

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

-обавезна садржина- свака рубрика мора бити попуњена

(сви подаци уписују се у одговарајућу рубрику, а назив и место рубрике не могу се мењати или изоставити)

I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ
<p>1. Датум и орган који је именовao комисију</p> <p>Решењем бр. 012-199/28-2017 од 02.28.2019. године, на основу Одлуке Научно-наставног већа Факултета техничких наука, а у складу са Статутом Факултета техничких наука, декан Факултета техничких наука проф. др Раде Дорословачки, именовao је Комисију за оцену и одбрану докторске дисертације.</p> <p>2. Састав комисије са назнаком имена и презимена сваког члана, звања, назива уже научне области за коју је изабран у звање, датума избора у звање и назив факултета, установе у којој је члан комисије запослен:</p> <p>1. др Павел Ковач, редовни професор, УНО: Процеси обраде скидањем материјала, 21.05.1998., Факултет техничких наука, Нови Сад, председник.</p> <p>2. др Мирослав Радовановић, редовни професор, УНО: Производни системи и технологије, 20.3.2007., Машински факултет, Ниш, члан.</p> <p>3. др Драган Кукољ, редовни професор, УНО: Рачунарска техника и рачунарске комуникације, 19.09.2003., Факултет техничких наука, Нови Сад, члан.</p> <p>4. др Миленко Секулић, редовни професор, УНО: Процеси обраде скидањем материјала, 15.10.2017., Факултет техничких наука, Нови Сад, члан.</p> <p>5. др Марин Гостимировић, редовни професор, УНО: Процеси обраде скидањем материјала, 29.12.2011., Факултет техничких наука, Нови Сад, ментор.</p>
II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ
<p>1. Име, име једног родитеља, презиме:</p> <p>Драган, Ђуро, Родић</p> <p>2. Датум рођења, општина, држава:</p> <p>07. 08. 1984., Бачка Паланка, Србија</p> <p>3. Назив факултета, назив студијског програма дипломских академских студија – мастер и стечени стручни назив</p> <p>Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду, Производно машинство, Мастер инжењер машинства</p> <p>4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија</p> <p>2010. год., Машинство</p> <p>5. Назив факултета, назив магистарске тезе, научна област и датум одбране: -</p> <p>6. Научна област из које је стечено академско звање магистра наука: -</p>

III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Оптимизација процеса електроерозивне обраде савремених инжењерских материјала

IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Навести кратак садржај са назнаком броја страна, поглавља, слика, шема, графикана и сл.

Предмет истраживања ове дисертације представља унапређење, моделовање и оптимизација процеса електроерозивне обраде савремених инжењерских материјала. Прво су представљене две иновативне методе: електроерозивна обрада у диелектрикуму са помешаним прахом PMEDM и електроерозивна обрада са помоћном електродом AEEDM, а затим и њихова комбинација (AE+PM)EDM. За генерисање математичких модела примењене су метода одзивне површине и алати вештачке интелигенције. У наставку су постављени оптимизациони процеси одређивања улазних параметара са једном и више функција циља који су решени применом класичних метода оптимизације. У завршном осврту спроведена је верификација добијених модела и оптималних параметара електроерозивне обраде.

Докторска дисертација изложена је кроз 10 поглавља на 159 страна, садржи 127 слика/графикана/шема/дијаграма, 95 табела и 151 литературну референцу. Испред основног дела текста у раду су дати: наслов рада, резиме и кључна документација.

Докторска дисертација се састоји из следећих основних поглавља:

1. Увод
2. Иновациони правци развоја електроерозивне обраде
3. Предмет истраживања
4. Експериментална истраживања
5. Резултати експерименталних истраживања
6. Моделовање процеса електроерозивне обраде
7. Оптимизација процеса електроерозивне обраде
8. Анализа резултата
9. Закључна разматрања
10. Литература

V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

1. Увод

У **првом поглављу** дата су уводна разматрања електроерозивне обраде савремених инжењерских материјала. Објашњени су основни мотиви и укратко је представљен предмет истраживања докторске дисертације. Такође су наведени главни циљеви, методе и очекивани резултати истраживања. Посебан осврт дат је на начине унапређења процеса електроерозивне обраде.

2. Иновациони правци развоја електроерозивне обраде

Иновациони правци развоја у области електроерозивне обраде дати су у **другом поглављу**. Детаљно је приказан преглед релевантне литературе у подручју предмета истраживања. Посебно се указује на актуелност теме иновационих поступака електроерозивне обраде кроз тренд и укупни број објављених радова. Представљени су основни принципи електроерозивне обраде у диелектрикуму са помешаним прахом (PMEDM) и електроерозивне обраде са помоћном електродом (AEEDM), као и њихове комбинације ((AE+PM)EDM). Јасно су дефинисани приступи моделовања и оптимизације претходно наведених метода. На крају овог поглавља дати су могући правци истраживања иновационих метода електроерозивне обраде.

3. Предмет истраживања

У **трећем поглављу** опширно је описан предмет истраживања докторске дисертације, који се

управо односи на проблематику унапређења, моделовања и оптимизације процеса PMEDM и AE +PM)EDM при обради легуре титанијума и цирконијум оксида. Основни циљ истраживања било је проналажење оптималних параметара електроерозивне обраде који би омогућили добијање повољних излазних перформанси. Сходно напред реченом, за реализацију постављених циљева успешно је постављена концепција и методологија истраживања. На основу прегледа и анализе литературних извора у области предмета истраживања оправдано су постављене хипотезе истраживања.

4. Експериментална истраживања

У складу са постављеним циљем и концепцијом истраживања у **четвртм поглављу** су описана експериментална истраживања. Јасно су изложени општи услови при којима су спроведена експериментална истраживања. Поред поставки електроерозивне обраде у диелектрику са помешаним прахом и електроерозивне обраде са помоћном електродом, дефинисана је методологија одређивања излазних перформанси обраде, као што су производност обраде, релативно трошење алата, параметри храпавости обрађене површине и дебљина дефектног слоја материјала обратка. Такође су приказана прелиминарна испитивања и услови електроерозивне обраде легуре титанијума и цирконијум оксида према различитим плановима експеримента. Кроз ово поглавље јасно су наведени и анализирани параметри који утичу на излазне перформансе електроерозивне обраде.

5. Резултати експерименталних истраживања

За потребе истраживања, у циљу проучавања утицаја различитих параметара електроерозивне обраде на излазне перформансе, успешно су примењене различите технике планирања експеримента. У зависности од броја параметара и њиховог разматраног нивоа коришћени су следећи планови експеримента: централни композициони план, Бокс-Бехнкен план и Тагучи план. На основу експерименталних планова, резултати истраживања докторске дисертације представљени су у **петом поглављу**, које је подељено у четири дела. Кроз прву групу експеримената, извршена је обрада легуре титанијума (PMEDM) према централном композиционом плану експеримента од укупно 30 експеримената. Улазни параметри (струја пражења, дужина импулса, коефицијент деловања импулса и концентрација графитног праха) су варирани на пет нивоа, док су за излазне параметре изабрани средња аритметичка храпавост обрађене површине, производност обраде и релативно трошење алата. Према Тагучи плану, у оквиру друге групе експеримената, изведено је 9 експеримената где су поред претходно наведених излазних перформанси посматране максимална висина неравнина и дебљина дефектног слоја материјала обратка при електроерозивној обради легуре титанијума (PMEDM). Трећа група експерименталних испитивања обухватала је обраду цирконијум оксида ((AE+PM)EDM), према Бокс-Бехнкен плану. Спроведено је 17 експеримената где су улазни параметри (струја пражења, дужина импулса и концентрација графитног праха) варирани на три нивоа, а за излазне перформансе изабране су средња аритметичка храпавост обрађене површине, производност обраде и релативно трошење алата. Последња група од 9 експеримената, изведена према Тагучи плану ((AE +PM)EDM), за улазне параметре користи исте услове као према Бокс-Бехнкен плану, док су поред поменутих излазних перформанси изабране максимална висина неравнина и дебљина дефектног слоја материјала обратка. Граничне вредности улазних параметара изабране су на основу литературних извора и прелиминарних испитивања.

6. Моделовање процеса електроерозивне обраде

У **шестом поглављу** успешно је реализовано моделовање процеса електроерозивне обраде. На основу измерених и прорачунатих вредности излазних перформанси, резултати су статистички обрађени и генерисани су математички модели за описивање утицаја улазних фактора на излазне перформансе. Математички модели су добијени применом методе одзивне површине према централном композиционом и Бокс-Бехнкен плановима експеримента. С друге стране, применом

метода вештачке интелигенције односно неуро-фази система (према централном композиционом плану) и фази логике (према Бокс-Бехнкен плану) креирани су интелигентни модели.

7. Оптимизација процеса електроерозивне обраде

Оптимизација параметара PMEDM и (AE+PM)EDM процеса је детаљно извршена у **седмом поглављу**. Спроведена је практична поставка примене једнокритеријумске и вишекритеријумске метода оптимизације процеса електроерозивне обраде легуре титанијума и цирконијум оксида. У циљу једнокритеријумске оптимизације параметара примењена је Тагучи метода, где су оптимизоване излазне перформансе обраде легуре титанијума и цирконијум оксида (средња аритметичка храпавост обрађене површине, максимална висина неравнина, дебљина дефектног слоја материјала обратка, производност и релативно трошење алата). За потребе вишекритеријумске оптимизације параметара електроерозивне обраде примењена је метода одзивне површине, где су анализирани излазне перформансе (средња аритметичка храпавост обрађене површине, производност и релативно трошење алата) при обради легуре титанијума (према централном композиционом плану) и цирконијум оксида (према Бокс-Бехнкен плану).

8. Анализа резултата

На основу спроведених истраживања докторске дисертације, у **осмом поглављу** је систематично презентована анализа резултата кроз три целине. Прва целина је обухватала анализу експерименталних резултата добијених на основу прелиминарних испитивања и анализе варијансе према Тагучи плану експеримента при електроерозивној обради легуре титанијума и цирконијум оксида. У другу целину су спадале анализе генерисаних модела добијених на основу методе одзивне површине и алата вештачке интелигенције. На основу прорачуна грешке и најмањег одступања од експерименталних резултата спроведено је поређење добијених модела. Такође је успешно реализована валидација креираних модела на основу нових експерименталних података. У оквиру треће целине извршена је анализа једнокритеријумских и вишекритеријумских метода оптимизације, и то прво за електроерозивну обраду легуре титанијума, а затим за обраду цирконијум оксида. У циљу провере добијених оптималних режима електроерозивне обраде успешно су спроведене верификације потврдом експериментима.

9. Закључна разматрања

На основу изведених експерименталних истраживања и анализа резултата у оквиру ове дисертације, спознала су се научна сазнања која су адекватно сумирана у **деветом поглављу** кроз закључке и правце будућих истраживања. Такође су наведене могућности унапређења наведених метода електроерозивне обраде.

10. Литература

У десетом поглављу је дат приказ свих коришћених литературних извора, којих је укупно било 151.

VI СПИСАК НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КОЈИ СУ ОБЈАВЉЕНИ ИЛИ ПРИХВАЋЕНИ ЗА ОБЈАВЉИВАЊЕ НА ОСНОВУ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ РАДА НА ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ

Таксативно навести називе радова, где и када су објављени. Прво навести најмање један рад објављен или прихваћен за објављивање у часопису са ISI листе односно са листе министарства надлежног за науку када су у питању друштвено-хуманистичке науке или радове који могу заменити овај услов до 01.јануара 2012. године. У случају радова прихваћених за објављивање, таксативно навести називе радова, где и када ће бити објављени и приложити потврду о томе.

Рад у истакнутом међународном часопису (M22):

1. M. Gostimirovic, M. Radovanovic, M. Madic, **D. Rodic**, N. Kulundzic: Inverse electro-thermal analysis of the material removal mechanism in electrical discharge machining. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 97(5-8), pp. 1861-1871 (2018).
2. P. Kovac, **D. Rodic**, V. Pucovsky, B. Savkovic, M. Gostimirovic: Multi-output fuzzy inference system for modeling cutting temperature and tool life in face milling. Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 28(10), pp. 4247-4256 (2014).
3. P. Kovac, **D. Rodic**, V. Pucovsky, B. Savkovic, M. Gostimirovic: Application of fuzzy logic and regression analysis for modeling surface roughness in face milling. Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 24(4), pp. 755-762 (2013).
4. M. Gostimirovic, V. Pucovsky, M. Sekulic, **D. Rodic**, V. Pejic: Evolutionary optimization of jet lag in the abrasive water jet machining. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, DOI: doi.org/10.1007/s00170-018-3181-5, (2018).

Саопштење са међународног скупа штампано у целини (M33):

1. **D. Rodic**, M. Gostimirovic, P. Kovac, M. Sekulic, B. Savković: Principle of electrical discharge machining of non-conductive zirconia ceramics, 13. International Scientific Conference "Flexible Technologies" - MMA, Novi Sad, pp. 33-36 (2018).
2. B. Batinic, **D. Rodic**, N. Lakovic, M. Gostimirovic, N. Kulundžic, Acquisition of current impulses in electrical discharge machining. Zooming Innovation in Consumer Electronics International Conference (ZINC), Novi Sad, pp. 37-40 (2017).

Рад у научном часопису (M52):

1. B. Batinic, **D. Rodic**, M. Gostimirovic, N. Kulundzic, N. Lakovic, Monitoring of the discharge current by hall-effect sensor. Journal of Production Engineering, Vol. 20(1), pp. 39-42 (2017).
2. M. Gostimirovic, P. Kovac, M. Sekulic, **D. Rodic**, V. Pucovsky, Machining characteristics of electrical discharge machining—a review. Journal of Production Engineering, Vol. 19(1), pp. 1-10 (2016).

Рад у научном часопису (M53):

1. **D. Rodic**, M. Gostimirovic, P. Kovac, I. Mankova, V. Pucovsky: Predicting of machining quality in electric discharge machining using intelligent optimization techniques. International Journal of Recent Advances in Mechanical Engineering, Vol. 3(2), pp. 1-9 (2014).
2. **D. Rodic**, M. Gostimirovic, P. Kovac, M. Radovanovic, B. Savkovic: Comparison of fuzzy logic and neural network for modelling surface roughness in EDM. International Journal of Recent Advances in Mechanical Engineering, Vol. 3(3), pp. 69-78 (2014).
3. M. Gostimirovic, **D. Rodic**, P. Kovac, V. Pucovsky, B. Savkovic, Application of neuro-fuzzy systems and genetic programming for modelling surface roughness in electrical discharge machining. Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara Vol. 12(1), pp. 137-140 (2014).

VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

У дисертацији су приказани резултати експерименталних истраживања спроведених са циљем моделовања и оптимизације процеса електроерозивне обраде савремених инжењерских материјала легуре титанијума и цирконијум оксида. У сврху доказивања постављених хипотеза успешно су изведене електроерозивна обрада у диелектрикуму са помешаним прахом (PMEDM) и електроерозивна обрада са помоћном електродом у диелектрикуму са помешаним прахом (AE+PM)EDM, а које су представљале главни предмет истраживања дисертације.

Анализом резултата електроерозивне обраде легуре титанијума у диелектрикуму са помешаним прахом доказана је *Хипотеза 1: Процес електроерозивне обраде у диелектрикуму са помешаним*

прахом остварује повољније излазне перформансе у односу на класичну електроерозивну обраду легуре титанијума. Утицај концентрације графитног праха (GR) је био најизраженији при струји пражњења $I_e = 4.5 A$, где је процентуално смањење средње аритметичке храпавости обрађене површине (R_a) износило приближно 27% (при $GR = 12 g/l$), повећање производности обраде (MRR) за 20% (при $GR = 6 g/l$) и смањење релативног трошења алата (TWR) за 14% (при $GR = 12 g/l$).

Извођењем прелиминарних испитивања (AEEDM цирконијум оксида) доказана је Хипотеза 2: Примена поступка електроерозивне обраде са помоћном електродом омогућује обраду електронепроводљивог керамичког материјала, тј. цирконијум оксида. Наношењем графитног премаза и постављањем адхезивне бакарне траке на горњу површину керамике остварена је хибридна помоћна електрода, која је заслужна за успешну изведбу електроерозивне обраде цирконијум оксида.

На основу анализе резултата (AE+PM)EDM цирконијум оксида доказана је и Хипотеза 3: Комбиновањем поступака електроерозивне обраде са помоћном електродом и електроерозивне обраде у диелектрику са помешаним прахом, при обради електронепроводљиве керамике, постиже се додатно побољшање излазних перформанси. Додавање графитног праха у диелектрику при обради цирконијум оксида, уз присуство помоћне електроде, доводи до смањења средње аритметичке храпавости обрађене површине за 18%, повећања производности обраде за 12% и смањења релативног трошења алата за 6%. Наведена побољшања излазних перформанси добијају се при струји пражњења $I_e = 1.5 A$, дужини импулса $100 \mu s$ и концентрацији графитног праха $8 g/l$.

На основу прорачуна релативне грешке и сагледавања најмањег одступања резултата модела од експерименталних вредности, због просечне грешке верификације, делимично је доказано да је Могуће је добити поуздане математичке моделе за излазне перформансе у функцији улазних параметара електроерозивне обраде легуре титанијума и цирконијум оксида применом класичних и интелигентних метода. Просечна грешка верификације свих добијених модела је износила у границама $4.88 \div 15.28\%$.

На основу експеримената који нису учествовали при добијању модела изведена је верификација модела, односно реална оцена способности предикције излазних перформанси са новим експерименталним подацима. Грешка модела добијена верификационим експериментима при електроерозивној обради легуре титанијума за RSM моделе износила је 10.85% за R_a , 15.44% за MRR и 6.97% за TWR , а за електроерозивну обраду цирконијум оксида 4.08% за R_a , 8.74% за MRR и 3.53% за TWR . Такође је спроведена верификација интелигентних модела, где је грешка $ANFIS$ модела електроерозивне обраде легуре титанијума износила 16.27% за R_a , 23.88% за MRR и 12.21% за TWR , док је код $MIMO$ модела електроерозивне обраде цирконијум оксида грешка износила 6.56% за R_a , 11.11% за MRR и 4.88% за TWR . Модели чија је грешка испод 10% могу се сматрати способним за предикцију резултата, док се остали модели сматрају делимично поузданим.

Анализом резултата класичних метода оптимизације, односно Тагучи методе при једнокритеријумској и RSM модела при вишекритеријумској оптимизацији успешно је доказана Хипотеза 5: На основу адекватних математичких модела могуће је одредити оптималне параметре електроерозивне обраде на бази једног и више критеријума. За проверу одређених оптималних вредности улазних параметара обраде, добијених Тагучи методом изведени су потврдни експерименти који доказују успешност једнокритеријумске оптимизације при електроерозивној обради оба материјала. Просечна грешка потврдних експеримената је износила испод 10 %. Провера оптималних вредности улазних параметара обраде, добијених методологијом одзивне површине при вишекритеријумској оптимизацији, такође доказује хипотезу 5, где је просечна грешка такође износила испод 10%.

На крају се са сигурношћу може рећи да резултати истраживања који су представљени у дисертацији омогућавају боље разумевање поступака PMEDM, AEEDM и (AE+PM)EDM, што ће допринети њиховој већој конкурентности у индустрији, која је сада на страни класичног поступка електроерозивне обраде.

VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА

Експлицитно навести позитивну или негативну оцену начина приказа и тумачења резултата истраживања.

На основу прегледа и анализе докторске дисертације Комисија сматра да је докторска дисертација адекватно структурирана и систематизована у складу с пријављеном темом. Приказани резултати јасно потврђују постављене хипотезе дисертације. Дискусија резултата је на високом научном нивоу, а изведени закључци аргументовани и свеобухватни.

У том контексту, Комисија ПОЗИТИВНО оцењује начин приказа и тумачења резултата истраживања.

Рад је проверен у софтверу за детекцију плагијаризма *iThenticate (Similarity index 7 %)*.

IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Експлицитно навести да ли дисертација јесте или није написана у складу са наведеним образложењем, као и да ли она садржи или не садржи све битне елементе. Дати јасне, прецизне и концизне одговоре на 3. и 4. питање:

1. Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме

Дисертација је написана у складу са образложењем и циљевима истраживања наведеним у пријави теме.

2. Да ли дисертација садржи све битне елементе

Докторска дисертација својим насловом, садржајем, резултатима истраживања и начином тумачења добијених резултата садржи све битне елементе научног рада.

3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци

Иновативне методе електроерозивне обраде (PMEDM, AEEDM, као и њихова комбинација (AE+PM)EDM), и примењене методологије моделирања и оптимизације које су представљене у овом раду подигли су електроерозивну обраду на један виши ниво, посебно са аспекта економичности и продуктивности. У том контексту, постављени циљеви дисертације су у потпуности достигнути.

Примењена метода PMEDM омогућила је да процес обраде постаје стабилнији и ефикаснији, чиме је постигнуто побољшање излазних перформанси процеса, док је са (AE+PM)EDM учињено да електронепроводљиви материјали као што су савремене керамике постану предмет електроерозивне обраде.

Сходно напред реченом, остварен је основни циљ истраживања, тј. направљени су помаци у смислу креираних класичних и интелигентних модела излазних перформанси електроерозивне обраде легуре титанијума и цирконијум оксида, као и успешно одређених оптималних параметара обраде заснованих на примени класичних метода једнокритеријумске и вишекритеријумске оптимизације.

На крају се са сигурношћу може рећи да резултати истраживања који су представљени у дисертацији воде ка бољој конкурентности поступака PMEDM, AEEDM и (AE+PM)EDM у односу на класичан поступак електроерозивне обраде. Применом математичких модела, оптималних режима обраде и смерница дефинисаних у истраживању наведени поступци се могу употребити са високом поузданошћу.

Истовремено, кроз истраживања у оквиру ове дисертације отворена су нека питања нових научних сазнања, која се намећу као правци даљег развоја и будуће примене иновативних метода електроерозивне обраде.

4. Недостаци дисертације и њихов утицај на резултат истраживања

Дисертација нема недостатака који утичу на резултат истраживања.

X ПРЕДЛОГ:

На основу укупне оцене дисертације, комисија предлаже:

Да се докторска дисертација под називом "Оптимизација процеса електроерозивне обраде савремених инжењерских материјала" прихвати, а кандидату Драгану Родићу одобри одбрана.

НАВЕСТИ ИМЕ И ЗВАЊЕ ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ
ПОТПИСИ ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ

1. **Др Павел Ковач, редовни професор**
Факултет техничких наука, Нови Сад, председник

2. **Др Мирослав Радовановић, редовни професор**
Машински факултет, Ниш, члан

3. **Др Драган Кукољ, редовни професор**
Факултет техничких наука, Нови Сад, члан

4. **Др Миленко Секулић, редовни професор**
Факултет техничких наука, Нови Сад, члан

5. **Др Марин Гостимировић, редовни професор**
Факултет техничких наука, Нови Сад, ментор

НАПОМЕНА: Члан комисије који не жели да потпише извештај јер се не слаже са мишљењем већине чланова комисије, дужан је да унесе у извештај образложење односно разлоге због којих не жели да потпише извештај.