Mechanical Technologies, Split, pp. 87-94, 2014.
2. Šterpin, G., Tadić, B., Cukor, G., Jurković, Z.: *Creating 3D models with scanner DAVID SLS-1*. Proc. of 4<sup>th</sup> Int. Conf. "Mechanical Technologies and Structural Materials" MTSM 2014, Croatian Society for Mechanical Technologies, Split, pp. 99-105, 2014.
3. Forempoher Škuver, M., Šterpin, G., Vale, F.: *Praktična provjera ishoda učenja – primjer diplomskog rada*. Proc. of Int. Prof. Conf. ME4CataLOGue, Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, pp. 102-108, 2014.
4. Šterpin, G., Jurković, Z., Perinić, M.: *Implementacija suvremenih metoda optimizacije proizvodnih procesa u inženjerskoj nastavi*. Proc. of Int. Prof. Conf. ME4CataLOGue, Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, pp. 310-316, 2014.
5. Šterpin, G., Cukor, G., Jurković, Z., Brezočnik, M.: *Simple shearing and ploughing cutting force model in turning operation with nose radius tool*. Proc. CIM 2015, Croatian Association of Production Engineering, Zagreb, pp. 231-234, 2015.
6. Cukor, G., Šterpin Valić, G., Kostadin, T., Fabić, M.: *Sustainable turning of martensitic stainless steel*. Transactions of FAMENA 43 (3), pp. 1-12, 2019.  
<https://doi.org/10.21278/TOF.43301>
7. Šterpin Valić, G., Cukor, G., Jurković, Z., Brezočnik, M.: *Multi-criteria optimization of turning of martensitic stainless steel for sustainability*. International Journal of Simulation Modelling 18 (4), pp. 632-642, 2019.  
[https://doi.org/10.2507/IJSIMM18\(4\)495](https://doi.org/10.2507/IJSIMM18(4)495)
8. Fabić, M., Pavletić, D., Šterpin Valić, G., Marković, M.: *Moderating impact of complexity on process management of turnaround project*. Management and Production Engineering Review 10 (4), pp. 25-36, 2019.  
<https://doi.org/10.24425/mper.2019.131442>
9. Fabić, M., Pavletić, D., Šterpin Valić, G.: *Factors in turnaround refinery (TAR) Project Management Process*. Tehnički vjesnik – Technical Gazette 27 (5), 12 stranica, 2020.  
<https://doi.org/10.17559/TV-20180720181243>