

# NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU MAŠINSKOG FAKULTETA U NIŠU

Predmet: Izveštaj Komisije za pregled, ocenu i odbranu doktorske disertacije

Odlukom Nastavno-naučnog veća Mašinskog fakulteta u Nišu, broj 612-471-4/2009 od 5.6.2009. godine, imenovani smo za članove Komisije za pregled, ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidata **mr Predraga Jankovića**, pod naslovom:

## MODELIRANJE PROCESA SEČENJA ABRAZIVNIM VODENIM MLAZOM I FORMIRANJE TEHNOLOŠKOG PROCESORA

Nakon pregleda doktorske disertacije, saglasno Zakonu o visokom obrazovanju i Statutu Mašinskog fakulteta u Nišu, Komisija podnosi sledeći

### IZVEŠTAJ

#### 1. Struktura i sadržaj rada

Doktorska disertacije mr Predraga Jankovića obuhvata ukupno 203 strane teksta formata A4, uzimajući u obzir uvodne stranice, sadržaj i osnovni tekst. Celokupna materija disertacije podeljena je u 13 poglavlja, sadrži 139 literaturnih citata, 145 slika sa objašnjenjem i 59 tabelarnih prikaza. Numeracija slika i tabela izvršena je pomoću dva broja, od kojih prvi ukazuje na broj poglavlja, a drugi na redni broj slike/tabele u okviru datog poglavlja. Uvodne stranice obuhvataju dokumentacionu informaciju, predgovor, kao i spisak korišćenih oznaka, skraćenica i simbola. Spisak literaturnih citata dat je u abecednom redosledu, označen brojevima. Osnovni tekst rada podeljen je u sledeća poglavlja:

1. Uvod
2. Mehanizam odvajanja materijala pri obradi abrazivnim vodenim mlazom
3. Faktori procesa obrade abrazivnim vodenim mlazom
4. Mašina za sečenje abrazivnim vodenim mlazom
5. Abrazivni vodeni mlaz
6. Predmet obrade
7. Parametri obrade
8. Kvalitet obrade
9. Eksperimentalno istraživanje procesa sečenja abrazivnim vodenim mlazom
10. Matematičko modeliranje procesa sečenja abrazivnim vodenim mlazom
11. Tehnološki procesor sečenja abrazivnim vodenim mlazom
12. Zaključak

## 2. Kratak prikaz pojedinačnih poglavlja

U **prvom poglavlju**, koje ima uvodni karakter, prikazan je, najpre, istorijski razvoj obrade abrazivnim vodenim mlazom, od prvih primena vodenog mlaza tridesetih godina prošlog veka u rudarstvu, preko prve industrijske primene 1972. godine, do savremenih rešenja i mogućnosti obrade abrazivnim vodenim mlazom. Dat je, takođe i pregled tema, sadržaja i autora, koji su rezultate svog naučnog rada iz ove oblasti objavljivali u knjigama i časopisima. Zatim, je dato mesto obrade vodenim mlazom u klasifikaciji postupaka obrade, kao i pregled njene industrijske primene. U okviru ovog poglavlja analizirane su prednosti i nedostaci tehnologije sečenja abrazivnim vodenim mlazom, naročito u poređenju sa komparativnim tehnologijama, kao što su lasersko sečenje, plazma sečenje i elektroeroziona obrada žičanom elektrodom.

U **drugom poglavlju**, analiziran je princip same obrade abrazivnim vodenim mlazom. Predstavljen je mikro i makro-mehanizam odvajanja materijala sa obratka pri obradi abrazivnim vodenim mlazom, i to kako krutih, tako i deformabilnih materijala. Posledica dejstva različitih mehanizama odvajanja materijala ima za posledicu stvaranje jasno uočljivih zona na površini reza, što je, takođe, objašnjeno u ovom poglavlju.

Obrada abrazivnim vodenim mlazom je proces definisan brojnim faktorima, koji određuju kvalitet reza i količinu odvojenog materijala. Na proces sečenja abrazivnim vodenim mlazom utiče veliki broj faktora, koji određuju efikasnost, ekonomičnost i kvalitet procesa. Optimizacija procesa, kao osnova njegove uspešne primene, odvija se kroz optimizaciju parametara koji utiču na proces sečenja abrazivnim vodenim mlazom. Prvi korak ka tom cilju je identifikacija i razumevanje faktora koji utiču na proces sečenja. Na osnovu teorijske analize došlo se do zaključka da na proces sečenja abrazivnim vodenim mlazom utiču faktori koji su sistematizovani na faktore: mašine, abrazivnog vodenog mlaza, obratka i parametri obrade, kao što je prikazano u **trećem poglavlju**.

Mašina za sečenje abrazivnim vodenim mlazom je složen obradni sistem koji predstavlja savremeni proizvod vrhunske tehnologije. Namenjena je za precizna konturna sečenja, najčešće ravnih (2D) delova. U **četvrtom poglavlju** predstavljene su različite vrste i konstrukcije mašina za sečenje abrazivnim vodenim mlazom, koje se u praksi susreću. Detaljno su objašnjeni svi elementi standardne konfiguracije mašine za sečenje abrazivnim vodenim mlazom: sistem za pripremu vode, pumpa visokog pritiska, instalacija visokog pritiska, magacin abraziva, rezna glava, mehanički sistem za kretanja (koordinatni sto) i upravljačka jedinica. Navedeni elementi su predmet neprekidnog usavršavanja i poboljšavanja, što se naročito odnosi na konstrukciju i materijal mlaznica u reznoj glavi i pumpu visokog pritiska, koja predstavlja "srce" mašine.

Tehnologija sečenja abrazivnim vodenim mlazom je kompleksan proces interakcije abrazivnog vodenog mlaza i materijala koji se obrađuje. Abrazivni vodeni mlaz se formira u reznoj glavi i predstavlja smešu tri faze: vode, abraziva i vazduha. U **petom poglavlju** objašnjen je proces stvaranja abrazivnog vodenog mlaza. Najpre je razmatran proces nastajanja mlaza vode velike brzine pri isticanju tečnosti visokog pritiska kroz vodenu mlaznicu. Pomoću Bernulijeve jednačine, može se odrediti brzina isticanja vode iz mlaznice. Analizirajući, dalje, proces dodavanja abraziva vodenom mlazu, u skladu sa zakonom o održanju impulsa, dobijen je izraz za brzinu abrazivnog vodenog mlaza. Uzimajući u obzir pritisak vode, gustinu vode i abraziva, kao i protok vode i abraziva, izračunata je brzina abrazivnog vodenog mlaza, koja iznosi oko 700 m/s. To je, praktično, brzina kojom zrna abraziva udaraju u obradak. Kako abraziv odvaja materijal sa obratka, potrebno je da poseduje odgovarajuća svojstva. Data je i klasifikaciju korišćenih abrazivnih materijala, kao i analiza njihovih najvažnijih karakteristika.

Savremena obrada abrazivnim vodenim mlazom stiče sve veću popularnost zbog mogućnosti obrade skoro svih materijala i debljina. Predmet obrade, analiziran u **šestom poglavlju**, koji se seče abrazivnim vodenim mlazom, karakteriše se: vrstom materijala, debljinom, oblikom konture, tačnošću oblika, tolerancijama dimenzija i slično. Kandidat je pregledno predstavio vrste materijala, kao i debljine koje se mogu ekonomično seći abrazivnim vodenim mlazom. Analizom proizvodne prakse u domaćim proizvodnim pogonima ustanovljeno je da sečenje abrazivnim vodenim mlazom najširu primenu nalazi u obradi nerđajućeg čelika (debljine iznad 5 mm), aluminijuma i njegovih legura i kamena (mermer i granit).

U **sedmom poglavlju** predstavljeni su parametri obrade abrazivnim vodenim mlazom. Parametri obrade su faktori čije vrednosti imaju značajan uticaj na odvijanje samog procesa sečenja, a koji određuju količinu odvojenog materijala, kao i kvalitet površine reza. Znatni naponi uloženi su u razumevanje uticaja parametara procesa, kao što su: pritisak vode, količina abraziva, rastojanje rezne glave od obratka i brzina sečenja, kao osnovnih parametara, a takođe i dodatnih: prečnik vodene mlaznice, prečnik i dužina abrazivne mlaznice, napadni ugao mlaza, vrsta i dimenzije abrazivnih zrna, materijal obratka i geometrija obratka.

Kako je sečenje abrazivnim vodenim mlazom relativno novija tehnologija obrade, nisu još uvek potpuno definisani kriterijumi na osnovu kojih se može oceniti postignuti kvalitet reza. U **osmom poglavlju** kandidat je, najpre, definisao veličine koje određuju geometrijske karakteristike kvaliteta reza kod sečenja abrazivnim vodenim mlazom i čije će se vrednosti određivati nakon sprovedenog eksperimentalnog istraživanja. To su: širina reza, konusnost reza i hrapavost površine reza. Takođe, definisana je tačnost obrade i dat opis grešaka koje se javljaju pri obradi abrazivnim vodenim mlazom. U nastavku, identifikovani su i opisani faktori koji utiču na pojavu grešaka pri obradi.

U inženjerskoj praksi se vrlo često nailazi na slučaj kada nisu u potpunosti poznati mehanizmi nekog procesa. U ovakvim slučajevima je neophodno izvršiti eksperimentalna istraživanja procesa, radi dobijanja pouzdanih informacija, koje bi omogućile matematičko modeliranje procesa u cilju predviđanja izlaznih faktora u zavisnosti od ulaznih. Eksperimentalna istraživanja procesa sečenja abrazivnim vodenim mlazom, sprovedena na osnovu prethodno definisanog plana eksperimentalnog istraživanja, prikazana su u **devetom poglavlju**. Koristeći se saznanjima teorije planiranja eksperimenta, primenjen je potpuni višefaktorni eksperimentalni plan koji obezbeđuje određivanje matematičkog modela pri svim mogućim nivoima variraja relevantnih faktora, uz maksimalnu redukciju broja potrebnih opita, bez smanjenja količine i kvaliteta informacija. Kandidat je detaljno opisao uslove izvođenja eksperimentalnih istraživanja, koji obuhvataju: mašinu na kojoj je izveden eksperiment, materijal obratka, merne veličine i mernu opremu, kao i način realizacije eksperimenta. Precizno je definisan cilj eksperimentalnih istraživanja, a rezultati istraživanja su pregledno predstavljeni u vidu tabela i dijagrama, uz korišćenje brojnih fotografija snimljenih tokom eksperimentalnih istraživanja.

Dobijeni rezultati eksperimentalnog istraživanja omogućili su formiranje matematičkog modela zavisnosti izlaznih faktora (širina reza, odstupanje od upravnosti, nagib reza i hrapavost površine reza), od ulaznih faktora (debljina obratka, brzina sečenja i protok abraziva), što je detaljno opisano u **desetom poglavlju**. Kako je oblik funkcije pomenute zavisnosti unapred nepoznat, kandidat se, na osnovu eksperimentalnih vrednosti zavisno promenjive, opredelio za izbor funkcije cilja u obliku složene stepene funkcije. Nakon definisanja eksperimentalnog prostora i izbora matematičkog modela detaljno je prikazana procedura modeliranja funkcije cilja. Kandidat je, takođe, izvršio upoređenje dobijenih rezultata eksperimentalnih istraživanja sa

rezultatima numeričkog proračuna dobijenim na osnovu modela, pri čemu je potvrđena značajnost pojedinih ulaznih faktora na vrednost izabranih izlaznih veličina.

Matematički model procesa sečenja abrazivnim vodenim mlazom je osnova za stvaranje tehnološke baze podataka i formiranje tehnološkog procesora. U **jedanaestom poglavlju** predstavljen je postupak izbora tehnoloških parametara obrade u cilju dobijanja željenog kvaliteta obrade, uz prikaz tehnološkog procesora za izbor parametara obrade. Predstavljeni tehnološki procesor je računarski program, čiji su ulazi parametri procesa sečenja (vrsta materijala obratka, debljina obratka, pritisak vode, prečnici vodene i abrazivne mlaznice i protok abraziva) i željene vrednosti karakteristika kvaliteta reza (širina reza, odstupanje od upravnosti, nagib reza, hrapavost), a izlaz je vrednost preporučene brzine sečenja, kao i vrednosti karakteristika kvaliteta reza, koje se tom brzinom ostvaruju. Zahvaljujući određivanju kvantitativnih zavisnosti između karakteristika kvaliteta reza i parametara procesa sečenja abrazivnim vodenim mlazom, pružena je mogućnost konstruktorima i tehnolozima da izvrše izbor parametara obrade u zavisnosti od zadatih vrednosti geometrijskih karakteristika kvaliteta. Takođe, produbljeno razumevanje procesa i međusobnog dejstva parametara obrade doprinosi postizanju višeg kvaliteta obrade i šire primene sečenja abrazivnim vodenim mlazom.

U zaključku, kao **dvanaestom poglavlju**, su istaknuta najvažnija saznanja do kojih se došlo teorijskim i ekperimentalnim istraživanjem procesa sečenja abrazivnim vodenim mlazom, istaknute osnovne karakteristike usvojenog modela i formiranog tehnološkog procesora i mogućnosti njegovog daljeg nadograđivanja. Takođe, navedeni su i pravci daljeg istraživanja.

### 3. Ocena rada

Tehnološki problemi u vezi sečenja abrazivnim vodenim mlazom leže u nedovoljnom poznavanju primene ove tehnologije, sa jedne strane i sa druge strane, nepostojanju dovoljno pouzdanih praktičnih podataka i znanja o uticajnim parametrima na sam proces obrade. To za posledicu ima nedovoljnu iskorišćenost tehnologije sečenja abrazivnim vodenim mlazom, s obzirom na mogućnosti koje ona pruža. Dosadašnja teorijska i eksperimentalna istraživanja bavila su se, uglavnom, mogućnošću primene sečenja abrazivnim vodenim mlazom za različite namene i vrste obrada. Mali broj istraživača je objavio radove koji obrađuju problematiku tehnologije sečenja, posebno kvaliteta obrade. Iz tog razloga predstavljena doktorska disertacija karakteriše se svojom originalnošću i savremenošću. Primenom savremenih naučnih metoda, adekvatnih za sprovedeno istraživanje, kandidat je pokazao visoku sposobnost za samostalan naučni rad.

Navedeni literaturni citati odgovaraju naučnoj oblasti koja je obrađena u doktorskoj disertaciji. Savremenost korišćene literature ogleda se u broju citata koji su mlađi od 10 godina (polovina od ukupnog broja), odnosno 5 godina (trećina od ukupnog broja). Takođe, očigledno je da su mentor i kandidat veoma dobro upoznati sa problematikom koja se obrađuje u doktorskoj disertaciji, što potvrđuje i veliki broj njihovih samostalnih i zajedničkih objavljenih naučnih i stručnih radova.

### 4. Zaključak i predlog

Na osnovu pregleda doktorske disertacije i analize postignutih rezultata, Komisija jednoglasno zaključuje da je priložena doktorska disertacija naučno zasnovana i sa savremenim pristupom. Rezultati, dati u disertaciji, su originalni i značajni za nauku i praksu.

Podneta doktorska disertacija u potpunosti odgovara temi prihvaćenoj od strane Nastavno-naučnog veća Mašinskog fakulteta u Nišu, kako nazivom tako i postavljenim ciljem. Kandidat je pokazao visoko poznavanje procesa sečenja abrazivnim vodenim mlazom i ispoljio sposobnost sinteze naučnih saznanja iz različitih oblasti u cilju proučavanja postavljenog zadatka, kao i samostalnost i inventivnost u naučno-istraživačkom radu.

Kandidat je došao do rezultata koji predstavljaju doprinos razjašnjavanju procesa sečenja abrazivnim vodenim mlazom. Dobijeni originalni eksperimentalni rezultati, kao i razvijen matematički model i formirani tehnološki procesor, doprinose boljem razumevanju ove problematike i efikasnijem korišćenju sečenja abrazivnim vodenim mlazom.

Na osnovu izloženog, Komisija za pregled i ocenu doktorske disertacije sa zadovoljstvom predlaže Nastavno-naučnom veću Mašinskog fakulteta u Nišu, da rad **mr Predraga Jankovića**, pod nazivom:

**MODELIRANJE PROCESA SEČENJA ABRAZIVNIM VODENIM MLAZOM I  
FORMIRANJE TEHNOLOŠKOG PROCESORA**

prihvati kao doktorsku disertaciju i kandidata pozove na usmenu javnu odbranu.

Niš, Beograd, jun 2009. godine

**ČLANOVI KOMISIJE**

**dr Miroslav Radovanović**, red. prof.  
Mašinskog fakulteta u Nišu

---

**dr Velibor Marinković**, red. prof.  
Mašinskog fakulteta u Nišu

---

**dr Dragoljub Lazaravić**, red. prof.  
Mašinskog fakulteta u Nišu

---

**dr Ljubodrag Tanović**, red. prof.  
Mašinskog fakulteta u Beogradu

---

**dr Bojan Rančić**, red. prof.  
Mašinskog fakulteta u Nišu

---