



## 4.13 Model završnog izvještaja

**Univerzitet:** UNIVERZITET U BANJOJ LUCI  
**Fakultet:** MAŠINSKI FAKULTET BANJA LUKA  
**Školska godina:** 2011/12



## ZAVRŠNI IZVJEŠTAJ o realizovanoj studentskoj praksi

**Student:** Branislav Sredanović

**ID broj studenta:** 181/III

**Godina studija:** 2. – Magistarski studij

**Studijski program:** Obradni sistemi i tehnologija obradnih sis. za rezanje

**Ime akademskog mentora:** Prof. dr Gordana Globočki Lakić

**Ime industrijskog mentora:** Doc. dr Davorin Kramar

*Ljubljana, 2011.*



## 1. Opšte informacije

Student			
Ime studenta: BRANISLAV SREDANOVIĆ		Nivo studija: <input type="checkbox"/> BSc <input checked="" type="checkbox"/> MSc	
ID broj: 181/III	E-mail: sredanovic@gmail.com	Telefon: +387 65 789 333	
Vremenski period prakse	Od: 29.11.2011.	Do: 28.12.2011.	Broj sati: 176
Akademska institucija			
Univerzitet: UNIVERZITET U BANJOJ LUCI			
Fakultet: MAŠINSKI FAKULTET			
Adresa: V. Stepe Stepanovića 71		Grad: Banja Luka, BiH	
Ime akademskog mentora: Prof. dr Gordana Globočki Lakić		Pozicija: Vanredni profesor	
E-mail: gordana.globocki@gmail.com		Broj telefona: +387 51 462 400	
Institucija u kojoj se realizuje praksa (preduzeće/institucija)			
Ime: UNIVERZA V LJUBLJANI, Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za odrezavanje			
URL: <a href="http://www.fs.uni-lj.si/labod">www.fs.uni-lj.si/labod</a>			
Adresa: Aškerčeva 6		Grad: Ljubljana, SLO	
Ime industrijskog mentora: Doc. dr Davorin Kramar		Pozicija: Docent	
E-mail: davorin.kramar@fs.uni-lj.si		Broj telefona: +386 1 4771 737	

## 2. Zahvalnice

Želim se zahvaliti svim institucijama koje su mi omogućili obavljanje studentske prakse i eksperimentalnih istraživanja u Laboratoriju za odrezavanje na Fakultetu za strojništvo u Ljubljani.

Želim zahvaliti sljedećim institucijama:

1. Laboratorij za odrezavanje, Fakulteta za strojništvo - Univerza v Ljubljana,
2. CTC Kooperativni centar Banja Luka, Mašinski fakultet Banja Luka,
3. Katedra za tehnologiju obrade rezanjem i obradne sisteme, Mašinski fakultet Banja Luka.

Takođe se želim zahvaliti osobama koji su mi korisnim savjetima omogućili kvalitetno izvođenje eksperimentalnih istraživanja te stručno i naučno usavršavanje:

1. Prof. dr Janez Kopač,
2. Doc. dr Davorin Kramar,
3. Prof. dr Živko Babić,
4. Prof. dr Gordana Globočki Lakić,
5. Vinko Rotas, dipl.ing.



### 3. Uvod

Laboratorija za rezanje (slovenski *Laboratorij za odrezavanje* ili kraće LABOD) je laboratorija na Mašinskom fakultetu u Ljubljani, u kojoj se vrše istraživanja u oblasti tehnologija obrade rezanjem i alatnih mašina. Laboratorijom rukovodi prof. dr. Janez Kopač, a ukupan broj zaposlenih istraživača i stručnih saradnika je 13.

Nastavnici i saradnici zaposleni u laboratoriju se primarno bave istraživanjima vezanim za ispitivanje obradivosti teškoobradivih materijala. Eksperimentalna istraživanja se provode korišćenjem standardnih, specijalnih i naprednih tehnologija obrade rezanjem. Istraživanja koja se obavljaju u laboratoriji vezana su za realizaciju međunarodnih i domaćih naučno – stručnih projekata, kao i projekata saradnje sa privredom (alatnice velikih korporacija i namjenska industrija).

Pored naučnog rada, zaposlenici laboratorije realizuju i nastavne aktivnosti u sklopu nastavnog programa na studijskom programu Proizvodno mašinstvo. Nastavnici pokrivaju preko deset predmeta koji su vezani za tehnologije obrade rezanjem, alatne mašine, alate i pribore i upravljanje kvalitetom proizvodnje. Saradnici, koji su i studenti doktorskih studija odnosno specijalizanti, izvode praktične i laboratorijske vježbe, ali koje su u skladu sa oblašću i istraživanjima kojima se bave u toku postdiplomskog studija.



Slika 1. Laboratorija za rezanje na Mašinskom fakulteta u Ljubljani

Laboratorija za rezanje posjeduje dva CNC struga, obradni centar za glodanje, obradni centar za mikropreciznu obradu, pomoćna postrojenja za specijalne i napredne tehnologije obrade rezanjem, te veći broj klasičnih alatnih mašina, a sve to uz veliki broj savremenih alata i pribora. U laboratoriji se nalazi i mjerna oprema koja je neophodna za obavljanje istraživanja vezanih za tehnologiju obrade rezanjem: dinamometri za mjerenje sila i momenata rezanja, alatni mikroskop, laserski sistem za trodimenzionalno praćenje habanja alata, uređaj za mjerenje hrapavosti površine, mjerac i analizator frekvencija, laserski umjerivač alatnih mašina, sistem za analizu odstupanja kod glavnog vretana mašina, mašinu za skeniranje površina predmeta dodirom, laserski sistem za skeniranje površina, itd.

Rezultati uspješno realizovanih projekata, mogu se pratiti po naučnim radovima objavljenim u vodećim časopisima iz oblasti proizvodnog mašinstva, a čiji su autori domaći istraživači ali i gostujući istraživači i postdiplomci. Timski rad i rad po principima konkurentnog inženjerstva su postavili LABOD na listu vodećih naučnih institucija regiona ovog tipa.



#### 4. Ciljevi PSP i metodologija

U okviru studentske prakse bilo je potrebno obaviti nekoliko zadataka. U prvim danima realizacije studentske prakse odnosno u prvoj radnoj sedmici, obavljeno je upoznavanje sa laboratorijskom opremom i zaposlenicima. U toku probnog rada na mašinama i probne upotrebe mjernih uređaja, realizovani su manji praktični zadaci, kao što su kratka programiranja mašina i očitavanja izlaznih podataka na mjernoj opremi. Takođe, izvršene su pripreme uvodne prezentacije koja je sadržavala nekoliko cijelina, i to opise i informacije vezane za: lične podatke, grad Banja Luka, Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet u Banjoj Luci, strukturu studija i studentskih programa, Katedru za tehnologiju obrade rezanjem i obradne sisteme i pripadajuće laboratorije, aktivne projekte na katedri, lična iskustva u oblasti tehnologije obrade, oblast ličnih istraživanja i interesovanja, buduća istraživanja i očekivanja od boravka u LABOD-u. Uvodna prezentacija je prikazana u drugoj sedmici prakse, a istoj su prisustvovali svi članovi laboratorije, kao i drugi zainteresovani zaposlenici fakulteta.

U drugoj sedmici prakse uglavnom su se odvijale konsultacije sa naučnim osobljem laboratorije vezane za eksperimentalno – stručni rad. Istovremeno, zbog mogućnosti pristupa bazama vodećih svjetskih i domaćih naučnih časopisa te ostaloj literaturi, izvršeno je proučavanje iste i definisanje cilja prakse, odnosno ka eksperimentalnim istraživanjima u oblasti obrade metala rezanjem. Kao bazna ideja rada odabrana je obradivost materijala pri obradi rezanjem i izvršeno je planiranje eksperimenta.



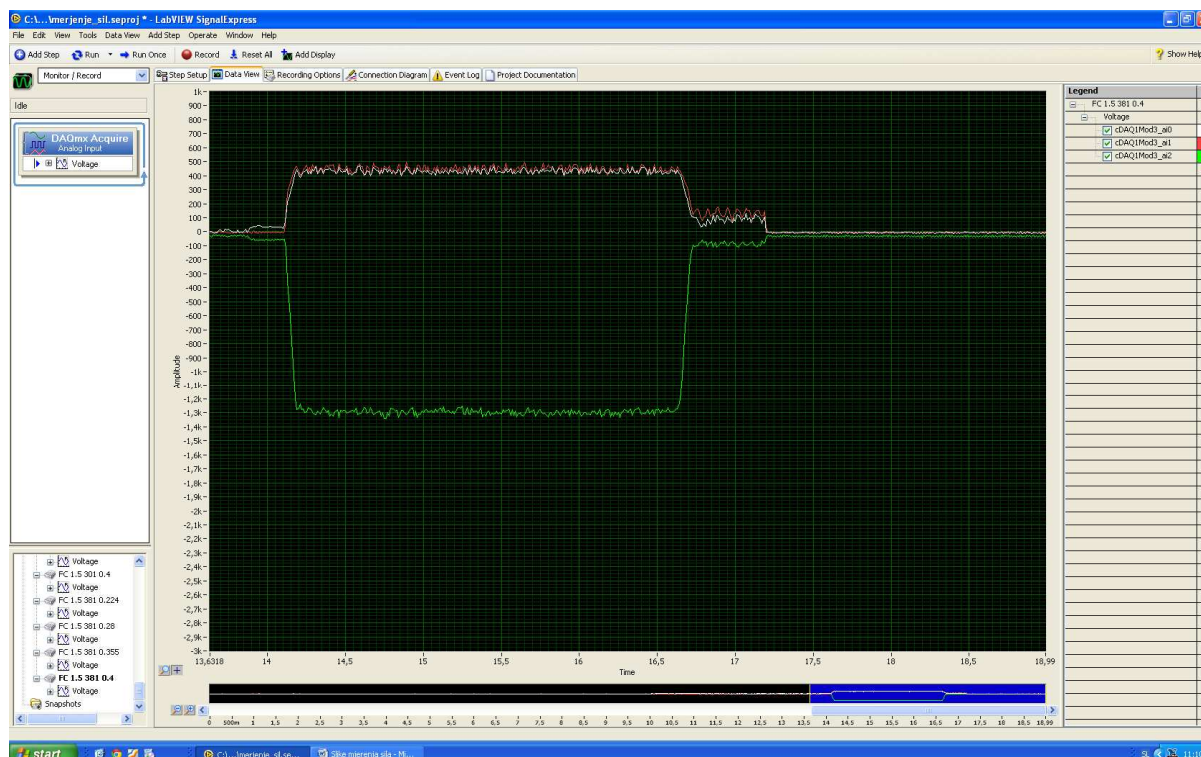
Slika 2. Mašina sa pomoćnim pristrojima i mjernom aparaturom

Cilj rada je bio proučavanje, analiza i donošenje zaključka o obradivosti čelika Ck45 (čelik za poboljšanje), pri različitim tehnologijama obrade struganjem, radi razvoja metoda proučavanja i razvoja baza obradivosti materijala. Kao vrste obrade odabrane su: standardna obrada obilvanjem SHP (*Flood cutting*), specijalna obrada sa minimalnom upotrebom SHP (*Minimal Quantity Lubrication and Cooling*) i napredna obrada potpomognuta mlazom SHP pri nekonvencionalnom viokom pritisku (*High Pressure Jet Assisted Machining*). Drugi varirani parametri su: brzina obrade (visoka brzine), dubina rezanja i korak (svi prilagođeni srednjoj obradi). Konstantni uslovi su uspostavljeni izborom jedne mašine i jedne vrste alata. Kao izlazni parametri praćeni su: sile rezanja, oblik strugotine, habanje alata (grudna i leđna površina) i hrapavost obrađene površine.



U trećoj sedmici su započeta eksperimentalna mjerenja i detaljno upoznavanje sa primjenjenim tehnologijama obrade metala. U prvom dijelu eksperimentalnih istraživanja izvršeno je mjerenje sila rezanja i snimanje oblika strugotine pri variranim režimima obrade. Režimi obrade su varirali u više nivoa, i to: brzina rezanja u tri nivoa, dubina rezanja u tri nivoa i korak u četiri nivoa, što je iznosilo 36 eksperimentalnih mjerenja po jednoj vrsti obrade bez ponavljanja mjerenja, odnosno ukupno 108 eksperimentalnih mjerenja za sve tri vrste obrade. Za svaku kombinaciju parametra i vrste obrade izmjerene su tri komponente sile rezanja, i to: glavna sila rezanja, sila prodiranja i sila posmičnog kretanja. Takođe, za svaku navedenu kombinaciju izvršeno je prikupljanje i snimanje oblika strugotine. U toku realizacije eksperimentalnih mjerenja riješavali su se prisutni problemi, diskutovalo o problematici obrade i donosili zaključci o samoj obradi.

Četvrta sedmica se iskoristila za analizu dobijenih eksperimentalnih rezultata prvog dijela i donijeli zaključci o postupcima i metodologiji praćenja i mjerenja habanja i mjerenja hrapavosti obrađene površine. Formirani su tehnološki prozori i zone kritičnih uslova obrade u kojima se ispituje habanje alata. Uz standardno praćenje habanja alata, mjerenje hrapavosti površine obavljeno je s ciljem utvrđivanja promjene hrapavosti u zavisnosti od pohabanosti alata. Takođe, i pri ovim isitivanjima vršena je analiza oblika strugotine, kao bitnog pokazatelja procesa obrade. Tokom ovog perioda, održana su dva sastanka katedre na kojima su se planirale prijave novih i analizirali rezultati tekućih međunarodnih i domaćih projekata.



Slika 3. Softver za akviziciju signala mjerenja sila rezanja

Zadnji dani realizovane prakse iskorišćeni su za analizu rezultata i pripremu završne prezentacije. U toku ovog preioda održan je još jedan sastanak katedre, gdje je tema bila međunarodni projekti.

Završna prezentacija je sadržavala sljedeće cijeline: utisci iz LABOD-a, prikaz eksperimentalnih mjerenja, prikaz rezultata eksperimenta i viđenje buduće saradnje LABOD-a i Katedre za tehnologiju obrade rezanjem i obradne sisteme. Prezentaciji su prisustvovali nastavnici i saradnici iz laboratorije. Zaključeno je da je praksa odlično obavljena, a dogovorena je i buduća saradnja kroz bilateralne projekte.



## 5. Opis posla

U toku studentske prakse obavljena su eksperimentalna istraživanja radi izučavanja kompleksne i univerzalne obradivosti materijala pri obradi rezanjem. Cilj eksperimentalnih istraživanja je bio analiza i poređenje različitih vrsta obrade rezanjem, radi razvoja baza obradivosti, optimizacije procesa i razvoja odgovarajućeg aplikativnog softvera.

Kao materijal koji je korišćen u eksperimentu odabran je ugljeni čelik za poboljšanje Ck45 (AISI 1045, EN 1.1191), kao predstavnik konstruktivnih čelika koji se koristi za izradu odgovornih dijelova na mašinama i uređajima. Isti se koristi kao materijal za izradu visokopterećenih vretena i osovina na alatnim mašinama, dijelova alata za obradu lima, jako opterećenih zupčanika, visoko napregnutih poluga, dijelova automobila, dijelova poljoprivrednih mašina i slično (slika 4.).

Tabela 1. Hemijski sastav čelika Ck45

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	Others
0.46	max. 0.40	0.65	max. 0.40	max. 0.10	max. 0.40	-	-	(Cr+Mo+Ni)=max. 0.63

Ostale fizičke osobine čelika Ck45 su:

- Napon na granici elastičnosti [ $N/mm^2$ ]: 460
- Zatezna čvrstoća [ $N/mm^2$ ]: 820
- Modul elastičnosti [ $N/mm^2$ ]:  $2 \times 10^3$
- Specifična težina - gustina [ $g/cm^3$ ]: 7.84
- Termička provodnost [ $W/mK$ ]: 15.1
- Tvrdća (HRC) 35-38

Kao pripremak za eksperiment je korišćena šipka hladno valjanog čelika Ck45 prečnika 120 mm i dužine 300 mm.



Slika 4. Vratilo izrađeno od čelika Ck45

Eksperimenti su izvedeni na univerzalnom strugu VDF BOEHRINGER PRVOMAJSKA, sa osiguranom visokom krutošću. Strug je standardno opremljen sistemom za obradu obilivanjem SHP-a. Na strug se zasebno dodaju postrojenja za specijalne i napredne postupke obrade rezanjem. Glavne karakteristike univerzalnog struga su:

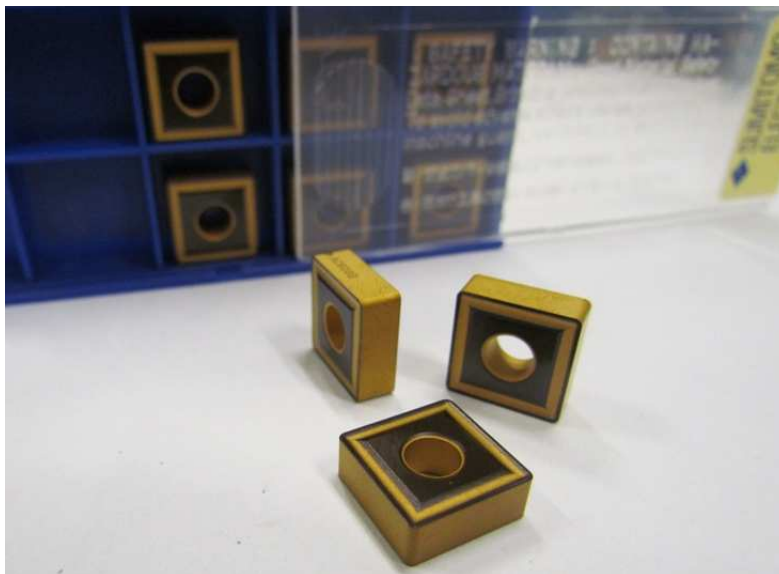


- Snaga:  $P = 8 \text{ kW}$ ,
- Maksimalni broj obrtaja:  $n_{\max} = 2240 \text{ min}^{-1}$ ,
- Maksimalni korak obrade:  $f_{\max} = 1,6 \text{ mm/obr}$ ,
- Maksimalne dimenzije radnog komada:  $D \times L = 250 \times 1500 \text{ mm}$ ,



Slika 5. Univerzalni strug POTISJE

Kao alat za obradu korišćen je kataloško preporučeni alat u obliku kvadratne pločice za srednju obradu od tvrdog metala sa prevlakama, japanskog proizvođača SUMITOMO, oznake SNMG 1204 08 NMX – AC 3000. Grudni ugao alata iznosi  $10^\circ$ , leđni ugao iznosi  $0^\circ$ , dok je radijus vrha alata 0,8 mm. Pločica ne posjeduje specijalnu geometriju za lomljenje strugotine tzv. lomače, radi obezbjeđenja konstantnog mlaza pri HPJA obradi. Pločica je pričvršćena na nosač pločice oznake PSDN N 2525 M 12.



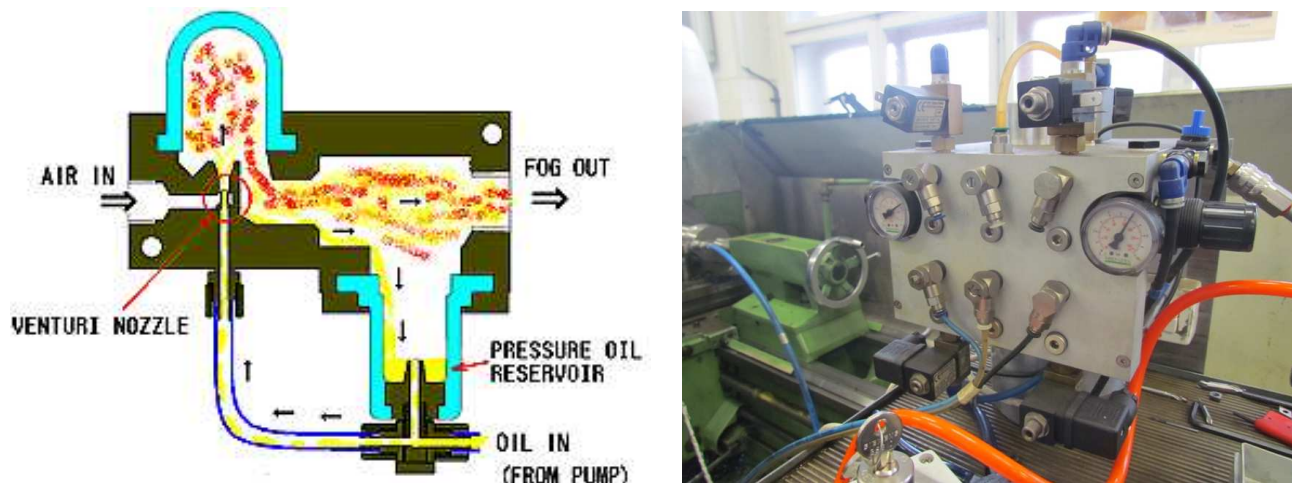
Slika 6. Alat za obradu



Sredstvo za hlađenje i podmazivanje je 3% -na emulzija od biljnog ulja rastvorena u tehničkoj vodi bez sadržaja hlora. Sa ovom mješavinom dobijena je ekološka emulzija sa niskom cijenom koštanja i sa odgovarajućim tribološkim karakteristikama.

Analizirani postupci obrade rezanjem su: standardni postupak obrade rezanjem sa obilvanjem SHP-a, (*Flood machining*), specijalni postupak obrade rezanjem sa minimalnom upotrebom SHP-a (*MQL Minimal Quantity Lubrication*) i napredni postupak obrade rezanjem potpomognut mlazom SHP-a visokog pritiska (*HPJA – High Pressure Jet Assisted Machining*). Pošto je standardni postupak obrade uz obilvanje SHP-a opšte poznat, ukratko će biti opisani samo MQL i HPJA postupci obrade. Bitno je napomenuti da se pri obradi sa obilvanjem SHP-a koristio protok od 1.5 l/min.

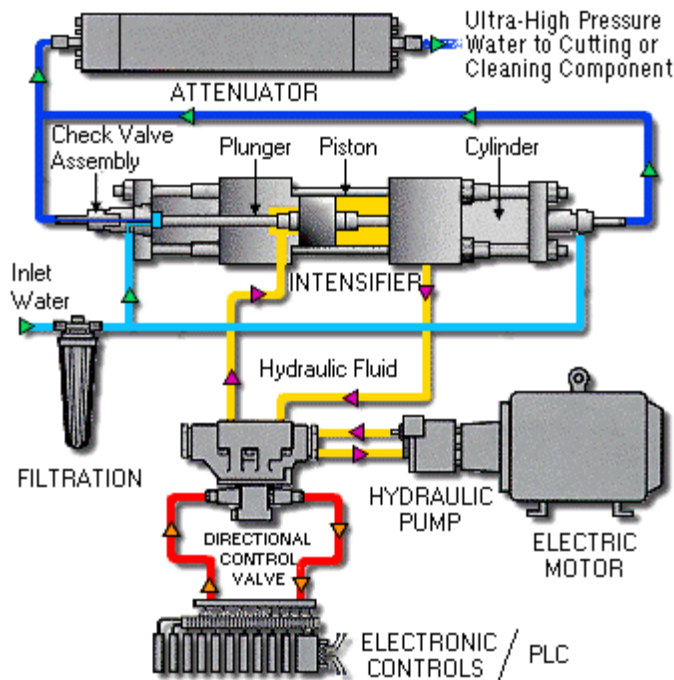
Obrada sa minimalnom upotrebom SHP-a (MQL) je specijalna tehnologija obrade rezanjem pri čemu se sredstvo za hlađenje i podmazivanje dozira u malim količinama u zonu obrade. Lubrikant se dozira pomoću specijalnog postrojenja koje koristi kompresovani zrak (5 bara i 25 l/min) radi pravljenja uljne magle u komori za mješanje zraka i emulzije (slika 7.).



Slika 7. Princip rada postrojenja i samo postrojenje za MQL

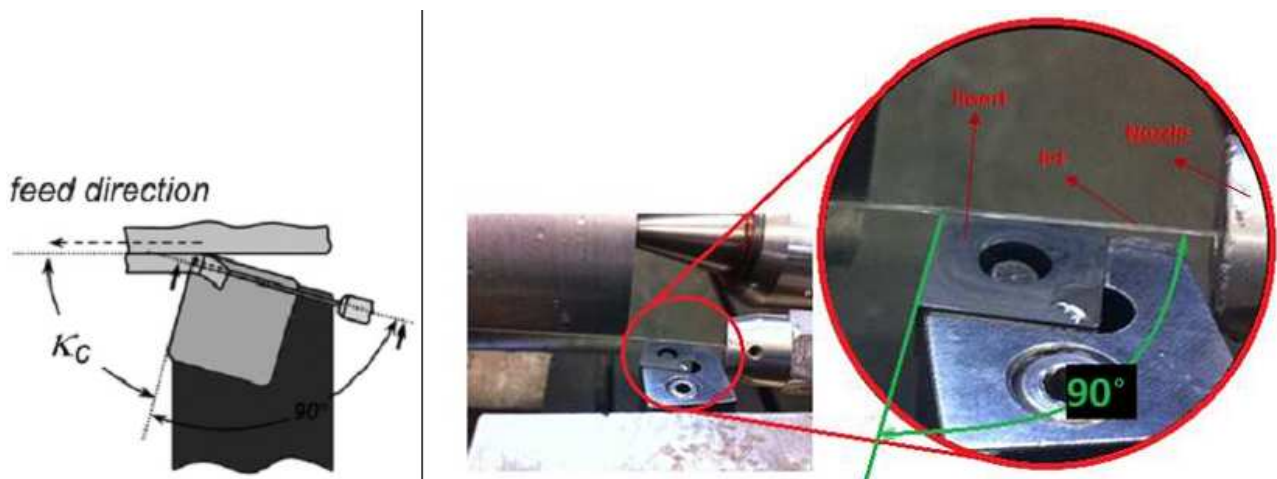
Prilikom doziranja SHP-a u malim količinama u zonu obrade alat je zaštićen od nagle promjene toplotnih opterećenja - "šokova". Time se izbjegavaju efekti širenja i skupljanja materijala i pojave prskotina na alatu i pucanja zaštitnih prevlaka. Zbog efekta spreja, alat je u toku obrade obavijen tankim slojem emulzije. Najveća prednost ove vrste obrade je minimalna potrošnja sredstava za hlađenje i podmazivanje, što smanjuje troškove obrade, dok karakteristike obrade ostaju iste kao i pri standardnoj obradi sa obilvanjem SHP-a. Potrošnja emulzije u postrojenjima za MQL se kreće od 1 do 50 ml/h, pri pritisku od 3.5 bara. Pri ekperimentalnim istraživanjima korišćen je protok od 25 ml/h. Još jedna od prednosti ove vrste doziranja SHP-a je uloga u zaštiti životne sredine.

Obrada potpomognuta mlazom visokog pritiska (HPJA) je napredna tehnologija obrade rezanjem. Uglavnom se koristi u visokoproduktivnim postupcima skidanja strugotine – grubu i srednju obradu, jer nije primjerena za finu obradu. Pri ovom postupku mlaz emulzije visokog pritiska se dovodi u zonu obrade čime se postiže efektivnije podmazivanje i hađenje zone obrade i efektivnije odnošenje strugotine. Emulzija se u zonu obrade može dovoditi preko posebnih mlaznica ili kroz specijalne otvore na alatu. Postrojenje za HPJA se proizvodi i montira nezavisno od alatne mašine. U novijim obradnim centrima ovo postrojenje je integrisano u samu mašinu. Glavni dio postrojenja je pumpa visokog pritiska, koja preko klipnih pojačivača stvara visoki pritisak SHP-a.



Slika 8. Šema postrojenja i postrojenje pumpe visokog pritiska

Konvencionalni visoki pritisci koji se koriste u današnjoj industriji sa ovom tehnologijom se kreću od 10 do 250 bara. Ukoliko se koristi nekonvencionalni pritisci viši od 250 bara, pored nabrojanih efekata pri obradi, mlaz visokog pritiska doprinosi i odvajanju strugotine sa obratka odnosno njenom efektivnijem deformisanju. Mlaznice koje se koriste pri obradi su izrađene od safira, radi smanjenja habanja, i različitih su prečnika.



Slika 9. Šema i postupak obrade HPJA

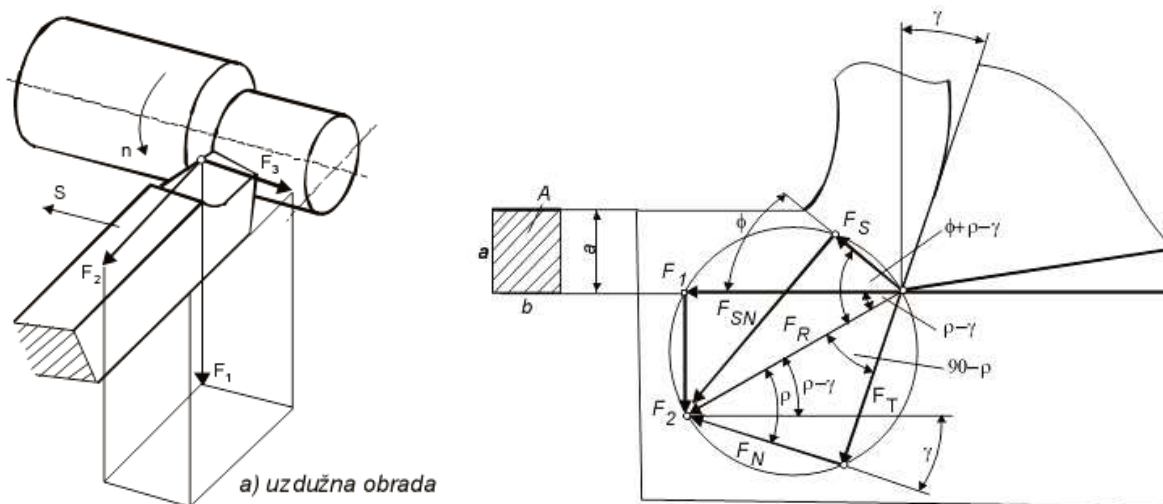
Prednosti ovog načina obrade ogleda se u smanjenju habanja alata, proširenju tehnoloških oblasti parametara obrade, povećanju proizvodnosti obrade, smanjenju temperature zone rezanja, uštedi sredstva za hlađenje i podmazivanje, smanjenju cijene obrade (postrojenje za visoki pritisak se, kroz uštede, otplati za otprilike 2 godine), i slični efekti. U toku eksperimenta korišćen je nekonvencionalni pritisak od  $p_{ml} = 500$  bar uz protok mlaza od 1.5 l/min.

Kao ostali ulazni parametri mijenjali su se tehnološki parametri: dubina rezanja, brzina obrade i korak obrade. Tehnološki parametri su prilagođeni srednjoj obradi uzdužnim stuganjem (N8). Brzine koje su se koristile u ekperimentu su više od standardnih i preporučenih brzina za ovu obradu, jer se želilo postići efikasnije skidanje strugotine. Ulazni parametri su varirali u različiom broju nivoa, i to:

- Dubina rezanja u tri nivoa  $a$  (mm): 1,5 ; 2,0 ; 2,5
- Brzina rezanja u tri nivoa  $v_c$  (m/min): 210, 320, 390
- Korak obrade u četiri nivoa  $f$  (mm/obr): 0,224 ; 0,28 ; 0,355; 0,4

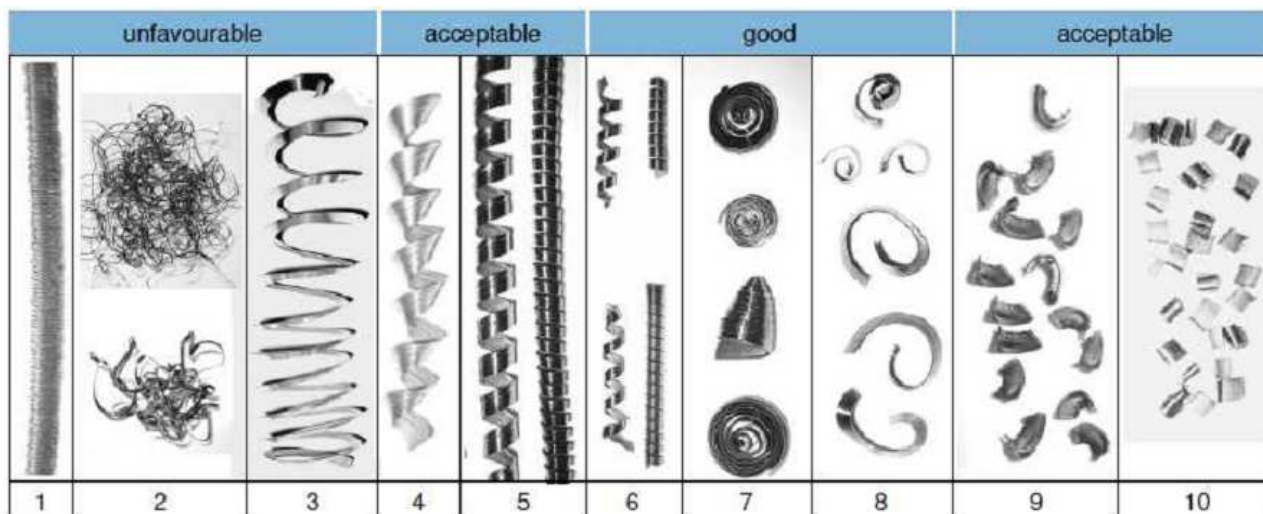
Mjerali su se sile rezanja, oblik strugotine, habanje na leđnoj površini i habanje na grudnoj površini, hrapavost površine u zavisnosti od habanja lata i oblik strugotine u zavisnosti od habanja alata. U prvom dijelu eksperimenta mjerile su se sile rezanja i pratilo se oblik strugotine za sve kombinacije ulaznih parametara i vrsta obrade. Nakon analize prvog dijela rezultata, donijet je zaključak o tehnološkim oblastima i domenima tehnoloških parametara u kojima obrada ima prihvatljive efekte. Nakon toga, u drugom dijelu eksperimenta vršena su mjerenja i praćenja habanja alata, i praćena je zavisnosti hrapavosti obrađene površine i oblika strugotine od veličine habanja alata.

Silama rezanja, kao bitnim parametrima obrade, se iskazuje ponašanje procesa rezanja. Od veličine sila rezanja zavisi snaga koja je neophodna za ostvarivanje procesa rezanja. Sile rezanja utiču na habanje alata i vibracije u procesu rezanja, a takođe utiču i na hrapavost obrađene površine. Poznavanje otpora rezanja ima efekat na definisanje obradivosti materijala, habanje reznih elemenata alata, temperaturu rezanja, tačnosti obrade, dimenzionisanja elemenata mašine, određivanje pogonske snage mašine itd. Veliki značaj imaju pokazatelji koji uzimaju u obzir silu prodiranja i silu posmičnog kretanja jer se preko istih mogu opisati vibracije u toku obrade i efekti habanja alata.



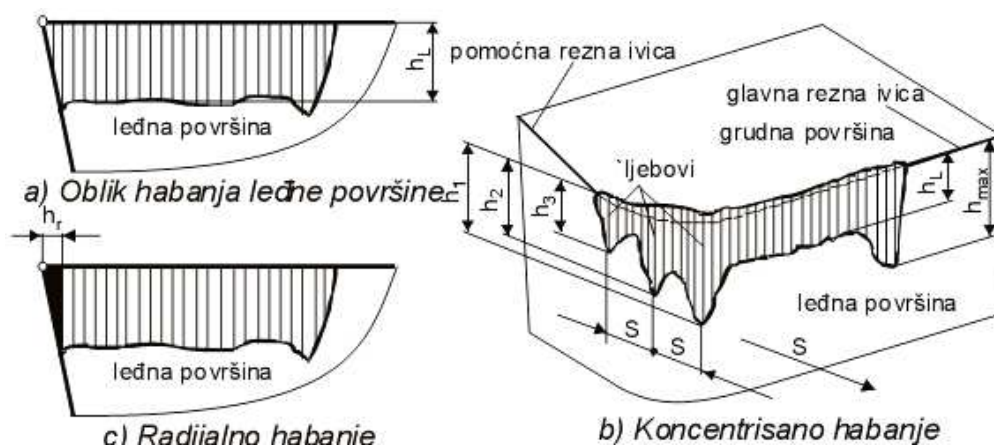
Slika 10. Sile i otpori rezanja

Oblik strugotine utiče na proces habanja alata i hrapavost obrađene površine, ali i na ostala oštećenja na elementima obradnog sistema. Različiti oblici strugotine su posljedica različitih procesa deformisanja u zoni obrade. Proces deformisanja i formiranja strugotine zavisi od geometrijskih i tehnoloških parametara parametara obrade. Naime, nepovoljna strugotina oštećuje alat, doprinosi habanju alata i oštećuje obrađenu površinu. Nepovoljna strugotina predstavlja smetnju pokretnim elementima i stvara probleme prilikom odnošenja iz zone obrade i transporta iz obradnih centara. Oblik i izgled strugotine govori o temperaturi zone obrade, habanju alata, vibracijama i hrapavosti obrađene površine.



Slika 11. Prihvatljivost oblika strugotine

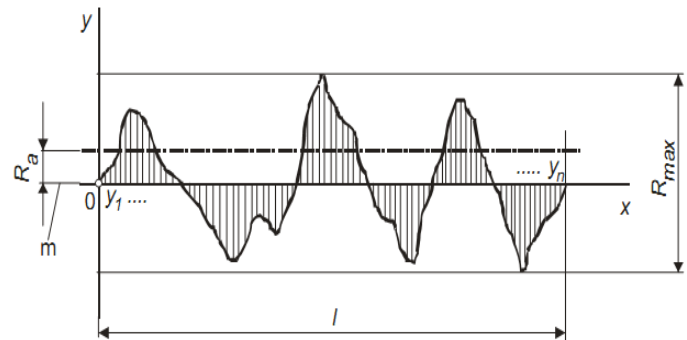
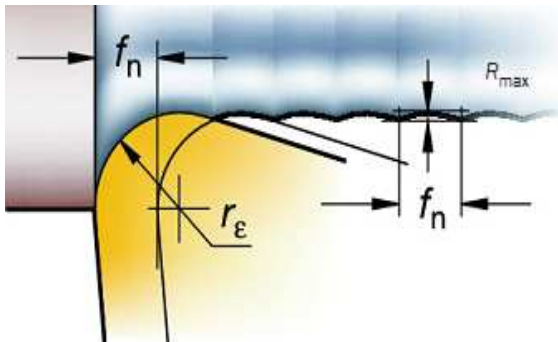
Habanje alata je direktni pokazatelj prihvatljivosti i “dobrote” procesa obrade. Na habanje alata utiče čitav niz karakteristika obrade, materijala alata i materijala obratka. Habanje alata direktno utiče na troškove obrade i čitav niz ekonomskih efekata obrade. Cilj savremenih tehnologija obrade, kao i tehnologija nanošenja prevlaka je produžiti vijek trajanja alata – postojanost alata. Habanje alata se iskazuje preko krivih habanja ili krivih inteziteta habanja.



Slika 12. Koncentrisano habanje alata

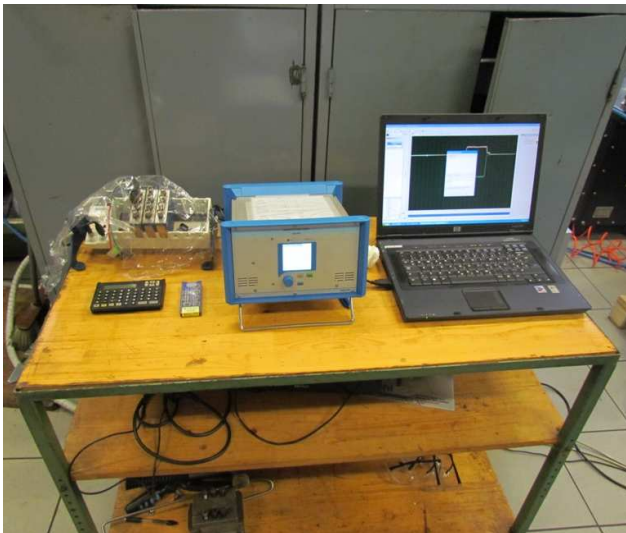
Kriterijum zatupljenja alata, na osnovu kojeg se definiše postojanost alata, uzrokuje trenutak prekida procesa rezanja i zamjene alata novim ili preoštrim. Kod definisanja kriterijuma zatupljenja alata treba: izbjegavati nepotrebna oštećenja alata (krzanje ili lom alata koje nastaje pri visokom stepenu pohabanosti alata), obezbjediti zahtjevani kvalitet obrade, tačnost obrade i kvalitet obrađene površine, te obezbediti maksimalnu ekonomičnost i proizvodnost obrade i sl.

Površinska hrapavost je direktni pokazatelj kvaliteta obrade. Hrapavost obrađene površine je skup svih neravnina koje obrazuju reljef površine u granicama odabranog isečka takve veličine da su eliminisane greške oblika i valovitosti. Hrapavost površine zavisi od uslova rezanja, posebno oblika alata, stanja reznih ivica alata, habanja reznih elemenata alata, naslage, vibracija, krutosti elemenata tehnološkog sistema i sl. Analitički se opisuje preko obrazaca u kojima konfiguriraju korak obrade i radijus vrha alata. Za praćenje hrapavosti obrađene površine postoji više od 30 parametara. Tri osnovna parametra hrapavosti su:  $R_a$  - srednje aritmetičko odstupanje profila od srednje linije profila,  $R_z$  - srednja visina neravnina i  $R_{max}$  - maksimalna visina neravnina.



Slika 13. Uticaj parametara procesa na hrapavost obrađene površine

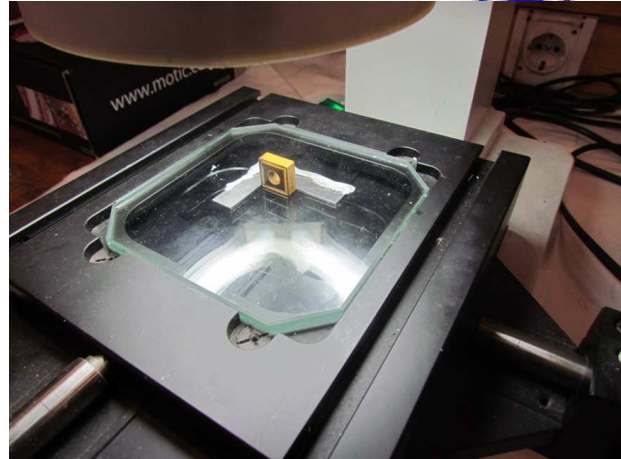
Oprema za mjerenje sila rezanja se sastojala od mjernog lanca za mjerenje sila rezanja "KISTLER". U okviru mjernog lanca nalaze se dinamometar, konekzioni kablovi, amplifajer za koverziju signala i softver za praćenje i obradu signala mjerenja. Dinamometar je trokomponentni i njime mogu da se mjere tri komponente sile rezanja: glavna sila rezanja  $F_c$ , sila prodiranja  $F_p$  i sila posmičnog kretanja  $F_f$ .



Slika 14. Aparatura za mjerenje sila rezanja "KISTLER"

Praćenje i mjerenje habanja alata se vrši pomoću alatnog mikroskopa MITOTOYO TM. U sklopu uređaja nalazi se i CCD kamera sa odgovarajućim računarskim softverom za obradu slika. Alat za mjerenje mikroskop je dizajniran za praćenje habanja rezne oštrice i rezne geometrije, analize strukture strugotine, analize i ispitivanja kvalitete površine. Glavne karakteristike mikroskopa MITOTOYO TM su:

- Robustan i stabilan sa propusnim svjetlosnim izvorom,
- 30 zoom objektiv (2x) i okulara (15x), 75 x zoom objektiv u (5x) i okulara (15x),
- Tačnost pozicioniranja 0,001 mm,
- Mogućnost stezanja mjerenje stol s T-utora,
- Softver za digitalne snimanja i obrade (Moticlimages Plus 2.0).



Slika 15. Alatni mikroskop MITOTOYO

Hrapavost obrađene površine je mjerena pomoću mjernog uređaja MITOTOYO SURFTEST SJ 301. Na uređaju je moguće odabrati različite mjerne funkcije, podesiti uslove mjerenja a mogu se odabrati parametri hrapavosti koje korisnik želi da prati. Rezultati mjerenja se mogu prenijeti na računar putem vanjske RS232 veze. Mjerenje i prikaz rezultata mjerenja može odgovarati DIN, ISO, ANSI ili JIS standardima.



Slika 16. Uređaj za mjerenje hrapavosti MITOTOYO SURFTEST SJ 301

## 6. Rezultati



Slika 17. Postupak mjerenja sile rezanja pomoću dinamometra

Mjerene su tri komponente sile rezanja, za sve kombinacije ulaznih tehnoloških parametara i za sva tri tipa obrade. Na slici 17. je prikazana mašina i dinamometar za mjerenje sile, čiji su izmjereni signali obrađeni u softveru LabVIEW, dok su rezultati obrađeni u programu MatLab. U tabelama su prikazane vrijednosti izmjerenih komponenti sile rezanja: glavna sila  $F_c$ , sila posmičnog kretanja  $F_f$  i sila prodiranja  $F_p$ .

Tabela 2. Vrijednosti sile rezanja za obradu sa oblivanjem

Cutting with flood cooling										
f	vc	a = 2,5 mm			a = 2,0 mm			a = 1,5 mm		
		Fc	Ff	Fp	Fc	Ff	Fp	Fc	Ff	Fp
0.224	210 m/min	1237	586	411	1018	520	372	805	418	326
0.280		1419	607	451	1164	542	407	944	438	356
0.355		1834	716	559	1468	586	477	1156	481	418
0.400		2021	780	619	1609	615	518	1165	489	423
0.224	320 m/min	1211	570	409	989	448	341	798	393	314
0.280		1406	603	452	1137	478	379	930	399	320
0.355		1769	647	528	1451	528	452	1165	419	394
0.400		1976	696	580	1599	536	477	1265	443	430
0.224	390 m/min	1195	541	386	982	466	355	772	360	311
0.280		1381	572	431	1136	495	389	919	382	339
0.355		1748	641	527	1445	541	460	1149	427	402
0.400		1943	693	589	1598	556	493	1269	452	438



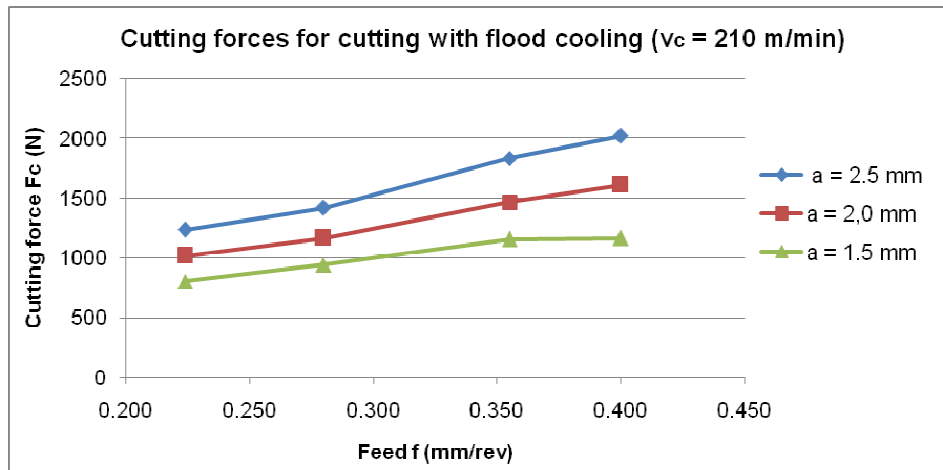
Tabela 3. Vrijednosti sila rezanja za obradu sa MQL

Minimal Quantity Lubrication (MQL)										
f	vc	a = 2,5 mm			a = 2,0 mm			a = 1,5 mm		
		Fc	Ff	Fp	Fc	Ff	Fp	Fc	Ff	Fp
0.224	210 m/min	1203	551	400	995	477	358	825	417	339
0.280		1404	592	446	1156	511	398	939	442	362
0.355		1800	696	551	1469	568	475	1187	477	420
0.400		2011	758	611	1623	602	516	1281	499	455
0.224	320 m/min	1195	544	403	964	359	286	785	391	325
0.280		1388	582	453	1145	489	394	907	410	351
0.355		1755	657	543	1446	535	467	1136	445	412
0.400		1955	725	615	1603	579	517	1257	466	442
0.224	390 m/min	1205	576	441	972	427	342	735	318	283
0.280		1384	601	482	1130	460	382	849	343	316
0.355		1752	664	578	1422	500	451	1085	379	370
0.400		1938	715	654	1581	535	500	1191	389	403

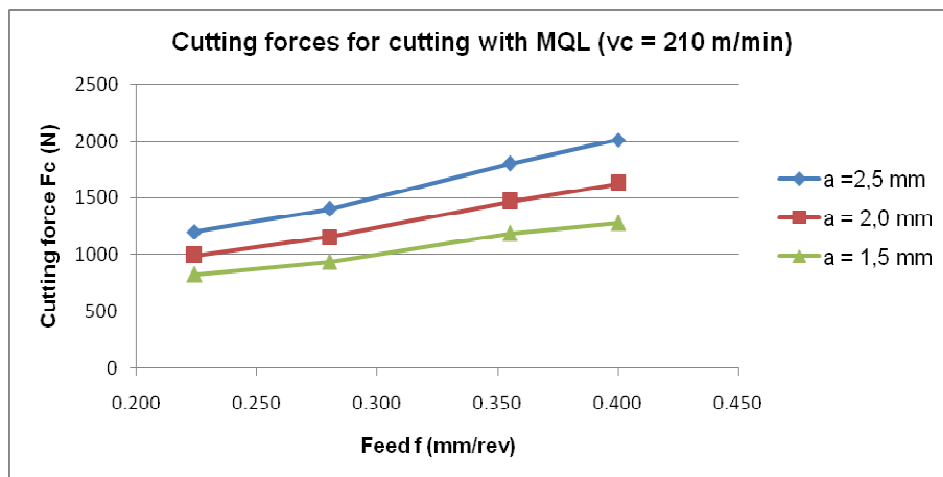
Tabela 4. Vrijednosti sila rezanja za obradu sa HPJA

High Pressure Jet Assisted Machining (p = 500 bar)										
f	vc	a = 2,5 mm			a = 2,0 mm			a = 1,5 mm		
		Fc	Ff	Fp	Fc	Ff	Fp	Fc	Ff	Fp
0.224	210 m/min	1242	577	401	1015	455	346	774	371	311
0.280		1424	599	445	1168	483	388	898	386	337
0.355		1809	672	547	1471	541	464	1127	420	403
0.400		2015	732	606	1634	570	504	1248	450	441
0.224	320 m/min	1211	528	401	998	432	347	764	354	306
0.280		1394	569	450	1142	453	386	877	373	337
0.355		1770	641	542	1455	503	454	1108	397	395
0.400		1966	703	600	1569	523	497	1240	436	437
0.224	390 m/min	1191	536	409	974	422	348	757	344	302
0.280		1382	558	453	1135	449	386	865	358	334
0.355		1763	617	539	1431	499	459	1106	388	343
0.400		1985	698	610	1588	550	511	1224	422	428

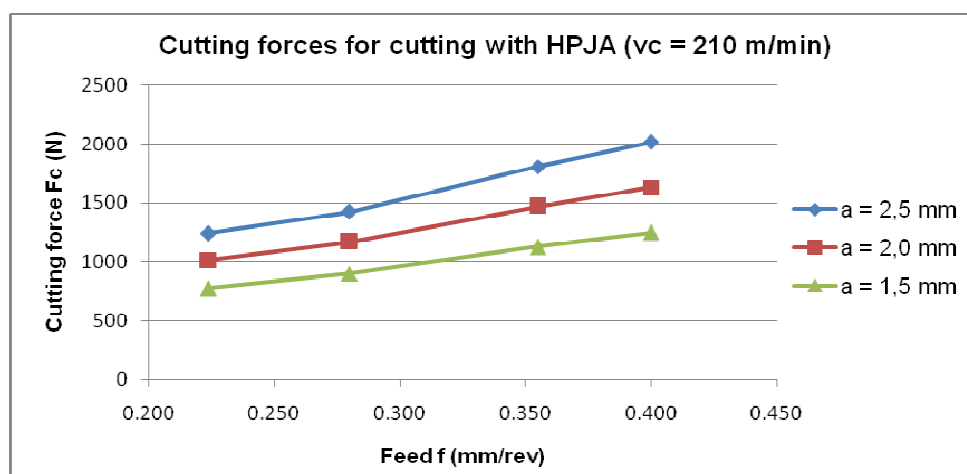
Analitički i dijagramski prikaz vrijednosti sila rezanja, prikazuje porast sile sa porastom dubine rezanja i sa porastom koraka obrade. Sa porastom brzine rezanja, sile rezanja padaju, jer se time izbjegava pojava naslage na alatu.



Slika 18. Zavisnost glavne sile rezanja pri obradi oblivanjem od koraka i dubine rezanja



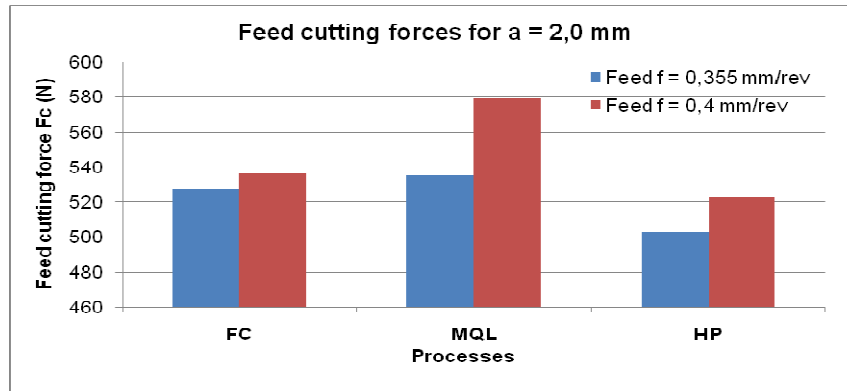
Slika 19. Zavisnost glavne sile rezanja pri obradi sa MQL od koraka i dubine rezanja



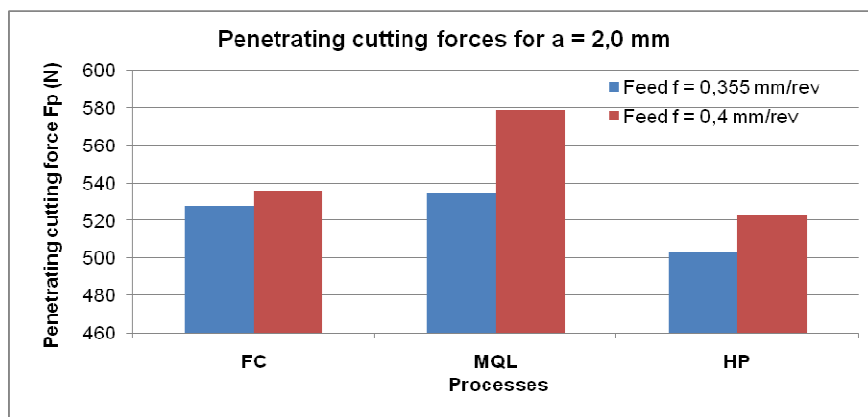
Slika 20. Zavisnost glavne sile rezanja pri obradi sa HPJA od koraka i dubine rezanja



Na sljedećim slikama su prikazane uporedne vrijednosti sila prodiranja i sile posmičnog kretanja. Sa dijagrama se vidi da su navedene sile za nekoliko procenata manje pri obradi HPJA nego prilikom obrade sa oblijanjem odnosno pri obradi sa MQL.

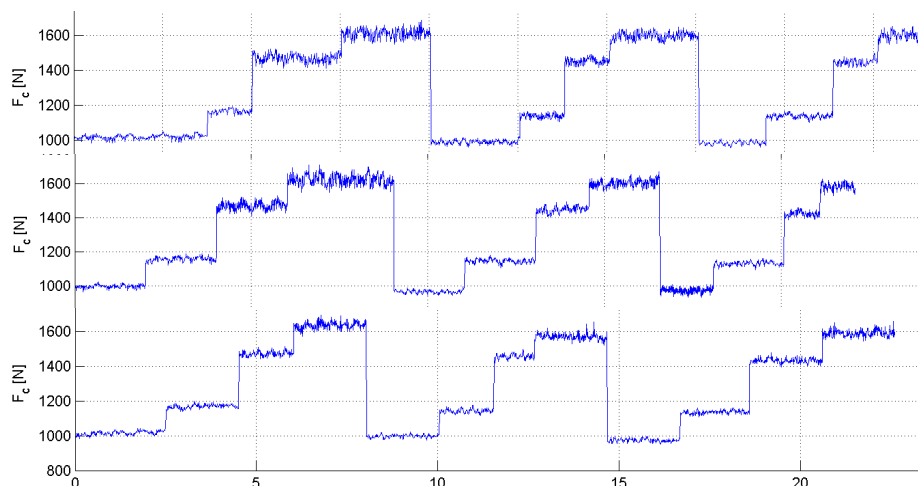


Slika 21. Uporedni prikaz vrijednost sile posmičnog kretanja



Slika 22. Uporedni prikaz vrijednost sile prodiranja

Signal sile prodiranja i sile posmičnog kretanja je stabilniji prilikom obrade sa HPJA nego prilikom obrade sa oblijanjem i obrade sa MQL.



Slika 23. Uporedni prikaz signala sila za obradu oblijanjem, MQL i HJPA

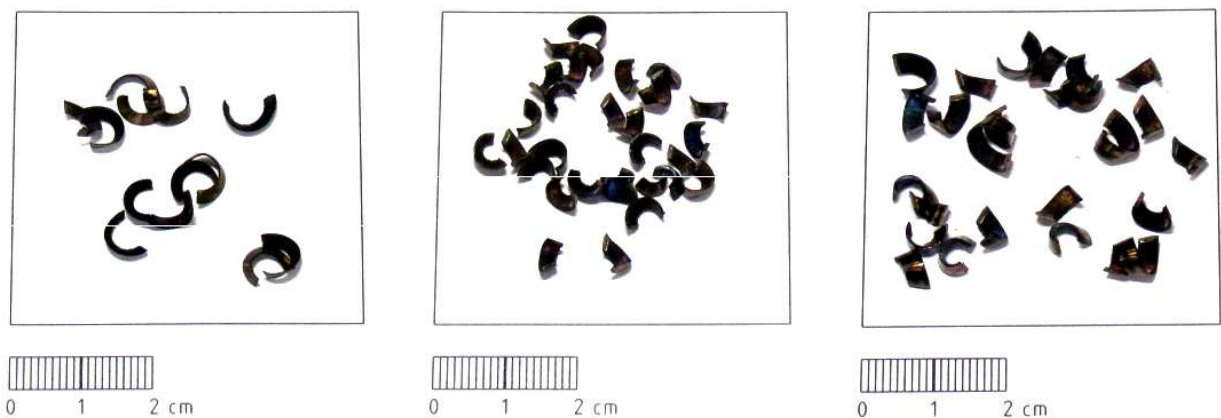


Slika 34. Nastanak nepovoljne strugotine pri obradi sa MQL

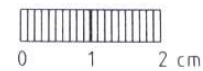
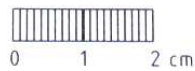
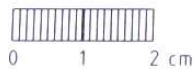
Oblik strugotine je praćen prilikom svake obrade, odnosno pri svakoj korišćenoj kombinaciji tehnoloških parametara i tipa obrade. Razlika u obliku strugotine je vidljiva. Pojedini oblici strugotine, dobijeni različitim vrstama obrade, su prikazani na slikama. Od oblika strugotine zavisi širina domena tehnoloških parametara.



Slika 25. Zavisnost oblika strugotine od promjene koraka i dubine pri obradi sa oblivanjem



Slika 26. Zavisnost oblika strugotine od promjene koraka i dubine pri obradi sa MQL

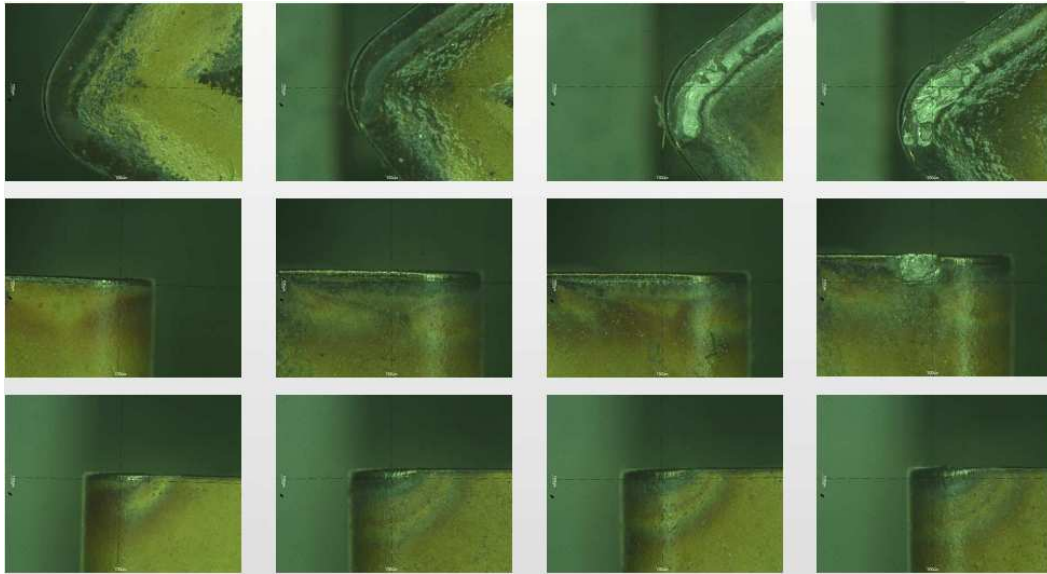


Slika 27. Zavisnost oblika strugotine od promjene koraka i dubine pri obradi HPJA

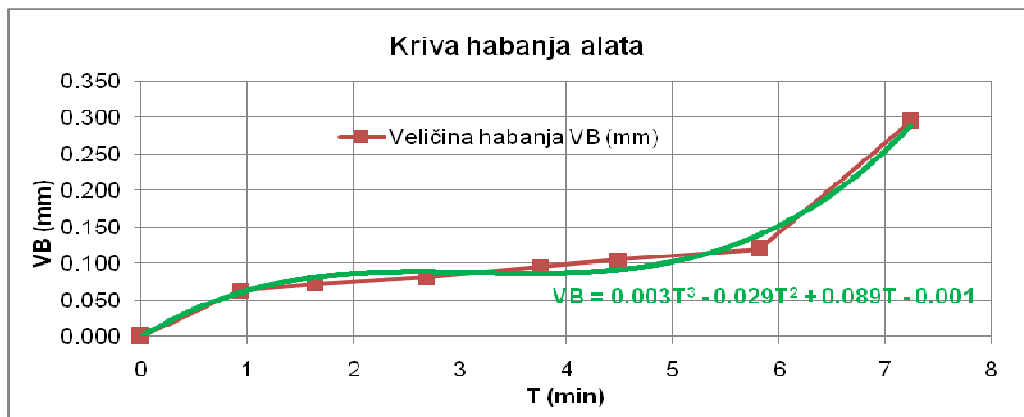


Slika 28. Postupak mjerenja habanja alata i hrapavosti površine

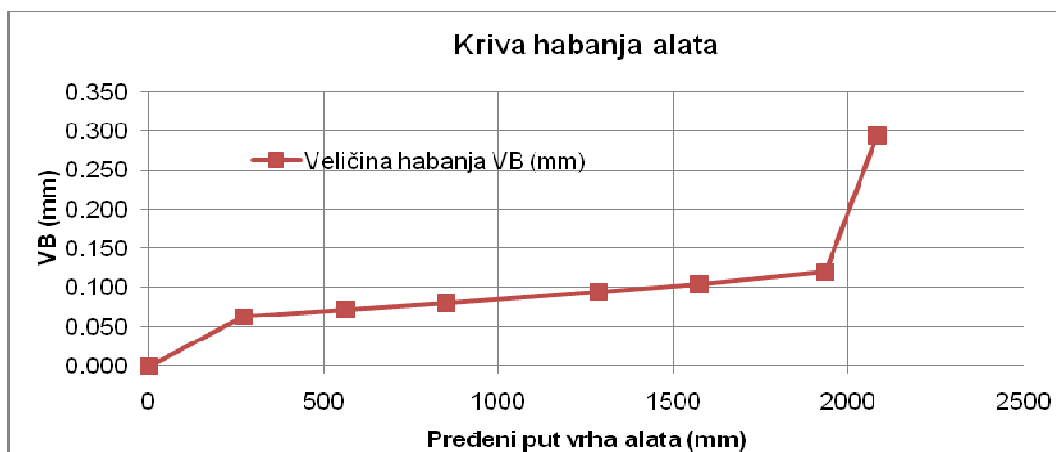
Za unaprijed određene tehnološke parametre, izvršeno je praćenje i mjerenje habanja alata. Habanje je praćeno na glavnoj i pomoćnoj leđnoj površini, te na grudnoj površini. Prilikom praćenja formirane su odgovarajuće krive habanja. U toku praćenja i mjerenja habanja mjerena je hrapavost obrađene površine. Kao parametri hrapavosti praćeni su srednja visina neravnina i maksimalna visina neravnina. Analizom dijagrama se može zaključiti da sa porastom habanja raste i srednja visina neravnina. Za svaki postupak mjerenja habanja, pomoću alatnog mikroskopa MITUTOYO, preuzete su odgovarajuće slike oštrice reznog alata.



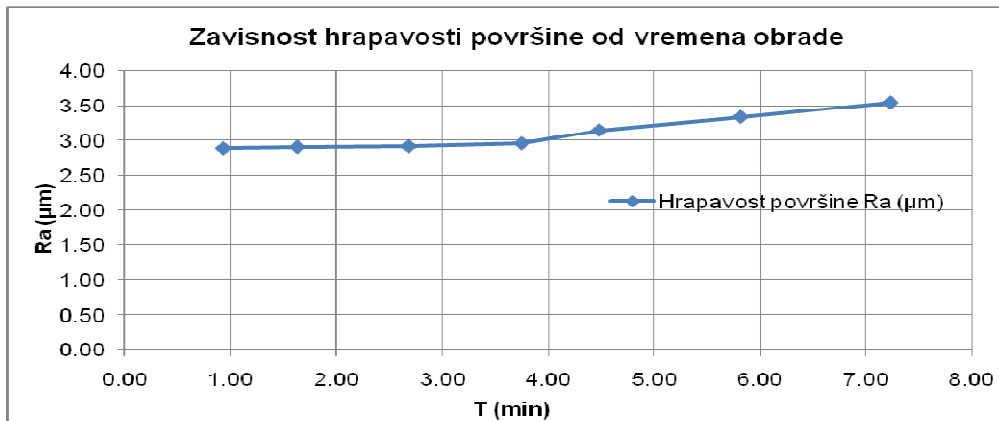
Slika 29. Pohabanost karakterističnih površina na alatu u zavisnosti u toku vremena pri obradi sa oblivanjem



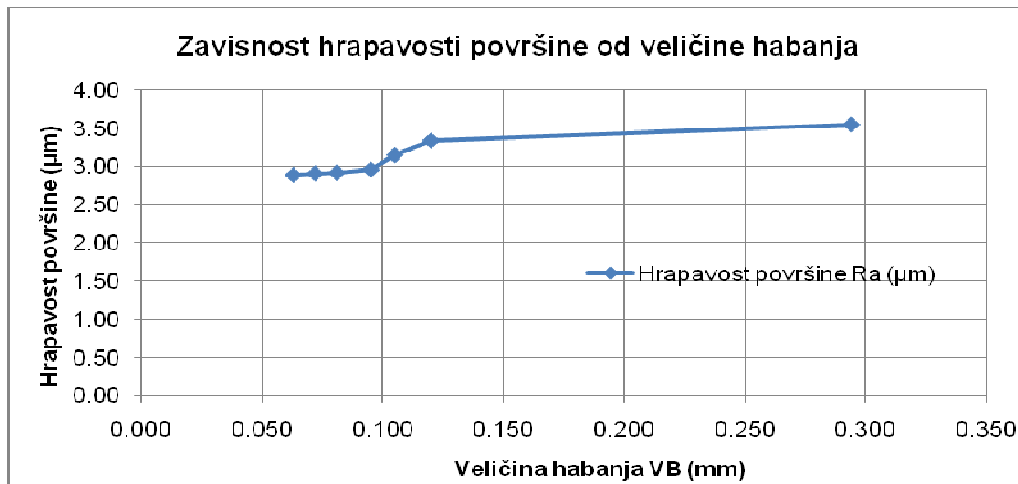
Slika 30. Kriva habanja – zavisnost traga habanja od vremena obrade za obradu sa oblivanjem



Slika 31. Zavisnost traga habanja od pređenog puta vrha alata za obradu sa oblivanjem



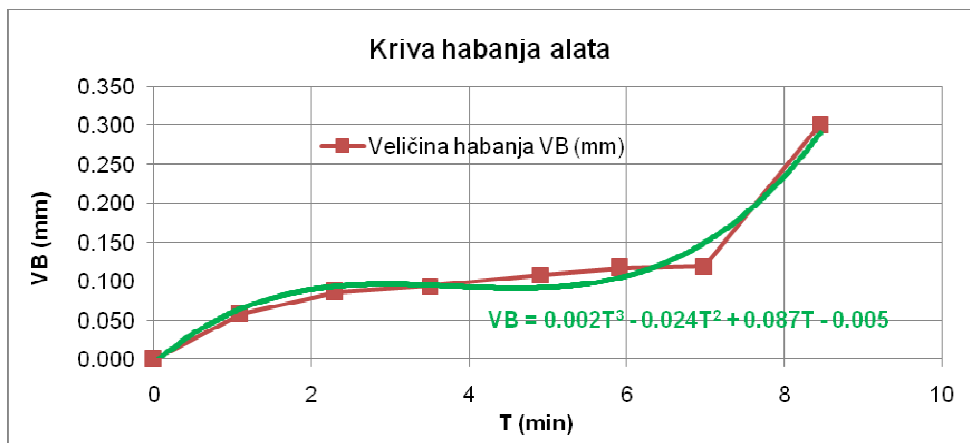
Slika 32. Zavisnost srednje visine neravnina od vremena pri obradi sa oblivanjem



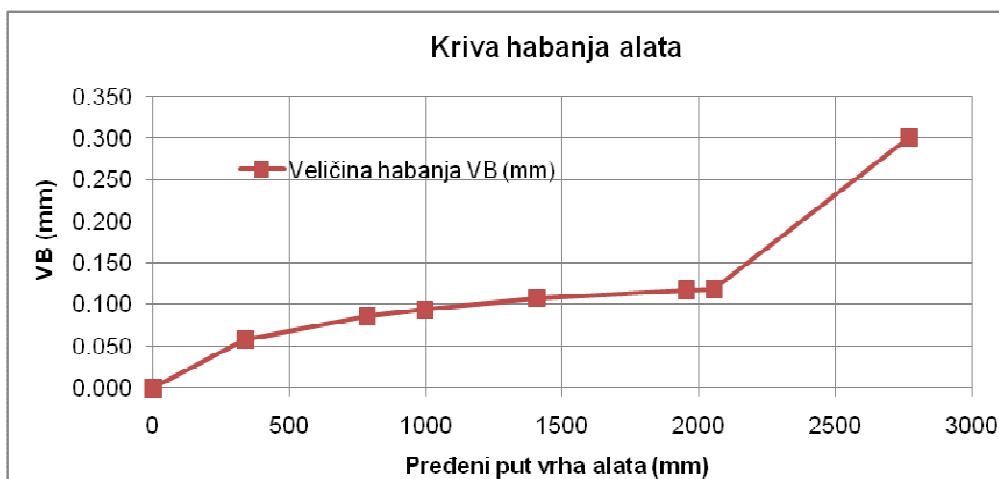
Slika 33. Zavisnost srednje visine neravnina od habanja pri obradi sa oblivanjem



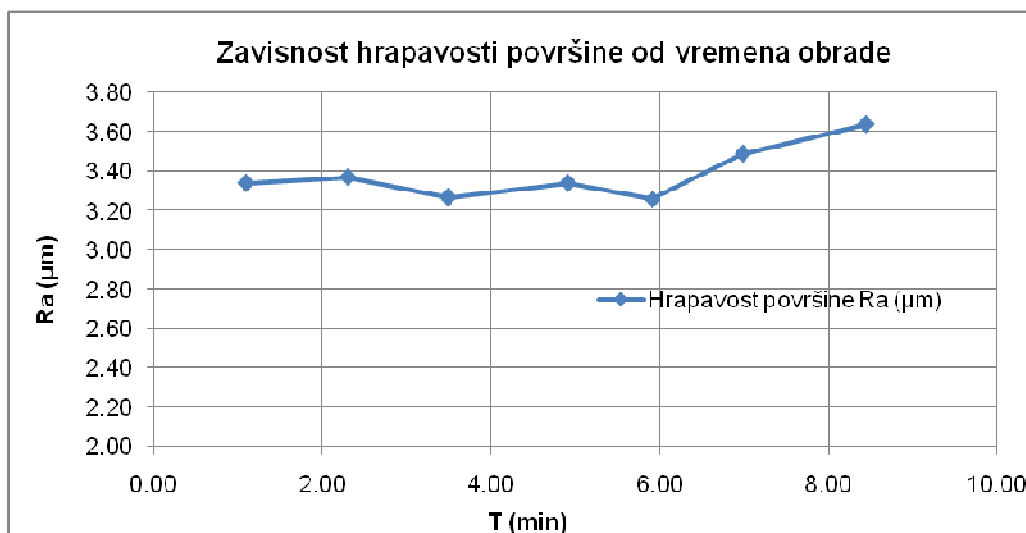
Slika 34. Pohabanost karakterističnih površina na alatu u zavisnosti u toku vremena pri obradi sa MQL



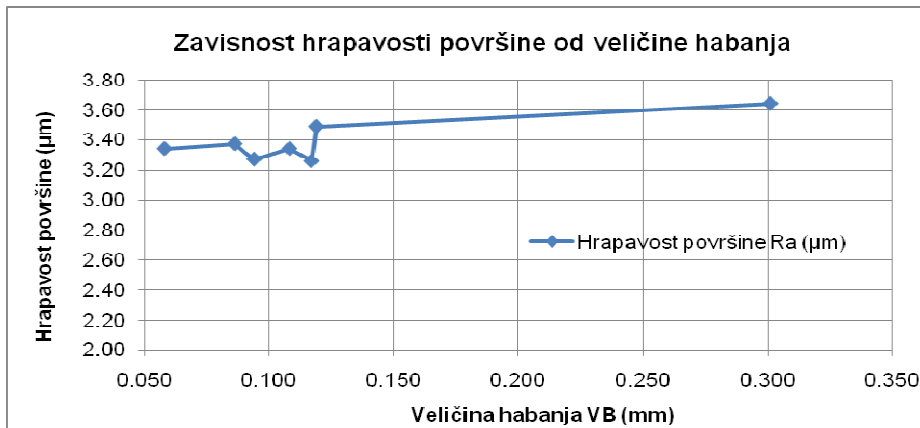
Slika 35. Kriva habanja – zavisnost traga habanja od vremena obrade za obradu sa MQL



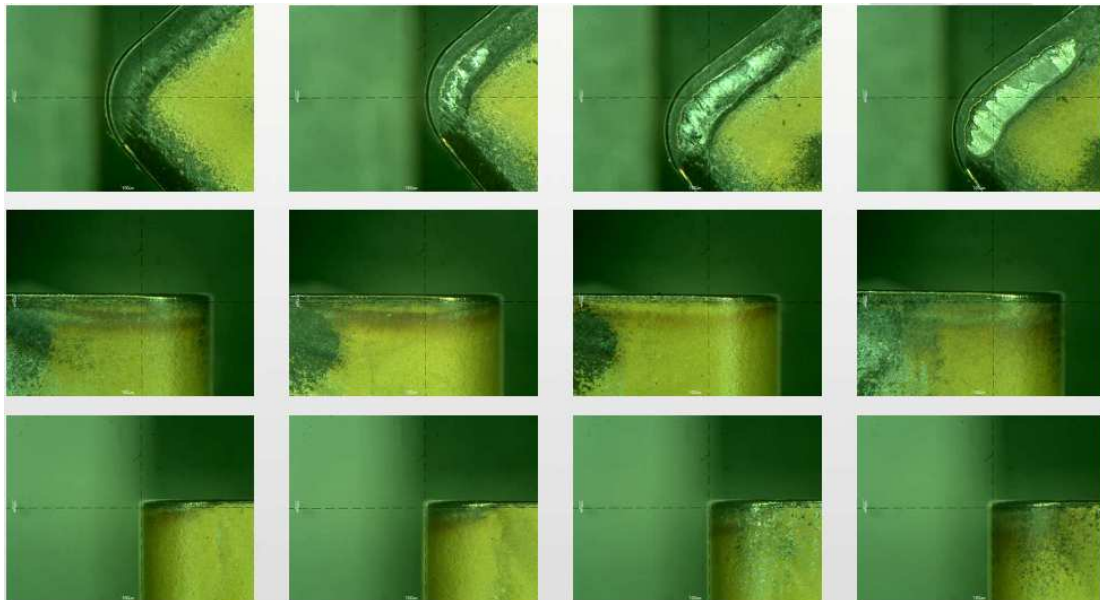
Slika 36. Zavisnost traga habanja od pređenog puta vrha alata za obradu sa obilivanjem



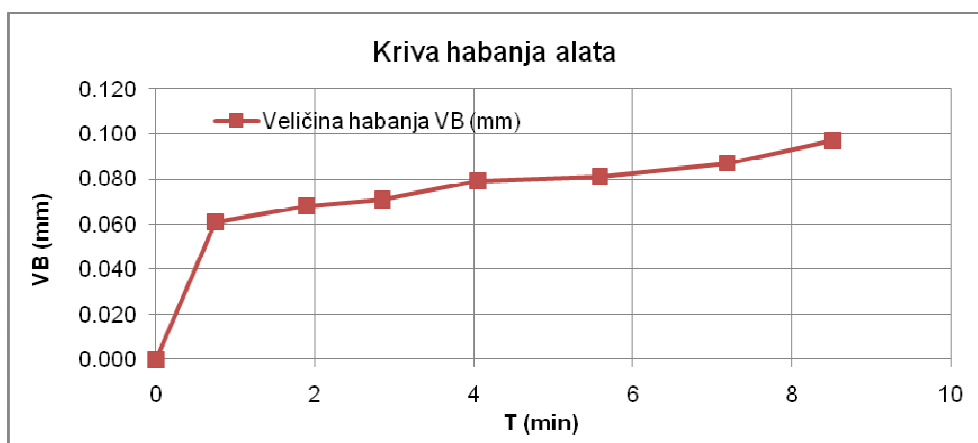
Slika 37. Zavisnost srednje visine neravnina od vremena pri obradi sa MQL



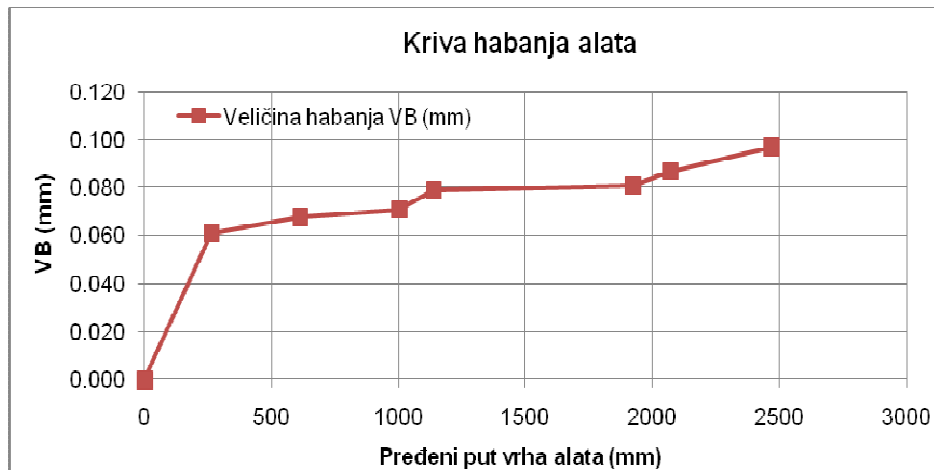
Slika 39. Zavisnost srednje visine neravnina od habanja pri obradi sa MQL



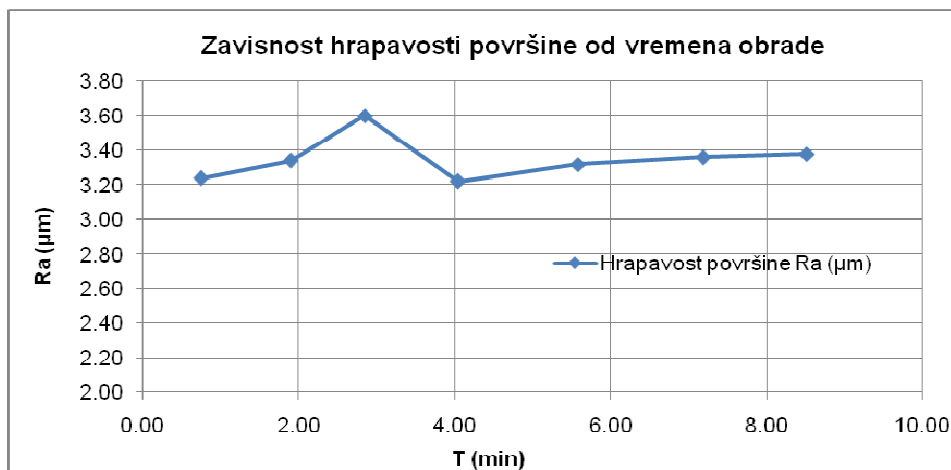
Slika 40. Pohabanost karakterističnih površina na alatu u zavisnosti u toku vremena pri obradi HJPA



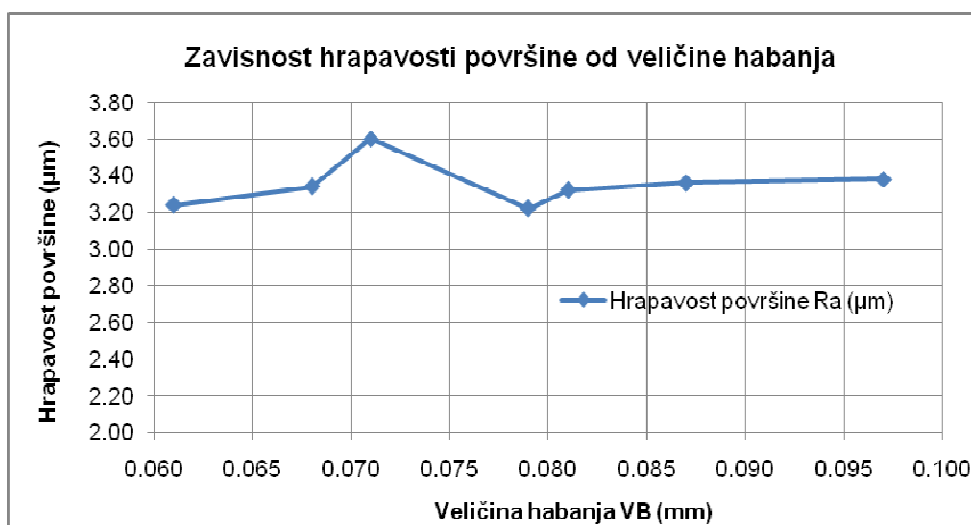
Slika 41. Kriva habanja – zavisnost traga habanja od vremena obrade za obradu HPJA



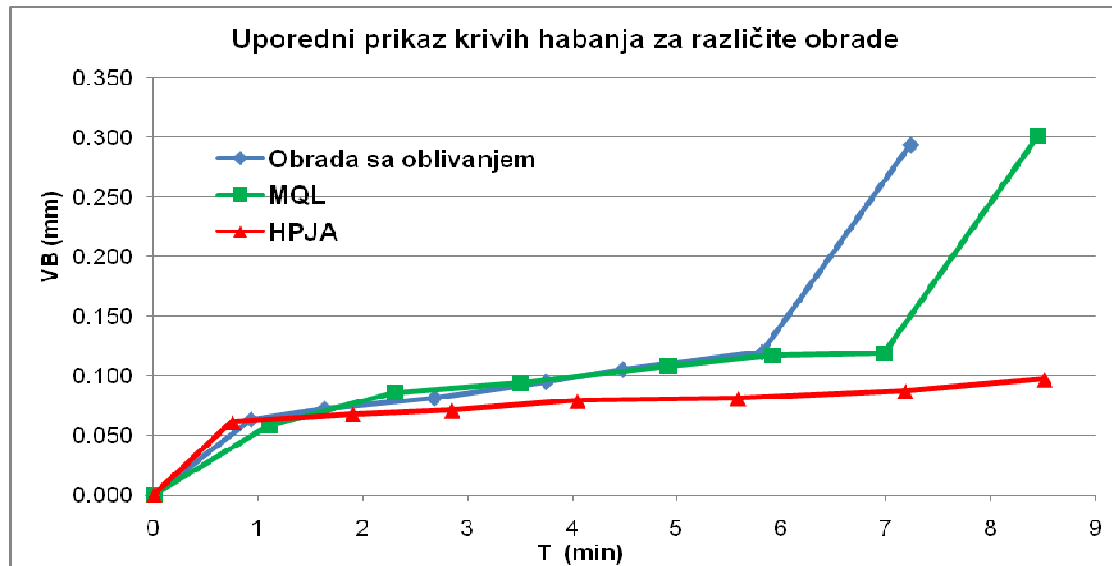
Slika 42. Zavisnost traga habanja od pređenog puta vrha alata za obradu sa oblivanjem



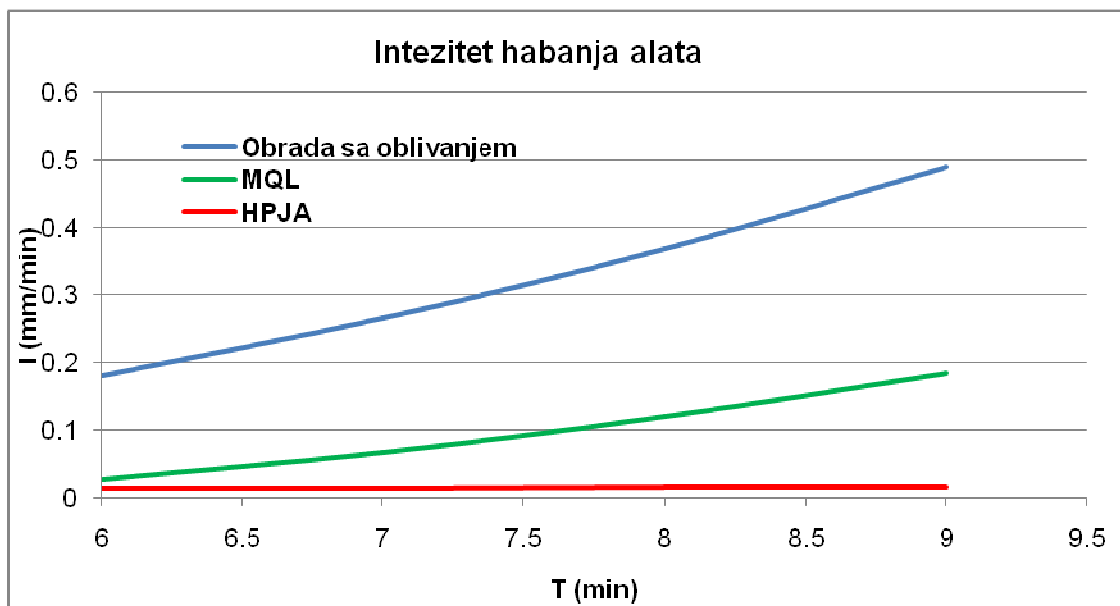
Slika 43. Zavisnost srednje visine neravnina od vremena pri obradi sa HPJA



Slika 44. Zavisnost srednje visine neravnina od habanja pri obradi sa HPJA



Slika 45. Uporedni prikaz krivih habanja za različite tipove obrade



Slika 46. Uporedni prikaz inteziteta habanja za različite tipove obrade

Uporednim prikazom krivih habanja, kao i ostalih parametra obradivosti, može se zaključiti da obrada sa oblivanjem ima najlošije rezultate, dok obrada potpomognuta mlazom visokog pritiska daje najbolje rezultate. Analizom inteziteta habanja primjećuje se da obrada oblivanjem ima daleko najlošije rezultate.

Kao zaključak eksperimentalnih istraživanja može se dati konstatacija da obrada potpomognuta sa mlazom visokog pritiska daje najveću postojanost alata. Kod ove obrade sile prodiranja i posmičnog kretanja su manje za nekoliko procenata, dok su vibracije pri obradi smanjenje. Ekomonski aspekt ove obrade se ogleda u velikim investicijama u postrojenje, ali koje se korisniku isplate u određenom vremenskom periodu korišćenja ove tehnologije. Uštede se postižu kroz alat, energiju i upotrebu sredstva za hlađenje i podmazivanje.



## 7. Reference

- [1] Janez Kopač, ODREZAVANJE – TEORETIČNE OSNOVE, Univerza v Ljubljana, Fakulteta za strojništvo, Slovenia, 2004.
- [2] Gordana Globočki-Lakić, OBRADA REZANJEM – TEORIJA, MODELIRANJE, SIMULACIJA, Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet Banja Luka, Bosna i Hercegovina, 2010.
- [3] Hinko Muren, ODREZAVANJE IN ODNAŠANJE, Univerza v Ljubljana, Fakulteta za strojništvo, Slovenia, 1995.
- [4] Wit Grzesik, ADVANCED MACHINING PROCESSES OF METALLIC MATERIALS: THEORY, MODELLING AND APPLICATION, Elsevier B. V., Netherland, 2008.
- [5] D. Kramar, J. Kopac, HIGH PRESSURE COOLING IN THE MACHINING OF HARD-TO MACHINE MATERIALS, Journal of Mechanical Engineering 55(2009)11, 685-694
- [6] D. Kramar, P. Krajnik, J. Kopac, CAPABILITY OF HIGH PRESSURE COOLING IN THE TURNING OF SURFACE HARDENED PISTON RODS, Journal of Materials Processing Technology, 210 (2010) 212–218
- [7] C. Courbon, D. Kramar, P. Krajnik, F. Pusavec, J. Rech, J. Kopac, INVESTIGATION OF MACHINING PERFORMANCE IN HIGH-PRESSURE JET ASSISTED TURNING OF INCONEL 718: AN EXPERIMENTAL STUDY, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 49 (2009) 1114–1125.
- [8] G. L. Globocki, B. Sredanovic, and et., VECTOR BASED APPROACH IN DEFINING OF UNIVERSAL MACHINABILITY, IN-TECH 2010 International Conference on Innovative Technology in Design, Manufacturing and Production, Prague, 2010
- [9] G. L. Globocki, B. Sredanovic, B. Nedic, Dj. Cica, D. Catic, DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL OF UNIVERSAL MACHINABILITY OF MATERIALS, Journal of the Balkan Tribological Association, 4 (2011)

## 8. Zaključci

Realizovani program studentske prakse, koja je obavljena u Laboratoriji za rezanje na Mašinskom fakultetu u Ljubljani, uspješno je izveden. Program studentske prakse koji se odvija u sklopu TEMPUS projekta je veoma koristan jer dopušta sticanje novih znanja i iskustava, ali i uspostavljanje poslovnih veza. Stručnom praksom se kompletiraju teoretska znanja. Realizovana studentska praksa u LABOD-u je bila vezana za konkretna laboratorijska i stručna istraživanja u oblasti obrade metala rezanjem.

Glavni naglasak istraživanja u toku realizacije prakse je bio na analizi obradivosti materijala pri različitim pristupima obradi rezanjem. Nепrekidan i ubrzan razvoj industrije diktira razvoj novih i usavršavanje postojećih materijala koji mogu da odgovore specifičnim zahtjevima u eksploataciji. Ovaj razvoj neminovno prati i razvoj novih obradnih sistema, alata, SHP-a, ali i podstiče istraživanja u oblasti obradivosti materijala. U toku realizacije prakse, uočena je problematika standardnih tehnologija i prednost novih tehnologija obrade metala.

Tokom obavljanja prakse, koristio sam se najsavremenijom mjernom opremom i radio na savremenim postrojenjima i mašinama. Rezultati istraživanja su više nego očiti, napredne tehnologije obrade rezanjem se sve više razvijaju, a u određenom vremenskom periodu, jako su isplative za metaloprerađivače. Pri upotrebi savremenih metoda obrade povećava se iskorišćenje alata i uložene energije, a troškovi vezani za SHP se višestruko umanjuju.



U toku prakse, praktično sam se upoznao sa metodikom i principima izvođenja inženjerskih eksperimenata, problematikom mjerenja, problematikom kombinovanja mjerenja i slično. Jedan od aspekata ocjene podobnosti neke tehnologije obrade metala, je ocjena sa aspekta ekologije odnosno zaštite životne sredine uz što veće iskorišćenje energije. Dio eksperimentalnih istraživanja su svakako vezana za navedena polja inženjerstva. Potrebno je napomenuti da je moje prijašnje iskustvo produbljeno kroz učešće na sastancima katedre, pri čemu je tema bila realizacija i prijava međunarodnih i domaćih projekata.

Dobri rezultati se ogledaju u količini usvojenih informacija i znanja o savremenim tokovima u tehnologiji obrade rezanjem, te realizovanim eksperimentalnim istraživanjima i stručnim radom. Usvojena znanja će svakako doprinjeti unapređenju vlastitog rada i stručnosti. Uspostavljenje poslovne veze svakako će biti od koristi u realizaciji buduće saradnje, realizacije međunarodnih projekata, a time i razvoja Mašinskog fakulteta u Banjoj Luci.

**Datum:** 28.12.2011.god.

**Mjesto:** Ljubljana

**Potpis studenta:**

---

**Potpis industrijskog mentora:**

---