

**УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ**  
**ФАКУЛТЕТ: Машински факултет**



## **ИЗВЈЕШТАЈ**

*о оцјени подобности теме и кандидата за израду докторске тезе*

### **ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ**

На основу одлуке Наставно-научног вијећа Машинског факултета бр. 16/3.1376/14 од 10.07.2014. године именована је комисија за оцјену подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације под радним називом „Моделирање функција обрадивости у микро-глодању, у слиједећем саставу:

1. Др Павел Ковач, редови професор, ужа научна област: Процеси обраде скидањем материјала, Катедра за процесе обраде скидањем материјала, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, предсједник;
2. Др Јанез Копач, редовни професор, ужа научна област: Производне технологије, Универзитет у Љубљани, Факултет за стројништво Љубљана, члан;
3. Др Гордана Глобочки - Лакић, ванредни професор, ужа научна област: Производно машинство, Универзитет у Бањој Луци, Машински факултет, члан.

Састав Комисије са назнаком имена и презимена сваког члана, звање, назив уже научне области за коју је изабран у звање, назив универзитета и факултета у којем је члан комисије стално запослен.

### **1. БИОГРАФСКИ ПОДАЦИ, НАУЧНА И СТРУЧНА ДЈЕЛАТНОСТ КАНДИДАТА**

#### **Биографски подаци о кандидату**

Бранислав Средановић је рођен 05. јануара 1984. године у Јајцу. Основну школу завршио је у Теслићу. Средњу школу, смјер Машински техничар, завршио је у Теслићу са одличним успјехом као ученик генерације. Након завршене средње школе, школске 2002/2003 године уписао је Машински факултет Универзитета у Бањој Луци, смјер Производно машинство. Дипломирао је школске 2006/2007 године, са просјечном оцјеном 9,00, као један од најбољих студената у генерацији. Кандидат је добитник Златне плакете Универзитета у Бањој Луци за 2007. годину. Постдипломске студије, по старом плану и програму, уписао је школске 2008/2009 године на Машинском факултету у Бањој Луци. Постдипломске студије, смјер Обрадни системи и технологија флексибилних обрадних система за резање, завршио је са просјечном оцјеном 9,83. Магистарски рад под називом „Развој модела за дефинисање универзалне обрадивости на основу параметара резања“ одбранио је јула 2012. године на Машинском факултету Универзитета у Бањој Луци.

Од 2007. до 2009. године био је запослен у предузећу Мегастил д.о.о. Бања Лука. У

октобру 2009. године изабран је у звање асистента на Машинском факултету Универзитета у Бањој Луци, на предметима: Технологија обраде резањем, Трибологија, Обрадни системи за обраду резањем и Алати и прибори. Приликом званичних оцјењивања рада наставника и сарадника од стране студената, кандидат је добио високе оцјене. У октобру 2013. године изабран је у звање вишег асистента на напријед наведеним предметима.

Кандидат је био активни учесник у реализацији већег броја научно-истраживачких пројеката који су реализовани на Машинском факултету у Бањој Луци. У више наврата је боравио на Факултету за стројништво у Љубљани у сврху реализације експерименталних истраживања и научног и стручног усавршавања. У својству аутора и коаутора, објавио је више од 25 радова на домаћим и међународним конференцијама и часописима. Од поменутих радова, могу се истаћи три рада са званичне свјетске *SCI* листе. Кандидат се активно служи енглеским језиком и посједује висок ниво знања рада на рачунару, при чему се издваја знање програмских пакета за инжењерско пројековање и прорачун.

Ожењен је и отац једног дјетета.

#### **Библиографски подаци о кандидату**

##### **Орг. научни радови у истакнутим научним часописима међународног значаја:**

1. **Sredanovic, B.**, Globocki-Lakic, G., Cica, Dj., Kramar, D.: Influence of different cooling and lubrication techniques on material machinability in machining, *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 59(12), 2013, pp. 748-754.
2. Cica, Dj., **Sredanovic, B.**, Globocki-Lakic, G., Kramar, D.: Modeling of the cutting forces in turning process using various methods of cooling and lubricating: an artificial intelligence approach, *Journal of Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 2013, 2013, pp. 1-18.
3. Globocki-Lakic, G., **Sredanovic, B.**, Nedic, B., Cica, Dj., Catic, D.: Development of mathematical model of universal material machinability, *Journal of the Balkan Tribological Association*, Vol. 17(4), 2011, pp. 501-511.

##### **Оригинални научни радови у часописима међународног значаја:**

1. Globocki-Lakić, G., Borojević, S., Čiča, Đ., **Sredanović, B.**: Development of application for index of machinability analysis, *Tribology in Industry*, Vol. 31(1), 2009, pp. 57-60.
2. Kramar, D., **Sredanović, B.**, Globocki-Lakić, G., Kopač, J.: Contribution to material machinability definition, *Journal of Production Engineering*, Vol. 15(2), 2012, pp. 27-32.
3. Čiča, Đ., Zeljković, M., Globocki-Lakić, G., **Sredanović, B.**, Borojević, S.: Identification of contact parameters of spindle-holder-tool assembly using artificial neural networks, *Journal of Production Engineering*, Vol. 15(2), 2012, pp. 37-40.
4. Čiča, Đ., Zeljković, M., Globocki-Lakić, G., **Sredanović, B.**: Modelling of dynamic behavior of a spindle-holder-tool assembly, *Strojarstvo - Journal for Theory and Application in Mechanical Engineering*, Vol. 54(2), 2012, pp 135-144.
5. Globocki-Lakić, G., **Sredanović, B.**, Kramar, D., Nedić, B., Kopač, J.: Experimental research using of MQL in metal cutting, *Tribology in Industry*, Vol. 35(4), 2013, pp.

**Оригинални научни радови на међународним научним конференцијама:**

1. Globocki - Lakić, G., Sredanovic, B., Jokanovic, S., Borojevic, S., Cica, Dj.: Vector based approach in defining of universal machinability, *Proc. of International Conference on Innovative Technologies in Design, Manufacturing and Production INTECH 2010*, 14. – 16. September 2010., Prague, Czech Republic.
2. Cica, Dj., Jokanovic, S., Borojevic, S., **Sredanovic, B.**: Algorithm for C1 continuous tool path: some experiences, problems and suggestion, *Proc. of International Conference on Innovative Technologies in Design, Manufacturing and Production INTECH 2010*, 14. – 16. September 2010., Prague, Czech Republic.
3. **Sredanović, B.**, Globočki - Lakić, G.: Quality monitoring of production systems and processes in form of vector of power, *Proc. of 9<sup>th</sup> International Scientific and Practical Conference on Research, Development and Application High Technologies in Industry*, 22. – 23. April 2010., Saint Petersburg, Russia.
4. Globočki - Lakić, G., Čiča, Đ., **Sredanović, B.**: Application of artificial intelligence in modeling of metal cutting process, *Proc. of 10<sup>th</sup> International Scientific and Practical Conference on Research, Development and Application High Technologies in Industry*, 23. – 24. April 2011., Saint Petersburg, Russia.
5. **Sredanović, B.**, Globočki-Lakić, G., Čiča, Đ., Borojević, S., Golubović- Bugarski, V.: Modeling of cutting forces with artificial neural networks, *Proc. of 4<sup>th</sup> International Conference on Manufacturing Engineering ICMEN 2011*, 03.-05. October 2011., Thessaloniki, Greece.
6. Golubović, B. V., **Sredanović, B.**, Globočki, L. G.: Development of DamageCALC application for automatic calculation of damage indicator, *Proc. of 12<sup>th</sup> Conference Diagnosis and Prediction Mechanical Engineering System DIPRE 12*, 30. - 31. May 2012., Galati, Romania.
7. Kramar, D., **Sredanović, B.**, Globočki - Lakić, G., Kopač, J.: Contribution to material machinability definition, *Proc. of 3<sup>rd</sup> International Conference of Sustainable Life in manufacturing SLIM 2012*, 2. - 5. October 2012., Istanbul, Turkey.
8. **Sredanović, B.**, Globočki - Lakić, G., Čiča, Đ., Borojević, S.: A novel method for material machinability evaluation, *Proc. of 4<sup>th</sup> International Conference of Sustainable Life in Manufacturing - SLIM 2013*, 22<sup>nd</sup> - 24<sup>th</sup> September 2013., Fiesa, Slovenia.
9. Globočki, L. G., **Sredanović, B.**, Kramar, D., Nedić, B., Kopač, J.: Effects of using of MQL technique in metal cutting, *Proc. of 13<sup>th</sup> International Conference on Tribology SERBIATRIB 13*, 15.-17. May 2013. Belgrade, Serbia.

**Оригинални научни радови на националним научним конференцијама:**

1. **Sredanović, B.**, Globočki-Lakić, G., Borojević, S.: Projektovanje i proračun obimnog glodala primjenom savremenih programskih sistema, *Zbornik 9. međunarodne konferencije o dostignućima elektrotehnike, mašinstva i informatike DEMI 2009*, 28.-29. maj 2009., Banja Luka, RS, BiH;

2. Borojević, S., **Sredanović, B.**, Globočki-Lakić, G., Nedić, B., Čiča, Đ.: Analiza indeksa obradivosti aluminijumskih legura pomoću aplikativnog programskog rješenja, *Zbornik XXXIII savjetovanja proizvodnog mašinstva Srbije sa međunarodnim učešćem*, 16.-17. jun 2009, Beograd, Srbija.
3. **Sredanović, B.**, Globočki - Lakić, G., Čiča, Đ., Borojević, S.: Modeliranje vretenastih glodala primjenom cad/cad sistema, *Zbornik 36. JUPITER konferencije sa međunarodnim učešćem*, 11. - 12. Maj 2010., Beograd, Srbija.
1. Čiča, Đ., Zeljković, M., Globočki - Lakić, G., **Sredanović, B.**: Senzitivnost funkcije frekventnog odziva sistema glavno vreteno – držač alata – alat na promjene parametara veze, *Zbornik 36. JUPITER konferencije sa međunarodnim učešćem*, 11.-12. Maj 2010., Beograd, Srbija.
2. **Sredanović, B.**, Globočki - Lakić, G., Nedić, B., Čiča, Đ.: Novi pristup definisanja univerzalne obradivosti pri obradi rezanjem, *Zbornik 37. JUPITER konferencije sa međunarodnim učešćem*, 10. - 11. Maj 2011., Beograd, Srbija
3. Jovišević, V., Borojević, S., Globočki - Lakić, G., **Sredanović, B.**: Optimizacija procesa proizvodnje primjenom programskog paketa Tecnomatix Plant Simulation, *Zbornik 37. JUPITER konferencije sa međunarodnim učešćem*, 10. - 11. Maj 2011., Beograd, Srbija
4. Golubović - Bugarski, V., Blagojević, D., Čiča, Đ., **Sredanović, B.**: Detection of structural damage location using frequency response fuction data, *Proc. of 10<sup>th</sup> Anniversary International Conference on Accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology DEMI 2011*, 26. - 28. May 2011., Banja Luka, Bosnia and Herzegovina.
5. Borojević, S., Jovišević, V., Globočki - Lakić, G., **Sredanović, B.**, Radisavljević, M.: Selection of variant for material flow type in conditions of group approach using the software system tecnomatix plant simulation, *Proc. of 10<sup>th</sup> Anniversary International Conference on Accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology DEMI 2011*, 26. - 28. May 2011., Banja Luka, Bosnia and Herzegovina.
6. Čiča, Đ., Zeljković, M., Globočki - Lakić, G., **Sredanović, B.**, Borojević, S.: Modeling of dynamical behavior spindle-holder-tool assembly, *Proc. of 34<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering ICPE 2011*, September 28. - 30. 2011., Niš, Serbia.
7. Borojević, S., Jovišević, V., Globočki - Lakić, G., Čiča, Đ., **Sredanović, B.**: Identification of face functionality with program system for purpose of modular fixture design, *Proc. of 34<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering ICPE 2011*, September 28. - 30. 2011., Niš, Serbia.
8. Borojević, S., Jovišević, V., Globočki-Lakić, G., **Sredanović, B.**: Efekti primjene programskog sistema catia u procesu izrade programa za numeričke mašine, *Zbornik 38. JUPITER konferencije sa međunarodnim učešćem*, 12. - 13. Maj 2012., Beograd, Srbija
9. Globočki - Lakić, G., **Sredanović, B.**, Borojević, S., Čiča, Đ., Jovišević, V.: Analiza obradivosti materijala pomoću aplikativnog računarskog programa, *Zbornik 10. međunarodne konferencije - Održavanje i proizvodni inženjering KODIP 2012*, 26. - 29. jun 2012., Budva, Crna Gora.

10. Globočki - Lakić, G., **Sredanović, B.**, Čiča, Đ., Milutinović, A.: Applications of cad/cam system for machining of aluminum profiles, *Proc. of 11<sup>th</sup> International Scientific Conference Advanced Production Technologies MMA 2012*, 20. - 21. September 2012., Novi Sad, Serbia.
11. Čiča, Đ., Zeljković, M., Globočki – Lakić, G., **Sredanović, B.**, Borojević, S.: Identification of contact parameters of spindle - holder – tool assembly using artificial neural networks, *Proc. of 11<sup>th</sup> International Scientific Conference Advanced Production Technologies MMA 2012*, 20. - 21. September 2012., Novi Sad, Serbia.
12. **Sredanović, B.**, Globočki, L. G., Kramar, D., Kopač, J.: Cutting force modeling in hard alloy steel turning, *Proc. of 11<sup>th</sup> International Conference on Accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology DEMI 2013*, 29. May - 1. June 2013., Banja Luka, Bosnia and Herzegovina.
13. Jovišević, V., Borojević, S., Globočki, L. G, Čiča, Đ., **Sredanović, B.**: Analysis of effectiveness on production system for production of the tools for hydraulic press brakes, *Proc. of 11<sup>th</sup> International Conference on Accomplishments in Eletrical and Mechanical Engineering and Information Tehnology DEMI 2013*, 29. May - 1. June 2013., Banja Luka, Bosnia and Herzegovina.

- a) Навести неопходне биографске податке: школовање, успјех у току школовања, кретање у служби, резултати научно-истраживачког или стручног рада, јавна признања, друштвене активности и познавање страних језика;
- б) У прилогу биографије доставити списак објављених научних радова.

## 2. ЗНАЧАЈ И НАУЧНИ ДОПРИНОС ИСТРАЖИВАЊА

### Значај истраживања

У посљедњих 10 година, развој технологије је у великој мјери фокусиран на микро-обраду дијелова малих димензија за потребе медицинске, електронске, војне, аутомобилске, авио индустрије, а значајно мјесто заузима у областима енергетике и свемирске технологије. Микро-технологијама се обрађују различити материјали, од чега су у највишем проценту заступљени метали и легуре метала. На примјер, алуминијум и његове легуре се користе за израду прототипова микро-дијелова док се бакар, легуре бакра и графит користе за израду прецизних електрода за електроерозиону обраду. Челици и специјалне легуре, који спадају у тешко обрадиве материјале, користе се за израду алата и функционалних микро-дијелова изложених високим топлотним и механичким оптерећењима.

Тешкообрадиви материјали се доминантно обрађују електроерозионом обрадом (EDM) и ласерском обрадом (LBM), што се у великој мјери пресликало и на област микро-технологије. EDM поступак обраде захтјева израду прецизних електрода сложеног облика за грубу и фину обраду. Израђене електроде се преносе на постројења за електроерозију што доводи до појаве грешака позиционирања, а саме електроде након обраде губе тачност и квалитет, те постају неупотребљиве. Чињеница је да су за производњу микро-дијелова EDM поступком потребне двије различите врсте обраде и то прецизно глодање и електроерозија. Главно и припремно-завршно вријеме код EDM поступка је много дуже у односу на обраду глодањем. Са друге стране, LBM поступак омогућава краће вријеме израде и елиминисање грешке позиционирања. Међутим, овим поступком се не могу добити микро-дијелови са сложеним запреминским облицима због немогућности контролисања дубине продирања ласерског зрака. Поред тога, ту је и негативан утицај топлоте ласерског зрака на квалитет обрађене површине микро-дијелова

услијед промјене особина површинског слоја.

Микро-глодање, као механички поступак обраде, омогућава израду комплексних тродимезионалних облика. Према дефиницији, микро-глодање је глодањесапречницамаалатамањимод 1 mm. Проблем код микро-обраде представља обрада високолегираних челика, алатних Cr-Ni челика и Mn челика, као и обрада титанијумових легура (Инконел), због њихових изузетно добрих механичких особина. Наведени материјали се користе за израду ковачких и ливачких калуца, матрица алата за деформисање и функционалних високооптерећених микро-дијелова. Контролисање поступка микро-глодања је много теже него код глодања на макро нивоу због присуства тзв. „*size effect-a*“. Наведени феномен се односи на несразмјеру у рангу величина геометријских и технолошких параметара обраде у односу на структуру материјала обраде, што усложњава проблем обраде. Због велике брзине одвијања процеса резања и његове сложеностиузрокованеутицајем „*size effect-a*“, мониторинг системи за праћење процеса у реалном времену не дају правовремене и поуздане резултате.

Као недостаци у истраживању микро-глодања могу се навести непоуздани и нетачни модели услед тешко објашњивих феномена, сложене интеракције параметара и нелинеарности у одвијању процеса резања, парцијални приступ у проучавању и недовољно истражена области примјене микро-глодања за обраду групе тешкообрадливих материјала. Циљеви истраживања планирани у оквиру дисертације односе се на развој модела за дефинисање интеракција између параметара процеса као и развојаодговарајућих база података.Остваривањем постављених циљева дисертације остварио би се значајан помак у области микро-глодања тешкообрадливих материјала, како у научном, тако и у апликативном смислу.

Моделирањем функција обрадивости омогућило би се превализажење наведених проблема, као и дефинисање подлога за провођење вишеобјектне оптимизације. Очекивања су да ће резултати спроведених истраживања, обезбиједити продуктивнију и ефикаснију обраду, те омогућити постизање тражене тачности димензија и квалитета обрађене површине. Ово би несумњиво био значајан научни допринос чији би резултати помогли рјешавањау бројних проблема у пракси, јер циљ истраживања има своје оправдање само ако је примјењив у пракси.

### **Преглед истраживања**

Микро-глодање (енг. *micro-milling*) је предмет многих истраживања јер представља прихватљиву алтернативу устаљеним технологијама израде микро-дијелова [3]. Многи истраживачи проучавају микро-глодање као један од предпосеца у микро-технологијама или као хибридни процес комбинован са EDM или LBM [4,5]. Резултати истраживања ове врсте обраде се објављују уводећим научним публикацијама.

Кроз преглед истраживања микро-глодања и хибридни микро-технологија, у радовима [6,7], приказана су достигнућа и предвиђања у погледу одговарајућих вриједности функција обрадивости као што су: храпавост обрађене површине, тачност димензија микро-дијелова и производност (енг. *material removal rate - MMR*). Сумирана су истраживања о утицајима технолошких и геометријских параметара на процес обраде и излазне параметре у микро-глодању. Аутори су се посебно осврнули на утицај односа полупречника заобљења резне ивице алата и дебљине неодрезане струготине. У раду [8] аутори стављају акценат на проблем дефлексије алата код микро-глодања тешкообрадливих материјала услијед дјеловања сила резања, при чему

су за истраживање користили глодала са пречником  $d \geq 0.5$  mm. Такође, аутори се осврћу и на проблематику недовољно истражених феномена у микро-резању, као што је утицај величине кристалних зрна материјала обратка на процес формирања струготине. Према истраживања, промјена вриједности улазних параметара и услова обраде за 20% у односу на област испитиваних режима приликом моделирања, доводе до наглог повећања грешке излаза из успостављених модела и неупотребљивости истих.

У раду [9] је приказан емпиријски модел силе резања при обради алатног челика S-7 тврдоће 55 HRc са вретенастим глодалом пречника 0.8 mm. Модел се заснива на раније развијеним емпијским моделима за силу резања при макро-стругању. Као улазни параметри користе се тврдоћа материјала, коефицијент трења између обратка и алата, те грудни угло алата. Излазе из поменутог модела аутори су искористили у сврху дефинисања дефлексије алата. Унапријеђени Армарегов модел резања приказан је у раду [10], при чему се разматрају различити услови клизања струготине преко грудне површине алата односно полупречника заобљења резне ивице. Експериментална истраживања су проведена са алуминијумском легуром и вретенастим глодалом пречника 0.6 mm. Аутори констатују да су услови који владају у зони микро-резања нелинеарни, што доводи до грешке у прорачуну угла смицања струготине и коефицијената трења између оштрице алата и материјала обратка. Проблем су превазишли увођењем поправног коефицијента који представља количник дубине резања и полупречника заобљења резне ивице.

Комбиновани модел предикције понашања сила резања приказан је у раду [11]. Коефицијенти емпиријских модела, засновани на специфичном отпору резања као статичкој величини, добијени су коришћењем методе коначних елемената (МКЕ). Анализиран је сигнал силе резања у зависности од угла ротације алата. При овим истраживањима је сигнал динамометра филтриран Калмановим алгоритмом како би се избјегли шумови услед вибрација динамометра. Процес моделирања сила резања помоћу МКЕ изложени су у раду [12] и [13], при чему су аутори примијенили Џонсон-Кук модел понашања материјала проширен коефицијентима који узимају у обзир отврдњавање матријала. Приликом симулације процеса микро-глодања коришћен је услов хомогености материјала. Услов хомогености материјала обратка такође је примјењен у раду [14], гдје су аутори проучавали утицај тешкообрадивог челика на силе резања у микро-глодању. Динамичко понашање сила резања симулирано је комбинацијом МКЕ и модела којим се описује промјена дубине резања у зависности од угла ротације микро-глодала.

Предикција сила резања при микро-глодању хладно ваљаног алатног челика тврдоће 50 HRc са алатом пречника 400  $\mu\text{m}$  изложен јеу раду [15]. При моделирању аутори су примијенили *fuzzy*-логику, која користи *Chio*-ов алгоритам за додатно груписање података ради дефинисања правила на основу улазних и излазних података. Модел користи читав спектар сигнала добијених из динамометра, при чему се као ограничење наводи немогућност константног временског праћења сигнала. Анализа обрадивости Cr-Ni челика при микро-глодању алатом пречника 800  $\mu\text{m}$ , дата јеу раду [16]. Извршена је анализа и поређење резултата моделирања Тагучијевом методом и *fuzzy*-логиком. Анализиран је утицај дубине резања, корака и брзине резања на хабање алата, силе резања и храпавост површине. Закључено је да се помоћу модела заснованих на вјештачкој интелигенцији може ефикасно описати понашање излазних параметара процеса. Индиректан начин мјерења сила резања при микро-глодању, који укључује акцелератор и сензор јачине струје, анализиран је у раду [17]. Експериментални подаци са сензора су анализирани у фреквенцијском домену. Због нелинеарности вриједности силе резања, иста је моделирана

модификованим неуронским мрежама. Моделирање модификованим неуронским мрежама одвија се у два корака при чему се користе подаци добијени са поменутих сензора. Реална вриједност силе резања мјерена динамометром је поређена са излазом из неуронских мрежа и при томе су добијене задовољавајуће вриједности грешака.

У раду [18] је анализиран утицај дубине резања, корака по зубу и брзине резања при обради микро-глодањем са глодалом пречника 1 mm. Аутори су експерименталном анализом дошли до закључака о нелинеарности процеса микро-резања, који су описали односом величине полупречника заобљења резне ивице и дебљине неодрезане струготине. Анализом храпавости усправних стијенки обрађених микро-канала, за конкретне вриједности величина алата и полупречника, дошло се до податка о минималној дебљини неодрезане струготине. Анализа обраде микро-глодања тешкообрадивог челика H13 алатом пречника 900  $\mu\text{m}$  је представљена у раду [19]. Испитиван је утицај „*size effect*-а“ на карактеристике и параметре процеса: силу резања, храпавост обрађене површине и висину наслага на ивицама обратка. Аутори су дошли до закључка да се најмања храпавост обрађене површине јавља када је вриједност односа полупречника заобљења резне ивице и дебљине неодрезане струготине приближно један, а као разлог наводе уједначавање механизма формирања струготине. У раду [20] је анализирана обрада алатног челика D2 тврдоће до 30 HRC са вретенастим глодалом пречника 200  $\mu\text{m}$ . Због мале вриједности пречника глодала коришћен је АЕ сензор ради дефинисања релативног положаја глодала и обратка са циљем побољшања димензионалне тачности обраде. Иако су добијене мале вриједности сила резања, аутори су дошли до закључка да је резултантна сила у великој мјери оријентисана у радијалном правцу у односу на осу глодала. Анализа је показала да се храпавост обрађене површине и вриједност радијалне силе повећава када се вриједност односа полупречника заобљења резне ивице и корака по зубу смањи испод један, а као разлог наводе преовладавање механизма гњечења материјала обратка. Аутори су у радовима [21] и [22] испитивали утицај технолошких параметара и геометрије глодала при обради нерђајућег челика тврдоће 58 HRC микро-глодалима пречника 600  $\mu\text{m}$ . Као параметри обраде анализране су силе резања и комплексни дводимензионални параметри квалитета обрађене површине. Резултати су моделирани регресионом анализом. Главни закључакаутора ова два рада је да још нису успостављени довољно тачни модели којима се описују излазни параметри микро-резања. У раду [23] је разматран утицај карактеристика кристалних зрна материјала обратка на квалитет обрађене површине. Анализиран је утицај различитих фаза материјала, који у суштини имају различите модуле еластичности и коефицијенте трења. Аутори су констатовали да величина еластичне деформације материјала обратка утиче на процес формирања струготине, а самим тим и на квалитет обрађене површине. Слична истраживања су презентована у раду [24]. Предложени модел разматра ефекте геометрије резног алата, корака и микроструктуре материјала предмета обраде на процес формирања струготине и силе резања. Промјена минималне дебљине неодрезане струготине на границама фаза узрокована је микроструктуром материјала. Ова запажања су имплементирана у модел путем кога је праћен њихов утицај на само остваривање механизма микрорезања. Анализа хабања алата, кроз прецизна мјерења повећања полупречника заобљења резне ивице, презентована је у раду [25]. При експерименталним истраживањима коришћен је угљенични челик и вретенасто глодало пречника 800  $\mu\text{m}$ . Као резултат добијени су емпиријски модели који укључују вриједности проценталног учешћа појединих фаза у материјалу обратка. У раду [26] анализирано је хабање алата у микро-глодању, при чему је



коришћено глодало пречника 500  $\mu\text{m}$ . У сврху праћења стања алата коришћени су сигнали добијени мјерењима сила резања помоћу динамометра, сигнали добијени мјерењем акустичне емисије и сигнали са акцелерометара. Због сложености приступа, коришћено је моделирање помоћу сложене неуро-фази логике, чији су излази дали задовољавајуће резултате.

У раду [27] анализиран је утицај MQL (енг. *minimal quantity lubrication*), као специјалне технике подмазивања, на концентрисано хабање микро-глодала и храпавост обрађене површине. При истраживању је коришћен челик тврдоће 38 HRC и глодало пречника 600  $\mu\text{m}$ . Анализиран је утицај сухе обраде и MQL технике при лазличитим притисцима и протоцима емулзије, корака по зубу и брзине обраде на поменуте излазне параметре. Константован је сигнификантан утицај MQL технике подмазивања, јер је дошло до повећања постојаности алата за 2 пута, а храпавост површине се смањила за 2,5 пута у односу на суву обраду. Анализа утицаја подмазивања дата је у раду [28], гдје су аутори проучавали утицај стандардне технике подмазивања на механизме хабања алата. Приликом истраживања коришћен је алат пречника 500  $\mu\text{m}$  којим је обрађивана тешкообрадива легура титанијума - Инконел. У закључцима је наведено да су адхезивно и дифузно хабање примарни облици хабања. Као утицајни параметри на ове врсте хабања наведени су дужина додира алата и обратка и температура зоне резања. У раду [29] приказана је анализа специјалне технике подмазивања наелектрисаним карбонским наночестицама. Наведена техника је поређена са техником обраде на суво и обрадом без јонизовања честица. Анализиран је квалитет обрађене површине и ефекат ове врсте подмазивања на хабање алата. Аутори су експерименталним путем мјерили коефицијент трења између алата и обратка. Резултати ових истраживања су фаворизовали обрада са наелектрисаним честицама у односу на остале.

Анализа техника оптимизације у области нових технологија приказана је у раду [30]. На основу анализе се може закључити да су примјењиване многе технике оптимизације, али да не постоје довољно тачни и егзактни модели којима се описује понашање излазних вриједности у процесу микро-обраде. У раду [31] аутори су у микро-глодању примјенили Тагучијеву технику оптимизације и анализу варијансе, гдје је циљ оптимизације био достизање максималне продуктивности. Према анализи, оптимална продуктивност се добија при коришћењу средње брзине обраде, велике дубине резања и великог корака по зубу. Вишеобјектна оптимизација микро-глодања проведена је у раду [32]. Аутори су, помоћу успостављеног алгорита, кроз низ корака одабрали параметре чије вриједности су поставили као циљ за сљедећи корак оптимизације заснован на *Grey-relation* анализи. У раду [33] је приказан примјер PSO оптимизације чији је циљ био минимизирање храпавости обрађене површине у микро-глодању. Анализом је установљено да се минимална храпавост добије при већим корацима по зубу, што није случај код макро-обраде. Анализа је показала да се минималне наслаге на ивицама обратка добијају при већим дубинама обраде.

На основу анализе досадашњих истраживања може се закључити да се мали број аутора фокусирао на анализу ефеката микро-глодања тешкообрадливих материјала, што потврђује и недостатак одговарајућих база података и база знања које би се могле користити у условима реалне производње. Свеобухватна истраживања којима се испитује утицај веома важних експлицитних механичких карактеристика материјала обратка, као што су тврдоћа, чврстоћа и жилавост, су врло ријетка. Мали је број истраживања која узимају у обзир утицај специјалних техника подмазивања и насљедне особине обрађене површине узроковане претходном обрадом. Ова врста истраживања је јако важна код микро-глодања као

технологије предвиђене за претходну и завршну обраду. Из опширне анализе досадашњих истраживања се може закључити да још увијек нису успостављени довољно тачни и поуздани модели понашања излазних величина у микро-глодању. Разлог за то лежи у чињеници да је велики број модела преузет из области макро-обrade коју карактеришу битно другачије физикалне карактеристике и механизми одвијања процеса резања.

Као примјер се може навести присуство феномена, гдје долази до повећања силе резања услед смањења корака по зубу и дубине резања, што довољно говори о сложености процеса и немогућности управљања овим процесом у реалном времену. Сложене међусобне интеракције параметара и присуство „*size effect*-а“ додатно усложњава проблем проучавања, због чега се веома мали број досадашњих истраживања базирао на свеобухватном приступу проблему микро-глодања тешкообрадливих материјала.

### **Радна хипотеза са циљем истраживања**

На основу детаљне анализе досадашњих истраживања, као и исцрпног образложења циљева истраживања, до рјешења постављеног проблема у докторској дисертацији доћи ће се разрадом следећих хипотеза:

1. Развојем предиктивних модела могуће је, при обради микро-глодањем, успоставити зависност излазних параметара процеса од улазних геометријских и технолошких параметара, те карактеристика материјала обратка, односно могуће је дефинисати функције обрадивости тешкообрадливих материјала при микро-глодању.
2. Вишеобјектном оптимизацијом која користи предиктивне моделе и базе података засноване на експерименталним истраживањима, могу се постићи значајни резултати у погледу повећања производности и смањења трошкова алата као критичног елемента у микро-глодању.
3. Обрадом микро-глодањем дијелова израђених од тешкообрадливих материјала, могуће је постићи исти квалитет обрађене површине и тачност димензија који се остварује примјеном до сада уобичајених метода обраде (EDM и LBM).

Циљ истраживања је испитивање могућности примјене микро-глодања за запреминску обраду тешкообрадливих материјала, који се у пракси најчешће обрађују електроерозијом (EDM). Резултати истраживања у овој докторској дисертацији би требали омогућити елиминисање неповољних ефеката који прате EDM али и LBM поступак. Ефекти примјене анализираће се и за претходну и за завршну обраду микро-глодањем. Како у микро-обradi велику важност има тачност димензија и квалитет обрађене површине, проучавање утицаја услова обраде на поменуте параметре је од есенцијалне важности. У микро-глодању алат је најосјетљиви елемент обрадног система, те је познавање природе сила резања битно због предикције лома алата и дефлексије алата која директно утиче на тачност обраде. Велику важност има и познавање утицаја услова обраде на квалитет обрађене површине и процес хабања алата. У складу са постављеним циљем, извршиће се експериментално истраживање и анализа утицаја технолошких и геометријских параметара обраде, материјала обратка, начина обраде и техника подмазивања (суво, конвенционално и MQL), на излазне величине: силе резања, хабање алата и хрпаваост обрађене површине.

## Материјал и методе рада

У процесу доказивања постављених хипотеза, уз систематичан приступ анализи проблема, кандидат ће детаљно разрадити неколико цијелина које се односе на:

- анализу теоријских истраживања,
- извођење експерименталних истраживања према дефинисаним циљевима и постављеним хипотезама,
- моделирање испитиваних процеса примјеном вјештачке интелигенције,
- поређење резултата, и
- верификацију истраживања уз извођење закључака.

Теоријска истраживања засниваће се на анализи доступних, досадашњих истраживања из области микро-глодања. На основу анализе добиће се теоријске подлоге које омогућују сагледавање физикалних појава и механизма процеса скидања материјала при микро-глодању тешкообрадливих материјала. Знање о механизмима одвијања процеса довешће до издвајања функција обрадивости, скупа сигнификатних технолошких и геометријских фактора, те до дефиниције микро-обрадивости. Моделирање функција обрадивости које узимају у обзир параметре процеса, обавиће се коришћењем комбинованих метода вјештачке интелигенције са циљем описа сложене интеракције параметара и нелинарности процеса. У току моделирања користиће се емпиријско и аналитичко знање из теоријских истраживања, због присуства различитих механизма одвијања процеса обраде. Модели ће обезбиједити идентификацију границе између појаве механизма формирања струготине и механизма гњечења материјала.

Експерименталним истраживањима претходиће припрема машине алатке, ради избјегавања грешака у кретању и позиционирању алата и обратка. Прелиминарним тестовима извршиће се подешавање мјерних уређаја, што је од изузетног значаја због високих брзина извођења процеса обраде. Дефинисање плана експеримената обухватиће дефинисање великог броја различитих комбинација узлазних параметара, који су идентификовани као сигнификантни у претходном верификационом кораку. У току извођења експерименталних мјерења пратиће се директни и индиректни показатељи стања процеса микро-глодања који су вези са храпавошћу обрађене површине те дефлексијом и хабањем алата. Обрада и анализа резултата ће се обавити с циљем потврђивања ваљаности формираних модела.

На основу дефиниције микро-обрадивости формираће се циљеви оптимизације. Оптимизација ће се заснивати на претходно развијеним моделима. Ради лакшег провођења оптимизације развиће се апликациони рачунарски програм. Резултати оптимизације биће коришћени у верификационим истраживањима описаним у оквиру постављених циљева у циљу извођења ваљаних закључака.

У сврху потврђивања постављених хипотеза, поред метода дедукције и индукције које ће се користити при у анализи извођењу закључака, примјењиваће се и:

- експерименталне методе,
- методе математичког моделирања и
- методе вјештачке интелигенције.

## Научни допринос истраживању

При микро-обradi готово свих врста материјала јављају се проблеми у погледу ниске обрадивости. Међутим, проучавање обрадивости легираних челика у микро-обradi се издваја као доминантан проблем. Научни допринос истраживања у оквиру дисертације огледа се у добијању интегралних модела понашања и интеракције излазних и улазних параметара процеса микро-глодања тешкообрадивих материјала. Поред тога, значајан допринос у истраживању феномена микро-обrade огледа се и у интегралном приступу дефинисању микрообрадивости кроз моделирање скупа функција обрадивости. Резултати проведених истраживања ће омогућити ефикасније управљање процесом микро-обrade и превазилажење недостатака EDM и LBM обрада као доминантних у овој области. Примјена резултати истраживања у пракси путем поступака директне израде функционалних дијелова микро-глодањем, обезбиједиће значајан допринос у погледу повећања квалитета обрађених површина и производности обраде микро дијелова.

## Прилог - цитирана литература:

- [1] McGeough, J.: Micro-machining of engineering materials, *Marcel-Dekker*, New York, 2002.
- [2] Dornfeld, D., Lee, D. E.: Precision manufacturing, *Springer*, New York, 2008.
- [3] Cheng, K., Huo, D.: Micro-cutting: fundamentals and application, *Wiley&Sons*, Oxford, 2013.
- [4] Masuzawa, T.: State of the art of micromachining, *Annals of the CIRP*, Vol. 49(2), 2000, pp. 473-488.
- [5] Chae, J., Park, S. S., Freiheit, T.: Investigation of micro-cutting operations, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, 2006, pp. 313-332.
- [6] Azcarate, S. and et.: Hybrid tooling - a review of process chains for tooling microfabrication within 4M, *Proceedings of 2<sup>nd</sup> Int. Conference on Multi-Material Micro Manufacture*, Grenoble, 2006, pp. 1-4.
- [7] Dornfeld, D., Min, S., Takeuchi, Y.: Recent Advances in Mechanical Micromachining, *Annals of the CIRP*, Vol. 55(2), 2006, pp. 745-768.
- [8] Camara, M.A., Campos, J.C., Abrao, A. M., Davim, J.P.: State of the art on micromilling of materials - a review, *Journal of Material Science and Technology*, Vol. 28(8), 2012, pp. 673-685.
- [9] Dow, T. A., Miller, E. L., Kenneth, G.: Tool force and deflection compensation for small milling tools, *Precision Engineering*, Vol. 28, 2004, pp. 31-45.
- [10] Bissacco, G., Hansen, H.N., Slunsky, J.: Modelling the cutting edge radius size effect for force prediction in micro-milling, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 57, 2008, pp. 113-116.
- [11] Altintas, Y., Jin, X.: Mechanics of micro-milling with round edge tools, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 60, 2011, pp. 77-80.
- [12] Lai, X., Li, H., Li, C., Lin, Z., Nib J.: Modelling and analysis of micro scale milling considering size effect, micro cutter edge radius and minimum chip thickness, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 48, 2008, pp. 1-14.

- [13] Thepsonthi, T., Ozel, T.: Experimental and finite element simulation based investigations on micro-milling Ti-6Al-4V titanium alloy: effects of CBN coating on tool wear, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 213, 2013, pp. 532-542.
- [14] Afazov, S. M., Ratchev, S. M., Segal, J.: Prediction and experimental validation of micro-milling cutting forces of AISI H13 steel at hardness between 35 and 60 HRC, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 62, 2012, pp. 887-899.
- [15] Ren, Q., Balazinski, M., Jemielniak, K., Baron, L., Achiche, S.: Experimental and fuzzy modelling analysis on dynamic cutting force in micro milling, *Soft Computing*, Vol. 17, 2013, pp.1687-1697.
- [16] Kuram, E., Ozcelik, B.: Micro-milling performance of AISI 304 stainless steel using Taguchi method and fuzzy logic modelling, *Journal of Intelligece Manufacturing*, Vol. 25, 2014, pp.1-14.
- [17] Hong Y. C., Ha, S. J., Cho, M. W.: Predicting of Cutting Forces in a Micromilling Process Based on Frequency Analysis of Sensor Signals and Modified Polynomial Neural Network Algorithm, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 13(1), 2012, pp. 17-23.
- [18] Sooraj, V. S., Mathew, J.: An experimental investigation on the machining characteristics of microscale end milling, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 56, 2011, pp. 951-958.
- [19] Aramcharoen, A., Mativenga, P. T.: Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel, *Precision Engineering*, Vol. 33, 2009, pp. 402-407.
- [20] Jin, C. Z., Kang, I. S., Park, J. H., Jang, S. H., Kim, J. S.: The characteristics of cutting forces in the micro-milling of AISI D2 steel, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 23, 2009, pp. 2823-2829.
- [21] Bissacco, G., Hansen, H. N., De Chiffre, L.: Micromilling of hardened tool steel for mould making applications, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 167, 2005, pp. 201-207.
- [22] Bissacco, G., Hansen, H. N., De Chiffre, L.: Size Effects on Surface Generation in Micro Milling of Hardened Tool Steel, *Annals of the CIRP*, Vol. 55(1), 2006, pp. 593-496.
- [23] Wang, J. S. and et.: Surface generation analysis in micro end-milling considering the influences of grain, *Microsystem Technology*, Vol. 14, 2008, pp. 937-942.
- [24] Elkaseer, A, Dimov, S. S., Popov, K. B., Negm, M. A., Minev, R.: Modeling the material microstructure effects on the surface generation process in microendmilling of dual-phase materials, *Journal of Manufacturing Science and Engineering* , Vol. 134(4), 2012, pp.
- [25] Elkaseer, A, Popov, K. B., Dimov, S. S., Minev, R.: Material Microstructure Effect-based Investigation of Tool Wear in Micro-endmilling of Multi-phase Materials, *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Multi Material Micro Manufacture 2010*, Oyonnax, 2010, pp. 188-191.
- [26] Malekian M., Park, S. S., Jun, B.G.: Tool wear monitoring of micro-milling operations, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, 2009, pp. 4903-

- [27] Li K. M., Choub, S. Y.: Experimental evaluation of minimum quantity lubrication in near micro-milling, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, 2010, pp. 2163-2170.
- [28] Imran M., Mativenga, P. T., Gholinia, A., Withers, P. J.: Comparison of tool wear mechanisms and surface integrity for dry and wet micro-drilling of nickel-base superalloys, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 76, 2014, pp. 49-60.
- [29] Inada, A., Min, S., Ohmori, H.: Micro cutting of ferrous materials using diamond tool under ionized coolant with carbon particles, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 60, 2011, pp. 97-100.
- [30] Rao, R. V., Kalyankar, V. D.: Optimization of modern machining processes using advanced optimization techniques: a review, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology, online issues*, DOI 10.1007/s00170-014-5894-4, 2014.
- [31] Periyanan, P. R., Natarajan, U., Yang, S.H.: A study on the machining parameters optimization of micro-end milling process, *International Journal of Engineering, Science and Technology*, Vol. 3(6), 2011, pp. 237-246.
- [32] Kuram, E., Ozcelik, B.: Multi-objective optimization using Taguchi based grey relational analysis for micro milling of Al 7075 material with ball nose end mill, *Measuring*, Vol. 46(6), 2013, pp. 1849-1864.
- [33] Thepsonthi, T., Özel, T.: Multi-objective process optimization for micro-end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 63(9-12), 2012, pp. 903-914.

- а) Значај истраживања;  
б) Преглед истраживања;  
в) Радна хипотеза са циљем истраживања;  
г) Материјал и метод рада;  
д) Научни допринос истраживања.

### 3. ОЦЈЕНА И ПРИЈЕДЛОГ

На основу прегледане документације достављене у пријави теме за израду докторске дисертације, Комисија сматра да кандидат мр Бранислав Средановић испуњава све услове за израду пријављене докторске тезе предвиђене Законом. Позитивну оцјену о подобности кандидата Комисија доноси имајући у виду:

- да је кандидат стекао звање магистра техничких наука, из уже научне области из које пријављује тему за израду докторске дисертације;
- да је објавио већи број релевантних научних радова на признатим научним скуповима и у часописима;
- да располаже личним и професионалним квалитетима за даље усавршавање у научном раду.

Позитивну оцјену о погодности предложене теме докторске дисертације под радним насловом „Моделирање функција обрадивости у микро-глодању“ Комисија заснива и на следећим чињеницама:


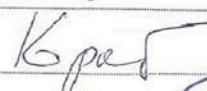
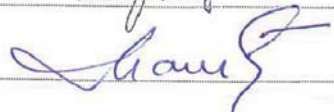
- предложена истраживања су актуелна и научно оправдана;
- реализација предложених циљева и представљених хипотеза примјеном предвиђених научно-истраживачких метода, довешће до нових сазнања из наведене проблематике и омогућити значајан научни допринос;
- предложена структура дисертације, од дефинисања проблема, прегледа досадашњих истраживања, циља истраживања и хипотеза, метода научно-истраживачког рада, до очекиваних резултата, упућује на закључак да ће кандидат дати свој оригинални научни допринос у области микро-глодања.

Имајући у виду напријед наведено, Комисија је једногласна у оцјени да је предложена тема погодна за израду докторске тезе, као и да кандидат испуњава све потребне услове за израду докторске дисертације. **Комисија предлаже Наставно-научном вијећу Машинског факултета Универзитета у Бањој Луци, да прихвати овај извјештај и одобри кандидату мр Браниславу Средановићу израду докторске дисертације под радним насловом „Моделирање функција обрадивости у микро-глодању“.**

- Кратка оцјена о научним и стручним квалификацијама кандидата тј. о његовим способностима да приступи изради дисертације;
- Научна или практична оправданост предложених истраживања и резултати који се могу очекивати;
- Мишљење о предложеној методи истраживања;
- Уколико комисија сматра да кандидат не посједује одговарајуће научне и стручне квалификације, да неке претпоставке кандидата у вези пријављене дисертације нису тачне или је предложен метод рада неадекватан, исти треба детаљно образложити.
- Приједлог са образложеном оцјеном о подобности теме и кандидата (Обавезно написати оцјену да ли су тема и кандидат подобни или не)

#### ПОТПИС ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ:

- Проф. др Павел Ковач, предсједник
- Проф. др Јанез Копач, члан
- Проф. др Гордана Глобочки - Лакић, члан

  
\_\_\_\_\_  
  
\_\_\_\_\_  
  
\_\_\_\_\_

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