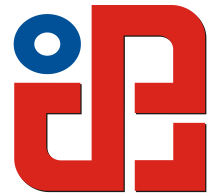




University of Novi Sad
Faculty of Technical Sciences
Department of Production Engineering



ETIKUM 2015

PROCEEDINGS

Novi Sad, 19-20 June 2015

PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
**ETIKUM 2015 - METROLOGY AND QUALITY IN PRODUCTION ENGINEERING AND
ENVIRONMENTAL PROTECTION**

Novi Sad 2015

Publisher: **FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
DEPARTMENT OF PRODUCTION ENGINEERING
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovica 6
SERBIA**

Organization of this Conference was approved by Educational-scientific Council of Faculty of Technical Sciences in Novi Sad

Editor: *Dr Rade DOROSLOVACKI, professor, dean*

Reviewer's team: *Dr Dragisa VILOTIC, professor
Dr Djordje VUKELIC, assistant professor
Dr Igor BUDAK, assistant professor
Dr Janko HODOLIC, professor
Dr Miodrag HADZISTEVIC, associate professor
Dr Miroslav PLANCAK, professor*

Technical treatment and design: *Dr Boris AGARSKI, assistant
Dr Ivan MATIN, associate
MSc Milana ILIC, associate
MSc Vesna MEDIC, associate
MSc Zorana LANC, associate*

Manuscript submitted for publication: **June 12, 2015**

Printing: **1st**

Circulation: **200 copies**

CIP classification:

CIP-Katalogizacija u publikaciji
Biblioteka Matije srpske, Novi Sad

621:658.562(082)
502.175(082)

**INTERNATIONAL Scientific Conference ETIKUM - Metrology and Quality in
Production Engineering and Environmental Protection (9 ; 2015 ; Novi Sad)**
Proceedings / [International Scientific Conference] ETIKUM 2015 [- Metrology and
Quality in Production Engineering and Environmental Protection], Novi Sad, 19 -20 June, 2015 ;
[editor Rade Doroslovački]. 1st printing. – Novi Sad : Faculty of Technical Sciences,
Department of Production Engineering, 2015 (Novi Sad : FTN, Graphic Centre GRID). – 136
str. : ilustr. ; 30 cm

Radovi na engl. i srp. jeziku. — Tiraž 200. — Bibliografija uz svaki rad.

ISBN 978-86-7892-713-3

a) Производно машинство – Контрола квалитета – Зборници
б) Животна средина – Контрола квалитета – Зборници
HYPERLINK

<http://www.vbs.rs/scripts/cobiss?command=DISPLAY&base=COBIB&RID=297162247>

Printing by: **FTN, Graphic Centre
GRID, Novi Sad**

Financing of the Proceedings was sponsored by the Provincial Secretariat for Science and Technological Development of AP Vojvodina.

ETIKUM 2015

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE NOVI SAD, SERBIA, JUNE 19-20, 2015

CONFERENCE ORGANIZER

**University of Novi Sad
Faculty of Technical Sciences
Department of Production Engineering**

PROGRAMME COMMITTEE

<i>Aco Antic, FTN Novi Sad</i>	<i>Milovan Lazarevic, FTN Novi Sad</i>
<i>Ales Nagode, FS Ljubljana</i>	<i>Milan Martinov, FTN Novi Sad</i>
<i>Borut Kosec, FS Ljubljana</i>	<i>Miodrag Hadzistevic, FTN Novi Sad</i>
<i>Branka Nakomic-Smargdakis, FTN Novi Sad</i>	<i>Mirko Sokovic, FS Ljubljana</i>
<i>Branka Trifkovic, SF Belgrade</i>	<i>Miroslav Badida, PhD., TU Kosice</i>
<i>Branko Skoric, FTN Novi Sad</i>	<i>Miroslav Plancak, FTN Novi Sad</i>
<i>Danimir Jevremovic, SF Pančevo</i>	<i>Miroslav Trajanovic, MF Nis</i>
<i>Dejan Ubavin, FTN Novi Sad</i>	<i>Nenad Simeunovic, FTN Novi Sad</i>
<i>Dominic Eggbeer, Metropolitan University Cardiff, UK</i>	<i>Nikola Jorgovanovic, FTN Novi Sad</i>
<i>Dragisa Vilotic, FTN Novi Sad</i>	<i>Petar Petrovic, MF Belgrade</i>
<i>Dražan Kozak, SF Slavonski Brod</i>	<i>Robert Cep, PhD, TU Ostrava</i>
<i>Dubravka Markovic, MF Novi Sad</i>	<i>Robert Williams, Metropolitan University Cardiff, UK</i>
<i>Djordje Vukelic, FTN Novi Sad</i>	<i>Sinisa Mirkovic, MF Novi Sad, vice president</i>
<i>Ferenc E. Kiss, TF Novi Sad</i>	<i>Slavko Arsovski, MF Kragujevac</i>
<i>Goran Stojanovic, FTN Novi Sad</i>	<i>Stanislaw Legutko, UNI Poznan</i>
<i>Goran Vujic, FTN Novi Sad</i>	<i>Sefket Goletic, MF Zenica</i>
<i>Igor Budak, FTN Novi Sad</i>	<i>Tatjana Puskar, MF Novi Sad</i>
<i>Igor Drstvensek, UNI Maribor</i>	<i>Viktor Till, MF Novi Sad</i>
<i>Ivan Kuric, PhD, UNI Zilina</i>	<i>Vladimir Koci, PhD, VSCHT Prag</i>
<i>Janko Hodolic, FTN Novi Sad, president</i>	<i>Zbigniew Klos, UNI Poznan</i>
<i>Jozef Zivcak, PhD, TU Kosice</i>	<i>Zdravko Krivokapic, MF Podgorica</i>
<i>Klara Szita Toth, EF Miskolc</i>	<i>Zeljko Ivandic, SF Slavonski Brod</i>
<i>Lubomir Soos, PhD, STUBA Bratislava</i>	<i>Zivana Jakovljevic, MF Belgrade</i>
<i>Marian Borzan, TU, Cluj-Napoca</i>	

ORGANIZING COMMITTEE

<i>Boris Agarski, secretary</i>	<i>Milana Ilic</i>
<i>Branko Strbac</i>	<i>Michal Potran</i>
<i>Djordje Vukelic</i>	<i>Miodrag Hadzistevic</i>
<i>Igor Budak</i>	<i>Tatjana Puskar, chairman</i>
<i>Ivan Matin</i>	<i>Vesna Medic</i>
<i>Janko Hodolic</i>	<i>Zeljko Santosi</i>
<i>Mario Sokac</i>	<i>Zorana Lanc</i>

ETIKUM 2015

**INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
NOVI SAD, SERBIA, JUNE 19-20, 2015**

ACKNOWLEDGEMENT

Organisation of International Scientific Conference ETIKUM 2015 was made possible with understanding and financial help of following sponsors:

- **PROVINCIAL SECRETARIAT FOR SCIENCE AND TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT OF AP VOJVODINA – Novi Sad**
- **FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES - Novi Sad**
- **DEPARTMENT FOR PRODUCTION ENGINEERING AT THE FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES - Novi Sad**
- **MANZAN 98 OC DOO – Petrovaradin**
- **TEHNOEXPORT - Indjija**

Foreword

International Scientific-Expert Conference ETIKUM 2015 will be held for the eight time and one can say that it has become a traditional. When established in 2006, the conference is designed as informative-educational and scientific-expert. Informative and educational dimension is reflected through the participation of lecturers from among expert representatives of the eminent manufacturers of equipment connected to educational and research processes at the Faculty. Moreover, the emphasis are on the dissemination of information as well as on education in relation to technological innovations related to both - hardware and software components. Scientific and expert, i.e., professional dimensions of conference are achieved through the presentation of scientific and expert results, primarily from the field of the Chair of metrology, quality, fixtures, tools and ecological engineering aspects. In addition, thanks to the development of interdisciplinary cooperation, the conference this year included the related scientific and technical fields, in which members of the Chair implement research and professional projects.

In the context of this conception, the conference was divided into three thematic sections:

- 1. Metrology and quality control in production engineering;*
- 2. Metrology and quality control in biomedical engineering;*
- 3. Metrology and quality in environmental protection and*

The first thematic area, in addition to the classical aspects of metrology and quality in the field of production engineering, included subjects related to precision engineering and nano metrology and related technologies.

The second thematic area was focused on presenting the research results obtained in the framework of a national project from the program of technological development TR35020 "Research and development of modelling methods and processes of manufacturing of dental restorations using modern technology and computer aided system". In addition, this year this section is enriched with submissions of researchers from other Faculty's departments dealing with biomedical engineering.

The third thematic area this year attracted a large number of researchers from various areas of environmental protection. A significant contribution was given by results achieved in the framework of the multilateral project "The platform for building the network of LCA centers and R&D institutes from Central and Southeastern Europe", as well as by results achieved within the project important for science and technological development of AP Vojvodina "Continuous quality improvement of products and processes throughout the entire life cycle".

At ETIKUM 2015 conference 33 scientific-expert papers were presented, while the conference was attended by over 80 speakers and listeners from academia and business from eight European countries. The previously mentioned facts are, on the one hand, the confirmation of the conference's concept, and on the other hand, a guarantee that the ETIKUM conference will be considered as important informative and educational, scientific and professional event in these region.

Novi Sad, June 2015

*PROGRAMME AND ORGANIZING
COMMITTEE*

Predgovor

Naučno stručna konferencija sa međunarodnim učešćem ETIKUM 2015 se održava deveti put i može se reći da je već postala tradicionalna. U vreme kada je koncipirana, 2006. godine, konferencija je osmišljena kao informativno-edukativna i naučno-stručna. Informativno-edukativna dimenzija se oslikava kroz učešće predavača iz redova stručnih predstavnika eminentnih proizvođača opreme koja se koristi u edukativnim i istraživačkim procesima na našem Fakultetu. Pri tome je akcenat na diseminaciji informacija i edukaciji u vezi sa tehnološkim novitetima u oblasti hardverskih i softverskih komponenti. Naučno-stručna dimenzija konferencije se ostvaruje kroz predstavljanje naučnih i stručnih rezultata, pre svega, iz oblasti koje obuhvata Katedra za metrologiju, kvalitet, pribore, alate i ekološko inženjerske aspekte. Pored toga, zahvaljujući razvoju interdisciplinarnе saradnje, konferencija je i ove godine obuhvatila i srodne naučno stručne oblasti, u okviru kojih članovi Katedre realizuju naučno-istraživačke i stručne projekte.

Ove godine je konferencija strukturirana u četiri tematske celine:

- 1. Metrologija i kontrola kvaliteta u proizvodnom mašinstvu*
- 2. Metrologija i kontrola kvaliteta u biomedicinskom inženjerstvu*
- 3. Metrologija i kvalitet u zaštiti životne sredine*

Prva tematska oblast je, pored klasičnih aspekata metrologije i kvaliteta u oblasti proizvodnog mašinstva, obuhvatila i precizno inženjerstvo, odnosno nano metrologiju i srodne tehnologije.

U okviru druge tematske oblasti su ove godine - pored rezultata istraživanja na nacionalnom projektu u oblasti tehnološkog razvoja TR35020 „Istraživanje i razvoj metoda modeliranja i postupaka izrade dentalnih nadoknada primenom savremenih tehnologija i računarom podržanih sistema“ - rezultate svojih aktivnosti u oblasti biomedicinskog inženjerstva predstavili istraživači sa drugih departmana FTN-a.

Treća tematska oblast je i ove godine privukla veći broj istraživača iz različitih oblasti zaštite životne i radne sredine. Značajan doprinos su dali rezultati ostvareni u okviru multilateralnog projekta “The platform for building the network of LCA centers and R&D institutes from Central and Southeastern Europe”, kao i projekta od značaja za nauku i tehnološki razvoj AP Vojvodine “Kontinualno unapređenje kvaliteta proizvoda i procesa tokom celokupnog životnog ciklusa”.

Na konferenciji ETIKUM 2015 je prezentovano ukupno 33 naučnih i stručnih radova, dok je u radu konferencije učestvovalo preko 80 predavača i slušalaca iz akademskih institucija i privrede iz osam evropskih zemalja. Prethodno pomenute činjenice predstavljaju, sa jedne strane, potvrdu koncepcije konferencije, a sa druge strane, garanciju da će konferencija ETIKUM i narednih godina predstavljati značajan informativno-edukativni i naučno-stručni događaj na ovim geografskim prostorima.

Novi Sad, Jun 2015

PROGRAMSKI I ORGANIZACIONI
ODBOR

CONTENTS

SESSION 1: METROLOGY AND QUALITY CONTROL IN THE BIOMEDICAL
ENGINEERING

Tadić, A.; Mirković, S.; Puškar, T.; Budak, I.; Šokac, M.: UPOTREBA CBCT SNIMAKA SA RADIOSENZITIVNIM ZUBIMA U PLANIRANJU IMPLANTOLOŠKE TERAPIJE – PRIKAZ SLUČAJA	1
Vicko, K.; Potran, M.; Petrović, B.; Šokac, M.; Puškar, T.: CONE BEAM KOMPJUTERIZOVANA TOMOGRAFIJA (CBCT) I NJENA PRIMENA U STOMATOLOGIJI	5
Mitić, J.; Vitković, N.; Manić, M.; Trajanović, M.; Radovanović, Z.: APPROACHES TO GEOMETRICAL MODELLING OF THE HUMAN MANDIBLE	9
Pavlović, M.; Kalem, Lj.; Trifković, B.; Puškar, T.: OTISNI MATERIJALI U STOMATOLOŠKOJ PROTETICI	13
Trifković, B.; Potran, M.; Todorović, A.R.; Todorović, A.B; Lapčević, A.; Jevremović, D.: AKTUELNI TRENDOVI U RAZVOJU STOMATOLOŠKIH SOFTVERA ZA CAD DIZAJN	17
Lapčević, A., Jevremović, D., Trifković, B., Santoši, Ž., Vukelić, Đ.: PRIMENA CAD/CAM TEHNOLOGIJE U PROJEKTOVANJU I IZRADI MOSTOVA PUNE ANATOMSKE FORME NA BAZI CIRKONIJUM-DIOKSIDA	21
Kalem, Lj.; Kalem, D., Ilić, M.; Mirković, S.; Tadić, A.; Puškar, T.: IZRADA ZUBNE PROTEZE NA MINI IMPLANTATIMA.....	25
Santoši, Ž.; Budak, I.; Trifković, B.; Šokac, M.; Soković, M.; Hodolić, J.: 3D DIGITALIZACIJA STOMATOLOŠKIH MODELA BLISKO-PREDMETNOM FOTOGRAFIJOM POTPOMOŠTU	29
Šokac, M.; Budak, I.; Ralević, N.; Spasić, A.; Santoši, Ž.; Vučaj-Ćirilović, V.; Till, V.: PRIMENA METODE KLASIFIKACIJE FAZI C-SREDNJIH VREDNOSTI KOD SEGMENTACIJE MEDICINSKIH SNIMAKA	33
Matin, I.; Hadžistević, M.; Hodolić, J.; Vukelić, Đ.; Trifković, B.; Potran, M.; Drstvenšek, I.; Brajljlić, T.: PRIMENA EKSPERTNOG SISTEMA ZA LIVENJE U STOMATOLOGIJI	37

SESSION 2: METROLOGY AND QUALITY CONTROL IN THE PRODUCTION
ENGINEERING

Bernetič, J.; Kosec, G.; Nagode, A.; Gojić, M.; Soković, M.; Burzić, Z.; Kosec, B.: PROTAC 500 – A NEW GENERATION OF ARMoured STEEL	41
Arsovski, S.: UTICAJ STANDARDIZACIJE I METROLOGIJE NA KONKURENTNOST.....	45
Škorić, B.; Schrittwieser, R.: CHARACTERIZATION AND SYNTHESIS OF THIN FILMS	49
Žutković, M.; Vilotić D.; Skakun, P.: TOPLOTNI PRORAČUN KALUPA ZA INJEKCIJNO PRESOVANJE MASKE ELEKTRO-PREKIDAČA	53

Antić, A.; Milošević, M.; Ungureanu, N.: IZDVAJANJE OBELEŽJA ZA PREPOZNAVANJE STANJA POHABANOSTI ALATA U OKVIRU NEURO-FAZI SISTEMA	57
Kačmarčik, I.; Ivanišević, A.; Movrin, D.; Plančak, M.; Vilotić, D.; Skakun, P.; Milutinović, M.: NUMERIČKA SIMULACIJA I EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA SUPROTNOSMERNOG ISTISKIVANJA BIMETALA	61
Ivanišević, A.; Kačmarčik, I.; Movrin, D.; Vilotić, D.; Skakun, P.; Milutinović, M.: EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE DIJAGRAMA GRANIČNE DEFORMABILNOSTI ZA MESING	65
Milutinović, M.; Plančak, M.; Skakun, P.; Vilotić, D.; Movrin, D.; Kačmarčik, I.; Ivanišević, A.: COMBINED COLD EXTRUSION OF STEEL	69
Štrbac, B.; Spasić – Jokić, V.; Radlovački, V.; Hodolič, J.; Hadžistević, M.: REZULTAT MERENJA SA ASPEKTA UKUPNE NESIGURNOSTI	73
Lanc., Z.; Zeljković, M.; Štrbac, B.; Živković, A.; Drstvenšek, I.; Hadžistević, M.: EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE EMISIVNOSTI LEGURE ALUMINIJUMA AW 6082 INFRACRVENOM TERMOGRAFSKOM TEHNIKOM	77
Brajlih, T., Kadivnik, Z., Paulic, M., Irgolic, T., Hadzistevic, M., Matin, I., Drstvensek, I.: COMPARISON OF SELECTIVE LASER SINTERING AND INJECTION MOULDING	81

SESSION 3: METROLOGY AND QUALITY IN THE FIELD OF ENVIRONMENTAL PROTECTION

Nakomčić-Smaragdakis, B.; Čepić, Z.; Dragutinović, N.: ENERGETSKI POTENCIJAL I ZNAČAJ KORIŠĆENJA POLJOPRIVREDNE BIOMASE U AP VOJVODINI	85
Arsovski, S.; Milanović, S.; Puškarić, H.; Tadić, D.: ODREĐIVANJE UTICAJA OTPADNIH FLUIDA MOTORNIH VOZILA NA ŽIVOTNU SREDINU	89
Arzate, J.A.; Ertem, F.C.; Cruz Bournazou, M.N.; Neubauer, P.; Junne, S.: LIFE CYCLE ASSESSMENT AND MODELING APPROACHES FOR BIOGAS PRODUCTION	93
Ertem, F.C.; Neubauer, P.; Junne, S.: Life Cycle Assessment of Biogas Production: IMPACT OF SUBSTITUTION OF ENERGY CROPS WITH SILPHIUM PERFOLIATUM	99
Kiss, F.; Rajović, V.: LIFE CYCLE INVENTORY OF ELECTRICITY IN SERBIAN COAL FIRED POWER PLANTS	105
Muransky, J.: QUALITY OF THE ENVIRONMENT AND ITS QUANTITATIVE DETERMINATION IN MECHANICAL ENGINEERING	109
Mihajlović, I.; Bajić, J.; Obrovski, B.; Vojinović Miloradov, M.; Batinić, B.; Živanov, M.: UPOTREBA SENZORA SA OPTIČKIM VLAKNIMA ZA ODREĐIVANJE REPREZENTATIVNIH NEORGANSKIH POLUTANATA U POVRŠINSKOJ VODI	113
Adamović, S.; Prica, M.: ELEKTROKOAGULACIONO UKLANJANJE BAKRA IZ OTPADNOG MATERIJALA GRAFIČKE INDUSTRIJE	117
Mirosavljević, Z.; Štrbac, D.; Štrbac, G.; Stanisavljević, N.: OTPADNA STAKLENA AMBALAŽA U JUŽNOBAČKOM REGIONU – KOLIČINE I MOGUĆNOSTI ISKORIŠĆENJA	121
Gluvakov, Z.; Agarski, B.; Košut, Z.; Hodolič, J.; Imamović, N.; Milijić, V.: VREDNOVANJE PELETA OD POLJOPRIVREDNE I DRVNE BIOMASE VIŠEKRITERIJUMSKOM ANALIZOM	125
Ilić, M.; Budak, I.; Kosec, B.; Vukelić, Đ.; Nagode, A.: ISPITIVANJE ČESTICA METODOM ANALIZE SLIKE PREMA ISO 13322	129
Medić, V.; Vojinović-Miloradov, M.; Hadžistević, M.: PREDLOG KORIŠĆENJA STATISTIČKIH METODA OPTIMIZACIJE U CILJU POBOLJŠANJA KVALITETA OTPADNIH VODA IZ PIVARA	133

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
ETIKUM 2015

PROCEEDINGS

Session 1:
METROLOGY AND QUALITY CONTROL IN THE
BIOMEDICAL ENGINEERING

Novi Sad, 19 – 20 June 2015.

Tadić A., Mirković S., Puškar T., Budak I., Šokac M.

**UPOTREBA CBCT SNIMAKA SA RADIOSENZITIVNIM ZUBIMA U PLANIRANJU
IMPLANTOLOŠKE TERAPIJE - PRIKAZ SLUČAJA**

Rezime: Nedostatak jednog, više ili svih zuba smanjuje kvalitet života. Savremena stomatologija pruža brojne mogućnosti za rehabilitaciju ovakvih pacijenata. Planiranje i preimplantacijska dijagnostika i priprema zauzimaju posebno važno mesto u oralnoj implantologiji. U procesu planiranja i pripreme implantacije centralno mesto zauzima rendgenološka dijagnostika.

U radu je prikazan slučaj pacijenta starog 60 godina, totalno bezubog, koji se javio na Kliniku za stomatologiju Vojvodine zbog izrade zubnih nadoknada nošenih dentalnim implantima. Pacijentu je izrađena gornja i donja totalna proteza, uz upotrebu radiosenzitivnih zuba, te načinjen CBCT snimak sa ovim protezama u ustima. Analizom ovako dobijenih snimaka napravljen je konačan plan terapije.

Ključne reči: implantologija, CBCT, radiosenzitivni zubi

1. UVOD

Zubi i usna duplja, kao početni deo sistema za varenje, imaju važnu fiziološku ulogu u organizmu, ali osim nje i ulogu u funkciji govora, imaju uticaja i na izgled osobe, te u velikoj meri utiču na psihu čoveka i njegov identitet. Nedostatak jednog, više ili svih zuba ima višestruke posledice, smanjujući kompletan kvalitet čovekovog života.[1]

Savremena stomatologija pruža brojne mogućnosti za rehabilitaciju ovakvih pacijenata. U poslednje dve decenije naročito se razvila dentalna implantologija koja podrazumeva izradu fiksnih i mobilnih zubnih nadoknada nošenih dentalnim implantatima.

U svakodnevnoj kliničkoj praksi srećemo se sa relativno velikim brojem pacijenata koji zahtevaju implantološko-protetski tretman, a kod kojih je gubitkom jednog, više ili svih zuba došlo do značajnog deficita kosti rezidualnog alveolarnog grebena[2] Alveolarni nastavak gornje vilice nosi zube u zubnim alveolama te razvoj i formiranje ovog nastavka počinje nicanjem zuba, a atrofira i redukuje se po njihovom gubitku. To znači da je alveolarna kost u funkciji prijema i distribucije sila žvakanja na skelet lobanje.[3] U ovakvim situacijama je neophodna nadoknada izgubljenih koštanih struktura radi obezbeđivanja optimalnih uslova za

ugradnju dentalnih implantata i sledstvenu protetsku rehabilitaciju.[2] Gubitak koštanog tkiva alveolarnog nastavka može da se desi pre gubitka zuba zbog parodontalnog oboljenja, periapikalnih patoloških procesa ili traume. Prilikom vadjenja zuba takođe može doći do gubitka kosti.[4]

Sve gore navedeno, rezultira pojavom neravnomerno resorbovanog grebena, različitog oblika, visine i širine, što u praksi stvara ozbiljne probleme za kvalitetnu protetsku sanaciju ovih pacijenata.[3]

Problem rehabilitacije krezubih i bezubih pacijenata nije vezan samo za nerazvijene zemlje. Više od 60 % stanovništva u visoko industrijalizovanim zemljama zahteva implantološko-protetsku rehabilitaciju, što je razlog godišnjeg porasta tržišta implantata za oko 15%.[5] Procenjuje se da je samo u SAD, prema trenutnim podacima, oko 36 miliona bezubih osoba.[3]

Planiranje i preimplantacijska dijagnostika i priprema zauzimaju posebno važno mesto u oralnoj implantologiji. Planiranje je uglavnom timski rad stručnjaka različitih specijalnosti. U procesu planiranja i pripreme implantološke terapije centralno mesto zauzima rendgenološka dijagnostika.[3]

CT i CBCT tehnologija omogućava kliničarima da prevaziđu ograničenja dvodimenzionalne radiologije. Interaktivni softveri dozvoljavaju daleko precizniju interpretaciju podataka dobijenih iz CT snimaka. Sve veće mogućnosti poboljšanih softverskih aplikacija koje omogućavaju kliničarima da tumače i maneuvre kroz razne trodimenzionalne slike, imaju dalekosežne posledice posebno ako se ovi softveri za virtualno planiranje kombinuju sa kompjuterski asistiranom dizajnom i proizvodnjom protetskih radova. [6] CBCT omogućava preciznu vizualizaciju arhitekture kosti, jer se tomografskim slojevima od 0,08 mm postiže potpuni volumetrijski prikaz alveolarnog luka. [7]

Cone beam kompjuterizovana tomografija (CBCT) omogućava nam da izmerimo gustinu, visinu i bukolingvalnu širinu alveolarne kosti, kao i da vizuelizujemo patološke procese, inklinaciju kosti i vitalnih anatomskih struktura. [8]

U svakodnevnoj kliničkoj praksi danas je standard upotreba CBCT snimaka, koji se koriste za virtuelno postavljanje implantata u željenu poziciju. U slučaju nedostatka manjeg broja zuba, kada su i međuvilični odnosi pacijenta očuvani samo CBCT snimak je dovoljan, ali kod totalno bezubih pacijenata sam snimak nam ne omogućava dobru orijentaciju i određivanje tačne pozicije implanta. CBCT snimak sa modelom zubne nadoknade uz upotrebu radiosenzitivnih markera u ustima je jedan od načina da se ovaj problem prevaziđe, jer nam omogućava tačnu orijentaciju prema poziciji zuba planiranog konačnog protetskog rada. Kao markeri se, za razliku od konvencionalnih radiografskih metoda, kod izrade CBCT snimaka ne smeju koristiti metali, već u obzir dolazi upotreba gutaperka poena ili radiosenzitivnog akrilata. [3] Izrada privremene proteze sa radiosenzitivnim akrilatnim zubima je upravo metoda koja nam pruža mogućnost da prevaziđemo gore navedene probleme i ograničenja samostalnog CBCT snimka u planiranju implantološke terapije kod bezubih pacijenata. Softverskom analizom ovako izrađenih snimaka stičemo uvid u dento-alveolarne odnose, precizno možemo da odredimo položaj i inklinaciju implantata, te da isplaniramo augmentacione procedure na rezidualnom alveolarnom grebenu ako za tim postoji potreba.

CT i kompjuterizovani sistemi doneli su revolucionarne promene u implantologiji i u

budućnosti će svakako imati ključni značaj u razvoju ove discipline. [3]

2. PRIKAZ SLUČAJA :

U radu je prikazan slučaj pacijenta starog 60 godina, totalno bezubog, koji se javio na Kliniku za stomatologiju Vojvodine zbog izrade zubnih nadoknada nošenih dentalnom implantima. Anamnestički su dobijeni podaci da je pacijent dobrog opšteg zdravstvenog stanja, ne uzima nikakvu terapiju, nije alergičan na hranu, lekove ni stomatološke materijale. Zube je sukcesivno vadio više godina unazad, nije imao nikada izrađene zubne proteze. Takođe, navodi da je u gornjoj vilici u dva navrata imao operacije na korenovima prednjih zuba.

Kliničkim stomatološkim pregledom utvrđen je značajan stepen resorpcije kosti rezidualnih alveolarnih grebena, posebno izraženih u gornjoj vilici. (slike 1. i 2.)



Sl. 1. Intraoralno gornja vilica



Sl. 2. Intraoralno donja vilica

Po izradi i analizi rendgen OPT snimka uočava se veliki nedostatak koštanog tkiva u obe vilice, kao i pojačana pneumatizacija oba maksilarna sinusa.

Odlučeno je da se pre određivanja definitivnog plana terapije, pacijentu napravi privremena gornja i donja totalna proteza, po svim pravilima stomatološke struke, uz upotrebu radiosenzitivnih zuba, te da se pacijentu napravi CBCT snimak celog stomatognatog sistema sa ovim protezama u ustima.(slike 3. i 4.)



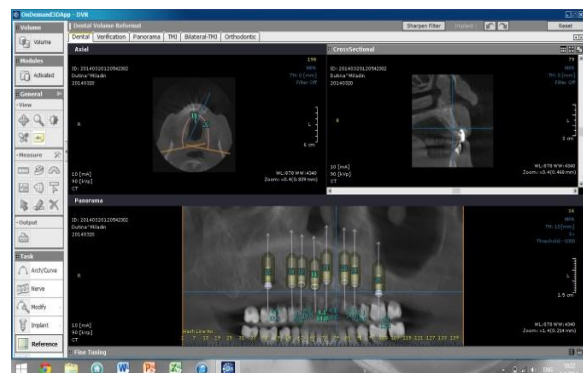
Sl. 3. Faza izrade proteze



Sl. 4. Proteza u ustima pacijenta

Analizom ovako dobijenih snimaka bilo je moguće napraviti konačan plan terapije.(Slike 5., 6. i 7.) Ustanovljen je broj, pozicija i dimenzija implantata koji će nositi buduću zubnu nadoknadu, kao što je utvrđena i količina koštanog tkiva koja mora prethodno biti nadoknađena da bi implanti bili postavljeni u željenu poziciju. U gornjoj vilici je, zbog izraženijeg stepena resorpcije koštanog tkiva, isplanirana dvofazna intervencija, pri čemu bi u prvom aktu bila izvršena augmentacija alveolarnog grebena, a u drugoj bi se pristupilo ugradnji implantata. U donjoj vilici je bilo moguće sprovesti terapiju u jednom aktu, tj. implanti bi bili ugrađeni uz istovremenu nadoknadu manje količine izgubljene kosti.

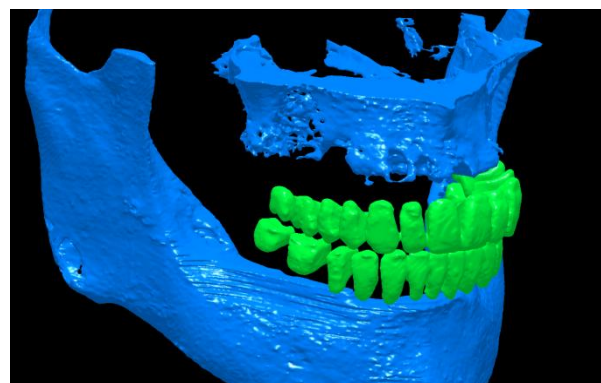
Nakon ovako izrađenog plana terapije, pristupilo se njegovoj realizaciji.



Sl. 5. Planiranje u gornjoj vilici



Sl. 6. Planiranje u donjoj vilici



Sl. 7. Softverska analiza dentoalveolarnih odnosa

3. ZAKLJUČAK :

Gubitak zuba i njegove posledice u modernom društvu predstavljaju ozbiljan medicinski, socijalni i ekonomski problem, te stoga ne čudi da se veliki broj naučnika kako medicinskih, tako i tehničkih nauka bavi njime. Razvoj nauke i tehnologije je u poslednjih 20 godina izbacio u prvi plan dentalnu implantologiju, kao granu stomatologije koja u velikoj meri rešava ovaj problem. Posebni pomaci su načinjeni u pogledu preimplantološke dijagnostike i planiranja implantološke terapije.

Danas implantologija nije moguća bez primene CBCT aparata i softverske podrške ovim aparatima, u vidu brojnih programa namenjenim

analiziranju, planiranju, virtualnom postavljanju implantata u željenu poziciju, i svim drugim postupcima koji nam omogućavaju da za svaki pojedinačni slučaj sprovedemo optimalnu terapiju. Uvođenjem radiosenzitivnih zuba u proceduru planiranja terapije bezubih pacijenata u velikoj meri poboljšavamo preciznost i pouzdanost, te smanjujemo mogućnost greške prilikom izrade zubne nadoknade. Sama jednostavnost procedure izrade zubnih proteza sa ovim zubima, daje joj prednost u odnosu na neke druge postupke koji su do sada korišćeni u praksi.

Iako ova procedura donekle produžava vreme terapije i poskupljuje je, benefiti koje donosi premašuju njene nedostatke, te autori ovog rada predlažu da se uvrsti u redovne protokole protetskog zbrinjavanja totalno bezubih pacijenata implantno nošenim nadoknadama.

Zahvalnica:

Rezultati prezentovani u ovom radu su realizovani u okviru projekta „Istraživanje i razvoj metoda modeliranja i postupaka izrade dentalnih nadoknada primenom savremenih tehnologija i računarom podržanih sistema“, TR – 35020, finansiranog od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

4. LITERATURA:

- [1].Mirković S; Mini dentalni implant; Univerzitet u Novom Sadu, medicinski fakultet, 2013;p 7.
- [2].Mirković S, Đurđević Mirković T, Puškar T. Application of concentrated growth factors in reconstruction of bone defects after removal of large jaw cyst-report of two cases. *Vojnosanit Pregl* 2014;in press.
- [3].Jurišić M, Stamenković D, Marković A, Todorović A, Leković V, Dimitrijević B et al. *Oralna implantologija*. 1st ed. Beograd: Stomatološki fakultet Beograd; 2008.
- [4].Mohammad M, Farzad M. Guided bone regeneration: A literature review. *J Oral Health Oral Epidemiol*, 2012; 1(1):3-18.
- [5].Peterson K, Pamenius M, Eliasson A, Narby B, Holender F, Palmqvist S& Hakansson J. 20-year follow-up of patients receiving high-cost dental care within the Swedish Dental Insurance System: 1977-1978 to 1998-2000.*Swed Dent J*. 2006; 30(2):77-86.
- [6].Ganz SD. Computer-aided Design/Computer-aided Manufacturing

Applications Using CT and Cone Beam CT Scanning Technology. *Dent Clin Nor Am* 2008; 52(4):777-808.

- [7].Eshak M, Brooks S, Abdel-Wahed N, Edwards PC. Cone beam CT evaluation of the presence of anatomic accessory canals in the jaws. *Dentomaxillofacial Radiology* 2014; 43 : 20130259.
- [8].Egbert N, Cagna DR, Ahuja S, Wicks RA. Accuracy and reliability of stitched cone-beam computed tomography images. *Imaging Science in Dentistry* 2015; 45:41-47.

Vicko, K., Potran, M., Petrović, B., Šokac, M., Puškar, T.

**CONE BEAM KOMPJUTERIZOVANA TOMOGRAFIJA (CBCT) I NJENA PRIMENA
U STOMATOLOGIJI**

Rezime: Radiografija je neizostavan deo dijagnostike, planiranja i evaluacije uspeha terapije u stomatologiji. Rutinski se u stomatološkoj praksi koriste dvodimenzionalni (2D) snimci. Prikazivanje 3D strukture u 2D dovodi do gubitka prostornih informacija treće dimenzije, stoga se nekad odluke donose na osnovu ograničenih podataka. CBCT kao napredna tehnologija sa 3D prikazom postao je zlatni standard u oblasti implantologije. U poređenju sa konvencionalnim CT-om izloženost zračenju je 10 puta manja. Preciznost snimaka, mogućnost manipulacije u željenim ravnima, kao i smanjene doze zračenja omogućuju da CBCT u budućnosti ima veliki potencijal i u drugim granama stomatologije. Tehnička i dijagnostička efikasnost prilikom primene CBCT su predmet brojnih istraživanja.

Gljučne reči: Kompjuterizovana tomografija, konusni snop zraka, stomatologija

1. UVOD

Prikaz treće dimenzije na radiogramu unapređuje dijagnostiku i terapiju u stomatologiji. Za trodimenzionalno prikazivanje objekta u medicini koristi se konvencionalna kompjuterizovana tomografija (CT), čija je primena u stomatologiji ograničena na regiju glave i vrata. Rutinska primena CT-a u stomatologiji nije prihvaćena zbog prekomernog zračenja i visoke cene. Pojava kompjuterizovane tomografije konusnog zraka (CBCT) je omogućila put za razvoj malih i relativno jeftinih skenera namenjenih za primenu u maksilofacijalnoj regiji [1,2]. Snimci dobijeni CBCT-om su u digitalnom formatu, a softver konstruiše 3D sliku u rasponu od 250-300 dvodimenzionalnih snimaka. Umesto piksela, koriste se vokseli, koje karakteriše dodatak treće dimenzije (zapremina) a ne samo dve dimenzije. Format zapisa ovih medicinskih snimaka je u DICOM formatu, odnosno *.dcm (eng. *Digital Imaging and Communications in Medicine*) koji predstavlja univerzalni format za 3D snimke u oblasti medicine, umesto digitalnih snimaka u *.jpeg ili *.tiff formatu. Region od interesa odnosno ROI (Region of interest), predstavlja 3D region koji želi da se analizira. Slično konvencionalnom CT-u, aksijalni, sagitalni i koronarni snimci se mogu izdvojeno analizirati [3]. Pomoću različitih filtera za poboljšanje slike, moguće je izvršiti optimizaciju snimaka. Smatra se da filteri za izoštravanje slike predstavljaju jedne od najznačajnijih alata za poboljšanu analizu snimaka. Trenutno na tržištu postoji veliki broj različitih softvera za analizu ovih 3D snimaka [4].

2. CBCT TEHNOLOGIJA

Osnovna razlika između CBCT i konvencionalnog CT-a je da CBCT koristi snop X zraka konusnog oblika sa kojim se detektuje snimak pune debljine u jednoj rotaciji oko glave pacijenta. Sa druge strane konvencionalni CT snima slojevitom tehnikom, sa uskim lepezastim snopom X zraka. Kraniofacijalni CBCT skeneri su dizajnirani kako bi se prevazišla ograničenja konvencionalnih CT skenera i omogućila svakodnevna upotreba 3D snimanja [3,4].

2.1 Prednosti CBCT tehnike

CBCT karakterišu sledeća svojstva:

- kraće vreme skeniranja u poređenju sa vremenom potrebnim za dobijanje ortopantomografskog ili konvencionalnog CT-a,
- preciznost i kompletan 3D prikaz iz željenog ugla,
- konusni snop zračenja omogućava ograničenje zračenja u regionu od interesa (ROI),
- u poređenju sa konvencionalnim CT-om (u proseku 2000 μSv), doza zračenja je redukovana i do deset puta (29-477 μSv). Prosečno vreme zračenja je 18 sekundi, što iznosi 1/7 u odnosu na konvencionalni CT skener,
- ne dolazi do superponiranja snimaka i struktura koje se nalaze izvan ROI,
- mogu se videti tkiva čije se fizičke gustine razlikuju za manje od 1%, jer se dobijaju dobre slike visoko kontrastnih struktura,
- ne javljaju se greške zbog uveličanja, odnosno dobijaju se stvarne dimenzije anatomskih struktura.

3. KLINIČKA PRIMENA U MAKSILOFACIJALNOJ REGIJI

3.1 Primena u oralnoj i maksilofacijalnoj hirurgiji

Važna uloga CBCT u oralnoj i maksilofacijalnoj hirurgiji je da prikaže tačnu 3D lokalizaciju patološke promene i njene granice. Omogućen je precizni prikaz položaja impaktiranih i prekobrojnih zuba, moguća je analiza odnosa promene i anatomskih struktura (Slika 1). S obzirom da se ne radi o snimanju magnetnom rezonancom (MR), najbolja je metoda kod intraoperativne navigacije tokom različitih procedura, posebno kod ustrelnih rana [1].



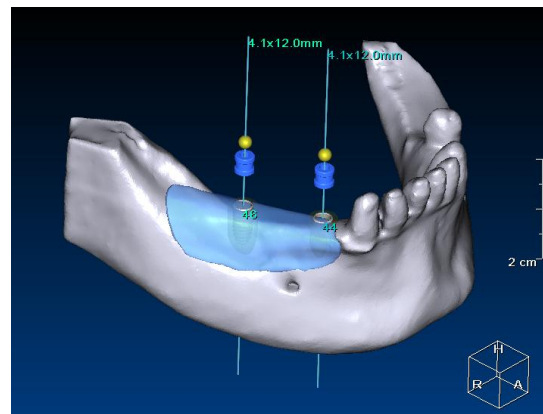
Sl. 1. 3D prikaz impaktiranih gornjih očnjaka i njihov odnos sa okolnim strukturama [5].

2D snimci su najčešće primenjivani kod izolovanih fraktura kostiju maksilofacijalne regije, gde su u određenim slučajevima neophodna dva različita snimka kako bi se dobila percepcija o 3D prostiranju frakturne linije, kao i o veličini dislokacije fragmenata. Konvencionalni 3D CT predstavlja za sada zlatni standard u dijagnostici panfacijalnih fraktura kosti ove regije, međutim usled značajnih prednosti CBCT-a predviđamo promenu u budućnosti [6].

CBCT je dobra tehnika za određivanje tačne pozicije kondila temporomandibularnog zgloba (TMZ) u temporalnoj fosi. Zahvaljujući tačnosti CBCT snimaka moguće je prikazati meko tkivo oko TMZ što umanjuje potrebu za snimanjem magnetnom rezonancom (MR). Ove prednosti ukazuju da je CBCT korisna tehnika kod analize trauma, bola i disfunkcije zgloba, a takođe i u detekciji fibrozealne ankiloze zgloba i cista. Moguća je i snimkom vođena punkcija, koji predstavlja jedan od mogućih tretmana kod adhezija diska TMZ [2,3].

Ova tehnika takođe ima veliki značaj i u oblasti implantologije, gde se mogu konstruisati hirurške vođice, moguće je uraditi kvalitativnu i

kvantitativnu evaluaciju koštanog tkiva što smanjuje komplikacije tokom i nakon same intervencije. Softveri za virtuelno planiranje omogućuju da se pre samog tretmana predvidi konačan ishod. Pre postavke implantata, na osnovu podataka o dimenzijama raspoložive alveolarne kosti, može se izabrati veličina implantata i mesto za njegov plasman, a oseointegracija se može procenjivati tokom određenog vremenskog perioda. Moguće je proceniti anatomske varijacije i planiranje sinus lift procedure [4,5,6]. Snimci dobijeni CBCT tehnikom, koji su pritom obrađeni u različitim softverima omogućavaju i postupak planiranja ugradnje koštanih graftova (Slika 2).



Sl. 2. Virtuelni prikaz izmodeliranog 3D modela koštanog grafta sa implantima [8].

Fizički 3D modeli se proizvode na višeosnim obradnim centrima iz bloka biokompatibilnog materijala. Dobijeni modeli se mogu koristiti u oblastima rekonstruktivne hirurgije, ortognatske hirurgije i implantologije [7,8].

3.2 Primena u stomatološkoj protetici

Prilikom planiranja protetske rehabilitacije jedan od značajnih ciljeva je adekvatna raspodela mastikatornih sila. Detaljne informacije sa CBCT snimka o stanju potpornog aparata zuba nosača, raspona između nosača, morfologiji rezidualnog alveolarnog grebena i strukturi kosti mogu precizno ukazati na neophodnu odnosno moguću terapijsku meru. Određivanje međuviličnih odnosa 3D snimkom je pouzdano snimanjem sa i bez šablona u ustima pacijenta. Ukoliko je neophodno, posebno se mogu izdvojiti snimci visine zagrižaja i centralne relacije u 2D [1,2].

Mogućće je izraditi gajdere za ugradnju implantata i snimiti CBCT-om, za koje mogu služiti specijalne proteze sa rendgen kontrastnim krunicama, odnosno moguće je različitim metodama iskoristiti staru pločastu protezu za pravilan putokaz postave implantata [8].

3.3 Primena u endodonciji

CBCT može da se koristi za određivanje broja i morfologije glavnih i akcesornih kanala, za merenje radne dužine i kasnije za evaluaciju opturacije. Pored toga veoma je korisna metoda u dijagnostici apikalnih lezija. Novije studije su pokazale mogućnost diferenciranja apikalnih lezija, odnosno granuloma i ciste mereći gustinu lezija na kontrastnim snimcima ovih lezija. Takođe je moguće utvrditi da li je lezija endodontskog ili parodontalnog porekla. CBCT je superioran u odnosu na 2D snimak u detekciji fraktura korena zuba, posebno frakturnih linija u bukolingvalnom pravcu. Omogućena je bolja vizuelizacija *fauss routa* i zalomljenih instrumenata. Kod povreda zuba, CBCT obezbeđuje preciznu dijagnozu i ukazuje na najbolji terapijski pristup [9].

3.4 Primena u ortodonciji

3D vizuelizacija pacijenta omogućava precizniju analizu skeletnih i dentalnih nepravilnosti i omogućuje detaljnu procenu ishoda ortodontske terapije. Upotreba 3D snimaka daje ortodontima mogućnost da individualno pacijentima pomoću računara porede različite planove terapije pomeranja zuba, funkcionalne terapije ili ortognatske hirurgije, takođe omogućuje predviđanje odgovora mekih tkiva u 3D. Kefalometrijska analiza pomoću CBCT-a postala je nova metoda izbora u svetu za određivanje tipa rasta, uzrasta, analize lica, vazdušnih prostora, sleep apnee i nicanja zuba (Slika 3). Koristi se za određivanje strukture kosti pre, u toku i nakon ortodontskog tretmana. Ovaj metod je dokazao superiornost u prevazilaženju preklapanja i računanja realne udaljenosti različitih struktura [5,10]. Na osnovu podataka dobijenih pomoću CBCT skenera moguće je prikazati anatomski model vilica. Digitalni anatomski model prikazuje anatomiju zuba i vilica, krunice i korenove zuba, zube u razvoju i impaktirane zube na kojima se mogu izvršiti potrebna merenja. CBCT omogućuje utvrđivanje nepravilnosti odnosa vilica u sve tri ravni, nepravilnosti zubnih nizova i pojedinačnih zuba [11].

3D snimak je koristan u dijagnostici kongenitalnih anomalija, rascepa i različitih sindroma koji se manifestuju u kraniofacijalnoj regiji [11,12].



Sl. 3. Analiza odnosa čvrstih i mekih tkiva pri promeni prozirnosti slike [5].

3.5 Primena u dečijoj stomatologiji

Redukcija zračenja, skraćena ekspozicija i uski snop zračenja su karakteristike CBCT-a koje su posebno pozitivne ukoliko je neophodna 3D radiografija kod populacije mlađeg uzrasta. 3D snimak pruža mogućnost detaljne analize traumatologije zuba koje su česte kod dece [1,2]. Uz kliničku sliku, prikaz frakture korena odnosno položaja i pravca pružanja frakturne linije, postojanja intruzije ili lateralne luksacije je presudno u izboru terapijskog pristupa kod povreda zuba i potpornog tkiva. Poremećaji razvoja zuba kao što su geminacija, fuzija, konkrescencija se precizno mogu dijagnostikovati i razlikovati [12].

3.6 Primena u parodontologiji

U parodontologiji značaj CBCT snimanja odnosi se na procenu dimenzija mekih tkiva i alveolarne kosti u tri ravni, prikazivanje morfologije infrakoštanih defekata, dehiscencija i fenestracija, detekcija furkacionih defekata i periodontalnih cista. Iako je 2D radiografija od koristi za prikazivanje aproksimalnih koštanih defekata, CBCT tehnikom moguće je precizno prikazati defekte lokalizovane vestibularno ili oralno. CBCT tehnika omogućuje znatno bolju vizuelizaciju periodontalnog prostora, praćenje ishoda regenerativne terapije i merenje gustine kosti u infrakoštanim defektima nakon primene koštanih zamenika [13].

3.7 Sudsko-medicinski značaj CBCT snimaka

Poređenje 3D snimaka iz baze podataka sa patološkim nalazom doprinosi identifikaciji osobe u sudskoj medicini na osnovu broja, morfologije zuba i izvršenih stomatoloških intervencija [1,2,3].

4. ZAKLJUČAK

Prikaz struktura u 3D maksilofacijalne regije doprinosi kliničkom radu u stomatologiji, međutim CBCT snimanje treba indikovati kada 2D snimci nisu dovoljni za postavljanje definitivne dijagnoze ili izradu plana terapije.

5. REFERENCE

- [1] Makdissi J. *3D imaging: the role of cone-beam computed tomography in dentistry: special reference to current guidelines*. Faculty Dental Journal, 6, p.p. 287-295, 2012.
- [2] Howerton W. B, Mora M. A. *Use of conebeam computed tomography in dentistry*. General Dentistry, 1, p.p. 54-57, 2007.
- [3] Kumar M, Shanavas M, Sidappa, A, Kiran M. *Cone beam computed tomography - Know its secrets*. Journal of International Oral Health, 7, p.p. 64–68, 2015.
- [4] Scarfe W. C, Farman A. G, Sukovic P. *Clinical applications of cone-beam computed tomography in dental practice*. Journal Canadian Dental Association. 72, p.p.75-80, 2006.
- [5] Agrawal J.M, Agrawal M.S, Nanjannawar L.G, Parushett A.D. *CBCT in Orthodontics: The Wave of Future*. Journal of Contemporary Dental Practise, 14, p.p. 153-157, 2013.
- [6] Ziegler C.M, Woertche R, Brief J, Hassfeld S. *Clinical indications for digital volume tomography in oral and maxillofacial surgery*. Dentomaxillofacial Radiology, 31, p.p. 126–130,2002.
- [7] Guerrero M. E, Jacobs R, Loubele M, Schutyser F, Suetens P, van Steenberghe D. *State-of-the-art on cone beam CT imaging for preoperative planning of implant placement*. Clinical Oral Investigations, 10, p.p. 1–7, 2006.
- [8] Mirković S., Budak I., Puškar T., Tadić A., Šokac M., Santoši Ž., Đurđević-Mirković T.: *Application of Modern Computer-Aided Technologies in the Production of Individual Bone Graft*, Vojnosanitetski pregled, (prihvaćen za štampu), 2015.
- [9] Scarfe WC, Levin MD, Gane D, Farman AG. *Use of cone beam computed tomography in endodontics*. International Journal of Dentistry, 69, p.p. 63-67, 2009.
- [10] Van Vlijmen O. J, Kuijpers M. A, Bergé S. J. *Evidence supporting the use of cone-beam computed tomography in orthodontics*. The Journal of The American Dental Association, 143, p.p. 241–252, 2012.
- [11] Palomo J.M, Kau C.H, Richmond S, Hans M. G. *Three-dimensional cone beam computerized tomography in orthodontics*. Journal of

Orthodontics, 4, p.p. 282–293, 2005.

[12] Bornstein M. M, Wölner-Hanssen A. B, Sendi P, von Arx T. *Comparison of intraoral radiography and limited cone beam computed tomography for the assessment of root-fractured permanent teeth*. Dental Traumatology, 25, p.p. 571–577,2009.

[13] Kasaj A, Willershausen B. *Digital volume tomography for diagnostics in periodontology*. International Journal of Computerized Dentistry, 10, p.p. 155–168, 2007.

Autori: dr Kristina Vicko¹, dr Michal Potran¹, doc. dr Bojan Petrović¹, MSc Mario Šokac², prof. dr Tatjana Puškar¹.

¹Katedra za stomatologiju, Medicinski fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Hajduk Veljkova 3, Novi Sad.

²Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet Tehničkih Nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad.

E-mail: kristina.vicko@yahoo.com

Napomena: Rezultati prezentovani u ovom radu su realizovani u okviru projekta „Istraživanje i razvoj metoda modeliranja i postupaka izrade dentalnih nadoknada primenom savremenih tehnologija i računarom podržanih sistema“, TR – 35020, finansiranog od strane Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

Jelena Mitić, Nikola Vitković, Miodrag Manić, Miroslav Trajanović, Zoran Radovanović

APPROACHES TO GEOMETRICAL MODELING OF THE HUMAN MANDIBLE

Abstract: *In this paper two approaches to obtain 3D geometric (surface) model of the mandible are presented. Both approaches for creating a geometric model are based on the use of Computer Tomography image as input data. First approach is classical techniques of reverse engineering and second is based on the Method of Anatomical Features (MAF). The basic difference between these two approaches of geometrical modeling of human mandible is in the method of generating the splines which produce the surface. The aim of this study is to compare 3D models of the mandible obtained by two presented approaches as well as their accuracy.*

Key words: *virtual modeling, mandible, surface model, accuracy, Method of Anatomical Features*

1. INTRODUCTION

Computer modeling has revolutionized almost all areas of engineering and science. The advances in computing technologies and production processes, [1] have led to usage of Computer Aided Design (CAD) in biomedical engineering, which includes medicine engineering.

An anatomically correct and geometrically accurate model of the human bone (in this case human mandible) is necessary in the computer-based preoperative planning, especially for orthodontics, prosthetics and maxillofacial surgery. Such model allows the creation of fixators and implants of human bones adapted for the patient, while also improving the preparation and simulation of surgical interventions. A surgical reconstruction is a very complex and difficult for patients with distinct craniofacial deformities or missing bony structures [2]. The main reasons for such malformations are: tumor, injury or fractures. Therefore, it is very important to create geometry of the bone rapidly and accurately.

Creating the 3D geometrical model of human mandible is a challenge, because the mandible has a very complex shape, structure and geometry. Development of geometrical model of the human mandible with the application of statistical methods is described in [2]. In the same paper, authors presented complexity of geometry and shape of geometrical model of the human mandible.

The aim of this research is to present two approaches to obtain 3D geometric (surface) model of the mandible and compare the accuracy. First is classical techniques of reverse engineering and second is based on the Method of Anatomical

Features (MAF). Both methods for creating a geometric model are based on the use of volumetric medical image. Volumetric scanning methods (Computer Tomography – CT) allow the creation of 3D data sets that can be transformed into an adequate model suitable for further processing. The process [3] of defining geometrical interpolation splines is crucial to creating a valid surface model. The process of creating a geometric model will be unsuccessful, if the splines are defined inaccurately. The basic difference between the previously mentioned two approaches of geometrical modeling of human mandible is in the method of generating the splines which produce the surface. The principle of generating splines over the scanned cloud of points is based on defining the splines with or without taking into consideration the morphological properties.

The aim of this study is to compare the 3D models of the mandible obtained by presented two approaches as well as their accuracy.

2. MATERIAL

Input for this research is a CT scan of the mandible scanned at 64-slice CT (MSCT) (Aquilion 64, Toshiba, Japan), according to the standard protocol recording: radiation 120 kVp, current 150 mA, rotation time 0.5 s, exposure time 500 ms, rotation time 0.5 s, thickness 0.5 mm, image resolution 512×512 px, and pixel size approximately 0.38 mm.

Geometrical modeling of the human mandible is based on reverse modeling of scanned sample by CAD software. For this case CATIA V5 R19 CAD software were used.

2.1 Anatomy of Human Mandible

Lower jaw (mandible) [4-5], is the biggest and most massive face bone, which is connected with skull of temporomandibular joint. It represents the largest odd-facial bone or viscerocranial bone, which participates in the construction of the only movable joint head. Lower jaw consists of the mandible body, two ramus and jaw angles.

Mandible body (lat. corpus mandibulae) is of horseshoe shape and represents its horizontal part, which consists of two arches: the upper and lower alveolar mandibular arch. Above, the alveolar arch is inscribed in mandibular arch, lower is where resulting expansion of the lower jaw down, and the outside is oriented in the field and down.

Ramus is approximately of a rectangle shape which is located upward and backward in relation to mandible body with which it forms an angle of 90° - 140° , most commonly 120° - 130° . It has two sides: external and internal, and four edges: upper, lower, anterior and posterior. The upper edge has two processes: anterior (lat. processus coronoideus) and posterior (lat. processus condylaris).

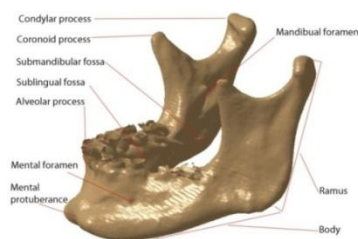


Fig. 1 - Anatomy of Human Mandible

2.2 The steps of the process

Both approaches involves certain steps to obtain a valid surface model. Generally, the steps are[3]:

- Computer Tomography (CT) scanning part of the human body or dry samples (in this case mandible)
- Preprocessing of raw data (scans) and its transformation in STL format
- Definition of the anatomical models of the specific human bones
- Importing the scanned model in STL format into CAD application and its further preprocessing
 - *Cleaning* the cloud of points
 - *Tessellation*
 - *Healing* the tessellated model

3. METHODS

Two approaches were used for the creation of surface models of the human mandible. First is classical techniques of reverse engineering and

second is based on the Method of Anatomical Features (MAF). Both approaches are presented in detail. The accuracy of obtained surface models is tested through comparison with the original model geometry.

The application of these approaches can be extended to other bones in human body.

3.1 First approach

The first approach for creating geometrical model of the human mandible is classical techniques of reverse engineering. The principle of generating splines over the scanned cloud of points is based on defining the splines in the input planes. Planes used for creation of the surface model were imported along with the scanned model of the mandible. Thirteen planes were used for the creation of the cross-sections on mandible body. The intersections of planes and model of mandible produces contour curves. These curves were used for creating points and spline curves (Fig.2). Obtained spline curves were used for creation of the surface model. A similar procedure, with eleven planes was used to create a surface model of the ramus of the mandible. The set of spline curves defined over the whole bone model is called the skeleton model. 3D surface model of human mandible is created by merging 3D surfaces of the mandible body with ramus.



Fig. 2 - Spline curves in first approach

3.2 Second approach

The second approach, Method of Anatomical Features (MAF) [6], is based on Referential Geometrical Entities (RGEs) which are defined on mandible polygonal model, and in accordance with mandible anatomical and morphological properties. The basic prerequisite for successful performance of reverse modeling of human bone geometry is identification of referential geometrical entities (RGEs). RGEs include anatomical points, directions, planes, views. Other elements [7] of bone curve and surface geometry will be defined in reference with RGEs. To create precise geometry of a human bone, a set of primary RGEs should be minimized.

Based on [8], for the bones of the lower jaw, the following anatomical landmarks can be defined: Mental Foramen, Gnathion, Gonion, Condylion and Mandibulare cut.

In the same paper, authors stated that the configuration of the mandible can be accurately perceived by means of ten (10) basic central and bilateral morphometric parameters. These morphometric parameters of the human mandible are: Gnathion-Interdentale distance, Bigonial Width, Bicondylar Breadth, Height of the Mandibular Body, Breadth of the Mandibular Body, Mandibular Length, Minimum Ramus Breadth, Maximum Ramus Height, Height of the Condyles and Gnathion - Condylar distance.

The first step in definition of the geometrical model is the creation of the model coordinate system which is used for identification of RGEs. The coordinate system was created on polygonal model. Origin of the coordinate system was positioned at the middle point of the distance between the most lateral points on the two condyles. The constructed planes of the Object Coordinate System of the mandible are: Mediosagittal, Mandibular and Coronal.

The Mediosagittal (MS) plane was constructed as normal to the line which connects Bicondylar breadth middle points. MS is a plane which divides human mandible into two halves, left and right. Horizontal or mandibular plane is the lowest plane normal to the MS plane. Coronal or anterior posterior (AP) plane is a plane which is normal to the mandibular plane and divides mandible into two anatomical sections, anterior (front) and posterior (back). Based on the anatomical characteristics of the mandible and Mediosagittal plane (rotated to the right angle), planes were created. These planes have been used to create cross-sections. At the intersection of these planes with polygonal model, contour curves are generated. These curves are used to create points and spline curves (Fig. 3). The spline curves are defined to follow the bone geometry and topology in accordance with the anatomical bone model of the mandible. The same procedure, was applied for creation of 3D surface model for the ramus of mandible. 3D surface model of human mandible is created by merging 3D surfaces of the mandible body with ramus.



Fig. 3 - Spline curves in second approach

4. RESULTS

Geometrical accuracy of the obtained surface model was tested by the application of the deviations analysis. The obtained models were compared with the original input models. Two analysis were performed, one for surface deviations and second for the deviations of morphometric parameters.

4.1 Maximum deviations

Maximum surface deviations of the surface models of human mandible created by the use first and second approaches are presented Figure 4. and Figure 5. It can be noticed that Maximal deviation value of the surface model created by second approach is 1.66 mm, lower than on the surface models created by first approach (2.03 mm). This means that the quality of the resulting geometric model of the mandible has a direct relationship to the identification of referential geometrical entities (RGEs).

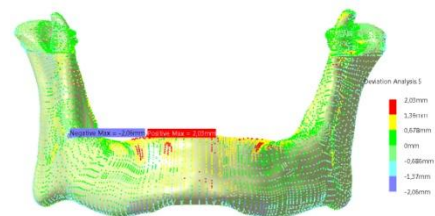


Fig. 4 - Maximum deviations of the surface model of the human mandible from the input human mandible model

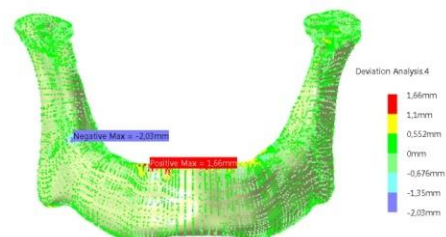


Fig. 5 - Maximum deviations of the surface model of the human mandible from the input human mandible model

4.2 Morphometric parameters of the human mandible

Anatomical point have been identified on a two surface model of the mandible, according to their respective values of ten (10) standard central and bilateral MP. Morphometric parameters were measured at the same CT scans of mandibles. Values bilateral MP were measured on both sides. Indirect measurement was performed in CATIA CAD application.

Position of anatomical point directly affects on values of morphometric parameters. Results of deviations analysis for morphometric parameters are presented in Table 1. for both of the surface

models. It can be noticed that values deviations analysis are smaller of the surface model 2. Virtual modeling of the lower jaw has a great importance in all areas of dentistry. In the definition of the geometry, values deviations analysis morphometric parameters should be kept to a minimum.

Table1. Deviations analysis morphometric parameters

Morphometric Parameters	Deviations analysis of Model 1		Deviations analysis of Model 2	
Bicondylar Breadth	0.113		0.087	
Bigonial Width	0.275		0.015	
Gnathion-Interdentale Distance	0.198		0.097	
Height of the Mandibular Body	0.1698 ^l	0.071 ^r	0.060 ^l	0.041 ^r
Breadth of the Mandibular Body	0.176	0.265	0.064	0.103
Mandibular Length	0.135	0.282	0.088	0.254
Minimum Ramus Breadth	0.155	0.142	0.063	0.061
Maximum Ramus Height	0.119	0.116	0.051	0.013
Height of the Condyle	0.117	0.087	0.052	0.064
Gnathion - Condylar Distance	0.271	0.199	0.077	0.083

4. CONCLUSION

In order to create valid model for preoperative planning, designing of implants, etc., the accurate definition of geometry and topology of all regions of human mandible is essential. The approaches presented in this study enable creation of bone surface model. 3D surface model of human mandible created with method of anatomical features (MAF) provides: anatomically correct and geometrically accurate model, increased accuracy, and maximally fits the real bone of the patient.

Acknowledgment

The paper is part of the project III 41017 Virtual Human Osteoarticular System and its Application in Preclinical and Clinical Practice sponsored by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia.

5. REFERENCES

[1] Mustafa, Ay., Tinaz, Kubat., Cagri, Delilbasi., Bulent, Ekici., Huseyin, Emir, Yuzbasioglu.,

Selim, Hartomacioglu., *3D Bio-Cad modeling of human mandible and fabrication by rapid-prototyping technology*, Usak University Journal of Material Sciences 2, 135 – 145, 2013

- [2] Zachow, S., Lamecker, H., Elsholtz, B., Stiller, M., *Reconstruction of mandibular dysplasia using a statistical 3D shape model*, Proc. Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS), 1248-1243, Berlin, Germany, 2005.
- [3] Trajanović, M., Vitković, N., Stojković, M., Manić, M., Arsić, S., *The morphological approach to geometrical modeling of distal femur*, 2nd South-East European Conference on Computational Mechanics, 1-8, Rhodes, Greece, 22–24 June 2009.
- [4] Moore, K., L., *Clinically oriented anatomy*. III ed. Williams & Wilkins. 1992 Baltimore.
- [5] Surdilović, S., *Maksilofacijalna hirurgija, praktikum iz traumatologije*. Prvo izdanje, Prosveta, Nis, 2000.
- [6] Majstorović, V., Trajanović, M., Vitković, N., Stojković, M., *Reverse engineering of human bones by using method of anatomical features*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 167-170, 2013.
- [7] Stojković, M., Trajanović, M., Vitković, N., Milovanović, J., Arsić, S., Mitković, M., *Referential geometrical entities for reverse modeling of geometry of femur*. In: Tavares JM, Jorge N, editors. *VIPIIMAGE 2009*. Proceedings of the Second Thematic Conference on Computational Vision and Medical Image Processing, p.189-94, Portugal, Porto, Oct 14-16, 2009.
- [8] Arsić, S., Perić, P., Stojković, M., Ilić, D., Stojanović, M., Ajduković, Z., Vucić, S., *Komparativna analiza linearnih morfometrijskih parametara humane mandibule dobijenih direktnim i indirektnim merenjem*, *Vojnosanitetski Pregled*, 67(10), 839-846, 2010.

Authors: Jelena Mitić, Assist. Prof. Nikola Vitković, Prof. Dr. Miodrag Manić, Prof. Dr. Miroslav Trajanović, Prof. dr Zoran Radovanović, University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering, Dr Zorana Đinđića 81 Bulevar, 18000 Niš, Serbia, Phone.: 018/500-662
E-mail: jelena.mitic153@gmail.com,
vitko@masfak.ni.ac.rs,
traja@masfak.ni.ac.rs,
miodrag.manic@masfak.ni.ac.rs
zorad_yu@yahoo.com

Pavlović, M., Kalem, Lj., Trifković, B., Puškar, T.

OTISNI MATERIJALI U STOMATOLOŠKOJ PROTETICI

Rezime: *Preduslov za uspešnu protetičku terapiju pacijenata predstavlja tačno reprodukovanje detalja zuba i mekih tkiva usne duplje. To se postiže u okviru kliničke faze otiskivanja, korišćenjem otisnih materijala. Cilj otiskivanja je dobijanje dimenzionalno stabilnog negativa koji će služiti za izradu gipsanog modela. Cilj ovog rada je da se razmotre fizičke osobine otisnih materijala koje mogu biti od značaja u izboru materijala u kliničkoj praksi.*

ključne reči: *otisak, otisni materijali, fizičke osobine*

1. UVOD

Tehnika otiskivanja prvi put je opisana u 18. veku, u tu svrhu korišćen je razmekšali vosak. Tokom 20. veka pojavili su se novi materijali: hidrokoloide, polietri, adicioni i kondezacioni silikoni. Poslednjih 20 godina došlo je do intenzivnog razvoja otisnih materijala i unapređivanja njihovih osobina [1]. Otisni materijali se na osnovu svojstva koje pokazuju nakon vezivanja dele u dve grupe. Prvu grupu čine neelastični otisni materijali (gips, termoplastična masa, cinkoksid eugenol). Drugu grupu čine elastični otisni materijali (hidrokoloide i elastomeri). Značaj gipsa i termoplastičnih masa kao otisnih materijala je danas samo istorijski.

Preparati cinkoksid eugenola dolaze u obliku dve paste, pri čemu je cink oksid glavni sastojak jedne a eugenol druge paste. Njihovim mešanjem pokreće se hemijska reakcija jonske prirode.

Hidrokoloide predstavljaju koloidne suspenzije polisaharida u vodi. Pripremaju se u dva oblika, sol i gel. U sol stanju nalaze se u formi tečnosti male viskoznosti sa neuređenim lancima polisaharida. Gel forma predstavljena je u želatinoznom obliku sa uređenim polisaharidnim lancima. Prelazak iz sol u gel stanje odvija se hlađenjem ili hemijskim reakcijama. Hidrokoloide mogu biti reverzibilni i ireverzibilni. Ireverzibilni hidrokoloide-alginati su koloidne suspenzije rastvorljivih soli alginske kiseline. Reverzibilni predstavljaju koloidne suspenzije agara u vodi. Njihov predstavnik je Agar, složeni organski polisaharid.

Elastomeri su sintetički materijali čiju osnovu čine polimeri male mase kojima se dodaju punioci. Po viskoznosti podeljeni su na četiri grupe: retki (light); srednji (medium/regular); gusti (heavy); veoma gusti (putty). U elastomere spadaju

polisulfidi, polietri, kondezacioni i adicioni silikoni [2].

Polisulfidi su najstariji elastomerni materijali koji su zapravo polimerna organska jedinjenja sumpora različitog hemijskog sastava. U današnje vreme, retko se koriste. Nakon polisulfida, u stomatologiju su uvedeni kondenzacioni silikoni i polietri. Osnovu kondenzacionih silikona čini polidimetil siloksan sa hidroksilnom grupom i puniocima. Polietri su prvi materijali sintetisani isključivo za potrebe stomatologije. Osnovu čine polietar prepolimer i punioci. Njihova hifrofilnost, visoka elastičnost i mala polimerizaciona kontrakcija, doprinela je njihovoj širokoj upotrebi pri čemu su potisli polisulfide i kondenzacione silikone sa tržišta. Deset godina kasnije uvedeni su adicioni silikoni. Osnovu adicernih silikona čini polidimetil silikon, u kom su pojedine metil grupe zamenjene sa vodonikom i puniocima [2]. Prednosti i nedostaci u odnosu na ranije uvedene polietre, još uvek su predmet diskusije.

1. SVOJSTVA

Otisni materijal treba da ima zadovoljavajuće osobine u kliničkim i laboratorijskim uslovima. Idealan otisni materijal treba da bude dimenzionalno stabilan, precizan, odgovarajućih mehaničkih osobina, biokompatibilan sa tkivima usne duplje, sa kratkim vremenom vezivanja i odgovarajućom cenom. Idealan tip materijala ne postoji [3]. Poznavanje osobina otisnih materijala doprinosi uspehu protetičke terapije i odabiru najpogodnijeg materijala za svaku individualnu situaciju.



Slika 1. Alginatni otisak



Slika 2. Dvofazni otisak sa adicisionim silikonom

2.1 Dimenzionalna stabilnost

Dimenzionalna stabilnost predstavlja sposobnost materijala da zadrži stečene dimenzije nakon vezivanja. Poželjno je da otisni materijal ima malu vezivnu kontrakciju, elastičnost i postojanost tokom vremena [1]. Od materijala koji su danas u upotrebi, cink oksid eugenol je u tankom sloju dimenzionalno stabilan, zahvaljujući minimalnoj kontrakciji eugenolata koja je manja od 0,1%. Ipak, osetljiv je na uticaj temperature pa se preporučuje blagovremeno izlivanje. Agar gel pokazuje malu dimenzionalnu stabilnost, iako se isti materijal može koristiti više puta. Zbog njegove osetljivosti na spoljne uticaje, danas se retko koristi. Treba ga čuvati u higroskopskim komorama sa regulisanim pritiskom i vlažnošću. Dodatno, agar vremenom gubi vodu, pa je neophodno izlivanje modela odmah nakon viskoelastičnog povraćaja materijala.

Alginatni gel takođe ima malu dimenzionalnu stabilnost. Otisak uzet sa alginatima brzo menja svoje dimenzije procesima evaporacije, imbibicije i sinereze (slika 1). To zahteva neposredno izlivanje gipsanog modela. Alginatni gel

nepovoljno deluje na vezivanje gipsa za izradu modela narušavanjem procesa kristalizacije. Taj problem se rešava potapanjem otiska u rastvor koji sadrži akcelerator odgovorne za proces vezivanja gipsa. Zbog njegove niske cene, upotrebljava se za izradu anatomskih modela, studijskih modela i otiskivanja antagonista zuba [2]

Polisulfidi i kondezacioni silikoni spadaju u starije materijale iz grupe elastomera. Preporučuje se izlivanje u roku od 30 min od otiskivanja, posle viskoelastičnog povraćaja materijala. To je uslovljeno nastankom sporednih proizvoda tokom polimerizacije, od koji su najznačajniji etil alkohol (polisulfidi) i voda (kondezacioni silikoni). Molekul alkohola je veći od molekula vode pa je kontrakcija kod polisulfida još izraženija. Polisulfidi i kondezacioni silikoni imaju najveće dimenzionalne promene od svih elastomera, u opsegu od 0,4% do 0,6 %. Potom slede polietri sa 0,2% i najmanje dimenzionalne promene imaju adicioni silikoni sa 0,15% [1]. Polietri su stabilni u suvoj i hladnoj sredini. Međutim u vlažnim uslovima upijaju vodu i bubre pa se stoga ipak preporučuje izlivanje u roku od 1 sata nakon otiskivanja. Adicioni silikoni imaju gotovo idealnu dimenzionalnu stabilnost i mogu se izlupati i nekoliko nedelja nakon otiskivanja (slika 2).

2.2 Hidrofilnost

Hidrofilnost je sposobnost molekula da vezuju vodu, gradeći pritom vodonične veze. S obzirom da usna duplja predstavlja vlažnu sredinu, hidrofilnost materijala je poželjna osobina koji doprinosi tačnosti otiska. Otisni materijali mogu biti hidrofilni, hidrofobni i hidroaktivni. Hidrofilni materijali imaju sposobnost da bolje prijanjaju na vlažne površine čvrstih i mekih tiva usne duplje i samim tim da bolje registruju detalje otiskivane strukture. Hidrofobni materijali imaju manju tačnost, beleže manje detalja tkiva i na njima mogu da ostanu tragovi tokova pljuvačke i sulkusnih fluida. Hidroaktivni materijali su oni koji su u osnovi hidrofobni, ali im se dodaju različiti nejonski surfaktanti da bi postali hidrofilni. [3] Polietri i polisulfidi predstavljaju hidrofilne materijali, pa se mogu koristiti i u uslovima povećane vlažnosti. Neželjno dejstvo hidrofilnosti nalazi se u imbibiciji vlage iz vazduha, pa je neophodno pakovati ih u zaštitne folije tokom transporta u zubnu laboratoriju. Kondenzacioni i adicioni silikoni su izrazito hidrofobni materijali. Novije generacije adicisionih silikona imaju dodatne surfaktante, kao što je polietarkarboksilan. Surfaktanti smanjuju

površinski napon čime se omogućava bolji kontakt sa tkivima i preciznija reprodukcija detalja. Međutim, ovo poboljšanje ima više efekat u kontaktu vezanog otisnog materijala sa vlagom iz gipsa, nego u kontaktu nevezanog materijala sa vlagom na tkivima. Razvoj novih materijala je usmeren ka smanjenju hidrofobnosti materijala [4].

2.3 Elastičnost i otpornost na kidanje

Otisni materijali moraju da imaju adekvatnu otpornost da bi se sprečilo njihovo kidanje pri uklanjanju iz usta. To je posebno izraženo kod uskog gingivalnog sulkusa, parodontalnih džepova i podminiranosti susednih zuba. Otisni materijali pokazuju viskoelastična svojstva. Neophodna je visoka granica proporcionalnosti kako bi bilo omogućeno nesmetano skidanje sa otisnutih struktura i elastični povratak u zabeleženo stanje. Plastična deformacija nastaje pod naponom većim od granice proporcionalnosti, što predstavlja poseban problem jer se teško zapaža u kliničkim uslovima. [5]. Elastičnost materijala zavisi od sastava materijala, temperature i veličine napona. Hidrokoloidni gel ima elastičnost koja je dovoljna da se otisak skine u jednom komadu i sa podminiranih mesta. Alginat je visoko elastičan materijal koji bez trajnih posledica podnosi umerene i kratkotrajne deformacije. Pri skidanju sa jako podminiranih mesta može doći do odvajanja od kašike ili kidanja. Za elastični povratak potrebno je oko 15-20 minuta. Agar je materijal manje otpornosti, pa samo umerene deformacije ne ostavljaju trajne posledice. Pri uklanjanju sa jako podminiranih mesta može se očekivati kidanje materijala.

Elastomeri podnose veće deformacije pri skidanju bez trajnih posledica. Polisulfidi su viskoelastični materijali, oporavljaju se sporo i nekompletno posle deformacije. Vreme potrebno za povratak zavisi od stepena podminiranosti otisnih površina i dužine trajanja deformacije. Imaju visoku otpornost na kidanje u poređenju sa ostalim grupama materijala.

Polietri imaju izvrsna elastična svojstva i pokazuju gotovo potpun povratak nakon nastale deformacije. Kondenzacioni silikoni imaju izraženu elastičnost i pri umerenim deformacijama povratak je skoro potpun. Pri većim deformacijama se trajno deformišu, ali dva puta manje od polisulfida. Otpornost na kidanje im je manja nego kod polisulfida, ali veća od hidrokoloida. Adicioni silikoni pokazuju gotovo idealnu elastičnost i otporni su na deformacije u visokom procentu. Otpornost na kidanje je slična

sa kondenzacionim silikonima. Prilikom izlaganja većim naponima, češće dolazi do kidanja nego do trajne deformacije. To predstavlja značajnu osobinu, jer pokidani materijal se lakše zapaža od deformisanog, pa se pre slanja u laboratoriju otisak može ponoviti [2].

2.4 Kompatibilnost sa gipsevima tipa IV

Kompatibilnost otisnih materijala sa gipsevima za izradu radnih modela, predstavlja preduslov za svaki otisni materijal, pošto svaki neuspeh u reprodukciji detalja otiskivanih struktura, dovodi do povećanja greške kod buduće zubne nadoknade. Merenjem kontaktnog ugla elastičnih otisnih materijala i zamešanog gipsa dobijeni su sledeći rezultati: kondenzacioni silikoni 95°, polisulfidi 70°, polietri 50°, hidrokoloidi 40° i pronađena je direktna veza između veličine kontaktnog ugla i broja blazni u gipsanom modelu [5].

Kod hidrofobnih adicijonih silikona teško je napraviti gipsani model bez blazni. Bez obzira što precizno registruju fine detalje u ustima, zbog malog ugla kvašenja često se javlja neuspeh u izlivanju radnog modela. Dodavanje nejonskih surfaktanata u silikone i polisulfide povećano je njihovo kvašenje sa zamešanim gipsom i smanjenje broja blazni [5]. Proučavanjem defekata na površini gipsanih modela, utvrđeno je da oslobođeni vodonik, nastao kao nusproizvod polimerizacije, takođe doprinosi smanjenoj preciznosti radnih modela. Eliminacija potencijalno štetnog vodonika može se vršiti dodavanjem čestica platine u sam materijal, ili odlaganjem izlivanja radnog modela za jedan sat, dok ne prođe oslobađanje vodonika.

2. ZAKLJUČAK

Izbor otisnog materijala zavisi od samog lekara, njegovog iskustva i afiniteta, ali treba se pridržavati smernica dobre kliničke prakse. Svaki materijal ima svoju indikaciju i neophodno je pridržavati se uputstva proizvođača kako bi se postigli njihove definisane osobine. Značaj uzimanja otiska je od neprocenjive važnosti za tačnost izrade zubne nadoknade, pri čemu poznavanje osobina materijala može značajno doprineti uspehu protetičke terapije.

3. LITERATURA

- [1]. Hamalian, T.A, Nasr, E., Chidia, J.J.
- [2]. Impression materials in fixed prosthodontics: influence of choice on clinical procedure. Journal of Prosthodontics 2011;20:153–160.
- [3]. Stamenković D. Stomatološki materijali, Velarta 2003, Beograd.
- [4]. Mandikos M.N. Polyvinyl siloxane impression materials: An update on clinical use. Australian dental journal 1998;43(6):428-434.
- [5]. Chandran, D.T., Jagger, D.C., Jagger, R.G., Barbour, M.E. Two- and three-dimensional accuracy of dental impression materials: Effects of storage time and moisture contamination. Biomedical materials and engineering 2010;20(5):243–249.
- [6]. Elie E. Daou. The elastomers for complete denture impression: A review of the literature. The Saudi Dental Journal 2010;22:153–160.

Autori: dr Marija Pavlović, dr Ljubomir Kalem, Prof. dr Tatjana Puškar. Univerzitet u Novom Sadu, Medicinski fakultet, Katedra za stomatologiju, Hajduk Veljkova 12, 21000 Novi Sad, Srbija, Tel.: +381 21 661-33-62, Fax: +381 21 526-120.

E-mail: mara.duk.82@gmail.com
ordinacija_kalem@hotmail.com
tatjanapuskar@yahoo.com

Asist. dr Branka Trifković, Klinika za stomatološku protetiku, Stomatološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, Republika Srbija.

E-mail: trifkovicbranka1011@gmail.com

4. ZAHVALNICA

Rezultati prezentovani u ovom radu su realizovani u okviru projekta „Istraživanje i razvoj metoda modeliranja i postupaka izrade dentalnih nadoknada primenom savremenih tehnologija i računarnom podržanih sistema“, TR – 35020, finansiranog od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Trifković, B., Potran, M., Todorović, A.R., Todorović, A.B., Lapčević, A., Jevremović, D.

AKTUELNI TRENDOVI U RAZVOJU STOMATOLOŠKIH SOFTVERA ZA CAD DIZAJN

Rezime: Tehnološki procesi izrade zubnih nadoknada su poslednjih godina znatno unapređeni. Zubne nadoknade se sve češće proizvode modernim tehnologijama zbog njihovog složenog geometrijskog oblika, visokih zahteva u vezi sa mehaničkim osobinama i zbog potrebe za preciznošću kao i pouzdanošću. Primena kompjuterskih tehnologija u stomatološkoj struci pojednostavljuje proces izrade zubnih nadoknada i doprinosi unapređenju njihovog kvaliteta.

Ključne reči: CAD/CAM, digitalizacija, fiksne zubne nadoknade

1. UVOD

Razvoj kompjuterskih tehnologija, njihovih osnovnih komponenti hardvera i softvera, u prvoj polovini XXI veka dostigao je neverovatne razmere. Tehnološka unapređenja nisu zaobišla ni stomatološke CAD/CAM sisteme, a promene i inovacije se odvijaju u okviru svake od tri oblasti: 3D digitalizacija, CAD dizajn i CAM segment. U okviru 3D digitalizacije značajno je unapređena tehnologija optičke 3D digitalizacije, tako da sa pravom možemo konstatovati da mehanički skeneri u stomatologiji postaju deo istorije. Primenom uređaja za optičku digitalizaciju moguće je izvršiti skeniranje objekata različitih dimenzija, oblika, teksture i stepena tvrdoće. Izlazni format digitalizovanih podataka sve češće postaje otvoren i dostupan većem broju korisnika. Značajne inovacije u CAM segmentu uočavaju se u oblasti implementacije novih uređaja, tehnologija izrade, softverskih aplikacija za CAM segment, kao i primeni velikog broja različitih vrsta gradivnih materijala.

2. CAD DIZAJN U STOMATOLOŠKIM SOFTVERIMA

Primena CAD/CAM tehnologija je omogućila da manuelno dizajniranje zubnih nadoknada zameni kompjuter. Zadatak kompjuterom vođenog dizajniranja je kreiranje virtuelnog modela nadoknade, a krajnji rezultat ovog postupka su naredbe za CAM segment. Rezultat 3D digitalizacije je *“oblak tačaka”* (*point of cloud* – eng), koji se nakon obrade u nekom od odgovarajućih softverskih programskih paketa transformiše u površinski model [1]. “Oblak” je skup tačaka (definisane su preko Dekartovih x, y, z koordinata) koje imaju određenu rezoluciju. Rekonstrukcija površina predstavlja fazu u kojoj

se na osnovu rezultata 3D digitalizacije vrši kreiranje površinskog (*surface* – eng) odnosno solid modela digitalizovanog objekta u matematičkom obliku (Slika 1) [2].

Savremene softverske platforme stomatoloških CAD/CAM sistema bazirane su uglavnom na PC tehnologiji i Windows okruženju. Pojedini proizvođači (3Shape, Denmark) softverske platforme postavljaju u iOS okruženje, čime su iste postale intuitivnije i jednostavnije za upotrebu.

3. DIZAJNIRANJE MODELA I NADOKNADA U STOMATOLOŠKIM SOFTVERIMA

Najvažniji korak u postupku softverskog dizajniranja nadoknada predstavlja iscertavanje demarkacije u okviru koga je moguće primeniti dve opcije: automatsko (računar samostalno prepoznaje demarkaciju) i manuelno iscertavanje (demarkaciju određuje operater). Na stepen tačnosti demarkacije, osim kvaliteta preparacije, utiču rezolucija uređaja za 3D digitalizaciju, rezolucija ekrana računara, kao i kvalitet softvera. Softveri savremenih CAD/CAM sistema automatski prepoznaju demarkaciju, ali pružaju i mogućnost njenog manuelnog prekontuiranja. Međutim treba naglasiti, da je pre iscertavanja demarkacije potrebno odabrati vrstu nadoknada koje se izrađuju, pravilno pozicionirati virtuelne modele gornje i donje vilice u odnosu na medijalnu, okluzalnu i frontalnu ravan i definisati pravac unošenja budućih nadoknada. Softveri savremenih CAD/CAM sistema poseduju niz različitih opcija koje je potrebno definisati pre početka postupka dizajniranja nadoknada, navešćemo samo neke od njih: debljina prostora za cementni film, debljina nadoknade i njene morfološke karakteristike i sl.

Na početku praktične primene CAD/CAM sistema najveći problem predstavljalo je dizajniranje spoljašnje konture nadoknada. Primenom novih softvera, koji sadrže mnoštvo različitih alata za dizajniranje problem je uspešno prevaziđen. Savremeni sistemi su pojednostavljeni i pružaju brojne mogućnosti u izradi jezgra nadoknada, ali i nadoknada u celini. Kada je reč o softverima poslednje generacije treba naglasiti da se njihove programske komponente mogu posmatrati kroz dvostruku prizmu: kao softveri za dizajniranje i softveri za izradu nadoknada. Smatra se da se najveći procenat inovacija u oblasti softvera odvija upravo u okviru ova dva segmenta. Razvoj kompjuterskih tehnologija implementirao je nove softverske funkcije i alate. Svaki CAD/CAM sistem ima poseban softverski interfejs, koji je istovremeno i lični pečat po kome su oni prepoznatljivi.

Uprkos brojnim razlikama u interfejsu, softveri poslednje generacije imaju sledeće zajedničke karakteristike:

- Baza podataka u koju se unose informacije o pacijentu, terapeutu i vrsti izrađenih nadoknada;
- Softversko okruženje u okviru koga su prikazani modeli zubnog niza gornje i donje vilice i vrste nadoknada koje je moguće izraditi;
- Alati za pozicioniranje virtuelnog modela u odnosu na prostorne ravni (Slika 2);
- Alati za trimovanje modela;
- Opcije za automatsko ili manuelno iscrtavanje demarkacije, tela mosta, spojnice i sl (Slika 3);
- Koralacione programe za dizajniranje virtuelnog modela nadoknade;
- Alate za redizajniranje i promenu oblika i pozicije virtuelnog modela nadoknade;
- Alate za definisanje debljine prostora za cementni film, marginalne diskrepance, promera tela nadoknade, debljine izlaznog profila nadoknade i intenziteta proksimalnih i okluzalnih kontakata i sl;
- Alati koje služe za pozicioniranje virtuelnog modela nadoknada u blokovima odabranog materijala, u skladu sa tim se vrši izbor veličine bloka
- Posebne delove savremenih softvera čine specijalne funkcije: smajl dizajn, virtuelni artikulatork i digitalizacija zagrižajnog registrata.

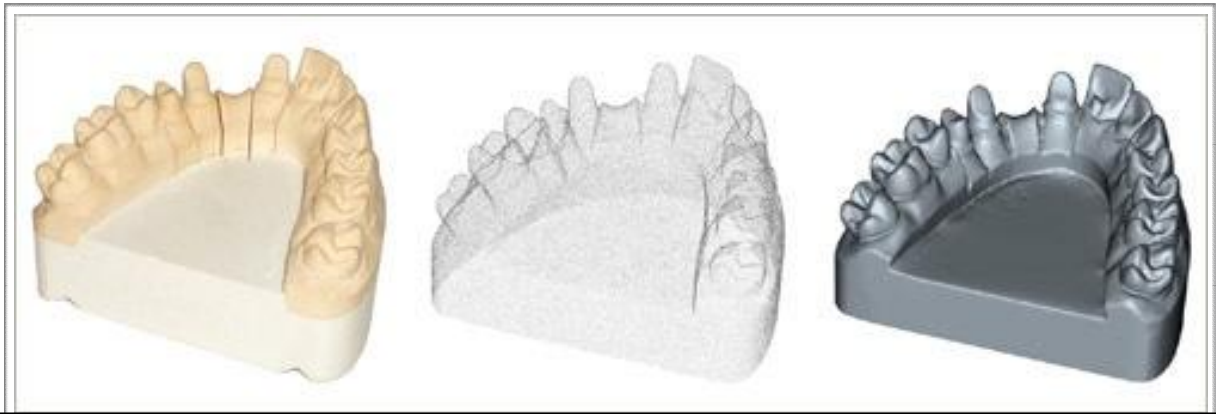
Tehničke mogućnosti softvera su različite i zavise od njihove namene. Softveri ordinacijskih CAD/CAM sistema su jednostavniji, njihove funkcije su usklađene sa spektrom mogućih indikacija. Laboratorijski softveri su moćnije alatke koje poseduju niz različitih opcija.

Jedan od važnih segmenata softvera predstavlja deo koji je zadužen za dizajniranje morfoloških karakteristika virtuelnih nadoknada. Proizvođači su u tom pogledu različito definisali softverske platforme i baze podataka. Neke od njih nastale su na osnovu skeniranja zuba za izradu mobilnih nadoknada. Posebnu pažnju privlači “*biogeneric design*” koncept koji je samo jedna u nizu specifičnosti po kojoj je prepoznatljiv softver Cerec (Sirona, Bensheim, Germany) sistema [3,4]. “*Biogeneric occlusal surfaces*” predstavlja model matematičkog opisa prirodne okluzalne morfologije koji je nastao na osnovu analize nekoliko hiljada intaktnih površina zuba, primenom posebnih algoritamskih principa. Model matematički opisuje svaki zub pomoću specijalnih numeričkih parametara. Digitalizacijom nekoliko stotina intaktnih zuba različite morfologije, konstituisana je baza podataka. Originalna morfologija zuba se rekonstruiše na osnovu informacija dobijenih sa agonista ili antagonista. Koncept funkcioniše slično ljudskom mozgu koji je sposoban da dešifruje rečenicu na osnovu nekoliko fragmentiranih slova. Na isti način Cerec® Biogeneric identifikuje postojeće strukture i automatski rekonstruiše okluzalne površine na osnovu individualne morfologije zuba. Cerec® Biogeneric predstavlja prvi metod koji metrički analizira stanje pojedinačne denticije, što je poslužilo kao osnova za kreiranje adekvatne okluzalne morfologije (Slika 4). Softveri poslednje generacije poseduju tri moda “Biogeneric” koncepta:

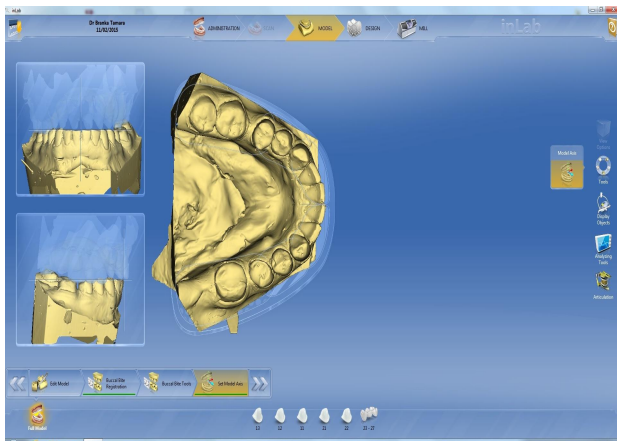
- Biogeneric individual;
- Biogeneric copy i
- Biogeneric reference.

Jedan od aktuelnih trendova u razvoju stomatoloških CAD/CAM tehnologija je dostupnost elektronskih podataka koji sadrže informacije o virtuelnom modelu i nadoknadama. Ovi sistemi su poznati kao “otvoreni”. Dostupnost elektronskih podataka omogućilo je umrežavanje CAD/CAM sistema različitih proizvođača. To znači da je moguće da se digitalizacija realizuje u okviru jednog, a da se za izradu nadoknade upotrebi sasvim drugi sistem.

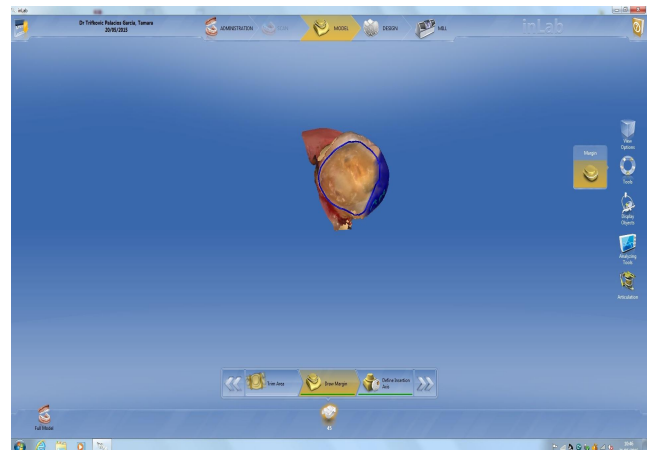
Elektronski podaci o digitalizovanom objektu mogu da budu prikazani u formi različitih zapisa, neki od najpoznatijih su STL, ASCII i DICOM3. STL (*Standard Tessellation Language* – eng) format u obliku trouglova prikazuje površine trodimenzionalnih objekata. (5)



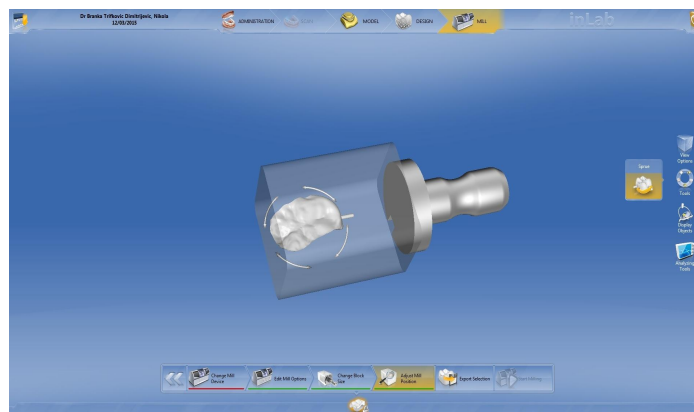
Slika 1. Prikaz: radnog modela od gipsa, model u formi “oblaka” tačaka i površinskog (solid) modela



Slika 2. Pozicioniranje modela u odnosu na prostorne ravni



Slika 3. Alati za iscrtavanje demarkacije



Slika 4. Alati za pozicioniranje nadoknada u blokove materijala



Slika 4. 1) Intaktan antagonist (osnovni izvor informacija), 2) Dizajn nadoknade (kreiran na osnovu informacija koje su prikupljene nakon digitalizacije antagonista), 3) Poređenje sa prirodnom morfologijom

4. ZAKLJUČAK

Nesumljivo je da se softveri stomatoloških CAD/CAM sistema razvijaju veoma brzo. Čini se da njihovi proizvođači žele da sa što većim brojem alata i opcija zamene brojne kliničke i laboratorijske faze izrade nadoknada. Dodatak virtuelnog artikulatora i "smile design" opcije predstavljaju značajna unapređenja koja omogućavaju preciznije i efikasnije modelovanje nadoknada. Pojava softverskih platformi u iOS okruženju obradovala je brojne ljubitelje ove softverske platforme, i istovremeno omogućila da programi postanu jednostavniji i dostupni za upotrebu većem broju korisnika. U kom pravcu će da se odvija razvoj softvera teško je tačno predvideti, ali pretpostavka je da će dodatak softvera i uređaja za određivanje boje zuba, kao i softvera za modelovanje mobilnih zubnih nadoknada značajno unaprediti njihov kvalitet.

5. LITERATURA

- [1] Mladenović, N., Spasić, V., Jovanović, M. Numerički metodi za mikroračunare, NIRO Tehnička knjiga i zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd 1986 str. 25-26 i 44-46.
- [2] Milićević, V., Stamenković, D., Todorović, A. Određivanje boje zuba analizom digitalnog video zapisa. Stom.Glas.S.,1993;40:(Sup 1.) 138.
- [3] Mehl, A., Blanz, V. New procedure for fully automatic occlusal surface reconstruction by means of a biogeneric tooth model. Int.J. Comput. Dent 2011;8(1):13-25.
- [4] Dunn, M. Biogeneric and user – friendly: the Cerec 3D software upgrade V3.00. Int.J. Comput.Dent 2007;10(1):109-17.

Autori: Asist. dr Branka Trifković , Prof. dr Aleksandar B. Todorović, Asist. dr Ana Todorović, Klinika za stomatološku protetiku, Stomatološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, Republika Srbija.

E-mail:

trifkovicbranka1011@gmail.com,
adent.bg@gmail.com

dr Michal Potran, Medicinski fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Hajduk Veljkova 3, 21000 Novi Sad, Republika Srbija.

E-mail:

michalpotran@gmail.com

Prof. dr Danimir Jevremović, Asist. dr Ana Lapčević, Univerzitet privredna akademija,

Stomatološki fakultet u Pančevu, Žarka Zrenjanina 179, 13000 Pančevo, Republika Srbija.
E-mail: dr. danimir@sbb.rs
dranalapcevic@gmail.com

6. ZAHVALNICA

Rezultati prezentovani u ovom radu su realizovani u okviru projekta „Istraživanje i razvoj metoda modeliranja i postupaka izrade dentalnih nadoknada primenom savremenih tehnologija i računarom podržanih sistema“, TR – 35020, finansiranog od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

**PRIMENA CAD/CAM TEHNOLOGIJE U PROJEKTOVANJU I IZRADI MOSTOVA
PUNE ANATOMSKE FORME NA BAZI CIRKONIJUM-DIOKSIDA**

Lapčević, A., Jevremović, D., Trifković, B., Santoši, Ž., Vukelić, Đ.

Rezime: Stomatologija, posebno stomatološka protetika svakodnevno napreduje uvođenjem novih materijala i tehnologija. Kako se javlja sve veća potreba za estetski prihvatljivim i bezmetalnim materijalima, došlo je do razvoja i unapređenja keramičkih materijala i računarima podržanih sistema (CA). Pacijent se javio radi nadoknade nedostajućeg levog bočnog sekutića. Pošto su susedni zubi zbrušeni i uzet otisak, izliven je model koji je skeniran pomoću 3Shape D 800 laboratorijskog skenera. Zubna nadoknada je dizajnirana pomoću 3Shape DentalSystem Premium softvera korišćenjem raspoloživih alata. Nakon završenog dizajna virtuelni podaci su poslani u program odgovoran za CAM Zenotec® mini CAD/CAM uređaja. Kao rezultat, dobijena je nadoknada pune morfologije bez potrebe za dorađivanjem.

Ključne reči: CAD/CAM, cirkonijum-oksidi, zubne nadoknade.

1. UVOD

Uvođenjem novih materijala i tehnologija, stomatologija, posebno stomatološka protetika svakodnevno napreduje. S porastom popularnosti intraosealnih implantata, došlo je do ekspanzije fiksnih zubnih nadoknada [1]. Kako se javlja sve veća potreba za estetski prihvatljivim bezmetalnim materijalima, došlo je do razvoja i unapređenja keramičkih materijala i računarima podržanih sistema (CA). U CA sisteme koji imaju najveću primenu u stomatologiji spadaju sistemi 3D digitalizacije, računarom podržano dizajniranje (CAD) sa reverznim inženjeringom (RE) i računarom podržana izrada (CAM) [2].

CAD/CAM sistemi omogućavaju efikasnu izradu visoko-kvalitetnih zubnih nadoknada sa velikom preciznošću i tačnošću u jednoj poseti, [3]. S druge strane, glavni nedostatak ovakvih nadoknada je estetika koja nije bila na zavidnom nivou. Blokovi, od kojih su se postupkom frezovanja izrađivale nadoknade, bili su su uniformni i nisu mogli u potpunosti da imitiraju zubne strukture koje se razlikuju u boji i translucenciji, bez dorade od strane zubnog tehničara. Na taj način se vreme izrade zubne nadoknade produžava, a i veći su troškovi njihove izrade. Iz tog razloga se dugo godina CAD/CAM sistem koristio kao metod za izradu osnove bezmetalne nadoknade, a nakon toga je zubni tehničar nanosio fasetirajuću keramiku.

Cirkonijum-oksidna keramika poseduje odličnu biokompatibilnost i mehaničke karakteristike u

odnosu na konvencionalnu keramiku [4]. Međutim, kao glavni nedostatak ovog keramičkog sistema se navodi odlamanje fasetiranog sloja keramike [5-8]. Rešenje za ovaj problem je izrada jednodelnih restauracija pomoću CAD/CAM sistema. Od cirkonijum-oksidne keramike je moguća izrada jednodelnih nadoknada velikog raspona pune morfologije, koja nema potrebu za fasetiranjem.

2. PRIKAZ SLUČAJA O PRIMENI CAD/CAM-a U PROJEKTOVANJU I IZRADI MOSTA PUNE ANATOMSKE FORME NA BAZI CIRKONIJUM-DIOKSIDA

Pacijent se javio radi nadoknade nedostajućeg levog bočnog sekutića. Nakon pregleda i razgovora predložio je, da mu se izgubljeni zub nadoknadi mostom od cirkonijum-oksidne keramike. U sledećoj poseti zbrušeni su susedni zubi, levi središnji sekutić i očnjak i uzeti su otisci.

2.1. 3D digitalizacija

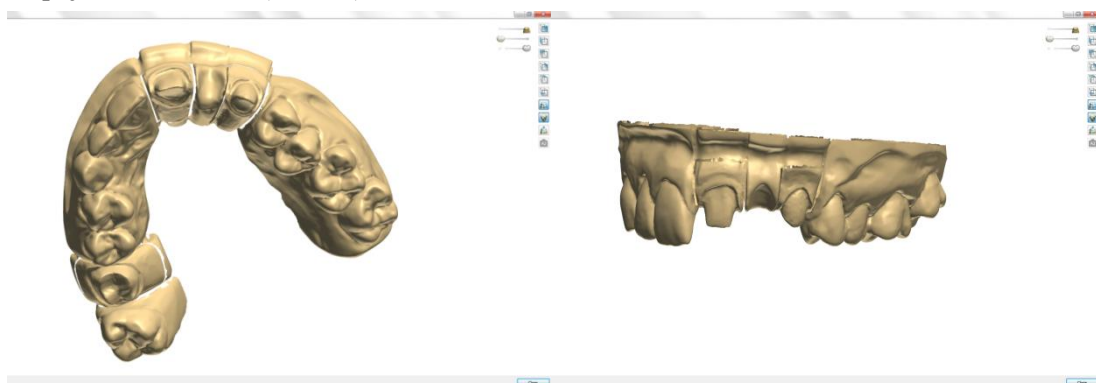
Nakon uzimanja otisaka, izliveni su modeli od specijalnog gipsa za skeniranje (Fujirock EP OptiXscan, GC, Japan) (slika x). Model je skeniran pomoću 3Shape D 800 laboratorijskog skenera (sl. 1) i 3Shape DentalSystem Premium softvera. Ovaj skener sadrži dve kamere rezolucije

5,0 Mpix, tehnologiju svetla crveni laser i preciznost od 20 mikrona.



Slika 1. 3Shape D 800 laboratorijski skener

Nakon što je 3D digitalizacija završena, virtualni model se pojavio na ekranu (slika 2.)

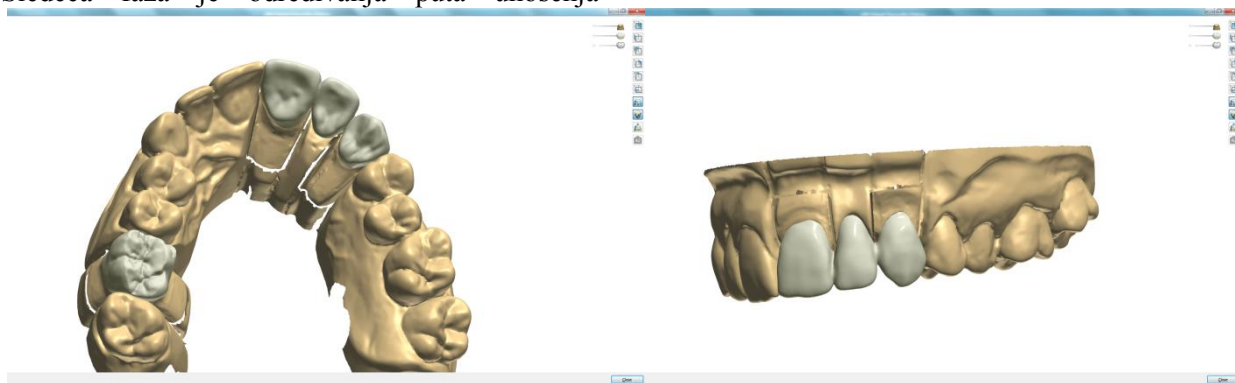


Sl. 2. Rezultat 3D digitalizacije

2.2. CAD dizajn nadoknade

Početak dizajniranja nadoknade podrazumeva određivanje linije demarkacije. Računar automatski daje predlog demarkacione linije, ali korisnički interfejs omogućava manuelne korekcije. Sledeća faza je određivanja puta unošenja

nadoknade. Potom se iz banke podataka bira najpovoljnija morfološka datoteka. Datoteke se razlikuju po visinama i broju kvržica, fisurnom kompleksu, kvržičko-grebenskoj morfologiji. Dalje korekcije omogućavaju grupno pomeranje nadoknade, korekciju pojedinačnih osa zuba ili korekciju pojedinih zona alatima za dodavanje ili oduzimanje materijala (slika 3.).



Slika 3. Gotov dizajn nadoknada

2.3. CAM nadoknade

Virtuelni projekat je automatski konvertovan u STL i elektronski poslat u program odgovoran za CAM proces. U ovom slučaju SLT podaci su importovani u program frezovanja Zenotec® mini CAD/CAM uređaj (Wieland Dental) (slika 4.). Nadoknade su zatim isfrezovane od obojenih Zenostar cirkonija diskova (boja T1). Obično, bojenje zahteva poseban radni korak koji se sastoji iz aplikovanja tečnosti za bojenje bazirane na metal-oksidu ili potapanjem ili tehnikom pomoću četkice pre sinterovanja. Kod obojenih diskova, boje su dodate u cirkonijum prah i homogenizovani tokom procesa industrijske proizvodnje.



Slika 4. Zenotec® mini CAD/CAM uređaj

Kao rezultat dobijena je nadoknada visoko homogene boje (slika 5 i 6.). Potreba za ručnim fasetiranjem može postojati kod izuzetno zahtevnih radova, dok se jednostavnije estetske forme mogu jednostavno površinski bojiti. Dodatnu prednost predstavlja ušteda vremena prilikom izrade nadoknada. Doslednost boje je još jedna prednost koju ne treba zanemariti. Kontaktne tačke u cirkonijum-dioksidnoj keramici treba da budu visoko polirane, čime se sprečava abrazija antagonista.



Slika 5 i 6. Gotova nadoknada

3. ZAKLJUČAK

Prikazana cirkonijum-oksidna keramika poseduje izuzetne mehaničke karakteristike, estetske performanse, odličnu biokompatibilnost, kao i otpornost na habanje u odnosu na konvencionalnu keramiku. Za razliku od staklo-keramike, koja je manje stabilna u ustima i ograničena za pojedinačne restauracije ili mostove manjeg raspona [4], od cirkonijum-oksidne keramike se mogu izrađivati mostovi velikog raspona pune morfologije. Zahvaljujući napretku materijala i pojavi diskova prethodno obojenih i homogenizovanih, dorade od strane zubnog tehničara mogu se minimizirati, te se gotov rad može dobiti brzo, jednostavno i pouzdano upotrebom CAD/CAM tehnologije.

4. LITERATURA

- [1] Miyazaki, T., Nakamura, T., Matsumura, H., Ban, S., Kobayashi, T. Current status of zirconia restoration, *Journal of Prosthodontic Research* 57, pp 236–261, 2013.
- [2] Williams, R.J., Eggbeer, D., Lapcevic, A., Trifkovic, B., Puskar, T., Budak, I., Jevremovic, D. RE-CAD-CAM approach in design and manufacturing of dental ceramic crowns in combination with manual individualization. 11th International Scientific Conference "MMA 2012-advanced production

technologies", September 20-21., 2012. Novi Sad, Serbia

- [3] Mörmann, W.H. The evolution of the CEREC system, The Journal of the American Dental Association, 137, p.p.7S-13S, 2006.
- [4] Hmaidouch, R., Muller, W.D., Lauer, H.C., Weigl, P. Surface roughness of zirconia for full-contour crowns after clinically simulated grinding and polishing, International Journal of Oral Science 6, pp 241–246, 2014.
- [5] Raigrodski, A.J., Yu, A., Chiche, G.J. Clinical efficacy of veneered zirconium dioxide based posterior partial fixed dental prostheses: five-year results, J Prosthet Dent 108(4), pp214–222, 2012.
- [6] Kokubo, Y., Tsumita, M., Sakurai, S. et al: Five-year clinical evaluation of In-Ceram crowns fabricated using GN-I (CAD/CAM) system. J Oral Rehabil, 38(8), pp 601–607, 2011.
- [7] Ortorp, A., Kihl, M.L., Carlsson, G.E. A 3-year retrospective and clinical follow-up study of zirconia single crowns performed in a private practice, J Dent 37(9), pp 731–736, 2009.
- [8] Etman, M.K., Woolford, M.J. Three-year clinical evaluation of two ceramic crown systems: a preliminary study, J Prosthet Dent 103(2), pp 80–90, 2010.

Autori: Assist. dr Ana Lapčević, Prof. dr Danimir Jevremović, Univerzitet Privredna Akademija, Stomatološki fakultet Pančevo, Klinika za stomatološku protetiku, Žarka Zrenjanina 179, 26000 Pančevo, Republika Srbija, tel. 013/ 2351292.

Email: dranalapcevic@gmail.com,

dr.danimir@sbb.rs

Assist. dr Branka Trifković, Univerzitet u Beogradu, Stomatološki fakultet, Klinika za stomatološku protetiku, Rankeova 4, 11000 Beograd, Republika Srbija, tel. 011/2433433

E-mail: trifkovicbranka1011@gmail.com

Prof. dr Đorđe Vukelić, Asist. dr Željko Santoši, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Institut za proizvodno mašinstvo, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Republika Srbija, Tel: +381 21 485 2306, Fax: +381 21 454-495.

E-mail: vukelic@uns.ac.rs

5. ZAHVALNICA

Rezultati prezentovani u ovom radu su realizovani u okviru projekta „Istraživanje i razvoj metoda modeliranja i postupaka izrade dentalnih nadoknada primenom savremenih tehnologija i računarom podržanih sistema“, TR – 35020, finansiranog od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

**Kalem, Lj., Kalem, D., Ilić, M., Mirković, S., Tadić, A., Puškar, T.
IZRADA ZUBNE PROTEZE NA MINI IMPLANTATIMA**

Rezime: Totalna proteza predstavlja zubnu nadoknadu koja nadoknađuje izgubljene zube kao i tkiva koja su nestala usled resorpcije kosti. Nosiocima totalnih proteza, tj. bezubim pacijentima, pored toga što su narušene funkcije žvakanja, gutanja i govora, velike smetnje predstavljaju estetski nedostaci. U slučajevima sa neodgovarajućom morfologijom potpornih tkiva, otežano je postići adekvatnu rehabilitaciju. Prevazilaženje neadkvatne morfologije potpornih tkiva u cilju retencije i stabilizacije totalne zubne proteze, postiže se upotrebom titanijumskih endoosealnih mini implantata.

Ključne reči: bezubost, mini implantati, totalna proteza

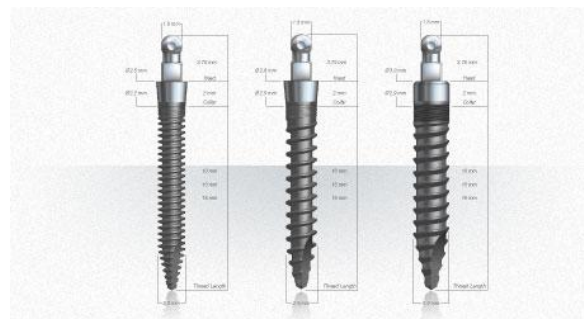
1. UVOD

Terapija bezubosti predstavlja čestu i zahtevnu proceduru u stomatološkoj praksi. Totalna proteza predstavlja kompleksnu zubnu nadoknadu koja nadoknađuje izgubljene zube kao i ostala potporna tkiva nestala usled resorpcije kosti. Zubna proteza treba što približnije da rekonstruiše narušen sklop intraoralnih struktura u skladu sa prethodnim stanjem u ustima. Nosiocima totalnih zubnih proteza, tj. bezubim pacijentima, pored toga što su narušene funkcije žvakanja, gutanja i govora, dodatna smetnja predstavlja narušen izgled pacijenta. Naime, pacijenti usled snižene donje trećine lica, bez obzira na godine, dobijaju starački izgled, zbog čega nastaju psihički problemi u smislu kompleksa starenja i inferiornosti, što se može odraziti na društveni život i radnu sposobnost pacijenta. Za razliku od nekadašnjih totalnih zubnih proteza pravljenih od gume ili drveta, današnje proteze omogućuju potpunu anatomsko-funkcionalnu rehabilitaciju, kao i poboljšan estetski učinak. Terapija bezubosti zahteva povoljne anatomske uslove u ustima, koji mogu biti narušeni. Česti su slučajevi, naročito kod osoba starije životne dobi, da posle vađenja zuba nastanu resorptivne promene, pri čemu dolazi do smanjenja visine i širine alveolarnog grebena. U takvim slučajevima pacijent nema mogućnost nošenja adekvatne zubne nadoknade. Rekonstrukcija potpornih struktura može se u određenim slučajevima vršiti hirurškom intervencijom (vestibuloplastika, augmentacija grebena, i dr.). Međutim, invazivnost takvih intervencija ih ograničava na relativno zdrave pacijente. Nosioci totalnih zubnih proteza su većinom starije osobe sa mogućim hroničnim oboljenjima ili na farmako terapiji, kada se zbog mogućih komplikacija ovakve intervencije

izbegavaju. Prevazilaženje invazivnosti preprotetske hirurgije, kao i poboljšanje retencije i stabilizacije zubne proteze može se postići ugradnjom endoosealnih mini implantata [1].

2. MINI IMPLANTATI

Mini implantati su zubne nadoknade koje se ugrađuju u alveolarnu kost sa ciljem povećanja retencije i stabilizacije kod zubnih proteza, ili kao nosioci pojedinačnih zubnih nadoknada, u odgovarajućim slučajevima (slika 1.). Izgled mini implantata sličan je konvencionalnim, ali su manjih dimenzija i zahtevaju posebnu tehniku ugradnje. Napravljeni su od titanijumske legure i spadaju u samonarezujuće i jednofazne sisteme. Kod osoba starijeg životnog doba često nemamo dovoljnu količinu raspoložive kosti, te ovi implantati predstavljaju povoljno rešenje kao potpora zubnoj protezi, izbegavajući direktno opterećenje i prenos pritiska žvakanja [2]. Mini implantati mogu biti različite dužine (10, 13 i 15mm), sa poprečnim presekom (1,8mm, 2,1mm, 2,4mm).



Slika 1. Izgled mini implantata

3. INDIKACIJE ZA UGRADNJU MINI IMPLANTATA

Indikacije za ugradnju mini implantata obuhvataju:

1. Totalna bezubost gornje i/ili donje vilice.
2. Bezube osobe starije životne dobi (nemogućnost upotrebe konvencionalnih implantata).
3. Osobe koje ne pristaju na augmentacione procedure.
4. Osobe koje ne žele da čekaju nekoliko meseci nakon ugradnje konvencionalnih implantata.
5. Pacijenti koji sebi ne mogu da priušte konvencionalne implantate.

4. PROTOKOL RADA SA DENTALNIM MINI IMPLANTATIMA

4.1. Hirurška faza

Priprema za ugradnju mini implantata obuhvata anamnezu, klinički pregled i analizu RTG snimka. U toku kliničkog pregleda radi se detaljna inspekcija mekokoštanih struktura i rezidualnog alveolarnog grebena, određuje se visina i širina kosti, kako bi se odabrao adekvatan implantatni sistem za svakog pacijenta. Na RTG snimku se određuje visina alveolarnog grebena, kao i rastojanje između levog i desnog foramena mentale. Nakon dobijanja pismene saglasnosti od pacijenta i detaljnog upoznavanja sa postupkom procedure, manama i mogućim komplikacijama, pristupa se jednoj od hirurških tehnika: transmukozne (*flapless*) ili incizione. Prednost transmukozne tehnike ogleda se u minimalno invazivnoj tehnici (bez reza) i neznatnim tegobama koje se javljaju nakon operativnog zahvata. Smanjeno je krvarenje i vreme zarastanja tkiva, što je pogodno jer se tada implant može odmah opteretiti (imedijatno opterećenje), bez obzira na vreme potrebno za oseointegraciju. To podrazumeva direktno pravljenje ležišta implantata u kosti kroz gingivu. U slučaju postojanja koštanih egzostoza, neravnomerne resorpcije alveolarnog grebena ili oštre morfologije grebena, potrebo je raditi incizionu, tj. otvorenu hiruršku tehiku sa odizanjem mukoperiostalnog režnja. Ova tehnika je komfornija za hirurga jer obezbeđuje bolju preglednost operativnog polja, ali je manje

komforna za pacijenta zbog većih postoperativnih tegoba [2].

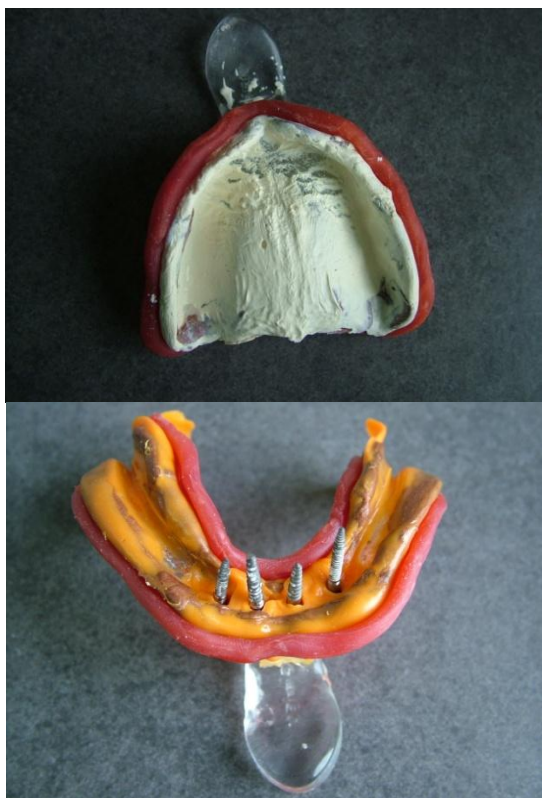
4.2. Protetska faza

Nakon ugradnje implanata i postizanja njihove stabilnosti, sledi uzimanje otiska ireverzibilnim hidrokoloidom i izrade individualne kašike (slika 2.). Individualna kašika se perforira na mestima gde dolazi u kontakt sa implantatima. Zatim sledi oblikovanje rubova individualne kašike pomoću termoplastične mase i uzimanje funkcionalnog otiska elastomerima (slika 3).

U funkcionalni otisak postavljaju se analogi implanata i šalje se u zubnu tehniku da bi se model izlio od tvrdog gipsa (slika 3.). Na definitivnom radnom modelu izrađuje se ploča od šelaka sa zagrižajnim bedemom. Laboratorijsku fazu izrade nastavlja klinička faza određivanja međuviličnih odnosa (slika 4) i odabira boje zuba. Dobijene vrednosti se prenose u artikator.



Slika 2. Izrada individualne kašike



Slika 3. Funkcionalni otisak

Nakon postave zuba u zagrižajni bedem, vrši se proba postave u ustima (slika 5). Zatim u tehnici sledi kivetiranje i polimerizacija [3,4]. Završna faza predstavlja stavljanje silikonskih blokera na vrat implantata koji služe da spreče prodiranje samovezujućeg akrilata ispod glave implanata. Sledi stavljanje metalnih kapica na implantate za koje su napravljena ležišta na bazi proteze. Krila proteze se izoluju vazelinom. Samovezujući akrilat uliva se u ležište proteze i proteza se postavlja preko metalnih kapica. Vilicu pacijenta dovodimo u interkuspidalni položaj i u tom položaju ostaje do potpunog vezivanja akrilata. Nakon vezivanja akrilata proteza se skida sa implanata pri čemu kapice ostaju u telu proteze. Nakon toga sledi uklanjanje viška akrilata i obrada proteze frezom i brusnim kamenom. Na kraju se radi fino poliranje proteze i predaja pacijentu uz informacije o održavanju oralne higijene kao i o načinu skidanja i stavljanja proteze (slika 6) [5].



Slika 4. Određivanje međuviličnih odnosa



Slika 5. Proba postave zuba

5. ZAKLJUČAK

Terapija bezubosti pomoću mini implanta ima niz prednost u vidu jednostavne hirurške tehnike, mogućnosti imedijantnog opterećenja kao i ekonomske isplativosti u poređenju sa konvencionalnim endosealnim implantatima. Mini implantati predstavljaju pogodno rešenje za terapiju bezubih pacijenata. Poboljšana retencija i stabilizacija koju pružaju zubnoj protezi, povećava uspešnost protetske terapije i veći komfor nošenja za pacijenta.



Slika 6. Predaja proteze

6. LITERATURA

- [1]. Tadić, A., Mirković, S., Peronijević, B., Jeremić-Knežević, M. Stabilizacija donje totalne proteze upotrebom minidentalnih implantata. Med Pregl 2012;(9-10):405-408.
- [2]. Mirković, S. Mini dentalni implantati. Univerzitet u Novom Sadu, Medicinski fakultet. 2013.
- [3]. Krstić, M. Stomatološka protetika-Totalna proteza, Velarta, Beograd 2006
- [4]. Vojvodić, D., Žabarović, D. Retencija donje totalne proteze uporabom mini dentalnih implantata: Prikaz slučaja. Acta Stomatol Croat. 2008;42(2):178-184.
- [5]. Jacob, P., Rai, N., Patil, D. Mini dental implants as a simple treatment alternative for edentulous mandibular cases. International journal of oral implantology and clinical research 2011;2(2):93-96.

Autori: dr Ljubomir Kalem, dr Dijana Kalem,
Ordinacija Kalem, Novi Sad, Republika Srbija
E- mail: ordinacija_kalem@hotmail.com

Prof. dr Tatjana Puškar, Prof. dr Siniša Mirković, Asist. dr Ana Tadić, Univerzitet u Novom Sadu, Medicinski fakultet, Katedra za stomatologiju, Hajduk Veljkova 12, 21000 Novi Sad, Srbija, Tel.: +381 21 661-33-62, Fax: +381 21 526-120.

E- mail: tatjanapuskar@yahoo.com
sinisa.mirkovic021@gmail.com

Asist. dr Milana Ilić, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Institut za proizvodno mašinstvo, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Republika Srbija, Tel: +381 21 485 2306, Fax: +381 21 454-495.
E-mail: milanai@uns.ac.rs

7. ZAHVALNICA

Rezultati prezentovani u ovom radu su realizovani u okviru projekta „Istraživanje i razvoj metoda modeliranja i postupaka izrade dentalnih nadoknada primenom savremenih tehnologija i računarom podržanih sistema“, TR – 35020, finansiranog od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Santoši, Ž., Budak, I., Trifković, B., Šokac, M., Soković, M., Hodolič, J.

3D DIGITALIZACIJA STOMATOLOŠKIH MODELA BLISKO-PREDMETNOM FOTOGRAMETRIJOM POTPOMOGNUTOM PROJEKTOVANOM SVETLOŠĆU

Rezime: U ovom radu predstavljena je primena 3D digitalizacije blisko-predmetnom fotogrametrijom na radnom modelu gornje vilice izlivena od gipsa. Zbog vizuelnih osobina gipsa, kao što su boja i tekstura, dovodi se u pitanje mogućnost primene ove metode na ovoj vrsti modela. Sa ciljem prevazilaženja loših vizuelnih osobina gipsa, u ovom radu je analizirana mogućnost primene metode blisko predmetne fotogrametrije potpomognute projektovanom svetlosnom teksturom.

Ključne reči: reverzibilno inženjerstvo, 3D digitalizacija, blisko-predmetna fotogrametrija

1. UVOD

Savremeno mašinstvo je izašlo iz okvira klasičnog mašinstva i sve više pronalazi ulogu i značaj u drugim oblastima, kao što su: biomedicinski inženjering, animacija u inženjerstvu, zaštita kulturnog nasleđa i sl. [1, 2, 3]. Posebnu ulogu moderno mašinstvo zauzima u biomedicinskom inženjeringu gde je potreba za saradnjom inženjera i lekara veoma izražena, a naročito u oblasti stomatologije. Naime, stomatolozi su potrebna tehnička sredstva koja će im olakšati rad sa pacijentima i samim tim omogućiti pacijentima pružanje kvalitetnijeg i boljeg lečenja. Veoma izražena saradnja je upravo na polju dentalne protetike, odnosno izrade zubnih proteza, zubnih nadoknada i koštanih graftova [4, 5]. Glavni zadatak svih dentalnih nadoknada je da ispune kako funkcionalne tako i estetske zahteve. Primena reverzibilnog inženjerstva (RE) u stomatologiji u velikoj meri je olakšalo modeliranje i izradu dentalnih nadoknada kao i samo planiranje zahvata i ugradnju istih. Za kreiranje virtuelnih 3D modela razvijene su i prilagođene u oblasti RE nekoliko metoda 3D digitalizacije. Pored transmisionih koje su pogodne za dobijanje kompletnog 3D modela vilice, razvijene su i optičke metode 3D digitalizacije, koje zbog svoje jednostavnosti, pristupačnosti i zadovoljavajuće tačnosti omogućavaju 3D digitalizaciju zubnog otisaka. Na bazi optičkih metoda 3D digitalizacije razvijeni su različiti tipovi ekstraoralnih i intraoralnih skenera [6, 7].

2. METODE I MATERIJALI

Optičke metode su reflektivne bezkontaktne metode 3D digitalizacije. Glavna karakteristika

ovih metoda je da se određena vrsta svetlosti projektuje na predmet 3D digitalizacije pri čemu senzor registruje povratni signal. Najbolji primer ove vrste 3D digitalizacije je lasersko skeniranje kao i metode zasnovane na stereoviziji i stereovizijski sistemi zasnovani na projektovanju struktuiranog svetla (aktivna triangulacija) [2, 3]. U grupu bezkontaktnih optičkih metoda spada i blisko-predmetna fotogrametrija zasnovana na *Structure from Motion* prilazu [8, 9]. Ovaj prilaz omogućava rekonstrukciju fizičkog 3D modela pomoću 2D digitalnih fotografija. Fotografije se snimaju tako da karakteristične tačke na predmetu budu vidljive na najmanje dve susedne fotografije. Metoda je zasnovana na principima stereovizije a pozicije karakterističnih tačka u prostoru određuju se triangulacijom. Osnovni preduslov za primenu ove metoda je da površina digitalizovanog objekta ima jedinstvenu i naglašenu teksturu. Strategija fotografisanja se izvodi planski tako da se „pokriju“ sve vidljive površine objekta 3D digitalizacije. Pošto su sva fotogrametrijska merenja bezdimenziona, ne određivanjem prave razmere na generisanom 3D modelu javiće se sistematska greška. Određivanje prave razmere definiše se na osnovu već poznatih relacija u mernom prostoru, npr. postavljanje kodiranih markera ili postavljanje referentnih lenjira.

Gips kao materijal je veoma pogodan za izlivanje fizičkog 3D modela otisaka zuba i intenzivno se koristi u zubnoj protetici. Radni model, korišćen u ovom istraživanju (slika 1), je izliven od specijalnog gipsa (Blue Die Stone, Tech-Ceram) koji je pogodan za ekstraoralnu 3D digitalizaciju [6].



Sl. 1. Izgled radnog modela

3. PRIPREMNE AKTIVNOSTI I AKVIZICIJA FOTOGRAFIJA

Za akviziciju fotografija korišćen je DSLR digitalni fotoaparar marke Nikon D3200, opremljen sa izmenljivim objektivom AF-S DX VR Zoom 18-55mm f/3.5-5,6G. U tabeli 1. dati su osnovni podaci ovog fotoaparata.

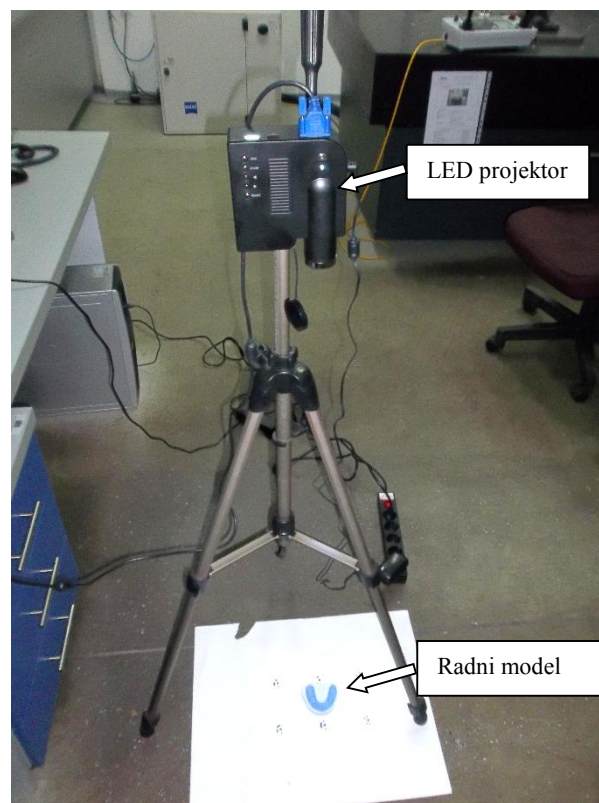
Senzor	CMOS APS-C
Veličina senzora	23.2 mm x 15.4 mm
Efektivni pikseli	24,2 Mpix
ISO osetljivost	100-6400
Podržane rezolucije fotografije	6016 x 4000; 4512 x 3000; 3008 x 2000 pix
Format zapisa fotografija	RAW; JPEG
Brzina zatvarača	1/4000 do 30 sek.
Memorija	Eksterna - SD

Tabela 1. Osnovne karakteristike kamere Nikon D3200

Projektovanje svetlosne slike je izvedeno sa *LED Projektor-Lcd image system*, svetlosnim projektorom. Podržana rezolucija projektovane slike iznosi 320x240 pix. Na slici 2. prikazana je postavka opreme i mernog predmeta. Radni model je postavljen na pod laboratorije, a ispod njega beli papir sa kodiranim markerima. Iznad njega postavljen je tronožac sa svetlosnim projektorom. VGA kablom projektor je bio povezan sa prenosivim računarom na kome je bila prikazana slika sa nasumičnom teksturom (slika 3.), tako da je slika sa računara projektovana na radni model. Projektovana slika u vidu impulsnog šuma odnosno nasumičnog kontrastnog razmeštenih belih, sivih i crnih tačaka. Ova forma najbolje predstavlja oblik jedinstvene i nasumične teksture.

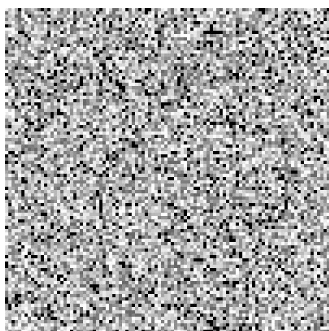
Tokom akvizicije fotografija fotoaparar je bio pozicioniran u priboru. Objektiv je bio fiksiran i

podešen na 55mm žižne daljine, a sva ostala podešavanja (otvor blende, ISO osetljivost, brzina zatvarača) držana su konstantno za svaki set fotografisanja. Prilikom fotografisanja sa projektovanom slikom, projektor je bio jedini izvor svetlosti dok bez projektovane slike za osvetljenje je korišćeno neonsko osvetljenje instalirano u prostoriji.



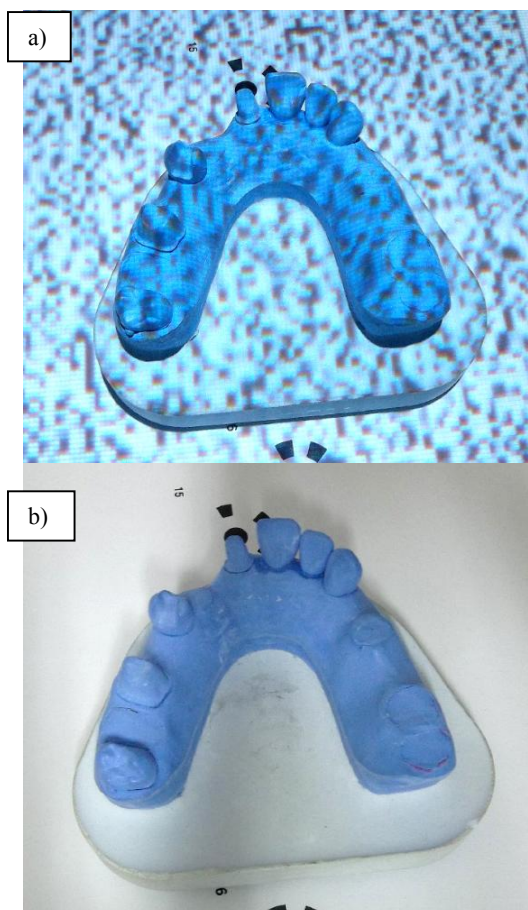
Sl. 2. Postavka opreme i mernog modela.

Fotografisanje jedne scene vršeno je sa i bez projektovane svetlosti, tako da je dobijeno dva seta fotografija, kako bi se eliminisao uticaj strategije fotografisanja. Svaki set sačinjavalo je po 16 fotografija rezolucije 4512 x 3000 pix. Položaj projektora i radnog modela za vreme fotografisanja se nije menjao. U slučaju da projektovanjem slike na radni model postoje delovi koji se nalaze u senci ili do njih ne dopire projektovana svetlost (što je čest slučaj sa kompleksnim površinama), sledi da bi se pozicija projektora morala pomeriti tako da se slika projektuje i na delove koji prethodno nisu bili pogođeni projektovanom svetlošću. Sa svakim pomeranjem projektovane slike, novo snimljene fotografije moraju se obrađivati u novoj grupi fotografija, pošto dolazi do menjanja teksture na radnom modelu. Takođe u daljoj obradi fotografija pojedinačni oblaci tačaka dobijeni u grupama se poravnavaju preko kodiranih markera u jedan kompleksan oblak tačaka i na osnovu njega generiše poligonalni 3D model.



Sl. 3. Izgled projektovane slike sa karakterističnom teksturom

Nakon uspešne akvizicije fotografije su prebačene na računar i obrađene u specijalizovanom softveru za obradu fotografija i rekonstrukciju 3D modela. Sa slike 4. može se videti primer fotografija iste scene sa i bez projektovane svetlosti. Zbog veoma male rezolucije projektora, lošije optike i jačine projektovane svetlosti istog, projektovana slika nije bila u zavidnom kvalitetu.



Sl. 4. Radni model a) sa projektovanom slikom b) bez projektovane slike

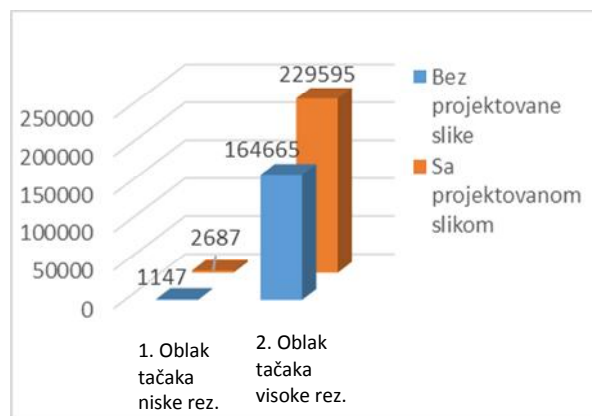
4. REZULTATI I DISKUSIJA

Rekonstrukcija 3D modela pomoću softvera vrši se u nekoliko koraka koji se sastoje iz:

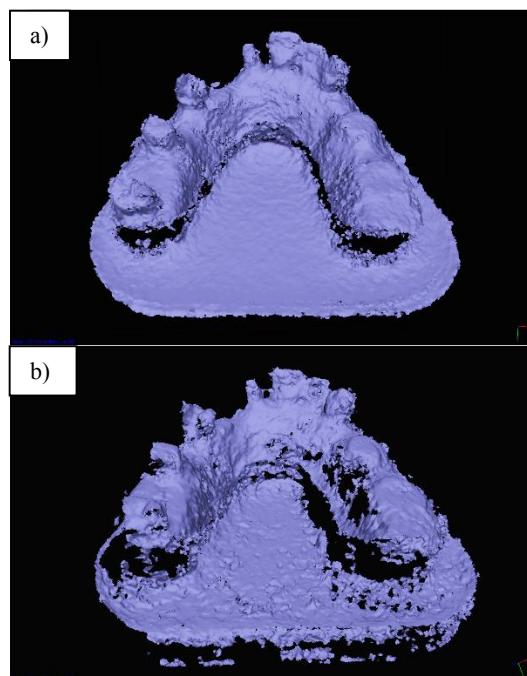
- izdvajanja objekta od interesa od pozadine,

- poravnavanja fotografija,
- generisanja gustog oblaka tačaka,
- generisanje poligonalnog 3D modela i
- definisanje razmere na modelu.

Alatima za selekciju radni model je izdvojen od pozadine na oba seta fotografija i odrađeno je njihovo poravnavanje. Rezultat poravnavanja fotografija je oblak tačaka niske rezolucije sa vizuelnim predstavljanjem pozicija sa kojih su fotografije bile načinjene. U sledećem koraku i obradom retkog oblaka tačaka na bazi aproksimacije dobija se oblak tačaka visoke rezolucije. Na slici 5. prikazan je broj tačaka dobijen za oba seta fotografija.



Sl. 5. Prikaz broja tačaka dobijenih za oba seta fotografija



Sl. 6. Generisani poligonalni 3D model a) sa projektovanom slikom b) bez projektovane slike

Nakon što su generisani gusti oblaci tačaka za oba seta fotografija, generisani su poligonalni 3D modeli prikazani na slici 6a i slici 6b. Vizuelnim zapažanjem može se zaključiti da poligonalni 3D model dobijen potpomognut projektovanom

svetlošću odnosno projektovanom slikom, ima nedvosmisleno bolje rekonstruisanu površinu nego poligonalni 3D model dobijen bez dodatnog tretmana projektovane svetlosti. Ovu tvrdnju dokazuje i broj tačaka generisan u retkom i gustom oblaku tačaka.

5. ZAKLJUČAK

Na osnovu iznetih pretpostavki i rezultata u vezi primene blisko predmetne fotografije na fizičkim modelima izlivenim od gipsa koji se koriste u dentalnoj protetici, može se izneti nekoliko zaključaka:

- gips kao materijal nije idealan materijal za 3D digitalizaciju blisko-predmetnom fotogrametrijom,
- zbog svojih vizuelnih karakteristika, predmete načinjene od gipsa potrebno je podvrgnuti dodatnim tretmanima u cilju dobijanja jedinstvene teksture koja je ključni faktor za dobijanje kvalitetnog 3D modela metodom blisko-predmetne fotogrametrije,
- 3D digitalizacija modela od gipsa metodom blisko-predmetne fotogrametrije potpomognute projektovanom svetlošću, daje značajno bolje rezultate u odnosu na klasičnu.

Dalja istraživanja u ovom području biće usmerena na analizu mogućnosti primene blisko-predmetne fotogrametrije potpomognute projektovanom svetlošću na materijalima različitih površinskih i vizuelnih osobina.

Zahvalnica

Rezultati prezentovani u ovom radu su realizovani u okviru projekta „Istraživanje i razvoj metoda modeliranja i postupaka izrade dentalnih nadoknada primenom savremenih tehnologija i računarom podržanih sistema“, TR – 35020, finansiranog od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije

6. REFERENCE

- [1] Budak, I., Vukelić, Đ., Bračun, D., Hodolić, J., Soković, M.: *Pre-Processing of Point-Data from Contact and Optical 3D Digitization Sensors*, Sensors, Izv. 12, št. 1, pp. 1100-1126, 2012.
- [2] Sansoni, G., Trebeschi, M., Docchio, F.: *State-of-The-Art and Applications of 3D Imaging Sensors in Industry, Cultural Heritage, Medicine, and Criminal Investigation*, Sensors, Izv. 9, pp. 568-601, 2009.
- [3] Luhmann, T.: *Close range photogrammetry for industrial applications*, ISPRS Journal of

Photogrammetry and Remote Sensing, Izv. 65, št. 6, pp. 558-569, 2010.

- [4] Budak, I., Kosec, B., Soković, M.: *Application of contemporary engineering techniques and technologies in the field of dental prosthetics*, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Izv. 54, št. 2, pp. 233-241, 2012.
- [5] Mirković, S., Budak, I., Puškar, T., Tadić, A., Šokac, M., Santoši, Ž., Đurđević Mirković, T.: *Application Of Modern Computer-Aided Technologies In The Production of Individual Bone Graft. A Case Report*, Vojnosanitetski preglad, 2015.
- [6] Trifković, B.: *Analiza metroloških karakteristika uređaja za optičku digitalizaciju stomatoloških CAD/CAM sistema*, doktorska disertacija, Stomatološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2012.
- [7] Budak, I., Trifkovic, B., Puskar, T., Vukelic, Dj., Vucaj-Cirilovic, V., Hodolic, J., Todorovic, A.: *Comparative analysis of 3D digitization systems in the field of dental prosthetics*, Tehnički vjesnik-technical gazette, Izv. 20, št. 2, pp. 291-296, 2013.
- [8] Snavely, N.: *Bundler: Structure from Motion (SfM) for Unordered Image Collections*, Dostupno: <http://www.cs.cornell.edu/~snavely/bundler/>.
- [9] Snavely, N., Seitz, M., Szeliski, R.: *Skeletal Graphs for Efficient Structure from Motion*, Dostupno: <http://www.cs.cornell.edu/~snavely/projects/skeletalset/>.

Autori: M.Sc. Željko Santoši¹, Doc. dr Igor Budak¹, Ass. dr sci. Branka Trifković² M.Sc. Mario Šokac¹, Prof. dr. Mirko Soković⁴, Prof. dr Janko Hodolić¹

1. Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za Proizvodno mašinstvo, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Tel: 021 485 2314, Fax: 021 454-495.

E-mail: zeljkos@uns.ac.rs
budaki@uns.ac.rs
marios@uns.ac.rs
hodolic@uns.ac.rs

2. Univerzitet u Beogradu, Stomatološki fakultet, Klinika za Stomatološku protetiku, Rankeova 4, 11000 Beograd, Tel: 011 2433-433
 E-mail: branka.trifkovic@stomf.bg.ac.rs
 E-mail: tatjanapuskar@yahoo.com

3. University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenia, Phone: +386 1 4771214
 E-mail: mirko.sokovic@fs.uni-lj.si

Šokac, M., Budak, I., Ralević, N., Spasić, A., Santoši, Ž., Vučaj-Ćirilović, V., Till, V.

PRIMENA METODE KLASTERIZACIJE FAZI C-SREDNJIH VREDNOSTI KOD SEGMENTACIJE MEDICINSKIH SNIMAKA

Rezime: *Primena različitih alata za analizu medicinskih snimaka generisanih CT ili MR (magnetna rezonanca) uređajima danas predstavlja aktivno polje istraživanja. U okviru ovog rada biće predstavljena metoda klasterizacije fazi C-srednjih vrednosti koja se koristi kod segmentacije medicinskih snimaka, a koja ima za cilj da grupiše podatke (odnosno piksele) u značajne klustere i na taj način ekstrahuje važne informacije iz medicinskih snimaka. Prikazan je detaljan opis predstavljene metode na primerima analize tri medicinska snimka generisana pomoću MR uređaja. Kako bi se izvršila evaluacija segmentacije prikazane metode korišćeni su statistički evaluatori. Prikazanom analizom se dolazi do zaključka da segmentacija medicinskih snimaka primenom fazi klasterizacije daje dobro rezultate i predstavlja dobru osnovu za dalje razvijanje i unapređenje.*

Ključne reči: MR, Segmentacija, fazi logika, klasterizacija,

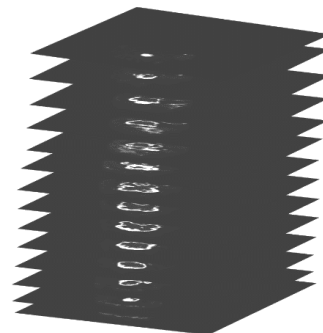
1. UVOD

Sa tehnološkim napretkom u oblastima medicine i stomatologije dolazi do nagle ekspanzije uređaja za akviziciju geometrijskih podataka o ljudskim anatomskim strukturama. Uporedo sa tim, primenom savremenih računarskih tehnologija u ovim oblastima dolazi do razvoja algoritama koji se uspešno implementiraju kod obrade i analize velikog broja medicinskih snimaka generisanih pomoću različitih modaliteta, kao što su kompjuterizovana tomografija (CT) i magnetna rezonanca (MR), ultrazvuk (US) i dr.. Veliki broj ovih različitih algoritama imaju za zadatak uspešno izdvajanje određenih struktura (koštano tkivo, meko tkivo, organi, tumori, itd.) kod ovih medicinskih snimaka. Međutim, prilikom akvizicije ovih snimaka mogu da se jave različiti problemi vezani za kvalitet generisanih snimaka. Kao najčešći problemi koji se javljaju su artefakti nastali usled prisustva amalgamskih plombi (kod Cone Beam kompjuterizovane tomografija - CB-CT), zatim šumovi na snimcima (najčešće kod snimaka generisanih pomoću ultrazvuka) ili usled nehomogenih struktura prilikom snimanja mekog tkiva na MR uređaju [1,2].

2. MATERIJALI I METODE

Postupak segmentacije digitalnih slika je široko rasprostranjen i kao takav ima primenu u mnogim aplikacijama kao što su algoritmi za detekciju pokreta u oblasti robotike, registracija objekata, analiza geografskih područja i analiza medicinskih snimaka [3,4]. U klasičnom smislu,

segmentacija se definiše kao deljenje slike na nepreklapajuće, konzistentne regione koji su homogeni, u saglasnosti sa nekim karakteristikama kao što su intenzitet sive boje ili tekstura [5]. Kao rezultat segmentacije dobija se binarna slika gde vrednost 1 predstavlja region od interesa, a 0 predstavlja pozadinu koja nije uzeta u obzir. „Slaganjem“ više uzastopnih binarnih 2D slika se generiše 3D model. Na slici 1 je prikazan postupak slaganja 2D binarnih slika kako bi se generisao 3D model.



Sl. 1. Prikaz naslaganih 2D slika tumora

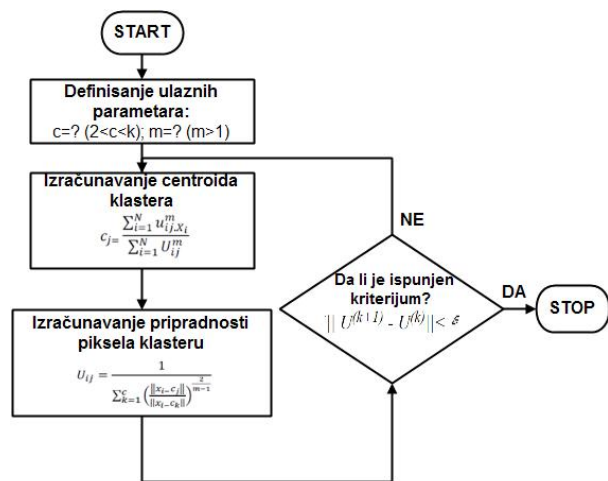
Klasterizacija predstavlja grupisanje više podataka, tako da za svaki podatak važi da je sličniji podacima iz svoje grupe (klastera), nego podacima iz drugih grupa (klastera). U zavisnosti od toga da li određeni podatak pripada isključivo jednom klasteru (grupi) ili nekoliko klastera sa različitim stepenima pripadnosti metode klasterizacije mogu biti čvrste [6] ili fazi [7]. Kod čvrste klasterizacije medicinskih snimaka svaki podatak tj. piksel pripada tačno jednom klasteru gde je dodeljena vrednost pripadnosti piksela klasteru nula ili jedan. Dok kod fazi klasterizacije, vrednost između 0 i 1 je dodeljena svakom podatku (pikselu) od funkcije pripadnosti [8].

Fazi C klasterizacija, odnosno klasterizacija metodom fazi C-srednjih vrednosti, je algoritam koji ima jako veliku rasprostranjenost primene u oblasti medicine. Ova metoda se koristi za klasterizaciju, odnosno grupisanje podataka (piksela) gde svaki podatak pripada nekom klasteru sa određenim stepenom pripadnosti, za razliku od hard klasterizacije gde svaki podatak pripada samo jednom klasteru. Ovaj algoritam je prvi razvio Dunn 1973. godine [9] a unapredio Berzdek 1981. godine [7].

Kod postupka klasterizacije medicinskih slika kao najčešći parametar koji se uzima u obzir jeste intenzitet piksela prikazan u nijansama sive boje. Na ovaj način se funkcija pripadnosti kod FCM algoritma minimizira kada se velike vrednosti stepena pripadnosti dodeljuju pikselima čiji intenzitet je bliži centru klastera, a male vrednosti stepena pripadnosti se dodeljuju kada je intenzitet piksela daleko od centra klastera [8].

Kod definisanja ulaznih parametara u algoritam potrebno je definisati broj klastera (koji ujedno predstavlja i najvažniji parametar) i težinski eksponent m koji definiše stepen fazifikacije ($m > 1$), odnosno pripadnosti piksela klasterima.

Na slici 2 je prikazana osnovna šema klasterizacije metodom fazi c-srednjih vrednosti [7].



Sl. 2. Algoritam toka rada metode fazi C-srednjih vrednosti

3. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Kako bi se analizirala efektivnost predstavljenog algoritma izvršen je postupak segmentacije tri medicinska snimka generisana na MR uređaju koja su nazvana MR 1, MR 2 i MR 3. Na sva tri snimka su prisutne velike abnormalnosti tkiva u vidu glioblastoma (najmaligniji i najčešći oblik tumora moždanog tkiva). Adekvatna ekstrakcija ovih abnormalnosti

omogućuje medicinskom osoblju da prikupi podatke o ovom tkivu kako bi se mogla sprovesti adekvatna terapija. Gore predstavljeni algoritam (nazvan FCM) je implementiran u Matlab programskom paketu, na računaru (FUJITSU CELSIUS M470-2) sa Intel(R) Xeon (R) CPU E5645, 2.40 GHz procesorom i sa 16 GB RAM memorije.

Pošto se u okviru ove analize vrši segmentacija samo abnormalnog tkiva, potrebno je lokalizovati područje analize. U Matlab programskom paketu je takođe implementiran alat za ocrtavanje regiona od interesa na medicinskom snimku unutar kojeg će se izvršiti postupak segmentacije.

Nakon postupka segmentacije izvršeno je naknadno post-procesiranje segmentiranih snimaka primenom morfoloških operacija kako bi se uklonili sitni šumovi (pikseli) nastali prilikom primene gore predstavljenog algoritma.

Ulazni parametri koji su se koristili kod ovog algoritma su broj klastera C koji korisnik unosi manuelno, terminacioni parametar ϵ (tačnost), maksimalni broj iteracija i težinski eksponent m . Kako bi se izvuklo što više informacija iz snimaka, nakon kraće eksperimentalne analize, uzeti su u obzir optimalni parametri kod postupka segmentacije svakog od ova tri medicinska snimka.

Kako bi se mogla izvršiti analiza tačnosti predstavljenog algoritma segmentiranih snimaka, svaki od ova tri snimka je ručno segmentiran od strane radiologa. Ovi snimci su se zatim koristili kao referentni u odnosu na koje su se poredili snimci segmentirani primenom fazi klasterizacije.

Kao evaluatori tačnosti segmentacije koristili su se Žakarov (*Jaccard*) indeks i Dajsov (*Dice*) koeficijent [10,11]. Kod ovih evaluatora opseg preklapanja se kreće od 0 do 1, gde 1 definiše potpuno preklapanje segmentiranog snimka sa referentnim snimkom. Ovi evaluatori su definisani na osnovu sledećih formula:

Žakarov indeks

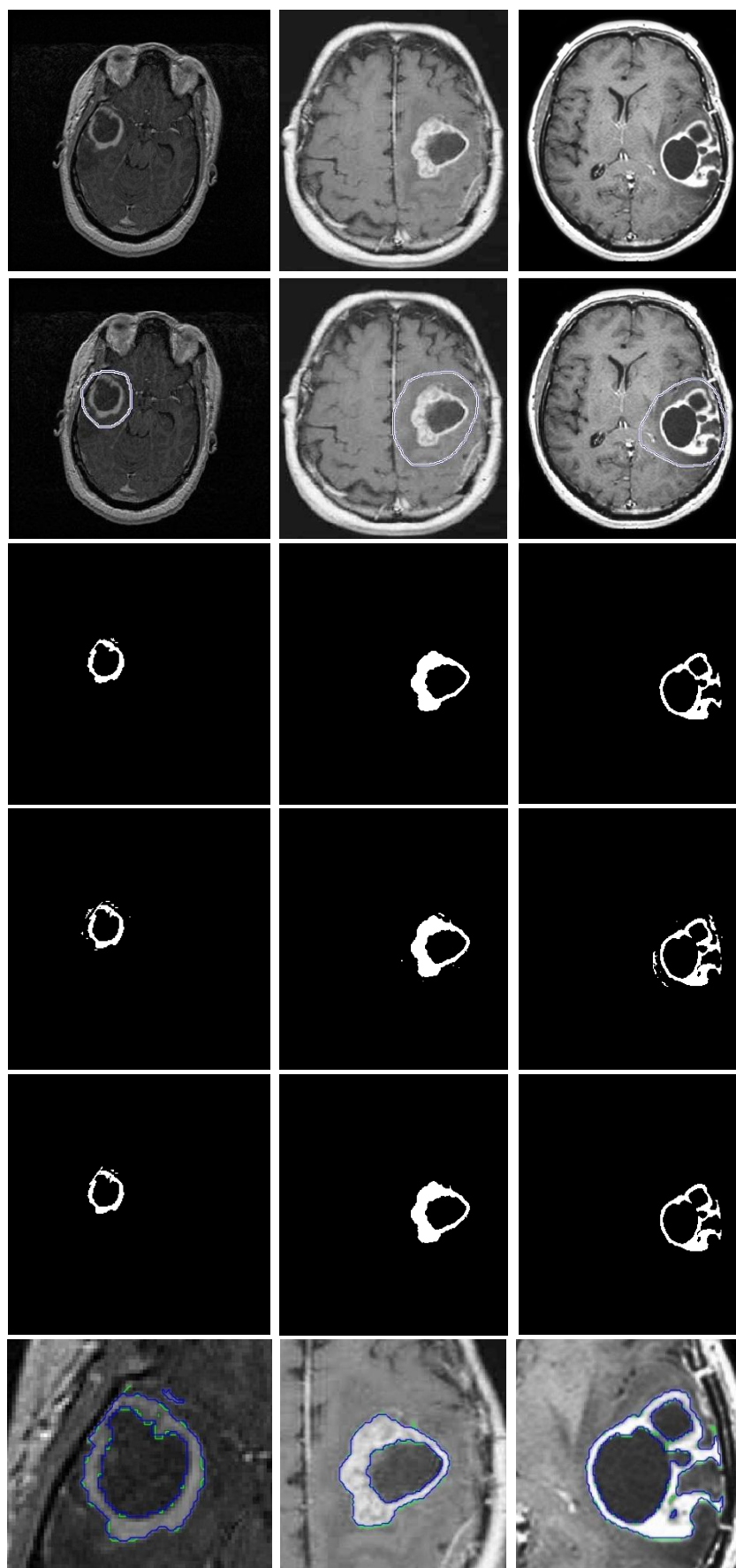
$$JI = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|} \quad (1)$$

Dajsov koeficijent

$$DK = \frac{2(A \cap B)}{|A| + |B|} \quad (2)$$

gde je A binarna slika referentnog snimka, i B binarna slika snimka koji se upoređuje sa njim.

Na slici 3. su prikazani rezultati segmentacije referentnih snimaka, snimaka segmentiranih primenom fazi klasterizacije i preklapanje ovih snimaka.



Sl. 3. Prikaz a)originalnih MR snimaka, b)definisanog regiona od interesa, c)referentnih snimaka, d)snimaka segmentiranih FCM algoritmom, e) segmentiranih snimaka posle post-procesiranja, i f) preklapljene granice referentnih snimaka (plava boja) i segmentiranih snimaka FCM algoritmom (zelena boja)

U tabeli 1. su prikazani rezultati evaluacije Žakarovog indeksa i Dajsovog koeficijenta kod sva tri medicinska snimka, segmentirana primenom FCM algoritma, upoređenih sa njihovim referentnim snimcima.

Br.	Oznaka	Žakarov indeks	Dajsov koeficijent
1.	MR1	0,8813	0,9370
2.	MR 2	0,9503	0,9745
3.	MR 3	0,8960	0,9451

Tabela 1. Rezultati analize tri MR snimka

Na osnovu prezentovanih rezultata segmentacije primenom FCM algoritma na tri MR snimka u tabeli 1. rezultati evaluacije po Žakaru iznose 0,8813, 0,9503 i 0,8960 respektivno. Kod evaluacije po Dajsovom koeficijentu rezultati evaluacije algoritma kod segmentacije su 0,9370, 0,9745 i 0,9451 respektivno.

4. ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada je predstavljena metoda klasterizacije fazi C-srednjih vrednosti koja je implementirana u Matlab programskom paketu. Izvršena je segmentacija tri snimka magnetne rezonance, nakon čega je izvršena evaluacija rezultata segmentacije poređenjem sa rezultatima manuelne segmentacije izvršene od strane radiologa. Kao evaluatori segmentacije iskorišćeni su Žakarov indeks i Dajsov koeficijent. Rezultati za sva tri MR snimka po Žakarovom indeksu su vrlo dobri, dok su kod evaluacije po Dajsovom koeficijentu rezultati segmentacije primenom ovog algoritma kod sva tri MR snimka još i bolji.

5. REFERENCE

- [1] Noble J. A., Boukerroui D.: *Ultrasound Image Segmentation: A Survey*, IEEE transactions on medical imaging, vol. 25, no. 8, p.p.987-1010, 2006.
- [2] Despotovic I., Goossens B., Philips W.: *MRI Segmentation of the Human Brain: Challenges, Methods, and Applications*, Computational and Mathematical Methods in Medicine, vol. 2015, p.p. 1-24, 2014.
- [3] Bezdek J., Hall L., Clarke L.: *Review of MR image segmentation techniques using pattern recognition*, Medical Physics., vol. 20 p.p 1033–1048, 1993.
- [4] Pham D., Xu C., Prince J.: *A survey of current methods in medical image segmentation*, Annual Review of Biomedical Engineering, vol. 2, p.p. 315–337, 2000.

- [5] Cai W., Chen S., Zhang D.: *Fast and Robust Fuzzy C-Means Clustering Algorithms Incorporating Local Information for Image Segmentation*, Pattern Recognition, vol. 40, no. 3, p.p. 825–838, 2007.
- [6] Lloyd S.: *Least Squares Quantization in PCM*, IEEE transactions on information theory, vol. 28, no. 2, p.p. 129-137, 1982.
- [7] Bezdek J.: *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*, Kluwer Academic Publishers Norwell, MA, USA, 1981.
- [8] El-Melegy M., Zanaty E., Abd-Elhafiez W. M., Fara A.: *On cluster validity indexes in fuzzy and hard clustering algorithms for image segmentation*, Image Processing, ICIP, IEEE International Conference, vol.6, p.p. 5-8, IEEE, San Antonio, TX, 2007.
- [9] Dunn, J.: *A Fuzzy Relative of the ISODATA Process and Its Use in Detecting Compact Well-Separated Clusters*, Journal of Cybernetics vol.3, p.p.32-57, 1973.
- [10] Dice, L. R.: *Measures of the Amount of Ecologic Association Between Species*, Ecology vol.26 no.3, p.p. 297–302, 1945.
- [11] Jaccard, P.: *Étude comparative de la distribution florale dans une portion des Alpes et des Jura*, Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles, vol. 37, p.p. 547–579, 1901.

Autori: M.Sc. Mario Šokac, doc. dr Igor Budak, Prof. dr. Ralević Nebojša, M.Sc. Željko Santoši, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad, Srbija, Tel.: +381 21 485 2332, Fax: +381 21 454-495.

E-mail: marios@uns.ac.rs
budaki@uns.ac.rs
mralevic@uns.ac.rs
zeljkos@uns.ac.rs

Dr. med. Aleksandar Spasić, Dr. med. Viktorija Vučaj-Ćirilović, Dr. med. Viktor Till Univerzitet u Novom Sadu, Medicinski fakultet, Hajduk Veljkova 3, Novi Sad, Tel.: +381 21 420 677.

E-mail: a_spasic@yahoo.com
vcirilovic@hotmail.com
vtill@eunet.rs

Napomena: Rezultati prezentovani u ovom radu su realizovani u okviru projekta „Istraživanje i razvoj metoda modeliranja i postupaka izrade dentalnih nadoknada primenom savremenih tehnologija i računarom podržanih sistema“, TR – 35020, finansiranog od strane Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

Matin, I., Hadžistević, M., Hodolić, J., Vukelić, Đ., Trifković, B., Potran, M., Drstvenšek, I., Brajljli, T.

PRIMENA EKSPERTNOG SISTEMA ZA LIVENJE U STOMATOLOGIJI

Rezime: U radu se prikazuje primena ekspertnog sistema za razvoj simulacionog modela za precizno livenje (IC) i brzo precizno livenje (RIC) metalne substrukture za metalo-keramičku krunicu. Ovaj prototipni ekspertni sistem je nastao kao potreba za automatizacijom procesa projektovanja i izrade metalne substrukture. Sistem je namenjen za stomatološke livačke mašine koje podržavaju upravljači sistem CASTCONTROL. U radu se prikazuje struktura sistema i hardverska podrška. Razvijeni integrisani sistem je parametarski, objektno-orijentisan, zasnovan na modelskim formama, veštačkoj inteligenciji, distributivnoj bazi podataka i arhitekturi table.

Ključne reči: integrisani sistem, precizno livenje, brzo precizno livenje

1. UVOD

Precizno livenje (IC) i brzo precizno livenje (RIC) predstavljaju najzastupljenije tehnologije livenja u stomatologiji. Odливci su obično geometrijski vrlo kompleksni oblici sa visokim zahtevima u pogledu mehaničkih, hemijskih, fizičkih i tehnoloških osobina. Relativno niska cena procesa, minimalni gubici biokompatibilne legure, visok kvalitet odlivka i relativno kratko vreme izrade predstavlja osnovni razlog primene ove tehnologije. Nedostaci ove tehnologije ogledaju se u pojavi poroznosti, zaostalih napona, deformacija, gasnih uključaka, hemijskih i fizičkih neujednačenosti. Ovi nedostaci se mogu umanjiti pravilnim projektovanjem simulacionog modela, kalupa i parametara livenja primenom ekspertnih sistema. Ekspertni sistemi se koriste u fazama konceptualnog i detaljnog projektovanja simulacionog modela i tehnologije livenja [2, 3, 5, 7, 8]. Cilj integracije sistema sa brzom izradom prototipa (RP) je povećanje kvaliteta substrukture i smanjenje vremena izrade [1].

2. METODOLOGIJA RAZVOJA SIMULACIONOG MODELA

Baza znanja, baza podataka i mašina za zaključivanje moraju pravovremeno obezbediti čitanje, modifikaciju, razvoj i dvosmerni tok informacija sa sledećim programskim sistemima:

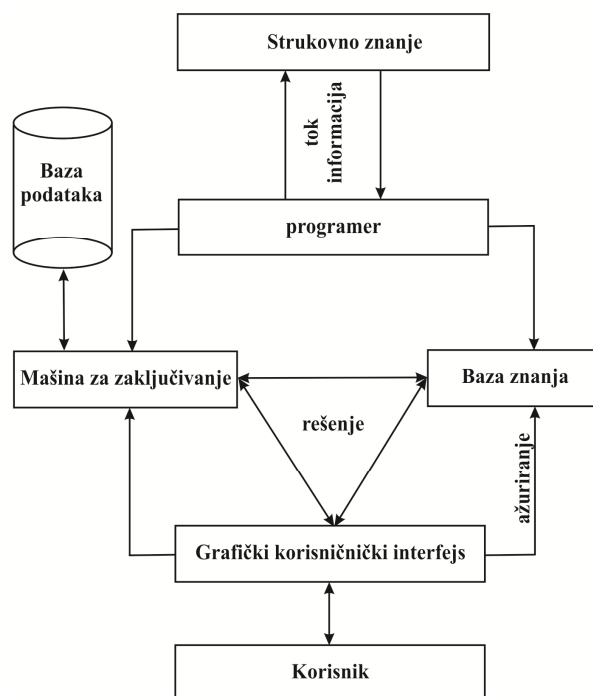
- My VGL,
- Creo Parametric (Pro/E),
- MAGMASOFT i
- CAST CONTROL.

Ekspertni sistem (ES) treba da poseduje arhitekturu koja je integralna nad celokupnim

prostorom znanja i omogućava kontinualan tok projektovanja simulacionog modela. Glavne komponente ES su (slika 1):

- Grafički korisnički interfejs:
 - obezbeđuje interaktivan rad korisnik-sistem,
 - obezbeđuje razvoj i održavanje baze znanja.
- Baza podataka:
 - sadrži činjenice, podatke i informacije.
- Baza znanja:
 - sadrži znanje kodirano pravilima.
- Mašina za zaključivanje:
 - Zaključuje vršeći pravilo sa najvišim prioritetom u agendi.

Arhitektura ES-a je prikazana na slici 1.



Sl. 1. Arhitektura ekspertnog sistema

CAD model se generiše na osnovu oblaka tačaka dobijenih skeniranjem na CT skeneru "Zeiss Metrotom 1500" korišćenjem programskog sistema „Zeiss Calypso“ i "My VGL". Dobijeni model, predstavlja facet model koji se dalje rekonstruiše u solid korišćenjem programskog sistema Creo Parametric (Pro/E) [4, 7]. U narednom koraku, u okviru numeričke simulacije u sistemu MAGMASOFT se vrši određivanje parametara preciznog livenja, izbor materijala, i geometrije ulivnog podsistema.

Parametri livenja, materijala i modela ulivnog podsistema se učitavaju iz baze podataka, koja sadrži:

- standardne „BEGO“ materijale,
- materijale koji ne spadaju u grupu materijala proizvođača „BEGO“,
- parametre livenja,
- režime obrade za kombinovanu glodalicu, bušilicu i mernu mašinu „BEGO Paraskop M“,
- modele ulivnih podsistema sa odgovarajućim srednjim prečnicima ulivnih kanala (Ø4mm, Ø6mm, Ø8mm, i dr.), uglove osa ulivnih kanala prema vertikalnoj ravni (12°, 15°, 18°, 20°, 22° i dr.) i odgovarajuće zapreminama ulivnih čaša, i
- podatke o livačkoj mašini "BEGO Nautilus CC+".

Baza podataka je objektno-orijentisana i relaciona. Creo Parametric, VBA, MS Excell i MS Access se koriste za razvoj baze podataka. Baza znanja je sastavljena od sledećih vrsta znanja: deklarativno, proceduralno, meta-znanje, heurističko i strukovno znanje. Najčešće upotrebljavano znanje je deklarativno, odnosno inferentno, a najčešće primenjivano pravilo je produkciono [5].

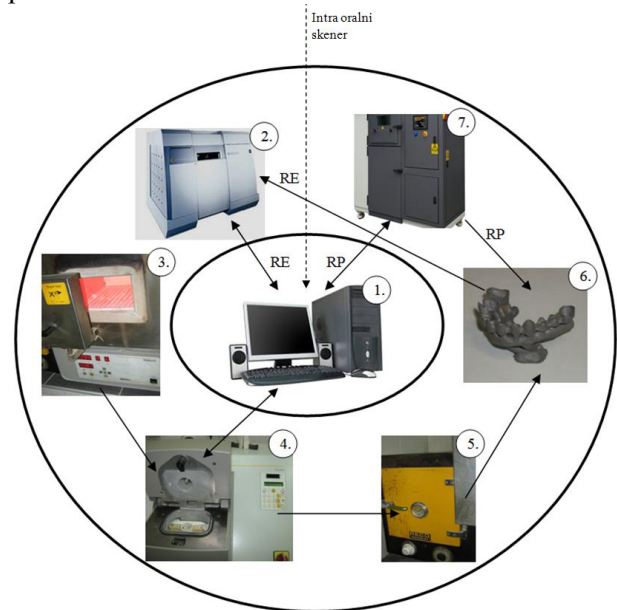
ES sadrži sledeće podmodule (izvore znanja) za:

- livačke parametre,
- ulivne podsisteme,
- selekciju livačkih materijala,
- geometrijsku analizu simulacionog modela, i
- modeliranje simulacionog modela.

Rešavanje problema uključuje donošenje odluka između podmodula koji sadrže stručna znanja. Svaki izvor znanja generiše delimično rešenje. Izvor znanja može da generiše rešenja na osnovu drugih rešenja. Konačno rešenje se postiže kada su sva parcijalna rešenja ispunila definisana pravila i ograničenja od strane korisnika, odnosno ekspertnog sistema.

3. OPREMA PODRŽANA EKSPERTNIM SISTEMOM

Integrirani sistem može da koristi snimke generisane uređajima za intraoralnu digitalizaciju (LAVA COS, CEREC, E4D, Trios, Siemens Sensation i dr.) i ekstraoralnu digitalizaciju (Zeiss Metrotom i sl.) s ciljem generisanja u početku poligonalnog a kasnije solid modela. Oprema neophodna za projektovanje i izradu metalne substrukture podržana od ekspertnog sistema je prikazana na slici 2.



Legenda:

1. Računar (Fujitsu P400),
2. 3D skener (Zeiss Metrotom 1500),
3. Peć za žarenje (BEGO Miditherm),
4. Mašina za livenje (BEGO Nautilus CC Plus),
5. Uređaj za hlađenje (Reco)
6. metalna substruktura
7. Mašina za lasersko sinterovanje metala (CONCEPT LASER MLAB).

Sl. 2. Hardverska podrška projektovanju i izradi metalne substrukture za metalokeramičku krunicu

Računar (1) vrši direktno/indirektno upravljanje nad opremom. Direktno se upravlja 3D skenerom, mašinom za livenje (4) i mašinom za lasersko sinterovanje (7). Peć za žarenje (3) i uređaj za hlađenje (5) nisu povezani sa računarnom, ali se parametri za njihovo optimalno korišćenje određuju pomoću programa CASTCONTROL i numeričke simulacije u MAGMASOFT-u [6].

ES bira „kod“ upravljačkog programa CASTCONTROL i obezbeđuje parametarsku vezu sa rezultatima simulacije. Metod rezonovanja na osnovu pravila (RBR), metod ograničenja (CSM), metod tekućih podataka (CDM), linearno programiranje (LP) i iterativni redizajn (IR)

predstavljaju primenjene gradivne metode za razvoj ES-a.

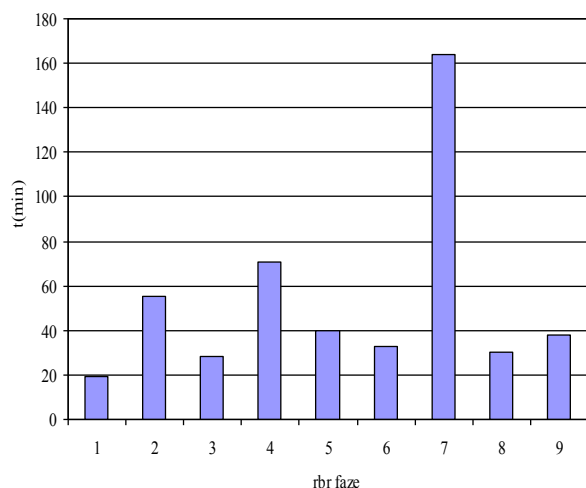
4. REZULTAT PRIMENE EKSPERTNOG SISTEMA

Primena ES smanjuje ukupno vreme izrade metalne substrukture (6) koja sadrži 12 odlivaka a prikazana je na slici 2. Ukupno vreme potrebno za proizvodnju metalne substrukture iznosi 472 min. Vreme izrade krunice je 280 min. Vreme za pripremu simulacionog modela za RP iznosi 18 min, a vreme SLM postupaka je 109 min. Tabela 1 prikazuje nekolicinu od više izlaznih parametara iz ekspertnog sistema.

Oznaka	Veličina
Maksimalna temperatura kalupa	$T_{kalupa\ max}=1000\ ^\circ C$
Minimalna temperatura kalupa	$T_{kalupa\ min}=900\ ^\circ C$
Preporučena temperatura kalupa	$T_{kalupa\ min}=920\ ^\circ C$
Režim zagrevanja	#4
Temperatura livenja	$T_{liv}=1450\ ^\circ C$
Relacioni kod pod programa upravljačkog programa CASTCONTROL	193
Izabrani livački materijal	Wirobond LFC
Grupa pripadnosti materijala	Grupa_CoCr
Proizvođač BEGO	DA
Prečnik ulivnih kanala	$d_1=4\ mm$
Prečnik razvodnih kanala	$d_2=5\ mm$
Predloženi model ulivnog podsistema, ugao 33°	model_12.prt
Preporučeno vreme hlađenja	$\tau_h = 141\ s$

Tabela 1. Izlazni parametri iz ekspertnog sistema

Vremena trajanja pojedinih faza izrade metalne substrukture su prikazani na slici 3.



Legenda:

1. Vreme za digitalizaciju objekta,
2. Vreme za pre procesiranje i rekonstrukciju poligonalnog modela,
3. vreme za numeričku simulaciju,
4. vreme izrade gipsanog modela,
5. vreme za modeliranje voštanog modela,
6. vreme predgrevanja,
7. centralno vreme livenja (vreme testiranja mašine+vreme ulivanja+vreme hlađenja),
8. vreme za vađenje vatrostalnog bloka, peskiranje, i
9. mašinsko vreme glodanja/brušenja odlivka.

Sl. 3. Hardverska podrška projektovanju i izradi metalne substrukture za metalokeramičku krunicu

Procenat kvalitetnih odlivaka se povećao korišćenjem ES za 12-18% u zavisnosti od broja odlivaka sadržanih u jednoj substrukтури, uz smanjene ukupnog vremena izrade.

4. ZAKLJUČAK

Metalna substruktura (6) i druge substrukture koje nisu prikazane u radu, a proizvedene su na isti način uz primenu ES-a, potvrđuju smanjenje ukupnog vremena izrade, uz povećanje procenta kvalitetnih odlivaka. Sve predhodno pokazuje da prikazani integrisani sistem predstavlja originalno, autentično i svrsishodno rešenje koje zadovoljava OSA i OSI standarde za posmatrano hardversko okruženje. ES predviđa mogućnost dobijanja CAD simulacionog modela RE inženjerskim modeliranjem, koji se zatim transformiše u fizički model RP-om i koji služi za proveru generisanog CAD modela, što diže kvalitet primene IC na područje RIC tehnologije. Razvijeni ES omogućava:

- automatizaciju modeliranja simulacionog modela metalne substrukture za metalokeramičku krunicu,
- određivanje parametara preciznog livenja simulacijom,
- izbor ulivnih podsistema i materijala substrukture iz BP,
- upotrebu i razvoj BP i baze znanja,
- skraćanje vreme izrade metalne substrukture,
- povećanje kvaliteta odlivka i
- distributivnu direktnu/indirektnu vezu sa opremom.

Dalje istraživanje će biti razvoj kolaborativnog sistema, postojećih izvora znanja i stvaranje novih primenom veštačke inteligencije. Dalje

istraživanje će se odnositi na ocenu mogućnosti integracije sa sistemima „3D Doctor“ i „GOM Inspect“, dok će se deo istraživanja usmeriti na „CCD/Laser“ i/ili „PSD/laser“ metode digitalizacije.

5. REFERENCE

- [1] Brajliah, T., Kostevsek, U., Zupancic, H. T., Paulic, M., Irgolic, T., Balic, J., Hadzistevic, M., Drstvensek, I.: *Comparison of manufacturing technologies of fixed structures in prosthetic dentistry*, Journal of Production Engineering, Vol.17., No 1., p.p.67-70, 2014.
- [2] Cheah, C.M., Chua, C.K., Lee, C.W., Feng, C., Totong, K.: *Rapid prototyping and tooling techniques: A review of applications for rapid investment casting*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 25: p.p. 308–320., 2005.
- [3] Er, A., Dias, R.: *A rule-based expert system approach to process selection for cast components*, Knowledge-Based Systems, 13, p.p. 225-234, 2000. Yue, Sh., Wang, G., Yin, F., Wang, Y.: *Application of an integrated CAD/CAE/CAM system for die casting dies*, Journal of Materials Processing Technology, Vol.139, p.p. 465-468., 2003.
- [4] Matin, I., Potran, M., Hadzistevic, M., Hodolic, J., Vukelic, DJ., Puskar, T., Drstvensek, I., Vrba, I.: *Development of the simulation model for casting of metal substructure of metal-ceramic crown*, Journal of Production Engineering, Vol.16., No 2., p.p. 49-53, 2013.
- [5] Matin, I., Hadžistević, M., Hodolić, J., Vukelić, Đ., Puškar, T., Potran, M., Drstvenšek, I.: *Razvoj ekspertnog sistema za projektovanje simulacionog modela metalne substrukture za metalokeramičku krunicu*, ETIKUM, p.p. 109-114, Novi Sad, FTN, Novi Sad, jun 2014.
- [6] Matin, I., Hadžistević, M., Hodolić, J., Vukelić, DJ., Puškar, T., Potran, M.: *Razvoj simulacionog modela substrukture za metalokeramičku krunicu*, ETIKUM, p.p. 79-82, Novi Sad, FTN, Novi Sad, jun 2013.
- [7] Matin, I., Hadžistević, M., Hodolić, J., Vukelić, Đ.1, Trifković, B., Potran, M., Brajliah, T.: *Primena integrisanog sistema za precizno i brzo precizno livenje u stomatologiji*, JUPITER, p.p. 91-95, Mašinski fakultet, Beograd, oktobar 2014.
- [8] Yue, Sh., Wang, G., Yin, F., Wang, Y.: *Application of an integrated CAD/CAE/CAM system for die casting dies*, Journal of Materials Processing Technology, Vol.139,

p.p. 465-468., 2003.

Autori: Dr Ivan Matin, Dr Miodrag Hadžistević, Dr Janko Hodolić, Dr Đorđe Vukelić, Univerzitet Novi Sad, Fakultet Tehničkih Nauka, Institut za Proizvodno mašinstvo, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Tel: +381 21 485 2332, Fax: +381 21 454-495.

E-mail: matini@uns.ac.rs

miodrags@uns.ac.rs

hodolic@uns.ac.rs

vukelic@uns.ac.rs

Dr Branka Trifković, Univerzitet u Beogradu, Stomatološki fakultet, Klinika za stomatološku protetiku, Rankeova 4, 11000 Beograd, Srbija, Tel: +381 11 2433 433.

E-mail: branka.trifkovic@stomf.bg.ac.rs

Dr Michal Potran, Univerzitet u Novom Sadu, Medicinski fakultet, Departman za stomatologiju, Hajduk Veljkova 12, 21000 Novi Sad, Srbija, Tel: +381 21 420 677, Fax: +381 21 662 4153

E-mail: michalpotran@gmail.com

Dr Igor Drstvenšek, Dr Tomaž Brajliah, Univerzitet u Mariboru, Mašinski fakultet, Institut za proizvodno mašinstvo, Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenija, Tel: +386 2 220 7596, Fax: +386 2 220 7996,

E-mail: igor.drstvensek@um.si

E-mail: tomaz.brajlih@um.si

ZAHVALNICA

Rezultati istraživanja prikazani u ovom radu predstavljaju deo istraživanja realizovanog na projektu: “Istraživanje i razvoj metoda modeliranja i postupaka izrade dentalnih nadoknada primenom savremenih tehnologija i računarom podržanih sistema”, TR-35020, koji finansijski podržava Ministarstvo za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj R. Srbije.

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
ETIKUM 2015

PROCEEDINGS

Session 2:
METROLOGY AND QUALITY CONTROL IN THE
PRODUCTION ENGINEERING

Novi Sad, 19 – 20 June 2015.

Bernetič, J., Kosec, G., Nagode, A., Gojić, M., Soković, M., Burzić, Z., Kosec, B.

PROTAC 500 – A NEW GENERATION OF ARMoured STEEL

Abstract: *The engineers of the biggest Slovenian steelwork ACRONI d.o.o. in cooperation with domestic and foreign institutions of science have been designed and developed a new generation of armoured steel PROTAC 500. Steel PROTAC 500 belongs to the group of high strength low alloy (HSLA) steels. It is made in steelwork ACRONI d.o.o. by the standard industrial procedures. The relevant mechanical properties of that steel are achieved by quenching and tempering.*

Preliminary tests of the mechanical properties of the steel have indicated the possibility of using steel PROTAC 500 for light armoured vehicles. The presented work studied the response of new generation armoured steel plates PROTAC 500 to the ballistic testing with armoured piercing bullets with a core of tungsten carbide, charge 7.62 mm. However, the interactions between the piercing bullets and the armoured steel plate were also investigated.

The most obvious and significant phenomena in penetrating of the piercing bullets Nammo AP8 in steel target PROTAC 500 are strain hardening of steels, the appearance of cracks and local failure, adiabatic shear bands (ASB) with related phase transformations, and melting as well as alloying at the interface between bullet and steel plate.

Key words: *steel, plate, armour protection, adiabatic shear band (ASB)*

1. INTRODUCTION

The selection of the appropriate armoured material is crucial to ensure the adequate safety and mobility transport systems [1]. When selecting or developing the appropriate materials for the armour it is necessary to achieve the best possible compromise between the required mechanical properties of materials, minimizing the density and the final price of the product [2]. With the appropriate production technology, which includes synthesis, hot forming, heat treatment, etc. [3,4]. High strength low alloy steel of good functional properties at affordable prices can be produced [5]. By improving the strength and toughness of the steel the required thickness and the weight of the steel shell is reduced [6]. Such steels are competitive to other materials for the armour [7]. In the context of this study, we carried out a ballistic test of high strength low alloy steel PROTAC 500, whose mechanical properties at testing temperature - 40 °C are collected in Table 1.

Table 1. Mechanical properties of steel PROTAC 500 at testing temperature - 40 °C

Yield strength $R_{p0.2}$	1200 MPa
Tensile strength R_m	1600 MPa
Elongation A_5	8 %
Impact toughness	20 J
Hardness	480 – 530 HB

Steel PROTAC 500 belongs to the group of high strength low alloy (HSLA) steels. It is made in

Slovenian steelwork ACRONI by the standard industrial procedures, and the relevant mechanical properties are achieved by quenching and tempering. Preliminary tests of the mechanical properties of the steel have indicated the possibility of using steel PROTAC 500 for light armoured vehicles. Ballistic testing was performed by using 7.62 mm armoured piercing bullets of the Swedish manufacturer Nammo (German standard VPAM, level 11, and the American standard STANAG 4569, Level 3), to examine the interaction between a bullet and a steel plate [8]. Armoured piercing bullets, containing the rigid core (generally of high strength steel), which results in the conversion of the total kinetic energy of the bullets to the deformation of the target. The peculiarity of this bullet is the core of tungsten carbide (WC-Co) [9].

When the bullet hits its target, first the formation of pressure waves (cyclic stress) are formed, that spread through the target material and shall be deducted from the back side of the target as tensile waves (Figure 1). These waves reinforce the material, at a certain intensity of interaction between the waves of pressure or tension and can lead to the formation of adiabatic shear bands (ASB), cracks and crack growth. The material resistance to compressive and tensile waves is improved by increasing the strength and toughness. The deformation mechanisms at low strain rate are relatively homogeneous, while at extremely high speeds they are more complex. Here it comes to the extreme strain localization in narrow bands called adiabatic shear bands (ASB). The belt is during the deformation very hot,

whereby there a transformation of the austenite phase originates, after the load it is rapidly cooled, which results in the transformation to martensite, and thus a high hardness and brittleness of the steel in the ASB occurs. The shear zones are therefore weak areas in the steel.

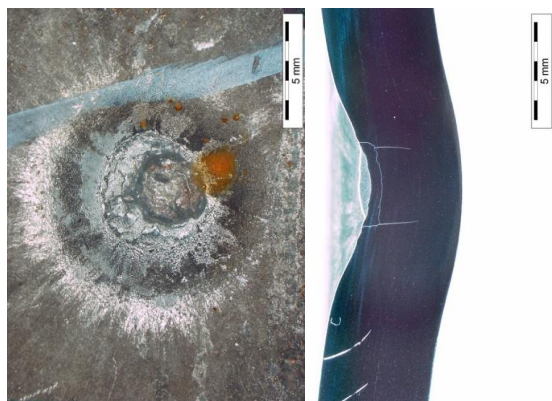


Fig. 1. Point of projectile shot (left) with cross-section of plastic deformed plate (right)

2. EXPERIMENTAL WORK

For the ballistics testing a steel PROTAC 500 testing plate with dimensions of 500 x 500 x 20.8 mm was used. Six shots were conducted under the terms of the standard VPAM and STANAG 4569 (Table 2) [9]. Nammo AP8 is the cartridge of an armoured-penetrating bullet caliber 7.62 x 51 mm (.308 Winchester) [9]. American label of the cartridge is the M993. It tends to be used against targets with light armour.

Table 2. Terms of ballistic test according to the standard VPAM and STANAG 4569 [9]

Producer	Nammo AP8
Standard	VPAM – level 11
Caliber	.308 Win
Cartridge	FMJ/PB/WC
Bullet mass	8.4 ± 0.,1 g
Bullet speed	930 ± 10 m/s
Distance from target	10 ± 0.5 m
Bullet energy	3633 J

Bullet is capable of destroying such targets by 2 to 3 times the distance from the armoured piercing of bullets with steel cores. The bullet is made up of a core of tungsten carbide, mounted in an aluminium cup shell is made of steel coated with brass.

In Table 3 are collected the properties of the bullet Nammo AP8, and image of transected cartridge and the cartridge sketch with the main dimensions [9].

Table 3. Characteristics of the billet Nammo AP8



After the ballistics test was excluded from the testing panel three testing samples were cut. The first sample was then cut in several planes perpendicular to the direction of the shot, the other two samples were cut through the penetration of bullets in a plane parallel to the direction of the shot. For the surface metallographic analysis samples were etched with an aqueous solution of ferric chloride. Prepared in this way the surface were examined by metallographic investigation methods. Analysis of macro and microstructure were performed on an optical microscope Olympus BX61. We were interested in particular areas with a different microstructure of the base and the places where the cracks and adiabatic shear bands (ASP) are found. This was followed by analysis with the scanning electron microscope (SEM) JEOL 5610 (Figure 2), which allows the observation of microstructure and qualitative and quantitative chemical analysis [10].



Fig. 2. Scanning electron microscope JEOL 5610

The images were recorded at various magnifications, especially the areas where had been ASB, cracks, pores, and where they were

traces of melting and mixing of materials [11]. Hardening of the steel plate after penetrating piercing bullets was determined by measuring the Vickers hardness (HV). The fractographic analysis of cracks that have occurred during the ballistic test, for which it was necessary to break down the samples have been done. To determine the mechanism of formation and spreading of the cracks and localized the nature of the fractured surfaces were ignoring and destroying extracts of the errors and faults at liquid nitrogen temperature.

3. RESULTS

In Figure 3 is the microstructure of the steel PROTAC 500 before the ballistic test. The microstructure consists of tempered martensite, and the hardness of such steel is 540 HV.

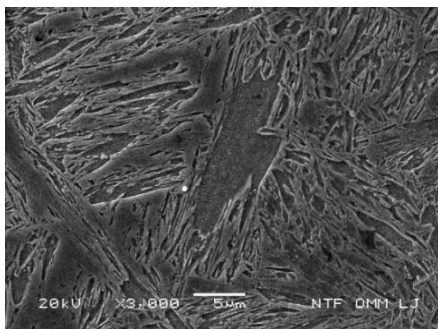


Fig. 3. The microstructure of steel PROTAC 500

In Figure 4 (left) there is a front side of the panels PROTAC 500 after ballistics testing with the markings of three samples were have cut and prepared for further analysis. All armoured piercing bullets are stopped in the plate. In interpreting the results of ballistic tests is the most important information if a bullet penetrates the target [9]. In Figure 4 (right) there is the back side of the panel after ballistic test. In none of the shots no perforation of the panel occurred.

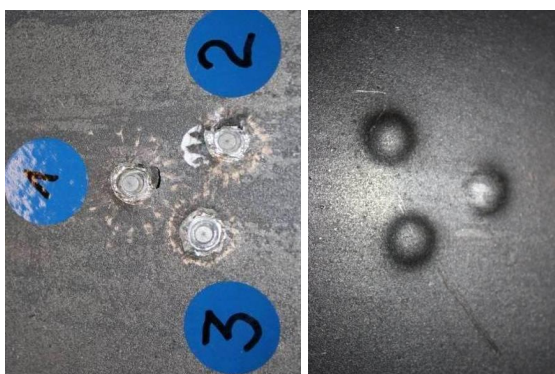


Fig. 4. Front (left) and back (right) side of the steel plate PROTAC 500 after ballistic testing – details of three shots

The testing results and descriptions of the standard VPAM are in Table 4.

Table 4. Parameters of the ballistic tests and description of the results

	Distance (m)	Shot angle (°)	Impact velocity (m/s)	Bullet energy (J)	Break trough
Sample A	10	90	929	3624.77	No
Sample B	10	90	931	3640.40	No
Sample C	10	90	937	3687.47	No

By the shot to the sample A the bulge with a crack was formed, that does not transmit light by other shots, but it was smaller bulge without cracks. For a more detailed picture of the interactions between bullets and plate the samples for metallographic analysis were prepared.

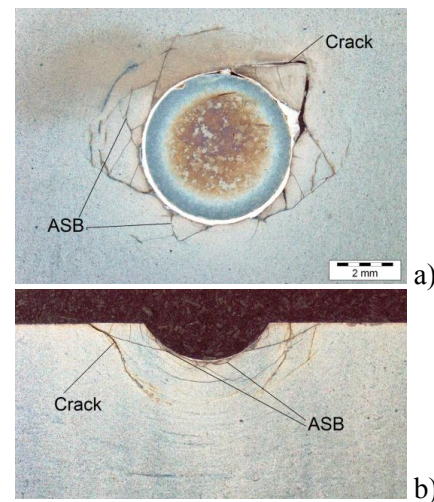


Fig. 5. Macroscopic cross-sectional images of the sample 1 (a - upper level, b - lower level)

Figure 5 consists of a macro-picture of two analytical levels of sample C cross-sections. In Figure 5a there is a cross-sectional view of the upper level of the sample, where there are a significant number of cracks, and branched adiabatic shear bands which extend from the border between the envelope bullets (bright narrow band around the circumference of the core) and the base material towards the interior of the target. In Figure 5b is a half cross-sectional view of the lower level of the sample. At this level it is less ASB and cracks and at the same time do not go so far into the interior of the target. Most of the kinetic energy of the projectile to the lower level is already spent.

Figure 6 shows the macro-picture breakthroughs balls on the analysis of sample C, giving examples of cracks and ASB. In the area between the ball and the lower edge of the steel plate they have cracks in the form of a pin. Breakthrough with pin is a common mechanism of penetration through

the high strength steels in which the phenomenon of ASB has an important role. The formation of the plug occurs when the thickness of the target is approaching to the diameter of the bullet. Notice also that the bullet after a stoppage due to elastic deformation and the target are slightly separated.

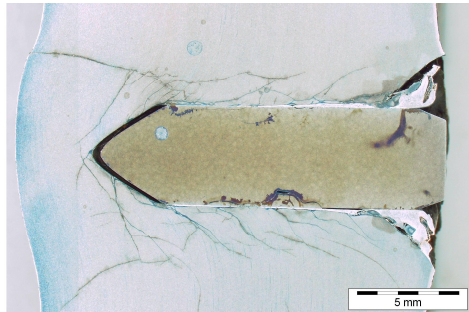


Fig. 6. Macroscopic picture of breakthroughs bullet through the sample C

For the sample C we have also measured the length of the cracks and ASB. The average length of the cracks on the sample C is 3.9 mm, the average length of the ASB was 4.3 mm, which indicates a very high-speed deformation.

4. CONCLUSIONS

The research analyzed the ballistic properties of armour steel plate PROTAC 500 against armoured piercing bullets caliber 7.62 mm.

The most obvious and significant phenomena in penetrating of the piercing bullets Nammo AP8 in steel plate (target) PROTAC 500 are:

1. strain hardening of steels,
2. the appearance of cracks and local failure,
3. adiabatic shear bands (ASP) and related phase transformations: austenitic, martensitic, melting, solidification, and
4. melting and alloying at the border of the bullet /steel of the plate (target).

References

- [1] Hu, C.J., Lee, P.W.: *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 25 (2002) 1, 99 – 107.
- [2] Dobrzanski, L.A.: *Technical and Economical Issues of Materials Selection*, Silesian Technical University, Gliwice, 1997.
- [3] Thelning, E.K.: *Steel and its Heat Treatment*, Butterworths, London, 1984.
- [4] Bernetič, J., Bradaškja, B., Kosec, G., Bricelj, E., Kosec, B., Vodopivec, F., Kosec, L.: *Metalurgija*, 49 (2010) 1, 29-32.

- [5] Trajkovski, J., Kunc, R., Pepel, V., Prebil, I.: *Materials and Design*, 66 (2015), 37–45.
- [6] Iqbal, M.A., Sentil, K., Bhargava, P., Gupta, N.K.: *International Journal of Impact Engineering*, 78 (2015), 98-111.
- [7] Jocić, B.: *Steels and Cast Irons*, BIO-TOP, Dobja Vas, 2008.
- [8] Kilic, N., Bedir, S., Erdik, A., Ekici, B., Tasdemirici, A., Guden, M.: *Materials and Design*, 63 (2014), 427-438.
- [9] NATO standard - STANAG 4569. Protection levels for Occupants of Logistic and Light Armoured Vehicles, NATO AEP-55, 2013.
- [10] Kosec, G., Nagode, A., Budak, I., Antic, A., Kosec, B.: *Engineering Failure Analysis*, 18 (2011) 1, 450-454
- [11] [Børvik](#), T., Dey, S., [Clausen](#), A.H.: [International Journal of Impact Engineering](#), 36 (2009) 7, 948–964.

Authors: Dr. Jure Bernetič, Assist. Prof. Dr. Gorazd Kosec, ACRONI d.o.o., c. B. Kidriča 44, 4290 Jesenice, Slovenia, Phone.: +386 4 5841016, Fax: +386 4 5841003. **Prof. Dr. Borut Kosec, Assist. Prof. Dr. Aleš Nagode**, University of Ljubljana, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenia, Phone.: +386 1 2000410, Fax: +386 1 4704560. **Prof. Dr. Mirko Gojić**, University of Zagreb, Faculty of Metallurgy, Aleja narodnih heroja 3, 44103 Sisak, Croatia, Phone.: +385 44 533378, Fax: +385 44 533381. **Prof. Dr. Mirko Soković**, University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenia, Phone.: +386 1 4771214, Fax: +386 1 4771218. **Prof. Dr. Zijah Burzić**, Military Institute VTI, R. Resanovića 2, 10000 Belgrade, Serbia, Phone.: +381 11 2508774, Fax: +381 11 2508702.

E-mail: jure.bernetic@acroni.si
gorazd.kosec@acroni.si
ales.nagode@omm.ntf.uni-lj.si
mgojic@simet.hr
mirko.sokovic@fs.uni-lj.si
zijah_burzic@vektor.net
borut.kosec@omm.ntf.uni-lj.si

UTICAJ STANDARDIZACIJE I METROLOGIJE NA KONKURENTNOST

Rezime: Standardizacija i metrologija su deo infrastrukture kvaliteta, do sada uglavnom posmatrane kao obavezan zahtev i trošak. Međutim, one mogu biti osnova za unapređenje konkurentnosti.

U radu je ukazano na kritične aspekte standardizacije i metrologije na konkurentnost organizacija i nacionalnih ekonomija. Na kraju rada, na primeru CE znaka za mašinu, dati su uticaji na konkurentnost.

Ključne reči: standardizacija, metrologija, konkurentnost, organizacija, CE znak

1. UVOD

Model konkurentnosti se razvijao sa jačanjem globalizacije. Razlikuju se individualna konkurentnost, konkurentnost organizacije, regionalna konkurentnost i konkurentnost država. Prema modelu Portera [1] snage koje upravljaju konkurencijom u jednoj oblasti su:

- snaga dobavljača,
- snaga kupaca,
- opasnost od novih konkurenata,
- opasnost od supstituta proizvoda ili usluga.

Da bi opstala organizacija i privredni sektor (npr. industrija) mora da manevriše i pozicionira se među postojećim konkurentima.

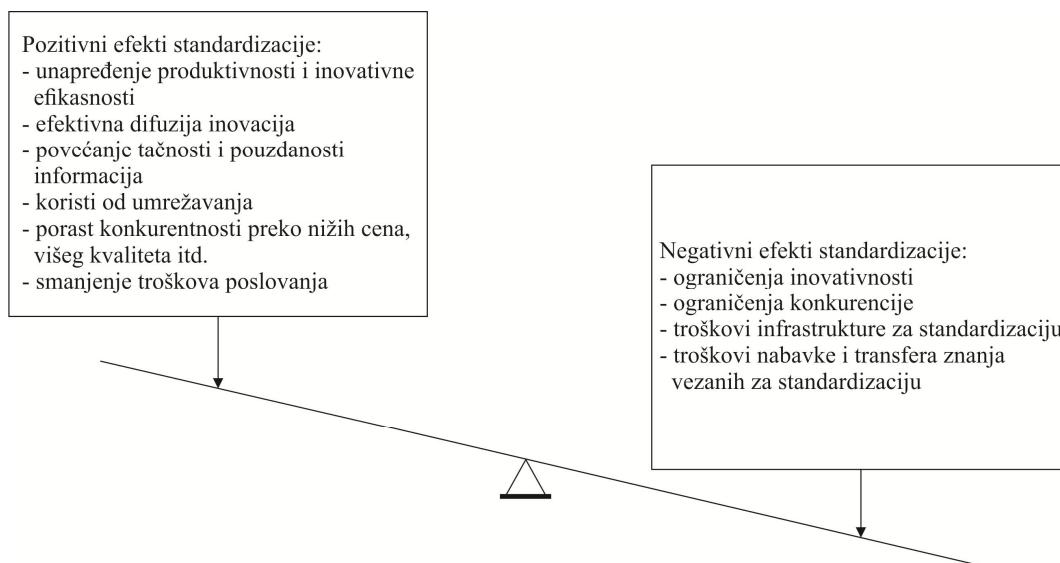
Standardizacija i metrologija su uređeni sistemi, na internacionalnom i nacionalnom nivou. Sa aspekta konkurentnosti oni imaju pozitivne i

negativne efekte. Do sada su uglavnom ovi sistemi posmatrani kao nezaobilazan deo infrastrukture kvaliteta, koji je otežavao poslovanje, trošio vreme i druge resurse i time smanjivao konkurentnost. Cilj ovog rada je da ukaže na drugi, suprotan pogled – pozitivan uticaj na konkurentnost.

U radu je ukazano na kritične aspekte standardizacije i metrologije na konkurentnost organizacija i nacionalnih ekonomija. Na kraju rada, na primeru CE znaka za mašinu, dati su uticaji na konkurentnost

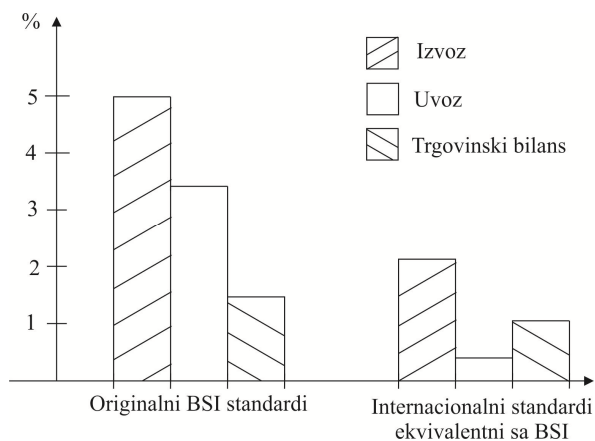
2. STANDARDIZACIJA I KONKURENTNOST

Standardizacija ima pozitivne i negativne efekte (Sl. 1).



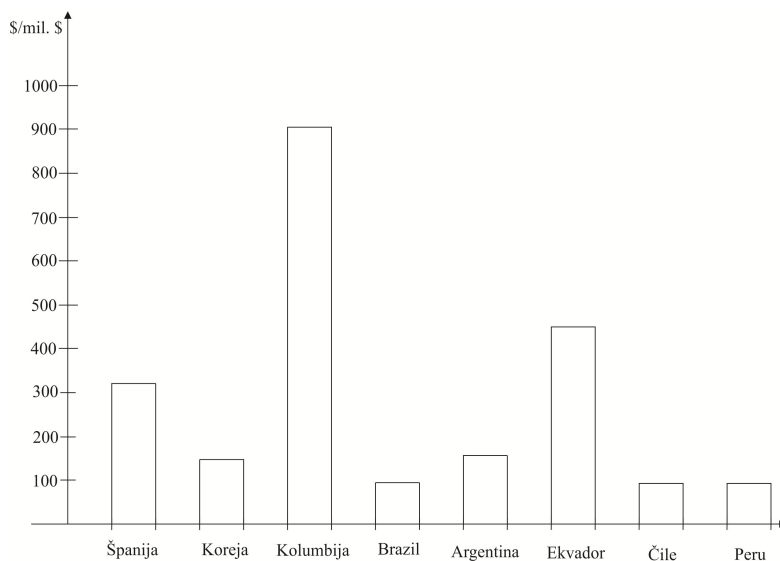
Sl. 1 Pozitivni i negativni efekti standardizacije

Ovi efekti se mogu iskazati preko uticaja na produktivnost (Sl. 2).



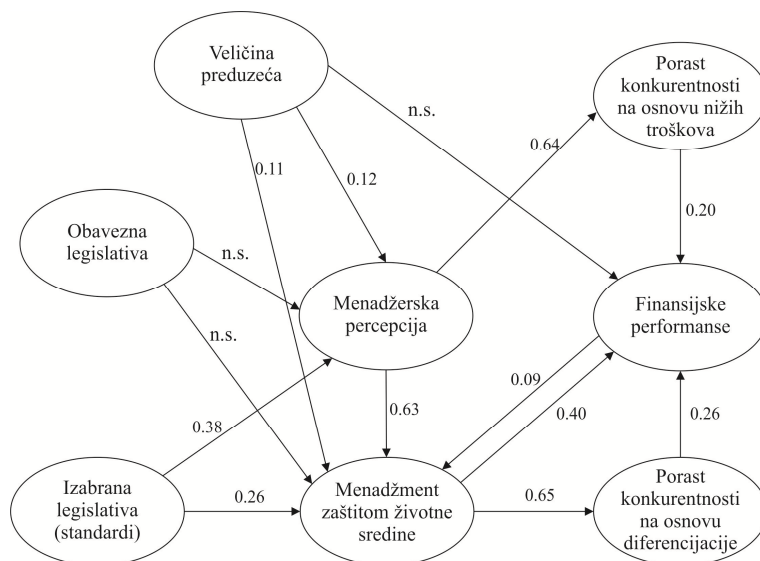
Sl. 2 Uticaj BSI standarda na trgovinu [2]

Ove analize na globalnom nivou ukazuju na pozitivni uticaj standardizacije na konkurentnost. Nivo ovog uticaja zavisi od organizovanja nacionalnih tela za standardizaciju i korespondentnih troškova i aktivnosti (Sl. 3).



Sl. 3 Odnos budžeta nacionalnih tela za standardizaciju u odnosu na milion dodatne vrednosti proizvodnje [3]

Na nivou organizacije (npr. industrijskog preduzeća) analiza ovog uticaja mora sprovesti na osnovu razvijenog dinamičkog modela. Na sl. 4 prikazan je uticaj primene standarda i logistike u oblasti zaštite životne sredine na konkurentnost preduzeća u Španiji [4].



Sl. 4 Uticaj primene standarda i legislative u oblasti zaštite životne sredine na konkurentnost preduzeća u Španiji

Utvrđeno je da postoji porast konkurentnosti po osnovu nižih troškova i diferencijacije u odnosu na druga preduzeća u sektoru. Sve to utiče na finansijske performanse. Najveći uticaj ima menadžment zaštitom životne sredine (faktor 0.40), a na isti utiču standardi (faktor 0.26).

U tabeli 1 prikazani su rezultati jedne studije [2] o uticaju eko-inovacija zasnovanih na primeni standarda i obavezne legislative u Nemačkoj.

Eko inovacije u preduzećima			Veličine kontrolnih varijabli	
Uticaj u preduzećima	Korišćenje energije	-0,88 (-1,79)	Veličina preduzeća	0,0 (0,07)
	Emisija CO ₂	0,02 (0,50)	Interna kooperacija	0,14 (3,56)
	Zagađenje vode	0,04 (0,067)	Interna istraživanja	0,09 (2,19)
	Buka	-0,04 (-0,78)	Dalje obrazovanje	0,09 (2,51)
	Opasne supstance	-0,03 (-0,058)	Intenzitet investiranja	0,00 (2,29)
	Recikliran materijal, voda ili otpad	-0,09 (-2,20)	Intenzitet konkurencije	-0,09 (-2,36)
Inovacije proizvod	Ušteda energije pri proizvodnji proizvoda	0,08 (1,85)	-	
	Reciklaža	0,22/0,49	-	
	Emisija u životnu sredinu	0,01 (0,14)	-	

Tabela 1 Uticaj eko-inovacija na prihod u Nemačkoj 2009

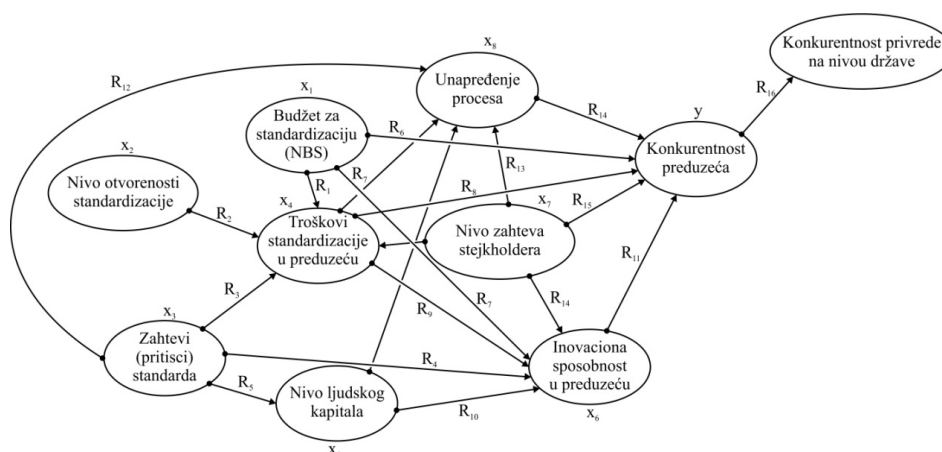
3. UTICAJ METROLOGIJE NA KONKURENTNOST

Uticaj metrologije na konkurentnost je analogan uticaj standarda. Primenom metroloških procedura u preduzećima i mreži metroloških laboratorija potvrđuje se željeni kvalitet proizvoda, čime se ostvaruje pozitivan efekat na:

- bezbednost proizvoda,
- potrošnju materijala i energije,

- životnom sredinom,
- diferencijaciju proizvoda,
- diseminacijom inovacija,
- efektivnost informacionih tokova,
- kompetentnost zaposlenih.

Konačan efekat se izražava uticajem na nivo konkurentnosti preduzeća i nacionalne ekonomije. Na sl. 5 prikazan je model uticaja metroloških aktivnosti na konkurentnost.



$$x_4 = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3$$

Sl. 5 Model uticaja standardizacije na konkurentnost

U ovom modelu, metrološke aktivnosti su grupisane na nivou nacionalnih tela za metrologiju i preduzeća. Izlaz je konkurentnost preduzeća, koja preko modela regionalne i nacionalne konkurentnosti [5], utiče na konkurentnost države.

Da bi se ovaj model verifikovao, potrebno sprovesti istraživanje na nivou Srbije i utvrditi signifikantnost relacija R1-R16.

Na pojedinačnom nivou, uticaj standardizacije i metrologije na konkurentnost je jednostavnije utvrditi, što je opasnost u narednom poglavlju.

4. UTICAJ REDIZAJNA MAŠINA NA KONKURENTNOST

Redizajn mašina se vrši kao rezultat potreba tržišta ili zakonske legislative, pre svega zahteva bezbednost proizvoda pri korišćenju.

Za izvoz na EU i druga tržišta neophodno je da proizvod bude usklađen sa direktivama i standardima. Zahtevi, pre svega harmonizovanih standarda, upućuju preduzeće da ispita usaglašenost proizvoda i sprovede, ukoliko je to neophodno, odgovarajuća metrološka ispitivanja u akreditovanim i ovlašćenim laboratorijama. To praktično znači da svaki proizvod mora, kao uslužni paket da se redizajnira zbog potreba, usaglašavanja sa EU direktivom i standardima.

Za jedno domaće preduzeće od 80 zaposlenih koje proizvodi mašine za izradu i pakovanje marama, pokazani su efekti standardizacije i metrologije na konkurentnost, mereno primenom cost/benefit metode.

Primer 1

Primena direktiva i standarda za redizajn mašina

Troškovi:

(1) nabavke standarda	300
(2) kons. usluge u vezi transpozicije zahteva standarda	1.500
(3) redizajna elemenata mašine u vezi zahteva standarda	25.000
(4) obuke zaposlenih u vezi primene Novog pristupa za CE znak	500
(5) izrada tehničkog fajla za mašinu	5.500
(6) izrada novih procedura i uputstava za IMS	1.200
(7) ispitivanja u akr. Laboratorijama u vezi primene standarda	3.500
(8) notifikacija	4.500
Ukupno	42.000

Povećanje prihoda na osnovu:

- (1) povećane cene po komadu mašine 60.000
- (2) obima proizvodnje mašina sa 15 na 25
- (3) porasta imidža na tržištu
- (4) međunarodne koperacije
- (5) smanjenje uticaja na životnu sredinu i bezbednost na radu

Rezultati za 3 godine:

- (1) povećane dobiti za 80%
- (2) povećanje broja zaposlenih za 40% (sa 2 na 3 smene)
- (3) povećanje investicije u novi pogon (cca 1 milion €)

- (4) povećanje društvene odgovornosti i poslovne izvrsnosti (cca 50%)
- (5) povećanje uticaja na lokalnu zajednicu (cca 20%)
- (6) procenjeno povećanje konkurentnosti za 30%
- (7) porasta imidža na tržištu
- (8) međunarodne koperacije
- (9) smanjenje uticaja na životnu sredinu i bezbednost na radu

$$\frac{\text{Benefiti}}{\text{Troškovi}} = \frac{\text{Ekonomski benefit}}{\text{Troškovi}} + \frac{\text{Ostali benefiti}}{\text{Troškovi}} = \frac{30 \text{ maš.} \times 60.000 \text{ €/maš.}}{42.000} + \frac{\text{Ostali benefiti}}{42.000} = 42.8 + \frac{\text{Ostali benefiti}}{42.000}$$

5. ZAKLJUČAK

Iz prethodnog se može izvući opšti zaključak da standardizacija i metrologija imaju uticaj na konkurentnost preduzeća i privrede u celini. Na osnovu prethodnih istraživanja i simulacije može se utvrditi kombinacija uticajnih veličina i primenom cost/benefit metode definisati očekivani nivo efektivnosti.

6. REFERENCE

- [1] Lopez – Gamero M., Molina – Azornih J., Claver – Cortes E., *The potential of environmental regulation to change managerial perception, environmental management, competitiveness and financial performance*, Journal of Cleaner Production 18 (2010) 963-974
- [2] Penckert J., *What shapes the impact of environmental regulation on competitiveness? Evidence from Executive Opinion Surveys*, Environmental Innovation and Societal Transitions 10 (2014) 77-94
- [3] Sanjuan M., Zaragoza A., Agua J., *Standardization for an innovative world*, Cement and Concrete research, 41 (2011) 767-774
- [4] Otero M., *Standardization in the Spanish Economy*, Economical Studies Institute Report, March, 2011, 89 pp.
- [5] CEN & CENELEC, STAIR – INOVATION: *An Integrated Approach for Standardization*, Innovation & Research, Ed. Brodthagen E., 2010

Autor: Prof. dr Slavko Arsovski

Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, Ul. Sestre Janjić br. 6, 34000 Kragujevac, Srbija

E-mail: cqm@kg.ac.rs

Škorić B. and Schrittwieser R.

CHARACTERIZATION AND SYNTHESIS OF THIN FILMS

Abstract: *In this paper, we present the results of a study of thin films which are deposited by a Physical Vapor Deposition and Ion Beam Assisted Deposition. In the present investigation the subsequent ion implantation was provided with N^{2+} ions. A variety of analytic techniques were used for characterization, such as scratch test, calo test, nanoindentation, SEM, AFM, XRD and EDAX. The functionality and reliability of these structures depend on the ability to control dimensions and chemistry with high precision; techniques for measuring and analyzing them must have similar or better precision. This paper therefore focuses on practical aspects of measurement science and fundamental limits based on basic physical and chemical principles.*

Key words: *measurement, thin films, synthesis, materials,*

1. INTRODUCTION

The film deposition process exerts a number of effects such as crystallographic orientation, morphology, topography, densification of the films. The optimization procedure for coated parts could be more effective, knowing more about the fundamental physical and mechanical properties of a coating. A duplex surface treatment involves the sequential application of two surface technologies to produce a surface composition with combined properties [1]. A typical duplex process involves plasma nitriding and the coating treatment of materials. In the paper are presented characteristics of hard coatings deposited by PVD (physical vapour deposition) and IBAD (ion beam assisted deposition). The synthesis of the TiN film by IBAD has been performed by irradiation of Ar ions. Subsequent ion implantation was provided with N^{2+} ions. Thin hard coatings deposited by physical vapour deposition (PVD), e.g. titanium nitride (TiN) are frequently used to improve tribological performance in many engineering applications [2,3]. The combination of nitriding and hard coating allows the production of duplex coatings, which are distinguished by a high resistance against complex loads, since the advantages of both individual processes are combined here.

In the nanoindentation technique, hardness and Young's modulus can be determined by the Oliver and Pharr method [4].

3. EXPERIMENTAL

The substrate material used was high speed steel type M2. Prior to deposition the substrate was mechanically polished to a surface roughness of

0.12 μm (R_a). The specimens were first austenitized, quenched and then tempered to the final hardness of 850 HV. In order to produce good adhesion of the coating, the substrates were plasma nitrided at low pressure (1×10^{-3} Pa), prior to deposition of the coating. The PVD treatment was performed in a Balzers Sputron installation with rotating specimen. The deposition parameters were as follows. Prior to entering the deposition chamber the substrates were cleaned. The other samples were produced with IBAD technology in DANFYSIK chamber. The IBAD system consists of an e-beam evaporation source for evaporating Ti metal and 5-cm-diameter Kaufman ion source for providing argon ion beam. Base pressure in the IBAD chamber was 1×10^{-6} mbar. The ion energy ($E_{\text{Ar}}=1.5-2$ keV), ion beam incident angle (15°), target to substrate distance $d_s-t=360$ mm, and substrate temperature $T_s=200$ °C, were chosen as the processing variables. Deposition rate $a_D=0.05-0.25$ nm/s. Quartz crystal monitor was used to gauge the approximate thickness of the film. Additional analyze the thickness of coatings, the ball crater method (calo-test), allows prompt and sufficiently precise results to be obtained.

A pure titanium intermediate layer with a thickness of about 50nm has been deposited first for all the coatings to enhance the interfacial adhesion to the substrates. After deposition, the samples were irradiated with 120 keV, N^{2+} ions at room temperature (RT). The Ion Source is a multiply charged heavy ion injector, based on the electron cyclotron resonance effect (ECR). The implanted fluencies were in the range from 0.6×10^{17} to 1×10^{17} ions/cm².

The Nano-Hardness tester uses an already established method where a Berkovich indenter tip

with a known geometry is driven into a specific site of the material to be tested, by applying an increasing normal load. The NHT is especially suited to load and penetration depth measurements at nanometer length scales. The analysis of the indents was performed by Atomic Force Microscope (AFM). The analyzed AE signal was obtained by a scratching test designed for adherence evaluation. Scratch tests were performed under controlled conditions with a device that consisted of a loaded probe with a diamond indenter moving linearly along the sample with a constant speed and continuously increasing force. Detection of elastic waves generated as a result of the formation and propagation of micro cracks. The AE sensor is insensitive to mechanical vibration frequencies of the instrument. This enables the force fluctuations along the scratch length to be followed, and the friction coefficient to be measured. The scratch tester equipment with an acoustic sensor (CSM-REVETEST) was used.

X-ray diffraction studies were undertaken in an attempt to determine the phases present, and perhaps an estimate of grain size from line broadening. The determination of phases was realized by X-ray diffraction using PHILIPS APD 1700 X-ray diffractometer. The X-ray sources were from $\text{CuK}\alpha$ with wavelength of 15.443 nm (40 kV, 40 mA) at speed $0.9^\circ/\text{min}$. The surface roughness was measured using stylus type (Talysurf Taylor Hobson) instruments. The most popular experimental XRD approach to the evaluation of residual stresses in polycrystalline materials is the $\sin^2\psi$ method. The method requires a θ - 2θ scan for every ψ angle around the selected diffraction peak and, in order to emphasize the peak shifts, it is important to work at the highest possible 2θ angle.

4. RESULTS

The nitrogen to metal ratio, EDX, Tab.1, is stoichiometries for IBAD technology and something smaller from PVD. For sample with additional ion implantation, value is significantly different, smaller.

Table 1. Atomic ratio N/Ti in coating.

	Coating	Ratio N/Ti (atomic)
1	IBAD	1.00
2	PVD	0.98
3	PVD/II	0.89

It is possibly diffused from the layer of TiN to the interface. The TiN coatings only show a golden surface and after ion implantation the color is dark golden.

All the results of nanohardness are obtained with the Oliver & Pharr method and using a supposed sample Poisson's ratio of 0.3 for modulus calculation.

The analysis of the indents was performed by Atomic Force Microscope (Fig. 1). It can be seen, from cross section of an indent during indentation, that the indents are regularly shaped with the slightly concave edges typically seen where is significant degree of elastic recovery.(Fig. 2).

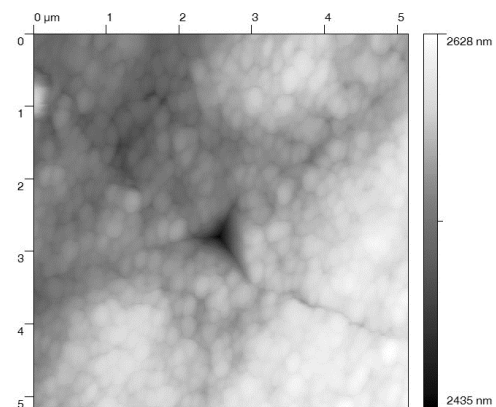


Figure 1. AFM image of crack paths from nano-indentation.

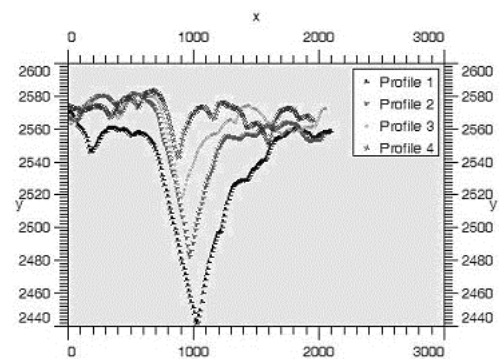


Figure 2. Cross-section of the indentation

The nanohardness values and microhardness are shown in Tab. 2.

Table 2. Surface microhardness ($\text{HV}_{0.03}$) and nanohardness (load-10mN).

Unit	pn/IBAD	PVD	pn/PVD/II	Silica
Vickers	2007	3028	3927	943
GPa	21.6	32.6	42.6	10,1

For each measurement, the penetration (Pd), the residual penetration (Rd), the acoustic emission (AE) and the frictional force are recorded versus the normal load. The breakdown of the coatings was determined both by AE signal analysis and optical and scanning electron

microscopy.

AE permits an earlier detection, because the shear stress is a maximum at certain depth beneath the surface, where a subsurface crack starts. Critical loads are presents in Tab. 3.

Table 3. Critical load of coating.

	<i>pn/TiN(IBAD)</i>	<i>pn/TiN(PVD)</i>
Lc1	-	23
Lc2	100	54
Lc3	138	108

The critical load Lc1 corresponds to the load inducing the first crack on the coating. No cracks were observed on sample 1. The critical load Lc2 corresponds to the load inducing the partial delamination of the coating. The critical load Lc3 corresponds to the load inducing the full delamination of the coating.

It was found that the plasma-nitriding process enhanced the coating to substrates adhesion. In some places of hard coatings cohesive failure of the coating and the delamination of the coating were observed, Fig. 3.

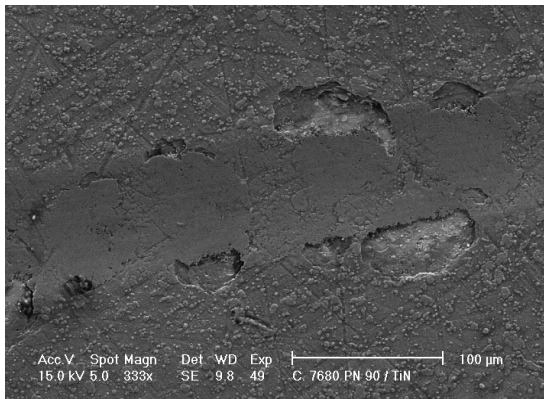


Figure 3. SEM Micrograph of scratch test of duplex coating, pn/TiN(PVD).

The errors related to the measurements and estimations were different and for duplex coating with ion implantation is less than 4%. Good agreement could be achieved between the E_c values and nanohardness.

The tribological behavior of the coatings was studied also by means of pin-on-ring contact configuration in dry sliding conditions, described elsewhere. The friction coefficient of sample with duplex coating with additional ion implantation, is presented in Fig. 4.

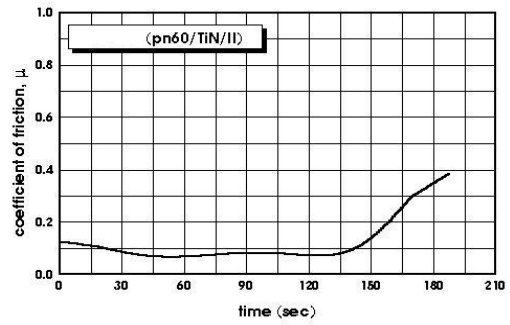


Figure 4. Friction coefficient of duplex TiN coatings with ion implantation.

The width of column is derived from the width of the diffraction peaks (Fig. 5), ($\lambda=0.154\text{nm}$, $\theta=62.5^\circ$ and $\beta=0.056\text{rad}$), and it is 70 nm.

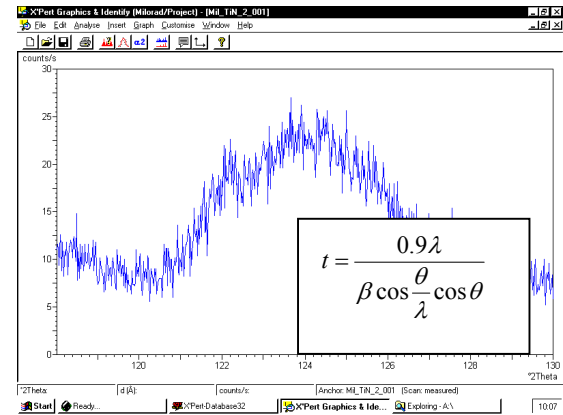


Figure 5. XRD diffraction peak of TiN (422).

The stress determination follows the conventional $\sin^2\psi$ method. Stress determination was performed using a PHILIPS XPert diffractometer. The (422) diffraction peak was recorded in a 2θ interval between 118° and 130° , with tilting angle: $\psi_0^1=0^\circ$, $\psi_0^2=18.75^\circ$, $\psi_0^3=27.03^\circ$, $\psi_0^4=33.83^\circ$, $\psi_0^5=40^\circ$. A typical result for compact film, with residual stresses $\sigma = -4.28\text{Gpa}$, has TiN(PVD).

5. DISCUSSION

A hardness increase is observed for implanted samples. This can be attributed to iron nitride formation in the near surface regions. The standard deviation of the results is relatively important due to the surface roughness of the samples. Because the thickness of the TiN coatings presented here is sufficiently large, which for all coatings is about 2900 nm (TiN-PVD), the hardness measurements will not be affected by the substrate, as in three times thinner (900 nm TiN-IBAD).

The wear resistance of the TiN coating was obviously improved by the presence of a nitride interlayer. Such an improvement is probably due to the adequate bonding between the nitrated layer and substrate. Energy dispersive analysis with X-ray (EDAX), of the transfer layer showed that the transfer layer consists of small amount of counter material (adhesive wear), Fig. 6.

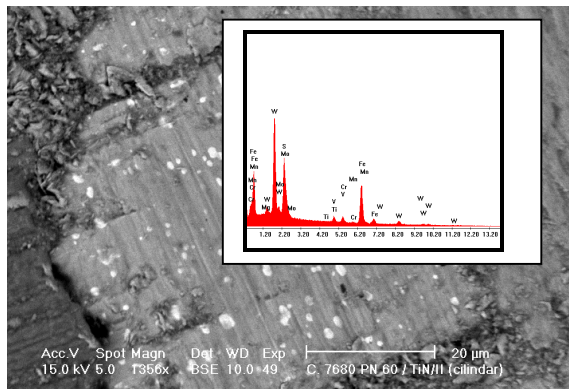


Figure 6. SEM micrograph of wear track (BSE), with EDAX image of wear debris.

The PVD coating process did not significantly change roughness. For the practical applications of IBA coatings, it is important to know that the roughness of the surface decreased slightly after deposition (from $R_a=0.19 \mu\text{m}$ to $R_a=0.12 \mu\text{m}$).

The curves of friction coefficient are clearly reproducible and distinctively show a lower rise in friction coefficient for the composite (pn/TiN) coated specimens and much more for sample with additional ion implantation (under 0.1). It is generally expected that an increase in hardness results in an increase in wear resistance.

The formation of TiN by IBA has its origin in a kinetically controlled growth. The nitrogen atoms occupy the octahedral sites in varying number according to the energy that these atoms possess to cross the potential barriers created by the surrounding titanium anions. The ion bombardment is believed to enhance the mobility of the atoms on the sample surface. XRD analysis revealed the presence of only one phase, δ -TiN, and there is no evidence for other phases, such as Ti_2N , could be found. The ϵ - Ti_2N does not lead to an improvement in the tribological behavior.

The coating morphology was evaluated using the well-known structure zone model of Thornton. It has been suggested that the transition from open porous coatings with low micro hardness and rough surface, often in tensile stress to dense coatings films with greater micro hardness, smooth surface occurs at a well defined critical energy delivered to the growing film.

3. CONCLUSIONS

The advanced measuring techniques are very important in the surface metrology for understanding the properties of the objects quality, design purposes, diagnostics, and high throughput screening.

Nitrogen ion implantation leads to the formation of a highly wear resistant and hard surface layer.

The present coating method can produce dense structures, high hardness and the high critical load values can be achieved. Tribological tests confirm that these composite coatings are wear resistant and provide very low friction coefficient

Acknowledgements

The authors would like to thank to The Provincial Secretariat for Science of Vojvodina supported this work by grant.

REFERENCES

- [1]. Zheng Y.Sun, T.Bell and J.M. Smith, Mechanical properties microprobing of TiN coatings deposited by different techniques, *The Fourth European Conference on Advanced Materials* 177, 1995.
- [2]. V. Nelea, C.Ristoscu, C. Ghica, I. Mihailescu, P. Mille, Hydroxyapatite thin films growth by pulsed laser deposition: effects of the Ti alloys substrate passivation on the film properties by the insertion of a TiN buffer layer, *Sixth Conference on Optics 2000*, Bucharest, Romania, 247, 2000.
- [3]. J.A. Batista, C. Godoy, A. Matthews, A. Leyland, Process Developments Towards Producing Well Adherent Duplex PAPVD Coatings, *Surface Engineering*, 9, 37, 2003.
- [4]. M. Pharr, D.S. Harding, W.C. Oliver, in: M. Nastasi et al. Mechanical Properties and Deformation Behavior of Materials Having Ultra-Fine Microstructures, *Kluwer, Dordrecht*, pp. 449, 1993.

Authors:

Prof. Dr. Branko Škorić, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Department for Production Engineering, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Phone.: +381 21 485 2342, Fax: +381 21 454-495.

E-mail: skoricb@uns.ac.rs

Univ.-Prof. Roman Schrittwieser, Institute for Ion Physics and Applied Physics Leopold-Franzens University of Innsbruck, Technikerstr. 25, A-6020 Innsbruck, Austria

Žutković, M., Vilotić D., Skakun, P.

**MEHANIČKI PRORAČUN KALUPA ZA INJEKCIONO PRESOVANJE MASKE
ELEKTRO-UTIČNICE**

Rezime: Projektovanje alata za injekciono presovanje obuhvata između ostalog reološki, toplotni i mehanički proračun. Takođe je potrebno uraditi i numeričku simulaciju procesa kako bi se uočili eventualni konstrukcioni nedostaci kalupne šupljine. Ovakav pristup je neophodan za dobijanje optimalne konstrukcije kalupa. U ovom radu prikazan je mehanički proračun i konstrukcija kalupa za injekciono presovanje polimernog otpreska maske elektro-utičnice kao elementa većeg proizvoda elektro-utičnice.

Pri razvoju proizvoda i kalupa prikazanih u ovom radu korišćeni su računarski programi Pro/Engineer Wildfire 4.0, HASCO Digital Catalogue za izbor standardnih elemenata kalupa, kao i računarski program Moldflow Plastics Advisers za simulaciju punjenja kalupne šupljine.

Ključne reči: injekciono presovanje, konstrukcija kalupa, mehanički proračun, termoplast

1. UVOD

Injekciono presovanje polimera ciklički je postupak praoblikovanja ubrizgavanjem polimernog materijala potrebne smičuće viskoznosti iz jedinice za pripremu i ubrizgavanje u temperiranu kalupnu šupljinu. Posebna pažnja se uvek mora posvetiti projektovanju kalupa jer on predstavlja specifični, središnji, vitalni i najkomplikovaniji deo sistema za injekciono presovanje polimera. Konstrukcija kalupa kod injekcionog presovanja otpreska od termoplasta od izuzetne je važnosti za visokokvalitetnu proizvodnju i racionalno vođenje procesa. Odlučujući uticaj na ekonomičnost postupka prerade imaju kvalitet i konstrukcija kalupa. U svrhu racionalizacije i optimizacije izrade odgovarajućeg otpreska, potrebno je uložiti maksimalan trud u konstruisanje kalupa. Primena računara i odgovarajućih računarskih programa omogućuju da se ti zahtevi i ostvare. Prilikom dimenzionisanja kalupa, posebna pažnja se posvećuje analitičkom proračunu koji obuhvata reološki, toplotni i mehanički proračun. U ovom radu prikazan je mehanički proračun kalupa za injekciono presovanje maske elektro-utičnice.

Pri razradi proizvoda i kalupa prikazanih u ovom radu korišćeni su sledeći softverski paketi: PRO/ENGINEER Wildfire 4.0, zatim HASCO digitalni katalog - baza standardnih delova i kućišta kalupa, a za simulaciju punjenja kalupne šupljine softverski paket Plastics Advisers proizvođača Moldflow.

2. PRORAČUN KALUPA

U okviru proračuna kalupa potrebno je uraditi

tri bloka analitičkih proračuna: reološki, toplotni i mehanički. Pre analitičkih proračuna potrebno je uraditi numeričku simulaciju injekcionog presovanja dela za koji se konstruiše alat, u ovom slučaju to je maska elektro-utičnice (sl.1).



Sl. 1. Elektro-utičnica (spoljni element je maska)

Za izradu maske previden je postupak injekcionog presovanja, a materijal od kojeg se maska izrađuje je blenda, odnosno mešavina (termoplastična legura) polikarbonata i akrilonitril butadien stirena (PC/ABS). Izabran je materijal trgovačke oznake C2950FR proizvođača GE Plastics (Europe) [3]. Reč je o termoplastu sa amorfnom strukturom namenjenom proizvodima elektro, elektronske i autoindustrije, kod kojih se zahteva dobar izgled površine uskladjen sa dovoljnom čvrstoćom i krutošću.

2.1 Mehanički proračun kalupa

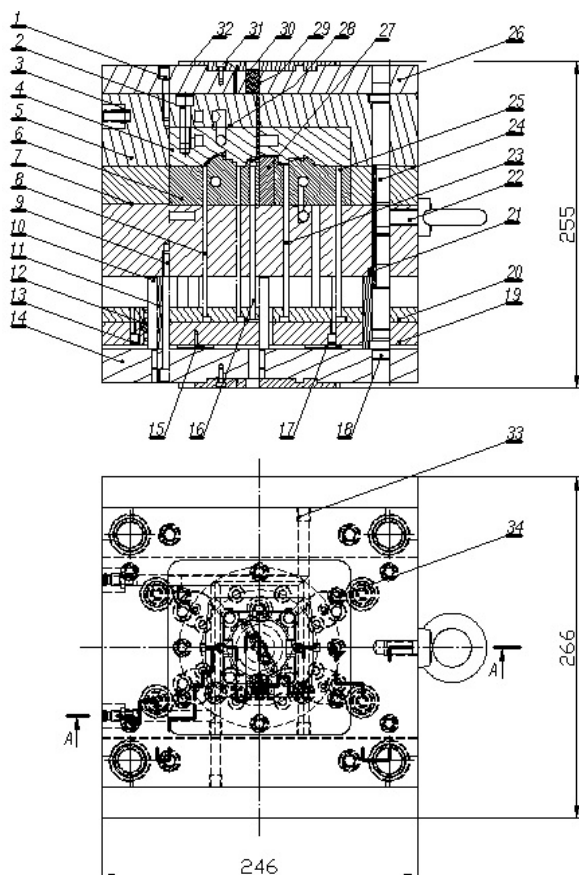
U okviru mehaničkog proračuna kalupa potrebno je proračunati kinematiku kalupa i odrediti mere i deformacije pojedinih elemenata kalupa koji su mehanički opterećeni.

2.1.1. Proračun kinematike kalupa

Pri proračunu kinematike kalupa potrebno je odrediti hod otvaranja kalupa koji osigurava nesmetano vađenje otpreska iz kalupa. Pri tome treba voditi računa o maksimalnom razmaku između steznih ploča mašine za injekciono presovanje, kako bi se kalup mogao stegnuti između njih, i otvoriti za potreban hod. Potrebno je proračunati i hodove elemenata za vađenje otpreska. Hod otvaranja kalupa određuje se prema jednačini (1):

$$h_{OK} = h_g + h_{op} + h_d = 63 + 11 + 5 = 79 \text{ mm} \quad (1)$$

gde su: h_{OK} - potrebno otvaranje kalupa (mm), h_g - visina grozda (mm), h_{op} - visina otpreska u pokretnom delu kalupa (mm), h_d - dodatno otvaranje kalupa (mm). Sa projektne skice, odnosno sa sklopnog crteža kalupa moguće je izmeriti potrebne podatke za proračun.



Sl.2. Projektna skica i konačni sklop kalupa za injekciono presovanje maske elektro-utičnice

Minimalni potrebni razmak između steznih ploča mašine za injekciono presovanje određuje se na osnovu izraza (2).

Dužina kalupa proizilazi iz projektne skice kalupa (ukupna visina svih kalupnih ploča). Na osnovu potrebne visine otvaranja kalupa i visine kalupa moguće je izračunati minimalni potrebni razmak između steznih ploča mašine za injekciono presovanje.

$$h_{Umin} = h_{OK} + L_K = 79 + 247 = 326 \text{ mm} \quad (2)$$

Za potrebe izrade maske izabrana je mašina za injekciono presovanje ENGEL 330/80 Victory (slika 3.) [5]



Sl. 3. Mašina za injekciono presovanje ENGEL 330/80 Victory

Prema podacima mašine, maksimalni razmak između steznih ploča iznosi $H_{Umax}=700$ mm, što zadovoljava kriterijum $h_{Umin} \leq H_{Umax}$.

Sledeći korak je određivanje potrebnog puta hoda izbacivača kako bi se otpresci sigurno izvadili iz kalupne šupljine. Vađenje otpresaka je pomoću cilindričnih izbacivača.

Dužina puta izbacivačke šipke (h_i) računa se prema izrazu (3):

$$h_i = h_{op} + h_{di} = 11 + 5 = 16 \text{ mm} \quad (3)$$

gde su: h_i - dužina puta izbacivača (mm), h_{di} - dopunski (sigurnosni) hod izbacivača (mm).

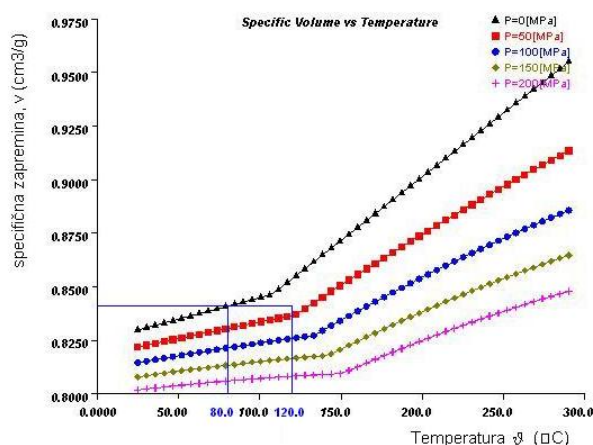
Pri izboru odstoynih letvi (odstoynika) kalupa potrebno je voditi računa da one omoguće minimalni pomak ploča izbacivača za 16 mm. Kako izabrane odstoynne letve osiguravaju pomak ploča izbacivača od 24 mm, taj kriterijum je zadovoljen.

2.1.2. Dimenzionisanje sistema za vođenje i centriranje

Kako su za vođenje i centriranje elemenata kalupa upotrebljeni normirani (standardizovani) elementi u skladu sa veličinom izabranog kućišta kalupa, nije potrebno provoditi njihovo dimenzionisanje.

2.1.3. Proračun sile vađenja otpreska

Pri određivanju potrebnog pritiska u kalupnoj šupljini, moguće je koristiti dijagram p-v-T za prerađivani polimerni material PC/ABS (slika 4.).



Sl. 4. Dijagram p-v-T za polimerni materijal PC/ABS

Uz pretpostavljenu temperaturu otvaranja kalupa ($\Theta_{OK} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$) i temperaturu postojanosti oblika ($\Theta_{PO} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$), moguće je iz dijagrama p-v-T očitati potreban pritisak u kalupnoj šupljini, koji u konkretnom slučaju iznosi $p_K = 40 \text{ MPa}$ (400 bar).

Sila vađenja otpreska može se odrediti pomoću izraza (4):

$$F = \mu \cdot p_K \cdot A_O = 0,2 \cdot 40 \cdot 4250 = 34 \text{ kN} \quad (4)$$

gde su: μ - faktor trenja između plastomernog materijala i elemenata kalupne šupljine, p_K - pritisak u kalupnoj šupljini (određuje se iz dijagrama p-v-T) (N/m^2), A_O - površina elemenata kalupne šupljine u dodiru sa otpreskom (m^2) [1].

Za izabranu mašinu za injekciono presovanje maksimalni iznos sile vađenja otpreska iznosi $F_{vmax} = 40 \text{ kN}$, što je zadovoljavajuće za konkretan slučaj.

2.1.4. Dimenzionisanje sistema za odzračivanje kalupa

Tokom faze koncepcionog oblikovanja kalupa, pri određivanju sistema za odzračivanje kalupa definisano je, kako je potrebno ostvariti potrebnu hrapavost dodirnih površina na podeonoj površini, pri čemu treba omogućiti izlazak vazduha iz kalupne šupljine, a sprečiti izlazak tečne mase. Potrebna hrapavost će se ostvariti tokom same izrade kalupa, pa nije potreban proračun sistema za odzračivanje.

2.1.5. Proračun krutosti kalupa upravno na smer otvaranja

Pri određivanju krutosti kalupa upravno na smer otvaranja potrebno je definisati elastičnu deformaciju kalupne šupljine, čiji iznos ne sme prelaziti iznose stezanja polimera. Za ovaj proračun moguće je koristiti i izraz (5) za odnos između naprezanja i deformacija [1]:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_r} = \frac{p_K}{E_r} = \frac{40}{21 \cdot 10^4} = 0,019\% \quad (5)$$

Skupljanje PC/ABS iznosi $s_v = 0,6 \%$, što je daleko veći iznos od deformacije kalupne šupljine, pa je zadovoljen kriterijum krutosti kalupa upravno na smer otvaranja kalupa.

2.1.6. Proračun sile držanja kalupa

Proračun sile držanja [2] kalupa sprovodi se na osnovu jednačine (6). Podaci potrebni za proračun u konkretnom slučaju su:

- projekcija površina ulivnog sistema na ravan normalnu na pravac brizganja $S_{us} = 4995,2 \text{ mm}^2$
- projekcija površina otpresaka na ravan normalnu na pravac brizganja $S_o = 179,4 \text{ mm}^2$
- faktor sigurnosti $k = 1,2$

$$F_d = p_K \cdot (S_{ot} + S_{us}) \cdot k = 248,38 \text{ kN} \quad (6)$$

Izabranom mašinom za injekciono presovanje moguće je postići vrednost sile držanja kalupa do 800 kN, što dovodi do zaključka kako izabrana mašina za injekciono presovanje zadovoljava kriterijum potrebne minimalne sile držanja kalupa.

2.1.7. Proračun krutosti kalupa u smeru otvaranja

Pri proračunu krutosti kalupa u smeru otvaranja potrebno je proračunati debljinu osnovne (temeljne) ploče. Podaci potrebni za proračun su sledeći:

- dužina osnovne ploče $t_{tp} = 246 \text{ mm}$
- dopušteni progib osnovne ploče $f_{tp} = 0,02 \text{ mm}$
- razmak između odstoynih letvi $b_{tp} = 142 \text{ mm}$

$$h_{tp} = \left(\frac{5}{32} \cdot \frac{F_d \cdot b_{tp}^3}{l_{tp} \cdot f_{tp} \cdot E_r} \right)^{\frac{1}{3}} = 45,75 \text{ mm} \quad (7)$$

gde su: h_{tp} - debljina (visina) temeljne (osnovne) ploče (mm), F_d - sila držanja kalupa (N), b_{tp} - razmak između odstoynih letvi (odstoynika) kalupa

(mm), l_{tp} - dužina temeljne (osnovne) ploče (mm), f_{tp} - dopušteni progib temeljne (osnovne) ploče (mm) [2].

Za osnovnu ploču izabrana je standardna ploča visine 56 mm i dodati su potporni stubovi između te osnovne ploče i prihvatne ploče pokretne strane, koji ukrućuju ceo sklop i sprečavaju deformaciju u pravcu otvaranja kalupa.

2.1.8. Proračun sile otvaranja kalupa

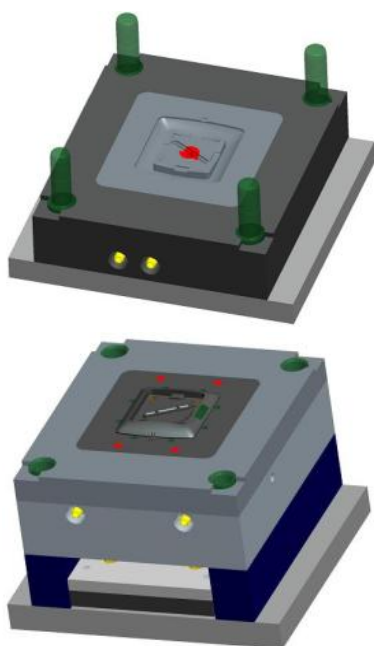
Silu otvaranja kalupa računa se prema sledećem izrazu:

$$F_O = \mu \cdot p_R \cdot A_O = 0,2 \cdot 0,1 \cdot 4250 = 85 \text{ N} \quad (8)$$

gde su: F_O - sila otvaranja kalupa (N), p_R - predpritisak u kalupnoj šupljini (određuje se iz dijagrama p - v - T) (N/m^2) [2].

3. KONSTRUKCIJA KALUPA

Na osnovu proračuna i iskustva iz projektovanja i konstruisanja alata projektovan je kompletan alat za injekciono presovanje maske elektro-utičnice (slika 5.).



Sl. 5. Prikaz otvorenog kalupa: nepokretni i pokretni deo alata za injekciono presovanje maske

4. ZAKLJUČAK

Primena savremenih metoda simulacija, proračuna i konstruisanje pomoću računara zahteva savremeni pristup aktivnostima razvoja

kalupa za injekciono presovanje. Put do optimalne konstrukcije kalupa olakšava metodičko konstruisanje. Znanje i iskustvo konstruktora ima ključnu ulogu u konstruisanju. Konstruktor svojim iskustvom može prepoznati i ispraviti nelogičnosti u proračunu. Takođe, mora doneti odluku o optimalnom rešenju kalupa i potrebnim elementima kalupa za pojedinu vrstu otpresaka.

U radu je razrađena konstrukcija kalupa za injekciono presovanje zadanog otpreska – maske elektro-utičnice, primenom metodičkog pristupa konstruisanju. Načelna konstrukciona rešenja su izabrana za pojedine parcijalne funkcije kalupa na osnovu analize koncepcije kalupa. Dimenzionisanje kalupa sprovedeno je pomoću tri bloka proračuna: reološkog, toplotnog i mehaničkog, a u radu je prikazan mehanički proračun.

Pri razradi konstrukcije kalupa korišćen je računarski program Pro/Engineer Wildfire 4.0.

5. LITERATURA

- [1] Čatić, I.: *Izmjena topline u kalupima za injekcijsko prešanje plastomera*, Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb, 1985.
- [2] Godec, D.: *Doprinos sustavnom razvoju kalupa za injekcijsko prešanje plastomera*, Magistarski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2000.
- [3] *Prospektni materijal*, GE Plastics, 2001.
- [4] Uputstvo za računarski program Moldflow Plastic Advisor
- [5] *Prospektni materijal*, ENGEL, 2008
- [6] *Katalog standardnih elemenata kalupa*, HASCO, 2012.

Autori: M.Sc. Milan Žutković, Prof. Dr. Dragiša Vilotić, Assist. Prof. Dr. Plavka Skakun, Assist. Univerzitet Novi Sad, Fakultet Tehničkih Nauka, Institut za Proizvodno mašinstvo, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Tel: +381 21 485 2334.

E-mail: zutkovic@gmail.com

vilotic@uns.ac.rs

plavkas@uns.ac.rs

Antić, A., Milošević, M., Ungureanu, N.

**IZDVAJANJE OBELEŽJA ZA PREPOZNAVANJE STANJA
POHABANOSTI ALATA U OKVIRU NEURO-FAZI SISTEMA**

Abstract: The paper presents a model of the developed fuzzy system for tool wear classification. The system comprises three modules: module for data acquisition and processing, module for tool wear classification, and module for decision-making. The selected method for feature extraction is presented within the module for data classification and processing. The selected model for the fuzzy classifier and classification in experimental laboratory conditions are shown within data classification and clustering. The proposed model has been tested in longitudinal and transversal machining operations.

Key words: tool wear, feature extraction, signal processing

1. INTRODUCTION

Sa napredkom informacionih tehnologija i tehnologija u obradi signala, širok spektar on-lajn senzora je uključen da bi se preuzele informacije relevantne za stanje alata. Takođe, dobijene informacije su značajnije za kontrolu procesa. Signali dobijeni od različitih senzora moraju da se transformišu u podatke koji sadrže relevantne informacije o osnovnom procesu. Velika količina podataka prikupljena od multisenzorskih sistema omogućava izdvajanje različitih obeležja, stvarajući tako dovoljno informativna obeležja, koja treba da se koriste sa zadatkom klasifikacije stanja alat u sistemima za nadzor alata.

Razvoj sistema za nadzor, koji rade u realnom vremenu, čini osnovu za praćenje stanja alata u savremenoj automatizovanoj proizvodnji. Kvalitetna informacija o stepenu pohabanosti alata u realnom vremenu predstavlja neophodan uslov za identifikaciju postojanosti alata. Dobijanje i odabir signifikantne informacije iz procesa, primenom odgovarajućeg senzora, u značajnoj meri se podiže kvalitet i produktivnost procesa obrade. Osim pozitivnog uticaja na stabilnost procesa obrade i kvalitet obrađene površine obradka, ovim načinom vođenja procesa ostvaruje se veći stepen produktivnosti i maksimalna iskorištenost alata u smislu životnog veka [1]. Konvencionalni načini nadzora habanja alata za obradu rezanjem zasnovani su na poznatim fizičkim principima, vizuelni, slušnim i intelektualnim sposobnostima operatera, pomoću kojih se nastoji prepoznati pohabanost alata. Savremeni, inteligentni sistemi za nadzor habanja alata za obradu rezanjem treba da svojim karakteristikama zamene i nadgrade ljudske nedostatke i mogućnosti u smislu kontinuiranog, brzog i preciznog određivanja stanja pohabanosti

alata što dovedu do:

- povećavanja stepena sigurnosti obradnog sistema, što posebno dolazi do izražaja u situacijama visokog stepena pohabanosti i loma alata,
- optimizacije parametara obrade s obzirom na zahtevanu postojanost alata, uzimajući u obzir i tehnološka ograničenja procesa,
- kontrolu kvaliteta obrađene površine i zahtevane dimenzionalne tačnosti obratka, i
- dodatnu racionalizuju troškova proizvodnje.

Intenzivnija istraživanja vezana za razvoj "inteligentnih" sistema za nadzor alata za obradu rezanjem započela su 90-ih godina prošlog veka primenom višesenzorskog pristupa tj. klasifikatora habanja zasnovanih na algoritmima veštačke inteligencije. Početak istraživanja u ovoj oblasti pretpostavljao je da bi primena ovih metoda trebala rezultirati industrijski primenljivim rešenjima nadzora habanja alata za obradu rezanjem.

**2. PRIMENA FUZZY SISTEMA U
NADZORU HABANJA ALATA**

Kombinacije različitih analiza signala, više senzorskih tehnika i algoritama veštačke inteligencije, zasnovanih na fuzzy logici, vode ka rešenju koje će uspeti da odgovori zahtevima visokih performansi i obezbede adekvatno rešenje nadzora habanja alata [2, 3]. Fuzzy odlučivanje je proces izvođenja zaključaka iz skupa nedovoljno preciznih premisa. Poslednjih godina većina istraživača koristi fuzzy sistem zaključivanja za klasifikaciju stanja pohabanosti alata. Jedan od pokušaja predstavili su Sharma i saradnici [4], kroz primenu fuzzy sistema za procenu habanja alata. Definisana pravila zaključivanja formiraju

bazu na osnovu koje se donose odluke. Proces fuzzy zaključivanja uključuje funkcije pripadnosti, operatore fuzzy logike i pravila ako-onda. Funkcija pripadnosti je kriva, koja definiše, kako je svaka tačka u prostoru ulaznih informacija pozicionirana u odnosu na vrednost članstva (ili stepen članstva) između 0 i 1. U koliko je odgovarajuća promenljiva podložnija šumu onda je njena oblast razmatranja veća kao i širina funkcije pripadnosti.

3. PROGRAMSKO REŠENJE IZDVAJANJA OBELEŽJA

Analizirajući različite prikazane modele uočene su prednosti i nedostaci pojedinih modela koji trebaju biti uvaženi pri razvoju novog. Imajući u vidu razmatrane modele pred razvoj novog laboratorijskog sistema su postavljeni sledeći zahtevi:

- Primena senzora za merenje ubrzanja vibracija kako bi se na što bolji način detektovale dinamičke karakteristike procesa rezanja i implementirale u sistem nadzora.
- Korišćenje novih algoritama veštačke inteligencije u oblasti nadzora habanja alata koji se zasnivaju na primeni apriori znanja o stanju pohabanosti alata.
- Pronalaženje zadovoljavajućeg načina izdvajanja vektora ulaznih karakteristika primenom transformacija u vremensko-frekventnom domenu.

Ekstrakcija obeležja su zasniva na, prema saznanjima autora, potpuno novom pristupu koji se sastoji od primene kratkotrajne Diskretna Furijeove transformacija (STFT) nad spektrom određenog signala vibracija, koja se posmatra kao 2D tekstura "slika". Vremenska skala je identifikovana kao prva dimenzija a frekventna skala druga dimenzija. Namera je da se iskoristi uticaj razlika u strukturi tekstone navedenih segmenata, na diskriminativnost klasa stanja habanja alata. Moguće promene u obliku i karakteristikama tekstone na određenim segmentima slike, ali u isto vreme sa dovoljno malim brojem parametara, kako bi se dobilo na robustnosti opisa posmatranih pojava. Pretpostavka, potvrđena eksperimentalno, da je dominantni fizički proces promene stanja habanja alata u tesnoj vezi sa strukturom dobijene 2D tekstone nakon obrade signala primenom razvijenog metoda. Na osnovu toga predložena je primena određene filter banke koja je u širokoj upotrebi u problemima prepoznavanja tekstone kako bi efikasno izdvojile informacije u vidu robustnih obeležja.

Selekcija obeležja koja je predložena, zasniva se na korišćenju Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (LASSO) regresione tehnike, koju je predložio Tibshirani [5], i široko se koristi u zadatku selekcije obeležja [6]. Ova metoda pronalazi optimalna obeležja koja se odnose na posmatrani set podataka, u cilju dobijanja kompromisa između greške reprezentacije (npr, kvadratne greške) i broja koji nisu nula koeficijenti a odgovaraju najznačajnijim funkcijama, koje su u našem slučaju većina diskriminativna. Set obeležja postaje još robusniji i u slučaju ograničenog skupa podataka za obuku na osnovu sprovedenih eksperimenata.

Veliki deo obeležja dobijenih 2D metodom u ukupnom broju obeležja koje bira Lasso regresor dokazuje značaj i robusnost izdvojenih 2D obeležja kod razvijenog sistema za nadzor habanja alata.

Neka je $F(x,y)$ tekstura slike, koja odgovara identifikovanom spektrogramu STDFT posmatranog signala senzora s , pri čemu je STDFT je spektrogram $|S(k, \omega)|^2$ definisan kao

$$S(k, \omega) = \sum_{n=-K/2}^{K/2} s(n)w(k-n)e^{-ikn} \quad (1)$$

gde je k označen diskretni vremenski okvir, sa ω diskretna vremenska frekvencija, odnosno, diskretna frekvencija zona pokrivenosti, dok je w prozorska sekvenca koja se koristi (koristi se Hamming-ovu funkcija), sa dužinom K . Diskretni vremenski prozor k , za $k = 0, \dots, k_{max}$ identifikovan je kao x osu tekstone slike, tako da je $x_{max} = k_{max}$. Takođe ω , za $\omega = 0, \dots, \omega_{max}$ identifikovana je kao y osa, tako da je $y_{max} = \omega_{max}$. Sada je:

$$F(x,y) = |S(k, \omega)|^2 \quad (2)$$

$$x = 0, \dots, x_{max}, y = 0, \dots, y_{max}$$

$$k = 0, \dots, k_{max}, \omega = 0, \dots, \omega_{max}$$

Sve dalje analize rade se nad teksturom slike $F(x,y)$ dobijene na prethodno objašnjen način, gde radi jednostavnosti, bez gubitka generalizacije, posmatraju kontinualne promenljive $x \in [0, x_{max}]$ i $y \in [0, y_{max}]$. Tada je

$$G(\sigma_1, \sigma_2, \theta, x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2} e^{-(A(\theta)^T [x \ y]) \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 \\ 0 & \sigma_2 \end{bmatrix} (A(\theta) \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix})} \quad (3)$$

usmereno na anizotropno Gausovo jezgro. Fiksne vrednosti $\sigma_1 > 0$ i $\sigma_2 > 0$ označavaju skalu $x \in [0, x_{max}]$, $y \in [0, y_{max}]$ i pravac, respektivno, dok θ i $A(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$ za $\theta \in [0, 2\pi]$, označava orijentaciju kernela (3) i njenu 2D rotacionu matricu, respektivno. Dobija se filter banka koja se primenjuje nad određenom teksturom slike signala $F(x,y)$ definisane u (2), koristeći Laplacian kernel (3), odnosno, bar detektor, u nekoliko različitih skala $S_k = \{(\sigma_1^{(k)}, \sigma_2^{(k)})\} | k = 1, \dots, R$. U razmatranje se

uzimaju samo promene vertikalne orijentacije tekstre slike, pošto su takve promene nosioci informativnog sadržaja vezanog za diskriminativnost u zadatku klasifikacije koji je od interesa. Naime, koristi se samo $\theta = \pi/2$, čime se uzimaju u obzir samo vertikalno orijentisane anizotropne komponente jezgra (3). Deli se $[0, y_{max}]$ u M podintervale $\{[y_{i-1}, y_i] \mid i = 1, \dots, M\}$ u fiksnom vremenskom okviru k, $[y_{i-1}, y_i]$ koji korespondiraju na odgovarajućim frekvencijama $|S(k, \omega)|^2$. I-ti bend filter banke, odgovara intervalu $[y_{i-1}, y_i]$ sastoji se od R vertikalnih komponent i LM MR8 filtera banke [LM], primenjen na tri skale koje su prethodno definisane. Jedan određeni vektor za neki fiksni vremenski okvir k se dobija primenom predložene filter banke na k-tom tekstonu $F_k(x, y), x \in [k, k+1]$ dobijen od tekstre slike $F(x, y), x \in [0, x_{max}]$, nad vremenskim okvirom k. Zapravo, za svako k će se dodavati novih R komponenti, svaka za različite skale, na prethodno obrađen vektor. Komponente se dobijaju kao

$$v_{k,i} = G(\sigma_1^{(i)}, \sigma_2^{(i)}, \pi/2, x, y) * F_k(x, y) \Big|_{x=k, y=y_{i-1}} \quad i = 1, \dots, R \quad (4)$$

Na osnovu toga dobija se set predprocesiranih obeležja sub-vektora $V_k = [v_{k,1}, \dots, v_{k,R}]$. Iz svakog izdvojenog obeležja u , izdvaja se q_u i formira se predprocesirani vektor $V_k^u, k = 1, \dots, q_u$. Vektor V, je tada slučajna promenljiva, tako da V_k^u su njegove realizacije, za svaki vremenski okvir k. Dalje se vrši kompaktifikacija i robustifikacija obeležja, tako što se koristi reprezentacija preko statističkih momenta, čime se ujedno vrši i redukcija dimenzionalnosti modela. Motiv je činjenica da

pomoću dovoljnog broja momenata (usrednjavanje po vremenu), se može predstaviti raspodela V. Zapravo, primećuje se (ako se uzme u obzir kontinuanlo vreme t umesto diskretnog vremenskog okvira k), da postoji jedinstvena korespondencija između raspodele verovatnoća p_{V^u} i k_{V^u} , a njegova karakteristična funkcija je

$$k_{V^u}(t) = E[e^{iV^u t}] = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(it)^j}{j!} E((V^u)^j) \quad (5)$$

$$E((V^u)^j) = [E((V_1^u)^j), \dots, E((V_R^u)^j)]$$

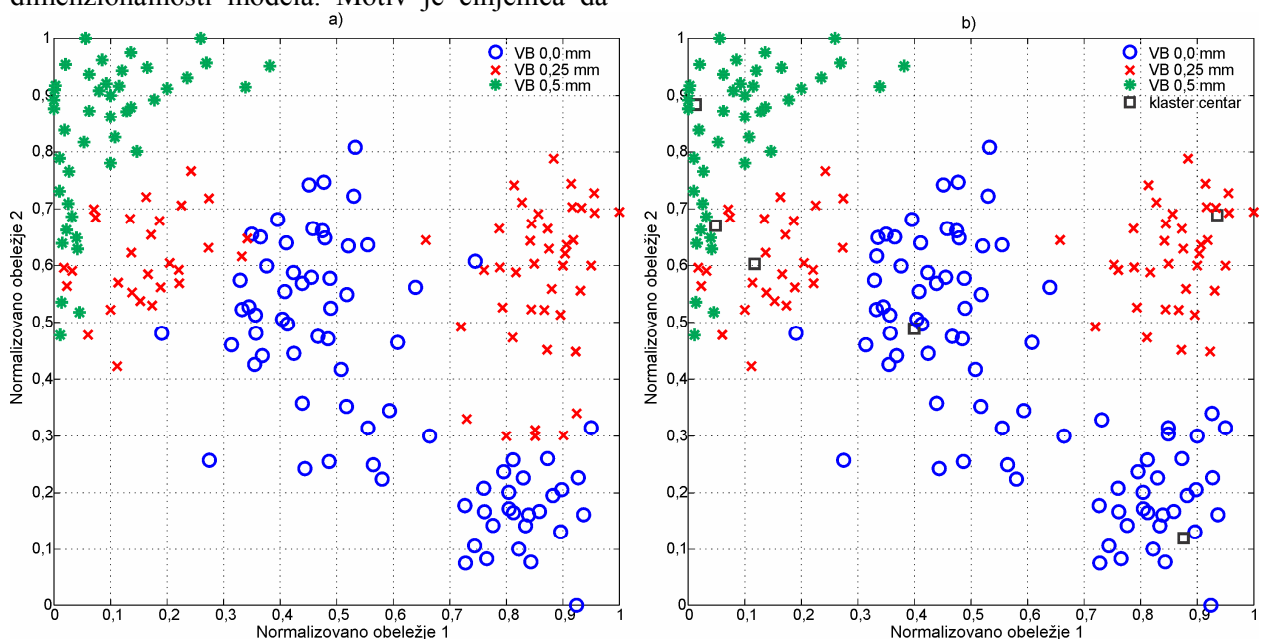
gde je usrednjavanje po vremenu t. Tako, koristeći dovoljno veliki broj L_1 momenata $E((V^u)^j), j = 1, \dots, L_1$, dobija se dobra aproksimacija p_{V^u} , ali ako je L_1 dovoljno mali, dobija se robustno predstavljanje, tj. uprošćavanje obeležja koja predstavljaju. Tako se dobija konačni vektor obeležja koji se koristi u zadatku prepoznavanja:

$$u_1 = [u_1^1 \dots u_1^1 \dots u_1^R \dots u_1^R]$$

gde označavaju $u_{k,i}^j = E((V_k^u)^j)$.

4. VEIFIKACIJA RAZVIJENOG MODELA

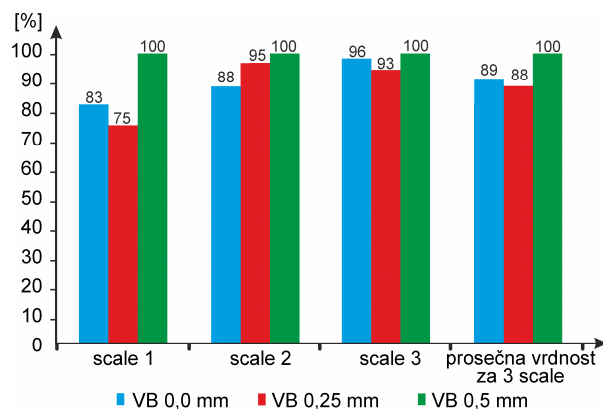
Provera predloženog modela rađena je na eksperimentalnim podacima koji su podeljeni u dve grupe, set za obuku koji sadrži oko tri četvrtine eksperimentalnih podataka, kao i test set koji sadrži preostalu četvrtinu podataka. Svi podaci su prikupljeni tokom serije eksperimentalnih istraživanja. Setovi podataka su pažljivo organizovani tako da svaki sadrži podatke iz svih kombinacija parametara obrade i stepena pohabanosti alata.



Slika 2. Raspored normalizovanih vektora obeležja u prvom opsegu, a) apriori raspored izdvojenih obeležja za prvi opseg b) klasterizovani raspored obeležja za prvi opseg

Prikazani metod klasifikacije korišćen u klasifikaciji izdvojenih obeležja formira klaster na osnovu matrice klasifikacije. Nakon ekstrakcije obeležja, prikazanim metodom, sledeći korak je klasterovanje ulaznih podataka u apriori klastere. Klasifikacija, odnosno, grupisanje obeležja istovremeno se obavlja u tri dimenzije, definisane kroz tri vektora, odnosno, tri centralna momenta: varijansa, skevness i Kurtosis. Analize su pokazale da za izabrani način ekstrakcije obeležja kombinovanje njihovih korelacija daje najbolje rezultate. Model klasifikacije je proveren pomoću funkcije obuke koja je postavljena definisanjem šest klaster centara, po jedan klaster centar za svaku grupu habanja u tri različita opsega.

Da bi se ocenila uspešnost klasifikacije, tj. broj uspešno klasifikovanih obeležja u pojedinim razmerama izvršena je statistička provera zastupljenosti dobro klasifikovanih obeležja po opsezima. Slika 2 prikazuje procenat zastupljenosti uspešno klasifikovanih obeležja po pojedinim opsezima primenjenim algoritmom u odnosu na apriori klasifikaciju za određena stanja pohabanosti reznog alata. Na slici se može uočiti nešto niži procenat tačno klasifikovanih obeležja za alat iz duge grupe u prvom opsegu. Međutim, može se uočiti da se za druge opsege taj procenat zastupljenosti uspešno klasifikovanih obeležja značajno povećava, tako da se prosečna vrednost procenata može smatrati zadovoljavajućom.



Slika 2. Rezultati provere klasifikacije kontrolnim skupom

5. FINAL REMARKS

Ovaj pristup na robustan način klasifikuje stanje habanja alata. Rezultati eksperimenta pokazuju da ovaj pristup prevazilazi standardne metoda u praćenju stanja alat. Osim toga, predloženi postupak se takođe može koristiti u proceni stanja drugih metoda obrade, kao što su bušenje i glodanje. Kao nedostatak ove metode može se smatrati zahev za visokim performansama

računarskog sistem u fazi obuke. U budućnosti, neka poboljšanja treba preduzeti na povećanju performansi izdvajanja obeležja i fleksibilnosti modela. Takođe, postupak izdvajanja obeležja iz wavelet i vremenskog domena doprineće boljem sagledavanju dinamike degradacije rezene geometrije alata, tj. procesa habanja alata i povećanja rezolutnosti.¶

6. REFERENCES

- [1] Antić, A., Kozak, D., Kosec, B., Šimunović, G., Šarić, T., Kovačević, D., Čep., R.: *Influence of Tool Wear on the Mechanism of Chips Segmentation and Tool Vibration*, Tehnicki Vjesnik 20, (1): pp 105-112, 2013.
- [2] Kunpeng, Z., Yoke San, W., Geok Soon, H.: *Wavelet analysis of sensor signals for tool condition monitoring: A review and some new results*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 49, pp 537–553, 2009.
- [3] Rehorn, A.G., Jiang, J., Orban, P.E., *State of the art methods and results in tool condition monitoring: a review*, International Journal of Advance Manufacturing Technology 26, pp 693–710, 2005.
- [4] Sharma, V.S., Sharma, S. K., Sharma, A.K.: *Cutting tool wear estimation for turning*, Journal of Intelligent Manufacturing 19, pp 99–108, 2008.
- [5] Tibshirany, R.: *Regression Shrinkage and Selection with LASSO*, J. R. Statist. Soc. B, 58, 1, pp 267-288, 1996.
- [6] Meinshausen, N., Yu, B.: *Lasso-Type Recovery of Sparse Representations for High-Dimensional Data*, The Annals of Statistics, 37, 1, pp 246–270, 2009.

Authors: Assist. Prof. Dr. Aco, Assist. Prof. Dr. Mijodrag Milošević, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Institute for Production Engineering, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Phone.: +381 21 485 2312, Fax: +381 21 454-495. Prof. Dr. Nikole Ungureanu, Technical University of Cluj-Napoca, Department of Engineering and Technologic Management
E-mail: antica@uns.ac.rs
mido@uns.ac.rs
unicu@ubm.ro

Kačmarčik, I., Ivanišević, A., Movrin, D., Plančak, M., Vilotić, D., Skakun P., Milutinović M.

NUMERIČKA SIMULACIJA I EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA
SUPROTNOSMERNOG ISTISKIVANJA BIMETALA

Rezime: Bimetalno istiskivanje je postupak plastičnog deformisanja pri kojem dolazi do istovremenog deformisanja dva materijala, pri čemu nastaje radni komad koji na svojim različitim segmentima poseduje različita svojstva. U ovom radu dato je numeričko i eksperimentalno istraživanje procesa suprotnosmernog istiskivanja priprema od aluminijuma i bakra. Ispitivani su tok materijala i kao i dijagram kretanja sile tokom procesa istiskivanja dobijeni numeričkom simulacijom i eksperimentalnim putem. Dat je uporedni prikaz rezultata dobijenih numeričkom simulacijom i eksperimentom.

Ključne reči: bimetalno istiskivanje, Simufact Forming, Aluminijum, Bakar, Sila – hod dijagram

1. UVOD

Klasično hladno istiskivanje mono-metala je dobro poznata tehnologija koja omogućava proizvodnju delova male i srednje veličine na veoma efikasan način. Postoje mnogobrojne prednosti ove tehnologije u odnosu na ostale, kao što su bolja iskorišćenost materijala, kratko vreme izrade, poboljšane mehaničke osobine izrađenih delova i visok kvalitet izrađene površine.

Bimetalno hladno istiskivanje je nova tehnologija plastičnog deformisanja u kojoj se priprema, koji se sastoji od dva ili više različita materijala, istiskuje i kao rezultat nastaje komponenta sa dva ili više različita materijala na svojim različitim segmentima. U najčešćem broju slučajeva, istiskuje se kombinacija dva, iako je moguća obrada i sa više materijala. Ovakva vrsta obrade omogućava dobijanje delova koji na pojedinim segmentima imaju tačno određene poželjne karakteristike.

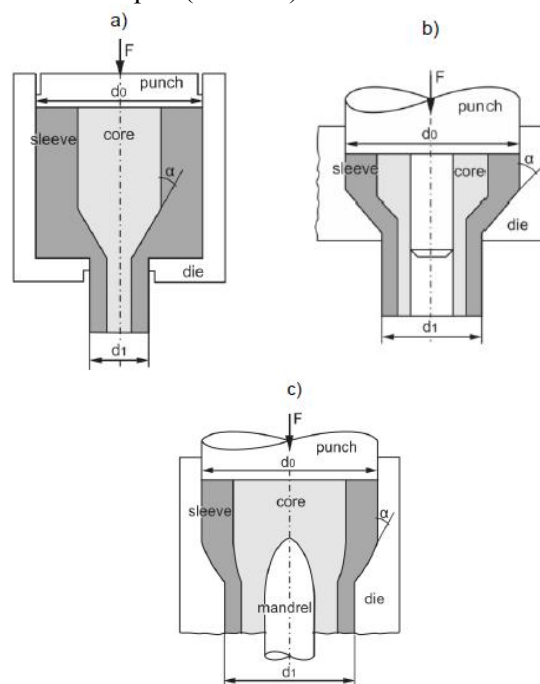
Postoje mnogobrojni oblici početnog priprema za bimetalno istiskivanje, ali najčešća je ona sa jezgro/omotač konfiguracijom. Tako na primer omotač može biti izrađen od materijala koji ima visoka anti-korozivna svojstva, a jezgro može biti izrađeno od materijala niske cene ili male specifične težine. Mnoge druge pogodne osobine materijala mogu biti kombinovane u ovakvim delovima, kao što su: povoljan koeficijent toplotnog širenja, mehanička čvrstoća, elektroprovodljivost, hemijska inertnost...

Jedan od najvećih izazova kod bimetalnog istiskivanja je drugačiji tok materijala kod obe komponente. Mekši materijal lakše teče i njegovo polje brzina se razlikuje od polja brzina čvršćeg materijala. Ovo može prouzrokovati nehomogenu debljinu oba metalna spoja, ili u ekstremnom

slučaju pojavu pukotine kod jednog od materijala. Kako bi se proizveo bimetalni uzorak bez greške, svi značajni parametri procesa moraju biti uzeti u obzir prilikom analize procesa.

2. BIMETANO ISTISKIVANJE

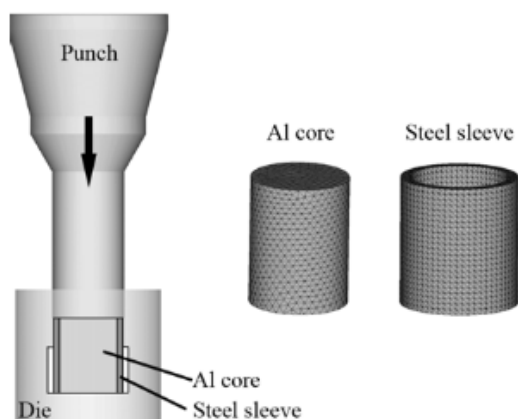
Bimetalno istiskivanje se može podeliti na tri različita procesa: istosmerno istiskivanje, suprotnosmerno istiskivanje i radijalno istiskivanje. Kod istosmernog istiskivanja, bimetalni uzorak koji se sastoji od spoljašnjeg omotača i unutrašnjeg jezgra se istiskuje pomoću žiga kroz otvor na matrici pri čemu se dobija bimetalna šipka (Slika 1a).



Sl. 1. Različite varijante istosmernog istiskivanja bimetala

Bimetalne cevi se mogu dobiti pomoću postupka prikazanog na slici 1b, a bimetalno istosmerno istiskivanje sa trnom prikazano je na slici 1c. Istosmerno istiskivanje je dosta opisano u literaturi. Tako je u radovima [1,2] ispitivana mogućnost dobijanja bimetalnih cevi istiskivanjem od sinterovanih čestica praha. U radu [3] iz 2012. godine vršeno je istosmerno istiskivanje aluminijuma i bakra kroz 4 različite matrice (zakrivljena, sa uglom od 20°, 15° i 10°), ali sa istom redukcijom suženja poprečnog preseka. U radu [4] ispitivano je istosmerno istiskivanje aluminijuma i magnezijuma kroz matrice različitih uglova.

Šema radijalnog istosmernog istiskivanja data je na slici 2. Kod ovog postupka materijali se kreću radijalno u odnosu na pravac kretanja žiga.

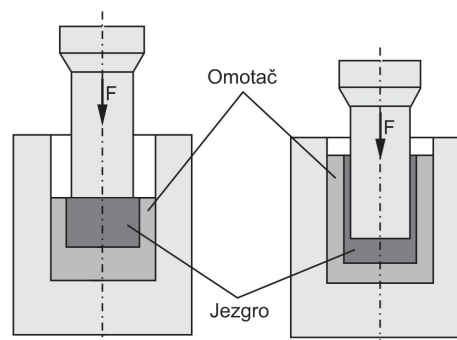


Sl. 2. Šema procesa radijalno istiskivanja aluminijuma i čelika [5]

Kod ove konfiguracije priprema, prilikom analize procesa, veoma je bitno voditi računa da usled velikih deformacija ne dođe do pucanja materijala spoljašnjeg prstena, što detaljnije opisano u radu [5].

Šema procesa suprotnosmernog istiskivanja, koji će biti predmet istraživanja u ovom radu, dat je na slici 3. Istraživanje suprotnosmernog istiskivanja vršeno je u znatno manjoj meri u odnosu na istosmerno. U pojedinim radovima [6,7] vršeno je fizičko modelovanje na različitim vrstama plastelina, a zatim i na bakru i aluminijumu.

Kao pripremak za ovaj postupak u ovom istraživanju korišćeno je jezgro od bakra cilindričnog oblika dimenzija $\phi 22 \times 15$ mm i omotač od aluminijuma spoljašnjih dimenzija $\phi 30 \times 25$ mm sa rupom iste veličine kao i bakarni umetak. Tokom postupka korišćen je žig sa ravnom glavom prečnika $\phi 18,9$ mm sa ukupnim hodom od 15 mm.



Sl. 3. Šema procesa suprotnosmernog istiskivanja

3. EKSPERIMENTALA ISPITIVANJA

Eksperimentalna istraživanja vršena su na hidrauličnoj presi Sack&Kiesselbach nominalne sile od 6,3 MN.



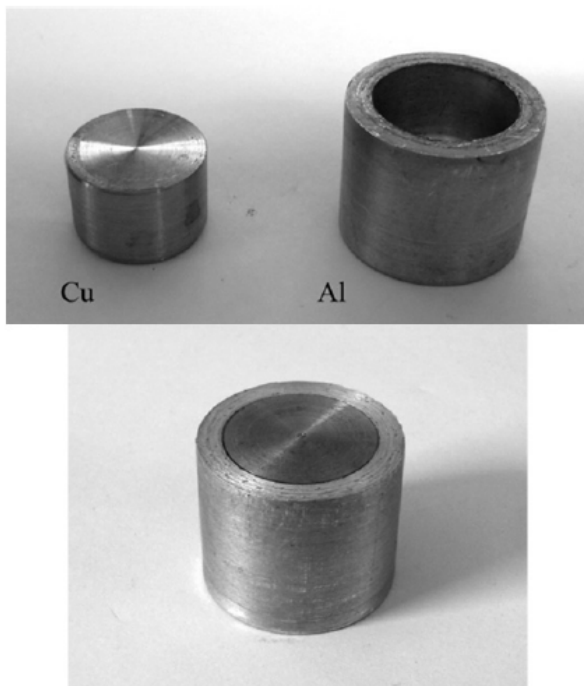
Sl. 4. Hidraulična presa Sack&Kiesselbach nominalne sile od 6,3 MN

Pre samog procesa suprotnosmernog istiskivanja, izvršeno je određivanje krive tečenja oba materijala pomoću metode Rastegajev i dobijene su sledeće krive:

$$\sigma_{Cu} = 362,67 \cdot \phi^{0,1828} \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{Al} = 191 \cdot \phi^{0,165} \text{ [MPa]}$$

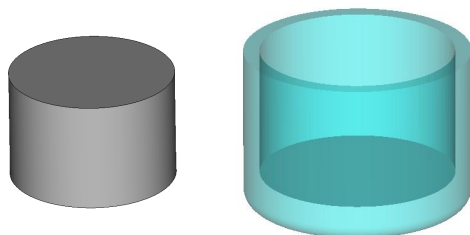
Kako je u eksperimentu korišćen čist aluminijum, mehaničke osobine bakra su bolje nego upotrebljenog aluminijuma. Da bi se obezbedio odgovarajući spoj materijala čitave kompozicije priprema, prilikom izrade uzoraka napravljeno je geometrijsko preklapanje između aluminijuma i bakra. Prilikom sastavljanja priprema, aluminijum je pregrejan a bakar ohlađen kako bi se mogli sastaviti. Matrica, pripremak i žig su podmazani mineralnim uljem. Slika 5 prikazuje bakar i aluminijum pre i nakon sastavljanja.



Sl. 5. Fotografija razdvojenih i sastavljenih komponenti bakra i aluminijuma

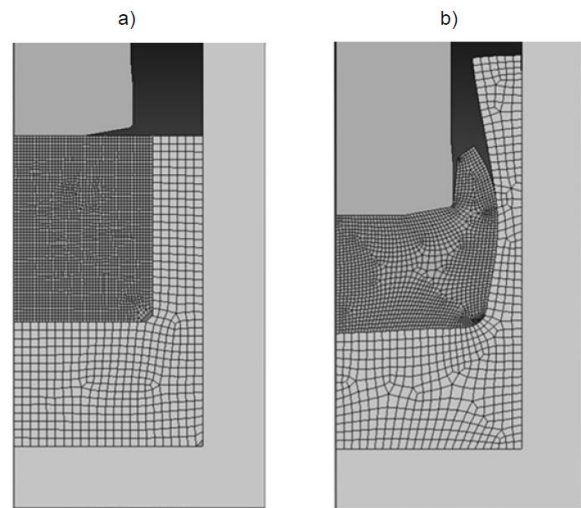
4. NUMERIČKA ISPITIVANJA

Numerička simulacija vršena je u programskom paketu Simufact Forming 10.0. (SF 10.0). Zbog same prirode procesa, odnosno svoje osnosimetričnosti, rađena je 2D simulacija. Sve geometrijske vrednosti, kao i brzina prese, radne temperature, trenje su podešene da budu iste kao i u eksperimentu. Slika 6 prikazuje *CAD modele* uzorkaka uvezene u SF 10.0.



Sl. 6. Stl fajlovi unutrašnjeg i spoljašnjeg materijala priprema

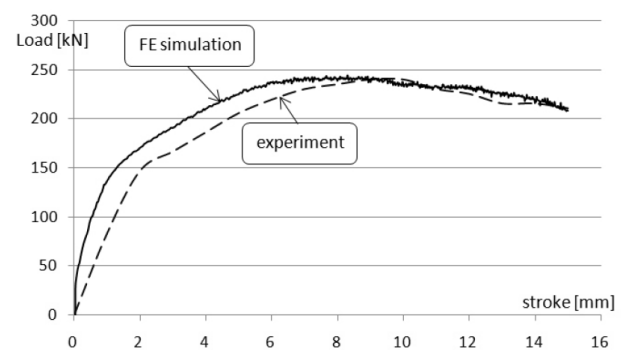
Žig i matrica zbog svoje velike čvrstoće su podešeni kao apsolutno kruta tela. Veličina elemenata unutrašnjeg jezgra od bakra podešena je na 0,25 mm, a aluminijuma na 0,65 mm, sa tzv. *Advanced Front Quad* premrežavanjem tipom elemenata. Vrednost koeficijenta trenja podešen je na $m = 0,12$.



Sl. 7. Numerička simulacija na početku procesa (a) i nakon 6 mm hoda (b)

5. DISKUSIJA RAZULTATA ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Kako bi se verifikovali rezultati dobijeni numeričkom simulacijom, oni su upoređeni sa eksperimentom. Na slici 8 dati su dijagrami sila – hod dobijeni eksperimentalnim putem i numeričkom simulacijom.

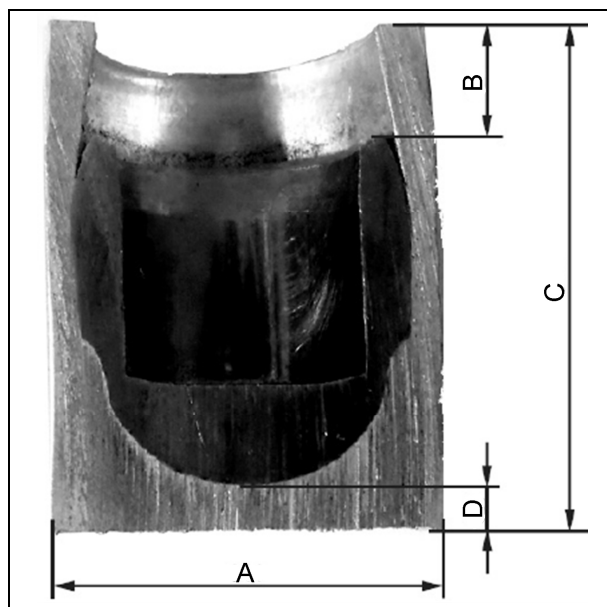


Sl. 8. Krive sila – hod dobijeni eksperimentalnim putem i numeričkom simulacijom

Kao što se vidi sa slike 8, postoji veoma dobra korelacija između eksperimenta i numeričke simulacije. Za prva 2 mm hoda sila veoma brzo raste, zatim do 8 mm se usporava rast i sila dostiže 230 kN. Nakon toga, i kod numeričke simulacije i kod eksperimenta sila lagano opada.

U tabeli 1 dat je uporedni prikaz geometrijskih vrednosti poprečnog preseka radnog komada nakon istiskivanja za numeričku simulaciju i eksperiment. Može se zaključiti da je takođe dobijena veoma dobra korelacija između geometrijskih vrednosti poprečnog preseka za numeričku simulaciju i eksperiment. Kao što se može primetiti sa slike 7, bakarni uzorak u početnoj fazi teče na stranu i dobija blago buričast

oblik. Ovo je posledica toga što je bakar dosta čvršći materijal nego čisti aluminium.



	Eksperiment	Simulacija
A	φ30 mm	φ30 mm
B	8,3 mm	9,1 mm
C	37,1 mm	38,7 mm
D	3,1 mm	3,5 mm

Table 1. Poprečni presek bimetalnog uzorka nakon suprotnosmernog istiskivanja

U drugoj fazi deformisanja buričast deo teče na gore i formira se tanak sloj na donjem delu radnog komada. Daljim kretanjem žiga na dole, dolazi do delimičnog razdvajanja aluminijuma i bakra u gornjem delu radnog komada.

6. ZAHVALNICA

Ovaj rad predstavlja deo istraživanja ostvarenih u okviru projekta TR 035020, finansiranog od strane Ministarstva za Nauku i Tehnološki Razvoj Republike Srbije.

7. REFERENCE

- [1] Krishna, B. V., Venugopal, P., & Rao, K. P.: *Co-extrusion of dissimilar sintered P/M preforms - An explored route to produce bimetallic tubes*, Materials Science and Engineering A, 407, pp. 77–83, 2005.
- [2] Vamsi Krishna, B., Venugopal, P., Prasad Rao, K.: *Solid state joining of dissimilar sintered P/M preform tubes by simultaneous cold extrusion.*, Materials Science and Engineering A, 386, pp. 301–317. doi:10.1016/j.msea.2004.07.048, 2004.

- [3] Momeni, S.T., Hosseinipour, S.J., Noshirvani S., Gorji A.H.: *An Investigation into the Effect of Die Profile of Cold Forward Extrusion on the Thickness Distribution of Al–Cu Bimetallic Tubes*, International Journal of Civil Engineering and Building Materials 2(4), pp. 132–141., 2012.
- [4] Negendank, M., Mueller, S., & Reimers, W.: *Coextrusion of Mg-Al macro composites*, Journal of Materials Processing Technology, 212(9), pp. 1954–1962., 2012, doi:10.1016/j.jmatprotec.2012.04.023
- [5] Kacmarcik, I., Plančak, M., Vilotić, D., Tolnai, M., Movrin, D., Ivanisević, A.: *Numerical analysis of bi-metallic extrusion of gear-like components*, The 6th PSU-UNS international conference on engineering and technology, pp. 1-4, Novi Sad, 15-17 Maj 2013.
- [6] Mstowski, P. M.: *Manufacture of bi-layered plain bearings by bimetallic cold backward extrusion I - Mechanical modelling*, Journal of Mechanical Working Technology, 1983.
- [7] Mstowski, P. M.: *Manufacture of bi-layered plain bearings by bimetallic cold backward extrusion II - Mechanical modelling*, Journal of Mechanical Working Technology, 8, pp. 337–347, 1983.

Autori: MSc Igor Kačmarčik, MSc Aljoša Ivanišević, Mr Dejan Movrin, Prof. Dr. Miroslav Plančak, Prof. Dr. Dragiša Vilotić, Assist. Prof. Dr. Plavka Skakun, Assist. Prof. Dr. Mladimir Milutinović Univerzitet Novi Sad, Fakultet Tehničkih Nauka, Institut za Proizvodno mašinstvo, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Tel: +381 21 485 2334.

E-mail: igorkac@uns.ac.rs
aljosa@uns.ac.rs
movrin@uns.ac.rs
plancak@uns.ac.rs
vilotic@uns.ac.rs
plavkas@uns.ac.rs
mladomil@uns.ac.rs

Ivanišević, A., Kačmarčik, I., Movrin, D., Vilotić, D., Skakun, P., Milutinović, M.

EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE DIJAGRAMA GRANIČNE
DEFORMABILNOSTI ZA MESING

Rezime: Dijagram granične deformabilnosti predstavlja grafičku interpretaciju funkcije obradivosti materijala. Primenom ovog dijagrama moguće je bolje dizajnirati i optimizovati broj faza obrade kod procesa hladnog zapreminskog deformisanja.

U ovom radu je dat prikaz rezultata ostvarenih u cilju eksperimentalnog određivanja dijagrama granične deformabilnosti za mesing CuZn36Pb3. Cilj istraživanja je bio određivanje dijagrama granične deformabilnosti za ovaj materijal primenom četiri testa: test sabijanja cilindra, test sabijanja cilindra sa konusom, test sabijanja cilindra sa prstenom i test sabijanja Rastegajev uzorka. Sabijanje je vršeno ravnim alatima. Za uzorke primenjene u eksperimentalnom istraživanju određeni su put deformacije i istorija pokazatelja naponskog stanja. Dijagram granične deformabilnosti prikazan u ovom radu predstavlja zavisnost granične deformacije i srednje vrednosti pokazatelja naponskog stanja.

Ključne reči: Dijagram granične deformabilnosti, put deformacije, istorija pokazatelja naponskog stanja

1. UVOD

Deformabilnost materijala je sposobnost materijala da se plastično deformiše a da pritom ne dođe do oštećenja strukture. Deformabilnost nije jedinstvena osobina materijala već zavisi kako od samog materijala tako i od uslova obrade.

Za određivanje deformabilnosti materijala pri hladnoj zapreminskoj obradi koriste se teorijski i empirijski kriterijum. Empirijski kriterijum je baziran na eksperimentalnom istraživanju stvarnih procesa deformisanja, a rezultati se predstavljaju u vidu dijagrama granične deformabilnosti (DGD), u dve varijante. Prva varijanta DGD se bazira na deformacijama i predstavlja vezu između lokalnih deformacija na slobodnoj površini u trenutku pojave pukotine. Primena ovog pristupa određivanja deformabilnosti materijala je moguće pronaći u [1 - 4].

Drugi kriterijum je zasnovan na praćenju promene naponskog stanja u uzorku. Primenom ovog kriterijuma definiše se veza između granične deformacije i pokazatelja naponskog stanja u zoni pojave pukotine na uzorku.

Na deformabilnost materijala (M_f) utiče niz faktora, kao što su vrsta materijala (H), mikrostruktura materijala (S), temperatura procesa (T), brzine deformacije ($\dot{\varphi}$), naponsko stanje (T_σ) i mnogi drugi faktori [5]:

$$M_f = F(H, S, T, \dot{\varphi}, T_\sigma, \dots) \quad (1)$$

Kvantitativan pokazatelj granične

deformabilnosti materijala je efektivna deformacija (φ_e^l), odnosno deformacija u trenutku nastanka oštećenja strukture. Ako se posmatra jedan materijal sa definisanom mikrostrukturom i definisanim hemijskim sastavom, koji se deformiše na konstantnoj temperaturi pri konstantnoj brzini deformisanja sledi da je deformabilnost materijala zavisna isključivo od naponskog stanja definisanog tenzorom napona T_σ :

$$\varphi_e^l = f(T_\sigma) = f(\beta) \quad (2)$$

Pokazatelj naponskog stanja β u trenutku nastanka oštećenja strukture se definiše prema:

$$\beta = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{\sigma_e} \quad (3)$$

Gde su:

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ - komponente napona u pravcima x, y i z i σ_e - efektivni napon

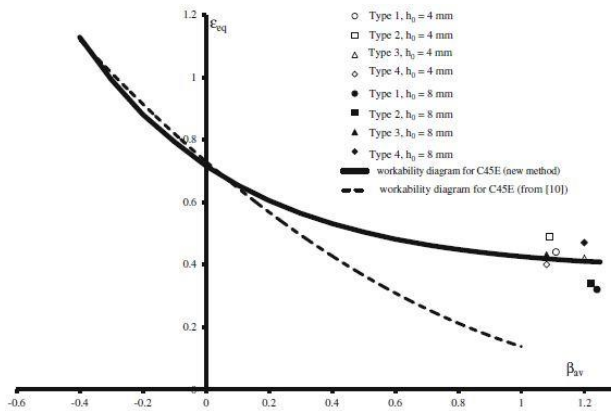
Grafička interpretacija jednačine (2) predstavlja dijagram granične deformabilnosti. Pokazatelj naponskog stanja (β) kod nemonotonih procesa je promenljiv u toku obrade pa se za potrebe definisanja DGD koristi srednja vrednost pokazatelja naponskog stanja [4, 6]:

$$\beta_{av} = \frac{1}{\varphi_e^l} \int_0^{\varphi_e^l} \beta(\varphi_e) d\varphi_e \quad (4)$$

Gde je:

$\beta(\varphi_e)$ - istorija pokazatelja naponskog stanja

DGD se može odrediti primenom tri testa: jednoosnog sabijanja, čistog uvijanja i sabijanja cilindra sa prstenom [7], slika 1.



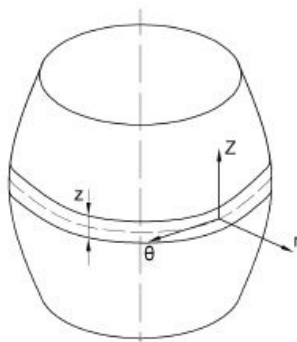
Sl. 1. Dijagram granične deformabilnosti za čelik C45E određen primenom različitih testova [7]

Određivanje komponenti napona na slobodnoj površini cilindra (pri čemu je $\sigma_r=0$) se vrši primenom deformacione teorije:

$$\beta = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z}{\sigma_e} = \frac{1 + \frac{1+2\alpha}{2+\alpha}}{\sqrt{1 - \frac{1+2\alpha}{2+\alpha} + \left(1 + \frac{1+2\alpha}{2+\alpha}\right)^2}} \quad (5)$$

Gde su:

$\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ – komponente napona u pravcima osa (r, θ, z), sl. 2.



Sl. 2. Smerovi osa na cilindričnom uzorku nakon deformisanja

Koeficijent α se računa prema:

$$\alpha = \frac{d\varphi_\theta}{d\varphi_z} \quad (6)$$

Put deformacije se može izraziti u sledećem obliku:

$$\varphi_\theta = f(\varphi_z) = A\varphi_z + B\varphi_z^2 \quad (7)$$

U ovom radu su prikazani rezultati eksperimentalnog istraživanja deformabilnosti mesinga CuZn36Pb3. U tu svrhu sabijane su četiri vrste uzoraka ravnim alatima. Cilj istraživanja je bio određivanje dijagrama granične deformabilnosti za ovaj materijal primenom četiri testa sabijanja.

2. EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE DIJAGRAMA GRANIČNE DEFORMABILNOSTI

Sabijanje uzoraka izrađenih od mesinga CuZn36Pb3 je izvršeno u Laboratoriji za tehnologije plastičnog deformisanja na Sack&Kiesselbach hidrauličnoj presi nominalne sile 6,3MN, sl. 3.



Sl. 3. Sack&Kiesselbach hidraulična presa

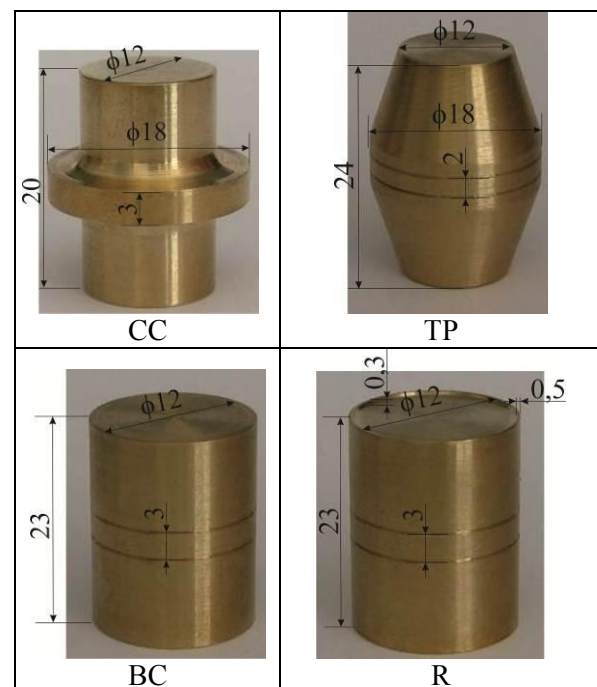


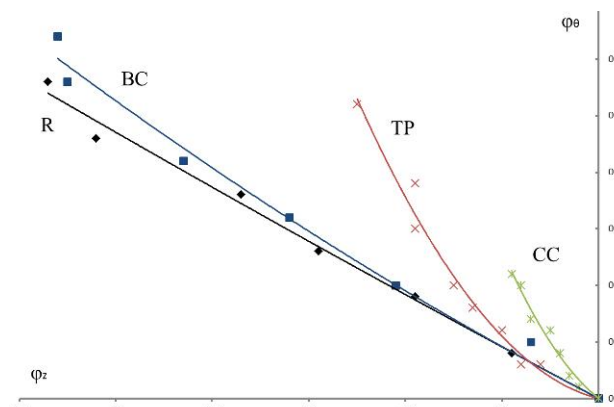
Tabela 1. Tipovi uzoraka sa početnim dimenzijama

Za određivanje dijagrama granične deformabilnosti primenjene su četiri grupe uzoraka sa oznakama CC, TP, BC, R. Kao sredstvo za podmazivanje je korišteno mineralno ulje. U tabeli 1 je dat prikaz korištenih uzoraka sa početnim dimenzijama.

Na slobodnoj površini svakog uzorka obeležena je zona Z koja je korištena za određivanje lokalne deformacije. Za uzorke grupe R, BC i CC visina zone je bila $Z=3mm$, dok je u slučaju uzoraka grupe TP ta zona bila $Z=2mm$. Nakon svake faze deformisanja računate su vrednosti lokalnih deformacija u dva pravca na osnovu promene visine markirane zone i prečnika uzorka prema sledećim obrascima:

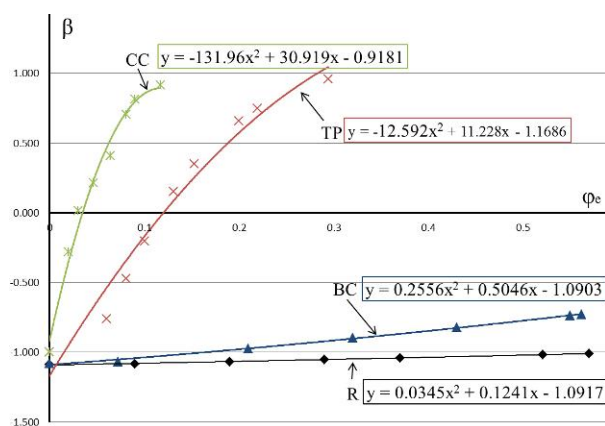
$$\varphi_z = \ln \frac{Z}{Z_0} \quad (8)$$

$$\varphi_\theta = \ln \frac{D}{D_0} \quad (9)$$



Sl. 4. Put deformacije za različite grupe uzoraka

Na slici 4 je dat prikaz puta deformacije za četiri primenjene grupe uzoraka. Veza između deformacija u dva pravca je aproksimirana na osnovu jednačine (7).



Sl. 5. Istorija pokazatelja naponskog stanja

Na osnovu poznavanja puta deformacije

promena pokazatelja naponskog stanja u toku procesa deformisanja je izračunata i prikazana na slici 5.

Izgled uzoraka posle deformisanja je prikazan na slikama 6 - 9.



Sl. 6. Izgled uzoraka grupe CC posle deformisanja



Sl. 7. Izgled uzoraka grupe TP posle deformisanja



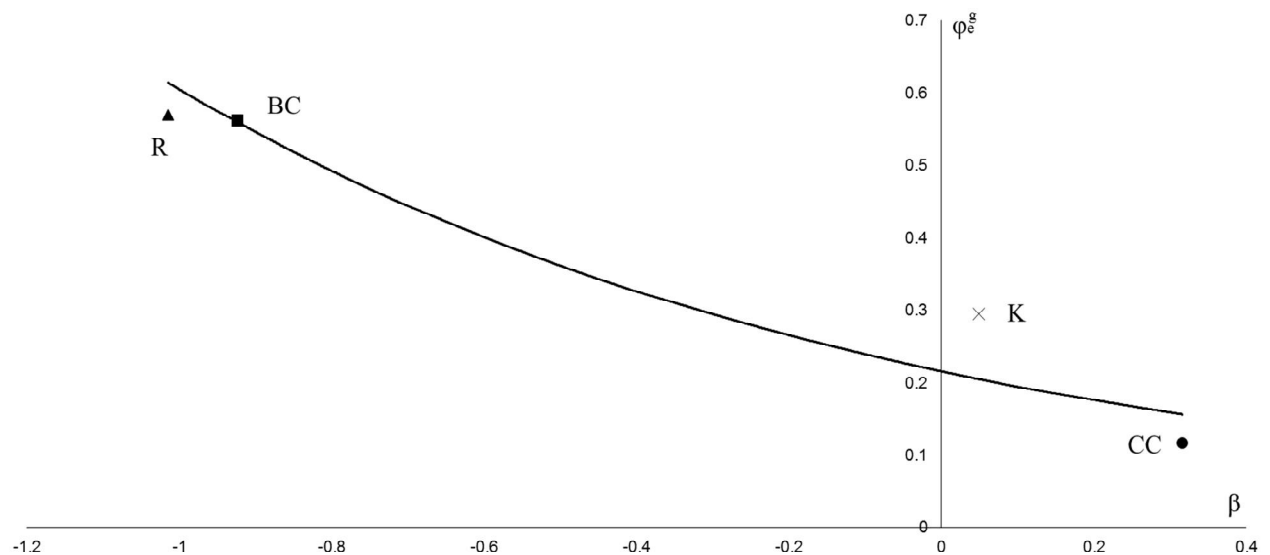
Sl. 8. Izgled uzoraka grupe BC posle deformisanja



Sl. 9. Izgled uzoraka grupe R posle deformisanja

Za određivanje dijagrama granične deformabilnosti prikazanog na slici 10 su korištene vrednosti granične deformacije i srednje vrednosti pokazatelja naponskog stanja. Srednja vrednost pokazatelja naponskog stanja β_{av} je računata prema jednačini (4) dok je granična deformacija računata prema:

$$\varphi_e^g = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varphi_z - \varphi_\theta)^2 + (\varphi_z - \varphi_r)^2 + (\varphi_r - \varphi_\theta)^2} \quad (10)$$



Sl. 10. Dijagram granične deformabilnosti za mesing CuZn36Pb3

3. ZAKLJUČAK

Metoda eksperimentalnog određivanja dijagrama granične deformabilnosti (DGD) za bilo koji materijal se bazira na primeni jednostavnih testova (test sabijanja cilindra, test čistog uvijanje i test sabijanja cilindra sa prstenom).

U ovom radu je predstavljena procedura određivanja dijagrama granične deformabilnosti primenom četiri različita testa. Naponsko stanje u kritičnoj zoni uzorka je varirano primenom uzoraka različite geometrije.

Dijagram puta deformacije pokazuje da postoji razlika u uslovima obrade kod primenjenih uzoraka, sl. 4. Ta razlika u uslovima obrade se može još jasnije uočiti na dijagramu koji predstavlja istoriju pokazatelja naponskog stanja, sl. 5.

Dijagram granične deformabilnosti prikazan na slici 10 pokazuje da se najpovoljniji uslovi obrade javljaju u uzorcima grupe R i BC. Najnepovoljniji uslovi se javljaju pri sabijanju cilindra sa prstenom. Test sabijanja cilindra sa konusom je pozicioniran u blizini testa čistog uvijanja ($\beta_{av} \approx 0$).

Za detaljnije određivanje dijagrama granične deformabilnosti je neophodno uvesti neke nove testove sabijanja koji bi omogućili preciznije definisanje krive u intervalu $\beta_{av} = -0,8 \div 0$.

4. REFERENCE

- [1] Martins, R.A.F., Bay, N., Tekkaya, A.E., Atkins, A.G.: *Characterization of fracture loci in metal forming*, International Journal of Mechanical Sciences, 83, p.p. 112 – 123, 2014.
- [2] Gänser P.: *Free-surface ductility in bulk forming processes*, International Journal of Plasticity, p.p. 755-772, 2001.

- [3] Ragab A.R.: *Fracture limit curve in upset forging of cylinders*, Materials Science and Engineering, p.p.114-119, 2002.
- [4] Landre J.: *On the utilization of ductile fracture criteria in cold forging*, Finite Elements in Analysis and Design, p.p. 1785-186, 2003.
- [5] Vujović, V., Shabaik A.: *Workability Criteria for Ductile Fracture*, Trans. ASME J. Engng Mater. Technol, p.p. 245-249, 1986.
- [6] Vujović, V., Shabaik A.: *Workability Criteria for Ductile Fracture*, Trans. ASME J. Engng Mater. Technol, p.p. 245-249, 1986.
- [7] Alexandrov, S., Vilotić, D., Konjović, Z., Vilotić, M.: *An improved experimental method for determining the workability diagram*, Experimental Mechanics, No. 53, pp 699 – 711, 2013

ZAHVALNICA

Ovaj rad predstavlja deo istraživanja ostvarenih u okviru projekta TR 035020, finansiranog od strane Ministarstva za Nauku i Tehnološki Razvoj Republike Srbije.

Autori: M.Sc. Aljoša Ivanišević, M.Sc. Igor Kačmarčik, M.Sc. Dejan Movrin, Prof. dr Dragiša Vilotić, dr Plavka Skakun, Doc. Dr Mladomir Milutinović, Univerzitet Novi Sad, Fakultet Tehničkih Nauka, Institut za Proizvodno mašinstvo, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Srbija, Tel: +381 21 485 2334, Fax: +381 21 454-495.

E-mail: aljosa@uns.ac.rs
igorkac@uns.ac.rs
movrin@uns.ac.rs
vilotic@uns.ac.rs
plavkas@uns.ac.rs
mladomil@uns.ac.rs

COMBINED COLD EXTRUSION OF STEEL

Abstract: Cold extrusion is metal forming technology which has many advantages compared to other manufacturing technologies: improved mechanical properties, high production rates and improved surface quality of the extruded parts. High loading of tooling elements is main disadvantage of this process. In this paper application of different methods (analytical, numerical and experimental) to obtain load – stroke characteristic in cold combine backward can – forward rod extrusion are presented. Steel material was considered.

Key words: cold combined extrusion, load-stroke characteristics

1. INTRODUCTION

Cold extrusion of metallic billets into final parts of different configurations is a highly effective metal forming technology which is predominantly applied for manufacturing of small and middle size components. Main advantages of this technology are improved mechanical properties, high production rates and improved surface quality of the extruded parts. High loading of tooling elements is main disadvantage of cold extrusion.

There exist a great number of different variants and sub-variants of this technology. One of the most comprehensive classification of cold extrusion is given in [1]. According to this method all cold extrusion processes are divided into the 4 classes which are based upon their geometrical characteristics. Every class consists of a definite number of sub-classes.

In [2] all cold extrusion operations are divided into three basic groups with three sub-groups: forward, backward and side extrusion. Simultaneous performance of two or more basic processes is called “combine extrusion”

Cold extrusion has been a subject of numerous investigations, from different aspects and with different aims. Some of the newer topics in the field of cold extrusion are elaborated in the [3], [4], [5].

Combined micro cold extrusion is presented in [3]. Authors investigated effects of grain size on the main process parameters. Conclusion is that grain refinement significantly improved product quality and accuracy. Combine radial-backward extrusion is described in [3]. Rigid plastic FE method was applied in the simulation. Total energy consumption is determined, including ideal, frictional and redundant energy.

Possibility to manufacture more complex

shapes by cold extrusion is illustrated in [5] and [6]. Radial extrusion was employed to manufacture gear like elements of different geometries. Phenomenon of divided flow, which takes place in this processes is elaborated in detailed way.

In the works [7] and [8] application of UBET method in the analysis of backward extrusion is illustrated. Theoretically obtained results are verified by experiment. Relevant punch design modification in order to decrease deformation load is suggested

Current paper is focused at the process of combine forward rod - backward can extrusion . In this process, due to geometrical relations between main tooling elements (punch, container , die) billet material is forced to flow simultaneously in two opposite directions: in the direction of punch movement and in the opposite direction. Amount of material flow in one or another direction depends on given geometrical relation between tooling elements and on the friction. In Fig.1 initial cylindrical billet and final extruded part, together with the main tooling elements are shown.

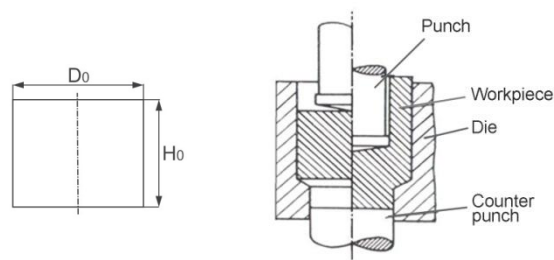


Fig.1 Combined extrusion

Present investigation is related to the force – stroke characteristic and the factors which influence this force. Three different investigation methods are employed: theoretical approach, experiment and FE modeling.

2. DETERMINATION OF FORCE

2.1 Theoretical approach

Based upon their experimental investigation, authors [9] developed analytical approach for force calculation in combine backward – forward extrusion. According to this method, punch pressure can be obtained as:

$$p_{max} = K_{sr} \left[\frac{D_0^2}{D^2} \ln m + \frac{H}{D} \left(1 + \frac{d}{D} \right) m \right] \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \mu \frac{D^2 - d^2}{D^2 H} \right) \quad (1)$$

where is

$$m = \frac{D_0^2}{D_0^2 - D^2 + d^2} \quad (2)$$

$$A = \frac{D^2 \pi}{4} \quad (3)$$

$$\varphi_{rav} = \left(1 + \frac{D}{8 \cdot t} \right) \cdot \ln \left(\frac{H}{H-s} \right) \quad (4)$$

$$K_1 = 289,671 + 597,581 \cdot \varphi^{0,333} \quad (5)$$

$$K_{sr} = \frac{K_1 + K_0}{2} \quad (6)$$

Extrusion load is then obtained as:

$$F = p_{max} A \quad (7)$$

Where is

D_0 - billet diameter

D - punch diameter

d - die opening diameter

t - wall thickness

s - punch stroke

H - workpiece height

2.2 Experiment

In the experiment steel C 45 was used, which strain-stress curve was obtained in Rastegaev test and has following analytical form: $K_1 = 289,671 + 597,581 \cdot \varphi^{0,333}$.

Cylindrical billets with the diameter $D_0 = 28$ mm and height $H_0 = 25$ mm were employed. Coefficient of friction was determined in ring test ($\mu = 0.12$, phosphated billet surfaces, lubrication by oil). Punch diameter was 18,80 mm and die opening 21,70 mm. Die inclination angle was 60° . With the given dimensions of tool elements logarithmic deformations are:

$$\text{Forward: } \varphi_{rav} = 2 \ln \frac{D_0}{d} = 2 \ln \frac{28}{21,7} = 0,51$$

$$\text{Backward } \varphi_{rav} = \ln \frac{D_0^2}{D_0^2 - D^2} = \ln \frac{28^2}{28^2 - 18,8^2} = 0,59$$

Experiment was performed on the Sack&Kiesselbach hydraulic press of 6300 KN. In Fig.2 initial billet and extruded component and in Fig. 3 extrusion tooling are shown.

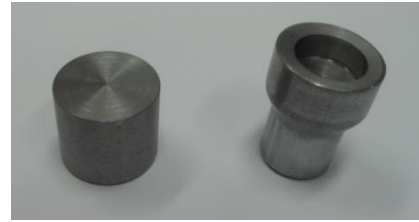


Fig.2. Initial billet and final component



Fig.3. Extrusion tooling

In the process die was stationary and punch moved downward. Punch velocity was 0,12 mm/s. During extrusion experiments load-stroke diagram was recorded by Spider 8 device.

2.3 FE simulation

For the numerical simulation Simufact package was used. 3D model was created In Solid Edge V18 which was then transfered via stl. Format. Starting configuration of billet and tool elements is shown in Fig.4.

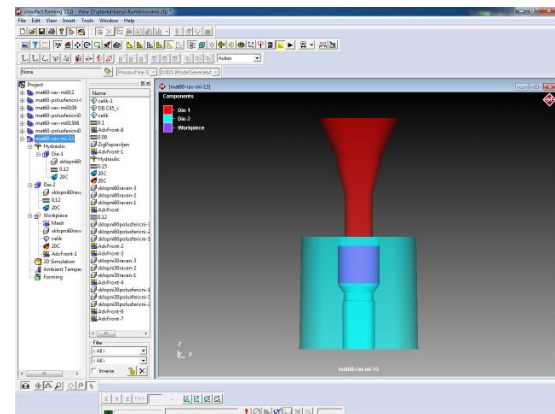


Fig. 4 Starting configuration

3. RESULTS

Force and punch pressure values calculated by

(1) – (7) for different punch strokes (s) are given in the Table 1.

S [mm]	0	3	6	9	12	15	18
φ	0	0,19	0,41	0,67	0,99	1,38	1,92
P [MPa]	0	1019,92	1130,32	1216,71	1295,55	1373,14	1458,1
F [kN]	0	283,12	313,77	337,75	359,63	381,17	404,76

Table 1. Theoretical values of force and punch pressure

In Fig.5 numerically obtained material flow for friction coefficient $\mu = 0,12$ is shown. As it is seen, material flows simultaneously in two

different directions. In further work investigation of material flow for different friction values will be performed.

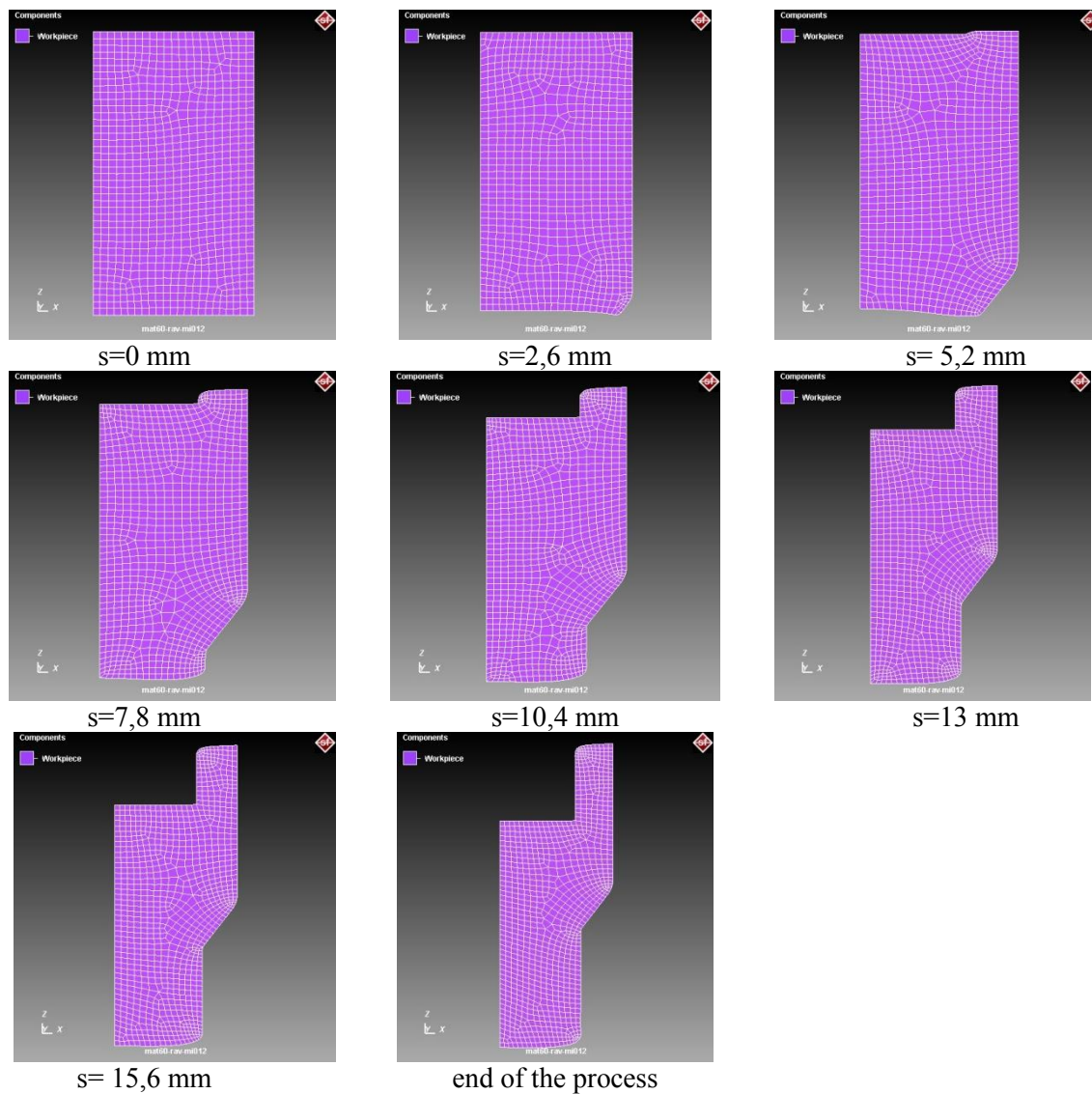


Fig. 5. Material flow – numerical simulation

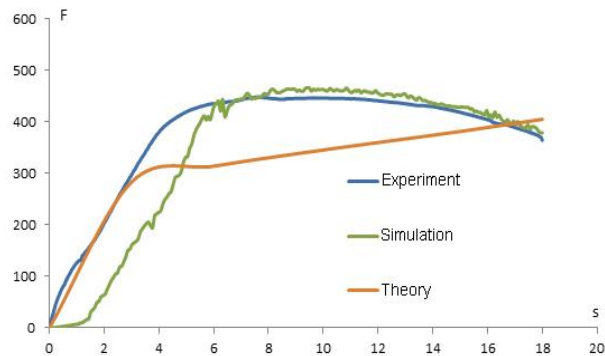


Fig.6. Load-stroke characteristics obtained by three different methods

Figure 6 suggests that there exists a relative good coincidence of force - stroke diagrams obtained by three different ways. Experimental and numerical force reaches a maximal value after 7mm – 9mm stroke after which it slowly declines. Contrary to this, analytically determined force shows permanent rise, reaching its maximal value at the end of the process.

4. CONCLUDING REMARKS

By combination of basic extrusion processes like a forward, backward and radial extrusion, it is possible to manufacture wide variety of components with complex shapes. Predominant users of cold extruded part are automotive and aircraft industry, general mechanical engineering, machine tool industry, arms industry etc.

Current work is focused on the application of different methods (analytical, numerical and experimental) to obtain load – stroke characteristic in cold combine backward can – forward rod extrusion. Steel material was considered. Results show that all three methods give similar values of force but there is substantial difference in the form of diagram: while this diagram exhibits its maximum after which it declines (experiment and FE analysis), analytical calculation suggests that there is a permanent increase of force during deformation. In further work extension of the research on this subject is planed which would involved all influential process parameters. Focus would be not only at the force of deformation but also on the stress state within the deformation zone, velocity distribution, material flow in different friction conditions etc. Variation of the punch and die geometry would be taken into consideration as well.

5. REFERENCE

[1] Lange, K.: *Handbook of metal forming*, SME Dearborn, Michigan, USA, 1985.

- [2] Spur,G., Stoferle, Th.: *Handbuch der Fertigungstechnik, Band 2/2, Umformen*, Carl Hansen Verlag, 1984.
- [3] Chao Cheng Chang et al.: *Effect of temperature and grain size on combined micro forward and backward extrusion*, Metal Forming 2012, Krarow, Poland
- [4] Ho Young Lee et al: *Forming load and deformation energy in combined radial backward extrusion*, Metal Forming 2012, Krarow, Poland
- [5] Skakun et al: *Manufacturing of gear like components by metal forming – possibilities and limitations*, MMA Conference, Novi Sad, 2012.
- [6] Plančak et al: *A study of radial gear extrusion*, Int. Journal of Forming Processes, Vol.6, Nr.1, 2003.
- [7] Marinkovic,V.: *Pressure determination in the backward cup extrusion*, Journal for Technology of Plasticity, Vol.33,2008, Novi Sad.
- [8] Vilotić,M.et al: *UBET analysis, FE simulation and experimental investigation of backward extrusion*, Journal for Technology of Plasticity, Vol.29,2004, Novi Sad.
- [9] Golovin V.A., Mitkin A.N., Reznikov A.G.: *Tehnologija hladnoj šampovki vidavljeniem*, Mašinstroenie, Moskva,1970
- [10] Kanjo, Z.: *Teorijsko-eksperimentalna istraživanja procesa zapreminskog deformisanja sa dvosmernim tečenjem materijala*, Master rad, FTN, Novi Sad 2014

Authors: Assist. Prof. Dr Mladimir Milutinović, Prof. Dr. Miroslav Plančak, assistant dr Plavka Skakun, Prof. dr Dragiša Vilotić, assistant mr Dejan Movrin M.Sc. Igor Kačmarčik M.Sc. Aljoša Ivanišević, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Institute for Production Engineering, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Phone.: +381 21 485 2347, Fax: +381 21 454-495.

E-mail: mladomil@uns.ac.rs

Štrbac, B., Spasić – Jokić, V., Radlovački, V., Hodolić, J., Hadžistević, M.

REZULTAT MERENJA SA ASPEKTA UKUPNE NESIGURNOSTI

Rezime: Rezultat merenja nije potpun ako uz njega ne stoji neki kvantitativni pokazatelj kvaliteta, to jest nesigurnost merenja. Bez poznavanja merne nesigurnosti rezultati merenja nisu međusobno uporediti, ne može se dokazati usaglašenost/neusaglašenost sa specifikacijom i nisu sledljivi. Međutim prema novoj generaciji standarda geometrijske specifikacije proizvoda, koja povezuje ceo tok geometrije proizvoda od funkcionalnosti, specifikacije, proizvodnje i verifikacije, postoje još nekoliko nesigurnosti koje čine ukupnu nesigurnost. U ovom radu, na primeru tolerancije ravnosti, biće objašnjeno kako proceniti ukupnu nesigurnost i kako ona utiče na ocenu usaglašenosti/neusaglašenosti proizvoda sa specifikacijom. **Ključne reči:** ukupna nesigurnost, geometrijska specifikacija proizvoda (GPS), ravnost, koordinatni merni sistemi (KMS).

1. UVOV

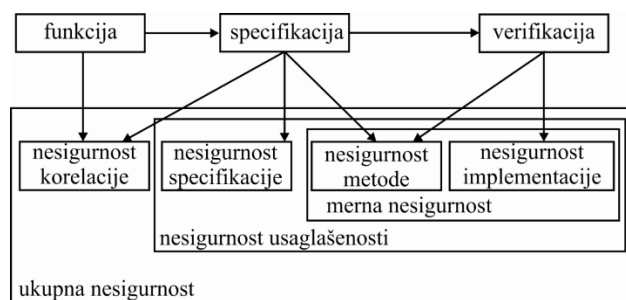
Savremeni industrijski svet nameće elementima sklopova i podskopova veoma uska tolerancijska polja u cilju izvršenja namenjenih funkcionalnih zahteva. Zbog nesavršenosti proizvodnje pristupi su različiti tipovi odstupanja na radnim predmetima. Smatra se da je dimenzionalno i/ili geometrijsko odstupanje u skladu sa propisanom tolerancijom ako se rezultat merenja nalazi u tolerancijskom prostoru. Rezultat merenja se smatra potpun jedino u slučaju kada je zajedno sa njim izjavljena merna nesigurnosti i tada se ocena usaglašenosti/neusaglašenosti vrši prema ISO 14253-1 [1]. Međutim, razvojem nove generacije geometrijske specifikacije proizvoda (GPS), koja povezuje ceo tok geometrije proizvoda od funkcionalnosti, specifikacije, proizvodnje do verifikacije, rezultat merenja iskazan sa mernom nesigurnosti nije dovoljan i potrebno je iskazati ukupnu nesigurnost. GPS je projektovan kao sredstvo komunikacije u kome projektanti, proizvođači i metrolozi razmenjuju nedvosmislene informacije vezane za funkcionalne zahteve proizvoda [2]. Standardi GPS postavljaju temelj za novi jezik zasnovan na operaterima i operacijama koje su utemeljene na matematičkim definicijama [3]. Radni predmeti tokom svog životnog ciklusa se pojavljuje u “tri sveta”, tj. nominalni model, skin model i realan radni predmet [4]. Predstavljanje geometrije radnog predmeta na ovaj način odgovara respektivno koracima CAD/CAM/CAQ sistemima. Nominalni model je ideja projektanta i karakteriše se preko nominalnih dimenzija. On definiše idealan radni predmet sa oblicima i dimenzijama koje se savršeno uklapaju u

funkcionalni mehanizam. Skin model odgovara projektanskoj mašti varijacija koje mogu uticati na realnu geometriju radnog predmeta. Ovaj model se koristi od strane projektanta da shvati moguće efekte odstupanja geometrije radnog predmeta u cilju postavljanja granica potrebnih da garantuje funkcionalne zahteve proizvoda. Stvaran radni predmet je geometrija koja je rezultat obrade radnog predmeta. Ona se razlikuje od nominalnog modela zbog unutrašnjih varijabilnosti svih činilaca realne proizvodnje (materijal, ambijentalni uslovi, proizvodni proces, itd.). Prema ova “tri sveta” prikazivanja geometrije radnog predmeta definisano je kroz tri operatera: idealni, specifikacioni i verifikacioni operater. U svakom operateru su sadržane operacije nad geometrijskim primitivima [5]. Provera konformnosti kvaliteta proizvoda se vrši poređenjem specifikacijskog i verifikacijskog operatera. Pristup zasnovan na operaterima i operacijama omogućava značajno poboljšanje upravljanja podacima radnog predmeta, tako da se minimizacija nesigurnosti odnosi na moguća tumačenja geometrijskih specifikacija. Kao garant najboljeg opisa radnog predmeta i procenje njegove korespondencije funkcionalnim zahtevima, GPS jezik uvodi definisanje novih činilaca nesigurnosti koji su u stanju da okarakterišu proizvode u različitim fazama njegovog životnog ciklusa. U poboljšanom GPS sistemu, pored merne nesigurnosti, definisana je nesigurnost korelacije, nesigurnost specifikacije, nesigurnost saglasnosti i ukupna nesigurnost.

U ovom radu na primeru tolerancije ravnosti biće pokazano kako proceniti ukupnu mernu nesigurnost i kako ona utiče na ocenu usaglašenosti/neusaglašenosti proizvoda.

2. ČINIOCI UKUPNE NESIGURNOSTI

Geometrijska specifikacija bi trebala da bude dovoljno kompletna kako bi se izbegla pogrešna tumačenja i pogodna da garantuje funkcionalne zahteve radnog predmeta. Iz tih razloga, GPS jezik uvodi činioce nesigurnosti, koji pogađaju proizvod u različitim fazama njihovog proizvodnog procesa. Ovi činioći su predstavljeni u ISO 17450-2 i oni dovode do procene ukupne nesigurnosti radnog predmeta kako je prikazano na slici 1.



Slika 1. Činioći nesigurnosti i njihova povezanost u ukupnoj nesigurnosti

Ukupna nesigurnost reprezentuje odstupanje stvarnog verifikacionog operatera od funkcionalnog operatera definisanog nominalnim modelom, jer funkcionalni zahtevi radnog predmeta treba da budu zadovoljeni.

Korelaciona nesigurnost je definisana kao „nesigurnost koja proizilazi iz razlika između stvarnog specifikacijskog operatera i funkcionalnog operatera, kojim se definiše namenjena funkcija radnog predmeta, izražena u terminima i jedinicama stvarnog specifikacijskog operatera. Drugim rečima, to je mera sposobnosti geometrijskih specifikacija da garantuje funkcionalne zahteve za šta je namenjena.

Nesigurnost usaglašenosti prikuplja sve nesigurnosti koje su u vezi sa usklađenosti geometrije radnog predmeta sa propisanom specifikacijom. To kvantifikuje nesigurnost sa kojom se može dokazati da je radni predmet u skladu svakom mogućom interpretacijom specifikacije. Metrolog može, ako se operator specifikacije nepotpun, da tumači na različite načine specifikaciju. Nesigurnost usaglašenosti obuhvata praktične aspekte procesa merenja (stvarni verifikacioni operator i njegova merna nesigurnost) i kvalitet specifikacije (ako specifikacija nema jednoznačnu interpretaciju, nastaje nesigurnost specifikacije).

Nesigurnost specifikacije ima ulogu da kvantifikuje dvosmislenost u operatorima specifikacije. Zapravo, ako stvarni specifikacijski operator nije kompletan, metrolozi moraju rekonstruisati kompletan specifikacijski operator

iz koga, prema principu dualnosti, je izveden idealni verifikacioni operator. Rekonstrukcijom kompletnog specifikacijskog operatera se dobija preko dodavanja operacija, ili delova operacija, nedostajećih u nekompletnoj specifikaciji i u skladu sa njim. Ali ova rekonstrukcija ne može biti saglasna, jer može postojati nekoliko operacija pogodnih da kompletiraju nepotpuni specifikacijski operator. Nesigurnost specifikacije može se lako eliminisati korišćenjem kompletnog specifikacijskog operatera.

Merna nesigurnost prikuplja sve nesigurnosti generisane upotrebom stvarnog verifikacijskog operatera. To odgovara klasičnom konceptu merne nesigurnosti i sastoji se od zbira (prema GUM-u) nesigurnosti primenjene metode i nesigurnosti implementacije. Ona uzima u obzir neidealnost instrumentacije kao i namernih odstupanja iz idealnog verifikacionog operatera uvedenog da olakša njegovu praktičnu primenu.

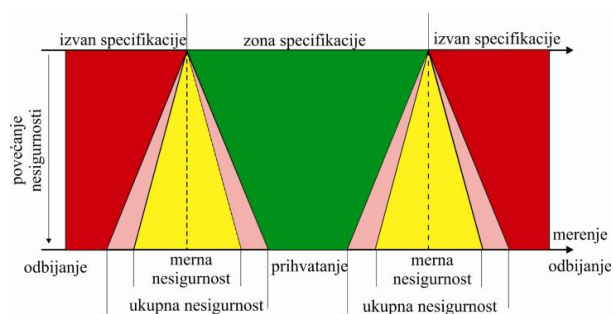
Nesigurnost primenjene merne metode „proističe iz razlika između stvarnog specifikacijskog operatera i stvarnog verifikacijskog operatera, bez obzira na metrološke karakteristike odstupanja stvarnog verifikacionog operatera. Nesigurnost merne metode prikuplja efekte verifikacionih operacija različitih od onih zahtevanih preko stvarnog verifikacionog operatera, koji je izveden iz stvarnog specifikacijskog prema principu dualnosti.

Nesigurnost implementacije proističe iz razilaženja u metrološkim karakteristikama stvarnog verifikacionog operatera od idealnih metroloških karakteristika definisanih preko idealnog verifikacionog operatera. Prikuplja efekte neidealnosti (odstupanja) stvarnog verifikacionog operatera od idealnog verifikacionog operatera. Veličina dela nesigurnosti implementacije uvedena preko mernog instrumenta može da se proceni kroz kalibraciju. Ostale komponente zbog uticaja okruženja, ne odnose se direktno na mernu opremu, moraju se uzeti u obzir, ako je moguće, nadoknaditi.

2.1 Ocena usaglašenosti/neusaglašenosti proizvoda prema ukupnoj nesigurnosti

Jasno je da ocena usaglašenosti /neusaglašenosti radnog predmeta prema mernoj nesigurnosti nije dovoljna prema poboljšanom GPS sistemu jer se nesigurnosti korelacije i nesigurnost specifikacije ne uzimaju u obzir. U cilju rešavanja ovog problema, predložena su pravila za odlučivanje na osnovu ukupne nesigurnosti, koja uzima u obzir nesigurnost korelacije i nesigurnost specifikacije. Jasno je da je „žuta zona“ izazvana preko nesigurnosti

usaglašenosti šira od „žute zone“ izazvane od merne nesigurnosti, slika 2.



Slika 2. Pravila odlučivanja zasnovana na ukupnoj nesigurnosti

3. PROCENA UKUPNE NESIGURNOSTI PRI MERENJU GREŠKE RAVNOSTI NA KMM

Tolerancija ravnosti je često prisutna u tehničkoj dokumentaciji jer ispunjava mnoge funkcionalne zahteve. Međutim, naznačena tolerancija na crtežu / CAD modelu ne sadrži informacije vezane za ograničenja propusnog opsega filtera, vrstu filtera i asocijativni kriterijum koji treba da se koristi. Projektovanje verifikacionog procesa, prema GPS standardu, zahteva definisanje kompletnog operatera specifikacije u prvom koraku. Onda je odgovarajući verifikacioni operater izveden iz njega prema principu dualnosti.

Kada specifikacija u tehničkoj dokumentaciji nije kompletna, metrolog mora da kompletira operator specifikacije prema njegovom iskustvu, eventualno o znanju o funkcionalnim zahtevima radnog predmeta ili o korišćenom proizvodnom procesu. Ova operacija je neophodna jer definisanje kompletnog operatera verifikacije oslanja se isključivo na definisanje kompletnog operatera specifikacije, prema principu dualnosti. Očigledno, kada specifikacije na tehničkom crtežu nisu kompletne, operator specifikacije je rekonstruisan od metrologa i može uvesti odstupanja od originalne zamisli projektanta. Sva moguća tumačenja dozvoljena preko nekompletnosti specifikacije su sinonimi za nesigurnost specifikacije. Da ne bi bilo nedvosmislenosti, operater specifikacije mora biti potpun.

Za studiju ovog slučaja, kompletni operater specifikacije je definisan tokom faze projektovanja, preko projektanta. To omogućava najbolju zaštitu funkcionalnih zahteva kroz izbor najadekvatniji specifikaciji, onda se minimizuje nesigurnost korelacije.

Prema principu dualnosti, definisanje kompletnog operatera specifikacije implicira

definisanje idealnog operatera verifikacije.

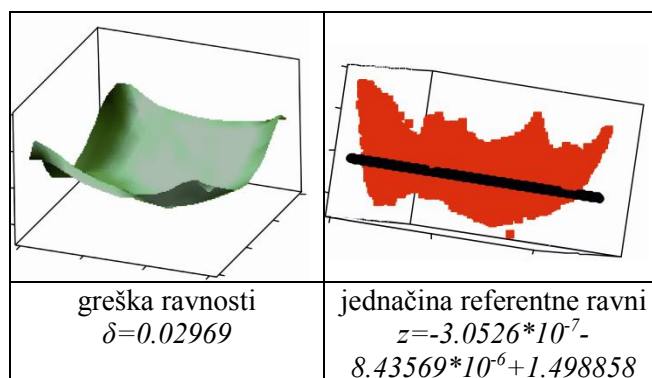
2.2 Primer slučaja

Na koordinatnoj mernoj mašini Carl Zeiss Contura g2 RDS ($MPE_E = 1.9 + L/330$) vršena inspekcija greške ravnosti brušene površine dimenzija 150*150mm. Kopletni specifikacioni operater ravnosti je definisan na slici 3. Operacije nad geometrijskim primitivom ravan su: ekstrakcija, filtracija, asocijacija i evolucije. Operacija ekstrakcije je vršena u diskretnom modu sa mernim pipkom prečnika 1 mm. Niža cut-off talasna dužina je podešena na 2.5 mm i prema gustini uzorkovanja ISO/TS 12780-2 [7] i u skladu sa Nyquistovim kriterijumom, zahteva se da rastojanje uzorkovanja bude manje od 0.357. Na osnovu ovoga se dobija broj tačaka idealnog specifikacionog operatera od 165310. Ovaj broj tačaka je sa ekonomskog stanovišta nerazuman i postoji posebno polje istraživanja koje se bavi optimizacijom broja tačaka i njihovog položaja za procenu tolerancija oblika. Za vrstu filtera je izabran Gaus-ov filter a metoda najmanjih kvadrata je korišćena za procenu referentne ravni. Evoluacija greške ravnosti je dobijena kao zbir rastojanja ekstremnih tačaka od referentne ravni.

	0.03	$\lambda_c = 2.5$	LS
--	------	-------------------	----

Slika 3. Kompletna specifikacija za toleranciju ravnosti

Na osnovu kompletno definisane specifikacije prema principu dualnosti sprovode se operacije verifikacije. Nakon uzorkovanja tačaka, korišćenja filtera odgovarajućeg propusnog opsega, dobijeni su parametri referentne ravni i procenjena je greška ravnosti (slika 4).



Slika 4. Procena greške ravnosti i referentne ravni metodom najmanjih kvadrata

Procena merne nesigurnosti je vršena prema vodiču za procenu merne nesigurnosti GUM. Metodologija primenjenog pristupa za grešku ravnosti je pokazana u [8,9]. Činioci nesigurnosti u ovom slučaju se odnose na nesigurnost hadvera na

dve ekstremne tačke koje u ovom slučaju predstavljaju $MPE_E/6$ i nesigurnost primenjene asocijativne metode. Formula za izračunavanje nesigurnosi je sledeća:

$$u_{\delta}^2 = \frac{\partial}{\partial x_1} u_{x_1}^2 + \frac{\partial}{\partial x_2} u_{x_2}^2 + \frac{\partial}{\partial y_1} u_{y_1}^2 + \frac{\partial}{\partial y_2} u_{y_2}^2 + \frac{\partial}{\partial z_1} u_{z_1}^2 + \frac{\partial}{\partial z_2} u_{z_2}^2 + \frac{\partial}{\partial a} u_a^2 + \frac{\partial}{\partial b} u_b^2 + 2 \frac{\partial}{\partial a} \frac{\partial}{\partial b} \rho_{ab} u_a u_b$$

Rešavanjem jednačine gore dobijena je proširena nesigurnost $U=2\mu m$ (faktor pokrivanja $k=2$). Na osnovu dobijenih rezultata može se konstatovati da za ukupan rezultata merenja ne može da se donese odluka o usaglašenosti / neusaglašenosti nego se odluka donosi neposredno između dostavljača i klijenta.

4. ZAKLJUČAK

Poznavanje vrednosti nesigurnosti je najbitniji koncept prema novoj generaciji geometrijske specifikacije proizvoda. U industrijskoj primeni merna nesigurnost je slabo zastupljena i treba je što više promovisati. Metodologija određivanja nesigurnosti prema GPS i kod primene KMM predstavlja veoma kompleksan zadatak i predstavlja jedno od najaktuelnijih polja istraživanja u ovoj oblasti proizvodne metrologije u poslednje dve decenije. Rezultati ovih napora su nekoliko standardnih upustava za procenu nesigurnosti serije ISO 15530 i komercijalni softveri zasnovani na simulaciji ponovljenih merenja. Prikazan pristup opisan u ovom radu predstavlja samo jedan od mogućih za procenu nesigurnosti.

4. REFERENCE

- [1] ISO 14253-1:1998. *Geometrical Product Specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment – Part 1: Decision rules for proving conformance or non – conformance with specifications*, ISO, 1998.
- [2] Ma, L., Jiang, X., Wang, J., Xu, Z., Li, Z.: *Study on the expression specifications of geometrical products for function, design, manufacture i verification based on the improved GPS language*, International Journal

of Advanced Manufacturing Technology, Vol 32, p.p. 990-998, 2007.

- [3] Srinivasan, V.: *Standardizing the specification, verification, and exchange of product geometry: Research, status and trends*, Computer Aided Design, Vol. 40, p.p. 738-749, 2008.
- [4] Durakbasa, N.M., Osanna, P.H., Afjehi-Sadat, A.: *A general approach to workpiece characterization in the frame of GPS (Geometrical Product Specification and Verification)*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 41 No. 13-14, p.p. 2147-2151, 2001.
- [5] ISO/TS 17450-2 „*Geometrical product specifications (GPS) - General concepts - Part 2: Basic Tenets, Specifications, Operators and Uncertainties*“, ISO, Geneve, 2002.
- [6] Wang, J.X., Jiang, X., Ma, L.M., Xu, Z.G., Li, Z.: *Decision rules for workpieces based on total uncertainty*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 28, p.p. 1169-1174, 2006.
- [7] ISO/TS 12780-2 (2003) *Geometrical product specifications (GPS) - Straightness - Part 2: Specification operators*. ISO, Geneve.
- [8] Wen, X-L., Zhu, X-C., Zhao, B-Y., Wang, D-X, Wang, F-L.: *Flatness error evolution and verification based on new generation geometrical product specification (GPS)*, Precision Engineering, Vol. 36, pp. 70-76, 2012.
- [9] Cui, C., Fu, S., Huang, F.: *Research on the uncertainties from different form error evaluation methods by CMM sampling*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 43, pp. 136-145, 2009.

Autori: M.Sc. Branko Štrbac, prof. dr. Vesna Jokić Spasić, vanr. prof. Vladan Radlovački, prof. dr. Janko Hodolić, prof. dr. Miodrag Hadžistević, Univerzitet Novi Sad, Fakultet Tehničkih Nauka, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Tel: +381 21 485 2316, Fax: +381 21 454-495.

e-mail: strbacb@uns.ac.rs
svesna@uns.ac.rs
rule@uns.ac.rs
hodolic@uns.ac.rs
miodrags@uns.ac.rs

Lanc, Z., Zeljković, M., Štrbac, B., Živković, A., Drstvenšek, I., Hadžistević, M.

EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE EMISIVNOSTI LEGURE ALUMINIJUMA AW 6082 INFRACRVENOM TERMOGRAFSKOM TEHNIKOM

Rezime: Koeficijent emisivnosti (ϵ) predstavlja optički parametar materijala koji pokazuje koliko je posmatrani materijal sposoban da emituje toplotu u odnosu na idealno crno telo pri istoj temperaturi. Emisivnost metala zavisi od temperature, hrapavosti i stanja površine materijala čija se temperatura određuje. U okviru ovog rada eksperimentalno je ispitana emisivnost legure aluminijuma AW 6082 infracrvenom termovizijskom kamerom, za 4 uzorka aluminijuma različite hrapavosti i pri temperaturama od 50, 100, 150 i 200°C. Rezultati pokazuju odstupanje od očekivanog ponašanja koeficijenta emisivnosti za metale. Emisivnost AW 6082 opada sa povećanjem temperature i hrapavosti površine u opsegu talasnih dužina između 8 μm i 14 μm .

Ključne reči: Emisivnost, AW 6082, infracrvena termografija

1. UVOD

Tačno i precizno merenje temperature aluminijumskih legura tokom gotovo svih faza obrade je bitno sa aspekta postizanja adekvatne mikrostrukture, mehaničkih svojstava i poboljšanja kvaliteta legura. Ovo je zbog toga što je mikrostrukturalni razvoj, kao i većina procesa obrade u aluminijumskoj industriji visoko temperaturno zavisna [1]. Pored ekstruzije, kovanja i valjanja, pri homogenizaciji, žarenju, starenju i drugim oblicima termičke obrade legura mogu se izdvojiti operacije kod kojih su temperatura i vreme faktori koji utiču na osobine legure. Kao ilustracija ovog efekta može se navesti primer veštačkog starenja različitih hladno deformisanih Al-legura koje se, u principu, može vršiti u temperaturnom intervalu 200–230°C u toku nekoliko časova, dok je na temperaturama iz opsega 100–120°C potrebno nekoliko desetina ili stotina časova [2]. Zbog svega navedenog, jasno je da je u aluminijumskoj industriji praćenje i merenje temperature od izuzetnog značaja.

U aluminijumskoj industriji se koriste različiti tipovi temperaturnih senzora, uključujući termoparove i radijacione termometre. Iako su u širokoj upotrebi, termistori i termoparovi mogu izazvati negativne uticaje u vidu parazitnih napona pri kontaktu senzora i ispitivane površine. Takođe im je nedostatak implementacija na nepristupačnim mestima, zbog čega je primena infracrvene termografije od velike koristi [3].

Infracrvena termografija predstavlja beskontaktni metod za merenje temperature, koja omogućava praćenje termičkih fenomena na površini u realnom vremenu. Ova metoda je pogodna za kontrolu industrijskih procesa, zbog

sposobnosti da vrši prostornu i vremensku termalnu analizu [4].

Jedan od najefikasnijih uređaja za beskontaktno merenje temperature jeste infracrvena termovizijska kamera. Termovizijska kamera beleži intenzitet infracrvenog zračenja koje telo emituje u zavisnosti od sopstvene temperature i koeficijenta emisivnosti. Koeficijent emisivnosti karakteriše koliko je posmatrano telo sposobno da apsorbuje i emituje toplotnu energiju i njegove vrednosti se kreću od 0 do 1. Zapravo, emisivnost predstavlja količnik intenziteta toplotne energije koju emituje realno telo i intenziteta toplotne energije koje emituje crno telo pri istoj temperaturi. Idealno crno telo je telo koje je u stanju da apsorbuje i emituje svu količinu zračenja koje dospe do njegove površine bez obzira na upadni ugao zaračenja. Koeficijent emisivnosti je ključan za termografska merenja, budući da bez poznavanja emisivnosti posmatranog materijala nije moguće odrediti pravu vrednost temperature [5].

Emisivnost aluminijuma zavisi od mnogih faktora, kao što su hemijski sastav legure, temperatura, opseg talasnih dužina u kojima se vrši merenje, stanje površine (oksidacija i hrapavost), vreme zagrevanja metala, ambijentalni uslovi, itd. [6]. Metali, generalno gledano, imaju nisku emisivnost, odnosno visoko su reflektivni, pa je iz tog razloga teško odrediti njihov koeficijent emisivnosti.

Zbog toga što emisivnost metala zavisi od hrapavosti obrađene površine i od temperature na kojoj se vrši merenje, mnogi autori su pokušali da odrede zavisnost između emisivnosti i navedenih parametara. Wen i Mudawar su uradili nekoliko studija u kojima su pokazali da emisivnost 4

različite legure aluminijuma: AW 1100, AW 7150, AW 7075 i AW 2024 uglavnom opada u opsegu talasnih dužina od 2.05 do 3.5 μm i raste između 3.05 i 4.72 μm . Takođe su utvrdili da koeficijent emisivnosti opada između 600 i 700 K i raste između 700 i 800 K, dok generalno, emisivnost raste sa povećanjem hrapavosti [1].

U drugoj studiji isti autori su pokazali da za iste legure aluminijuma samo AW 7150 pokazuje monotoni rast emisivnosti sa povećanjem temperature, AW 1100 (komercijalni čist aluminijum) pokazuje suprotni trend, dok emisivnost preostale dve legure opada između 600 i 700 K i raste između 700 i 800 K, gde je ovaj porast praćen promenom u boji legura od svetlo sive do crne [3].

Albatici i dr. su odredili koeficijent emisivnosti aluminijuma pomoću ITT emisometra na temperaturama od 100, 175 i 250°C, dobijene vrednosti koeficijenta emisivnosti iznosile su 0.368, 0.416 i 0.418, respektivno [7]. Valiorgue i dr. su napravili kalibracioni uređaj za određivanje emisivnosti, koji je koristio termovizijsku kameru, kako bi odredili emisionu krivu za čelik 316L. Pokazano je da emisivnost čelika raste između 100 i 200°C, nakon čega opada do 400°C [8].

Cilj ovog rada je eksperimentalno određivanje koeficijenta emisivnosti aluminijumske legure AW 6082 pomoću infracrvene termovizijske kamere za različite vrednosti kvaliteta obradene površine i temperature radnog predmeta.

2. OPIS METODOLOGIJE

U okviru ovog rada ispitana su četiri aluminijumska radna predmeta izrađenih od legure AW 6082 sa različitim površinskim hrapavostima. Svaki radni predmet je pojedinačno zagrevana u peći, na temperaturama od 50, 100, 150 i 200°C. Vrednost temperature zagrevanja je praćena on-line pomoću tri termopara koja su bila pričvršćena sa zadnje i prednje strane radnog predmeta. Tokom zagrevanja vrata peći su bila zatvorena. Nakon dostizanja pomenutih temperatura, vrata peći su otvorena, a termovizijskom kamerom je zabeležen intenzitet infracrvenog zračenja emitovanog sa posmatranog uzorka.

Dobijene termografke slike su analizirane u softveru *Guide IrAnalyser*, u kojem je podešen koeficijent emisivnosti za temperaturu koju su pokazali termoparovi.

2.1 Postavka eksperimenta

Tokom eksperimenta za zagrevanje radnih predmeta korišćena je peć ispred koje je postavljena termovizijska kamera na rastojanju od 1m. Uzorci su pojedinačno ispitivani.

Svaki uzorak je postavljen vertikalno unutar peći, tako da se zagrevanje vrši ravnomerno sa svih strana. Temperatura na radnim predmetima je praćena pomoću tri termopara tipa K, koji su izvedeni kroz gornji otvor peći do ručnog kontaktnog termometra tipa *PCE – T395*.

Sa zadnje strane radnog predmeta postavljena su dva termopara, koja su bila pričvršćena pomoću dve metalne pločice i vijaka, tako da kuglice termoparova budu na jednakoj udaljenosti od centra ploče, sa leve i desne strane. Sa prednje, desne strane uzorka postavljen je treći termopar, čiji je kontakt sa radnim predmetom učvršćen živom gumom.

Postavka eksperimenta je data na slici 1. Zbog pojave refleksije usled isijavanja grejača peći i mogućnosti dobijanja greške u rezultatu merenja, peć je obložena crnim limom koje je predstavljalo simulaciju crnog tela.



Sl. 1. Eksperimentalna postavka

Termografsko merenje je vršeno pomoću termovizijske kamere tipa *ThermoPro™ TP8S*, rezolucije 640×480 piksela. Prilikom eksperimenta ambijentalna temperatura je iznosila 25°C.

2.2 Uzorci AW 6082

Ispitivanje je vršeno na leguri aluminijuma iz serije 6XXX, koja pripada aluminijumskim legurama sa silicijumom i magnezijumom. Legura AW 6082 je srednje čvrstoće i izuzetno je otporana na koroziju, zbog čega ima široku primenu u industriji. Procentualni udeo silicijuma, mangana i magnezijuma u leguri, je sledeći:

- Si – 0.7%,
- Mn – 0.4 % i
- Mg – 0.6%.

Za potrebe eksperimenta površine 4 ploče aluminijuma, dimenzija 150×150×10 mm, su obrađene na različite načine. Tri radna predmeta su obrađena različitim režimima glodanja, dok je četvrti obrađen brušenjem.

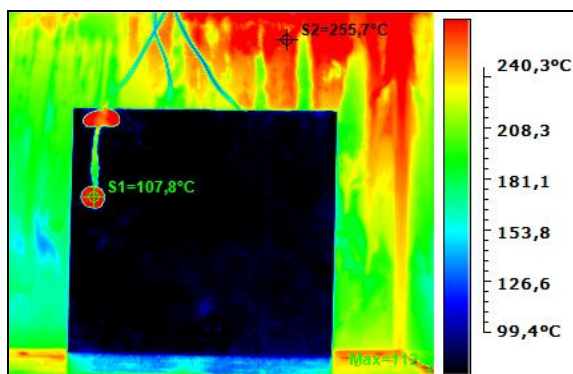
Vrsta obrade ploče	Hrapavost Ra [μm]	Oznaka uzorka
Brušenje	1.07	B. 1
Glodanje I	1.55	Gl. 1
Glodanje II	1.25	Gl. 2
Glodanje III	1.77	Gl. 3

Tabela 1. Karakteristike uzoraka

Hrapavost svakog uzorka je izmerena kontaktnim profilometrom na devet mernih mesta uniformno raspoređenih na ploči. Uređaj je izmerio srednju aritmetičku vrednost hrapavosti Ra u μm , koja predstavlja srednju vrednost sume odstojanja svih tačaka efektivnog profila od srednje linije, na određenoj referentnoj dužini. Iz devet izmerenih vrednosti izračunata je srednja vrednost Ra. Hrapavost, vrsta obrade i oznaka svake ploče je data u Tabeli 1.

2.3 Eksperimentalna procedura

Aluminijumski radni predmeti su zagrevani u peći na četiri različite temperature: 50, 100, 150 i 200°C. Tokom zagrevanja uzorka vrata peći su bila zatvorena, a vrednost temperature merene termoparovima je praćena on-line na računaru. U trenutku postizanja za nekoliko stepeni veće temperature od željene, grejači su ugašeni, vrata peći su otvorena i snimljena je termografska slika uzorka. Postupak je ponovljen za svaku od navedenih temperatura i za svaku ploču pojedinačno.



Sl. 2. Termogram ploče od brušenog aluminijuma B. 1 pri temperaturi od 100°C

Termovizijskom kamerom je vršeno snimanje u opsegu talasnih dužina od 8 do 14 μm , pri čemu je korišćen Filter 1, za temperature do 200°C. Pre svakog snimanja termovizijskom kamerom izvršena je kalibracija, a slika je izoštrana kako bi se dobili što jasniji termogrami. Jedan od

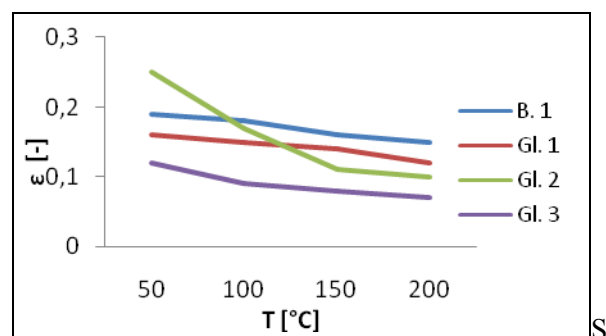
termograma je prikazan na slici 2. Svetlije oblasti na termogramu su najtoplije, dok su tamnije ujedno i najhladnije. Najviše temperature su zabeležene iza ploče, na crnom limu, zbog uticaja grejača sušare.

Dobijeni termogrami su analizirani u programu Guide IrAnalyser, koji daje mogućnost da se za izabranu tačku na ploči podesi koeficijent emisivnosti. Koeficijent emisivnosti je podešavan između vrednosti 0 i 1, dok god se za posmatranu tačku ne dobije temperatura koju je izmerio termopar sa prednje strane ploče.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

3.1 Uticaj temperature

Aluminijum je jedan od metala čije emisione karakteristike umnogome variraju sa promenom temperature, hrapavosti, stanja površine i vrste legure. Kao što se može primetiti sa slika 3. emisivnost sva 4 uzorka opada između 50 i 200°C u intervalu talasnih dužina od 8-14 μm , što nije tipičan trend za metale.



Sl. 3. Uticaj temperature na emisivnost

Najviša emisivnost je zabeležena za uzorak Gl. 2. na 50°C ($\epsilon = 0.25$), dok je najmanju emisivnost imao uzorak Gl. 3. pri temperaturi od 200°C ($\epsilon = 0.07$).

3.2 Uticaj hrapavosti

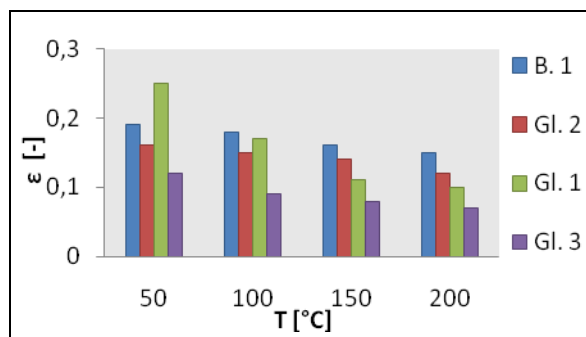
Radi lakšeg tumačenja rezultata u Tabeli 2 rezultati su prikazani za uzorke, poređani u rastućem nizu prema hrapavosti.

T [°C]	ϵ (B.1)	ϵ (Gl.2)	ϵ (Gl.1)	ϵ (Gl.3)
50	0.19	0.25	0.16	0.12
100	0.18	0.17	0.15	0.09
150	0.16	0.11	0.14	0.08
200	0.15	0.10	0.12	0.07

Tabela 2. Emisivnost uzoraka pri različitim T

Na slici 4. data su četiri histograma tako da se može izvršiti poređenje koeficijenta emisivnosti aluminijumskih ploča različitih hrapavosti na istoj temperaturi.

Na temperaturi od 50°C uzorak Gl. 2 ima veću emisivnost od uzorka B. 1., što je očekivano, ali uzorak B. 1. iako ima najmanju hrapavost njegov koeficijent emisivnosti je veći od preostala dva uzorka, dok najmanju emisivnost ima uzorak sa najvećom hrapavošću, Gl. 3.



Sl. 4. Uticaj hrapavosti na emisivnost

Na 100°C najvišu emisivnosti ima uzorak B. 1., dok najmanju ima uzorak Gl. 3. Uzorak Gl. 1 na 100°C ima veću emisivnost od uzorka Gl. 2. Na višim temperaturama od 150 i 200°C emisivnost opada sa povećanjem hrapavosti.

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu prezentovanih rezultata, zaključuje se da koeficijent emisivnosti legure aluminijuma AW 6082 opada sa porastom temperature u temperaturnom opsegu od 50 do 200°C i opada sa povećanjem hrapavosti od 1.07 do 1.77 μm u spektralnom opsegu od 8 do 14 μm. Vrednosti koeficijenta emisivnosti se kreću u granicama od 0.05 do 0.3, što je u dobroj korelaciji sa rezultatima drugih autora [1,2].

Zbog svog kompleksnog emisionog ponašanja, određivanje temperature aluminijuma infracrvenom termografijom može biti problematično. S obzirom na to da se u literaturi ne mogu naći tablice za koeficijent emisivnosti aluminijuma u zavisnosti od temperature, hrapavosti i vrste legure, problem može biti dodatno otežan.

Pored svega navedenog, prilikom termografskog ispitivanja mora se voditi računa o uticaju drugih toplotnih izvora, zbog toga što je aluminijum visoko reflektivan materijal, usled čega može doći do znatnih grešaka u merenju.

U budućim istraživanjima autori će pokušati da odrede emisivnost različitih legura aluminijuma pomoću termovizije pri višim temperaturama i u strožije kontrolisanim laboratorijskim uslovima, kako bi se minimizirao uticaj okolnih toplotnih izvora. Jedan od predloga za dalja ispitivanja jeste da se koriste uzorci manjih dimenzija, radi lakšeg postizanja uniformne temperature uzorka.

5. REFERENCE

- [1] Wen, C., Mudawar I.: *Emissivity characteristics of roughened aluminum alloy surfaces and assessment of multispectral radiation thermometry (MRT) emissivity models*, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 47, p.p. 3591-3605, avgust 2004.
- [2] Ivanov, S., Ivanić, Lj., Gusković, D., Mladenović, S.: *Optimization of the aging regime of Al-based alloys*, Hemijska industrija, Vol. 66, p.p. 601-607, 2012.
- [3] Wen, C., Mudawar I.: *Emissivity characteristics of polished aluminum alloy surfaces and assessment of multispectral radiation thermometry (MRT) emissivity models*, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 48, p.p. 1316-1329, mart, 2005.
- [4] Iniewski, K.: *Smart Sensors for Industrial Applications*, CRC Press, Boca Raton, 2013.
- [5] Incropera, F., Dewitt, D.: *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley and Sons, New York, 2002.
- [6] Bently, E.: *Temperature and Humidity Measurement*, Springer Science & Business Media, Lindfield, 1998.
- [7] Albatici, R., Passerini, F., Tonelli, A., Gialanellac, S.: *Assessment of the thermal emissivity value of building materials using an infrared thermovision technique emissometer*, Energy and Buildings, Vol. 66, p.p. 33-40, juli, 2013.
- [8] Valiorgue, F., Brosse, A., Naisson, P., Rech, J., Hamdi, H., Bergheau, J.: *Emissivity calibration for temperatures measurement using thermography in the context of machining*, Applied Thermal Engineering, Vol. 58, p.p. 321-326, april, 2013.

Autori: M.Sc. Zorana Lanc, prof. dr Milan Zeljković, M.Sc. Branko Štrbac, doc. dr Aleksandar Živković, prof. dr Miodrag Hadžistević, Univerzitet Novi Sad, Fakultet Tehničkih Nauka, Institut za Proizvodno mašinstvo, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Tel: +381 21 485 2306, Fax: +381 21 454-495.
e-mail: zoranalanc@uns.ac.rs; milanz@uns.ac.rs; strbac@uns.ac.rs; aco@uns.ac.rs; miodrags@uns.ac.rs

Prof. dr Igor Drstvenšek, Univerzitet u Mariboru, Strojnički fakultet, Smetanova 17, SI-2000 Maribor, Slovenija, Tel: +386 2 220 75 93.
e-mail: drsti@uni-mb.si

Brajlih, T., Kadivnik, Z., Paulic, M., Irgolic, T., Hadzistevic, M., Matin, I., Drstvensek, I.

COMPARISON OF SELECTIVE LASER SINTERING AND INJECTION MOULDING

Abstract: *This paper presents a comparison between selective laser sintering and injection moulding technology for the production of small batches of plastic products. The comparison is based on analysing the time-cost efficiencies of each manufacturing process regarding the size of the series regarding the selected product sample. Both technologies are described and the times and costs of those individual processes needed to create a final product are assessed when using each of the manufacturing processes. The presented analysis could be used as a general guideline for decision-making process regarding the more efficient manufacturing methods*

Key words: *Additive Manufacturing; Selective Laser Sintering; Injection Moulding; Time-Cost Analysis*

1. INTRODUCTION

For a long period additive manufacturing machines were mainly used for Rapid Prototyping. The parts made by these machines were used as various prototypes during different stages of product development. That meant that this was mainly individual or very low volume production at which additive manufacturing machines were generally more efficient than conventional manufacturing processes. Later, the Rapid Manufacturing term was established to describe cases of using Additive Manufacturing machines for producing end-user parts. Nevertheless, in the majority of these kinds of cases, it was individual, highly customised or very low volume production. Usually the search for the most appropriate manufacturing process was made amongst different additive manufacturing technologies. The most important decision criteria were usually the available material properties and achievable accuracy [1, 2], whilst manufacturing time and cost differences played only minor roles. The purpose of the research presented in this paper was to evaluate the efficiencies of additive manufacturing regarding larger series. In such cases comparisons have to be made between conventional manufacturing processes that are usually used during high volume production.

2. STATE OF THE ART

The first research into the efficiencies of using additive manufacturing was focused within the field of Rapid Prototyping. These kinds of studies [3, 4] examined how additive manufacturing performs compared to conventional workshop-based prototyping. The advantages shown by these studies, and proven by the quick expansion of

additive manufacturing machines, enabled a new field of Rapid Manufacturing. Initial studies in this field mainly focused on comparing different additive technologies and machines between themselves [2, 4]. In addition, based on certain gained results, some decision making models were established [1, 3]. There have also been studies that compared additive manufacturing to conventional manufacturing at high volume series but which usually also included some redesigning of the product itself by making it more adaptable to additive technologies [4].

3. RESEARCH APPROACH

At the beginning of the research a decision was made to limit the study to a single-product and the study was to be limited to the plastic part of the production. In order to obtain useful results, a real life example was needed of a part that would fit the description of a 'standard usual mass-produced plastic part. A plastic cylindrical protective cover was chosen (Fig. 1).

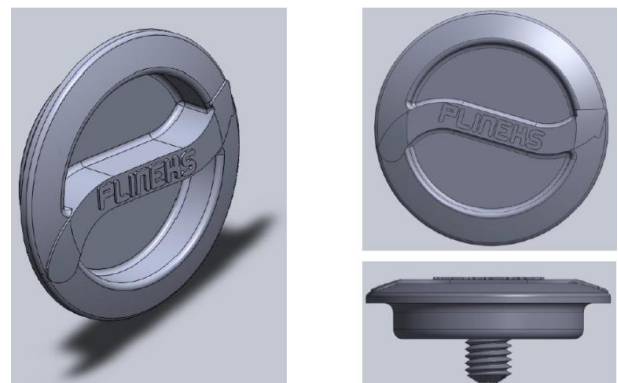


Fig. 1. Selected product

The greater diameter of the part was 55 mm and the part's complexity was limited to company logo

and an M10 thread on the part. In addition the company interested in producing the part was fairly unsure of possible series volume, making the selected part even more appropriate for a planned study.

4. SELECTIVE LASER SINTERING

Selective laser sintering is an additive manufacturing technology that uses a laser as the power source to sinter powdered material, binding the material together to create a solid structure. The manufacturing procedure begins with CAD data preparation, orientation and placement in the machine's workspace, and layer and laser strategy definitions. In the next phase, the machine manufactures the parts. After the required cooling-down period, the parts can be cleaned.

Previous research has already proved that an individual part's cost depends largely on how efficiently the machines workspace is used during manufacturing [3]. The following analysis was made using selected product sample, a selective laser sintering machine with a workspace volume of 200 x 250 x 330 mm and 0.1 mm layer thickness when manufacturing. If we build just one part it takes the machine 2.05 hours to finish the manufacturing phase. If the entire level is filled (12 parts) manufacturing takes 2.65 hours. We can further increase the workspace yield by placing an additional 12 reoriented parts above the first level. In this case the manufacturing of 24 parts takes 4.65 hours.

The corresponding drop of in an individual part's required manufacturing time is presented by the following diagram (Fig. 2).

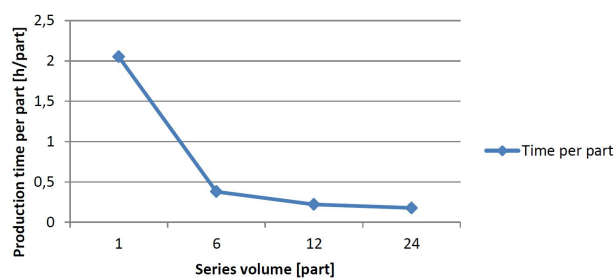


Fig. 2. Diagram of production time per part

If the entire workspace of the machine is filled by vertically adding this 24 parts setup, 192 parts are manufactured in 34.75 hours. Therefore, if serial production of the part is considered, it makes sense to continually manufacture parts with completely filled workspace volume jobs. Such production begins with initial data and machine preparation. Before manufacturing starts, a selective laser sintering machine has to be slowly preheated to the working temperature.

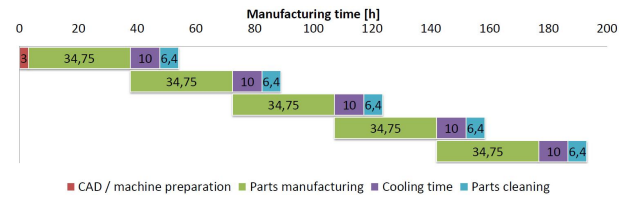


Fig. 3. Selective laser sintering serial production workflow

During this time, CAD data and a controller program can also be prepared. When the manufacturing phase of the first job is finished the cooling down period begins. If the selective laser sintering machine has a removable workspace frame, this can be performed outside the machine. This means that the next process of manufacturing can start with the same program on an already preheated machine. When the cooling of the first process has finished, there is still enough time for all the parts to be cleaned before the next parts are completed on the same machine (Fig. 3).

In order to calculate the costs of serial production it was presumed that the selective laser sintering machine would be run 24 hour per day. The work runs over three shifts with one worker running and supervising the machine and also cleaning the finished parts, during each shift. The combined machine/worker hours was estimated at 25 €/hour. The materials' cost must also be added, and was estimated at 2 € per part, presuming the previously presented workspace yield and recommended 50 % used powder refresh rate. Now, the series volume dependent price part can be calculated (Fig. 4). The serial production runs in steps of 192 parts. The material and machine/worker's hourly costs during the required jobs are added to the costs of the initial CAD/machine preparation and final cooling-down and cleaning phases, when the serial production on the machine has already stopped.

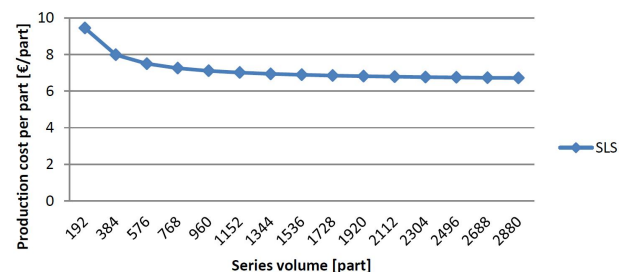


Fig. 4. Series volume dependant production costs per part

5. SELECTIVE LASER SINTERING

Injection moulding is a manufacturing process for producing parts by injecting the material into a mould. Injection moulding can be performed using

a host of materials, including metals, glasses, elastomers, and most commonly thermoplastic and thermosetting polymers. After a product has been designed, usually by an industrial designer or an engineer, moulds are made by a toolmaker from metal, usually either steel or aluminium, and precision-machined to form the features of the desired part.

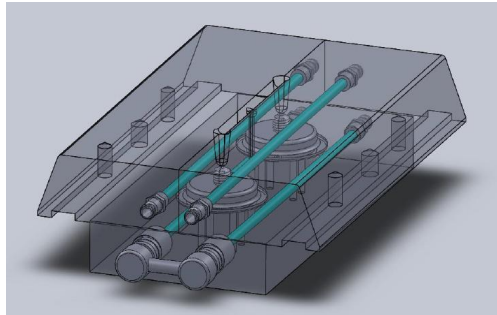


Fig. 5. Mould cavity design

In regard to the selected sample part, a two-nested cavity design was predicted in order to enable the removal of finished parts from the mould and a three-part cavity plate design was constructed (Fig. 5).

Besides the cavity part of the mould, other construction parts are also necessary when using the mould on a standard injection moulding machine. These parts are usually bought from standard mould parts' suppliers. The price of the standard parts necessary for tool assembly is usually a good indicator of the final mould price (often 50 % of the final price contributes to the standard parts). After consultation with a renowned mould making shop in Slovenia the final price of the selected injection mould design was estimated at 8,000 €.

Mould manufacturing time estimation was made under ideal circumstances, which meant that the mould making shop had free capacity to start each phase of the manufacturing process as soon as possible [2]. In such a case, 8 days were estimated to be required for presented the injection mould (Fig. 6).

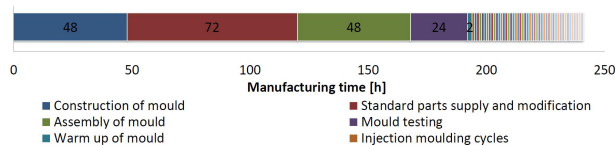


Fig. 6. Injection moulding serial production workflow

Next, a serial production on the injection moulding machine can begin. Again, a continual three-shift production was predicted. After 3 hour the initial mould/machine setup is performed 40 seconds (predicted by an injection moulding simulation software) sequential production of 2 parts begins. For the series number dependent price parts to be

calculated, the costs of mould production, combined injection moulding machine/worker cost (20 €/h) and material costs (1 €/part) have to be considered (Fig. 7).

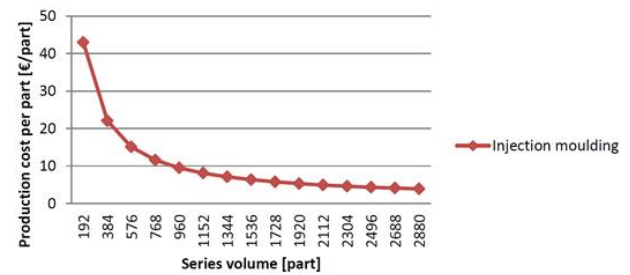


Fig. 7. Series volume dependand production costs per part.

6. SERIES VOLUME BASED COMPARISON

6.1. Production costs analysis

Production costs per part with selective laser sintering becomes almost constant for series volumes higher than 192 parts, due to only the initial CAD/machine preparation and final cooling-down and cleaning phase being distributed between more produced parts. In contrast, with injection moulding much higher mould production costs (per part) are quickly compensated by technology's much faster production rate.

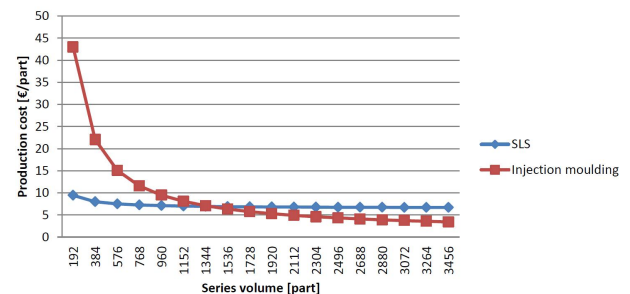


Fig. 8. Comparison of production costs per part

Naturally, a break-even point (a production volume at which the production costs per part are the same, regardless of the technology) is interesting (Fig. 8).

During the presented comparison an exact break-even point number could not be determined due to a lack of the necessary 192 parts cycle of selective laser sintering for the estimated production cost to be valid. However, a 192 interval value could be found after which the production costs per part of injection moulding fell below the almost constant costs per part of selective laser sintering. In the presented case this number was at 1344 parts at which the costs per part of selective laser sintering were 6.94 €/part whilst the injection moulded parts were at 7.09 €/part (Fig. 9).

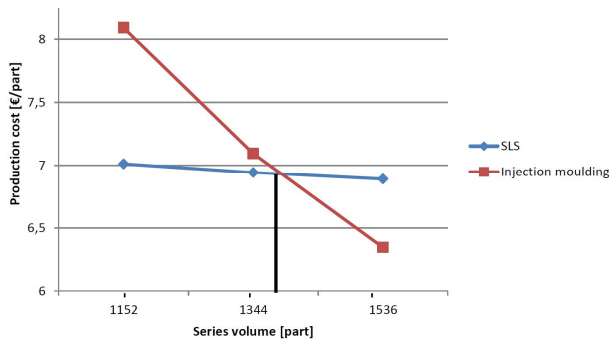


Fig. 9. Break-even point estimation

6.2. Production time analysis

The following production time analysis is also based on ideal circumstances that both technologies are available for any phase of production to start as soon as possible. With selective laser sintering production can start immediately and after 54 15 hours the first 192 parts were finished. Afterwards, each new batch of 192 parts was finished in 34.75 hours. With injection moulding technology an initial phase of mould production results in an 8 days waiting period for the first parts to be completed. Afterwards injection moulding production starts and quickly overtakes with 3150 parts already completed, when selective laser sintering would still be manufacturing the 192 part steps to 1152 series volume (Fig. 10). At that volume (3150 parts) the production costs per part of injection moulding would have already fallen to 3.6 €/part.

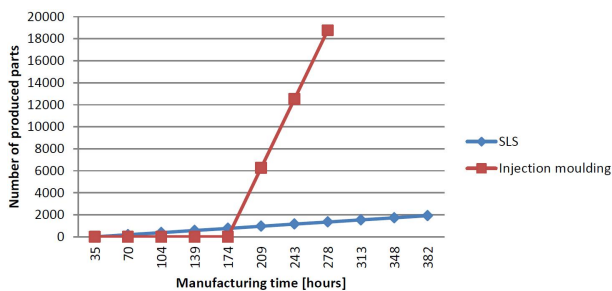


Fig. 10. Comparison of produced parts numbers

7. DISCUSSION

The presented results clearly show that selective laser sintering cannot compete with injection moulding regarding anything that could be considered as high volume production. The absolute numbers presented in this paper are only valid for the selected part's production, but general cost per part relationship between both technologies could be attributed to a general case. With injection moulding, there are always high initial costs for mould production that have to be compensated by larger series volume. Therefore, for any plastic part a certain lower limit of the

series volume that is more cost-effective to be produced on selective laser sintering machine can be determined. This limit in a general case depends largely on how many parts are possible to be produced with maximal workspace volume yield within a single selective laser sintering machine run [3]. This means that the part's maximal outer dimension and geometrical properties in connection with the particular machine's workspace have to be considered for each case. In a case when only single part serial production is considered and final CAD data is already available, an efficient workspace yield layout for that part can be quickly determined relatively. Once this is established, a predictively required manufacturing time can be obtained from a selective laser sintering machine's software.

8. REFERENCES

- [1] Goffard, R., Sforza, T., Clarinval, A., Dormal, T., Boilet, L., Hocquet, S., and Cambier, F., 2013, *Additive manufacturing of biocompatible ceramics*, Advances in Production Engineering & Management, vol. 8, no. 2, pp. 96–106.
- [2] Campbell, I., Bourell, D. and Gibson, I., 2012, *Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age*, Rapid Prototyping Journal, vol. 18, no. 4, pp. 255–258.
- [3] Gracanin, D., Lalic, B., Beker, I., Lalic, D. and Buchmeister, B., 2013, *Cost-time profile simulation for job shop scheduling decisions*, International Journal of Simulation Modelling, vol. 12, no.4, pp. 213–224.
- [4] Evans, M. A. and Campbell R. I., 2003, 'A comparative evaluation of industrial design models produced using rapid prototyping and workshop-based fabrication techniques', Rapid Prototyping Journal, vol. 9, no. 5, pp. 344–351.

Authors: Dr. Tomaz Brajljih, B.Sc. Ziga Kadivnik, B.Sc. Matej Paulic, B.Sc. Tomaz Irgolic, Prof. Dr. Miodrag Hadzistevic, Dr. Ivan Matin, Prof. Dr. Igor Drstvensek, University of Maribor, Faculty of Mechanical Engineering, Institute for Production Engineering, Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenia, Phone.: +386 2 220 7596, Fax: +386 2 220 7996.

E-mail: tomaz.brajlih@um.si
 ziga@ortotip.com
 matej.paulic@gmail.com
 tomaz.irgolic@gmail.com
 miodrags@uns.ac.rs
 matini@uns.ac.rs
 igor.drstvensek@um.si

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
ETIKUM 2015

PROCEEDINGS

Session 3:
METROLOGY AND QUALITY IN THE FIELD OF
ENVIRONMENTAL PROTECTION

Novi Sad, 19 – 20 June 2015.

Rad po pozivu

Nakomčić-Smaragdakis, B., Čepić, Z., Dragutinović, N.

**ENERGETSKI POTENCIJAL I ZNAČAJ KORIŠĆENJA POLJOPRIVREDNE
BIOMASE U AP VOJVODINI**

Rezime: Naša zemlja ima relativno visoku stopu rasta potrošnje energije, a to upućuje na potrebu za racionalnim korišćenjem svih raspoloživih količina dostupnih energenata. Navedene okolnosti jasno nalažu potrebu za stvaranje uslova za veće učešće biomase u proizvodnji korisnih oblika energije. Korišćenje poljoprivredne biomase u AP Vojvodini, kao izrazito poljoprivrednoj regiji, ima značaj, ne samo za trenutno rešavanje problema snabdevanja energijom i njene visoke cene, već i za dugoročno rešavanje problema zaštite životne sredine. Dodatni značaj razmatranjima potencijala poljoprivredne biomase kao izvora energije, svakako daje proces prilagođavanja i pripreme za uključivanje Republike Srbije u Evropsku Uniju.

Ključne reči: Energetski potencijal, Poljoprivredna biomasa, Toplotna moć

1. UVOD

Klimatske promene, većim delom prouzrokovane pojačanim efektom staklene bašte, kao i smanjenje rezervi fosilnih goriva, pokrenuli su brojne mere na globalnom nivou. Jedna od njih jeste veće korišćenje obnovljivih izvora energije (OIE). Evropska Unija je Direktivom 2009/28/EC, detaljno definisala ciljeve u ovoj oblasti. Kao glavni cilj navodi se, da u EU do 2020. godine udeo OIE u potrošnji primarne energije bude najmanje 20%, a da se bar 20% električne energije proizvede iz OIE. Rad na ostvarenju ciljeva Direktive obaveza je za sve članice, pa i one koje to žele da postanu. U R. Srbiji je 2010. godine prvi put donesen Akcioni plan za biomasu u kom je definisana strategija za korišćenje biomase, kao obnovljivog izvora energije, u skladu sa važećim strategijama, zakonskim regulativama i evropskim direktivama. Ratifikacijom Ugovora o osnivanju energetske zajednice R. Srbija se obavezala da donese i realizuje plan primene direktive 2003/30/EC o promovisanju primene biogoriva.

U Autonomnoj Pokrajini Vojvodini najveći potencijal obnovljivih izvora energije predstavlja biomasa [1], pre svega čvrsta biomasa, nastala ratarskom proizvodnjom. Ostaci poljoprivredne biomase predstavljaju značajan izvor energije u svim regijama čiji se razvoj bazira na poljoprivrednoj proizvodnji, a najčešći oblik energije koji se dobija korišćenjem biomase je toplotna energija nastala njenim sagorevanjem. Za njeno korišćenje neophodan je razvoj povoljnih uređaja sa širokim mogućnostima upotrebe koji bi mogli da koriste biomasu iz ratarske proizvodnje, kao veoma raspoloživ i trenutno vrlo ekonomski

prihvatljiv izvor energije. Uređaji za sagorevanje moraju biti u što većoj meri automatizovani, a sa mogućnošću da koriste baliranu biomasu koja sada nema adekvatnu primenu. Treba naglasiti da je prilikom sagorevanja biomase neophodno voditi računa da celokupan proces bude usaglašen sa tri osnovna uslova: efikasnost procesa, zaštita životne sredine i održivi razvoj [2].

Korišćenje poljoprivredne biomase u energetske svrhe bi trebalo biti najzastupljenije u malim mestima i seoskim sredinama, u poljoprivredi (plastenici, staklenici, staje, živinarske farme i dr.), u malim preduzećima koja se bave preradom poljoprivrednih proizvoda (mini mlekare, klanice, sušare), za grejanje objekata i slično. Međutim i pored visokog potencijala, trenutno korišćenje biomase u energetske svrhe u AP Vojvodini je još uvek malo zastupljeno, sporadično i zasnovano na pojedinačnim inicijativama. Glavni razlog je nepostojanje razvijenog tržišta i konkretne systemske podrške za intenziviranje korišćenja biomase u energetske svrhe [3, 4].

U radu će biti prikazan energetski potencijal i značaj korišćenja poljoprivredne biomase u AP Vojvodini.

2. ZNAČAJ KORIŠĆENJA POLJOPRIVREDNE BIOMASE U ENERGETSKE SVRHE

Autonomna Pokrajina Vojvodina raspolaže relativno velikim potencijalima biomase, koja predstavlja nusproizvod u primarnoj poljoprivrednoj proizvodnji. Ukupna produkcija biomase od jednogodišnjih poljoprivrednih kultura

se u AP Vojvodini procenjuje na nešto preko 6 miliona tona godišnje.

Prema [1], ako bi se u energetske svrhe iskoristila samo jedna četvrtina navedene biomase dobila bi se energija koja bi bila dovoljna da se u agrokompleksu podmire skoro sve potrebe za niskotemperaturnom energijom stacionarnih energetskih sistema (grejanje, dorada proizvoda u procesnim postrojenjima, sušenje u malim sušarama i slično). Međutim, treba naglasiti da se prema [5] korišćenje biomase u energetske svrhe isplati samo ako je mesto njenog nastajanja u blizini mesta njenog korišćenja. Usled visoke cene transporta i manipulacije biomasom, ističe se da je maksimalna udaljenost mesta nastanka i mesta korišćenja svega 10-15 km i u tim uslovima se prelazak sa fosilnih goriva na biomasu prema [6] isplati već u prvih 5 godina. Ukoliko bi se biljni ostaci poljoprivredne proizvodnje koristili za gore navedene svrhe, njeno korišćenje bi odmah bilo ekonomski isplativo, jer bi se biomasa koristila u neposrednoj blizini njenog nastanka, pa bi postojala potreba samo za lokalnim transportom. Na ovaj način bi najveći problemi vezani za potrebe skupog transporta, manipulacije i skladištenja biomase bili rešeni. I pored toga, najveći deo biomase biva ostavljen na samoj njivi, spaljen i zaoran. Mada je ovaj tretman ekološki neprihvatljiv i zakonski zabranjen, dosta je raširen, pošto nema adekvatne primene zakonske regulative.

Kao razlog male dosadašnje iskorišćenosti poljoprivredne biomase, osim skupog transporta, prvenstveno se ističe mala toplotna moć biomase po jedinici skladišne zapremine, njeno periodično nastajanje, velika količina i nepovoljne osobine pepela, sklonost ka biohemijskoj degradaciji, i još uvek relativno skupi i nedovoljno automatizovani uređaji za njeno sagorevanje. Međutim, glavni razlog za nekorišćenje biomase u energetske svrhe je to što ne postoji organizovano tržište i konkretna sistemska podrška za inteziviranje korišćenja biomase, kao i dovoljan broj korisnika koji bi prepoznali značaj njenog korišćenja, imajući u vidu trenutno važeće paritete cena električne energije i drugih energenata. Bez obzira na sve, usled respektabilnih potencijala, ona se može smatrati značajnim izvorom energije [7].

Takođe, treba istaći da primarna prednost biomase kao izvora energije nije u njenom značajnom potencijalu, već u obnovljivosti. Upravo obnovljivost daje suštinsku prednost biomasi nad konvencionalnim, fosilnim gorivima koja su neobnovljiva i samim tim ne mogu biti osnov za planiranje održivog razvoja koji podrazumeva racionalno korišćenje energije.

Osim toga, korišćenje biomase u energetske

svrhe ima značaj kako u socio-ekonomskom tako i u ekološkom smislu, jer je CO₂ neutralno gorivo. Omogućava povećanje energetske nezavisnosti jedne zemlje od uvoza energenata. Obezbeđuje otvaranje novih radnih mesta i razvoj prateće infrastrukture, a sa aspekta zaštite životne sredine omogućava smanjenje GHG emisije.

3. ENERGETSKI POTENCIJAL POLJOPRIVREDNE BIOMASE AP VOJVODINE

Autonomna Pokrajina Vojvodina je izrazito poljoprivredna regija. Više od polovine (55,6%) društvenog proizvoda AP Vojvodine u 2004. godini se odnosi na prerađivačku industriju i poljoprivredu (uključujući i šumarstvo). AP Vojvodina sa 1.789.841 ha obradive zemlje, od čega 1.579.597 ha oranica, ima značajni klimatski i zemljišni potencijal za proizvodnju energetskih kultura [8].

Brkić i Janjić su u svom radu [4] dali procene količina poljoprivredne biomase u AP Vojvodini, na oko 6 miliona tona godišnje (Tabela 1), konstatujući da je ona smanjena u odnosu na ranije periode za 30 do 40%, pre svega zbog promene strukture setve.

Kultura	Površina [ha]	Prinos biomase [t/ha]	Masa biomase [t/god]
Pšenica	297.403	3,766	1.120.074
Raž	1.474	3,056	4.506
Ječam	47.921	3,234	154.964
Ovas	5.179	2,344	12.140
Kukuruzovina (stablo+oklasak)	636.728	5,165	3.288.447
Suncokret (stablo+glava)	171.489	4,565	680.714
Suncokret (ljuska)	-	0,595	102.107
Soja	127.856	4,852	620.358
Uljana repica	4.204	4,180	17.572
Duvan (stablo)	4.321	0,516	2.230
Ukupno	1.296.575	4,630	6.003.112

Tabela 1. Proizvodnja biomase u ratarstvu AP Vojvodine (2003. - 2007.) godine [4]

Poljoprivrednu biomasu čine ostaci jednogodišnjih kultura kao što su: stabljika, glava, oklasak i ljuska. Analizirajući podatke iz Tabele 1, vidi se da u ratarskoj proizvodnji AP Vojvodine svake godine nastane preko 6 miliona tona poljoprivredne biomase, od čega su najzastupljeniji kukuruzovina (stablo i oklasak) sa 54,8%, pšenična slama sa 18,7% i suncokret (stablo, glava i ljuska) sa 13%.

U nizu mogućih načina kvalitetnog iskorišćenja poljoprivredne biomase kao goriva je njeno sagorevanje u cilju transformacije hemijske energije ove materije u korisne oblike energije. To su uglavnom razni vidovi namenske toplotne energije (zagrevanje objekata, sanitarna topla potrošna voda i sl.) i električna energija kao vid energije pogodan za najširu upotrebu.

Procenjuje se da od ukupne količine poljoprivredne biomase koja godišnje nastane u ratarstvu Vojvodine može da se iskoristi oko trećine u svrhu proizvodnje toplotne i/ili električne energije, što je energetska ekvivalentno sa 0,7 miliona tona ekvivalentne nafte. Preostali deo biomase mogao bi da se usmeri na povećanje plodnosti zemljišta, za prostirku u stočarstvu, za povrstarsku proizvodnju, za poliranje u metalnoj industriji, za izolaciju u građevinarstvu, za kozmetičku industriju, za proizvodnju stočne hrane i u druge svrhe [4].

Poljoprivredna biomasa, kao čvrsto biogorivo, ima svoje specifične karakteristike u odnosu na konvencionalne vrste goriva, u pogledu: hemijskog sastava, temperature sagorevanja, tačke topljenja pepela, toplotne vrednosti i stepena zagađivanja životne sredine [9].

Jedan od najvažnijih pokazatelja upotrebljivosti neke materije kao goriva je njena toplotna moć. Toplotne moći poljoprivredne biomase se razlikuju u zavisnosti od vrste i sastava, a najviše od njenog sadržaja vlage. Toplotne moći biomase su znatno manje od tečnih ili gasovitih fosilnih goriva, rukovanje biomasom je znatno teže, ali je bez obzira na to njena upotreba značajna.

Kako se u praksi poljoprivredna biomasa nikad ne koristi suva, treba imati u vidu da sa porastom vlage njena toplotna moć opada. Tako, Martinov u svom radu [10] navodi srednju vrednost donje toplotne moći pšenične slame (za uzorke od 15% vlage) od 13,1 MJ/kg. Brkić i Janić u [11] iznose orijentacionu vrednost za donju toplotnu moć pšenične slame od 14,0 MJ/kg, pri njenoj skladišnoj vlažnosti od 14%, a Viglasky [12] navodi interval od 14,6 do 15,8 MJ/kg. Donja toplotna moć žitne i sojine slame pri ravnotežnom sadržaju vlage kreće se od 14,0 do 15,7 MJ/kg, slame uljane repice 17,4 MJ/kg, kukuruzovine 13,7 MJ/kg, a kukuruznog oklaska 14,7 MJ/kg, Tabela 2.

Vrsta biomase	Donja toplotna moć [MJ/kg]
Pšenična slama	14,0
Ražena slama	14,0
Ječmena slama	14,2
Ovsena slama	14,5

Kukuruzovina	13,5
Oklasak	14,7
Stabljika suncokreta	14,5
Ljuska suncokreta	17,5
Slama od soje	15,7
Slama od uljane repice	17,4
Stabljika duvana	13,8

Tabela 1. Donja toplotna moć poljoprivredne biomase pri ravnotežnom sadržaju vlage [11]

Ljuske suncokreta, koje nastaju u tehnološkom procesu proizvodnje jestivog ulja, predstavljaju veoma kvalitetno biogorivo. Donja toplotna moć ljuski suncokreta je 15,6 do 16,7 MJ/kg, zavisno od sadržaja vlage u ljusci. Sadržaj vlage u ljusci obično iznosi 12 do 14%, dok je sadržaj pepela oko 2%, a sadržaj volatila relativno visok (oko 80%). Prema nekim autorima ljuska suncokreta ima toplotnu moć 17,5 MJ/kg, što znači da jedan kilogram ljuske može da zameni 0,4 kg mazuta.

Energetska efikasnost transformacije biomase je manja u odnosu na fosilna goriva što takođe treba imati u vidu kada se vrednuje potencijal. Zato korišćenje biomase u energetske svrhe, mora biti planski urađeno, od faze prikupljanja, skladištenja pa sve do njenog sagorevanja i održavanja opreme i postrojenja, sa što je moguće većim stepenom automatizacije sistema.

4. ZAKLJUČAK

Biomasa je najveći obnovljivi izvor energije, a R. Srbija spada u vrh evropskih zemalja po količini raspoložive, a neiskorišćene biomase. Korišćenje biomase u energetske svrhe je vrlo rašireno u Evropskoj Uniji i praćeno je mnogobrojnim zakonskim i podzakonskim propisima. Cena toplotne i električne energije dobijene iz biomase je regresirana u zemljama EU. Fond za ovaj regres formiran je iz povišenih cena konvencionalnih izvora energije i naplate taksi za one kompanije i lica koja zagađuju životnu sredinu. Naša država još uvek nema pravnih, niti tehničkih propisa za korišćenje biomase u energetske svrhe. Donet je samo jedan jedinstven Zakon o energetici, koji nema prpratnih propisa. Naše propise treba unaprediti i prilagoditi propisima EU, u kojoj je korišćenje biomase u energetske svrhe zastupljenije i ima dužu tradiciju.

Biomasa predstavlja jedan od najznačajnijih oblika obnovljivih izvora energije u AP Vojvodini i njenom upotrebom doprinosi se efikasnijem korišćenju sopstvenih potencijala u proizvodnji energije i istovremeno vodi računa o zaštiti životne sredine.

Tehnologije za njeno korišćenje su raspoložive,

ekološki prihvatljive i ne spadaju u red visokih tehnologija. Domaća industrija već proizvodi opremu za korišćenje biomase, ali nije dovoljno razvijena oprema za sakupljanje, transport i pripremu biomase.

Energetska efikasnost postojećih peći i kotlova na biomasu je još uvek niska i kreće se od 50% do 70%. Na postrojenjima za sagorevanje biomase nema odgovarajuće merne, kontrolne i regulacione opreme. Ručno se lože, što iziskuje angažovanje obučenog rukovaoca i povećava troškove rada. Zbog toga ovakva postrojenja još uvek sporo nalaze primenu u praksi.

Jednu od dodatnih prepreka većem korišćenju poljoprivredne biomase je što u R. Srbiji ne postoji organizovano tržište poljoprivredne biomase kao goriva. Cena biomase se formira na osnovu troškova ubiranja, tj. prikupljanja, transporta i skladištenja. Cena biomase treba da omogući ekonomski opravdanu proizvodnju i da istovremeno bude stimulativna za korišćenje. Pri tome se mora imati u vidu da trgovina biomasom treba da teče nesmetano i da treba da se stvore uslovi za dugoročnu sigurnost u tom poslu. U svemu ovome nezaobilazni aspekti su interesi države, pokrajine, regionalnih i lokalnih zajednica. Zajednički interes svih je intenziviranje korišćenja biomase kao način za smanjenje zavisnosti od uvoza fosilnih goriva, saniranje neminovno nastalog bio-otpada, razvoj ruralnih sredina i povećanje zaposlenosti u ruralnim sredinama.

Uz sve nedostatke u pogledu trenutne rentabilnosti korišćenja poljoprivredne biomase u energetske svrhe, treba ponoviti da je njen energetska potencijal zaista ogroman i vrlo značajan za budući razvoj AP Vojvodine.

5. ZAHVALNICA

Rad predstavlja deo istraživanja na Projektima III-46009, III-42006, III-42004, koje finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

6. REFERENCE

- [1] Nakomčić-Smaragdakis, B., Čepić, Z., Dragutinović, N.: *Proces sagorevanja pšenične slame i njegov uticaj na zagađenje vazduha*, Savremena poljoprivredna tehnika, Vol. 40, No. 1, str. 55-62, 2014.
- [2] Erić, A.: *Termomehanički procesi pri sagorevanju baliranog sojinog ostatka u potisnom ložištu*, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, 2010.
- [3] Repić, B., Dakić, D., Mladenović, R., Erić, A.:

Analiza mogućnosti i načina korišćenja slame u industrijskoj energetici, Regionalna konferencija „Industrijska energetika i zaštita životne sredine u zemljama jugoistočne Evrope“ IIEP’08, str.1-8, Društvo termičara Srbije, Zlatibor, 24-28 jun 2008.

- [4] Brkić, M., Janić, T.: *Nova procena vrsta i količina biomasa vojvodine za proizvodnju energije*, Savremena poljoprivredna tehnika, Vol. 36, No. 2, str. 178-188, 2010.
- [5] Zekić, V.: *Ocena ekonomske opravdanosti energetske upotrebe biomase*, Doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad, 2005.
- [6] Miljković, B., Stepanov, B., Pešenjanski, I.: *Ocena ekonomske opravdanosti upotrebe postrojenja na biomasu*, Prva međunarodna konferencija Izazovi tranzicije ‘06, , Novi Sad, 2006.
- [7] Gvozdenac, D., Petrović, J., Brkić, M., Marić, M., Kljajić, M., Gvozdenac Urošević, B., Đaković, D.: *Elaborat: Razvoj tržišta biomase u Vojvodini*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2010.
- [8] Tomić M, Furman T, Nikolić R, Savin L, Simikić M: *Potencijalna sirovinska baza za proizvodnju biodizela u Srbiji*, Traktori i pogonske mašine, Vol 1, str. 28-32, 2006.
- [9] Gvozdenac, D., Nakomčić-Smaragdakis, B., Gvozdenac-Urošević B.: *Obnovljivi izvori energije*. Edicija tehničke nauke – udžbenici.: FTN, Novi Sad, 2010.
- [10] Martinov, M.: *Toplotna moć slame žita uzgajanih na području SAP Vojvodine*, Savremena poljoprivredna tehnika, Vol 6, No 3, str. 95 – 101, Novi Sad, 1980.
- [11] Brkić, M., Janić, T.: *Biomasa kao izvor sirovina, đubriva, stočne hrane i energije*, Traktori i pogonske mašine, Vol: 5(2), str. 23-28, Novi Sad, 2000.
- [12] Viglasky, J.: *Biomass as energy source*, Journal of Electrical and Power Engineering, Vol: 5, str. 15-16, Bratislava, 1999.

Autori: Prof. dr Branka Nakomčić-Smaragdakis, M.Sc. Zoran Čepić, M.Sc. Nataša Dragutinović, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet Tehničkih Nauka, Departman za Inženjerstvo zaštite životne sredine i zaštite na radu, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Srbija, Tel: +381 21 485-2395, Fax: +381 21 455-672.

E-mail: nakomcic@uns.ac.rs
zorancepic@uns.ac.rs
n.dragutinovic@uns.ac.rs

Arsovski, S., Milanović, S., Puškarić, H., Tadić, D.

ODREĐIVANJE UTICAJA OTPADNIH FLUIDA MOTORNIH VOZILA NA ŽIVOTNU
SREDINU

Rezime: U ovom radu razmatra se problem uticaja različitih vrsta otpadnih fluida na životnu sredinu. Razmatraju se samo oni fluidi koji se dobijaju iz motornih vozila u procesu reciklaže. Razmatrani problem je postavljen kao zadatak grupnog više-kriterijumskog odlučivanja. Težine elemenata životne sredine se određuju primenom modifikovane AHP metode. Vrednosti otpadnih fluida se modeliraju primenom teorije verovatnoće. Otpadni fluid koji ima najveći uticaj na životnu sredinu je dobijen na egzaktan način primenom Hurvikovog kriterijuma. Razvijena metoda je ilustrovana na podacima koji su dobijeni iz realnih uslova poslovanja.

Ključne reči: otpadni fluid, životna sredina, grupno odlučivanje, više-kriterijumska optimizacija

1. UVOD

U ovom radu razmatraju se fluidi koji se dobijaju u procesu reciklaže motornih vozila na kraju njihovog životnog ciklusa. Podrazumeva se da se reciklaža motornih vozila odvija prema propisima Evropske Unije kao što su: preuzimanje od poslednjeg vlasnika, izdavanje sertifikata za deregistraciju, rasklapanje, pripremu materijala za ponovnu upotrebu kroz različite vrste tehnološkog tretmana, isporuku delova za ponovnu ugradnju, isporuku materijala za proizvodnju novih proizvoda i energije i otpremu do skladišta nekorisnog otpada. Materijal koji se ne može iskoristiti vraćanjem u ciklus, mora biti trajno uskladišten saglasno propisima, na odgovarajućoj deponiji.

Materijali koji se dobijaju u procesu reciklaže a koji će se nadalje razmatrati su fluidi. Smatra se da reciklaža fluida ima punu ekonomsku i ekološku opravdanost razmatranja. U radu je razmatran ekološki aspekt uticaja fluida na različite elemente životne sredine. Smatra se da uticaj razmatranih fluida na različite elemente životne sredine ima različitu važnost. Težina elemenata je dobijena primenom Analitičkog Hijerarhijskog Procesu (AHP) [1]. Vrednost uticaja svake vrste fluida dobijena je na osnovu procene eksperata. Razvoj teorija matematike, kao što je teorija verovatnoće omogućila je da se ove procene na dovoljno dobar način kvantitativno opišu.

Rad je organizovan na sledeći način: u delu 2 dat je okvir za razmatranje problema. Sekcija 3 predstavlja model za ocenu uticaja na životnu sredinu. Razvijena metoda je ilustrovana na primeru u kojem egzistiraju realni podaci.

2. POSTAVKA PROBLEMA

U ovoj sekciji je razvijen nov model za ocenu uticaja otpadnih tečnosti koje se dobijaju iz motornih vozila na kraju životnog ciklusa (ELV) na životnu sredinu. Pretpostavlja se da se razmatra više vrsta tečnosti koja se dobojaju iz ELV-a i koja mogu da se recikliraju. Formalno tečnosti koje se razmatraju kao otpad mogu formalno da se predstavje skupom $\zeta = \{1, \dots, i, \dots, I\}$. Životna sredina može da se posmatra kao složen skup koji se sastoji od više elemenata. Ukupan broj otpadnih tečnosti je označen kao I i i je indeks otpadne tečnosti, $i=1, \dots, I$. Elementi životne sredine se formalno predstavljaju skupom indeksa $\kappa = \{1, \dots, k, \dots, K\}$. Ukupan broj elemenata životne sredine je značen kao K i k je indeks elementa životne sredine, $k=1, \dots, K$.

Elementi životne sredine za razmatranu vrstu otpada imaju različitu relativnu važnost. Procena relativne važnosti elemenata životne sredine može u opštem slučaju da se dobije direktnom procenom eksperata ili da se zada preko matrice parova upoređenja relativne važnosti. Smatra se da je bliže ljudskom načinu razmišljanja da eksperti razmatraju svaki par elemenata životne sredine, separatno. Drugim rečima, relativna važnost elemenata životne sredine zadata je preko matrice parova upoređenja (analogno AHP) (Saaty, 1990). Određivanje vrednosti elemenata ove matrice postavljen je kao zadatak grupnog odlučivanja (analogno [2]). Eksperti se predstavljaju skupom $\varepsilon = \{1, \dots, s, \dots, E\}$. Ukupan broj eksperta (menadžeri zaštite životne sredine, predstavnici lokalne samouprave, glavni menadžeri reciklažnih centara, tehnolozi i dr.) je označen kao E.

Indeks eksperta koji učestvuje u rešavanju razmatranog problema je označen kao e , $e=1, \dots, E$. Procena relativne važnosti svakog para elemenata životne sredine je opisana jednim od unapred definisanih lingvističkih iskaza (analogno AHP), $W_{kk'}^e$. Svakom lingvističkom iskazu može da se pridruži jedna precizna vrednost sa uobičajne skale mera [1 – 9]. Vrednost 1, odnosno vrednost 9 označava da element životne sredine k prema elementu životne sredine k' , $k, k' = 1, \dots, K; k \neq k'$ ima jednaku, odnosno ekstremno veću važnost, respektivno. U slučaju da relativna važnost element k' je veća od relativne važnosti element k , $k, k' = 1, \dots, K; k \neq k'$, tada se to formalno predstavlja kao $1/W_{k'k}^e$. Može se realno pretpostaviti da eksperti imaju različito mišljenje. Agregacija individualnih mišljenja eksperata u zajednički konsenzus može da bude postignuta primenom različitih operatora. U ovom radu korišćena je metoda geometrijske sredine kao metoda agregacije. Vektor težine elemenata životne sredine dobija se primenom metode sopstvenog vektora [3]. Težina elementa životne sredine k , $w_k, k = 1, \dots, K$ pripada skupu realnih brojeva koji su definisani na intervalu [0 – 1].

Uticaj svake vrste otpadne tečnosti i , $i=1, \dots, I$ na svaki element životne sredine k , $k=1, \dots, K$ nije jednak i dobija se na osnovu subjektivne procene eksperata. Eksperti svoje procene zasnivaju na: (1) karakteristikama tehnologija reciklaže koje se koriste na razmatranom reciklažnom centru i (2) procenjenoj količini otpada. Procenjena količina otpada zavisi od broja ELV i od vrsta sakupljanja otpadnih tečnosti. Na osnovu iznetih činjenica jasno je da procena uticaja svake vrste otpadne tečnosti na bilo koji element životne sredine ne može da se dobije egzaktnim putem. Tačnost ove procene zavisi od znanja i iskustva eksperta. Eksperti ima znanja iz različitih domena, obavljaju različite poslove tako da je realno pretpostaviti da oni nemaju ista znanja, iskustva, da imaju različite informacije ili različite količine relevantnih informacija. Stoga, njihove procene mogu da budu različite. U ovom radu procene eksperata su opisane diskretnim slučajnim veličinama, $F_{ik}^e, i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K; e = 1, \dots, E$. Vrednosti ovih slučajnih veličina su definisane na skali mera od [1 – 9]. Svakoju vrednosti svake slučajne promenljive se pridružuje određena vrednost verovatnoće koja se računa na klasičan način. Na osnovu pravila teorije verovatnoće, otežana vrednost uticaja vrste otpada na element životne sredine je opisana diskretnom slučajnom promenljivom $f_{ik}, i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K$ [4]. Diskretne slučajne veličine $f_{ik}, i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K$ su transformisane u precizne brojeve tako što su zamenjene svojim matematičkim očekivanjem

$M_{ik}, i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K$. Poređenjem vrednosti $M_{ik}, i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K$ unutar kolone k , $k=1, \dots, K$ može da se odredi fluid koji ima najveći uticaj na element životne sredine k , $k=1, \dots, K$. Otežana vrednost procene uticaja svake vrste otpa i , $i=1, \dots, I$ na svaki element životne sredine $k, k=1, \dots, K$ računa se kao proizvod težine elementa k , $i=1, \dots, K$ i procenjene vrednosti, $F_{ik}^e, i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K; e = 1, \dots, E$. Ova otežana vrednost uticaja vrste otpada i , $i=1, \dots, I$ na element k , $k=1, \dots, K$ računa se kao proizvod težine i procenjene vrednosti. Primenom adaptiranog Hurvikovog kriterijuma [5] se određuje koja vrsta otpada ima najveći uticaj na zaštitu životne sredine respektujući sve njene elemente kao i njihove težine. Na osnovu dobijenih rezultata menadžment tim svakog reciklažnog centra može da definiše strategiju poboljšanja procesa reciklaže sa ciljem da se poveća zaštita životne sredine. Takođe, dobijeni rezultati mogu da se koriste kao odgovarajući ulazni podaci za definisanje strategije upravljanja životnom sredinom kako na nivou lokalne zajednice tako i na nivou države.

3. ALGORITAM

Predloženi model može da se realizuje kroz veći broj koraka koji su nadalje prikazani.

Korak 1. Procena relativne važnosti svakog elementa životne sredine izvršena je od svakog eksperta, $W_{kk'}^e, k, k' = 1, \dots, K; k \neq k'; e=1, \dots, E$.

Korak 2. Izračunajmo agregiranu vrednost procene eksperata primenom metode geometrijske sredine [6]:

$$W_{kk'} = \sqrt[e]{W_{kk'}^e} \quad (1)$$

Korak 3. Postavimo matricu relativne važnosti elemenata životne sredine:

$$[W_{kk'}]_{K \times K} \quad (2)$$

Korak 4. Primenom metode sopstvenog vektora odredimo težinu svakog razmatranog elementa životne sredine, $w_k, k = 1, \dots, K$. (3)

Korak 5. Odredimo slučajno promenljivu $f_{ik}, i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K$ kojom se opisuje uticaj vrste otpada i , $i=1, \dots, I$ na element životne sredine k , $k=1, \dots, K$:

$$f_{ik} = \begin{pmatrix} F_{ik}^e \\ p_{ik} \end{pmatrix} \quad (4)$$

gde: $p_{ik} = \frac{F_{ik}^e}{\sum_{e=1}^E F_{ik}^e}$

Korak 6. Izračunajmo matematičko očekivanje slučajne veličine $f_{ik}, M_{ik}, i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K$.

Korak 7. Postavimo matricu odlučivanja čiji elementi predstavljaju otežane vrednosti uticaja razmatranih vrsta otpada na svaki element životne

sredine, d_{ik} :

$$d_{ik} = w_k \cdot M_{ik} \quad (5)$$

Korak 8. Primenom adaptiranog Hurvikovog kriterijuma [5] odredimo koja vrsta otpada, i^* ima najveći uticaj na životnu sredinu respektujući sve razmatrane elemente životne sredine kao i njihove težine:

$$\max_{k=1..k} \min_{i=1..1} d_{ik} \rightarrow i^* \quad (6)$$

4. ILUSTRATIVNI PRIMER

Razvijena metoda je ilustrovana na podacima koji su dobijeni na osnovu procene grupe eksperata. Vremenski period koji se razmatra u ovom radu je jedna decenija. Tim eksperata je sastavljen od glavnih menadžera četiri reciklažna centra koja se nalaze u Republici Srbiji, pet menadžera zaštite životne sredine koje rade u lokalnim samoupravama gradova gde se nalaze reciklažni centri, četiri inženjera iz razmatranih reciklažnih centara i jednog predstavnika iz Ministarstva koji radi u oblasti zaštite životne sredine.

Fluidi koji se razmatraju su: gorvo ($i=1$), ulje ($i=2$), kočiono ulje ($i=3$) i antifriz i voda ($i=4$). Elementi životne sredine su: globalno zagrevanje ($k=1$), podzemne vode ($k=2$), tlo ($k=3$), površinske vode ($k=4$) i biodiverzitet ($k=5$).

Primenom postupka (Korak 1 i Korak 2 razvijenog Algoritma) dobijene su procene i agregirane vrednosti relativne važnosti svakog para tretiranih elemenata životne sredine. Razvijeni postupak je prikazan na izračunavanju agregirane relativne važnosti globalnog zagrevanja ($k=1$) prema podzemnim vodama ($k=2$).

$$1:2 = \sqrt[13]{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{5} \cdot \frac{1}{6} \cdot \frac{1}{7} \cdot \frac{1}{7} \cdot \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{8}} = 0.226$$

Matrica relativne važnosti razmatranih elemenata životne sredine nadalje je prikazana (Korak 3 predloženog Algoritma):

1	0.226	0.178	0.334	0.495
4.425	1	0.551	2.919	3.468
5.618	1.815	1	4.783	4.765
2.994	0.343	0.209	1	0.613
2.020	0.288	0.210	1.631	1

Primenom metode sopstvenog vektora (Korak 5 razvijenog Algoritma) odredimo vektor težina elemenata životne sredine, tako da:

$$w = (0.447, 2.473, 3.596, 1.032, 0.829)$$

Neka matricu relativne važnosti elemenata

životne sredine označimo kao A. Da bi procene bile konzistentne tada mora da važi jednakost:

$$A \cdot w = \delta_{max} \cdot w$$

U ovom primeru mora da bude zadovoljena sledeća jednakost:

$$(2.401, 12.319, 19.482, 4.477, 4.881)^T = (\delta_{max} \cdot 0.447, \delta_{max} \cdot 2.473, \delta_{max} \cdot 3.596, \delta_{max} \cdot 1.032, \delta_{max} \cdot 0.829)^T$$

Vrednost sopstvenog vektora je:

$$\delta_{max} = \frac{2.401}{0.447} = 5.376$$

$$\delta_{max} = \frac{12.319}{2.474} = 4.983$$

$$\delta_{max} = \frac{19.482}{3.596} = 5.417$$

$$\delta_{max} = \frac{4.477}{1.032} = 4.339$$

$$\delta_{max} = \frac{4.881}{0.829} = 5.883$$

Kako sve vrednosti sopstvenog vektora nisu veće od $K=5$ sledi da u prvoj iteraciji nije postignut konsenzus donosilaca odluka. Neophodno je primeniti postupak kojim se izračunava vrednost vektora težina. Konsenzus se postiže u četvrtoj iteraciji prikazanog postupka, tako da:

$$w^4 = (0.0561, 0.2855, 0.4482, 0.1034, 0.1064)$$

Procena vrednosti uticaja na svaki element životne sredine izvršeno je od strane eksperata (Korak 5 razvijenog Algoritma). Dobijene diskretne slučajne veličine su zamenjene njihovim matematičkim očekivanjem (Korak 6 predloženog Algoritma). Na primeru određivanja vrednosti uticaja goriva ($i=1$) na globalno zagrevanje ($k=1$) ilustrovan je razvijen postupak:

$$f_{11} = \left(\frac{1}{9/13} \quad \frac{2}{3/13} \quad \frac{3}{1/13} \right) = \left(\frac{1}{0.69} \quad \frac{2}{0.23} \quad \frac{3}{0.08} \right) \rightarrow M_{11} = 1.39$$

Sve ostale vrednosti uticaja svakog vrste otpadnog ulja na svaki element životne sredine se računa na isti način.

Prema razvijenom Algoritmu (Korak 7) matrica odlučivanja je konstruisana:

0.058	0.814	1.277	0.249	0.122
0.069	1.507	2.742	0.366	0.229
0.069	1.507	2.742	0.366	0.229
0.061	0.525	1.015	0.278	0.122

Primenom Hurvikovog kriterijuma (Korak 8 razvijenog Algoritma) odredimo onu vrstu otpada koja ima najveći uticaj na životnu sredinu respektujući sve njene elemente kao i težine elemenata životne sredine:

$$\max_{k=1, \dots, 5} (0.058, 0.525, 1.015, 0.249, 0.122) = 1.015 \rightarrow I^* = (1 = 3)$$

Na osnovu dobijenih rezultata može da se zaključi da najveći uticaj na životnu sredinu, respektujući sve elemente životne sredine kao i njihove težine, ima kočiono ulje. Na osnovu dobijenog rezultata menadžment tim reciklažnog centra može da propiše odgovarajuće mere za poboljšanje tehnologija reciklaže koje se primenjuju. Na primer, bolje sakupljanje i filtriranje kočionog ulja. Ili na primer bolje odlaganje ostatka kočionog ulja koje ne može da se reciklira. Druga mera uvođenjenje savremenijih tehnologija reciklaže ulja ako za to postoje finansijske mogućnosti.

5. ZAKLJUČAK

U uslovima savremenog poslovanja, reciklaža predstavlja jednu od profitabilnih industrijskih grana. Rezultati koji se dobijaju pri rešavanju ovog problema propagiraju se kroz ceo socio-ekonomski sistem i utiču na sve njegove elemente.

S obzirom na starost motornih vozila u Republici Srbiji (prosečno oko 15 godina) može da se kaže da njihovo recikliranje predstavlja najvažniji problem u domenu reciklaže. Otpadni fluidi predstavlja 2% od ukupnog motornog vozila, mada u mnogo većem stepenu uticu kako na ekonomiju države tako i na zavitu životne sredine.

Na osnovu svega, jasno može da se sagleda važnost razmatranog problema.

Uvedena je pretpostavka da svi elementi životne sredine nemaju istu važnost sa aspekta otpada koji se razmatra. Relativna važnost elemenata je predstavljena u matricnoj formi koja je bliža ljudskom načinu razmišljanja. Svaki element matrice je postavljen kao zadatak grupnog odlučivanja. Agregiranje mišljenja eksperata u grupni konsenzus je izvršeno primenom metode geometrijske sredine. Vektor težina je dobijen primenom metode sopstvenog vektora. Ove vrednosti su opisane ordinalnim brojevima. Uticaj svake vrste otpada na svaki element životne sredine je dobijen na osnovu procene eksperata. Ove vrednosti su modelirane primenom teorije verovatnoće. Primenom adaptiranog Hurvikovog kriterijuma se određuje onaj otpadni fluid koji ima najviše uticaja na sve elemente životne sredine, istovremeno, respektujući i njihove težine.

Osnovni doprinos rada može da se definiše kao određivanje uticaja na životnu sredinu na egzaktan način. Svako rešenje dobijeno na ovaj našin manje je opterećeno subjektivnim stavovima eksperata pa se može smatrati da je tačnije.

Strategije poboljšanja upravljanja zaštitom životne sredine treba da budu zasnovane na dobijenim rezultatima.

Zahvalnica

Ovo istraživanje je podržano od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnologije Republike Srbije broj 35033 "Održivi razvoj tehnologija i opreme za reciklažu motornih vozila".

6. REFERENCE

- [1] Saaty, T.L.: *How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process*, European Journal of Operational Research, Vol. 48, p.p. 9-26, 1990.
- [2] Nestić, S., Stefanović, M., Đorđević, A., Arsovski, S., Tadić, D.: *A model of the assessment and optimization of production process quality using the fuzzy sets and genetic algorithm approach*, E.J. of Industrial Engineering, Vol. 9 (1), 77-99, 2015.
- [3] Harker, P.T.: *Derivates of the Perron root of a positive reciprocal matrix: with application to the Analytic Hierarchy Process*, Applied Mathematics and Computation, Vol. 22, p.p. 217-232, 1987.
- [4] Tadić, D., Tadić, B., Milanović, D.D.: *Statistické metode za upravljacke i inženjerske probleme, teorija, Principi, Primene*, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac, 2014.
- [5] Petrović, D., Petrović, R.: *Multicriteria ranking of inventory replenishment policies in the presence of uncertainty in customer demand*, Int. Journal of Production Economics, Vol. 71, p.p. 439-446, 2001.
- [6] Li, J., Butler-Purry, K.L., Benner, C.L., Russell, B.D., Langari, R., *Selecting a Fuzzy Aggregation Operator for the Multi-Criteria Fault Location Problem*, Proceedings of the IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, p.p. 1134-1140, New York, NY, October 10-13, 2004.

Autori: Prof. dr Slavko Arsovski¹⁾, Milanović, S.¹⁾, Hrvoje Puškarić¹⁾, Prof. dr Danijela Tadić¹⁾

¹⁾ Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, Ul. Sestre Janjić br. 6, 34000 Kragujevac, Srbija

E-mail: cqm@kg.ac.rs
xpboje@gmail.com
galovic@kg.ac.yu

Arzate J.A., Ertem F.C., Cruz Bournazou M.N., Neubauer P., Junne S.

LIFE CYCLE ASSESSMENT AND MODELING APPROACHES FOR BIOGAS PRODUCTION

Abstract: *Biogas production as a complex biological process requires tailored solutions to achieve a real sustainable operation. In this regard, better control, monitoring and optimization strategies are required. If the objective is the optimal design and operation of a biogas production while reducing the GHG, it is useful to combine LCA and mathematical modelling approaches. Thus, this study evaluates the biogas production in an industrial plant located in Ireland. The plant operates with the co-digestion of grass, maize and clover silage and produces 500 kW energy. LCA was performed by using Simapro software to determine the environmental impacts of the operation. The mathematical modelling was realized by ASPEN, which enables a process description based on stoichiometric biochemical networks.*

Key words: *Case study, mathematical modeling, Life cycle assessment, biogas production, ASPEN*

1. INTRODUCTION

Biogas production plays a remarkable role to reach European Union's goal, which is enhancing the renewable energy ratio to 20 % and to cut the greenhouse gas (GHG) emissions by 20% until 2020 [2].

Nonetheless, biogas production is a complex process and many challenges still should be unraveled to attain a maximum of sustainability during operation. In this regard, improved control, monitoring and optimization strategies are necessary. Though, if the objective of the biogas production is the reduction of GHG, the impacts of each component and procedure should be quantified. To achieve this, life cycle assessment (LCA) need to be performed. From scientific concepts including experimental trials to the application of statistical methods using experimental data records, several modelling approaches for describing the anaerobic digestion (AD) have been developed. In 2014, a novel model applied to AD, which is using ASPEN was published [3]. The model included several reactions considering four phases in the metabolic process. The hydrolysis phase was related to the conversion of reactants from macromolecules to short-chain compounds. Acidogenic, acetogenic, and methanogenic phases were described by kinetic equations depending on temperature, pH-value, compound concentrations and inhibitory effects. The kinetic constants of the reactions were obtained from previous models like the anaerobic digestion model 1 (ADM1) and others [4, 5]. The modelling approach used in the current paper uses a model based on ASPEN [6]. Moreover, this paper examines the accurateness of the combination of process modelling and LCA for

biogas production for the aim of GHG emission reductions.

However, such a method requires accurate data of operation. To be independent of data availability to foresee scenarios for improved operation, the development and application of suitable mathematical models is required [7]. They should be able to simulate the operation with sufficient accuracy and limited computational effort. Data of these simulation studies are integrable to LCA studies. Such an approach permits the forecast of different production scenarios and a seemly choice of the one with fewer GHG emissions [8].

2. METHODS**2.1. Life cycle assessment**

LCA is a method that is utilized to quantitatively assess the environmental benefits of all process steps. In this study, the stages from feedstock production to electricity generation were considered. The standard ISO 14040:2006, which provides the fundamental basis for LCA procedures was pursued [9].

Due to data availability, the scope of the assessment is the southwest region of Ireland [10, 11].

2.1.1. System boundary

Fig. 1 shows the examined system, its boundary and involved processes:

- crop production
- ensilage and storage
- manure storage
- anaerobic digestion

Emissions from ensilage were estimated based on data provided by the University of Applied Sciences Nordhausen (2013) (www.fh-nordhausen.de).

	Maize	Clover	Grass
Dates			
Sowing	End of April	1-10 July	1-10 July
Harvest	End of October	20-30 September	20-30 September
Input (kg ha⁻¹)			
Seed amount	28	7.5	22
N fertilizer	140	82	37.5
P ₂ O ₅ fertilizer	50	22	70
K ₂ O fertilizer	225	97	220

Table 2. Basic data for the cultivation of the crops (Cultivation data of crops are real data of the plant).

After ensilage, the crops were carried to the biogas plant. The transport distance between the agricultural area and the biogas plant was 5 km. Transport was done by a tractor with a trailer consuming 45 L h⁻¹ of Diesel fuel.

2.1.5. Anaerobic digestion

The biogas plant consisted of a main fermenter (2000 m³) and a secondary fermenter (1500 m³) and a storage tank for the digestate of a volume of 2000 m³. Digesters were operated under 43 °C (mesophilic conditions) at a retention time of 115 days. Methane emissions from fermenters were assumed as a 1% share of total biogas produced [15]. Electricity used in the process was taken from the grid and heat was supplied from the biogas combustion.

2.1.6. Anaerobic digestion

The biogas plant consisted of a main fermenter (2000 m³) and a secondary fermenter (1500 m³) and a storage tank for the digestate of a volume of 2000 m³. Digesters were operated under 43 °C (mesophilic conditions) at a retention time of 115 days. Methane emissions from fermenters were assumed as a 1% share of total biogas produced [15]. Electricity used in the process was taken from the grid and heat was supplied from the biogas combustion.

2.1.7. Biogas utilization

The produced biogas is used in a 500 kW capacity combined heat and power plant (CHP) for the production of electricity and heat. 35% of the produced heat was used for the fermenters, 65% was sold. Emissions occurring during the

combustion of biogas at the CHP were taken from Lansche and Müller (2012).

2.1.8. Digestate

Digestate was stored at the plant or at the agricultural area. The storage of digestate resulted in emissions of CH₄, N₂O and NH₃, which were estimated based on data from De Vries et al. (2012), Jülich (2008), and Lukehurst et al. (2010). Transport of digestate between the biogas plant and the agricultural area was accomplished by a 40 ton truck.

Digestate was spread on the fields. The quantities of fertilizers that were replaced by the digestate were calculated on the basis of the digestate composition and fertilizer replacement values. Furthermore, digestate compositions were determined based on the decomposition rates of the substrates and available organic nitrogen [1, 17].

The field emissions such as ammonia, nitrous oxide, nitrogen, nitrate and phosphate, were calculated. Nitrogen-based emissions were determined by factors provided by Brentrup et al. (2000). Phosphate emissions into water were calculated according to the method of Rosier (1998).

2.1.9. Life cycle impact assessment

All emissions and resources used were included in the assessment and categorized with respect to the global warming potential (GWP) in kg CO₂-eq. The scenarios were simulated with the Simapro 7.3.2. [21] by using the Ecoinvent 2.2 database. The impact assessment was computed by using the ReCiPe midpoint v.1.06 method. To enable the comparison of feedstock, environmental impacts were calculated based on FU.

2.2. Description of the ASPEN model

The model includes four biochemical phases of anaerobic digestion, described through interconnected chemical reactions and degradation of some intermediates by bacteria. The digestion process starts with the hydrolysis of substrate. Insoluble organic polymers, such as carbohydrates, proteins and lipids, are broken down into sugars, amino acids and fatty acids, and become available for other bacteria. Acidogenic bacteria convert these compounds into carbon dioxide, hydrogen, ammonia, and short chain fatty acids (e.g. acetic acid, propionic acid, butyric acid, valeric acid). In the acetogenic phase, bacteria convert these resulting organic acids into acetic acid, along with additional ammonia, hydrogen, and carbon dioxide. Finally, methanogenic

microorganisms convert these products to methane and carbon dioxide.

2.2.1. Model equations

The model includes different simulation units connected in series, which are shown in fig. 2. A stoichiometric reactor is simulated, where thirteen reactions are applied for the hydrolysis phase. Carbohydrates, proteins and lipids are converted from the feedstock [3]. The fractional conversion of each stoichiometric reaction is determined by the design specification tool included in ASPEN; the model calculates the output flow rates of all components. A Gibbs reactor unit is used, where equilibrium reactions for water, ammonia, acetic acid, carbon dioxide, carbonic acid, hydrogen carbonate and sulphide hydrogen are applied to calculate the pH-value of the medium. Acidogenesis, acetogenesis and methanogenesis are simulated in a continuous stirred tank reactor. Chemical reactions, kinetic equations and kinetic parameters are taken from published models [4, 5]. Composition of maize silage [22, 26], grass silage [23, 24] and clover [25, 27] were obtained from literature.

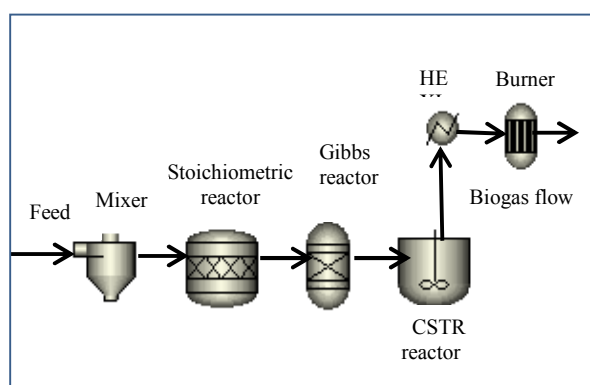


Fig. 2. Simulation flow sheet of biogas process in ASPEN.

3. RESULTS

3.1. LCA Results

Fig. 3 illustrates the comparison of LCA characterization results for different scenarios. The results show that it is possible to reduce GHG emissions just by optimizing the co-digestion ratios and produce still the same amount of energy. For the real situation, it is seen that emissions are mainly resulted from the digestate transport (36%), followed by agricultural activities of maize (21%). All scenarios resulted in lower emissions due to relatively low maize production except of scenario 1. Scenario 1 resulted in a 2.35 g CO₂ eq higher GWP, that was caused by the reason of (110% more) almost doubled clover production against only 16% less maize

production.

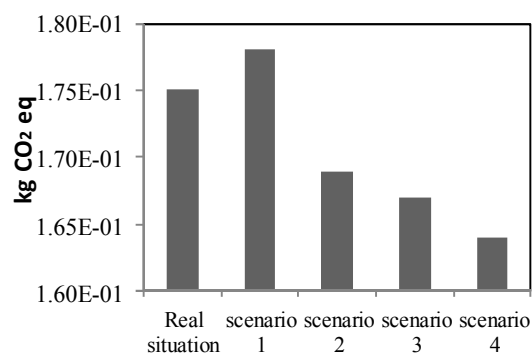


Fig. 3. Comparison of global warming potentials (kg CO₂ eq) of different scenarios. The results are given per FU.

3.2. Simulation results

A comparison of the biogas flow rate between the ASPEN simulation and the KTBL values for each substrate (maize silage, clover and grass silage) and co-digested mixture is shown in Table 3. A close approximation in biogas production of -3% to values of KTBL is achieved, when all substrates are co-digested. The prediction of power capacity and the comparison to KTBL values for each substrate and co-digested mixture is depicted in Table 4. The efficiency considered for the CHP was 47.5% [1] (KTBL, 2014).

Substrate	Feed flow t a ⁻¹	Biogas production		
		KTBL* m ³ h ⁻¹	ASPEN m ³ h ⁻¹	Difference %
Maize	5940	150	147	-2
Clover	1374	25	25	0
Grass	2181	50	47	-6
All substrates**	9495	225	219	-3

Table 3. Simulation and comparison of results to KTBL values of the biogas flow rate for each co-substrate and co-digested mixture.

*KTBL, 2014

** Maize, clover and grass silage are co-digested

The portion of methane in biogas is predicted to 54% (difference to the KTBL value: -2.0%), when all substrates are co-digested. The composition of the biogas is estimated when co-digestion occurs (beside methane) to: CO₂ – 43 %, H₂O – 3.6 %, H₂S – 0.4 %, H₂ – 175 ppm, NH₃ – 9 ppm.

The prediction of power capacity based on the ASPEN model is acceptable with a difference of -5% between the simulation and the KTBL values, when digestion involves all substrates.

Substrate	Feed flow t a ⁻¹	Power capacity		
		KTBL*	ASPEN	Difference
		kW	kW	%
Maize	5940	361	349	-3
Clover	1374	64	56	-13
Grass	2181	118	109	-8
All substrates**	9495	543	514	-5

Table 4. Simulation and comparison of results to KTBL values of power capacity for each co-substrate and co-digested mixture

*KTBL, 2014

** Maize, clover and grass silage are co-digested

3.3. LCA and modelling

The results show that modelling can predict the real behaviour of biogas production systems and helps to increase the GHG emission reduction potential of the plants. Therefore, process modelling can be an influential instrument to optimize the processes.

The simulations can be applied for various scenarios of the LCA studies, predicting the environmental impact of feedstock changes. The prediction of biogas flow and power capacity of scenario 4, which has the lowest emissions of the study, is shown in Table 5.

Substrate	Feed flow t a ⁻¹	Simulation	
		Biogas flow m ³ h ⁻¹	Power capacity kW
Maize	2000	53	116
Clover	7049	134	278
Grass	2000	46	99
All substrates*	11049	232	493

Table 5. Simulation of the biogas flow rate and power capacity of scenario 4 for each co-substrate and co-digested mixture.

* Maize, clover and grass silage are co-digested

4. CONCLUSIONS

The decision concerning the most suitable production of biogas entirely depends on the view of which environmental impacts are considered to be of the highest importance for biomass supply. In this paper, a close approximation to values of simulation and real power capacity was achieved. Thus, the performance of a biogas plant basically represented by chemical conversion is efficiently simulated by the ASPEN model. Once the system optimization with modelling is done, negative

impacts of biogas plants on the environment could be diminished and even positive impacts would be increased.

5. ACKNOWLEDGEMENT

This publication has emanated from research conducted with the financial support of the Friedrich Naumann Foundation (Friedrich-Naumann-Stiftung für die Freiheit, Deutschland) and CONACYT, "Consejo Nacional para la Ciencia y Tecnología"(Mexico). The authors would like to acknowledge Professor Finkbeiner for his permission to access Simapro software and Dr. Julia Martinez Blanco for her support.

6. REFERENCES

- [1] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft K. Wirtschaftlichkeitsrechner Biogas. 2014.
- [2] Change IC. Mitigation of climate change. Summary for Policymakers 2007:10.
- [3] Rajendran K, Kankanala H. R., Lundin, M., Taherzadeh M. J. A novel process simulation model (PSM) for anaerobic digestion using Aspen Plus. *Bioresource Technology* 2014.
- [4] Angelidaki I, Ellegaard L, Ahring BK. A mathematical model for dynamic simulation of anaerobic digestion of complex substrates: focusing on ammonia inhibition. *Biotechnology and bioengineering* 1993;42:159.
- [5] Bastone DJ KJ, Angelidaki I, Kalyuzhnyi SV, Pavlostathis SG,, et al. The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1). *Water Sci Technol. Water Sci Technol* 2002;45:65.
- [6] Technology A. Aspen Plus V8.0. Inc, version; 2009.
- [7] Colussi I. CA, Gallo V, Rubesa Fernandez A. S., Vitanza R*. Modelling of an Anaerobic Process producing Biogas from Winery Wastes. *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS A publication of AIDIC The Italian Association of Chemical Engineering* 2012;VOL. 27:301.
- [8] Edwards D, Hamson M. Guide to mathematical modelling: Palgrave; 2001.
- [9] Standard I. 14040 (2006) NF EN ISO 14040: 2006-Environmental management-life cycle assessment-principles and framework. AFNOR.
- [10] Braun R, Weiland P, Wellinger A. Biogas from energy crop digestion. IEA Bioenergy, Task; 2008.

- [11] Murphy J, Braun R, Weiland P, Wellinger A. Biogas from energy crop digestion. IEA Bioenergy Task; 2010.
- [12] FNR FfNR. Leitfaden Biogas: von der Gewinnung zur Nutzung; [diese Arbeit wurde im Rahmen des Projekts "Handreichung Biogasgewinnung und-nutzung" angefertigt]: FNR; 2010.
- [13] Hans-Jörg Althaus CB, Gabor Doka, Roberto Dones, Roland Hischier, Stefanie Hellweg, Sébastien Humbert, Thomas Köllner, Yves Loerincik, Manuele Margni, Thomas Nemecek. Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. In: Rolf Frischknecht NJ, editor: Swiss Centre for Life Cycle Inventories; A joint initiative of the ETH domain and Swiss Federal Offices; 2010.
- [14] Nordhausen IfrEF. Eine Biomethananlage in Nordhausen: Energiepolitische Rahmenbedingungen, Standortbezogene Potenziale, Ermittlung einer CO2 Bilanz und ethische Aspekte der Bioenergienutzung. Nordhausen: Institut für regenerative Energietechnik Fachhochschule Nordhausen; 2013.
- [15] Jülich F. Optimierungen für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland. In: Verbundprojekt gefördert vom Bundesministerium für Umwelt NuRB, editor. – Endbericht mit Materialband – ; 2008.
- [16] Lansche J, Müller J. Life cycle assessment of energy generation of biogas fed combined heat and power plants: Environmental impact of different agricultural substrates. Engineering in Life Sciences 2012;12:313.
- [17] De Vries JW, Vinken TMWJ, Hamelin L, De Boer IJM. Comparing environmental consequences of anaerobic mono- and co-digestion of pig manure to produce bio-energy - A life cycle perspective. Bioresource Technology 2012;125:239.
- [18] Lukehurst CT, Frost P, Al Seadi T. Utilisation of digestate from biogas plants as biofertiliser. IEA Bioenergy 2010.
- [19] Brentrup F, Küsters J, Lammel J, Kuhlmann H. Methods to estimate on-field nitrogen emissions from crop production as an input to LCA studies in the agricultural sector. Int J Life Cycle Assess 2000;5:349.
- [20] Rossier D. Adaptation of the Method Ecobilan for the Environmental Management of Agricultural Exploitation. Service Romand de Vulgarisation Agricole, Lausanne, Switzerland 1998;49.
- [21] Consultants P. Introduction to LCA with SimaPro 7. Report Version 2008;4.
- [22] Johansson S. Whole-crop maize silage for growing dairy bulls: effect of maturity stage at harvest and feeding strategy. Skara: Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Animal Environment and Health, Section of Production Systems, Report-308 2010.
- [23] Gerlach K, Roß F, Weiß K, Büscher W, Südekum K-H. Aerobic exposure of grass silages and its impact on dry matter intake and preference by goats. Small Ruminant Research 2014;117:131.
- [24] Garnsworthy P, Gong J, Armstrong D, Mann G, Sinclair K, Webb R. Effect of site of starch digestion on metabolic hormones and ovarian function in dairy cows. Livestock Science 2009;125:161.
- [25] Weenink R. Acetone-soluble lipids of grasses and other forage plants. I.-galactolipids of red clover (*Trifolium pratense*) leaves. Journal of the Science of Food and Agriculture 1961;12:34.
- [26] Kolver, E. S., Roche, J. R., Miller, D., & Densley, R. (2001). Maize silage for dairy cows. In proceedings of the conference-New Zealand Grassland Association (pp. 195-202).
- [27] Whitehead, D. C., Buchan, H., & Hartley, R. D. (1979). Composition and decomposition of roots of ryegrass and red clover. *Soil Biology and Biochemistry*, 11(6), 619-628.

Authors: MSc. Juan Antonio Arzate Salgado, MSc. Funda Cansu Ertem, Dr. Nicolas Cruz Bournazou, Prof. Dr. Peter Neubauer, Dr. Stefan Junne, Technische Universität Berlin, Institute of Biotechnology, Chair of Bioprocess Engineering, Ackerstr. 76, ACK24, 13355 Berlin, Germany, Phone: +49 30 314 27576, Fax: +49 30 314 27577.
E-mail: j.arzate@mailbox.tu-berlin.de
fcertem@mailbox.tu-berlin.de
mariano.n.cruzbournazou@tu-berlin.de
peter.neubauer@tu-berlin.de
stefan.junne@tu-berlin.de

Ertem F.C., Neubauer P., Junne S.

**LIFE CYCLE ASSESSMENT OF BIOGAS PRODUCTION: IMPACT OF
SUBSTITUTION OF ENERGY CROPS WITH SILPHIUM PERFOLIATUM**

Abstract: *Silphium perfoliatum* (cup plant) was proven as a promising crop for future bioenergy production. Besides the biogas potential of cup plants, no life cycle assessment (LCA) related to it was done before. This LCA evaluates the influences of replacement of energy crops with cup plants for biogas production at an industrial scale biogas plant situated in Germany. Our results demonstrate the positive impact of cup plants on the emission reductions. The biogas production systems highly depend on the selected substrates and there is a need of considering the feedstocks, not only based on their biogas yields, but also on their climate protection potentials.

Key words: Case study, *Silphium perfoliatum*, LCA, biogas production

1. INTRODUCTION

The use of renewable energy is an increasing importance in the world's energy policy. The European Union's target to raise the ratio of renewable energy sources 18% of the final energy consumption by 2020, can only be met through a greater use of renewable resources [1].

According to a survey of the German Biogas Association, in Germany, about 7500 biogas plants operated in 2012 with an electrical capacity of about 3500 MW [2]. The crops currently used as a substrate are mainly maize, grain and fodder. The rising number of agricultural biogas plants and the efforts to get more efficient fermentation technologies result in a steadily increasing need for crop use. The necessary addition of the cultivating more crops for bioenergy production will trial with the secondary utilization ways as animal food and cause market prices to increase. For that reason, a few years ago, the research for alternatives or supplements to traditional substrates started. *Silphium perfoliatum* (cup plant), a perennial daisy family, was proven as a suitable crop for the future [3-5]. Inspired by the fact, this study evaluates the environmental impacts of cup plant for biogas production and its substitution with energy crops at a real industrial biogas plant.

2. METHODS

Life cycle assessment (LCA) is a method that is utilized to quantitatively assess the environmental benefits of all elementary process steps. In this case, the stages from feedstock till electricity production were considered. The standard ISO 14040:2006, which provides the

fundamental basis for LCA procedures was pursued in this study [6].

3. The extent of this paper is the Northeastern region of Germany. That is why, all data in this study were chosen to be characteristic of this specific area.

3.1. System boundary

Fig. 1. presents the examined system, its boundary and involving processes: crop production, ensilage and storage; manure storage; anaerobic digestion; storage of digestate and its spreading, electricity and heat generation from biogas, transport between several steps. Poultry production was left outside the boundary, since they are accepted as products from other processes.

3.2. Life cycle inventory analysis

The yearly operational data for the biogas plant was used and literature data were complimented whenever required. Some material and energy flows of the plant were monitored on a nonstop basis (e.g. weight of input feedstock, gas volume and methane content of the biogas, electricity consumption and biogas generation). Diesel, fertilizer, electricity, pesticides, construction materials, etc. were real data from the operation. Material flows that could not be measured directly, were taken from the literature. The production of construction materials, tractor, cogeneration unit were taken from the database of Ecoinvent 2.2 (the Ecoinvent Centre, Switzerland) [7].

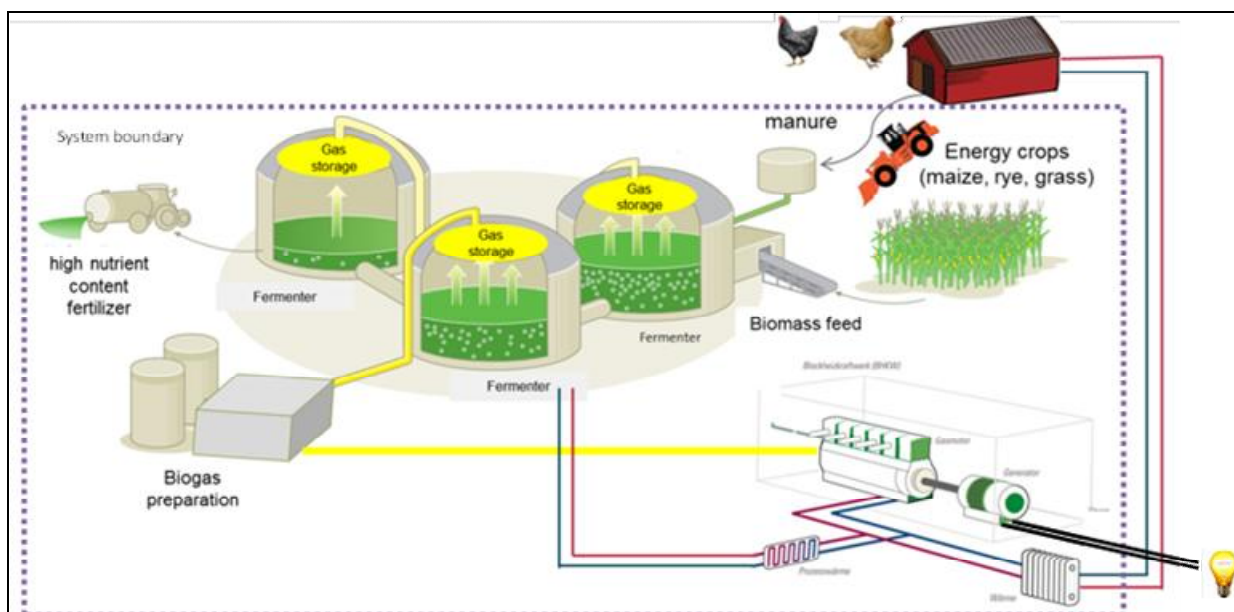


Fig. 1. System boundary

3.2.1. Determination of feedstock amounts and compositions

A mass equilibrium methodology was applied to define all the feedstock compositions and energy flows within the system. The quantity of cup plant was determined based on the biogas (Table 1.) and biomass yields (Table 2.) of feedstock to balance the biogas yield come from

energy crops. The collation was done depending on functional unit (FU) (1 ton of feedstock). Characterization of the feedstock, the total solid (TS) to organic total solid (oTS) ratio and the biogas yield was determined based on data from KTBL, 2014 and FNR, 2010. See Table 1. for an overview for the chemical compositions and gas yields of the feedstock.

Feedstock	Cup plant	Maize	Rye	Grass	Poultry manure
TS (% FM)	26	33	25	35	40
oTS (% TS)	93	95	89	90	75
Gas yield (m ³ t ⁻¹ FM)	215	270	245	255	225
Methane content (%)	58	52	53	53	55
Methane yield (m ³ t ⁻¹ FM)	125	140	130	135	124

Table 1. Characteristics of the feedstock [8, 9]

	Maize	Rye	Grass	Cup plant
Dates				
Sowing	1-10 May	1-10 October	1-20 April	10-15 April
Harvest	20-30 September	20-30 June	Cut 1: 1 April; cut 2: 1 July; cut 3: 1 October	20-30 September
Input (kg ha⁻¹)				
Seed amount	28	110	40	2.5
Herbicide	3	3	1	3
N fertilizer	166	130	38	140
P ₂ O ₅ fertilizer	72.7	75	70	30
K ₂ O fertilizer	180	170	220	250

Table 2. Basic data for the cultivation of the crops

3.2.2. Agricultural feedstock

Yearly 2190 tons maize on 62 ha, 657 tons rye on 110 ha and 4380 tons grass were cultivated on 194 ha agricultural area. In order to replace energy crops, it is assumed to be produced 10,094 tons cup plants on 131 ha area. Agricultural processes for crop production were cultivation, chisel, harrow, sow, hoe and plough. Harvesting was done once in a year for maize and rye, three times for grass and two times for cup plant. Table 2 gives an overview of the required input for the cultivation. Necessary planting data for cup plant was delivered from the Thüringer National Institution for agriculture, 2013. The Silphie can be harvested at least ten years [10]. Herbicide application was performed by field sprayer, fertilizing by a broadcaster and harrowing by a rotary harrow. Emissions from herbicide applications were calculated based on data from Lal (2004), and Tenuta and Beauchamp (1996).

Following the harvest period, crops were ensiled for 6 months. Emissions from ensilage were estimated based on data provided by the Institute of regenerative energy technology, University of Applied Sciences Nordhausen (2013).

After ensilage, the crops were carried to the biogas plant. The transport distance between agricultural area and biogas plant was 12 km. Transport was done by a tractor with a trailer consuming 80 L h⁻¹ diesel.

3.2.3. Poultry manure

Poultry housing was situated at the plant. The produced manure is transported by tractor to the storage several times per day. The loading capacity of the tractor was 250 kg and the diesel consumption was 40 L h⁻¹. The distance between housing and storage was 40 m and the necessary time for a tour was one minute. The production of the vehicle and diesel required for the operations was considered within the boundary, also the combustion emissions derived from diesel fuel.

2.5 tons of daily produced manure was kept in the store at the biogas plant. Nitrogen based emissions forming during the storage were estimated based on data from Koerkamp (1994), Wathes et al. (1997), and Nicholson et al. (2004). It was assumed that 10% of the ammonium content of manure will be released as an emission into the atmosphere during the storage.

3.2.4. Anaerobic digestion

The biogas plant consisted of a main fermenter, two secondary fermenters and a storage tank for the digestate of a volume of 3000 m³. Digesters were operated under 42 °C mesophilic conditions with total 170 days retention time. Digestion process resulted in two products; biogas and digestate. Methane emissions from fermenters accepted as a 1% share of total biogas produced [17]. Electricity used in the process was taken from the grid and heat demand was supplied from the produced heat at Combined Heat and Power (CHP).

3.2.5. Biogas utilization

The produced biogas is used in a 500 kW capacity CHP for the production of electricity and heat. 35% of produced heat was used for the fermenters and 65% was used for poultry housing. Emissions occurring during the combustion of biogas at CHP were taken from Lansche and Müller (2012). Excess heat was discharged as waste to the atmosphere.

3.2.6. Digestate

Digestate was stored at the plant or on the agricultural area. The storage of digestate resulted in emissions of CH₄, N₂O and NH₃. Emissions vary depending on the temperature and composition of the digestate. These emissions were estimated based on data from De Vries et al. (2012), Research Centre Jülich (2008), and Lukehurst et al. (2010).

Transport of digestate between biogas plant and the agricultural area was accomplished by a 40 ton capacity lorry, consuming the 80 L h⁻¹ of diesel.

It was spread then for the growth of crops as fertilizer by splash plate. The digestate residues replaced mineral fertilizers like calcium ammonium nitrate for N, triple superphosphate for P and potassium chloride for K [19]. The quantities of fertilizers that were replaced by the digestate were calculated on the basis of the digestate composition and fertilizer replacement values. Furthermore, digestate compositions were determined based on the decomposition rates of the substrates and available organic N [8, 19].

The field emissions such as ammonia, nitrous oxide, nitrogen, nitrate and phosphate, were calculated. Nitrogen-based emissions were determined by factors provided by Brentrup et al. (2000) and phosphate emissions into water were

calculated according to the method of Rosier (1998).

3.3. Life cycle impact assessment

All emissions and resources used were included in the assessment and categorized under four environmental indicators: global warming potential (GWP) in kg CO₂-eq, acidification potential (AP) in kg SO₂-eq, eutrophication potential (EP) in kg P-eq, and land transformation potential (LTP) in m². The operation was modeled in the Simapro 7.3.2. Software [23] by using the Ecoinvent 2.2 database. Impact assessments were computed by using the ReCiPe midpoint v.1.06 method. To enable the comparison of feedstock, environmental impacts were calculated based on FU.

4. RESULTS

Fig. illustrates the comparison of LCA characterization results for energy crops and cup plant. The results showed that greenhouse gas (GHG) emissions change based on feedstock type. For the current operation with energy crops, it is seen that the digestate spreading creates the highest AP and EP due to high nitrate and phosphor emissions. Agriculture related activities have the highest LTP because of arable land use and transport. Fuel burning emissions from the transport cause the highest GWP.

4.1. Global warming

According to Fig.2.a, the results suggest that under the current conditions, the replacement of energy crops with cup plants would result in 3 times lower GWP. The decrease was caused due to lower fertilizer requirement of cup plants. When cup plants are used as co-substrate, 74% of GWP were resulted from fuel combustion emissions generated during transport.

4.2. Acidification

The emissions lead to acidification, including H₂S, NH₃, SO₂, and NO_x are site specific. Fig 2.b illustrates that energy crops would result in 19 times higher AP compared to the cup plants. 78% of AP was resulted from diesel combustion emissions coming from digestate transport and it was followed by cup plant production (10%).

4.3. Eutrophication

FEP was mainly connected to phosphorous emissions. The operation with energy crops would result in 3.2 times higher FEP (Fig 2.c), as a result of greater leaking of nitrate and phosphorous from digestate application. When the cup plant was co-substrate, the highest FEP was resulted from digesters due to the ammonia emissions (63%). These emissions could be avoided, if ammonia filters were used [24].

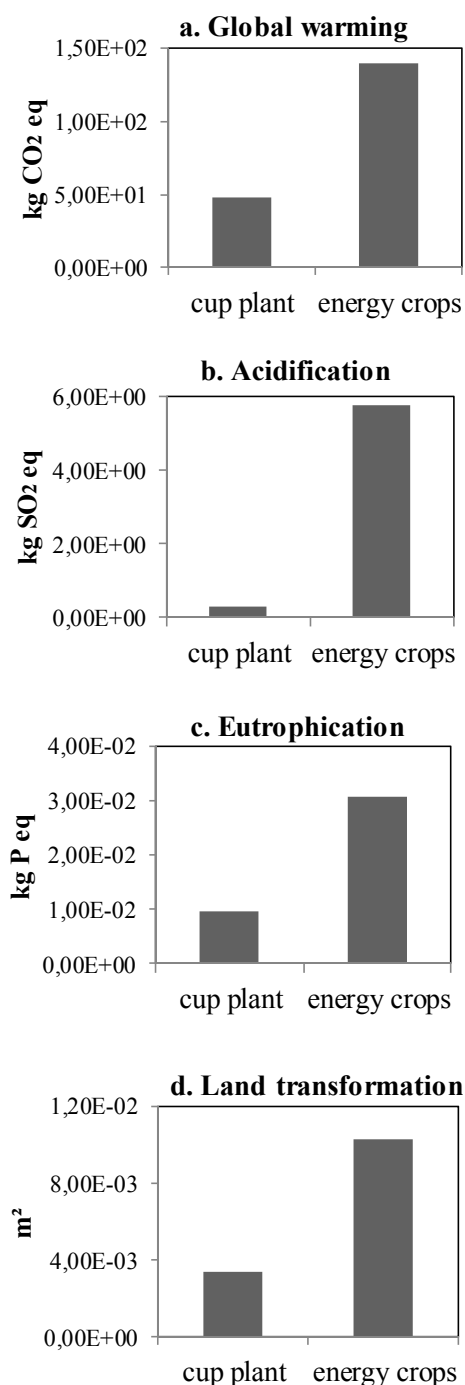


Fig. 2. LCA characterization results comparisons. The results are given per FU

4.4. Land transformation

LTP (Fig 2.d) was basically related to transport and agricultural crop production. The energy crops resulted in 3 times higher LTP due to larger agricultural area use. Crop production contributes the highest LTP (31%).

5. CONCLUSION

This paper assessed the environmental impacts of cup plant as cosubstrate for biogas production by using LCA methodology, when they substitute the energy crops. The results demonstrate that cup plants require less amount of fertilizers and arable land for cultivation. These result in better environmental conditions by means of lower amount of GHG emissions. The biogas production systems, their operation efficiency and environmental impacts vastly depend on the chosen feedstock. The cup plant was demonstrated as a hopeful cosubstrate for bioenergy production by this study. However, the *Silphium perfoliatum* has so far been systematically investigated as an energy crop in Germany only in Thüringen. The collected results are promising, nevertheless need to be secured a few more years. The plant in agricultural production is so new and commercially difficult to obtain. The high expense in the first year of cultivation creates a potential disadvantage, which makes it remain uninteresting for the practitioner [10].

6. REFERENCES

- [1] Change IC. Mitigation of climate change. Summary for Policymakers 2007:10.
- [2] Association GB. Biogas segment statistics 2012. 2013.
- [3] Trepner A. Eignung verschiedener Herkünfte von *Silphium perfoliatum* als Biogassubstrat im Vergleich zu Mais. 2013.
- [4] Landwirtschaft Tlf. Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Durchwachsener Silphie. 2013.
- [5] Augustenberg LT. Erste Versuchsergebnisse mit der Durchwachsenen Silphie (*Silphium perfoliatum* L.) in Baden-Württemberg. 2011.
- [6] Standard I. 14040 (2006) NF EN ISO 14040: 2006-Environmental management-life cycle assessment-principles and framework. AFNOR.
- [7] Hans-Jörg Althaus CB, Gabor Doka, Roberto Dones, Roland Hischier, Stefanie Hellweg, Sébastien Humbert, Thomas Köllner, Yves Loerincik, Manuele Margni, Thomas Nemecek. Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. In: Rolf Frischknecht NJ, editor: Swiss Centre for Life Cycle Inventories; A joint initiative of the ETH domain and Swiss Federal Offices; 2010.
- [8] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft K. Wirtschaftlichkeitsrechner Biogas. 2014.
- [9] FNR Leitfaden Biogas: von der Gewinnung zur Nutzung:[diese Arbeit wurde im Rahmen des Projekts "Handreichung Biogasgewinnung und-nutzung" angefertigt]: FNR; 2010.
- [10] FNR FNR. Die Durchwachsene Silphie (*Silphium perfoliatum* L.) aus der Gattung *Silphium* aus der Familie der Asteraceae (Korbblütler). FNR; 2015.
- [11] Lal R. Carbon emission from farm operations. *Environment international* 2004;30:981.
- [12] Tenuta M, Beauchamp EG. Denitrification following herbicide application to a grass sward. *Canadian journal of soil science* 1996;76:15.
- [13] Nordhausen IfrEF. Eine Biomethananlage in Nordhausen: Energiepolitische Rahmenbedingungen, Standortbezogene Potenziale, Ermittlung einer CO2 Bilanz und ethische Aspekte der Bioenergienutzung. Nordhausen: Institut für regenerative Energietechnik Fachhochschule Nordhausen; 2013.
- [14] Koerkamp P. Review on emissions of ammonia from housing systems for laying hens in relation to sources, processes, building design and manure handling. *Journal of Agricultural Engineering Research* 1994;59:73.
- [15] Wathes C, Holden M, Sneath R, White R, Phillips V. Concentrations and emission rates of aerial ammonia, nitrous oxide, methane, carbon dioxide, dust and endotoxin in UK broiler and layer houses. *British poultry science* 1997;38:14.
- [16] Nicholson F, Chambers B, Walker A. Ammonia emissions from broiler litter and laying hen manure management systems. *Biosystems Engineering* 2004;89:175.
- [17] Jülich F. Optimierungen für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland. In: Verbundprojekt gefördert vom Bundesministerium für Umwelt NuRB, editor. – Endbericht mit Materialband –; 2008.

- [18] Lansche J, Müller J. Life cycle assessment of energy generation of biogas fed combined heat and power plants: Environmental impact of different agricultural substrates. *Engineering in Life Sciences* 2012;12:313.
- [19] De Vries JW, Vinken TMWJ, Hamelin L, De Boer IJM. Comparing environmental consequences of anaerobic mono- and co-digestion of pig manure to produce bio-energy - A life cycle perspective. *Bioresource Technology* 2012;125:239.
- [20] Lukehurst CT, Frost P, Al Seadi T. Utilisation of digestate from biogas plants as biofertiliser. *IEA Bioenergy* 2010.
- [21] Brentrup F, Küsters J, Lammel J, Kuhlmann H. Methods to estimate on-field nitrogen emissions from crop production as an input to LCA studies in the agricultural sector. *Int J Life Cycle Assess* 2000;5:349.
- [22] Rossier D. Adaptation of the Method Ecobilan for the Environmental Management of Agricultural Exploitation. *Service Romand de Vulgarisaation Agricole, Lausanne, Switzerland* 1998;49.
- [23] Consultants P. Introduction to LCA with SimaPro 7. Report Version 2008;4.
- [24] Deublein D, Steinhauser A. *Biogas from waste and renewable resources: an introduction*: John Wiley & Sons; 2011.

ABBREVIATIONS

AP	Acidification Potential
CHP	Combined Heat & Power
EP	Eutrophication Potential
GHG	Greenhouse Gas
GWP	Global Warming Potential
FU	Functional Unit
LCA	Life Cycle Assessment
LTP	Land Transformation Potential

ACKNOWLEDGEMENT

This publication has emanated from research conducted with the financial support of the Friedrich Naumann Foundation (Friedrich-Naumann-Stiftung für die Freiheit, Deutschland).

Authors: MSc. Funda Cansu Ertem, Prof. Dr. Peter Neubauer, Dr. Stefan Junne, Technische Universität Berlin, Institute of Biotechnology, Department of Bioprocess Engineering, Ackerstr. 71-76, ACK24, 13355 Berlin, Germany, Phone: +49 30 314 27576, Fax: +49 30 314 27577.
 E-mail: fcertem@mailbox.tu-berlin.de
peter.neubauer@tu-berlin.de
stefan.junne@tu-berlin.de

Kiss, F., Rajović, V.

LIFE CYCLE INVENTORY OF ELECTRICITY GENERATED IN SERBIAN COAL-FIRED POWER PLANTS

Abstract: The study provides updated life cycle inventory data of electricity generated in Serbian coal-fired power plants. The data refer to the situation in 2012 and cover the whole life cycle of electricity, including power plant emissions, and up- (e.g., coal mining and transportation, provision of auxiliary materials, etc.) and downstream (e.g., coal ash treatment) processes. In 2012, the global warming potential and the cumulative fossil energy requirements of electricity were $1.18 \text{ kg CO}_{2\text{eq}}\cdot\text{kWh}^{-1}$ and $11.64 \text{ MJ}\cdot\text{kWh}^{-1}$, respectively.

Key words: Electricity, lignite, life cycle inventory, power plants, Serbia

1. INTRODUCTION

Without electricity, no industrial process would be achievable. Therefore, accurate life cycle inventory (LCI) of electricity system in life cycle assessment (LCA) study is crucial. Commercial LCI databases on Serbian electricity system are based on older information, often from the mid-1990s, which makes them uncompetitive. Updated Serbian electricity system LCI data would grant benefit to many LCA studies. In 2012, net electricity generation in Serbia was approximately 34,509 GWh [1]. 70.4% of electricity production in 2012 relied on lignite, most undesirable coal (low calorific value, high moisture and sulphur content). Hydroelectric power plants contributed 28.5% of the total, while other energy sources (mainly natural gas) have virtually negligible share in total electricity generation (about 1%) [1].

In 2013 the Electric Power Industry of Serbia (*Elektroprivreda Srbije – EPS*) published several reports [1, 2], which provided information on annual emissions, fuel consumption and the net electricity generation of each Serbian power plant. Information provided by EPS is very useful, but

limited in LCA study for a few reasons. Data on upstream processes (e.g. extraction, fuel production, fuel transportation) is not provided and modest information on emissions is presented.

The aim of this study is to provide more accurate and comprehensive LCI information on electricity generated in the Serbian coal-fired power plants in 2012 by including flows associated with upstream processes (e.g., fuel extraction, fuel production, etc.) and other emissions not addressed in the EPS reports.

The assessment is limited to coal-fired power plants (i.e., thermal power-plants; TPPs). However, the results of this research are a good proxy for the total environmental impacts caused by electricity generation in Serbia, given the negligible environmental impacts arising from life cycle emissions associated with hydroelectricity [3] and small share of other fossil fuels (ca. 1%) in electricity generation [1].

2. METHODS AND MATERIALS

2.1 Coal-fired power plants in Serbia

LCI of six Serbian coal-fired power plants

Name of the TPP	abbrev.	Net output electric capacity (MW)	Electricity generation ($\text{GWh}\cdot\text{a}^{-1}$)	Thermal energy generation ($\text{GWh}\cdot\text{a}^{-1}$)	LHW* of coal ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Coal consumption (million Mg^{**})
TPP "Nikola Tesla A"	TENT A	1,502	10,581		7,448	15.34
TPP "Nikola Tesla B"	TENT B	1,160	6,725		7,448	9.54
TPP "Kolubara"	TEK	245	1,195		6,805	1.81
TPP "Morava"	TEM	108	651		8,757	0.83
TPP "Kostolac A"	TEK A	281	2,091	302	8,079	3.44
TPP "Kostolac B"	TEK B	640	3,032		8,079	4.12
Total		3,936	24,275	302		34.92

Notes: * lower heating value; ** Megagram (or 1 metric ton)

Table 1. Electric capacity and annual production of electricity and heat in Serbian coal-fired power plants in 2012 [1, 2, 3]

(operated by EPS) is presented in this study. 3,936 MW is their total net output capacity, which is 55% of total capacities [1]. Overview of power plants covered in this research is given in Table 1.

2.2 Functional unit and system boundaries

The functional unit is defined as 1 kWh of electricity generated in Serbian coal-fired power plants in 2012. System boundaries include *i)* coal mining, *ii)* coal transportation, *iii)* coal combustion in TPPs, i.e. electricity generation, and *iv)* treatment of coal ash. Transmission and distribution of electricity and consequently the electric grid infrastructure and losses are not within the system boundaries.

2.3 LCI data and assumptions

Data on power plant emissions, fuel and material inputs of electricity generation are largely available from EPS reports [1, 2], while LCI data associated with these inputs is taken from the Ecoinvent v.2.2 LCI database [4] which is integrated in the SimaPro 8 LCA software used for calculations. Concise description of life cycle subsystems and processes and implemented LCI datasets are provided below.

i) Coal mining. Total coal consumption of provided TPPs in 2012 (Table 1) was ca. 35 million Mg with energy content of 7.7 MJ·kg⁻¹. The required quantities of coal are retrieved via opencast method in Kolubara and Kostolac lignite coal mines [1, 3]. The coal is obtained by surface mining, which involves fracturing and removing

the overlying soil and rock, breaking the coal by blasting or mechanical means, and loading the coal for transport to its final destination.

Ecoinvent v.2.2 includes LCI data of coal excavation from opencast mines. „Lignite, at mine/RER“ is the respective process and refers to the excavation of 1 kg of coal from the average opencast lignite mine in Europe. In order to have more representative results, the flow describing lignite in the original dataset “Coal, brown” which has a calorific value of 9.9 MJ·kg⁻¹ is changed into the “Coal, brown, 8 MJ per kg”.

ii) Coal transportation. Distances and transportation of coal are obtained from the EPS officials and they refer to the case in 2011. TPPs receive coal loads via conventional freight trains and/or conveyor belts. Due to assumed small environmental impact, conveyor belts are not taken in the calculation in this study. Our previous studies provide data on transportation distances from coal mines to TPPs [3, 5].

Ecoinvent database: „Operation, coal freight train, electricity/CN” describes LCI inventory data of coal electric train transport. It was necessary to adopt Serbian electricity system data, since the original process refers to coal transport with electric trains in China [3, 5].

iii) Electricity generation in power plants. Annual emission of pollutants (CO₂, SO₂, NO_x) and particles (PM) is available from the EPS report [2]. Information on other emissions, as well as information on particle size distribution is not available from the report. Since size of the

Life cycle phase	Unit	TENT A	TENT B	TEK	TEM	TEK A*	TEK B	Average	LCI data from Ecoinvent v.2.2
Coal mining									
- lignite	kg	1.45E+0	1.42E+0	1.52E+0	1.27E+0	1.44E+0	1.36E+0	1.42E+0	(a)
Coal transportation									
- rail transport	Mg·km	9.28E-2	1.08E-1	1.52E-2	2.85E-1	0.00E+0	0.00E+0	7.78E-2	(b)
- rail infrastructure	Mg·km	9.28E-2	1.08E-1	1.52E-2	2.85E-1	0.00E+0	0.00E+0	7.78E-2	(c)
I. Power plant									
- emissions									
PM	kg	3.89E-4	3.18E-4	4.25E-3	6.96E-3	6.96E-4	1.41E-3	8.87E-4	
PM _{2,5}	kg	3.24E-4	2.65E-4	3.53E-3	5.79E-3	5.78E-4	1.17E-3	7.37E-4	
PM _{2,5-10}	kg	3.81E-5	3.11E-5	4.15E-4	6.80E-4	6.80E-5	1.38E-4	8.67E-5	
PM ₁₀	kg	2.77E-5	2.27E-5	3.03E-4	4.95E-4	4.95E-5	1.00E-4	6.31E-5	
SO ₂	kg	9.96E-3	1.40E-2	1.95E-2	2.63E-2	2.10E-2	1.27E-2	1.34E-2	
NO _x	kg	1.91E-3	1.80E-3	2.80E-3	2.23E-3	1.28E-3	8.67E-4	1.74E-3	
CO ₂	kg	1.14E+0	1.10E+0	1.41E+0	1.25E+0	1.11E+0	1.20E+0	1.15E+0	
- infrastructure	p.	1.18E-11	1.18E-11	1.18E-11	1.18E-11	1.18E-11	1.18E-11	1.18E-11	(d)
- water for cooling	m ³	1.00E-1	1.27E-1	1.32E-1	1.28E-1	1.47E-1	1.58E-1	1.21E-1	(e)
- water other	kg	8.07E-2	7.45E-2	1.30E-1	1.97E-1	1.30E-1	2.96E-1	1.03E-1	(f)
- chlorine	kg	1.21E-4	1.21E-4	1.21E-4	1.21E-4	1.21E-4	1.21E-4	1.21E-4	(g)
V. Coal ash treatment									
- coal ash	kg	2.74E-1	2.68E-1	2.87E-1	2.40E-1	2.72E-1	2.57E-1	2.69E-1	(h)

Notes: (a) modified “Lignite, at mine/RER” see Section 2.3; (b) modified “Operation, coal freight train, electricity/CN”, see Section 2.3; (c) modified “Transport, freight, rail/RER”, only infrastructure related flows considered; (d) Lignite power plant/RER; (e) Water, cooling, unspecified natural origin/m³; (f) Water, completely softened, at plant/RER; (g) Chlorine, liquid, production mix, at plant/RER; (h) Disposal, lignite ash, 0% water, to opencast refill/CS.* 13% of total flows related to TPP “Kostolac A” is allocated to heat co-product according to the principles of energy allocation.

Table 2. Material and energy flows associated with electricity generation in the Serbian TPPs (per 1 kWh)

particles is relevant due to their influence on life cycle impact assessment (LCIA) results, we followed recommendation of Röder et al. [6] who suggested the following size distribution of particles emitted from power plants equipped with electrostatic precipitators: 83.1% are particles with diameter below 2.5 μm ($\text{PM}_{2.5}$), 7.1% are particles with diameter bigger than 10 μm (PM_{10}) and the rest are particles with diameter between 2.5 μm and 10 μm ($\text{PM}_{2.5-10}$).

Required raw water (from rivers and underground aquifers) for cooling and steam generation processes in TPPs is provided in EPS report [2]. Ecoinvent v.2.2 database provides LCI of these processes.

Data inventory on emissions released during the construction, maintenance and demolition of TPPs equipment and infrastructure is contained and is taken from Ecoinvent database. Same database provided data on quantity and LCI of chlorine consumed in Serbian power plants (see Table 2).

iv) *Coal ash treatment.* Röder et al. [6] concluded that after each kg of burned lignite coal in Serbian TPPs, 0.189 kg of ash was formed. According to annual coal consumption (Table 1), annual ash produced is estimated to be around 7 million Mg. Environmental flows considering ash disposal in the Serbian TPPs are given in the Ecoinvent v.2.2 database. In this study we assumed that formed ash is recycled in form of backfilling material in opencast mines.

Table 2 gives an overview of environmental and product flows associated with the life cycle of electricity from Serbian TPPs and references to their respective LCI datasets.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Life cycle inventory results

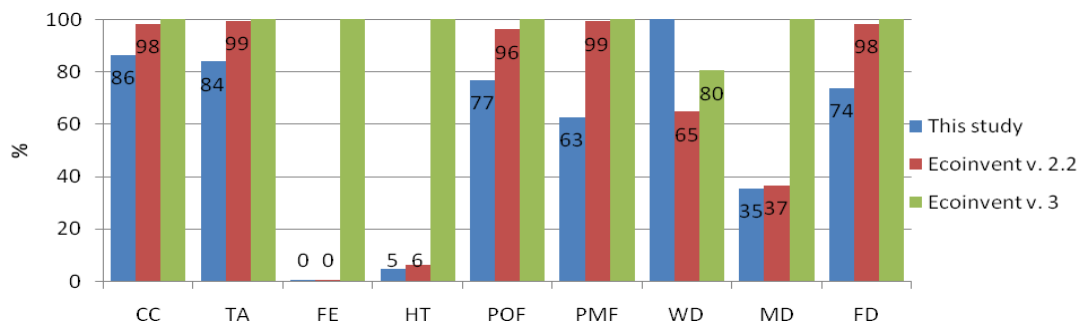
Selected results of LCI analyses are summarized in Table 3. Due to space limitation only selected environmental flows are presented here. However, the whole LCI and selected LCIA results of electricity generated in Serbian TPPs are available on-line (<https://goo.gl/R2hGBj>).

Life cycle CO_2 emissions of coal-based electricity in Serbia range from 1,125 to 1,426 g kWh^{-1} with 1,170 g kWh^{-1} as a weighted average value. Substantial difference between the results can be explained with different electric efficiencies of TPPs, and with differences in chemical composition and heating value of lignite used for electricity generation in different power plants. In 2012 the average heating value of lignite used by different power plants varied between 6.8 $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ and 8.7 $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ [3].

Relatively high life cycle SO_2 emissions of about 13.5 g kWh^{-1} characterize the Serbian TPPs. About 99% of total SO_2 emissions are released during the combustion of lignite in TPPs. Sulphur content in combusted lignite is main determinant of SO_x emissions. Other factors are: heating value, moisture and alkali concentration. Besides the high sulphur content of the Serbian lignite (up to 1.58 wt.% on dry basis [7]), old abatement technology and the lack of treatment of flue gases in Serbian TPPs are also determining factors of the high SO_2 emissions. Variation of NO_x and PM emissions within different TPPs can be explained with various fuel composition, boiler construction and combustion conditions, and different extension of installation and efficiency of emission control devices in the investigated TPPs.

Life cycle phase	Unit	TENT A	TENT B	TEK	TEM	TEK A	TEK B	Average
Resources								
Coal (lignite)	kg	1.46E+0	1.43E+0	1.52E+0	1.28E+0	1.44E+0	1.36E+0	1.43E+0
Coal (hard)	kg	4.03E-3	4.00E-3	3.99E-3	4.11E-3	3.78E-3	3.60E-3	3.93E-3
Crude oil	kg	1.57E-3	1.58E-3	1.46E-3	1.84E-3	1.37E-3	1.31E-3	1.52E-3
Natural gas	m^3	1.69E-3	1.67E-3	1.68E-3	1.70E-3	1.58E-3	1.50E-3	1.64E-3
Water (all sources)	kg	2.67E+2	2.97E+2	2.70E+2	3.63E+2	2.73E+2	2.77E+2	2.79E+2
Emissions to air								
PM	kg	1.00E-3	9.21E-4	4.89E-3	7.52E-3	1.30E-3	1.98E-3	1.49E-3
$\text{PM}_{2.5}$	kg	3.36E-4	2.77E-4	3.54E-3	5.81E-3	5.86E-4	1.18E-3	7.49E-4
$\text{PM}_{2.5-10}$	kg	4.34E-5	3.67E-5	4.20E-4	6.88E-4	7.18E-5	1.41E-4	9.18E-5
PM_{10}	kg	6.25E-4	6.07E-4	9.24E-4	1.03E-3	6.38E-4	6.57E-4	6.48E-4
SO_2	kg	1.01E-2	1.41E-2	1.95E-2	2.64E-2	2.11E-2	1.27E-2	1.35E-2
NO_x	kg	1.98E-3	1.87E-3	2.86E-3	2.32E-3	1.34E-3	9.24E-4	1.81E-3
CO_2	kg	1.16E+0	1.13E+0	1.43E+0	1.28E+0	1.13E+0	1.22E+0	1.17E+0
NMVOC	kg	9.90E-6	9.93E-6	9.29E-6	1.13E-5	8.72E-6	8.32E-6	9.58E-6
CO	kg	4.33E-5	4.42E-5	3.75E-5	5.74E-5	3.53E-5	3.43E-5	4.17E-5
CH_4	kg	3.69E-4	3.62E-4	3.83E-4	3.31E-4	3.63E-4	3.43E-4	3.61E-4

Table 3. Selected results of LCI analyses of electricity generated in Serbian TPPs (per 1 kWh in 2012)



Notes: CC – Climate change (100% = 1.36 kg CO_{2eq}); TA – Terrestrial acidification (100% = 1.72E-02 kg SO_{2eq}); FE – Freshwater eutrophication (100% = 3.58E-03 kg P_{eq}); HT – Human toxicity (100% = 2.43E+00 kg 1.4 DB_{eq}); POF – Photochemical oxidant formation (100% = 3.79E-03 kg NMVOC); PMF – Particulate matter formation (100% = 6.28E-03 kg PM_{10eq}); WD – Water depletion (100% = 2.74E-01 m³); MD –Metal depletion (100% = 6.53E-03 kg Fe_{eq}); FD – Fossil depletion; i.e. cumulative fossil energy demand (100% = 15.7 MJ);

Fig. 1. Comparable LCIA results of electricity generated in Serbian power plants according to the Ecoinvent database and this study.

CO₂, NO_x, SO₂, PM_{2.5-10}, and PM_{2.5} emissions are mainly released during lignite combustion in the power plants, accounting for 94–99% of the total, whereas other emissions are mainly associated with up- and downstream processes.

Total annual CO₂ emissions associated with the lignite combustion in the Serbian TPPs are 28 Tg (Tg = million metric tons), accounting for 61% of the total CO₂ emissions in Serbia in 2012 (ca. 46 Tg). Serbian TPPs in 2012 released 0.33 Tg and 0.04 Tg of SO₂ and NO_x, respectively.

3.2 Comparison with Ecoinvent data

Results were compared with respective processes from Ecoinvent v.2.2 (Electricity, lignite, at power plant/CS) and Ecoinvent v. 3 (Electricity, high voltage {RS}|electricity production, lignite|Alloc Def) databases. Selected results of LCIA calculated with SimaPro 8 and the ReCePi Midpoint (H) v.1.10 and cumulative energy demand (CED) LCIA methods are shown on Fig. 1.

Ecoinvent processes show higher environmental impacts in most of the impact categories compared to our average process. This can be largely explained with older and more complete emission datasets used by Ecoinvent v.2.2 and v.3 and different heating values of lignite assumed in Ecoinvent. According to data on Fig. 1, in 2012, the global warming potential and cumulative fossil energy requirements of electricity generated in Serbian TPPs were 1.18 kg CO_{2eq} and 11.64 MJ, respectively.

4. CONCLUSIONS

Available Ecoinvent LCI datasets do not accurately describe the environmental impact of electricity produced in Serbian coal-fired power plants. Since most industrial processes directly (or

indirectly) link to the electricity, it is paramount to provide up-to-date, accurate and comprehensive LCI datasets of electricity.

5. REFERENCES

- [1] Electric Power Industry of Serbia: *Technical Report for 2012*, Belgrade, 2013.
- [2] Electric Power Industry of Serbia: *Annual Report on the State of Environmental Protection for 2012*, Belgrade, 2013.
- [3] Kiss, F.: *Real costs of electricity generation in Serbia – study on environmental and economic interdependencies (available in Hungarian from the author)*, Project financed by the Hungarian Academy of Sciences, 2014.
- [4] Frischknecht, R. et al.: The ecoinvent database: Overview and methodological framework, *International Journal of Life Cycle Assessment*, 10, pp. 3–9, 2005.
- [5] Kiss, F., Petković, Đ.: *Revealing the Costs of Air Pollution Caused by Coal-based Electricity Generation in Serbia*. Proceedings of the EXPRES 2015 Conference, pp. 96–101, Subotica, Serbia, 2015.
- [6] Röder, A., Bauer, C., Dones, D.: *Kohle: Sachbilanzen von Energiesystemen*, Final report No. 6 ecoinvent data v2.0. Dübendorf and Villigen, Switzerland, 2008.
- [7] Životić, D. et al.: *Petrological and geochemical composition of lignite from the D field, Kolubara basin (Serbia)*, *International Journal of Coal Geology*, 111, pp. 5-22, 2013.

Authors: Dr. Ferenc Kiss, MSc. Vuk Rajović, PhD candidate, University of Novi Sad, Faculty of Technology, Bul. cara Lazara 1, 21000 Novi Sad, Serbia,
E-mail: ferenc1980@gmail.com
rajovic89@gmail.com

Muránsky, J.

QUALITY OF ENVIRONMENT AND ITS QUANTITATIVE DETERMINATION IN
MECHANICAL ENGINEERING

Abstract : A mathematical method is applied to the solution of this problem. The individual factors of environmental and economic character have been expressed before, in the other publications, by means of different equations having universal validity. The progress in this field is the quantitative expression of the quality of environment in the local level. The presented method is applied in the field of mechanical engineering. Each of summarized criterion is represented by its graphical form. The final results can be presented in the percentual and monetary form, too. An application in the automotive industry closes the paper.

Key words: quantitative expression of the quality of environment, mathematical modeling, graphical presentation, automotive industry.

1. INTRODUCTION

Operational Program (OP) – Quality of Environment, [1], [2] is a research program, what has been approved by the European Commission for the Slovak Republic. About 4,3 billion € will be disposable from the European Structural and Capital Funds for this OP, during the years 2014 – 2020, including the slovakian co-financing. The Slovak Ministry of Environment will be co-operate in this research program with lot of institutes as

- Slovak Agency of Environment,
- Department of Home Affairs,
- Slovak Agency for Innovations and Energy, and some others.

This OP has an integral characteristic, because it supports activities concentrated to

- waste management,
- water management,
- preservation of air quality standards and its improvement,
- decontamination of environmental ballasts, and nature preservation.

Mechanical engineering represents in the Slovak economy its significant part. It is a key innovative industry and, as such, any European industrial policy must consider mechanical engineering as a strategic sector [3]. The question is – what an influences has mechanical engineering on the quality of environment ?

There are a lot of methods an approaches, how this problem express, for example exactly, or as a declaration. It would be suitable to find some method for the quantitative expression of the quality of environment, as one of the results of mechanical engineering production processes.

A lot of analytical methods are suitable, how to solve this problem [4]. One of them is described in this paper – [5], [6].

2. THE BASIC ENVIRONMENTAL AND
ECONOMIC FACTORS AND THEIR
EXPRESSION

According to the formulas presented in [5], the most important ones are the following :

$$K_1(x) = C_1/x \quad (1),$$

where C_1 is a disposable quantity of natural capital during a year, for production of x products in a mechanical engineering works.

The total costs for environment protection, signified as $K_2(x)$, is defined as

$$K_2(x) = C_2 \cdot x + INV + SAN \quad (2),$$

where

$$C_2 = V + ODP + EMO + EMV + IM \quad (3),$$

and V – manufacturing costs per one unit of product,

ODP – quantity of solid wastes,

EMO – quantity of emissions,

EMV - quantity of liquid wastes,

IM – quantity of imissions inside the factory,

INV – capital expenditure in connection to the environment protection,

SAN – costs depending from the environment degradation (fines, fees, etc.).

The total costs for the manufacturing of x products in a factory, can be expressed as

$K(x) = K_1(x) + K_2(x)$, and applying the substitutions – including $C_3 = INV + SAN$ too, the following equation is obtained

$$K(x) = C_1/x + C_2 \cdot x + C_3. \quad (4)$$

After the differentiation of the equation (4), the optimal number of products $x = x_{opt}$, and the corresponding quality of environment, in connection to the factory influences, are defined, as

$$x_{opt} = \sqrt{\frac{C_1}{C_2}}. \quad (5)$$

The graphical interpretation of this results are illustrated in Fig. 1.

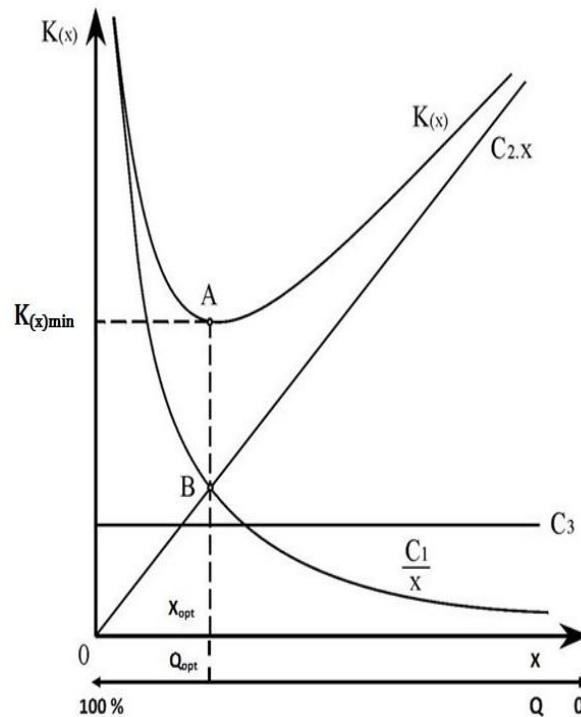


Fig. 1 Graphical interpretation of the compromise solution between the economic and the environmental demands in the mechanical engineering industry.

3. DISCUSSION

- The curve $K(x)$ sometime called as **the curve of the sustainable development** - has its minimum (point A), and represents, according to some approach, the compromise solution between the economic and the environmental demands on the micro-economic level.
- Consumption of the natural capital (habitually per annum) is gradually reduced by growing production, which is compensated with costs - to eliminate this consumption. Point B represents equality of both - costs and thus the **economic**

optimum of the environment quality - Q_{opt} .

- The environment quality in this case is in connection to the concrete mechanical engineering factory. If the $x = 0$, $C_2 = 0$ too, the corresponding $Q = 100\%$, and the natural capital C_1 has not been consumed, too.
- The environment protection costs have their initiation part of the constant value, which consists of the capital expenditure part **INV** and constant payments **SAN**. It is presumed that **SAN = const**, to the $x = x_{opt}$ value. If $x > x_{opt}$, it will be probably

depend from the other concrete conditions.

- Perhaps, the presented method and approach, can be applied to some parts in the LCC (Life Cycle Costing) analysis.

4. AN APPLICATION IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

The basic input data, according to the [7], [8] are the following :

$C_1 = 1,8 \cdot 10^{20} \text{ € / year}$, $C_2 = 1,65 \cdot 10^9 \text{ € / year}$, and C_3 has a marginal value. The corresponding graph is illustrated in **Fig. 2**.

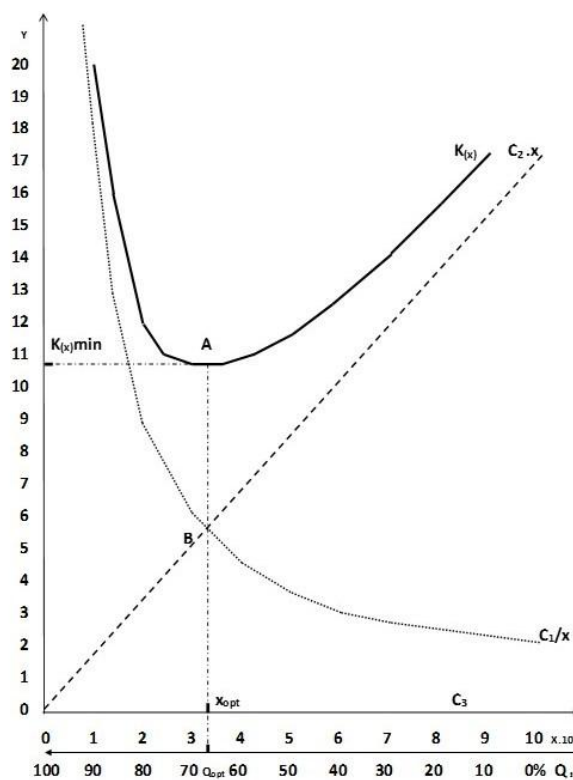


Fig. 2 Results from the personal car production in a ME factory, illustrated in this graph:

It is possible to declare according to the applied procedure : **the quality of environment has the quantitative value !**

5. CONCLUSION

There is the need for systematic approach to organize a factory in such a way, that improving the environmental and economic performance of their products across product life cycles becomes an integrated part of operations and strategy [1]. Determination of the optimal quality of environment and the optimal production volume

Results :

$x_{opt} = 330\ 000$ cars/year, quality of environment for the given conditions : $Q_{opt} = 67\ %$.

If the theoretical value of the environment quality $Q_t = 100\ %$, then it is reduced according to the formula :

$$Q_t - Q_{opt} = 100\% - 67\% = 33\% . \quad (6)$$

Of course, the financial quantification and expression of these data is possible too. It depends from the monetary system.

for the given conditions has operational and strategic purpose, too [7]. The described method represents the way , how to determine them. An application, for example, in the automotive industry this approach can bring not only environmental, but also economic benefits [8],[10], [11]. At the present time, the research program in this field is continuing, and is concentrated and applied in some factories in Slovakia for personal cars production.

6. REFERENCES

- [1] Žiga, P.: Operational Program – Quality of Environment (in Slovak). Enviromagazín, 5/2014, p.7, ISSN 1335-1877
- [2] Húska, M.: Priority is – Better Quality of Environment (in Slovak). Enviromagazín, 5/2014, pp.8-9, ISSN 1335-1877
- [3] Opinion of the European Economic and Social Committee on Industrial Change in Mechanical Engineering Sector (2005/C 267/02)
- [4] Gray, M.: Geodiversity : Valuing and Conserving Abiotic Nature. J.Wiley & Sons, Chichester, 2010, 260p.
- [5] Muránsky, J.: Determination of the Optimal Production Volume Respecting the Environmental and Economic Criterions. In: **maa 2012**, 11th Int. Scient. Conf., Novi Sad, Serbia, Sept. 20-21,2012, pp.373-376, ISBN 978-86-7892-429-3
- [6] Muránsky, J.: Environmental Evaluation of Mechanical Engineering Works. In : **Etikum 2014**, Int. Scient. Conf., Novy Sad, Serbia, June 2014, ISBN 978-86-7892-616-7
- [7] Available from : <http://www.portal.statistic.sk/showdoc.do?docid=37945>
- [8] Available from : <http://www.teeb.ecosyst/stud0810/an2010^>
- [9] Muránsky, J.: Environmental Compatibility of the Mechanical Engineering Products (in Slovak).SD(VLK), 2008, p.300, ISBN 978-80-96988-9-2
- [10] Available from : <http://www.cecs.pdx.edu/~herm/capstone/mee9899/491stuff/mon7/37945>
- [11] Mareš, A.: Application of Video Analysis for Gearbox Manual Assembly. In : Interdisciplinarity in Theory and Practice. Vol. 2, no. 4, 2014, pp.38 – 40, ISSN 2344 - 2409

Author: Prof. Ing. Juraj Muránsky, PhD.,
External specialist of the Slovak Ministry of Environment, working place: Rožňavská 15,
04011 Košice, Slovakia, phone: 0944 160 860,
e-mail : jurmur@netkosice.sk

UPOTREBA SENZORA SA OPTIČKIM VLAKNIMA ZA ODREĐIVANJE
REPREZENTATIVNIH NEORGANSKIH POLUTANATA U POVRŠINSKOJ VODIMihajlović, I.¹, Bajić, J.², Obrovski, B.¹, Vojinović Miloradov, M.¹, Batinić, B.², Živanov, M.²¹Departman za inženjerstvo zaštite životne sredine i zaštite na radu, Fakultet tehničkih nauka,
Univerzitet u Novom Sadu²Departman za energetiku, elektroniku i telekomunikacije, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u
Novom Sadu

Rezime: Utvrđivanje i praćenje koncentracionih nivoa zagađujućih supstanci u površinskoj vodi ima izuzetan značaj za upravljanje kvalitetom površinskih voda u cilju unapređenja hemijskog i ekološkog statusa životne sredine. Standardne laboratorijske metode, zbog visokih troškova i kompleksnosti analize, se u poslednje vreme zamenjuju kontinualnim merenjima sa senzorima. Senzori sa optičkim vlaknima su pogodni za detektovanje reprezentativnih neorganskih polutanata u površinskim vodama, omogućavaju dobijanje trenutnih i pouzdanih informacija, kao i pravovremeno reagovanje ukoliko dođe do kontaminacije vodnog tela. Kalibracija senzora sa optičkim vlaknima omogućava praćenje kvaliteta površinskih voda analizom neorganskih parametara (ortofofata, nitrita, sulfata, šestovalentnog hroma, hlora) čije povišene koncentracije mogu negativno da utiču na životnu sredinu.

Ključne reči: Senzori; Neorganski polutanti; Površinske vode

1. UVOD

Optička vlakna (OV) su prvi put upotrebljena za izradu senzora 70-ih godina prošlog veka. U početku primena OV je bila ograničena zbog troškova komponenti za izradu uređaja i nemogućnosti da pariraju konvencionalnim metodama. Karakteristike današnjih komponenata su veoma poboljšane u odnosu prethodne, a cena komponenata je znatno snižena [1,2].

Novija istraživanja su omogućila poboljšanje performansi senzora sa optičkim vlaknima (SOV) koji su imali određene prednosti u odnosu na konvencionalne metode. Prednosti uređaja SOV su: jednostavna izrada, male dimenzije, bezbednost rada jer nije potrebno napajanje na mestu merenja, primena na nepristupačnim mestima, mogućnost upotrebe u hemijski opasnim sredinama, otpornost na koroziju i elektromagnetne uticaje [3,4,5]. Postoji mogućnost multipleksiranja, odnosno povećanja broja senzora na jednom optičkom vlaknu. SOV sadrže određene limitirajuće faktore kao što su osetljivost na promene u spoljašnjoj sredini i fizičke smetnje, skraćen životni vek usled konstantne izloženosti zračenju. Dalja istraživanja u ovoj oblasti treba da minimiziraju uticaj ovih faktora na rad senzora.

Senzori sa optičkim vlaknima imaju sve veću primenu u industriji, za podvodno detektovanje, procese kontrole, monitoring životne sredine, u medicini, poljoprivredi, robotici, itd. Laborato-

rijske analize imaju određena ograničenja često zbog skupih i specifičnih hemikalija, kompleksnosti analize i nemogućnosti dobijanja trenutnih rezultata.

SOV obezbeđuju kontinualni monitoring i pouzdane prostorne i vremenske informacije o koncentraciji neorganskih parametara u cilju procene kvaliteta vodnog tela. SOV služe za obradu signala iz životne sredine, što eliminiše mogućnost ljudske greške koja je prisutna u toku laboratorijske analize. Senzori sa optičkim vlaknima su u početku korišćeni za određivanje osnovnih fizičko-hemijskih parametara kao što su: temperatura, pH, mutnoća, rastvoreni kiseonik i elektroprovodljivost. SOV predstavlja najpogodniju tehniku za detektovanje posmatranih parametara. Napredovanje u razvoju SOV je omogućilo upotrebu ovih uređaja za praćenje sulfata [6], hlora [7], nitrita [8], fosfata, katjona teških metala i drugih fizičko-hemijskih parametara u površinskim, podzemnim i otpadnim vodama. Senzori su osposobljeni i za praćenje jedinjenja kao što su hlorofil [9], toluen, etanol, i druga.

Senzor sa optičkim vlaknima predstavlja senzor boje koji pretvara RGB model boja u HSV model boja i na osnovu tri parametra: nijanse (Hue), zasićenosti (Saturation) i vrednosti (Value), određuje koncentracije definisanih parametara. Senzor sa optičkim vlaknima može da određuje pH vrednosti uzoraka vode na osnovu nijanse (H -

vrednost). Prednost senzora boje je mogućnost određivanja ukupnog opsega pH vrednosti (0-14), za razliku od ostalih senzora koji služe za merenja u užim opsezima [10, 11, 12].

Povišene koncentracije osnovnih fizičko-hemijskih parametara mogu imati negativne efekte na kvalitet površinskih voda. Visoke koncentracije fosfora dovode do eutrofikacije, hlor se koristi za dezinfekciju vode za piće i tokom tog procesa nastaju kancerogena i toksična jedinjenja hlora, prisustvo sulfata u površinskim vodama dovodi do acidifikacije, a hrom i nitriti mogu biti toksični po vodenu floru i faunu.

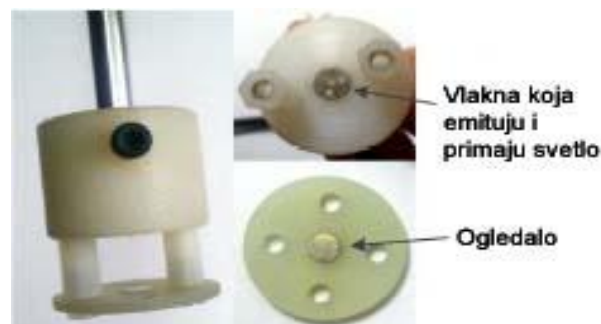
Cilj istraživanja je bio da se u uzorcima površinske vode odrede koncentracije navedenih parametara laboratorijskom analizom i uporede sa rezultatima merenja pomoću senzora boje sa optičkim vlaknima da bi se dokazala efikasnost senzora.

2. METODOLOGIJA

Dunav je najznačajnija reka u Srbiji i veoma je važno pratiti hemijski i mikrobiološki status same reke. Ispuštene otpadne vode iz antropogenih izvora i prirodnih procesa narušavaju kvalitet vodnog tela reke Dunav. Najveći izvor kontaminacije predstavljaju netretirane pomešane industrijske i komunalne otpadne vode koje se u okolini Novog Sada bez ikakvog prečišćavanja direktno ispuštaju u Dunav. Voda Dunava se koristi za navodnjavanje, rekreaciju i u industriji, a najvažnija primena je za dobijanje vode za piće. Zbog toga je izuzetno važno u svakom trenutku pratiti kvalitet vode Dunava, primenjivati preventivne mere radi sprečavanja kontaminacije i napraviti plan za pravovremeno reagovanje u slučaju akcidenta.

Uzorci površinske vode iz reke Dunav u Novom Sadu su prikupljeni za laboratorijsku analizu. Uzorci su prikupljeni u plastične boce od 1 L i transportovani do laboratorije u ručnom frižideru na 4 °C. Analize su sprovedene u akreditovanoj Laboratoriji za monitoring deponija, otpadnih voda i vazduha, Departmana za inženjerstvo zaštite životne sredine i zaštite na radu u Novom Sadu.

Analize fizičko-hemijskih parametara ortofosfata i nitrita urađene su primenom EPA metoda (EPA 365.3 za ortofosfate i EPA 354.1 za nitrite), dok su sulfati, šestovalentni hrom i ukupni hlor urađeni HACH metodama (HACH 8021 za sulfate, HACH 8023 za šestovalentni hrom, i HACH 8167 za ukupan hlor). Koncentracije svih parametara su merene na UV-VIS spektrofotometru (DR 5000, HACH, Nemačka).



Slika 1. Izgled primenjenog senzora.

Za merenje koncentracije neorganskih fizičko-hemijskih parametara upotrebljen je senzor sa optičkim vlaknima koji na osnovu boje pripremljenog uzorka meri koncentracije definisanih parametara (slika 1). Uređaj radi po principu prikupljanja odbijene svetlosti na osnovu čega se određuje boja. Senzor se sastoji od tri plastična optička vlakna koja emituju crvenu, zelenu i plavu komponentu i jednog optičkog vlakna koje prikuplja svetlo odbijeno od ogledala. Tri diode koje emituju svetlo crvena, zelena i plava su podešene na različite frekvencije. Tako podešen uređaj omogućava detektovanje odbijenog signala sa jednim fotodetektorom i tri propusna filtera. Propusni filteri su primenjeni kao digitalni IIR (beskonačni impulsni odziv) filteri na mikrokontroleru. Senzor sa optičkim vlaknima detektuje boju pretvarajući RGB model boja u HSV modela boja [13]. Rezultati dobijeni upotrebom senzora su poređeni sa rezultatima dobijenim laboratorijskom analizom.

3. REZULTATI

Utvrđivanje i praćenje koncentracionih nivoa specifičnih zagađujućih materija u površinskoj vodi, u cilju smanjenja rizika od negativnog uticaja, ima izuzetan značaj za celokupno unapređenje statusa životne sredine i kreiranje platforme za razvoj kvalitetnog monitoring programa, koji će pružiti doprinos u donošenju odluka i upravljanju kvalitetom površinskih voda. Monitoring reke Dunav je neophodan zbog upotrebe površinske vode u različitim ljudskim aktivnostima i potrebe za dobijanjem kvalitetne vode za piće. Važno je obezbediti higijenski ispravnu vodu koja nema negativni uticaj na ljudsko zdravlje. Pravovremene informacije omogućavaju reagovanje u slučaju kontaminacije.

Uzorci površinske vode Dunava su kolektovani i obrađeni uporednom analizom standardnim laboratorijskim metodama i merenjem pomoću senzora sa optičkim vlaknima. Izmerene koncentracije posmatranih neorganskih parametara prikazane su u Tabeli 1.

Koncentracije analiziranih uzoraka su upoređene sa Uredbom o граниčnim vrednostima zagađujućih materija u površinskim i podzemnim vodama i sedimentu i rokovima za njihovo dostizanje (Službeni glasnik Republike Srbije 50/2012). Prema koncentraciji ortofosfata u uzorcima površinskih voda, Dunav spada u III klasu što odgovara umerenom ekološkom statusu za površinske vode. Koncentracija nitrita je povišena i spada u IV klasu što odgovara slabom ekološkom statusu za površinske vode. Izmerena koncentracija sulfata spada u II klasu ekološkog statusa za površinske vode. Koncentracije šestovalentnog hroma su izuzetno niske, dok su koncentracije ukupnog hlora povišene.

Parametri	Koncentracije (mg/L)
Ortofosfati	0.176
Nitriti	0.148
Sulfati	57.93
Šestovalentni hrom	0.014
Ukupni hlor	0.046

Tabela 1. Koncentracije neorganskih parametara u površinskoj vodi Dunava.

Na osnovu laboratorijske analize i dobijenih rezultata može se utvrditi da reka Dunav spada u IV klasu ekološkog statusa površinskih voda. Slab ekološki status na osnovu analiziranih hemijskih parametara za površinske vode reke Dunav dozvoljava upotrebu vode uz odgovarajući tretman za piće, navodnjavanje i industriju (za rashlađivanje uređaja i u procesu proizvodnje).

Senzor boje sa optičkim vlaknima je kalibrisan i razvijen za merenje ortofosfata, nitrita, sulfata, šestovalentnog hroma i ukupnog hlora. Ovim postupkom univerzalni optički senzor prilagođen je primenama u analizi medijuma životne sredine, prvenstveno površinskih voda.

Senzor sa optičkim vlaknima se pokazao kao veoma pogodan za monitoring neorganskih parametara. Rezultati dobijeni standardnom laboratorijskom analizom su upoređeni sa rezultatima dobijenim senzorom boje i poklapanja su bila zadovoljavajuća (tabela 2).

Parametri	λ UV-VIS [nm]	λ senzor [nm]
Sulfati	450	490
Ukupan hlor	530	531
Šestovalentni hrom	540	539
Nitriti	540	546
Ortofosfati	650	678

Tabela 2. Poređenje vrednosti talasnih dužina dobijenih senzorom sa standardnim laboratorijskim vrednostima.

Dobijeni rezultati ukazuju da postoji visoka mogućnost da se ovakav tip senzora sve više upotrebljava za praćenje narušavanja kvaliteta površinske vode i zameni standardne laboratorijske tehnike.

Dalja istraživanja treba da budu usmerena na izradu terenskog uređaja koji bi omogućio on-line monitoring površinskih voda. Podaci prikupljeni tokom monitoringa bi bili sačuvani i poslani na dalju obradu. Na ovaj način bi bilo omogućeno trenutno dobijanje podataka o kvalitetu vodnog tela, što sa standardnim laboratorijskim tehnikama nije moguće. Laboratorijske tehnike zahtevaju uzorkovanje, ekstrakciju i analizu, što podrazumeva znatno duže vreme potrebno za dobijanje rezultata u odnosu na senzore.

4. ZAKLJUČAK

Kontinualna poboljšanja karakteristika i performansi senzora sa optičkim vlaknima omogućavaju upotrebu ovih uređaja za širok opseg merenja. Zbog niske cene izrade, mogućnosti upotrebe na nepristupačnim mestima i dobijanja pouzdanih informacija senzori se koriste za praćenje kontaminacije vodnog tela. Buduća istraživanja u ovoj oblasti treba da omogućе unapređivanje rada uređaja i otklanjanje ograničavajućih faktora koji danas postoje. Praćenje trendova iz razvijenih zemalja i donošenje zakona koji će zahtevati niže granične vrednosti za posmatrane zagađujuće materije zahtevaju nove tehnologije koje će se upotrebljavati za sve kompleksniju kontaminaciju životne sredine. Zbog svih svojih prednosti senzori sa optičkim vlaknima pružaju mogućnost razvoja efikasne tehnike za merenje i detektovanje različitih organskih i neorganskih parametara u životnoj sredini. Postoji mogućnost da se standardne laboratorijske tehnike zamene sa efikasnijim senzornim tehnikama koje će pružiti pouzdanije i kvalitetnije informacije o zagađenju.

Kalibracija senzornih instrumenata i konstruisanje pogodnog prenosnog uređaja za direktnu detekciju zagađujućih supstancija u vodnim telima, omogućili bi brzo, jeftino, tehnički i tehnološki opravdano rešenje za kontinualni real-time monitoring voda i blagovremeno reagovanje u slučaju akcidentalnih pojava, što je od posebnog značaja za očuvanje kvaliteta vodnih tela, bezbednost i zdravlje ljudi. Upotreba senzora će smanjiti utrošak vremena za uzorkovanje, pripremu i analizu uzoraka, i ubrzaće dobijanje preciznih realnih rezultata u odnosu na konvencionalne metode ispitivanja, što je od posebnog značaja za analizu parametara čije se

koncentracije veoma brzo menjaju (hlor, nitriti). Prednost korišćenja opreme na bazi optičkih vlakana je mogućnost slanja dobijenih podataka putem bežičnih mreža, što omogućava kontrolu kvaliteta čitavih sistema površinskih voda.

Zagađenje reke Dunav ima veliki uticaj na ekološki status površinske vode. Potrebno je definisati sve izvore negativnog uticaja na kvalitet površinske vode Dunava i preduzeti određene postupke da se kontaminacija smanji. Takođe, izuzetno je važno stvoriti uslove za donošenje zakona koji bi sprečio ispuštanje netretiranih otpadnih voda u životnu sredinu, a posebno u akvatičnu sredinu, zbog potencijalnog negativnog uticaja na ljudsko zdravlje i vodene organizme.

5. ZAHVALNICA

Istraživanje je finansijski podržano od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja, Republike Srbije u okviru projekta br. III43008, „Razvoj metoda, senzora i sistema za monitoring kvaliteta vode, vazduha i zemljišta“.

6. LITERATURA

- [1] Kersey, A. D.: *A Review of Recent Developments in Fiber Optic Sensor Technology*, Optical fiber technology, 2, 291-317, 1996.
- [2] Grattan, K. T. V., Sun, T.: *Fiber optic sensor technology: an overview*, Sensors and Actuators, 82, 40-61, 2000.
- [3] Klainer, S., Thomas, R., Francis, J.: *Fiber-optic chemical sensors offer a realistic solution to environmental monitoring needs*, Sensors and Actuators, 11, 81-86, 1993.
- [4] Ghong, S. S., Abdul Aziz, A. R., Harun, S. W.: *Fibre Optic Sensors for Selected Wastewater Characteristics*, Sensors, 13, 8640-8668, 2013.
- [5] Ahmad, A. B. H.: *Development of a portable optical fibre chemical sensor measuring instrument*, Department of Instrumentation and Analytical Science, UMIST, Manchester, 1994.
- [6] Ferrer, L., de Armas, G., Miro, M., Estela, M. J., Cerda, V.: *A multisyringe flow injection method for the automated determination of sulfide in waters using a miniaturised optical fiber spectrophotometer*, Talanta, 64, 1119-1126, 2004.
- [7] Kasik, I., Mrazek, J., Podrazky, O., Seidl, M., Aubrecht, J., Tobiska, P., Pospisilova, M., Matejec, V., Kovacs, B., Markovics, A., Szili, M.: *Fiber-optic detection of chlorine in water*, Sensors and Actuators B, 139, 139-142, 2009.
- [8] Petsul, P. H., Greenway, G. M., Haswell, S. J.: *The development of an on-chip micro-flow injection analysis of nitrate with a cadmium reductor*, Analytica Chimica Acta, 428, 155-161, 2001.
- [9] Zhang, Z. J., Zhao, C. J., Dong, D. M., Zheng, W. G., Jiao, L. Z., Zhao, X. D.: *Measurement of chlorophyll in water based on laser-induced fluorescence spectroscopy: Using spiral-wound unclad optical fiber system and partial least squares regression*, Optik, 124, 3375-3378, 2013.
- [10] Capel-Cuevas, S., Cuellar, M. P., de Orbe-Paya, I., Pegalajar, M. C., Capitan-Vallvey, L. F.: *Full-range optical pH sensor based on imaging techniques*, Analytica Chimica Acta, 681, 2010, 71-81.
- [11] Capel-Cuevas, S., Cuellar, M. P., de Orbe-Paya, I., Pegalajar, M. C., Capitan-Vallvey, L. F.: *Full-range optical pH sensor array based on neural networks*, Microchemical Journal, 97, 225-233, 2011.
- [12] Martinez-Olmos, A., Capel-Cuevas, S., Lopez-Ruiz, N., Palma, A. J., de Orbe, I., Capitan-Vallvey, L., F.: *Sensor array-based optical portable instrument for determination of pH*, Sensors and Actuators B, 156, 840-848, 2011.
- [13] Bajić, J., Stupar, D., Dakić, B., Manojlović, L., Slankamenac, M., Živanov, M.: *Implementation and characterization of a fibre-optic colour sensor*, PhysicaScripta, T162, 014033, 2014.

Autori: Assist. Prof. Dr. Ivana Mihajlović, M.Sc. Boris Obrovski, Prof. Dr. Mirjana Vojinović Miloradov, Univerzitet Novi Sad, Fakultet Tehničkih Nauka, Departman za inženjerstvo zaštite životne sredine i zaštite na radu, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Srbija, Tel: +381 21 485 2405, Fax: +381 21 6350 696.

E-mail: ivanamihajlovic@uns.ac.rs
borisobrovski@uns.ac.rs
miloradov@uns.ac.rs

M.Sc. Jovan Bajić, M.Sc. Branislav Batinić, Prof. Dr. Miloš Živanov, Univerzitet Novi Sad, Fakultet Tehničkih Nauka, Departman za energetiku, elektroniku i telekomunikacije, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Tel: +381 21 485 2555, Fax: +381 21 475 0572

E-mail: bajic@uns.ac.rs
batinicbb@yahoo.com
zivanov@uns.ac.rs

Adamović, S., Prica, M.

ELEKTROKOAGULACIONO UKLANJANJE BAKRA IZ OTPADNOG MATERIJALA GRAFIČKE INDUSTRIJE

Rezime: U procesu ofset štampe stvara se otpadni tok koji je posledica interakcije grafička boja/štamarska podloga/štamarska forma/sredstvo za vlaženje. Otpadni tok ofset štampe trebalo bi ponovo upotrebiti ili odložiti na za to predviđeno mesto. U oba slučaja potreban nam je tretman koji bi iz otpadnog toka uklonio materije štetne za životnu sredinu. U radu je ispitana mogućnost primene elektrokoagulacionog tretmana za uklanjanje bakra iz otpadnog toka ofset štampe sa četiri različite kombinacije elektroda od aluminijuma i gvožđa. Rezultati su ukazali da efikasnost uklanjanja bakra zavisi od vrste i kombinacije elektroda i vremena elektrokoagulacionog tretmana.

Ključne reči: elektrokoagulacioni tretman, otpadno sredstvo za vlaženje, bakar

1. UVOD

Ofset tehnika štampe je razvijena u 19. veku i danas je jedna od najzastupljenijih. Ofset štampa spada u tehnike ravne i indirektno štampe, što znači da se grafička boja sa forme ne prenosi direktno na podlogu, nego se predhodno prenosi na gumeni omotač (koji je postavljen na ofsetni cilindar), a zatim sa njega na materijal za štampu. Kod ravne štampe, štampajući i neštampajući elementi nalaze se u istoj ravni, a međusobno se razlikuju po svojim fizičko-hemijskim karakteristikama. Štamarska forma je tako pripremljena da su štampajuće površine oleofilne te odbijaju vodu, dok neštampajuće površine primaju vodu (hidrofilne), a posle vlaženja odbijaju grafičku boju [1]. Uređaj za vlaženje nanosi sredstvo za vlaženje na neštampajuće delove ofset štamparske forme, dok štampajući delovi ne primaju sredstvo za vlaženje na sebe. Valjci prenose grafičku boju iz uređaja za obojavanje na štamparsku formu gde štampajući delovi prihvataju boju (oleofilni), a neštampajući ne prihvataju. Potom se grafička boja prenosi sa ofset štamparske forme na cilindar sa gumenim omotačem, koji sliku, uz kontra pritisak cilindra za pritisak, prenosi na podlogu za štampanje [1]. Sredstvo za vlaženje koje se koristi u postupku ofset štampe sadrži vodu (80%), izopropil alkohol ili surfaktante na bazi glikola, puferna sredstva (regulatore pH vrednosti), antikorozivna sredstva, antifungicide i sredstva protiv stvaranja pene u sistemu za cirkulaciju sredstva za vlaženje [2]. Tvrdoća vode bi trebala da bude između 80 i 100 °dH. Neodgovarajuća tvrdoća vode može da dovede do naslaga kalcijuma na valjcima i na

gumenom omotaču, negativnog uticaja pH i podstiče koroziju.

Sredstvo za vlaženje ima sledeće funkcije: (i) sprečava nanošenje grafičke boje na neštampajuće elemente ofsetne ploče stvarajući tečni film, (ii) održava hidrofilnu prirodu neštampajućih elementa, i (iii) kontroliše stvaranje emulzije grafička boja/voda [3]. Usled važnosti površinske hemije u procesu ofset štampe, neophodno je proučavanje fizičko-hemijskih karakteristika, kontaminacije i prečišćavanja otpadnog sredstva za vlaženje, odnosno celokupnog otpadnog toka nastalog nakon interakcije grafička boja/štamarska podloga/štamarska forma/sredstvo za vlaženje.

Pri procesu ofset štampe stvara se određena količina otpadnog toka koja bi trebala ili da se reciklira i upotrebi ponovo ili nakon obrade odložiti prikladno na za to predviđeno mesto. U oba slučaja potreban je tretman kojim bi se otpadni tok prečistio i uklonile materije koje su štetne za životnu sredinu. Danas se ispituje velik broj različitih procesa za prečišćavanje različitih otpadnih tokova, koji se koriste zasebno, ali češće u kombinaciji jedni sa drugima kako bi se postigla što bolja efikasnost uklanjanja procesa.

Elektrokoagulacija nije nova tehnologija i korišćena je za prečišćavanje raznih tipova otpadnih voda sa različitom efikasnošću. Elektrokoagulacija je uspešno korišćena u tretmanima otpadnih voda od: hemijsko-mehaničkog poliranja, tekstilne industrije, pranja odeće, fabrika papira, voda sa pekarskim kvascem, voda iz klanice, voda iz restorana i voda sa fosfatima, hromom(VI), arsenikom i drugim teškim metalima [4,5].

Elektrokoagulaciona tehnika je privukla mnogo pažnje zbog: bezbednosti, selektivnosti, pogodnosti za aumotatizaciju, usklađenosti sa okolinom, male cene rada i nabavke i mogućnosti prečišćavanja raznih vrsta otpadnih voda [6].

Karakteristike elektrokoagulacionog procesa su: jednostavna oprema i laka upotreba, kratak period zadržavanja reakcije, smanjena ili zanemarljiva oprema za dodavanje hemikalija, i smanjena količina taloga na dnu [7].

Elektrohemijski tretman otpadne vode prvi put je predložen 1887. godine u Engleskoj. Prvo postrojenje za obradu vode elektrokoagulacionim tretmanom je izgrađeno u Londonu 1989. godine. Iste godine je izgrađeno i postrojenje za obradu kanalske vode u Salfordu, koje je radilo na istom principu. Postrojenje koje je bilo u Londonu je funkcionisalo narednih 10 godina. U Americi je tek 1909. godine prijavljen prvi patent za prečišćavanje otpadnih voda pomoću elektrohemijskog tretmana sa aluminijumskim i gvozdanim elektrodama. Nakon dve godine je pušteno u funkciju i prvo postrojenje za tretman otpadnog mulja u SAD. Prva značajnija upotreba elektrohemijskog tretmana za obradu vode za piće je bila tek 1946. godine u SAD. Ovaj elektrokoagulacioni reaktor za prečišćavanje je koristio aluminijumske elektrode. U Engleskoj se deset godina kasnije dolazi do poboljšanja obrade rečne vode korišćenjem gvozdene elektrode sa konstrukcijom sličnom elektrokoagulacionim ćelijama. Ove upotrebe elektrokoagulacije su ukazale na veliku efikasnost ovog tretmana, koja se vidi u smanjenju obojenosti i nivoa zamućenosti vode pre i nakon tretmana. Ali zbog predviđenih inicijalnih troškova elektrokoagulacioni tretman nije šire prihvaćen. Tek su sedamdesetih godina prošlog veka počela detaljnija istraživanja elektrohemijskog procesa. Primećeno je da elektrohemijski proces stvara mnogo brže flokule nego drugi procesi i time ima veću efikasnost. Dalja istraživanja su ukazala na problem taloženja aluminijum-hidroksida ($\text{Al}(\text{OH})_3$) i gvožđe-hidroksida ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) u elektrokoagulacionim ćelijama kao i na probleme odlaganja istih. Krajem osamdesetih i početkom devedesetih godina prošlog veka vršena su uporedna istraživanja koja ukazuju na to da se elektrokoagulacija može koristiti u prečišćavanju širokog spektra industrijskih otpadnih voda. Osamdesetih godina je takođe istraživano i prečišćavanje vode za piće ovim tretmanom. U isto vreme istraživači su nedvosmisleno predložili upotrebu metode u sistemima za tretman vode za piće manjih ruralnih naselja. Devedesetih godina istraživanja efikasnosti elektrokoagulacionog

procesa su nastavljena, u smislu tretmana komunalnih otpadnih voda [8].

Elektrokoagulacijom se iz otpadne vode uklanjaju: čvrste materije, rastvoreni metali, tanin i razne boje [7]. Literaturni podaci pokazuju da elektrokoagulacija nije upotrebljena za prečišćavanje otpadnih tokova nastalih u procesima proizvodnje grafičke industrije. Ograničene su i informacije o kombinovanoj upotrebi elektroda od aluminijuma (Al) i gvožđa (Fe) u istoj elektrokoagulacionoj ćeliji [9].

Elektrokoagulacioni tretman otpadne vode predstavlja elektrohemijski proces koji se odvija uz stvaranje koagulanata „in situ“ elektrolitičkim rastvaranjem Al ili Fe elektroda. Tokom procesa elektrokoagulacije na katodi dolazi do izdvajanja vodonika koji izlazi iz sistema i čestica koje se sa koagulantima izdvajaju na površini vode. Koagulacija je pojava kada koloidne čestice dispergovane ili rastvorene u vodi gube svoju stabilnost i počinju da se sjedinjuju formirajući agregate više čestica. Kada ovi agregati dostignu određenu veličinu, podležu dejstvu sile teže i počinju da se izdvajaju iz disperzne faze. Flokulacija je proces kada se destabilisane čestice ili čestice nastale koagulacijom međusobno povezuju i pri tome obrazuju veće anglomerate.

U procesu štampe stvaraju se otpadni tokovi koji mogu u manjoj ili većoj meri da zagađuju pojedine medijume životne sredine ukoliko se direktno u njih ispuštaju. Osim organskih polutanata, teški metali kao neorganski polutanti mogu predstavljati ozbiljan problem. Ukoliko su teški metali prisutni u povećanim koncentracijama u odnosno na maksimalno dozvoljene oni nikako ne bi smeli da se emituju u gradsku kanalizaciju gde veoma često završe. Prisustvo teških metala u prirodi ima negativan uticaj na zdravlje ljudi i stanje životne sredine. Njihovo stanje, forma, pokretljivost, adsorpcija, mobilnost i biodostupnost zavise od fizičko-hemijskih uslova sredine u kojoj se nalaze, kao i od prirode prisutnih hemijskih vrsta u toj sredini, sa kojima mogu da interaguju. Uklanjanje ili reciklaža jedini su načini da se spreči ispuštanje teških metala u okolinu.

Cilj rada je određivanje efikasnosti uklanjanja bakra iz otpadnog sredstva za vlaženje primenom elektrokoagulacionog tretmana sa četiri različite kombinacije Al i Fe elektroda pri određenim operativnim uslovima.

2. EKSPERIMENTALNI DEO

Stacionarni elektrokoagulacioni reaktor je staklena čaša (zapremine 250 ml) sa 220 ml otpadnog sredstva za vlaženje u koji su vertikalno uronjene

4 elektrode na rastojanju od 1 cm. Sprovedena su četiri elektrokoagulaciona tretmana, svaki sa različitom kombinacijom elektroda: (1) četiri Fe elektrode (Fe(-)/Fe(+)), (2) četiri Al elektrode (Al(-)/Al(+)), (3) dve Al (jedna anoda) i dva Fe elektrode (Al(-)/Fe(+)) i (4) dve Fe (jedna anoda) i dve Al elektrode (Fe(-)/Al(+)).

Samo spoljne elektrode su povezane sa DC izvorom struje (DF 1730LCD) sa konstantnom gustinom struje (i) od 8 mA/cm². Ujednačeno mešanje otpadnog sredstva za vlaženje postignuto je upotrebom magnetne mešalice (IKA color squid). Uzorci (15 ml) za analizu sadržaja bakra sakupljeni su u određenim vremenskim intervalima (1, 5, 10, 20, 40, 60 minuta) elektrokoagulacionog procesa.

Koncentracije bakra u uzorcima posle elektrokoagulacionog tretmana određene su primenom atomskog apsorpcionog spektrometra (PerkinElmer, AAnalyst 700) plamena tehnika u skladu sa USEPA 7000b metodom [10].

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Efikasnost uklanjanja bakra iz otpadnog sredstva za vlaženje tokom elektrokoagulacionog tretmana zavisi od vrste i kombinacije elektroda i vremena tretmana. Efikasnost kombinacija elektroda opada u nizu: Fe(-)/Fe(+) > Fe(-)/Al(+) > Al(-)/Fe(+) > Al(-)/Al(+) (tabela 1). Takođe, sa porastom vremena elektrokoagulacionog tretmana raste i efikasnost uklanjanja bakra. Najveća efikasnost (99,2%) je postignuta sa Fe(-)/Fe(+) kombinacijom elektroda nakon 60 minuta.

Za Fe(-)/Fe(+), Fe(-)/Al(+) i Al(-)/Fe(+) kombinacije elektroda efikasnost uklanjanja (> 90%) bakra se postiže posle 20, 40 i 60 minuta, respektivno. Za Al(-)/Al(+) kombinaciju elektroda efikasnost uklanjanja bakra je manja od 90% i posle 60 minuta. Kombinacije Fe elektroda su efikasnije u elektrokoagulacionom uklanjanju bakra iz otpadnog sredstva za vlaženje u odnosu na Al kombinacije elektroda.

S obzirom da bakar nije detektovan u polaznom sredstvu za vlaženje dobijeni rezultati ukazuju da bakar migrira iz grafičke boje u sredstvo za vlaženje tokom procesa ofset štampe. Dakle, upotreba grafičkih boja sa pigmentima na bazi metala mora biti strogo regulisana.

Na efikasnost elektrokoagulacionog procesa utiču: gustina struje, vrsta materijala elektroda, rastojanja između elektroda, dizajn elektroda, inicijalne pH vrednosti rastvora, temperatura, protok efluenta, pasivizacija elektroda i potporni elektrolit. Gustina struje koja se primenjuje pri procesu elektrokoagulacije direktno utiče na količinu jona Al³⁺ ili Fe²⁺ koja se rastvori na

odgovarajućim elektrodama u reaktoru. Ono na šta gustina takođe utiče je i veličina elektrokoagulacionog uređaja. Primena veće gustine struje omogućava manje dimenzije uređaja. Negativna strana veće gustine struje je u tome što dolazi do povećanja gubitka električne energije i do zagrevanja samog vodenog rastvora koji se prečišćava. Na izbor gustine struje utiču i dodatni parametri kao što su pH vrednost, temperatura i brzina protoka polutanata vode koja prolazi kroz sistem [8].

U svakom elektrokoagulacionom procesu izbor materijala elektrode predstavlja veoma važan faktor koji utiče na finalni rezultat procesa. Takođe, i rastojanje između elektroda u elektrokoagulacionom reaktoru ima direktan uticaj na efikasnost reaktora u uklanjanju polutanata iz rastvora. Promena rastojanja između elektroda utiče na protok struje u rastvoru i na stvaranje koagulanata. Pored materijala i sam dizajn elektroda elektrokoagulacionog reaktora ima uticaj na: efikasnost procesa, odnosno stvaranje koagulantata u rastvoru, i dimenzije mehura [7].

Tabela 1. Efikasnost uklanjanja bakra tokom elektrokoagulacionog tretmana otpadnog sredstva za vlaženje ($r = 1$ cm, $i = 8$ mA/cm²)

Kombinacija elektroda	Fe(-)/Fe(+)	Fe(-)/Al(+)	Al(-)/Fe(+)	Al(-)/Al(+)
Vreme tretmana (min)	Efikasnost uklanjanja bakra (%)			
1	41,5	34,6	28,5	19,2
5	44,7	35,7	32,3	27,3
10	58,7	51,1	43,4	33,3
20	90,4	73,7	58,8	48,1
40	97,7	92,7	85,2	67,5
60	99,2	96,0	94,2	83,3

Istraživači su utvrdili da inicijalna pH vrednost otpadne vode ili sirove vode namenjene za piće koja se elektrokoagulaciono tretira postaje izuzetno važan faktor koji definiše efikasnost elektro-koagulacionog procesa [4,6]. Hemijska priroda polutanta koji se elektrokoagulacionim tretmanom namerava odstraniti iz rastvora definiše opseg pH vrednosti koji je optimalan i u okviru kojeg se postiže puna efikasnost uklanjanja određenog polutanta iz rastvora.

Poznato je da se smanjenjem provodljivosti tretiranog rastvora u elektrokoagulacionom reaktoru dovodi do porasta temperature rastvora vremenom. Uticaj temperature na elektro-

koagulaciju nije dovoljno istraživano. U nekim istraživanjima je ukazano da povećanje temperature do 60°C ima pozitivan uticaj na efikasnost elektrokoagulacionog tretmana. Dalje povećanje temperature rastvora dovodi do smanjenja iskorišćenosti struje i ne preporučuje se [8].

Pasivizacija elektroda u elektrokoagulacionom reaktor redukuje stepen efikasnosti samog procesa i nakon određenog vremena potpuno zaustavlja tretman. Kao rezultat pasivizacije na površini elektrode se formira sloj metalnih oksida i/ili soli koji sprečava električno rastvaranje elektroda i na taj način limitira koncentraciju koagulanata u efluentu. Tokom vremena pasivizirajući sloj postaje deblji i smanjuje stepen efikasnosti procesa. Pasivizirajući sloj ima sledeće karakteristike: izuzetno je tanak, teorijski monomolekularan, neporozan je, ekstremno fiksiran za površinu katode, uglavnom oksidne prirode, osetljiv na određene rastvore [6,8]. Mehanizam kojim se adsorbuje pasivizirajući sloj na elektrodama do sada nije potpuno razjašnjen. Prihvaćeno je da je u pitanju određeni vid hemijske ili fizičke adsorpcije.

Prisustvo jona hlora u rastvoru koji se elektrokoagulaciono tretira utiče na povećanje efikasnosti uklanjanja polutanata. U svojim istraživanjima Yildiz i sar. [11], analizirali su procese i uticaj tri različita potporna elektrolita Na_2SO_4 , NaNO_3 i NaCl na efikasnost elektrokoagulacionog procesa uklanjanja organskih materija iz rastvora. Uočeno je da se dodavanjem NaCl , kao potpunog elektrolita, postiže najviša efikasnost uklanjanja polutanata za najkraći vremenski period. Navedeno ima direktan pozitivan uticaj na smanjenje potrošnje energije neophodne u procesu.

4. ZAKLJUČAK

Rezultati ukazuju na mogućnost primene elektrokoagulacionog tretmana za uklanjanje bakra iz otpadnog sredstva za vlaženje. Na osnovu dobijenih relevantnih rezultata uočava se da je elektrokoagulacija veoma obećavajuća tehnologija za uklanjanje materija i iz drugih efluenata grafičke industrije. Neophodna su dalja istraživanja u smislu proširenja parametara koji utiču na proces elektrokoagulacije kao i njihova optimizacija.

5. LITERATURA

- [1] Novaković, D.: *Grafički procesi*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2008.
- [2] Kiphan, H., *Handbook of Print Media – Technologies and Production Methods*, Springer, Berlin, 2001.

- [3] Tag C.-M., Pykonen M., Rosenholm J.B., Backfolk K.: *Wettability of model fountain solutions: The influence on topo-chemical and -physical properties of offset paper*, Journal of Colloid and Interface Science, 330, p.p. 428-436, 2009.
- [4] Akbal, F., Camcı, S.: *Comparison of electrocoagulation and chemical coagulation for heavy metal removal*, Chemical Engineering and Technology, 33, p.p. 1655-1664, 2010.
- [5] Can, O.T., Bayramoglu, M.: *The effect of process conditions on the treatment of benzoquinone solution by electrocoagulation*, Journal of Hazardous Materials, 173, p.p. 731-736, 2010.
- [6] Escobar, C., Soto-Salazar, C., Tiral, M.I.: *Optimization of the electrocoagulation process for the removal of copper, lead and cadmium in natural waters and simulated wastewater*, Journal of Environmental Management, 81, p.p. 384-391, 2006.
- [7] Merzouk, B., Gourich, B., Sekki, A., Madani, K., Chibane, M.: *Removal turbidity and separation of heavy metals using electrocoagulation-electroflotation technique: a case study*, Journal of Hazardous Materials, 164, p.p. 215-222, 2009.
- [8] Mohora, E.: *Mogućnost primene i efikasnost elektrokoagulacione tehnike u preradi podzemne vode sa visokim sadržajem prirodnih organskih materija*, Doktorska disertacija, PMF, Novi Sad, 2012.
- [9] Linares-Hernandez I., Barrera-Diaz C., Roa-Morales G., Bilyeu B., Urena-Núñez F.: *Influence of the anodic material on electrocoagulation performance*, Chemical Engineering Journal, 148, p.p. 97-105, 2009.
- [10] USEPA 7000B, *Flame Atomic Absorption Spectrophotometry*, 2007.
- [11] Yildiz, Y.S., Koparal, A.S., Irdemez, S., Keskinler, B.: *Electrocoagulation of synthetically prepared waters containing high concentration of NOM using iron cast electrodes*, Journal of Hazardous Materials, B139, p.p. 373-380, 2007.

Autori: Asistent Mr Savka Adamović, Van. Prof. Dr. Miljana Prica, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za Grafičko inženjerstvo i dizajn, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Tel: +381 21 485 2634.

E-mail: adamovicsavka@uns.ac.rs

Miroslavljević, Z., Štrbac, D., Štrbac, G., Stanisavljević, N.

OTPADNA STAKLENA AMBALAŽA U JUŽNOBAČKOM REGIONU – KOLIČINE I
MOGUĆNOST ISKORIŠĆENJA

Rezime: Trend savremenog upravljanja otpadom zasnovan je na smanjivanju količina otpada koji se odlaze na deponije upotrebom različitih tehnologija reciklaže. Komunalna deponija u Novom Sadu najveća je deponija u Vojvodini, sa stalnim problemom prostora za deponovanje. Istraživanja pokazuju da se na deponiju u Novom Sadu godišnje deponuje preko 6000 tona staklene ambalaže. U okviru rada biće predstavljene potencijalne buduće količine otpadne staklene ambalaže za Južnobački region i ispitivanje mogućnosti njenog iskorišćenja kao ulazne sirovine za proizvodnju građevinskog bloka odnosno opeke.

Ključne reči: otpadna staklena ambalaža, deponija, građevinski blok

1. UVOD

Upravljanje komunalnim otpadom na teritoriji AP Vojvodine identifikovano je kao veliki ekološki i sanitarno higijenski problem, s obzirom na to da se količina komunalnog i industrijskog otpada stalno uvećava a njegovo odlaganje vrši neadekvatno. Prema Strategiji upravljanja otpadom u Republici Srbiji usvojenoj 2010. i Zakonu o upravljanju otpadom usvojenom 2009. godine kao najoptimalnije rešenje za odlaganje otpada predloženo je bilo da se formiraju regionalne sanitarne deponije koje bi obuhvatile region sa najmanje 200.000 stanovnika. Udruživanjem opština radi zajedničkog upravljanja otpadom uspostaviće se sistem regionalnih centara za upravljanje otpadom koji obuhvataju sakupljanje otpada, regionalnu deponiju za najmanje 20 godina, postrojenje za separaciju reciklabilnog otpada pored deponije, gde će se vršiti separacija papira, stakla, plastike, aluminijuma i dr. U tom smislu je Grad Novi Sad sa opštinama Bačka Palanka, Bački Petrovac, Beočin, Žabalj, Srbobran, Temerin i Vrbas oformio tzv. Južnobački region koji ima za cilj uspostavljanje regionalnog sistema upravljanja otpadom. Sa ukupno 510.522 stanovnika zadovoljen je prvi i osnovni uslov za formiranje jednog takvog Regiona za upravljanje komunalnim otpadom [1].

Iz tog razloga u okviru rada će se razmatrati količine staklene ambalaže za Grad Novi Sad zajedno sa opštinama Bačka Palanka, Bački Petrovac, Beočin, Žabalj, Srbobran, Temerin i Vrbas (Sl. 1.).



Sl. 1. Opštine koje čine Južnobački region

Prema Prostornom planu Republike Srbije ("Sl. Glasnik RS", br.88/10) osnovni cilj u oblasti upravljanja otpadom je "razvijanje održivog sistema upravljanja otpadom u cilju smanjenja zagađenja životne sredine i degradacije prostora". U novom, integrisanom industrijskom sistemu, potrošnja energije i sirovina mora biti optimizirana, a nastajanje otpada svedeno na minimum. U ovakvim sistemima otpad iz jednog proizvodnog procesa koristi se kao sirovina u drugom procesu. Reciklaža i ponovna upotreba otpadnog materijala ima značajan ekonomski i ekološki značaj. Materijal koji je idealan primer za to je upravo staklo odnosno staklena ambalaža.

Spram svojih karakteristika, staklo odloženo na deponiju nikada se neće razgraditi, i kao takvo, stvara veliki problem na deponijama iz razloga što se njegova količina povećava, ukoliko se ne preduzimaju prethodno određeni koraci sanacije ove vrste otpada, kao što su ponovna upotreba, reciklaža staklene ambalaže sa ciljem dobijanja istog ili novog proizvoda itd.

U okviru rada, biće razmatrane potencijalne količine otpadne staklene ambalaže na teritoriji Grada Novog Sada zajedno sa opštinama Bačka

Palanka, Bački Petrovac, Beočin, Žabalj, Srbobran, Temerin i Vrbas i mogućnost dobijanja staklenog praha iz utvrđene raspoložive količine sa ciljem njegove upotrebe kao ulazna sirovina za proizvodnju građevinskog bloka/opeke.

2. PREGLED RASPOLOŽIVE KOLIČINE OTPADNE STAKLENE AMBALAŽE ZA JUŽNOBAČKI REGION

Regionalnim planom za Grad Novi Sad i opštine Bačka Palanka, Bački Petrovac, Beočin, Žabalj, Srbobran, Temerin i Vrbas i lokalnim planovima upravljanja otpadom za opštine regiona definisano je upravljanje otpadom u skladu sa Strategijom upravljanja otpadom. Potencijalne okvirne lokacije regionalnog centra za upravljanje otpadom, kriterijumi i smernice za njegovu izgradnju definisane su prostornim planom

Republike Srbije. Prema Prostornom planu Republike Srbije, na teritoriji Vojvodine planirane su bile izgradnje 3 regionalna centra za upravljanje otpadom u oblasti Bačke, 5 regionalnih centara u Banatu i 2 regionalna centra za upravljanje otpadom u Sremu. Konkretno, regionalnom centru za upravljanje otpadom u Novom Sadu, kao što je ranije pomenuto, gravitiraju sledeće opštine: Novi Sad, Bačka Palanka, Bački Petrovac, Beočin, Žabalj, Srbobran, Temerin i Vrbas.

U skladu sa rezultatima projekta [2] kao i prema podacima Strategije upravljanja otpadom [3] u Tabeli 1. dat je prikaz količina komunalnog otpada koji se generiše u opštinama Južnobačkog regiona i udeli staklene ambalaže u njemu, kao i ukupna godišnja produkcija staklene ambalaže.

Region	Br. stanovnika	Komunalni otpad kg/st./dn.	Komunalni otpad t/god.	Staklena ambalaža %	Staklena ambalaža t/god.
Novi Sad	299294	1,16	126.628	5,07	6420
Bačka Palanka	60966	1,15	25.590	2,78	711
Bački Petrovac	14681	0,58	3.108	5,99	186
Beočin	16086	1,15	6.752	5,07	342
Žabalj	27513	0,58	5.825	5,99	349
Srbobran	17855	0,58	3.780	5,99	226
Temerin	28275	0,60	6.192	4,13	256
Vrbas	45852	0,67	11.213	4,13	463
UKUPNO	510522	1,01	189.089	4,89	8953

Tabela 1. Količine generisanog komunalnog i staklenog otpada u opštinama Južnobačkog regiona

Kao što se može videti u Tabeli 1., trenutno se na deponiji u Novom Sadu godišnje deponuje preko 6000 tona staklene ambalaže, a uključivanjem novih opština članica Južnobačkog regiona sa centrom u Novom Sadu, količina staklene ambalaže koja bi se deponovala na deponiju u Novom Sadu iznosila bi minimum 9 000 t godišnje, čineći je veoma značajnim resursom za proizvodnju istog ili novog proizvoda.

3. OTPADNA STAKLENA AMBALAŽA KAO ULAZNA SIROVINA ZA PROIZVODNJU GRAĐEVINSKOG BLOKA/OPEKE

Znatne uštede u potrošnji energije i sirovina mogu se postići reciklažom staklene ambalaže, međutim veliki je problem sortirati staklenu ambalažu prema boji, zbog različitih temperatura topljenja stakla u zavisnosti od toga koje je boje, pa to dodatno poskupljuje proces, i na kraju

najveći deo takve otpadne staklene ambalaže završi na deponiji.

Upotreba otpadne staklene ambalaže u proizvodnji npr. građevinskog bloka/opeke, pokazala se vrlo značajnom, iz razloga što se na taj način smanjuje potrošnja prirodnih resursa i troškovi odlaganja otpada, a u isto vreme se štiti životna sredina od potencijalnih štetnih uticaja određenih supstanci.

Zbog sadržaja Na₂O i nekristalne strukture, staklena ambalaža pokazala se kao dobar aditiv za proizvodnju građevinske opeke, smanjujući potrebne temperature za sinterovanje opeke. Pored toga, dodatno prisustvo staklaste faze u građevinskoj opeki doprinelo je i poboljšanju strukture same opeke u smislu njene trajnosti. U radovima [4], [5] objašnjen je postupak iskorišćenja staklene ambalaže kao sekundarne sirovine za dobijanje novog proizvoda – građevinskog bloka/opeke.

4. POSTUPAK DOBIJANJA GRAĐEVINSKOG BLOKA/OPEKE SA UDELOM STAKLENOG PRAHA

Kao prvi korak u proizvodnji građevinskog bloka/opeke sa udelom staklenog reciklata, jeste dobijanje staklenog praha čije dimenzije čestica moraju zadovoljavati uslov propisanih radi mogućnosti mešanja praha sa glinom.

Mlevenje staklene ambalaže u cilju dobijanja staklenog praha kao ulazne sirovine za dobijanje građevinskog bloka/opeke vršeno je poluindustrijskim mlinom. Izbor optimalnog režima mlevenja detaljno je opisan u radu [6]. Ukratko, dobijen je stakleni prah ujednačene veličine čestica, uz male gubitke u procesu mlevenja i granulometrijske separacije (Sl. 2.). Najveći procenat dobijenih čestica je veličine ispod 0,71 mikrona, što je pogodna veličina za proizvodnju opeke[6].



Sl. 2. Stakleni prah dobijen mlevenjem otpadne staklene ambalaže

Tako pripremljen stakleni prah se zatim meša sa glinom do dobijanja homogene sirovine, nakon čega se vrši ekstrudiranje bloka/opeke (Sl.3.), njihovo sušenje i pečenje. Uzorci se suše po 24 časa, na temperaturama od 50°C, 70°C i 105°C, sukcesivno i zatim se peku na temperaturi od 880°C [6].

Uzimajući u obzir podatke o potencijalnoj količini staklene ambalaže produkovane na teritoriji Južnobačkog regiona (Tabela 1.) i gubitke pri mlevenju iste u cilju dobijanja staklenog praha [6], izračunata je količina staklenog praha koju je moguće dobiti mlevenjem na način koji je opisan u prethodnom poglavlju. Ukoliko se uzme da će količina otpadne staklene ambalaže Južnobačkog regiona biti oko 9000 tona godišnje, a s obzirom da se utvrdilo da su gubici pri mlevenju manji od 2%, dobijamo podatak da bismo mogli da raspoložemo sa oko 8800 tona staklenog praha godišnje.



Sl.3. Ekstrudiranje i sušenje uzoraka

Kolika bi bila upotreba staklenog praha u proizvodnji građevinskog bloka/opeke, zavisi od procentualnog udela staklenog praha koji bi se mešao sa glinom. U radu [4] dobre karakteristike pokazale su opeke sa udelima od 2, 5%, 5% i 10% staklenog praha.

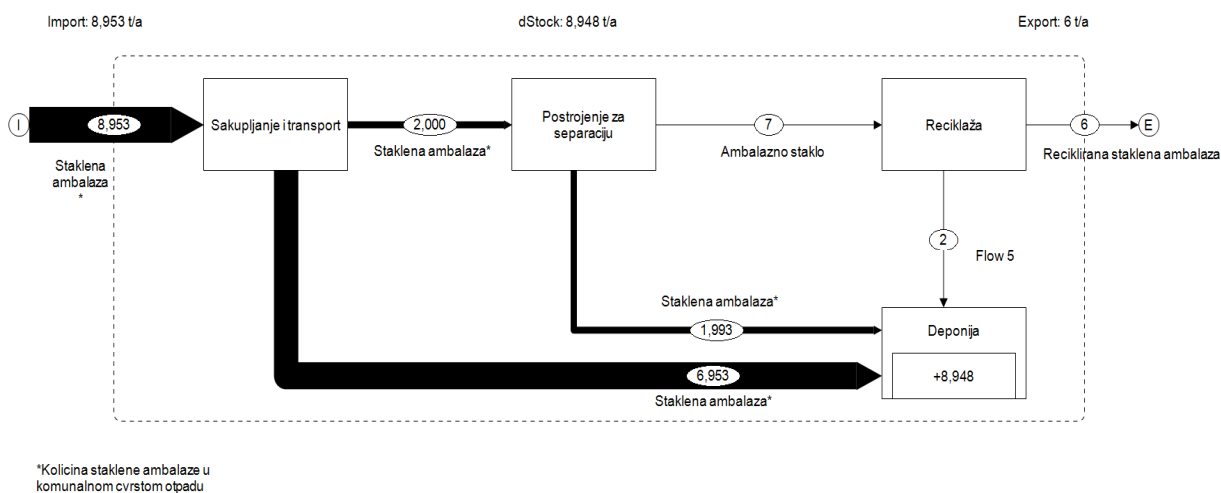
5. ZAKLJUČAK

U radu su prikazane količine otpadne staklene ambalaže koja se sakupi na deponiji u Novom Sadu, kao centrom Južnobačkog regiona. Na Sl. 4 dat je trenutni sistem sakupljanja i tretiranja staklene ambalaže deponovane zajedno sa komunalnim otpadom. U godišnjoj količini od

189089 tona komunalnog otpada, 8953 tona čini otpadna staklena ambalaza, od koje većina, blizu 7000 tona ide direktno na deponiju, a svega 2000 tona ide na separaciju od čega se samo 7 tona dalje na reciklažu a ostatak od 1993 tone takođe ide na deponiju [7].

Prikazano sakupljanje i određivanje

raspoloživih količina staklene ambalaze, ukazuju na ispitivanje drugih mogućnosti njene upotrebe u cilju što boljeg iskorišćenja. Umesto odlaganja na deponiju u Novom Sadu staklena ambalaza bi mogla biti iskorišćena kao jedna od sirovina za dobijanje građevinskog bloka/opeke.



Sl. 4. Sakupljanje i sortiranje staklene ambalaze - Južnobački region

Iskustva evropskih zemalja u tendencijama što većeg ponovnog iskorišćenja staklene ambalaze, količina otpadne staklene ambalaze raspoloživa u Južnobačkom regionu, prethodna istraživanja sličnih proizvoda sa staklenim reciklatom i relativno jednostavna predviđena tehnologija proizvodnje novog proizvoda, čine ostvarivanje prikazanih rezultata efikasno primenljivim.

6. REFERENCE

- [1] *Reginalni plan upravljanja otpadom za grad Novi Sad i opštine Bačka Palanka, Bački Petrovac, beočin, Žabalj, Srbobran, Temerin i Vrbas*, 2011.
- [2] *Utvrđivanje količine i morfološkog sastava otpada u Republici Srbiji*, projekat, Departman za inženjerstvo zaštite životne sredine, Fakulteta tehničkih nauka, Novi Sad, 2008.
- [3] *Strategija upravljanja otpadom za period 2010-2019. godine*, Vlada Republike Srbije, Ministarstvo energetike, razvoja i zaštite životne sredine, Republika Srbija, (Član 10. stav 2. Zakona o upravljanju otpadom „Službeni glasnik RS”, broj 36/09 i član 45. stav 1. Zakona o Vladi „Službeni glasnik RS”, br. 55/05, 71/05 – ispravka, 101/07 i 65/08).
- [4] Demir, I.: *Reuse of waste glass in building brick production*, Waste Management & Research, 27, 572-577, 2009.

- [5] Chidiac, S., Federico, L.: *Effects of waste glass additions on the properties and durability of fired clay brick*, Canadian Journal of Civil Engineering, 34, 458-1466, 2007.
- [6] Štrbac, D., Štrbac, G., Miroslavljević, Z., Ivetić, T., Đaćanin, Lj., Skuban, F.: *Korišćenje otpadne staklene ambalaze kao sekundarne sirovine za dobijanje građevinskog bloka*, X Međunarodno savetovanje „Rizik i bezbednosni inženjering - Kopaonik 2015.“
- [7] Stanisavljević, N.: *Modelovanje sistema za upravljanje otpadom primenom analize tokova materijala*, doktorska disertacija, 2013.

Autori: Zorica Miroslavljević, M.Sc., Doc. dr Dragana Štrbac, Doc. dr Goran Štrbac, Doc. dr Nemanja Stanisavljević, Univerzitet Novi Sad, Fakultet Tehničkih Nauka, Departman za inženjerstvo zaštite životne sredine i zaštite na radu, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Tel: +381 21 485 2386.

E-mail: zoricavojnovic@uns.ac.rs
draganastrbac@uns.ac.rs
grstrbac@uns.ac.rs
nemanjastanisavljevic@uns.ac.rs

Gluckov, Z., Agarski, B., Košut, Z., Hodolič, J., Imamović, N., Milijić, V.

VREDNOVANJE PELETA OD POLJOPRIVREDNE I DRVNE BIOMASE VIŠEKRITERIJUMSKOM ANALIZOM

Abstrakt: U savremenim uslovima življenja, kada se akcenat stavlja na očuvanje životne sredine i održivi razvoj, goriva proizvedena iz biomase sve više dobijaju na značaju. Stoga, neophodno je razmatrati kvalitet krajnjeg proizvoda dobijenog od biomase sa aspekta uticaja na životnu sredinu. U ovom radu su na osnovu postojećih evropskih standarda i laboratorijskih metoda prikazani rezultati ispitivanja i višekriterijumskog vrednovanja četiri vrste peleta od biomase nakon presovanja i hlađenja sabijenog materijala. Višekriterijumskim vrednovanjem otkriveno je da su peleti od sojine slame i mešavine različitih vrsta biomase pokazali najbolje sa aspekta zaštite životne sredine.

Ključne reči: peleti od biomase, višekriterijumska analiza, metode za određivanje kvaliteta, životna sredina

1. UVOD

Pokazatelji kvaliteta peleta mogu da se podele na biološke, hemijsko - termičke i fizičko - mehaničke osobine. Biološki pokazatelji određeni su vrstom, strukturom, anatomskom građom i usitnjenošću biomase (veličinom čestice) [1]. Fizičko-mehanički pokazatelji pokazuju geometrijske parametre peleta, gustinu peleta, abraziju i otpornost na pritisak. Hemijsko-termički pokazatelji određeni su sadržajem pojedinih hemijskih elemenata u peletima, sadržajem pepela, vlage i energetske vrednosti (toplotne moći) peleta [2]. Proizvođačima, snabdevačima i potrošačima čvrstih biogoriva u koje se svrstavaju i energetske pelete od biomase neophodno je omogućiti sistem sigurnosti kvaliteta biogoriva da bi došlo do sigurnijeg poslovanja.

Cilj ovog rada jeste da se na osnovu evropskih standarda i laboratorijskih metoda vrednuju energetske peleti od biomase primenom višekriterijumske analize (VKA) sa aspekta zaštite životne sredine.

2. MATERIJALI I METODE

Razmatrani peleti napravljeni su od poljoprivredne i drvne biomase sa područja Vojvodine u Srbiji. Korišćeni materijali u VKA su peleti od biomase različitog porekla sirovine. Sirovina u proizvodnom procesu za dobijanje konačnog proizvoda (peleta) je: pšenična slama, sojina slama, mešavina 1 (bukva 50%, čamovina 30 % i sojina slama 20%) mešavina 2 (bukva 30%, čamovina 50 % i sojina slama 20%).

Parametri za vrednovanje peleta od biomase su: sadržaj vlage, sadržaj pepela, toplotna moć,

nasipna masa, otiranje, fine čestice (manje od 3,15 mm). Vrednosti parametara dobijene su prema sledećim metodama:

- *Metoda za određivanje sadržaja vlage u energetskim peletima* – Sadržaj vlage u peletima od biomase je gubitak mase koji usitnjena masa peleta izgubi za dva sata u procesu sušenja na 105 °C. Određivanje sadržaja vlage u peletima je urađeno prema standardu SRPS E. B8. 012.
- *Metoda za određivanje toplotne moći energetskih peleta* – Toplotna moć peleta određuje se kalorimetarski prema standardu CEN/TS 14918.
- *Metoda za određivanje sadržaja pepela u energetskim peletima* – Sadržaj pepela uzorka je masa energetskog peleta koja ostaje posle potpunog spaljivanja uzorka na temperaturi od 575 ± 25 °C, izražena kao procenat, prema standardu SRPS H.N8.136.
- *Metoda za određivanje otiranja energetskih peleta* – Otpornost energetskih peleta na otiranje (habanje) određuje se u rotacionom bubnju prema ASAE standardu 269.2.
- *Metoda za određivanje finih čestica u energetskim peletima* – Fine čestice u energetskim peletima (uzorcima) su čestice (nečistoće) manje od 3,15 mm, kao i prašina u uzorku [3].
- *Metoda za određivanje nasipne mase energetskih peleta* – Nasipna masa je parametar koji se lako određuje i predstavlja odnos mase i ukupne zapremine, prema [4] i [5].

SAW (engl. Simple Additive Weights) i PROMETHEE II (engl. Preference Ranking

Organization METHod for Enrichment Evaluation) metode su primenjene za višekriterijumsko vrednovanje peleta od biomase.

Metoda aditivnih težinskih faktora (SAW) [6] jeste jednostavna metoda koja najčešće daje slične rezultate kao i tzv. naprednije metode. Nakon određivanja težinskih faktora kriterijuma w_j primenom jednačine 1 za svaku alternativu izračunava se ukupna vrednost-korist alternative S_i , gde je najbolja alternativa sa najvećom vrednošću S_i .

$$S_i = \sum_{j=1}^m w_j b_{ij}, \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, n; \quad \sum_{j=1}^m w_j = 1; \quad 0 \leq w_j \leq 1;$$

Normalizovane vrednosti matrice performanse b_{ij} dobijaju preko jednačina 2 i 3.

$$b_{ij} = \frac{a_{ij} - a_j^-}{a_j^* - a_j^-}, \text{ za "max" tip kriterijuma, } (2)$$

$$b_{ij} = 1 - \frac{a_{ij} - a_j^-}{a_j^* - a_j^-}, \text{ za "min" tip kriterijuma, } (3)$$

gde je: S_i – rejting alternative (rang alternative), w_j – težinski faktor kriterijuma, x_{ij} – elemenat normalizovane matrice performansi, a_{ij} – elemenat matrice performansi, a^* - idealno rešenje (maksimalna vrednost) j -kriterijuma, a^- - anti-idealno rešenje (minimalna vrednost), j -kriterijuma; n – broj alternativa, m – broj kriterijuma.

PROMETHEE I metoda daje parcijalni poredak (rangiranje) alternativa, dok PROMETHEE II daje konačan poredak alternativa [7, 8]. Karakteristika metode PROMETHEE jeste da za svaki kriterijum donosilac odluke određuje jednu od mogućih šest predefinisanih funkcija preferencije [7, 8]. PROMETHEE II se izračunava u sledećih pet koraka:

1. određivanje devijacija prema parcijalno-parnim poređenjima,

$$d_j(a, b) = g_j(a) - g_j(b) \quad (4)$$

gde $d_j(a, b)$ označava razliku u vrednovanju alternative a u odnosu na alternativu b po svakom kriterijumu.

2. primena funkcija preferencije,

$$P_j(a, b) = F_j[d_j(a, b)]; \quad j = 1, 2, \dots, m; \quad (5)$$

gde $P_j(a, b)$ označava preferenciju alternative a u odnosu na alternativu b po svakom kriterijumu, kao funkciju $d_j(a, b)$. Što je $P_j(a, b)$ bliže 1 to je veća preferencija alternative a u odnosu na alternativu b .

3. izračunavanje ukupnog indeksa preferencije,

$$\forall a, b \in A, \quad \pi(a, b) = \sum_{j=1}^m P_j(a, b)w_j \quad (6)$$

gde je $\pi_j(a, b)$, od a prema b (od 0 do 1), definisano otežanom sumom $P_j(a, b)$ za svaki j -kriterijum, a w_j je težinski faktor j -kriterijuma.

4. izračunavanje pozitivnih i negativnih tokova (PROMETHEE I delimično rangiranje),

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x) \quad (7)$$

$$\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a) \quad (8)$$

gde je $\phi^+(a)$ pozitivni tok, a $\phi^-(a)$ negativni tok za svaku alternativu.

5. izračunavanje neto toka (PROMETHEE II potpuno rangiranje).

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) \quad (9)$$

gde je $\phi(a)$ neto tok za svaku alternativu.

3. REZULTATI VREDNOVANJA

Matrica performansi za VKA sa vrednostima parametra za svaku razmatranu vrstu peleta od biomase data je tabelom 1.

Poredjenjem vrednosti uzraka peleta od biomase u tabeli 1 sa EN 14961-1 standardom nisu zabeležena odstupanja sadržaja vlage (prema standardu <15%), sadržaja pepela (prema standardu >10%), sadržaj finih čestica (prema standardu >5%), nasipne mase (prema standardu >550 kg/dm³). Toplotne vrednosti u standardu EN 14961-1 nisu definisane, ali predstavljaju minimalnu vrednost koju je neophodno navesti, kao neto kalorijsku vrednost prema EN 14918 standardu. Otiranje nije definisano EN 14961-1 standardom.

Poredjenjem vrednosti datih uzoraka iz tabele 1 sa ENplus standardom:

- sadržaj vlage prema standardu iznosi ≤10%, manja odstupanja se javljaju kod energetskih peleta od mešavine biomase 1 i 2 (čamovina,

- bukva, pšenična slama),
- sadržaj pepela prema standardu iznosi $\leq 3\%$, značajna odstupanja se javljaju kod poljoprivredne biomase (pšenične i sojine slame),
- toplotna moć prema standardu iznosi ≥ 16.0 MJ/kg, manja odstupanja se javljaju kod svih ispitivanih uzoraka,
- nasipna masa prema standardu iznosi ≥ 600 kg/dm³, manja odstupanja se javljaju kod mešavina biomase 1 i 2,
- sadržaj finih čestica prema standardu iznosi $\leq 1\%$, odstupanja se javljaju kod drvene biomase,
- otiranje nije definisano ENplus standardom.

	Vlaga [%]	Pepeo [%]	Kalorijska moć [MJ/kg]	Nasipna masa [kg/dm ³]	Otiranje [%]	Fine čestice [%]
Pšenična slama	7,78	8,63	14,70	0,734	0,19	0,05
Sojina slama	7,71	7,43	15,41	0,697	0,25	0,17
Mešavina biomase 1	8,85	2,39	15,57	0,554	0,55	0,22
Mešavina biomase 2	11,48	1,59	15,64	0,573	1,39	0,45

Tabela 1. Matrica performansi

Prilikom određivanja težinskih faktora (tabela 2) parametri koji ukazuju na opterećenje životne sredine smatrani su za najuticajnije. Imajući prethodno u obziru, najveća vrednost dodeljena je težinskom faktoru za sadržaj pepela (0,25) jer pepeo predstavlja otpad. Toplotna moć i sadržaj vlage su takođe veoma značajni parametri energetskih peleta, međutim u ovom vrednovanju su smatrani za manje značajne od sadržaja pepela jer je vrednovanje izvršeno sa aspekta zaštite

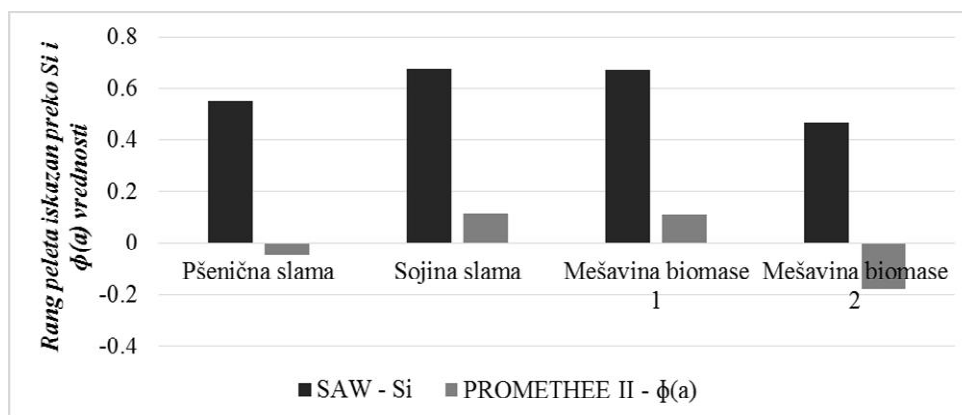
životne sredine.

Kod PROMETHEE metode za sve parametre uzet je „V-oblik“ funkcije preferencije sa odgovarajućim p-parametrima, s obzirom na to da „V-oblik“ dobro modelira kvantitativne kriterijume.

Rezultati VKA metodom SAW i metodom PROMETHEE prikazani su slikom 1.

	Vlaga [%]	Pepeo [%]	Toplotna moć [MJ/kg]	Nasipna masa [kg/dm ³]	Otiranje [%]	Fine čestice [%]
Tip parametra (SAW i PROMETHEE)	Min.	Min.	Max.	Max.	Min.	Min.
Težinski faktori (SAW i PROMETHEE)	0.20	0.25	0.20	0.15	0.10	0.10
p-parametar (PROMETHEE)	3,00	6,00	1,00	0,10	1,00	0,50
Tip funkcije preferencije (PROMETHEE)	V - oblik	V - oblik	V - oblik	V - oblik	V - oblik	V - oblik

Tabela 2. Tip parametra i težinski faktori parametara



Sl. 1 Rezultati vrednovanja peleta od biomase

4. ZAKLJUČAK

Neophodno je imati u vidu da se standardi zemalja EU odnose uglavnom na energetske pelete od drvene biomase. Sadržaj pepela energetskih peleta od poljoprivredne (ratarske) biomase zavisi od niza faktora: lokacije, agrotehničkih mera, građe materijala i sl. Neophodno je da se vodi računa pri samom prikupljanju biomase da se ne prikupljala zemlja, prašina i druge primese, što dovodi do povećanja pepela u energetskim peletama.

Posmatrajući rezultate VKA prikazane na slici 1, može se zaključiti da peleti napravljeni od sojine slame i mešavine biomase 1 imaju najbolji rang. Peleti sastavljeni od sojine slame i mešavine biomase 1 su najbolje alternative za aspekta uticaja na životnu sredinu. Takođe, može se primetiti da je rang peleta ostao nepromenjen za obe metode. Prema metodi SAW i prema metodi PROMETHEE peleti biomase su od najboljeg ka najlošijem rangirani kao: sojina slama, mešavina biomase 1, pšenična slama i mešavina biomase 2. Prilikom razmatranja dobijenih rezultata VKA neophodno je imati u vidu da je vrednovanje urađeno sa aspekta zaštite životne sredine i da bi rezultati mogli biti drugačiji ako bi se vrednovanje uradilo sa energetskog aspekta i drugačijim težinskim faktorima parametara. Jedan od mogućih pravaca budućih istraživanja je da se vrednovanje VKA izvrši sa dva aspekta: energetskog i uticaja na životnu sredinu kako bi se sagledale dve perspektive problema.

Zahvalnice:

Rezultati prikazani u ovom radu predstavljaju deo istraživanja na projektu "Development and improvement of technologies for energy-efficient use of multiple forms of agricultural and forest biomass in an environmentally acceptable manner, with the possibility of cogeneration" (Br. III-42011) podržanom od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Deo rezultata prikazanih u ovom radu dobijeni su u okviru realizacije CEEPUS (the Central European Exchange Program for University Studies) projekta "Teaching and Research of Environment-oriented Technologies in Manufacturing", CIII-RO-0013-09-1314.

5. LITERATURA

[1] Gluvakov, Z., Brkić, M., Janić, T. Metode za određivanje kvaliteta energetskih peleta od biomase, Međunarodna naučna konferencija,

Obnovljivi i raspoloživi izvori energije, Fruška gora, Andrevlje, 2012

- [2] Urbanovičová, O.: Hodnotenie technologických parametrov výroby tuhých biopalív na báze biomasy, Dizertačná práca, Nitra, 2011.
- [3] Gluvakov, Z. Methods of energy pellets from biomass. Master work, Faculty of Agriculture, Novi Sad, 2012.
- [4] Mohesenin, N. N. Structure, physical characteristics and mechanical properties plant and animal materials. Gordon and Breach Press, New York 1980.
- [5] Singh, K. K., Goswami, T. K. Physical properties of cumin seed. Journal of Agricultural Engineering Research. 1996
- [6] Triantaphyllou, E. (2000). Multi-Criteria Decision Making: A Comparative Study. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers (Springer). p. 320. ISBN 0-7923-6607-7.
- [7] Brans, J.P.. (1982). L'ingenierie de la decision. Elaboration d'instruments d'aide a la decision. Methode PROMETHEE. Laide a la Decision: Nature, Instrument s et Perspectives Davenir. Presses de Universite Laval, Quebec, Canada, str. 183–214.
- [8] J.P. Brans. B. Mareschal, The PROMETHEE methods for MCDM, the PROMCALC, GAIA and Bankadviser Software. Working Paper ST001224. Vrije Universiteit Brussel, 1989.

Autori: MSc Zorica Gluvakov¹⁾, Dr Boris Agarski²⁾, MSc Zlatko Košut³⁾, Prof. Dr Janko Hodolić²⁾, Dr Nusret Imamović⁴⁾, Vojislav Milijić, dipl. Ing⁵⁾

¹⁾ Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Trg Dositeja Obradovića 8, 21000 Novi Sad, Srbija,

²⁾ Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za proizvodno mašinstvo, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija, Telefon.: +381 21 485 2306, Fax: +381 21 454-495.

³⁾ Victoria Starch, 23000 Zrenjanin, Srbija,

⁴⁾ Univerzitet u Zenici, Mašinski Fakultet u Zenici, Fakultetska 1, 72000 Zenica, Tel: +387 (0)32 449 141.

⁵⁾ Foragrobio, 24000 Subotica, Srbija.

E-mail: zorica.gluvakov@live.com
agarski@uns.ac.rs
zlatko.kosut@victoriagroup.rs
hodolic@uns.ac.rs
nimamovic@mf.unze.ba
vojislav.milijic@foragrobio.rs

Ilić, M., Budak, I., Kosec, B., Vukelić, Dj., Nagode, A.

ISPITIVANJE ČESTICA METODOM ANALIZE SLIKE PREMA ISO 13322

Rezime: *Izbor bitnih karakteristika čestica za početak nekog analiziranja ili merenja često predstavlja problem. U praksi, čestice koje čine neki prah retko će imati sferni oblik. Poznavanje različitih veličina frakcija daje osnovu za razvoj kriterijuma na osnovu veličinom-selektivnih čestica. Sledi da je određivanje veličine i raspodele veličina čestica fundamentalna za njihovu karakterizaciju. Tehnike elektronske mikroskopije se široko koriste radi pružanja informacija o veličini, morfologiji na bazi analize slike, kao i elementarnom sastavu pojedinačnih čestica prikupljenih na površini filtera. S obzirom da metoda ispitivanja čestica zasnovana na analizi slike nije rutinska i često su prisutne nedoumice prilikom sprovođenja metode, ovaj rad se bazira na analizi standard ISO 13322:2014 Analiza veličine čestica – Metode analize slike.*

Ključne reči: *ISO 13322, analiza slike, SEM*

1. UVOD

Interes za merenjem raspodele veličina čestica potiče od činjenice da svojstva disperznih materijala zavise od veličine čestica i uniformnosti raspodele. Počev od naučnih istraživanja u oblastima kao što su npr. koloidna hemija i nanomaterijali, preko industrijskih istraživanja, kontrole i optimizacije proizvodnje lekova, sirovina, prehrambenih i drugih proizvoda, postoji potreba za brzom i tačnom on-line metodom za određivanje raspodele veličina čestica.

Prašina često predstavlja zagađivač sa najvećim uticajem na životnu sredinu u urbanim područjima. Nivo kontaminacije česticama koji se može tolerisati u svim sistemima je izuzetno nizak i mora biti praćeni. Obim i veličina čestica predstavlja faktor koliko dobro i koliko će dugo, kako mehanički, tako i ljudski sistem funkcionisati.

Čestice u radnoj i životnoj sredini imaju širok opseg veličina. Ponašanje, taloženje i sudbina svake čestice nakon stupanja na ljudski respiratorni sistem, i odgovor koji izaziva, zavisi od prirode i veličine čestica. Iz tih razloga je važno uzeti u obzir koncentracije prisutne u različitim frakcijama veličine [1].

Inhaltivni deo čestica pruža polaznu tačku za razumevanje odnosa između izloženosti aerosolima i negativnih zdravstvenih rezultata. Poznavanje različitih veličina frakcija daje osnovu za razvoj kriterijuma na osnovu veličinom-selektivnih čestica. Sledi da je određivanje veličine i raspodele veličina čestica fundamentalna za njihovu karakterizaciju što je od vitalnog

značaja za projektovanje i rukovanje uređajima i razvoj strategije bezbednosti.

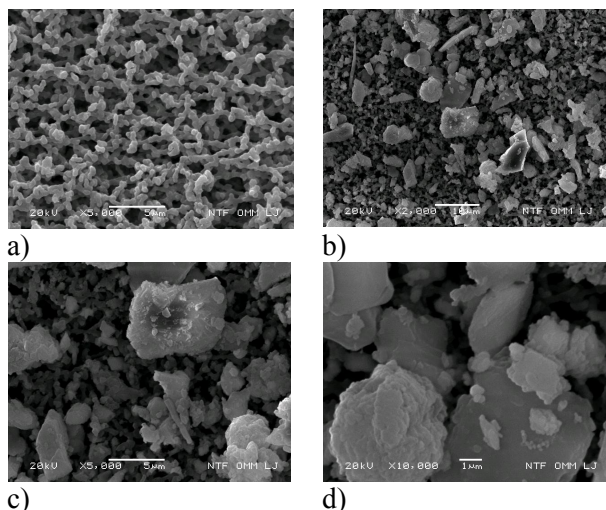
2. SEM ANALIZA

Tehnike elektronske mikroskopije se široko koriste radi pružanja informacija o veličini, morfologiji i elementarnom sastavu pojedinačnih čestica prikupljenih na površini filtera [2]. Stoga je interes za prikupljanje čestica na filtere unapređen sa mogućnošću korišćenja mikroskopske tehnike za njihovu analizu.

Ograničenje mikroskopske tehnike je taj što dobijanje podataka za statistički značajan uzorak može trajati izuzetno dugo. Da bi rešili ovaj problem, nekoliko organizacija je razvilo automatizovani sistem koji može da analizira veliki broj čestica [3,4,5,6]. U ovoj studiji je ispitivan je polu-automatizovani metod zasnovan na analizi slike i preporuke standarda ISO 13322 [7], slike se dobijaju pomoću skenirajuće elektronske mikroskopije (SEM) radi istraživanja velikog broja čestica deponovanih na filtere.

Skenirajući elektronski mikroskop koristi fokusirani elektronski snop visokoenergetskih elektrona da bi se generisali različiti signali sa površine čvrstog uzorka. Signali koji se dobijaju u interakciji elektrona sa uzorkom pružaju informacije o morfologiji, teksturi uzorka i hemijskom sastavu. U većini primena, podaci se beleže sa odabranih površina uzorka, a dvodimenzionalnom slikom se prikazuju promene svojstava uzorka po površini.

Površine šire od 1 cm do 5 μm se mogu snimiti u skenirajućem modu konvencionalnim SEM tehnikama (uvećanja od 20x do oko 30.000x i rezolucijom od 50 do 100 nm). SEM-om je moguće uraditi analize u izabranoj tački na uzorku, ovaj pristup je posebno koristan za kvalitativno ili semikvantitativno određivanje hemijskog sastava EDS (energy dispersive spectroscopy) metodom [8].



Sl. 1. Mikrofotografije sa SEM-a sa različitim stepenom uvećanja. (a) filter; (b-d) uzorak prašine

3. ANALIZA SLIKE PREMA ISO 13322

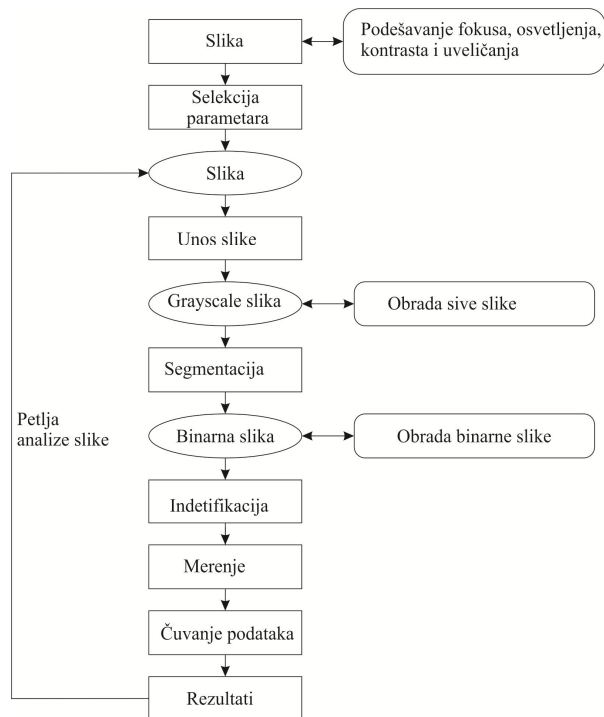
Cilj analize slike jeste da pruži kvantitativni opis slike (broj ćelija određene veličine) ili prepoznavanje oblika, što je korisno ako su morfološke karakteristike objekta povezane sa njegovim svojstvima. Osnovni tok analiza slike prema ISO 13322 prikazan je na slici 2.

Pri tom, ciljevi segmentacije su:

- ili određivanje koji pikseli pripadaju gornjem objektu;
- ili pronalaženje opisujuće konture – maske, svakog gornjeg/izdignutog objekta.

Algoritmi za izračunavanje veličine i oblika čestice moraju da budu prilagođeni metodi segmentacije, da bi se postigli identični rezultati sa istih slika čestica.

Zona koja se ispituje vizualizuje se korišćenjem ekrana, a sistem omogućava izbor ispitivane zone. Sa ovakvom metodom moguće je odabrati objekte koji se ispituju, kao i razdvojiti, brisati ili spojiti susedne čestice. Ovakvi sistemi omogućavaju korekciju slika ili korišćenje metoda za klasifikaciju kao što je intenzifikacija slike preko određivanja nivoa sivoće da bi se dobio što bolji kontrast.



Sl. 2. Grafik toka procedure analize slike

Svi pikseli (sive nijanse) koji su iznad određenih vrednosti granica se smatraju delom izdignutih objekata. Dok svi pikseli (sive nijanse) čiji je intezitet ispod određenih vrednosti granica se smatraju delom pozadine. Proces inverzne binarizacije je takođe moguć. Tako da slika može da se predstavi kao binarna koristeći samo crne i bele piksele da bi se izdvojile čestice od pozadine.

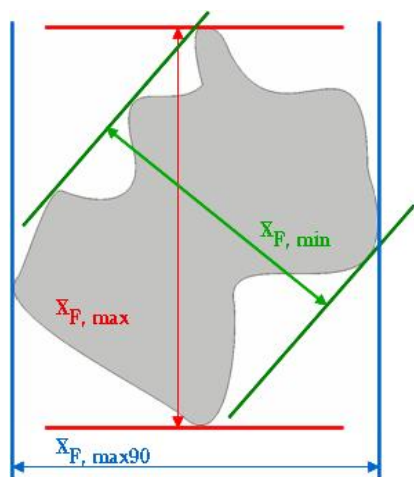
Automatske metode koriste ili histogram ili samu sliku za podešavanje vrednosti granica. Granice mogu da se postavljaju lokalno, u okviru izvesne regije, ili globalno na celu sliku. Optimalni izbor zavisi od slika i od optičkih karakteristika čestica.

S obzirom da su sfere i kocke jedini objekti čija se veličina može dati preko jednog broja (prečnik ili dužina strane), a čestice prašine iz radne sredine su neizometrijske čestice sa nepravilnim oblicima i treba nekoliko veličina i faktora oblika da se u potpunosti okarakterišu [9]. Opis čestica je dobijen analizirajući dvodimenzionalnu projekciju "stvarnih" oblika čestica na ravni površine.

Veličina čestice se opisuje uglavnom pomoću dva parametara: Feretov prečnik i ekvivalentni prečnik kruga.

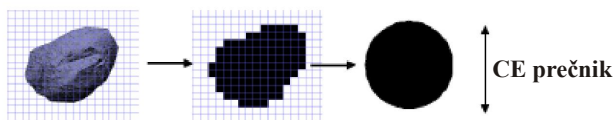
Feretov prečnik je definisana kao rastojanje između dve paralelne tangente čestice sa proizvoljnom uglom. U praksi se najčešće koristi minimalni ($X_{F,min}$) i maksimalni ($X_{F,max}$) Feretov prečnik, srednja vrednost Feretovog prečnika (\bar{X}_F), i Feretov prečnik na 90° za minimalni i maksimalni Feretov prečnik. Feretov prečnik meri

najduže i najkraće rastojanje između bilo koje dve tačke čestice sa određenim ivicama (slika 3) i to je prihvatljivo merenje za rad, jer treba ispitati veliki broj nasumično orijentisanih čestica, s tim da se izračunava srednja vrednost Feret-ovog prečnika, preko aritmetičke sredine.



Sl. 3. Feretov prečnik minimalni ($X_{F,min}$) i maksimalni ($X_{F,max}$) i Feretov prečnik na 90° za minimalni i maksimalni Feretov prečnik

Ekvivalentan prečnik kruga se dobija tako što 3D čestice zarobljene u 2D slici konvertuje u krug ekvivalentan prostoru 2D slike (slika 4). Tako dobijen prečnik se naziva ekvivalentan prečnik čestice ili CE prečnik (eng. Circle Equivalent diameter).



Sl. 4. 3D čestica (a) zarobljene u 2D slici (b) se konvertuje u krug sa istom površinom čiji se prečnik meri (CE prečnik) (c)

Neki autori smatraju da se geometrija čestice može dobro opisati pomoću samo jednog ili dva faktora oblika [10]. Neophodno je imati u vidu da je jedna od zajedničkih karakteristika većine faktora geometrije njihova zavisnost od metoda koju koristi softver za analizu slike pri proceni osnovnih dimenzija čestica, naročito za obim [11].

U okviru ISO 13322 navode da merenje obima (perimetra) izuzetno zavisi koji je sistem za analizu slike upotrebljen. Dakle, primarno merenje obuhvata projektovanu površinu svake čestice, izražene u pikselima, zatim najduži i najkraći Feret-ov prečnik svake čestice, takođe izražen u pikselima. Ova metoda olakšava definisanje faktora oblika sa najvećom diskriminacijom. Iz tih razloga, preporučene primarne vrednosti bi

obuhvatile:

- površinu svakog objekta A_i ;
- najdužu dimenziju svake čestice, maksimalni Feretov prečnik, $x_{Fmax,i}$;
- najkraću dimenziju svake čestice, minimalni Feretov prečnik, $x_{Fmin,i}$;

Ovi parametri se koriste da bi se izračunala površina ekvivalentnog prečnika $x_{A,i}$, prema formuli (1) i parameter oblika, φ_i , prema formuli (2).

$$x_{A,i} = \sqrt{\frac{4A_i}{\pi}} \quad (1)$$

$$\varphi_i = \frac{x_{Fmin,i}}{x_{Fmax,i}} \quad (2)$$

S obzirom da metoda ispitivanja čestica zasnovana na analizi slike nije rutinska i često su prisutne nedoumice prilikom sprovođenja metode veoma je bitno poštovati preporuke prisutne u ISO 13322.

Prema ISO 13322 svako uzorkovanje mora da sadrži sledeće podatke:

- indentifikaciju uzorka;
- pozivanje na standard ISO 13322;
- detaljan opis metode za pripremu uzorka, sa podacima o nominalnoj težini, zapremini i sastavu čestica i proizvodima koji su korišćeni u svakoj fazi u procesu pripremanja uzorka;
- korišćen sistem (hardver ili softver);
- veličina slike;
- broj kadrova;
- ukupan broj ispitanih čestica.

4. ZAKLJUČAK

U ovom članku objašnjene su teorijske osnove i osnovni principi rada skenirajućeg elektronskog mikroskopa i metoda analize slike prema ISO 13322. Metoda ispitivanja čestica nije rutinska i u velikoj meri zavisi od načina pripreme uzorka za merenje kao i od poznavanja osnovnih fizičko-hemijskih karakteristika samog uzorka, pri tom je često prisutna i nedoumica prilikom kvantitativne karakterizacije čestica sa mikrofotografijama, kao što je velika količina podataka dobijenih nakon prikupljanja čestica, raznovrsnost i složenost oblika čestica, teškoće definisanja oblika faktora pogodnih za modeliranje, brojni programi dostupni za analizu slike. Iz tih razloga obezbeđivanja usklađenosti sa propisima i

standardima (ISO 13322), kao i redovno praćenje (monitoring) predstavlja osnovu za identifikaciju potencijalnih opasnosti u životnoj i radnoj sredini.

11. REFERENCE

- [1] Fathie, K., Saied, M., Moftah, I., Abdelnaser, O.: *Evaluation of dental technicians awareness of health and safety rule in dental laboratories at some cities in Libya*, International journal of engineering, 125-128, 2010
- [2] Casuccio, Gary S., Schlaegle, Steven F., Lersch, Traci L., Huffman, Gerald P., Chen, Y., Shah, N.: *Measurement of fine particulate matter using electron microscopy techniques*. Fuel Process Technology, Vol. 85, 763–779, 2004
- [3] Jones, T., Moreno, T., BéruBé, K., Richards, R.: *The physicochemical characterisation of microscopic airborne particles in south wales: a review of the locations and methodologies*. Science of the Total Environment, Vol. 360, 43–59, 2005
- [4] Coz, E., Gómez-Moreno, F.J., Pujadasa, M., Casuccio, G.S., Lersch, T.L., Artíñanoa, B.: *Individual particle characteristics of North African dust under different*, Atmospheric Environment, Vol. 43, No. 11, 1850–1863, 2009
- [5] Laskin, A., Cowin, J.P., Iedema, M.J.: *Analysis of individual environmental particles using modern methods of electron microscopy and X-ray microanalysis*. Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena, Vol. 150, 260–274. 2006
- [6] Stojanović, Z.: *Hidrotermalna sinteza nanostrukturnih oksidnih prahova i njihova karakterizacija, magistarski rad, Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 2009*
- [7] ISO 13322:2014, Particle size analysis – Image analysis methods
- [8] Nagode, A., Godec M., Kosec G., Kosec L.: *Investigations of carbide precipitates in modified 9 % Cr steel using different electron spectroscopy techniques*, RMZ – Materials and Geoenvironment, Vol. 58, No. 1, pp. 59–70, 2011
- [9] Saad, M., Sadoudi, A., Rondet, E., Cuq, B.: *Morphological characterization of wheat powders, how to characterize the shape of particles?*, Journal of Food Engineering 102 293–301, 2011
- [10] Al Mahdi, R., Nasirpour, A., Banon, S., Scher, J., Desobry, S.: *Morphological and mechanical properties of dried skimmed milk and wheat flour mixtures during storage*. Powder Technology 163, 145–151, 2006
- [11] Bagheria, G.H., Bonadonna, C., Manzella, I., Vonlanthen, P.: *On the characterization of size and shape of irregular particles*, Powder Technology, Vol. 270, Part A, pp 141–153, 2015

Autori: M.Sc. Milana Ilić, doc. dr Igor Budak, doc. dr Đorđe Vukelić, Univerzitet Novi Sad, Fakultet Tehničkih Nauka, Institut za Proizvodno mašinstvo, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Tel: +381 21 485 2306, Fax: +381 21 454-495.

Prof. Dr. Borut Kosec, Assist, Assist. Prof. Dr. Aleš Nagode, University of Ljubljana, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenia, Phone.: +386 1 2000410, Fax: +386 1 4704560

E-mail: milanai@uns.ac.rs
budaki@uns.ac.rs
borut.kosec@omm.ntf.uni-lj.si
vukelic@uns.ac.rs
ales.nagode@omm.ntf.uni-lj.si

Medić, V., Vojinović - Miloradov, M., Hadžistević, M.

**PREDLOG KORIŠĆENJA STATISTIČKIH METODA OPTIMIZACIJE U CILJU
POBOLJŠANJA KVALITETA OTPADNIH VODA IZ PIVARA**

Abstrakt: Predmet istraživanja rada je analiza mogućnosti korišćenja metoda optimizacije i statističkog planiranja eksperimenta u cilju smanjenja koncentracije zagađujućih materija u otpadnim vodama iz pivara. Efluent iz pivara ima velio biološko opterećenje i zbog toga su selektovani indikatori kvaliteta vode HPK i BPK. Definisane statistički najznačajnijih varijabli i uslova eksperimenta se odabira pomoću statističke matematičke optimizacije zvane Taguchi metoda. U radu će biti prikazane osnovne karakteristike Taguchi metode, kao i podaci o tretmanu i zagađujućim supstancama otpadnih voda.

ključne reči: otpadne vode iz pivara, optimizacija, Taguchi metoda.

1. UVOD

Pivarska industrija je jedan od najvećih industrijskih korisnika vode. Uprkos značajnim tehnološkim poboljšanjima potrošnja energije, vode, generisanje otpadnih voda, čvrstog otpada i dalje predstavlja veliki ekološki izazov. Pivarska industrija ima strateški ekonomski položaj sa svetskom godišnjom proizvodnjom piva od 1,95 milijardi hl u 2013. godini. Pivo je peti najviše konzumirani napitak u svetu sa prosečnom potrošnjom od 9,7 l po punoletnom stanovniku. U samom procesu proizvodnje piva, velike količine vode se koriste za proizvodnju samog piva, ali i za pranje, čišćenje i sterilizaciju ambalaže. Pivare se kontinuirano zalažu za održivu proizvodnju jer su vrsta industrije koja bi mogla da bez ulaganja u novu opremu i samim reinžinjerinom procesa smanji sopstvene troškove za 20-50%. Upravo zbog ove činjenice postoji preporuka za korišćenje dizajniranja eksperimenata i optimizacije u cilju definisanja optimalnih tehničkih rešenja.

Menadžment otpadnih voda i odlaganje otpada su značajan finansijski faktor i važan aspekt u upravljanju pivarama. Kako propisi koji se odnose na odlaganje otpada postaju sve strožiji, sve pivare pokušavaju da što je moguće više minimiziraju generisanje otpada i smanje troškove prečišćavanja i odlaganja. Potrošnja vode u pivari nije samo ekonomski parametar već i sredstvo kojim se meri učinak sopstvenog procesa u odnosu na druge pivare. Osim toga, predstavljanje piva kao prirodnog proizvoda, nameće velikom kompanijama da obrate pažnju na sopstveni marketing i posvete posebnu pažnju zaštiti životne sredine i efikasnijim proizvodnim procesima.

Cilj rada je da prikaže pregled problema otpadnih voda u pivarama, najčešći način njihovog tretmana i da se predloži mere smanjenja štetnog

uticaja na životnu sredinu korišćenjem metoda optimizacije.

2. SASTAV OTPADNIH VODA IZ PIVARA

Potrošnja voda i upravljanje otpadnim vodama u pivarama je izazovan problem, jer potrošnja vode nije samo ekonomski parametar već i indikator performansi ukupnog procesa. Pivarska industrija ima širok spektar proizvodnih kapaciteta, što izaziva veliki problem prilikom upravljanja otpadom i vodama. Otpadne vode su uglavnom opterećene organskim materijama i zbog toga se prečišćavaju biološkim tretmanima. Međutim, protok otpadnih voda u procesu proizvodnje u velikoj meri zavisi od doba dana, dana u nedelji i od godišnjeg doba. Kvalitet i opterećenje vode veoma varira u zavisnosti od temperature, pH, količine suspendovanih, organskih i neorganskih materija.

Pivare troše vrlo velike količine vode, za proizvodnju 1l piva potrebno 4-10l (H₂O)n koja se koristi kao voda za pivsko vrenje, rashlađivanje i pranje gde se troši najveća količina vode [3]. Poznavanje vodnog bilansa je izuzetno važno za optimizaciju potrošnje vode, smanjenje otpadnih voda i očuvanje energije. Otpadne vode industrije piva imaju visok sadržaj kiselih i organskih materija, što povećava hemijsku potrošnju kiseonika, (HPK) i biološku potrošnju kiseonika, (BPK) i doprinosi organskom opterećenju izazvanom rastvorenim ugljenim hidratima, alkoholima, suspendovanim česticama. HPK je mera teoretske potrošnje kiseonika, tj. količina kiseonika koja se potroši pri potpunoj oksidaciji organskih komponenti u neorganske produkte. HPK je esencijalni parametar u studiji karakterizacije otpadnih voda. HPK, kada se koristi zajedno sa BPK, je od ključnog značaja za

analizu i procenu biorazgradljivosti otpadnih voda. BPK je parametar biorazgradivosti i što je više vrednost približna HPK, otpadna voda lakše podleže procesima biodegradacije. BPK je masena koncentracija rastvorenog kiseonika, koja je pod određenim uslovima utrošena za biohemijsku oksidaciju materija u vodi. U tabeli 1 su prikazane prosečne vrednosti supstanci koje određuju sastav otpadnih voda.

Parametar	Jedinica	Sastav efluenta
HPK	mg/l	2000 -6000
BPK	mg/l	1200 – 3600
TSS	mg/l	200 – 1000
T	°C	18 – 40
pH		4.5 – 12
Azot	mg/l	25 – 80
Fosfor	mg/l	10 - 50

Tabela 1. Sastav otpadnih voda iz pivara

pH vrednosti efluenta su određene količinom i vrstom hemikalija koje se koriste (npr. fosforna kiselina, azotna kiselina itd). Nivoi azota i fosfora dominantno zavise od rukovanja sirovinama i količine potrošenog kvasca prisutnog u otpadnim vodama.

2.1 Tretman otpadnih voda

Biološki procesi za prečišćavanje otpadnih voda imaju centralnu ulogu u načinu na koji pivare upravljaju sopstvenim otpadnim vodama. Nakon fizičkih i hemijskih predtretmana otpadnih voda, dalji procesi su biološki tretmani. Biološki tretmani otpadnih voda se zasnivaju na delovanju širokog konzorcijuma mikroorganizama koji razgrađuju biorazgradive organske zagađujuće supstance. U poređenju sa fizičim ili hemijskim tretmanom, biološki tretman ima nekoliko prednosti[3]:

- tehnologija je visoko usavršena,
- velika efikasnost prečišćavanja (90%),
- niski troškovi investicija.

Ipak, iako je biološki tretman otpadne vode veoma efikasan u slučaju prečišćavanja otpadnih voda pivara, proces zahteva veoma veliku količinu energije[3]. Biološki tretmani otpadnih voda mogu biti aerobni (sa prisustvom kiseonika), anaerobni (bez prisustva kiseonika) i kombinacija obe metode.

Anaerobni tretman se karakteriše biološkom konverzijom organskih supstanci. Kao produkt

ove vrste biološkog tretmana se dobija biogas u sledećem sastavu: metan 55–75%, ugljen dioksid 25–40% i tragovi vodonik sulfida [5]. U kontekstu smanjenja zavisnosti pivara od strane eksternih dobavljača goriva iskorišćavanje biogasa u sopstvene energetske svrhe je najbolja opcija.

Aerobni biološki tretman se odvija u prisustvu odgovarajućih aerobnih mikroorganizama koji metaboliziraju organsku materiju čime podstiču aktiviranje i druge vrste mikroorganizama i formiranje neorganskih produkata (CO_2 , NH_3 i H_2O) i mikrobiološkog mulja [7].

3. METODE OPTIMIZACIJE

Optimizacija procesa se razvija analizom izlaznih vrednosti dobijenih izvođenjem eksperimenata u realnim uslovima. Međutim, izvođenje eksperimenata u realnom okruženju procesa proizvodnje može da izazove remećenje procesa, a takođe sami eksperimenti su skupi i dugotrajani. Implementacija metode Taguchi, koja se bavi optimizacijom izlaznih vrednosti, doprinesi smanjenju eksperimentalnih analiza, a samim tim i troškova izrade eksperimenata. Osim toga, ovaj metod pruža druge prednosti, kao što su:

- ekonomska prednost (manji broj eksperimenata),
- smanjenje varijabilnosti izlaznih promenljivih;
- pronalaženje optimalnog rešenja tokom laboratorijskih eksperimenata.

Taguchijev ortogonalni dizajn koristi poseban skup unapred definisanih nizova (ortogonalni nizovi) da dizajnira plan eksperimenata. Ovi standardni nizovi obezbeđuju potpune informacije o svim faktorima koji utiču na performanse procesa (izlazne promenljive). Odgovarajući ortogonalni niz je odabran prema broju faktora i njihovih nivoa (vrednosti) koji će se koristiti u eksperimentu. Taguchi metoda je sistematski pristup poboljšanju kvaliteta proizvoda i smanjenju troškova smanjenjem osetljivosti procesa od strane faktora koje nije moguće kontrolisati. Očekivana vrednost i odstupanje se kombinuju u jednu meru performanse poznatu kao signal-šum odnos (engl. signal-to-noise S/N). Taguchi klasifikuje parametre problema u različite kategorije u zavisnosti od cilja istraživanja i za svaku kategoriju postoju drugačiji definisan S/N odnos. Klasifikacija je sledeća:

$$S/N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

smaller-the better

$$S/N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (2)$$

larger-the-better

$$S/N = 10 \log \frac{\mu^2}{\sigma^2} \quad (3)$$

nominal-the-better

Signal – šum odnos je logaritamska funkcija koja se koristi za optimizaciju procesa ili dizajn proizvoda i čiji je glavni zadatak da smanji varijabilnost. Da bi se umanjila varijabilnost, mora se izabrati nivo faktora koji proizvodi maksimalnu vrednost S/N. U zavisnosti od željenog rezultata bira se odgovarajuća S/N funkcija. Na primer, ako želi da se meri uticaj određene zagađujuće supstance na životnu sredinu bira se funkcija smaller-the better (što-manje-to-bolje), odnosno ako je potrebno odrediti uticaj ozona na UV zračenje bira se funkciju larger-the-better (što-više-to-bolje).

Taguchi je koristan alat za poboljšanje produktivnosti i razvojne aktivnosti: ekonomičan je jer smanjuje broj iteracija, može da kao faktore izabere parametre životne sredine ili ekonomske faktore, izuzetno je neosetljiv na spoljne faktore koje nije moguće kontrolisati i time predviđa ponašanje sistema u realnim uslovima.

U cilju smanjenja broja testova Taguchi preporučuje korišćenje osamnaest osnovnih parcijalnih faktorijalnih ortogonalnih nizova. Taguchi tretira S/N odnos kao indikator koji prikazuje statističke karakteristike rezultata u cilju utvrđivanja značaja posmatranih faktora. Taguchi eksperimentalni dizajn se sprovodi u par koraka[2]:

- određivanje izlazne vrednosti koja se posmatra,
- identifikacija faktora i njihovih vrednosti,
- dodeljivanje faktora i interakcija odabranom ortogonalnom nizu,
- izvršenje eksperimenta,
- sprovođenje statističke analize pomoću S/N odnosa i utvrđivanje optimalne vrednosti ulaznih varijabli,
- realizacija provere.

2.3 Planiranje eksperimenta

U fazi planiranja eksperimenta, istraživač mora definisati i izabrati faktore (nezavisne varijable) i njihove odgovarajuće nivoe. Nakon ovog izbora neophodno je odrediti najbolji ortogonalni niz, a zatim odabrati željenu signal-šum funkciju.

Ako se eksperiment sastoji u izboru 3 relevantna parametra za posmatrati i određeni eksperiment, potrebne su odgovarajuće faktorske vrednosti što iduća tabela prikazuje.

Faktor	Vrednost		
Faktor A	1	2	3
Faktor B	1	2	3
Faktor C	1	2	3

Tabela 2. Faktori i njihove vrednosti

Nakon toga se određuje parametar koji služi kao indikator kvaliteta otpadne vode. S obzirom na visoko biološko opterećenje, parametar koji bi bilo najlogičnije posmatrati je hemijska ili biološka potrošnja kiseonika (BPK i HPK). Sledi izbor odgovarajućeg ortogonalnog niza i nakon eksperimenta se odabere optimalno rešenje koje predstavlja odnos između efekata kontrolnih faktora i faktora na koje nije moguće uticati. Optimalno rešenje se bira na osnovu S/N rezultata i ANOVA tabele. Izgled ortoganlog niza L9 je prikazan u tabeli 3.

Broj eksperimenta	Vrednosti faktora		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	2
9	3	3	1

Tabela 3. L9 ortoganli niz

Analiza varijansi (ANOVA) se koristi u cilju pronalaženja najznačajnijih faktora i interakcija efekata. U tom kontekstu, ANOVA se koristi da proceni koliko je značajan uticaj faktora pomoću analize izlaznih vrednosti ili kako različite vrednosti faktora utiču na izlazne promenljive.

U fazi planiranja izuzetno je značajno da se odrede relevantni faktori, koji bi zavisili od tehnologija prečišćavanja vode koji postoje u posmatranim pivarama i upravo zbog ove činjenice nije moguće izabrati univerzalne faktore koji bi mogli da se koriste u svakom slučaju.

4. ZAKLJUČAK

Korišćenjem Taguchi metode svi faktori se jednako uzimaju u obzir i adekvatno su predstavljeni tako da se nakon obrade podataka pronalazi optimalno rešenje. Međutim, treba napomenuti da je faza planiranja posebno kritična u dizajnu eksperimenta. Neuspeh da se na odgovarajući način identifikuju relevantni faktori i odrede njihove vrednosti će dati pogrešne zaključke i time povećati eksperimentalne i operativne troškove. Ali sa druge strane, metoda dozvoljava da se u samom procesu planiranja eksperimenta uključe faktori na koje se ne može uticati kao npr. mikroklimatski faktori. To doprinosi robustnosti procesa i proveravanju na koji način će se taj proces ponašati u realnim uslovima rada.

Postoje različiti načini minimiziranja otpada iz pivara kao što je korišćenje savremenih tehnologija, kombinacija različitih vrsta prečišćavanja voda (aerobno/anaerobno), iskorišćavanje biogasa dobijenog anaerobnim prečišćavanjem voda ili korišćenja mulja u različite svrhe. Upravo zbog ovakvog širokog spektra načina prečišćavanja vode i tehnologija se nalazi mogućnost primene metoda optimizacije koje bi troškove preduzeća i rukovanje otpadom doveli na optimalni nivo.

Praksa je pokazala da je Taguchi metoda koristan alat i da se uspešno primenjuje u polju inženjerstva zaštite životne sredine, a samim tim i u oblasti otpadnih voda. Postoje brojne studije i eksperimenti urađeni za potrebe optimizacije polutanata u komunalnim vodama. Na osnovu izloženog može se zaključiti da bi se ovakvo pojednostavljenje analiza kao i proračuna i predikcija pomoću brojnih komercijalno dostupnih softvera moglo da se uspešno primeni i u pivarskoj industriji. Preliminarne eksperimentalne aktivnosti iz opisane oblasti su u toku.

5. REFERENCE

- [1]Fillaudeau, L., Blanpain-Avet, P., Daufin, G., *Water, wastewater and waste management in brewing industries*, Journal of Cleaner Production 14 (2006) 463-471.
- [2]Borges Silva, M., Melo Carneiro, L., Alves Silva, J. P., I. dos Santos Oliveira, H. J. Izário Filho, C. R. de Oliveira Almeida, *An Application of the Taguchi Method (Robust Design) to Environmental Engineering: Evaluating Advanced Oxidative Processes in Polyester-Resin Wastewater Treatment*, American Journal of Analytical Chemistry,

2014, 5, 828-837.

- [3]Braeken, L., Van der Bruggen, B., Vandecasteele, C., *Regeneration of brewery waste water using nanofiltration*, Water Research 38 (2004) 3075–3082.
- [4]Šibalića, T., Majstorovi, V., Soković, M., *Taguchi-Based and Intelligent Optimisation of a Multi-Response Process Using Historical Data*, Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering 57(2011)4, 357-365.
- [5]Simate, G., Cluett, J., Iyuke, S., Musapatika, E., Ndlovu, S., Walubita, L., Alvarez, A., *The treatment of brewery wastewater for reuse: State of the art*, Desalination 273 (2011) 235–247.
- [6]Bamforth, C., W., *New brewing technologies: setting the scene*, University of California, USA, 2006.
- [7]Olajire, A., *The brewing industry and environmental challenge*, Journal of Cleaner Production xxx (2012) 1-21.
- [8]Torng, C., Chou, C., Liu, H., *Applying quality engineering technique to improve wastewater treatment*, Journal of Industrial Technology, Volume 15, Number 1 - November 1998.
- [9]Driessen, W., Vereijken, T., *Recent developments in biological treatment of brewery effluent*, The Institute and Guild of Brewing Convention, Livingstone, Zambia, March 2-7, 2003.
- [10]Briggs, D., Boulton, C., Brookes, P., Stevens, R., *Brewing Science and practice*, Cambridge, England, 2004.

Autori: M.Sc. Vesna Medić, Prof. Dr Mirjana Vojinović-Miloradov, Prof. Dr. Miodrag Hadžistević, Univerzitet Novi Sad, Fakultet Tehničkih Nauka, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Tel: +381 21 485 2306, Fax: +381 21 454-495.

E-mail: medicv@uns.ac.rs
miodrags@uns.ac.rs