



ENGINEERING ACADEMY OF MONTENEGRO



THE UNION OF ENGINEERS OF MONTENEGRO



MAINTAINERS SOCIETY OF MONTENEGRO



COOPERATIVE TRAINING CENTER  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
PODGORICA

**XII INTERNATIONAL  
CONFERENCE  
MAINTENANCE AND  
PRODUCTION ENGINEERING**

**KODIP - 2014**

**PROCEEDINGS**

Budva, 18.-21.06.2014.



KONFERENCIJA ODRŽAVANJE I  
PROIZVODNI INŽENJERING  
KODIP 2014  
Budva, 18.-21.06.2014.

## ZBORNİK RADOVA

### *Izdavači:*

Inženjerska akademija Crne Gore  
Savez inženjera Crne Gore  
Društvo održavalaca sredstava za rad Crne Gore  
Mašinski fakultet u Podgorici - Kooperativni trening centar

### *Za izdavače:*

Prof. dr Ljubomir Pejović  
Ivan Burić, dipl. inž. građ.  
Doc. dr Deda Đelović  
Prof. dr Sreten Savićević

### *Tiraž:*

100 primjeraka

### *Štampa:*

Art Grafika, Podgorica

### *Zbornik uredili:*

Prof. dr Miodrag Bulatović  
Prof. dr Mileta Janjić  
Doc. dr Nikola Šibalić

### *Adresa:*

Univerzitet Crne Gore  
Mašinski fakultet  
Džordža Vašingtona bb, 81000 Podgorica  
Tel. +382 20 245 003 i +382 67 349 111; fax: +382 20 245 116  
E-mail: [bulatovm@ac.me](mailto:bulatovm@ac.me); [mileta@ac.me](mailto:mileta@ac.me)

CIP - Каталогизација у публикацији  
Национална библиотека Црне Горе, Цетиње

ISBN 978-9940-527-35-8 (Mašinski fakultet)  
COBISS.CG-ID 25103632



## PREFACE

*Dear participants of the Conference*

*We continue with the Conference of maintenance and production engineering.*

*On the right is the XII Conference KODIP-2014.*

*This year the conference theme will relate to innovations in organization, technology and process technology in manufacturing engineering and maintenance.*

*This conference is specifically dedicated maintenance technology and production engineering for sustainable development*

*Conference themes include:*

- *Production technologies and maintenance of sustainable development*
- *The conventional and unconventional production technology*
- *Tribology*
- *Materials*
- *Industrial Engineering*
- *Software Engineering*
- *Numerical modeling and simulation*
- *construction and design*
- *Production systems and optimization - Implementation of ISO quality standards.*
- *Modern techniques and technologies to maintain*
- *Maintenance - "from practice to practice"*

*In Proceedings of the 47 works of over 70 authors and co-authors*

*Content of work covers the areas of application in practice to serious scientific texts*

*Responding to the jury at the end of the conference to declare the most notable works of the research character of the area to solve practical problems and interesting presentation.*

*On behalf of the organizers of the Conference: Engineering Academy of Montenegro, Association of Montenegro, the Company Maintainers funds for the operation of Montenegro and cooperative training center Mechanical Engineering in Podgorica I express gratitude to the authors and co-authors, participants and guests, sponsors and co-organizers, who have their engagement, The presence and resources, and have made it possible to this event, and so far, it reprezentativnan and useful.*

*We welcome you, successful work and a pleasant stay on the Montenegrin coast, in the beautiful surroundings of the hotel "Slovenska plaza", here in Budva.*

**President of the Organizing Committee  
Prof. Dr. Miodrag Bulatovic**





KONFERENCIJA ODRŽAVANJE I  
PROIZVODNI INŽENJERING  
KODIP 2014  
Budva, 18.-21.06.2014.

## PROGRAM I SADRŽAJ

**SRIJEDA, 18.06.2013.**

**20:00-22:00 REGISTRACIJA UČESNIKA**

**ČETVRTAK, 19.06.2013.**

**08:00-10:00 REGISTRACIJA UČESNIKA**

**10:00-11:00 OTVARANJE KONFERENCIJE - SALA A**

**Predsjedavajući:**

**Prof. Dr Ljubomir Pejović, Prof. dr Ljubodrag Tanović, Doc. dr Deda Đelović,  
Prof. dr Safet Brdarević, Prof. dr Miodrag Bulatović**

**11:00-12:00 Uvodna izlaganja - A**

- **D. Đelović, D. Medenica Mitrović:**  
ELEMENTI ANALIZE KORELACIJE IZMEĐU ODRŽAVANJA  
TEHNIČKIH SISTEMA I PRINCIPA ODRŽIVOG RAZVOJA ..... 1
- **D. Stanivuković, G. Ivanović, S. Mirković:**  
DOGAĐAJ - VEROVATNOĆA DOGAĐAJA - POUZDANOST ..... 9
- **S. Brdarević:**  
CILJEVI FUNKCIJE ODRŽAVANJA ..... 19
- **Lj. Tanović:**  
AKTUELNA ISTRAŽIVANJA U OBLASTI MIKRO-BRUŠENJA ..... 29

**12:00-13:00 KOKTEL DOBRODOŠLICE**

**13:00-14:30 Izlaganje radova - A**

**Predsjedavajući: Prof. dr Radoje Vujadinović, Mirjana Stanić, Prof. dr Krsto Mijanović**

- **R. Vujadinović:**  
SAVREMENO ODRŽAVANJE VOZILA U FUNKCIJI ODRŽIVOG  
RAZVOJA DRUMSKOG SAOBRAĆAJA ..... 37
- **M. Stanić, B. Milovanov:**  
ASPEKTI ŽIVOTNE SREDINE U ODRŽAVANJU ..... 45
- **S. Hadrović, S. Stevović:**  
MAINTENANCE OF FOREST RESOURCES AND REUSE OF WOOD

WASTE IN FUNCTION OF BIOMASS PRODUCTION INCREASING .....55

- **M. Vukčević, N. Šibalić, M. Janjić:**  
EKONOMSKA ANALIZA PROIZVODNJE DRVNIH PELETA .....63
- **K. Mijanović, J. Kopač:**  
CHANGING THE PARAMETERS OF THE QUALITY OF  
INPUT MATERIALS TO SUSTAINABLE MANUFACTURING .....73
- **M. Petronijević:**  
THE ISO 9000 AND 14000 FAMILY OF STANDARDS:  
ENVIRONMENTAL MANAGEMENT SYSTEMS .....85
- **S. Radosavljević, M. Radosavljević, J. Radosavljević:**  
ANALIZA RIZIKA ENERGETSKIH SISTEMA  
RUDARSTVA I ODRŽIVI RAZVOJ .....93
- **V. Jauković:**  
UPRAVLJANJE RIZIKOM UDESA U RADNOJ I ŽIVOTNOJ SREDINI

**PETAK, 20.06.2013.**

**9:00 - 10:30 Izlaganje radova - A**

**Predsjedavajući: Prof. dr Milentije Stefanović, Dr Safet Avdić, Mr Milenko Perović**

- **V. Mandić, M. Stefanović, Ž. Gavrilović:**  
DEVELOPMENT OF THE FORGING TECHNOLOGY FOR PRODUCING  
THE ARTIFICIAL HIP STEM THROUGH APPLICATION OF VIRTUAL  
MANUFACTURING .....99
- **D. Milosavljević, M. Bojić, R. Čukić, G. Bogdanović, V. Mandić:**  
INFLUENCE OF STATE OF ART FACADE TECHNOLOGY TO  
NET-ZERO ENERGY BUILDINGS .....109
- **S. Avdić:**  
SANACIJA KATARKE BAGERA RH 40C RADI PROIZVODNE  
RASPOLOŽIVOSTI, POUZDANOSTI I SIGURNOSTI U EKSPLOATACIJI..115
- **D. Erić, V. Mandić, S. Marković:**  
PODRŠKA OPTIMIZACIJI PROIZVODNIH TEHNOLOŠKIH PROCESA  
PRIMENOM ELEMENATA VIRTUELNE PROIZVODNJE .....123
- **M. Perović:**  
METALOGRAFSKA ANALIZA I KARAKTERIZACIJA UZROKA  
PLASTIČNOG KOLAPSA SISTEMA SVJEŽEG VAZDUHA U  
TERMOENERGETSKIM OBJEKTIMA.....129
- **M. Perović:**  
NAVARIVANJE KRANSKIH TOČKOVA OD ČELIKA  
ZA POBOLJŠANJE .....133
- **P. Nikšić, R. Radovanović:**

NADZOR VIBRACIONOG STANJA TURBINE U TE "MORAVA" SVILAJNAC .....	139
--	-----

**11:00 - 12:30 Izlaganje radova - A**

**Predsjedavajući: Prof. dr Mustafa Imamović, Mr Milanko Koruga, Mr Dušan Đurović**

- **D. Đurović, M. Bulatović:**  
IZVRSNOST ODRŽAVANJA .....149
- **M. Vemić, M. Koruga, D. Gačević, Ž. Čačić, R. Jelovac:**  
REKONSTRUKCIJA, REVITALIZACIJA I MODERNIZACIJA  
KOTLOVSKOG POSTROJENJA U TERMOELEKTRANI PLJEVLJA .....155
- **M. Koruga:**  
STRATEGIJA ODRŽAVANJA TEHNIČKIH SISTEMA  
U TERMOELEKTRANAMA .....167
- **M. Vujaković, A. Mićašević, U. Ljiljak:**  
UPRAVLJANJE OPREMOM - SPECIFIČNOSTI ISO 55001:2014 .....177
- **M. Imamović, A. Manduka:**  
DIZAJN I POUZDANOST ELEMENATA MAŠINA .....185
- **R. Biočanin, S. Šaćirović, B. Bilalović, M. Badić:**  
EKOLOŠKA BEZBEDNOST HRANE I VODE U USLOVIMA  
VISOKO-TOKSIČNE KONTAMINACIJE.....191
- **Z. Todorović:**  
KOMPLEMENTARNI ODNOS TURIZMA I ODRŽIVOG RAZVOJA U  
CRNOJ GORI.....203

**13:00 - 14:30 Izlaganje radova - A**

**Predsjedavajući: Prof. dr Živko Babić, Mr Mihailo Popović, Dr Zoran Jurković**

- **M. Jurković, Z. Jurković, M. Obad, S. Buljan:**  
REENGINEERING TOOLS IN THE DEVELOPMENT OF MODERN AND  
COMPETITIVE MANUFACTURING.....211
- **N. Šibalić, M. Vukčević, S. Savićević, M. Janjić, S. Martić, D. Laković:**  
PRIMJENA POSTUPKA FSW KOD ZAVARIVANJA ISTORODNIH  
MATERIJALA .....221
- **M. Mandić, G. Mladenović, Lj. Tanović, G. Danon:**  
MODEL ZA PREDIKCIJU SILE REZANJA PRI OBIMNOM GLODANJU  
HRASTOVINE.....231
- **G. Mladenović, Lj. Tanović, M. Popović:**  
OPTIMIZACIJA PUTANJE ALATA PRI OBRADI SLOBODNIH  
POVRŠINA GLODANJEM.....239
- **M. Popović, LJ. Tanović, G. Mladenović:**  
EKSPERIMENTI ORTOGONALNOG STRUGANJA U FUNKCIJI  
PREDIKCIJE SILA REZANJA .....247

- **M. Perović, M. Jevtović:**  
SANACIJA OŠTEĆENJA VEZE GLAVNOG HIDRAULIČNOG CILINDRA  
I OSLONE PLOČE PRESE ZA EKSTRUZIJU ALUMINIJUMA 27 MN .....255
- **Ž. Babić, R. Lekanić:**  
KONSTRUKTIVNA POBOLJŠANJA ALATA U TEHNOLOGIJI  
TERMOOBLIKOVANJA AMBALAŽE ZA TABLETE .....261

**16:00 - 19:00 Izlet brodom**

**20:30 SVEČANA VEČERA**

**SUBOTA, 21.06.2013.**

**09:00 - 11:00 Izlaganje radova - A**

**Predsjedavajući: Prof. dr Lazo Vujović, Prof. dr Mileta Janjić, Mr Sadžid Nuhodžić**

- **S. Šćepanović, L. Vujović, J. Vujović:**  
PLANIRANJE ODRŽAVANJA JEDINKE .....269
- **M. Janjić, M. Bulatović, M. Vukčević, D. Đurašković:**  
MODELIRANJE I SIMULACIJA NAPREZANJA STAKLENE PLOČE .....275
- **M. Janjić, M. Vukčević, S. Savićević, N. Šibalić:**  
POREĐENJE DEFORMACIONIH STANJA DOBIJENIH  
DISKRETIZACIONIM METODAMA .....283
- **D. Đurašković, M. Bulatović, M. Janjić, M. Vukčević:**  
ODRŽAVANJE U FUNKCIJI GOTOVOSTI MAŠINA ZA  
OBRADU STAKLA .....289
- **Z. Đukić:**  
STABLO OTKAZA SISTEMA DIZEL MOTORA .....295
- **S. Nuhodžić:**  
ULOGA I KONCEPCIJA DIJAGNOSTIKE U MODELU UNAPREDJENJA  
ODRŽAVANJA OSOVINSKIH SKLOPOVA ŽELJEZNIČKIH VOZNIH  
SREDSTAVA .....305
- **I. Kucora, LJ. Radovanović, Ž. Adamović:**  
RAZVOJ MATERIJALA CEVNIH SNOPOVA PIROLITIČKIH PEĆI  
ZA PROIZVODNJU LAKIH OLEFINA .....313

**11:30 - 13:30 Izlaganje radova - A**

**Predsjedavajući: Prof dr Petar Nikšić, Dr Slobodan Radosavljević, Đorđe Lazarević**

- **Đ. Lazarević, I. Ćosić, M. Lazarević, N. Sremčev, N. Suzić:**  
CLASSIFIER FOR PLANK SHAPED PARTS MADE IN  
FURNITURE INDUSTRY .....323
- **P. Nikšić, V. Milićević, D. Vujović:**



OPTIMIZACIJA TROŠKOVA U PROIZVODNJI I EKSPLOATACIJI  
VODENE PARE U POGONU KEKSA I VAFLA PROIZVODNOG  
SISTEMA SWISSLION D.O.O. ....327

- **Z. Punoševac:**  
UTICAJ LIDERA NA NEFORMALNO OBRAZOVANJE.....333
- **S. Radosavljević, M. Radosavljević, J. Radosavljević:**  
MOGUĆNOST UGRADNJE NOVOG POGONA NA KONSTRUKCIJU  
STRELE ROTORNOG BAGERA SRs 1200\*22/2, (ANALIZA) .....343
- **M. Mijanović Markuš, Z. Mijanović, R. Vukasojević, M. Đukanović:**  
EDUKATIVNI ROBOTI U VISOKOM OBRAZOVANJU.....351
- **N. Šibalić, B. Šljukić:**  
PREMAZI ZA POVRŠINSKU OBRADU PROIZVODA OD DRVETA U  
EKSTERIJERU .....359
- **D. Bratić, R. Grujičić, O. Mijanović, L. Grubiša, M. Mijanović Markuš,  
R. Tomović, Z. Mijanović:**  
AUTONOMNI MOBILNI ROBOT ZA SAKUPLJANJE DISKOVA .....365

**13:30 - 14:30 ZAVRŠNE DISKUSIJE - ZATVARANJE KODIP 2014 - A**

**Predsjedavajući: Prof. dr Miodrag Bulatović, Doc. dr Deda Đelović,  
Prof. dr Mileta Janjić**

G. Mladenović<sup>1</sup>, Lj. Tanović<sup>2</sup>, M. Popović<sup>3</sup>

## OPTIMIZACIJA PUTANJE ALATA PRI OBRADI SLOBODNIH POVRŠINA GLODANJEM

### Rezime

*U današnje vreme u skoro svim granama mašinstva je sve češća upotreba slobodnih (skulptorskih) površina u procesu projektovanja proizvoda, više iz estetskih nego iz funkcionalnih zahteva. Kada je u pitanju projektovanje i izrada slobodnih površina neizostavna je upotreba CAD/CAM sistema. Dobijena putanja alata je ključni element za kvalitet obrađene površine i za ukupno vreme obrade što direktno utiče na cenu izrađenog dela. U radu se daje postupak optimizacije putanje alata po kriterijumu održanja konstantne sile rezanja za proces 3-osne obrade glodanjem loptastim glodalom, kao i ekperimentalna verifikacija dobijenih rezultata simulacije.*

**Ključne reči:** Skulptorska površina, putanja alata, loptasto glodalo

### 1. UVOD

Danas je u skoro svim oblastima mašinstva prisutna upotreba slobodnih (skulptorskih, složenih) površina, pogotovu u automobilske i avio industriji, brodogradnji, ali i prilikom izrade kovačkih ili livačkih kalupa za različite mašinske delove. Upotreba slobodnih površina je prevashodno zbog poboljšanja ekstetskih zahteva, ali/i zbog poboljšanja funkcionalnih zahteva. Definicija slobodne površine je više intuitivna nego formalna [1]. Obično su definisane kao površine koje sadrže jednu ili više neplanarnih, ne kvadratnih površina predstavljenih u parametarskom domenu ili u obliku mozaika. Najčešće korišćeni postupci obrade su glodanjem loptastim glodalom na 3-osnim ili 5-osnim mašinama alatkama. Sa ovim u vezi se postavlja pitanje generisanje putanje alata koje podrazumeva upotrebu CAD/CAM sistema kako bi se površina predstavila analitički i na osnovu toga generisala odgovarajuća putanja alata. Kvalitet i tolerancija obrađene površine direktno zavisi od prethodno generisane putanje alata gde sa smanjenjem tolerancije eksponencijalno raste količina podataka koju treba smestiti u upravljačku jedinicu mašine alatke što predstavlja dodatni problem pa je u nekim slučajevima potrebno dati NC program deliti u segmentima što predstavlja dodatni problem za projektanta tehnologije.

Pri obradi slobodnih površina prisutne su sledeće faze: gruba, predzavršna i završna obrada. Pri gruboj obradi veliki deo materijala je skinut da bi se dobio približni oblik površine. Neravnine koje su ostale nakon grube obrade, a koje su uslovljene upotrebom alata velikog prečnika se uklanjaju u predzavršnoj obradi da bi se dobila ofsetovana površina (na rastojanju jednakom dodatku za finu obradu) koja će se obraditi u završnoj

<sup>1</sup> Goran Mladenović, dipl. inž. maš., [gmladenovic@mas.bg.ac.rs](mailto:gmladenovic@mas.bg.ac.rs), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

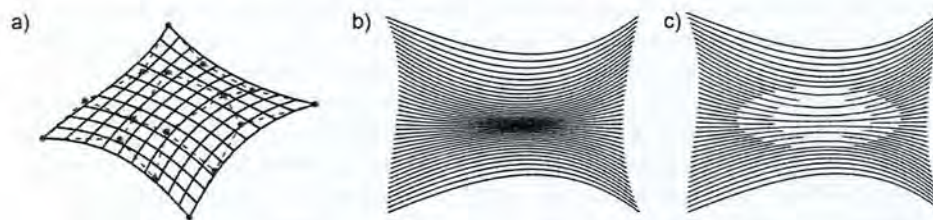
<sup>2</sup> Prof. dr Ljubodrag Tanović, [ltanovic@mas.bg.ac.rs](mailto:ltanovic@mas.bg.ac.rs), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

<sup>3</sup> Mr Mihajlo Popović, [mpopovic@mas.bg.ac.rs](mailto:mpopovic@mas.bg.ac.rs), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

obradi što dovodi do smanjenja ukupnog vremena obrade [2, 3]. Pri gruboj obradi je potrebno ukloniti što je više moguće materijala za što manje vreme pa se u današnje vreme istraživanja usmeruju na tu stranu. Jedan od primenjenih metoda je promena brzine pomoćnog kretanja u cilju održanja sile rezanja na konstantnu vrednost gde se za krajnji cilj dobija značajno smanjenje ukupnog vremena obrade u odnosu na metod sa konstantnom dubinom rezanja i brzinom pomoćnog kretanja [4]. Upotreba ovog metoda optimizacije je opravdana samo kod grube obrade jer su kod završne obrade dubine rezanja male pa je samim tim i sila razanja mala.

## 2. GENERISANJE PUTANJE ALATA

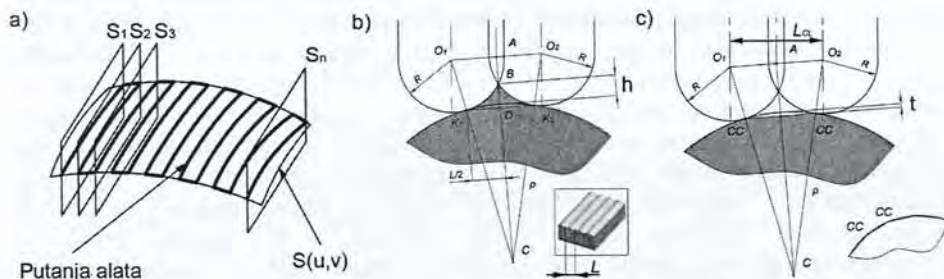
Skulptorka površina je najčešće predstavljena kao bikubna Bezier-ova, B splajn ili NURBS površina, a definiše se preko kontrolnih tačaka koje su zadate u dekartovim koordinatama. Svaka tačka na površini se izračunava prema odgovarajućim obrascima u funkciji dva parametra,  $u$  i  $v$ . Osobina navedenih površina je da zadržavaju kontinuitet drugog reda koji je različit od nule čime se obezbeđuju kontinualni prelazi između površina. Zadavajući vrednost jednog parametra možemo odrediti krivu u funkciju drugog parametra čime se može generisati mreža površine, slika 1a. Ovako definisani metod obrade se naziva izoparametarski i prvi put je predstavljen od strane Loney-a i Ozroy-a [5]. Ovaj metod obrade je popularan za obradu složenih površina jer su podaci o tačkama površine direktno iskorišćeni za generisanje putanje alata tako što se CL tačka (Cutter location point – tačka centra alata) nalazi na normali u svakoj tački površine na rastojanju jednakom radijusu sfernog dela glodala. Mana ovog metoda obrade je ta što se dobija nejednaka raspodela visina neravnina po datoj površini jer konstantan korak u parametarskom domenu dovodi do nejednakog koraka u dekartovom prostoru, slika 1b. Prvo rešenje ovog problema je predstavljeno od strane Elber-a i Cohen-a koje je nazvano adaptivno izoparametarsko [6]. Dato rešenje prema pomenutom metodu za primer sa slike 1b je predstavljeno na slici 1c. Pored navedenog, mana izoparametarskog metoda obrade je što je teško generisati putanju alata za površinu koja se sastoji od više podsečenih površina [7].



Slika 1 – Bikubna Bezier-ova površina (a), izoparametarske linije (b), adaptivni izoparametarski metod generisanja putanje alata (c)

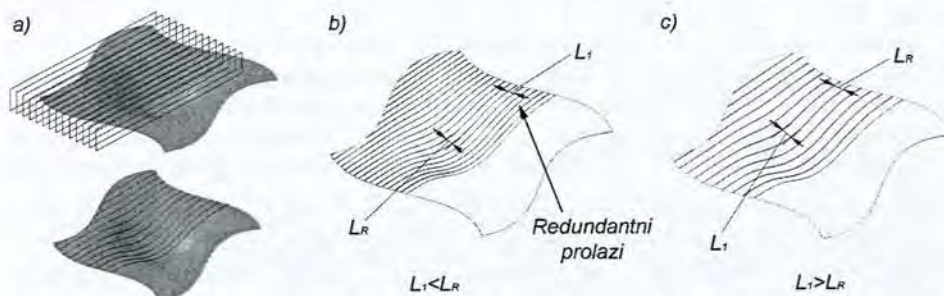
U najvećem broju slučajeva putanja alata kod obrade složenih površina se poklapa sa nekom od kordinatnih osa mašine alatke. U vezi sa ovim je razvijen izoravanski metod obrade koji podrazumeva da je putanja alata određena kao presek slobodne površine ( $S_{u,v}$ ) sa nekom od koordinatnih ravni dekartovog pravouglog koordinatnog sistema ( $S_1-S_n$ ), slika 2a. Kako je teško odrediti tačke preseka površine i ravni potrebno je površinu aproksimirati skupom ravnih trouglastih površina gde je svaki trougao definisan koordinatama svoja tri temena [8]. Ovaj metod je robustan i široko upotrebljen u komercijalnim CAM sistemima [9]. Poprečni korak ( $L$ ) kod ovog metoda je jednak

rastojanju između paralelnih ravni i određen je iz uslova jednake visine neravnina obrađene površine ( $h$ ), slika 2b. Veličina longitudinalnog koraka ( $L_{CL}$ ) je određena iz uslova najvećeg dozvoljenog odstupanja ( $t$ ), slika 2c. Za razliku od izoparametarskog metoda obrade izoravanski metod obrade je moguće upotrebiti za obradu površina koja se sastoji od više podsečenih površina [10]. Pravilan izbor presečnih ravni kod ovog metoda direktno utiče na dužinu putanje, a samim tim i na ukupno vreme obrade.



Slika 2 – Izo ravanski metod generisanja putanje alata (a), poprečni korak (b), longitudinalni korak (c)

Oba pomenuta metoda, izoparametarski i izoravanski dovode u veoma malom broju slučajeva do uniformne raspodele visine neravnina na obrađenoj površini. Moguće je da se desi da prilikom preseka površine paralelnim ravnima na jednakom rastojanju ( $L_R$ ), slika 3a na nekim delovima površine postoji nepotreban visok kvalitet obrađene površine, slika 3b, a na nekim delovima da dodje do veće hrapavosti od dozvoljene, slika 3c.



Slika 3 – Presek složene površine sa papalelnim ravnima (a), redundantni prolazi (b), veća visina neravnina od dozvoljene (c)

Radi dobijanja uniformne raspodele visine neravnina po obrađenoj površini uveden je novi metod obrade, nazvan izohrapavi [11, 12]. Izohrapavi metod obrade predstavlja poboljšanu verziju izoparametarskog i izoravanskog metoda obrade. Da bi se odredila putanja alata koja će respektovati uslov jednake hraposvosti naredna putanja alata se mora određivati na osnovu poznate prethodne putanje i uslova da kriva koja predstavlja vrhove neravnina između dva prolaza alata zajednička za oba prolaza. Ovaj princip podrazumeva da nam je poznata površina izohrapavosti, rubna kriva kao presek obvojnje površine alata i površine izo-hrapavosti.

Ovako definisane putanje nemaju redundantnost i višekratnu obradu istog dela površine što podrazumeva da se ovako dobija kraća putanja alata odnosno obrada radnog predmeta se vrši u kraćem vremenu u odnosu na NC obradu sa izo-parametarskim i izo-ravanskim putanjama alata [13].

### 3. FORMIRANJE MODELA ZA PREDIKCIJU SILE GLODANJA

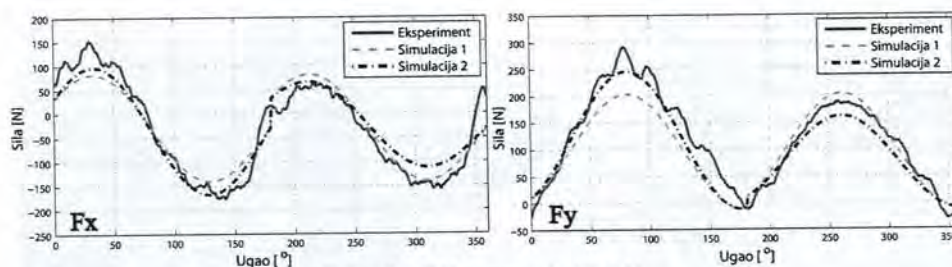
Proces obrade glodanjem loptastim glodalom je najviše zastupljen pri obradi skulptorskih površina. Kako je na delu loptastog dela glodala promenljiva brzina rezanja to je jako teško održavati važeće parametre procesa obrade, a sve u cilju postizanja zadovoljavajućeg kvaliteta obrađene površine. Sila rezanja koja deluje na obradak je jedna od promenljivih koja značajno utiče na kvalitet obrađene površine. Odgovarajući model sile glodanja bi trebao da obezbedi tačnu predikciju stvarne sile glodanja u cilju planiranja tehnologije obrade dela. Specifičnost glodanja u odnosu na druge metode je prekidno rezanje i promenljiv, kako položaj pojedinih elementarnih sečiva, tako i debljina nerezane strugotine zahvaćena tim sečivima. Iz tog razloga, procedura predikovanja sile glodanja podrazumeva proračun trenutnih vrednosti komponenata sile glodanja u dovoljno velikom broju uzastopnih ugaonih položaja, koji odgovaraju punom obrtu alata za date uslove obrade. Izračunavanje trenutnih vrednosti, za date uslove obrade, podrazumeva određeni ugaoni položaj sečiva glodala. Za slučaj obrade loptastim glodalom odgovarajuća ugaona pozicija se definiše uglom koji zaklapa poteg vrha izabranog referentnog zuba, sa izabranim referentnim pravcem [14]. U primenjem modelu je primenjena aproksimacija loptastog glodala skupom diskova jednake debljine dz raspoređenih duž ose alata.

Sledeći zadatak je određivanje ugaonog položaja sečiva ( $\delta_z$ ) u odnosu na referentni pravac, koji se prema [15] određuje po obrascima, a u zavisnosti od udaljenosti diska (z), radijusa loptastog glodala (R) i ugla nagiba zavojnog žljeba cilindričnog dela glodala ( $\beta$ ):

$$\delta_z = 0.0068 + 0.2432 \frac{z}{R} + 0.0775 \left( \frac{z}{R} \right)^2 + 0.1617 \left( \frac{z}{R} \right)^3 - \text{za loptasti deo glodala}$$

$$\delta_z = \frac{z}{R} \operatorname{tg} \beta - \text{za cilindrični deo glodala}$$

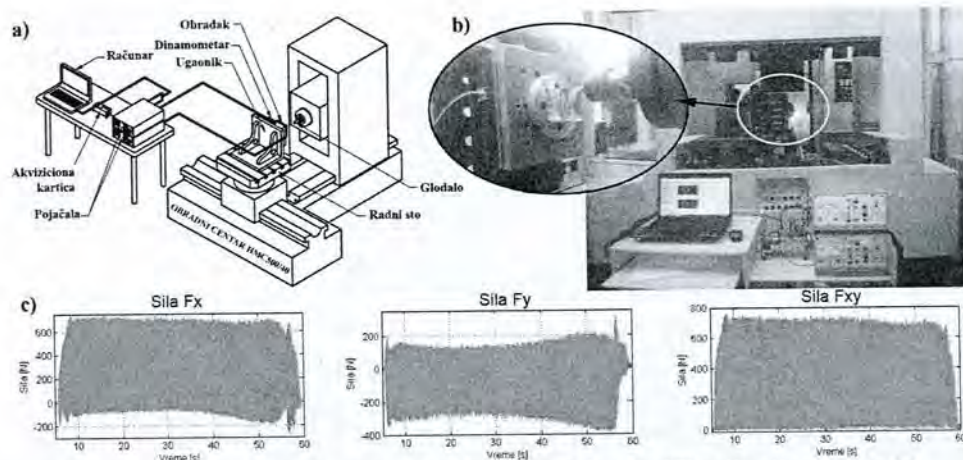
Primenom formiranog modela sile glodanja za loptasto glodalo materijala HSSE (8% Co) sa dva zuba prečnika 12mm, ugla nagiba zavojnog žljeba cilindričnog dela 30° i materijala obratka AlMg4.5Mn za izabranu dubinu rezanja dobijeni su rezultati simulacije koji su prikazani zajedno sa eksperimentalno određenim za jedan pun obrt alata na slici 4 (X pravac je pravac brzine pomoćnog kretanja). Prikazani su rezultati simulacije za proračun sile glodanja bez radijalnog bacanja glodala (Simulacija 1) i sa radijalnim bacanjem glodala koje je tokom eksperimenta iznosilo 0.01mm (Simulacija 2), a određeno je pomoću komparatora na samoj mašini. Sa slike se vidi da primenjeni model daje upotrebljive rezultate za dalju upotrebu pri generisanju putanje alata.



Slika 4 – Dijagram sila  $F_x$  i  $F_y$

#### 4. OPTIMIZACIJA PUTANJE ALATA

Primenom modela za predikciju sile rezanja datog u poglavlju 3 ovog rada generisana je putanja alata po izoparametarskom kriterijumu sa održanjem sile glodanja na konstantnu vrednost variranjem brzine pomoćnog kretanja u opsegu 31-180mm/min, što za zataji broj obrtaja od 1060o/min i glodalo sa dva zuba daje vrednost koraka po zubu u opsegu 0.015-0.13mm/zubu. Složena površina je predstavljena preko bikubne Bezier-ove površine. Dimenzije priprema su 70x70x50mm, a materijal AlMg4.5Mn. Korišćeno je loptasto glodalo materijala HSSE (8% Co) prečnika 12mm sa dva zuba, ugla nagiba zavojnog žljeba cilindričnog dela 30°. Softver u svakoj tački površine računa vektor normale i u tom pravcu udaljuje tačku za vrednost radijusa loptastog dela glodala. Na osnovu geometrije priprema određuje u datoj tački koliko se materijala skida (dubina i širina glodanja) i podatke šalje podprogramu koji računa vrednost sile rezanja u toj tački i na osnovu dobijenog rezultata vrši korekciju unapred zadate brzine pomoćnog kretanja kako bi sila rezanja bila jednaka zadatoj. U slučaju da vrednost brzine pomoćnog kretanja dostigne minimalno dozvoljenu vrednost, a vrednost sile glodanja bude veća od maksimalno dozvoljene dobija se obaveštenje da se površina ne može obraditi zadatim režimima obrade pa je potrebno obradu izvršiti iz više prolaza. Na slici 5a i 5b je prikazana šema povezivanja opreme za eksperimentalnu verifikaciju sile rezanja. Na numerički upravljanoj mašini (u ovom slučaju obradnom centru) je postavljen ugaonik na koji je stegnut dvokomponentni dinamometar pomoću koga se vrši merenje sila rezanja u dva upravna pravca u ravni koja je upravna na osu glavnog vretena (glodala). Na dinamometru je stegnut obradak. Pravac merenja sila se poklapa sa pravcima osa X i Y mašine alatke. Signali za dve komponente sile rezanja se vode u dva pojačala (HBM-KWS3082A) gde se vrši njihovo pojačavanje. Iz pojačivača se signal vodi u akvizicionu karticu (National Instruments – cDAQ-9174), a odatle u računar gde se pomoću softvera LABVIEW vrši formiranje datoteke zapisa vremena i odgovarajuće dve komponente sile rezanja. Prikaz izmerenih vrednosti sila rezanja u zavisnosti od vremena u ravni upravnom na osu glodala za jedan prolaz je prikazan na slici 5c gde se vidi da je vrednost rezultujuće sile rezanja ( $F_{XY}$ ) održavana na zadatu vrednost od 700N.



Slika 5 – Šema postavke opreme za ekperimentalnu verifikaciju sila rezanja (a), postavljena oprema prema datoj šemi ekperimenta (b), dijagrami zapisa sila rezanja (c)

U toku obrade zadate površine dubina rezanja se menja od 1 do 12mm pa bi upotreba metode sa konstantnom brzinom pomoćnog kretanja dovela do loma alata ako bi brzina bila velika ili pak do znatnog povećanja vremena obrade ako bi se vrednost brzine pomoćnog kretanja definisala na osnovu maksimalne dubine rezanja jer bi tada na mestima sa malom dubinom rezanja odgovarajuća sila glodanja bila daleko manja od maksimalno dozvoljene.

## 5. ZAKLJUČAK

U radu je data procedura optimizacije generisanja putanje alata za obradu glodanjem složenih površina po kriterijumu održanja konstantne sile rezanja prema formiranom modelu za simulaciju procesa obrade glodanjem loptastim glodalom. Rezultati simulacije su eksperimentalno verifikovani u zavodu za mašine alatke na Mašinskom fakultetu u Beogradu. Na osnovu analize rezultata eksperimenta i simulacije može se zaključiti da je primenjeni algoritam za generisanje putanje alata upotrebljiv i primenljiv u nekom od budućih CAM softvera, posebno za obradu delova sa tankim zidovima gde bi prilikom prekoračenja maksimalno dozvoljene sile glodanja došlo do deformacije obratka.

## LITERATURA

- [1] R.J. Campbell, P.J. Flynn, A survey of free-form object representation and recognition techniques, *Computer Vision and Image Understanding*, 81 (2) (2001), pp. 166–210
- [2] Y.S. Lee, B.K. Choi, T.C. Chang, Cut distribution and cutter selection for sculptured surface cavity machining, *International Journal of Production Research*, 30 (6) (1992), pp. 1447–1470
- [3] Y. Ren, H.T. Yau, Y.S. Lee, Clean-up tool path generation by contraction tool method for machining complex polyhedral models, *Computers in Industry*, 54 (1) (2004), pp. 17–33
- [4] S. Ehsan Layegh K.a, Huseyin Erdimb, Ismail Lazoglu, Offline Force Control and Feedrate Scheduling for Complex Free Form Surfaces in 5-Axis Milling, 5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012, pp. 96–101

- [5] G.C. Loney, T.M. Ozsoy, NC machining of free form surfaces, *Computer-Aided Design*, 19 (2) (1987), pp. 85–90
- [6] G. Elber, E. Cohen, Toolpath generation for freeform surface models, *Computer-Aided Design*, 26 (6) (1994), pp. 490–496
- [7] S.G. Lee, H.C. Kim, M.Y. Yang, Mesh-based tool path generation for constant scallop-height machining, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37 (1–2) (2008), pp. 15–22
- [8] P. Bojanić, Generisanje putanje alata pri obradi skulptorskih površina na 3-osnim CNC mašinama loptastim glodalom, 33<sup>rd</sup> Conference On Production Engineering Of Serbia, 2009, pp. 115–118
- [9] Z.L. Han, D.C.H. Yang, Iso-phote based tool-path generation for machining free-form surfaces, *Journal of Manufacturing Science and Engineering, ASME Transactions*, 121 (4) (1999), pp. 656–664
- [10] S. Ding, M.A. Mannan, A.N. Poo, D.C.H. Yang, Z. Han, Adaptive iso-planar tool path generation for machining of free-form surfaces, *Computer-Aided Design*, 35 (2) (2003), pp. 141–153
- [11] K. Suresh, D.C.H. Yang, Constant scallop height machining of free form surfaces, *Journal of Engineering for Industry, ASME Transactions*, 116 (1994), pp. 253–259
- [12] R.S. Lin, Y. Koren, Efficient tool-path planning for machining free-form surfaces, *Journal of Engineering for Industry, ASME Transactions*, 118 (1) (1996), pp. 20–28
- [13] P. Bojanić, G. Mladenović, Generisanje putanje alata po kriterijumu izo-hrapavosti pri bbradi skulptorskih površina na 3-osnim CNC mašinama, 36. Jupiter konferencija, 2010, str. 2.22-2.28
- [14] B. Kokotović, Obrada glodanjem u virtuelnom obradnom sistemu, Doktorska disertacija, Beograd 2013
- [15] Azeema, H-Y. Fenga, L. Wangb, Simplified and efficient calibration of a mechanistic cutting force model for ball-end milling, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44 (2004), pp. 291-298

## TOOL PARH OPTIMIZATION FOR MACHINING OF FREE FORM SURFACES

### *Abstract*

*In today's in almost all sectors of mechanical engineering is increasing use of free form (sculpture) surfaces in the product design process, more for esthetic than functional requirements. When it comes to the design and development of the free form surface is indispensable use of CAD/CAM systems. Obtained tool path is a crucial element to surface quality of the machined surface and the total machining time, which directly affects the cost of the created part. The paper gives the procedure to optimize the toolpath by maintaining a constant cutting force for the process 3-axis machining with ball-end mill, and experimental verification of the simulation results.*

**Keywords:** *Free form surface, tool path, ball-end mill*