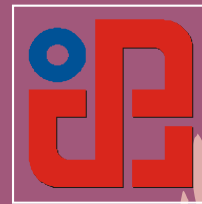




Univerzitet u Novom Sadu
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA
DEPARTMAN ZA PROIZVODNO MAŠINSTVO
Novi Sad, Srbija



NAUČNA KONFERENCIJA SA MEĐUNARODNIM UČEŠĆEM

SCIENTIFIC CONFERENCE WITH INTERNATIONAL PARTICIPATION

ETIKUM 2017

ZBORNIK RADOVA
PROCEEDINGS

NOVI SAD DECEMBAR/DECEMBER 2017.



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



ETIKUM 2017

PROCEEDINGS

Novi Sad, 06-08 December 2017

PROCEEDINGS OF THE SCIENTIFIC CONFERENCE WITH INTERNATIONAL PARTICIPATION
ETIKUM 2017
Novi Sad 2017

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

Technical treatment and design: *Dr Boris AGARSKI, assistant professor*
MSc Milana ILIC MICUNOVIC, research assistant
MSc Mario SOKAC, research assistant

CIP classification:

CIP - Каталогизacija у публикацији
Библиотека Матице српске, Нови Сад

621:658.562(082)
502.175(082)

INTERNATIONAL Scientific Conference ETIKUM (11 ; 2017 ; Novi Sad)
Proceedings [Elektronski izvor] / [Scientific Conference with International
Participation] ETIKUM 2017, Novi Sad, 06-08 December 2017. - Novi Sad : Faculty of
Technical Sciences, Department of Production Engineering, 2017 (Novi Sad : FTS,
Graphic Centre GRID)

Način dostupa (URL): <http://www.dpm.ftn.uns.ac.rs/index.php/etikum> . - Radovi na srp. i
engl. jeziku. - Tekst štampan dvostubačno. - Bibliografija uz svaki rad.

ISBN 978-86-6022-00-68

a) Производно машинство - Контрола квалитета - Зборници b) Животна средина -
Контрола квалитета - Зборници
COBISS.SR-ID 319047687

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

ETIKUM 2017

SCIENTIFIC CONFERENCE WITH INTERNATIONAL PARTICIPATION NOVI SAD, SERBIA, DECEMBER 06-08, 2017

CONFERENCE ORGANIZER

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

PROGRAMME COMMITTEE

- Aco Antić, FTN Novi Sad*
Aleksandar Kiralj, MF Novi Sad
Aleš Nagode, FS Ljubljana
Bojan Ačko, UNI Maribor
Bojana Milekić, MF Novi Sad
Boris Agarski, FTN Novi Sad
Borut Kosec, FS Ljubljana
Branka Nakomcic-Smargdakis, FTN Novi Sad
Branka Trifković, SF Beograd
Branko Skorić, FTN Novi Sad
Daniela Korolija-Crkvenjakov, Matica Srpska, Novi Sad
Danimir Jevremović, SF Pančevo
Dejan Lukić, FTN Novi Sad
Dejan Ubavin, FTN Novi Sad
Dominic Eggbeer, Metropolitan University Cardiff, UK
Dragana Štrbac, FTN Novi Sad
Dragisa Vilotić, FTN Novi Sad
Dražan Kozak, SF Slavonski Brod
Dubravka Marković, MF Novi Sad
Đorđe Vukelić, FTN Novi Sad
Ferenc E. Kiss, TF Novi Sad
Funda Cansu Ertem, TU Berlin
Goran Šimunović, SF Slavonski Brod
Goran Stojanović, FTN Novi Sad
Goran Vujić, FTN Novi Sad
Igor Budak, FTN Novi Sad, chair
Igor Drstvenšek, UNI Maribor
Ilija Čosić, FTN Novi Sad
Ivan Kuric, UNI Žilina
Jozef Živčák, TU Košice
Juraj Šebo, TU Košice
Klara Szita Toth, EF Miškolc
Marian Borzan, TU, Cluj-Napoca
Miladin Stefanović, FIN Kragujevac
Milan Martinov, FTN Novi Sad
Miljana Prica, FTN Novi Sad
Milovan Lazarević, FTN Novi Sad
Mijodrag Milošević, FTN Novi Sad
Miodrag Hadžistević, FTN Novi Sad
Miodrag Manić, MF Niš
Mirko Gojić, MF Sisak
Mirko Soković, FS Ljubljana
Miroslav Badida, TU Košice
Miroslav Trajanović, MF Niš
Mladen Šercer, FSB Zagreb
Nenad Simeunović, FTN Novi Sad
Nikola Jorgovanović, FTN Novi Sad
Nusret Imamović, MF Zenica
Petar Petrović, MF Beograd
Peter Monka, TU Košice
Robert Čep, TU Ostrava
Robert Williams, Metropolitan University Cardiff, UK
Siniša Mirković, MF Novi Sad
Slavko Arsovski, FIN Kragujevac
Stanislaw Legutko, UNI Poznan
Slobodan Mitrović, FIN Kragujevac
Šefket Goletić, MF Zenica
Tatjana Puškar, MF Novi Sad
Vesna Stojaković, FTN Novi Sad
Viktor Till, MF Novi Sad
Vladimir Koči, VŠCHT Prag
Zbigniew Klos, UNI Poznan
Zdravko Krivokapić, MF Podgorica
Željko Ivandić, SF Slavonski Brod
Živana Jakovljević, MF Beograd
Zorana Tanasić, MF Banja Luka

ORGANIZING COMMITTEE

- Bojana Milekić*
Boris Agarski, chair
Branislava Petronijević
Branko Štrbac
Đorđe Vukelić
Igor Budak
Ivan Matin
Mario Šokac, technical secretary
Milana Ilić Mićunović
Miodrag Hadžistević
Zorana Lanc
Željko Santoši

ETIKUM 2017

**SCIENTIFIC CONFERENCE WITH INTERNATIONAL
PARTICIPATION
NOVI SAD, SERBIA, DECEMBER 06-08, 2017**

ACKNOWLEDGEMENT

Organisation of Scientific Conference with international participation ETIKUM 2017 was made possible with understanding and financial help of following sponsors:

- **PROVINCIAL SECRETARIAT FOR HIGHER EDUCATION AND SCIENTIFIC RESEARCH OF AP VOJVODINA – Novi Sad**
- **FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES - Novi Sad**
- **DEPARTMENT FOR PRODUCTION ENGINEERING AT THE FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES - Novi Sad**

Predgovor

Naučno stručna konferencija sa međunarodnim učešćem ETIKUM 2017 se održava jedanaesti 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 interdisciplinarne saradnje, konferencija je i ove godine obuhvatila i srodne naučno stručne oblasti, u okviru kojih članovi Katedre realizuju naučno-istraživačke i stručne projekte.

Od prethodne, 2016. godine, uvedena je nagrada za najbolji rad mladog istraživača u znak sećanja na Prof. dr Janka Hodoliča. Programski odbor ETIKUM konferencije je i 2017 godine nagradio najbolji rad mladog istraživača ETIKUM konferencije sa Prof. dr Janko Hodolič nagradom.

Konferencija ETIKUM 2017 je strukturirana u četiri tematske celine:

- 1. Metrologija i kontrola kvaliteta u proizvodnom inženjerstvu;*
- 2. Metrologija i kontrola kvaliteta u biomedicinskom inženjerstvu;*
- 3. Metrologija i kvalitet u zaštiti životne sredine;*
- 4. Merenje u oblasti zaštite kulturnog nasleđa.*

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 privukla je istraživače iz različitih oblasti zaštite životne i radne sredine. U okviru treće tematske oblasti predstavljena su istraživanja vezana za merenja i analize zagađujućih materija emitovanih u vazduh, vodu, zemljište, merenje i monitoring fizičkih aspekata životne sredine kao što su buka, zračenje i vibracije, kao i ocenjivanje životnog ciklusa proizvoda i procesa.

Četvrta tematska oblast je fokusirana na predstavljanju rezultata istraživanja primene 3D tehnologija i metoda 3D digitalizacije u oblasti kulturnog nasleđa u cilju očuvanja kulturnih i istorijskih znamenitosti.

Na konferenciji ETIKUM 2017 je prezentovano ukupno 57 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.

Foreword

International Scientific-Expert Conference ETIKUM 2017 will be held for the eleventh 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.

From the last year, 2016, in memoriam of Prof. dr Janko Hodolic award for the best paper of the young scientist was introduced. The best paper of the young scientist from ETIKUM 2017 conference was rewarded with the Prof dr Janko Hodolic award on behalf of the ETIKUM conference programme committee.

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

- 1. Metrology and quality control in the production engineering;*
- 2. Metrology and quality control in the biomedical engineering;*
- 3. Metrology and quality in the field of environmental protection and*
- 4. Measurement in the field of protection of cultural heritage.*

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 researchers from various areas of environmental protection and occupational safety. Research in field of measurement and analysis of pollutants to air, water, and soil, measurement and monitoring of physical aspects of environment such as noise, radiation and vibrations, as well as life cycle assessment of products and processes is presented in third thematic area.

The fourth thematic area was focused on presenting the research results related to application of 3D technologies and 3D digitization methods in the field of cultural heritage for the purpose of preserving the cultural and historical artefacts.

At ETIKUM 2017 conference 57 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.

CONTENTS

SESSION 1: METROLOGY AND QUALITY CONTROL IN THE PRODUCTION ENGINEERING

Szuchy, P.: OVERVIEW OF TWO DEGREE-OF-FREEDOM SUBSYSTEMS IN ACOUSTIC METAMATERIALS	1
Bosák, M., Tarča, A.: IMPROVEMENT OF QUALITY AND EFFECTIVENESS IN THE MANUFACTURING ENTERPRISE.....	5
Bijelić, Z., Milanović, B., Bijelić, M.: RAZVOJ INTEGRISANIH MODELA PRIMENOM INTEGRISANE OPTIMIZACIJE U FUNKCIJI INTEGRISANOG KVALITETA	9
Chirasatitsin, S., Kojić, S., Stojanović, G.: OPTIMIZATION OF MICROCHANNEL FABRICATION USING XUROGRAPHIC TECHNIQUE FOR MICROFLUDIC CHIPS	13
Kožuh, S., Kolić, M., Holjevac Grgurić, T., Kosec, B., Gojić, M.: MICROSTRUCTURE OF CU-AL-MN ALLOY MICROALLOYED WITH TITANIUM	17
Škorić, B., Schrittwieser, R.: INFLUENCE OF POST-TREATMENT BY N ION BOMBARDMENT ON THE DUPLEX COATINGS.....	21
Đorđević, V., Mijatović, M.: PROJEKTOVANJE PNEUMATSKOG MERNO-KONTROLNOG SISTEMA	25
Birdahić, V., Hadžistević, M., Imamović, N., Šišić, M.: ANALIZA EFEKATA IMPLEMENTACIJE STANDARDA ISO 14001 U ORGANIZACIJAMA METALSKOG SEKTORA.....	29
Kolarević, M., Đorđević, V., Milunović, V., Grković V.: STATISTIČKA KONTROLA PROCESA SKLAPANJA SIGURNOSNIH BLAGAJNI	33
Mitrović, S., Jakovljević Ž.: PRIMENA DISTRIBUIRANOG SISTEMA UPRAVLJANJA BAZIRANOG NA IEC 61499 I 802.15.4 STANDARDIMA.....	37
Čabrilo, A., Gerić, K.: ENERGIJA UDARA U ZAVARENOM SPOJU PANCIRNOG ČELIKA	41
Ristić, M., Lužanin, O., Baloš, S., Radusin, T., Rajnović, D., Šidanin, L., Dramićanin, M.: UTICAJ TEMPERATURE RADNE PLOČE 3D ŠTAMPAČA NA PROCENAT KRISTALNOSTI PLA UZORAKA IZRAĐENIH FDM TEHNOLOGIJOM	45
Stefanović, Lj., Milutinović, M., Skakun, P.: OPTIMIZACIJA PROCESA INJEKCIONOG PRESOVANJA NUMERIČKOM SIMULACIJOM.....	49
Lanc, Z., Zeljković, M., Živković, A., Štrbac, B., Hadžistević, M.: ISPITIVANJE UTICAJA POVRŠINSKE HRPAVOSTI I TEMPERATURE NA KOEFICIJENT EMISIVNOSTI MESINGA	53
Karpe, B., Novak, S., Rečnik, S., Kožuh, S., Holjevac Grgurić, T., Kosec, B., Nagode, A.: ANALYSIS OF CHAMBER FURNACE TECHNOLOGICAL PARAMETERS FOR HCS ROLLS HEAT TREATMENT	57

Tanasić, Z., Jotanović, S., Janjić, G., Vranješ, B., Kosec, B.: PRAĆENJE I UNAPREĐENJE PERFORMANSI PROCESA PROIZVODNJE	61
Vasić, J., Petrović S., Kašiković, N., Milošević, R., Szilágyi, Á.: UTICAJ GRAMATURE PAPIRA NA KVALITET DIGITALNE ŠTAMPE	65
Ilić, V., Doroslovački, R., Žunić, J.: VIŠE-KOMPONENTNI OBLICI I NJIMA PRIDRUŽENE NUMERIČKE KARAKTERISTIKE	69
Lalić, B., Cvetković, N., Marjanović, U., Medić, N.: THE IMPACT OF PRODUCTION MANAGEMENT AND CONTROL CONCEPTS ON QUALITY PERFORMANCES: EVIDENCE FROM THE TRANSITIONAL ECONOMY	73
Vilotić, D., Kraišnik, M.: DIJAGRAMI GRANIČNE DEFORMABILNOSTI PRI HLADNOM ZAPREMINSKOM DEFORMISANJU	77
Lukić, D., Milošević, M., Salak, S., Štrbac, B., Biševac, S., Dramićanin, M.: POREĐENJE TAČNOSTI OBRADNE I ISKORIŠĆENOSTI MATERIJALA PRI SEČENJU ČELIČNIH PLOČA RAZLIČITIM OBRADNIM PROCESIMA	81
Rajnović, D., Mačaš, M., Ristić, M., Janjatović, P., Labus Zlatanović, D., Baloš, S., Šidanin, L.: NASTANAK KONTAMINIRANOG SLOJA I ZONE BEZ KARBIDA KOD SUPERLEGURE IN100 PRILIKOM TOPLOG HIDROSTATIČKOG PRESOVANJA	85
Vukman, J., Lukić, D., Milošević, M., Borojević, S., Đurđev, M., Antić, A.: TEHNOLOŠKI PROCESI OBRADNE TANKOZIDNIH DELOVA OD LEGURE ALUMINIJUMA	89
Pećanac, M., Dramićanin, M., Janjatović, P., Labus Zlatanović, D., Rajnović, D., Šidanin, L., Baloš, S.: RUČNO-ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE RUTILNIM ELEKTRODAMA SA MODIFIKOVANOM OBLOGOM	93
Pećanac, M., Dramićanin, M., Janjatović, P., Labus Zlatanović, D., Rajnović, D., Šidanin, L., Baloš, S.: UTICAJ GEOMETRIJE RAMENA ALATA NA OSOBINE ZAVARENIH SPOJEVA DOBIJENIH ZAVARIVANJEM TRENJEM SA MEŠANJEM	97
Šimunović, G., Svalina, I., Vukelić, Đ., Šimunović, K., Šarić, T., Kljajin, M., Lujić, R., Havrlišan, S.: PROCJENJIVANJE HRPAVOSTI OBRADENE POVRŠINE NA TEMELJU ZNAČAJKI DIGITALNE FOTOGRAFIJE	101
Havrlišan, S., Šimunović, K., Šarić, T.: ISTRAŽIVANJE OTPORNOSTI LEGURA NIKLA, BORA I SILICIJA NA EROZIJSKO TROŠENJE SUHIM ČESTICAMA	105
Štrbac, B., Jotić, G., Hadžistević, M.: ANALIZA GREŠKE RAVNOSTI NA RAZLIČITIM KOORDINATNIM MERNIM SISTEMIMA	109

SESSION 2: METROLOGY AND QUALITY IN THE FIELD OF BIOMEDICAL ENGINEERING

Kostevšek, U., Brajljih, T., Balić, J., Moličnik, A., Vogrin, M., Hadžistević, S., Drstvenšek, I.: INTERDISCIPLINARY COMMUNICATION IN ORTHOPEDIC SURGICAL PLANNING	113
Karpe, B., Vodlan, M., Kopač, I., Nagode, B., Puškar, T., Pavlič, A., Taubmann, H., Gojić, M., Bizjak, M., Kosec, B.: THERMAL PROPERTIES OF DENTAL MATERIALS	117
Pantić, M., Mitrović, S., Babić, M., Džunić, D., Jevremović, D., Jevremović, A., Kanjevac, T.: IN VIVO STUDY OF THE NANOMECHANICAL PROPERTIES OF LEUCITE GLASS CERAMIC PREPARED WITH DIFFERENT SURFACE FINISHING PROCEDURES	121
Milekić, B., Puškar, T., Jeremić-Knežević, M., Đurović-Koprivica, D., Laban-Terzija, J., Gušić, I., Marković, D.: MOGUĆNOSTI PRIMENE I PRECIZNOST LASERA U STOMATOLOŠKOJ PROTETICI	125
Petronijević Šarčev, B., Krstonošić, V., Šarčev, I., Puškar, T., Maletin, A.: MERENJE VISKOZNOSTI KOMPOZITNOG MATERIJALA ZA PRIMENU U STOMATOLOGIJI	129

Đurović Koprivica, D., Budak, I., Puškar, T., Jeremić Knežević, M., Milekić, B., Pivaš, B., Marković, D.: PRIMENA KOMPJUTERA I RAČUNAROM VOĐENIH SISTEMA U ANALIZI OKLUZALNIH KONTAKATA (T-SCAN SISTEM)	133
Jeremić Knežević M., Marković D., Knežević A., Đurović Koprivica D., Milekić B., Pivaš B., Puškar T.: UPOTREBA CBCT I MAGNETNE REZONANCE U STOMATOLOGIJI	137
Vicko, K., Puškar, T., Santoši, Ž., Eggbeer, D.: PRIMENA 3D TEHNOLOGIJA KOD IZRADE DENTALNIH MOBILNIH APARATA	141
Laban Terzija, J., Milekić, B., Puškar, T., Mirković, S., Santoši, Ž., Šokac, M.: REŠAVANJE PROBLEMA RETENCIJE I STABILIZACIJE GORNJE TOTALNE PROTEZE POMOĆU IMPLANATA	145
Matin, I., Vukelić, Đ., Hadžistević, M., Štrbac, B., Potran, M.: UNAPREĐENJE KVALITETA IZRADE METALNE SUBSTRUKTURE ZA METALOKERAMIČKU KRUNICU KORIŠĆENJEM SOFTPREL-A.....	149
Šokac, M., Budak, I., Santoši, Ž., Spasić, A., Jakovljević, Ž.: ULOGA STATISTIČKIH EVALUATORA I NJIHOVA PRIMENA KOD ANALIZE TAČNOSTI SEGMENTIRANIH MEDICINSKIH SNIMAKA.....	153

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

Ertem-Kappler, F.C., Acheampong, M.: FLEXIBLE HEAT PRODUCTION CONCEPT AT BIOGAS PLANTS FOR DISTRICT HEATING SYSTEMS	157
Arzate, J.A., Cruz Bournazou, M.N., Neubauer, P., Junne, S.: OPTIMIZATION OF ANAEROBIC DIGESTION FROM ENERGY CROPS AND MANURE FOR BIOGAS PRODUCTION USING ASPEN	161
Muránsky, J.: TRANSITION OF MECHANICAL ENGINEERING WORKS TO THE GREEN ECONOMY ...	165
Šišić, M., Imamović, N., Birdahić, V.: ANALIZA UTICAJA PEPELA U POSTUPKU KOMPOSTIRANJA SMESE MULJA S KOMUNALNIH UREĐAJA ZA PREČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA I BIOOTPADA ..	169
Imamović, N.: ENERGIJSKI INDEX KOD RADA CSTR ANAEROBNOG DIGESTORA	173
Iskra, M., Budak, I., Soković, M., Agarski, B., Kosec, B.: LCA IN STEEL PRODUCTION AS A BASE FOR TYPE III ENVIRONMENTAL DECLARATION	177
Kecić, V., Prica, M., Kerkez, Đ., Bečelić-Tomin, M., Tomašević Pilipović, D., Leovac Maćerak, A., Pavlović Ž., Rapajić S.: TRETMAN VODENOG RASTVORA CIJAN FLEKSO GRAFIČKE BOJE PRIMENOM NANO NULA VALENTNOG GVOŽĐA	181
Kustudić, M., Šunjević, M.: INCREASING THE EFFICIENCY OF PICO SOLAR SYSTEMS WITH SOLAR TRACKING SYSTEMS IN LIBERIA	185
Adamović, S., Prica, M., Szilágyi, Á., Kašiković, N., Milošević, R., Banjanin, B.: FIZIČKO-MEHANIČKA I OPTIČKA KARAKTERIZACIJA TETRA PAK AMBALAŽE	189
Karić, M., Živković, M., Nikolić, R.: REKUPERACIJA OTPADNE TOPLOTE KLIPNOG KOMPRESORA KAO MERA POBOLJŠANJA ENERGETSKIH I EKOLOŠKIH KARAKTERISTIKA PNEUMATSKOG SISTEMA	193
Obrovski, B., Mihajlović, I., Bajić, J., Vojinović Miloradov, M., Bežanović, V., Rajs, V.: PROCENA KONTAMINACIJE REKE DUNAV NA ISPUSTIMA OTPADNE VODE U NOVOM SADU	197
Šunjević, M., Vojinović-Miloradov, M., Obrovski, B., Reba, D., Zekovic, M.: NEW EMERGING MATERIALS BETWEEN ARCHITECTURE AND ENVIRONMENTAL PROTECTION.	201
Agarski, B., Budak, I., Ilić Mićunović, M., Kosec, B., Vukelić, Đ.: OCENJIVANJE ŽIVOTNOG CIKLUSA ZBORNIKA RADOVA ETIKUM KONFERENCIJE	205
Ilić Mićunović, M., Agarski, B., Kosec, B., Nagode, A., Miroslavljević, Z.: PERSONALNA IZLOŽENOST PEŠAKA ZAGAĐIVAČIMA VAZDUHA NA PROMETNOJ SAOBRAĆAJNICI GRADA NOVOG SADA ...	209

**SESSION 4: MEASUREMENT IN THE FIELD OF
CULTURAL HERITAGE**

Bosák, M.: CULTURAL HERITAGE OF MICHAEL BOSAK – AMERICAN-SLOVAK BANKER	213
Miljević, B., Mauko Pranjić, A., Vučetić, S., van der Bergh, J.M., Sever Škapin, A., Ranogajec, J.: COMPUTED TOMOGRAPHY STUDY OF THE CRACKS MORPHOLOGY AND BACTERIAL PROPAGATION IN CONCRETE STRUCTURES	217
Vučetić, S., Hiršenberger, H., Miljević, B., van der Bergh, J.M., Tanasić, J., Ranogajec, J.: IN SITU MERENJA U KONZERVACIJI I RESTAURACIJI KULTURNOG NASLEĐA	221
Stojaković, V.: HIBRIDNI PRISTUP FOTOGRAMETRIJSKOJ REKONSTRUKCIJI SRUŠENIH OBJEKATA	225
IN MEMORIAM: Teach. Ass. IVAN SOVILJ-NIKIĆ, MSc. Eng	229

SCIENTIFIC CONFERENCE WITH INTERNATIONAL PARTICIPATION
ETIKUM 2017

PROCEEDINGS

Session 1:
METROLOGY AND QUALITY CONTROL IN THE
PRODUCTION ENGINEERING

Novi Sad, 06 – 08 December 2017.

Szuchy, P.

OVERVIEW OF TWO DEGREE-OF-FREEDOM SUBSYSTEMS IN ACOUSTIC
METAMATERIALS

Abstract: This paper provides an overview of the theory of the two-degree-of-freedom vibration systems from the point of view of the absorption of harmful or dangerous deterministic or stochastic vibrations. It gives a theoretic summary of the single-degree-of-freedom, damping-free, non-excited or excited vibration, than it presents the mass-in-mass system where due to the external excitation negative dynamic effect mass appears in the mass-spring subsystem. Accordingly the metamaterials with mass-in-mass subsystems can eliminate vibration at different frequency. It introduces the theory of dynamic vibration damping. On the basis of the highlighted relationships the paper gives directives to the author for the following steps of his PhD duty.

Key words: Two-Degree-Of-Freedom, Acoustic metamaterials, Dynamic vibration damping

1. INTRODUCTION

Vibration is part of our every days, it is significant in our life even if it is unnoticed. Some vibrations are expressly harmful, for example the noise and vibration of vehicles, swing of building caused by earthquake, or a bridge excited on its eigenfrequency by wind or by soldiers stepping all at once. The most common harm of acoustic vibration is the noise. There are several methods for reducing noise, among them the absorption of the energy of vibration by metamaterials is my research theme. My research goal is developing such mass-in-mass metamaterials, that can reduce or eliminate deterministic and stochastic acoustic vibrations. Metamaterial are used to call such materials which properties are determined by their structure rather than their substance [1]. The most important property of them is given by their structure modelled with spring-mass-damping subsystems, resonators [2]. These micro- and nano-scaled resonators [3] absorb the excited vibration's energy on different frequency like dynamic vibration damping [4]. The research of metamaterials is in progress on civil or even military fields, whether it is stealth aircraft or non-visible submarine.

Harmonic oscillating is used for modelling the vibrations as any periodic vibration can be composed from a set of sines and cosines functions according to Fourier [4].

2. ONE-DEGREE-OF FREEDOM
OSCILLATIONS

2.1 Undamped, unexcited vibrations

The basic model of oscillation is the One-

Degree-Of-Freedom (1-DOF), undamped free oscillation (Fig. 1.), where the spring-mass system has no energy loss [4]. The motion can be described with one function. The mass has a displacement from the equilibrium position, than the undisturbed mass oscillates as a simple harmonic motion with a given amplitude on a determined frequency.

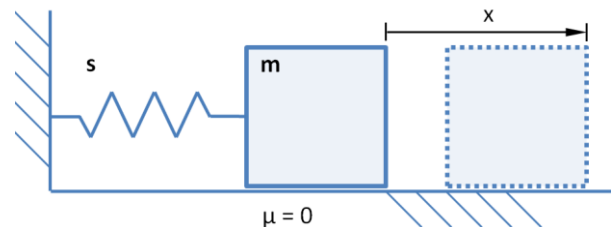


Fig. 1. One-Degree-Of-Freedom undamped oscillation

The spring is supposed to be linear ($F = -sx$). The motion can be written by Newton's second law, where we get the equation of motion:

$$m\ddot{x} + sx = 0 \quad (1)$$

Introducing the following connection $\omega = \sqrt{\frac{s}{m}}$,

we reach the differential equation of the simple harmonic motion:

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0 \quad (2)$$

This is an ordinary, homogeneous linear differential equation, where the solution has a form like this:

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (3)$$

where A : amplitude, ω : eigenfrequency (angular frequency), φ_0 : phase.

2.2. Undamped, excited vibration

For developing the model let us bring in a periodic $F_g(t)$ exciting force that can be decomposed by Fourier to a set of sines and cosines functions: $F_g(t) = F_0 \cos(\omega_g t)$. In this case the motion can be described by the following differential equation:

$$m\ddot{x} + sx = F_0 \cos(\omega_g t) \quad (4)$$

The solution consists of the homogeneous and inhomogeneous parts' particular solutions:

$$x = x_h + x_p \quad (5)$$

The homogeneous part's solution is as same as the unexcited one's: $x_h = A \cos(\omega t + \varphi_0)$. The particular solution can be found in the form of $x_p = x_0 \cos(\omega_g t + \varphi_g)$. This one is also a harmonic oscillation, where x_0 : amplitude, φ_g : the phase between the excitation and the oscillation, and it's value is zero if there is no damping [4-5].

2.3. Effective mass

When we are going to decrease the vibration of a machine with dynamic vibration damping, a secondary spring-mass system has to be connected to the main system. The mass-in-mass principled metamaterial's subsystems have the same operating theory (Fig. 2.) [1]. The $F(t)$ exciting force acts on m_1 primary mass, the m_2 attached mass connects to the first one through a s_2 linear spring.

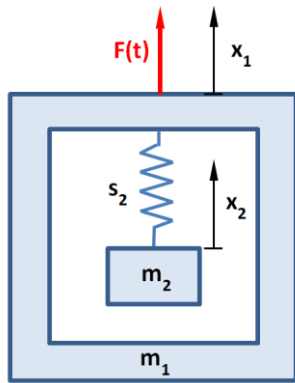


Fig. 2. Mass-in-mass system

The differential equations of motion are the followings:

$$m_1 \ddot{x}_1 + s_2(x_1 - x_2) = F_0 \cos(\omega_g t) \quad (6)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + s_2(x_2 - x_1) = 0 \quad (7)$$

The solutions are:

$$x_1 = A_1 \cos(\omega_g t), \text{ where}$$

$$A_1 = \frac{F_0(s_2 - m_2\omega_g^2)}{(s_2 - m_1\omega_g^2)(s_2 - m_2\omega_g^2) - s_2^2} \quad (8)$$

$$x_2 = A_2 \cos(\omega_g t), \text{ where}$$

$$A_2 = \frac{F_0 s_2}{(s_2 - m_1\omega_g^2)(s_2 - m_2\omega_g^2) - s_2^2} \quad (9)$$

If we substitute this mass-in-mass subsystem's actions with the same effects of a one-degree-of-freedom system, we can understand the theory of effective mass (Fig. 3.) [7-8]. This acts like a black box, we do not care of the properties of the inner part, observing the input and output is enough for us.

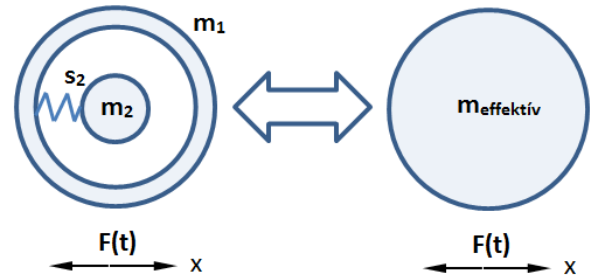


Fig. 3. Effective mass

If the same $F(t)$ excitation acts on m_1 and m_{eff} they will have the same x_1 displacement, so the Linear momentum of the two systems has to be equal [5]:

$$m_{eff} \frac{dx_1}{dt} = m_1 \frac{dx_1}{dt} + m_2 \frac{dx_2}{dt} \quad (10)$$

Replacing A_1 and A_2 maximum displacements:

$$m_{eff} A_1 = m_1 A_1 + m_2 A_2 \quad (11)$$

Substituting to the (7) equation A_1 , A_2 values as well, and the $\ddot{x}_{2_{max}} = \omega_g^2 A_2$ relationship we get

$$m_2 \omega_g^2 A_2 + s_2(A_2 - A_1) = 0 \quad (12)$$

equation. After reordering we put it into equation (11), expressing the effective mass:

$$m_{eff} = m_1 + m_2 \frac{s_2}{s_2 - m_2 \omega_g^2} \quad (13)$$

Introducing $\omega_2 = \sqrt{\frac{s_2}{m_2}}$ as the natural frequency

of m_2 , s_2 oscillator:

$$m_{eff} = m_1 + m_2 \frac{\omega_2^2}{\omega_2^2 - \omega_g^2} \quad (14)$$

$$m_{eff} = m_1 + m_2 \frac{1}{1 - \frac{\omega_g^2}{\omega_2^2}} \quad (15)$$

So the effective mass depends on the rate of the ω_g frequency of excitation and the ω_2 natural frequency of m_2 , s_2 oscillator. If $\omega_g < \omega_2$, the effective mass is positive and x_1 , x_2 are in phase. When $\omega_g = \omega_2$, m_{eff} approaches infinity. If $\omega_g > \omega_2$, effective mass can be negative, depending on the rate of both m_1/m_2 and ω_g/ω_2 , and the two mass oscillate in opposite direction (Figure 4.) [5].

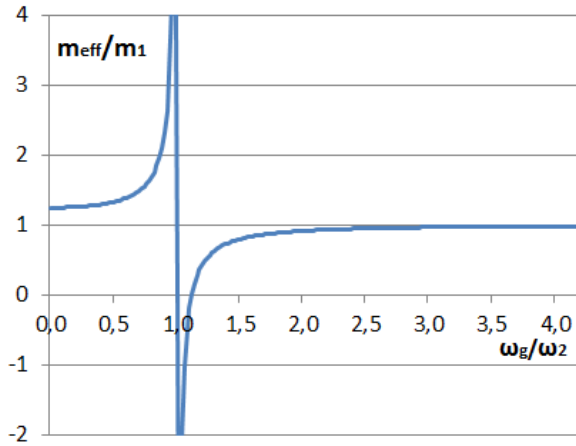


Fig. 4. m_{eff} / m_1 as a function of ω_g / ω_2

Taking the time-derivative of equation (10):

$$m_{eff} \frac{d^2 x_1}{dt^2} = m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} \quad (16)$$

From the equation (6) and (7):

$$m_1 \ddot{x}_1 + m_2 \ddot{x}_2 = F_0 \cos(\omega_g t) \quad (17)$$

Based on equation (16) and (17):

$$m_{eff} \ddot{x}_1 = F_0 \cos(\omega_g t) = F(t) \quad (18)$$

$$m_{eff} = \frac{F(t)}{\ddot{x}_1} \quad (19)$$

So the m_{eff} determinates the acceleration of m_1 excited by $F(t)$.

3. TWO-DEGREE-OF-FREEDOM VIBRATION

3.1. Undamped, periodic excited vibration

The Two-Degree-Of-Freedom, undamped, periodic excited vibration model differs in one thing from the previously presented effective mass model: the m_1 mass is connected to the fixed surroundings by another s_1 linear spring (Fig. 5.) [4-6]. The $F(t)$ periodic excitation still acts on m_1 mass, while m_2 mass is excited through s_2

spring.

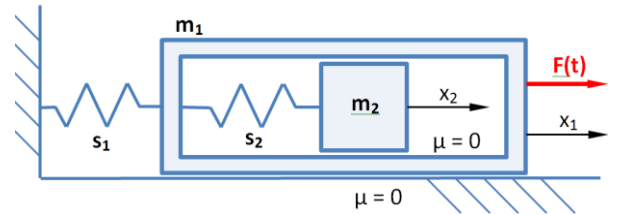


Fig. 5. Two-Degree-Of-Freedom undamped, excited vibration

The motion's differential equations are the followings:

$$m_1 \ddot{x}_1 + s_1 x_1 + s_2 (x_1 - x_2) = F_0 \cos(\omega_g t) \quad (20)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + s_2 (x_2 - x_1) = 0 \quad (21)$$

With some modifications:

$$m_1 \ddot{x}_1 + (s_1 + s_2) x_1 - s_2 x_2 = F_0 \cos(\omega_g t) \quad (22)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + s_2 x_2 - s_2 x_1 = 0 \quad (23)$$

The solutions can be found in the form of:

$$x_1 = A_1 \cos(\omega_g t) \quad x_2 = A_2 \cos(\omega_g t) \quad (24)$$

of which two times derivatives are:

$$\ddot{x}_1 = -\omega_g^2 A_1 \cos(\omega_g t) \quad \ddot{x}_2 = -\omega_g^2 A_2 \cos(\omega_g t) \quad (25)$$

Entering (24) (25) to the equation (22) (23), and simplifying with $\cos(\omega_g t)$:

$$-m_1 \omega_g^2 A_1 + (s_1 + s_2) A_1 - s_2 A_2 = F_0 \quad (26)$$

$$-m_2 \omega_g^2 A_2 + s_2 A_2 - s_2 A_1 = 0 \quad (27)$$

Expressing A_2 from (27), entering $\omega_2^2 = s_2/m_2$:

$$A_2 = \frac{s_2 A_1}{s_2 - m_2 \omega_g^2} = \frac{A_1}{\frac{s_2}{s_2} - \frac{m_2}{s_2} \omega_g^2} = \frac{A_1}{1 - \frac{\omega_g^2}{\omega_2^2}} \quad (28)$$

Substituting (28) into (26):

$$-m_1 \omega_g^2 A_1 + (s_1 + s_2) A_1 - s_2 \frac{A_1}{1 - \frac{\omega_g^2}{\omega_2^2}} = F_0 \quad (29)$$

Bringing the left side of equation to the same denominator, multiplying with it, than multiplying out A_1 , dividing with s_1 . The results are:

$$A_1 = \frac{x_{st} \left(1 - \frac{\omega_g^2}{\omega_2^2} \right)}{\left(-\frac{\omega_g^2}{\omega_1^2} + 1 + \frac{s_2}{s_1} \right) \left(1 - \frac{\omega_g^2}{\omega_2^2} \right) - \frac{s_2}{s_1}} \quad (30)$$

$$A_2 = \frac{x_{st}}{\left(-\frac{\omega_g^2}{\omega_1^2} + 1 + \frac{s_2}{s_1} \right) \left(1 - \frac{\omega_g^2}{\omega_2^2} \right) - \frac{s_2}{s_1}} \quad (31)$$

where $x_{st} = F_0 / s_1$.

If $\omega_g = \omega_2$, then $A_1 = 0$, so the m_1 mass stand still. This can be used for the dynamic vibration damping. When $\omega_g = \omega_1$, there is no resonance, the amplitudes remain limited [6].

Set the m_1, m_2, s_1, s_2 values so that $\omega_1 = \omega_2$. In

this case $\frac{s_1}{m_1} = \frac{s_2}{m_2}$ and let $\mu = \frac{s_2}{s_1} = \frac{m_2}{m_1}$.

We get resonances where the denominator of (30) and (31) equations is zero:

$$\left(\mu + 1 - \frac{\omega_g^2}{\omega_1^2} \right) \left(1 - \frac{\omega_g^2}{\omega_2^2} \right) - \mu = 0 \quad (32)$$

$$\frac{\omega_g^4}{\omega_2^4} - (2 + \mu) \frac{\omega_g^2}{\omega_2^2} + 1 = 0 \quad (33)$$

The solution of this quadratic equation is:

$$\frac{\omega_g^2}{\omega_2^2} = 1 + \frac{\mu}{2} \pm \sqrt{\mu + \frac{\mu^2}{4}} \quad (34)$$

Let $\mu = 1/5$ be. Than the two frequency of

resonances are: $\frac{\omega_g^2}{\omega_2^2} = 0,642$, and $\frac{\omega_g^2}{\omega_2^2} = 1,558$

(Fig. 5.) [6].

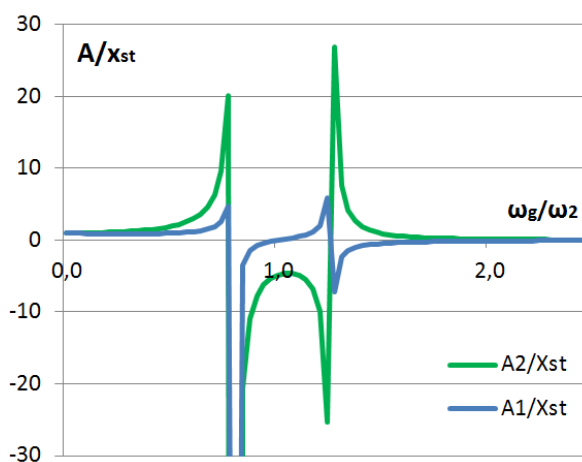


Fig. 5. Amplitudes as a function of ω_g / ω_2

4. CONCLUSIONS

The basic theory of acoustic metamaterials with negative effective mass had been introduced, modelled by linear spring-mass subsystems, without damping. It is visible that the effective mass is the connection between the exciting force and the excited mass's reply for the excitation. This effective mass can be set to negative value. Installing well the spring-mass values, the excited mass can even stand still according to the dynamic vibration damping theory. Subsequent steps are necessary for the introduction of two-degree-of-

freedom subsystems first with damping, than using nonlinear elements (spring, damper). I will investigate with Finite Element Methods the interaction of the skeleton and the inner mass of the mass-in-mass metamaterials first with linear components. I am going to calculate the values of the absorbed frequency than hopefully I will be able to confirm the results with experience as well. Later non-linear components will be involved, further refining the outcome also with finite element methods and experiments.

5. REFERENCES

- [1]Huang, H.H., Sun, C.T., Huang, G.I.: On the negative effective mass density in acoustic metamaterials, International Journal of Engineering Science, 47, 2009, 610-617.
- [2]Peng, H., Pai, P.F.: Acoustic metamaterial plates for elastic wave absorption and structural suppression, International Journal of Mechanical Sciences, 89, 2014, 350-361.
- [3]Cveticanin, L., Zukovic, M., Mester, Gy., Biro, I., Sarosi, J.: Oscillators with symmetric and asymmetric quadratic nonlinearity, Acta Mecahnica, 227(6), 2016, 1727-1742.
- [4]Hegedűs, A.: Fejezetek a kinetikából Rezgéstan, Szent István Egyetemi Kiadó, Gödöllő, 2015. ISBN:978-963-269-468-9
- [5]Cveticanin, L., Mester, Gy: Theory of acoustic metamaterials and metamaterial beams: An overview, Acta Polytechnica Hungarica, 13(7), 2016, 43-62.
- [6]Bíró, I.: Mechanikai lengések, Szegedi Tudományegyetem Mérnöki Kar, Szeged, 2014. 122 p. ISBN:978-963-306-288-3
- [7]Cveticanin, L., Zukovic, M.: Negative effective mass in acoustic metamaterial with nonlinear mass-in-mass subsystems, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 51, 2017, 89-104.
- [8]Pai, P.F., Peng, H., Jiang, S.: Acoustic metamaterial beams based on multi-frequency vibration absorbers, International Journal of Engineering Science, 79, 2014, pp. 195-205.

Authors: Szuchy, Péter, Scientific associate,
University of Szeged, Faculty of Engineering,
Mars tér 7., H-6724 Szeged, Hungary, Phone.: +36
62 546 000, Fax: +36 62 546 003, Mobile: +36
30 366-8362.
E-mail: szpeter@mk.u-szeged.hu

Bosák, M., Tarča, A.**IMPROVEMENT OF QUALITY AND EFFECTIVENESS IN THE MANUFACTURING
ENTERPRISE**

***Abstract:** The success of motor car company depends primarily on the efficient process of production, the quality of the offered products and the satisfaction of the customers. To achieve an efficient process of production, quality needs to be constantly improved too. To improve quality the production process, each manufacturing enterprise should perform process mapping at least once per half-year. Mapping can reveal problems that cause process slowdown or downtime on lines. The Lean Production method used by manufacturing companies is Value Stream Mapping. Its use in Car-parts Slovakia Company has increased the effectiveness of the Painting line.*

***Key words:** production, process mapping, effectivity*

1. INTRODUCTION

The success of motor car company depends primarily on the efficient process of production, the quality of the offered products and the satisfaction of the customers. To achieve an efficient process of production, it needs to be constantly improved. Therefore, every manufacturing company should map at least once in a half year the current state when it identifies which processes work efficiently and which needs to be changed. Mapping can reveal for instance surplus stocks that are tied to funds that the business could use more efficiently. In addition, it is possible to detect problems that cause a slowdown in the process of production, or breakdowns on the lines. These negativities cause the extension of delivery of the product to the customer, which adversely affects the satisfaction of the customer.

The automobile industry is currently the largest employer in the Slovak Republic by comparison with other industries. In the last year 2015, the world leadership in the number of cars produced per thousand inhabitants was maintained, while the magical limit of millions of cars produced was exceeded. In the coming years, it is assumed that the number of cars produced would increase due to the entry of the Jaguar Land Rover into the Slovak market.

2. USED METHOD - LEAN PRODUCTION

Toyota company, with its lean production, brought a new impulse to the automotive industry. The method introduced Taichi Ohno and Shigeo Shing in the middle of the last century as a set of

different tools and methods, whereby their purpose from long-term side was not only the stability and productivity gains but also the efficiency of production. Toyota tried to prevent all kinds of wasting. Its effort was aimed at preventing waste of time to repair the resulting scrap, waste of resources and so on. [1] Wastage, in Japanese MUDA, is an activity that does not add value. According to Lean Manufacturing Tools, we distinguish the following 7 mistakes:

- transportation
- surplus stocks,
- unnecessary movement,
- downtime,
- repair, faulty pieces
- overproduction,
- badly processed.

Largely used method by The Lean Production in manufacturing companies is the Value Stream Mapping (VSM), which is the fastest way to uncover the deficiencies that exist in the enterprise. Below reserves and deficiencies we can also understand the different kinds of wasting. [2]

Value Stream Mapping can be translated as a mapping flow of values, or we can talk about value chain analysis. The title suggests that this analytical technique serves to map the entire value flow, whether in production or administrative processes. The aim of this method is to quickly and easily describe both material and information flows in the enterprise, describing not only those processes that add value to a product or service, but also processes that do not add value to it. Added value is the process the customer requires and for which he pays. Below the value that is not added, it is necessary to understand the process

that must be done to produce a quality product, but the customer does not care, so it does not pay for it [4].

The mapping process includes the following steps:

- a) selection of the mapping object, representative of a particular component or product,
- b) drawing a current state map,
- c) analysis based on the map of the current state and the identification of the insufficiencies of the map of the future state,
- d) establishing a plan of proposals needed to achieve the future state. [3]

3. MAPPING PROCESS

Before starting the mapping, a working group will be created to perform the mapping, with the purchasing, logistics, production and finance department being represented in the working group. Selecting the mapping object follows the selection of the mapping flow direction. There are two lines of flow in the direction and counter-flow. While looking at the flow direction, it is possible to understand the process of turning the raw material into a product, and technical problems will emerge in that direction.

Table 1. Flow direction for VSM

In the direction of flow	In the opposite of flow
Physical flow of components.	Order flow – customer’s view in relation to the supplier.
Product requirements.	Customer requirements.
Flow of raw material - it is necessary to contact the expert.	Product flow - it is possible to assess whether the individual stages of the process were necessary and useful.
Supplier restraint is also shifted to the customer.	Customer needs are monitored to see if the vendor meets customer needs.
Do not see the growing stock between the stages of the process. See a flow failure.	Stocks to see clearly.
Simpler flow tracking.	More streamlined flow tracking.

When watching the counter-flow, everything is covered by the customer. At the beginning, the

customer requests are made to see if the selected vendor can respond to these requirements, and there is a view of creating unnecessary stocks that slow down the process. [5]

The map of the future state is a condition that the enterprise would want to achieve in the future. The goal is to streamline the process, to eliminate downtime, problems and "muddy" that disrupt the entire production process. The map is drawn based on outputs from the current state map and on the basis of found wasting.

4. MANUFACTURING ENTERPRISE

Car-parts Slovakia Company is one of the leading suppliers of the automotive industry in Slovakia and is an independent industrial concern, which is currently expanding its production almost on all continents. Its activity is mainly equipment of personal cars as well as trucks from design to the actual sale of individual components.

At Car-parts Slovakia Company several components are produced:

- keys (32%),
- locks (27%),
- handles (16%),
- electronic access (14%),
- electric steering lock (7%)
- powerful closing systems (4%).

For the production management analysis, the product of handle for the Renault Citroën company was selected as the third most important and most-produced product in the enterprise. The mapping process was performed upstream, that is, from customer to supplier. This direction is more complicated, but it is ideal for mapping because of the rapid detection of errors.

Key products, handles and locks make the car an important locking security system, which can be seen in the following figure.

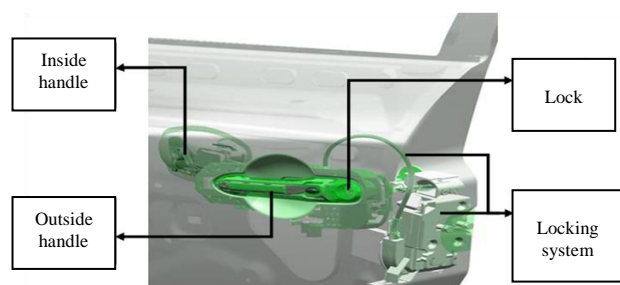


Fig. 1. Locking security system

5. PRODUCTION LINE - PAINTING LINE

The manufacturing process begins by moving the components from the warehouse by operator before painting to the Painting line. The process in

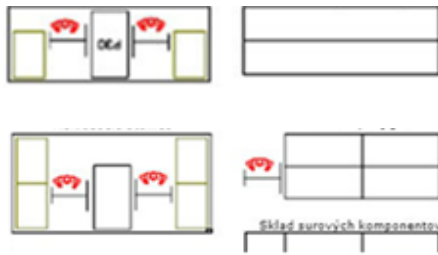


Fig. 3. Position 2 – before and after the introduction of the proposals on loading station

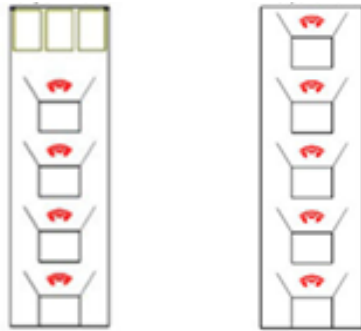


Fig. 4. Position 7 – before and after the introduction of the proposals on the check

Table 4. Proposed state of the line after the introduction of proposals

Painting Line	Original state	Changed status
Overall efficiency of machines and workers	65 %	68 %
Non-productivity in production	9 %	9 %
Time needed to produce 1 piece of product	10,01 s/pc	9,57 s/pc
Down time the line	21 %	18 %

Table 5. Summary of the results before and after the introduction of the proposals

Data		Painting Line
Original state	Production in pieces / 3change	7822
	Scrap loss	704
	Output in units / 3changes	7118
New state	Production in pieces / 3change	8184
	Scrap loss	736
	Output in units / 3changes	7448
Increase status	Production	362
	Output	330

At the time of mapping, it was found that the Painting line during a three-shift operation can produce 7822 products a day, with an output of 7118 units after removal of non-products. The

total efficiency of machines and workers is now at 65% of the painting line, the remaining 35% being time out of production, the highest share being line stopping, 21% downtime. The remaining 14% includes, for example, product control, data entry into a computer, product shipment, etc.

Following the introduction of the proposals, the effectiveness of the Painting line will increase by 3%, with 8,184 pieces per day being produced. After deducting non-subsidies, the line output is 7448 pieces. Following the implementation of the proposals, the enterprise will re-map the manufacturing process, which will introduce further measures to increase output on the Painting line and ensure a smooth manufacturing process.

6. CONCLUSION

Every enterprise should take care of the satisfaction of their customers by producing quality products, thus ensuring a competitive advantage. Making the required quality product can only be an efficient production process that needs to be constantly improved. A very often used method for improving the efficiency of a production process is the value flow analysis. The essence of the method is to understand the current state of the production process, identify the causes of slowing or non-functioning of the process, and suggest improvements.

7. REFERENCES

- [1] Bosák, M., Rudy, V.: Manažérstvo výroby. Ekonóm Bratislava, 2016, ISBN 978-80-225-4369-9.
- [2] Erlach, K.: Value Stream Design: The Way Towards a Lean Factory. Stuttgart: Springer Science & Business Media, 2012, ISBN 978-36-421-2569-0.
- [3] King, P., King, J.: Value Stream Mapping for the Process Industries. New York, CRC Press, 2015, ISBN 978-14-822-4769-5.
- [4] Kyseľ, M.: Mapovanie toku hodnôt vo výrobe. Žilina, IPA Slovakia, 2011, ISBN 978-80-89667-08-6.
- [5] Nash, M., Poling, S.: Mapping the Total Value Stream. New York, CRC Press, 2011, ISBN 978-14-200-9532-6.

Authors: Prof.h.c. Ing. Martin Bosák, PhD., Ing. Alexander Tarča, PhD., Faculty of Business Economy with seat in Košice, University of Economics in Bratislava, Tajovského 13, 041 30 Košice, Slovak Republic
E-mail: martin.bosak@euke.sk
alexander.tarca@euke.sk

Bijelić, Z., Milanović, B., Bijelić, M.

**RAZVOJ INTEGRISANIH MODELA PRIMENOM INTEGRISANE OPTIMIZACIJE U
FUNKCIJI INTEGRISANOG KVALITETA**

Rezime: *Savremeno i optimalno upravljanje kvalitetom proizvoda podrazumijeva integrisano upravljanje svim faktorima koji čine strukturu kvaliteta i strukturu troškova proizvodnje i drugim troškovima u ceni koštanja proizvoda. Sve u funkciji rasta konkurentnosti na tržištu. Kako su troškovi kvaliteta proizvoda u direktnoj korelaciji sa stepenom kvaliteta to integralno upravljanje faktorima kvaliteta proizvoda zahtjeva i integrisano upravljanje troškovima. Troškovi razvoja proizvoda se najčešće finansiraju kroz investiciona ulaganja. Razvoj proizvoda je faza proizvodnog ciklusa u kojem se vrši investiranje u cilju stvaranja dobiti u fazi operativne proizvodnje. Imajući u vidu da su investiciona sredstva potrebna za ulaganje, u fazi razvoja proizvoda, ograničenog karaktera i činjenice da viši nivo kvaliteta proizvoda zahtjeva veće ulaganje u fazi razvoja proizvoda kao i veće troškove u fazi operativne proizvodnje, nameće se potreba optimizacije odnosa ulaganja i nivoa projektovanog kvaliteta proizvoda koji se razvija.*
Gljučne reči: *Kvalitet, integracija, optimizacija, upravljanje, investicije, konkurentnost.*

1. UVOD

Rad je nastao integrisanjem dva rada koji se bave problemom integrisanog upravljanja kvalitetom sa aspekta konkurentnosti i matematičkim modeliranjem stepena ulaganja i kvaliteta proizvoda u fazi razvoja proizvoda. Ovako integrisani obuhvatio je ključne vrednosne aspekte oba rada, a što je kvalitet.

Cilj rad je da se pokaže da je moguće optimalno upravljati integrisanim kvalitetom primenom integrisanih znanja. Drugi cilj je da se pokaže da je moguće modelirati, odnosno razviti model za optimizaciju investicionih ulaganja u fazi razvoja proizvoda, vodeći računa o zadovoljavajućoj konkurentnosti proizvoda. Treći cilj rada je da se pokaže da se razvijeni model optimizacije može uspješno koristiti u praksi.

U radu su postavljene sledeće hipoteze:

1. Osnovna hipoteza: Moguće je razviti matematički model za integrisano upravljanje i integrisanu optimizaciju investicionih ulaganja u kvalitet proizvoda u fazi razvoja proizvoda.

2. Dodatna hipoteza: Razvijeni model optimizacije može se uspješno koristiti u praksi.

3. Matematičko modeliranje i optimizacija na prostoru BoH se ne koristi kao mehanizam izvrsnosti za upravljanje i optimizaciju razvojnih faktora. Danas se u stručnom segmentu ekonomije izuzetno malo koristi matematika.

Sve postavljene hipoteze su potvrđene u cjelosti primenom sledećih naučnih metoda i tehnika: Metod analize sinteze, metode matematičkog modeliranja, metod indukcije i

detukcije, metod eksperimentalnog posmatranja i metod logičkog zaključivanja.

2. INTEGRISANI KVALITET I UPRAVLJANJE KVALITETOM

2.1 Opšte o upravljanju sistemima i procesima

U uslovima izuzetne dinamičnosti promena kako u okruženju tako i u strukturi i interakcijama bilo kojeg sistema, upravljanje postaje sve složenije i rizičnije.¹ Proces promena traje oduvek i zauvek će se nastaviti [1]. Promene mogu biti: fizičke, hemijske, biološke, društvene, ekonomske, tehnološke itd. Promene proizvode probleme, a problemi traže da se rešavaju. Rešenje problema proizvodi nove promene, a time i nove probleme. Znači promenama se mora upravljati. Pošto jedne promene produkuju i druge promene, promenama je najefikasnije i najefektivnije upravljati integrisano. Najbolji rezultat upravljanja imaćemo kad upravljamo primenom integrisanog sistema upravljanja i kad je polje upravljanja integrisano [2].

Mnogi autori upravljanje i menadžment poistovjećuju. Međutim postoji razlika u tome što sistem upravljanje u širem smislu obuhvata i proces odlučivanja, a menadžment samo upravljanje. Matematičkim rečnikom kazano menadžment je podsistem sistema upravljanje. Po Adizesu [1] upravljanje je dobar menadžment. Iz prethodnog slijedi da možemo imati dobar i loš

¹ Složenost upravljanja sistema (SUS) može se predstaviti matematičkom formom: $SUS = N!$ (Faktorijal broja elemenata sistema) [3].

menadžment i dobro i loše upravljanje. Mjera kvaliteta upravljanja je efektivnost i efikasnost.

Bez promena upravljanje bi bilo nepotrebno. Pošto je to nemoguće upravljanje imamo u svim porama ljudske aktivnosti. Za ljudski progres najbitnije je efektivno i efikasno upravljanje razvojnim promenama. Razvojne promene su vezane za budućnost, a kako je budućnost neizvjesna, a time i rizično upravljanje razvojnim procesima. Zadatak nauke, a pre svega primenjene je da stalno traga za efikasnim mehanizmima upravljanja razvojnim promenama [2]. Sistem, po raširenoj definiciji je skup elemenata celine i interakcija između elemenata, je nemoguće posmatrati odvojeno od upravljanja sistemom. Jednostavno zato što je upravljanje proces koji se odvija u sistemu. Tretiranje sistema sa i bez upravljanja kao celine krije u sebi latentne opasnosti, zbog čega iz ugla upravljanja realnim sistemima i procesima sistem i upravljanje se moraju posmatrati kao jedinstvena celina [4].

2.2 Upravljanje kvalitetom

U literaturi postoji mnogo definicija za kvalitet. Iz ugla teorije i prakse kvalitet bi se mogao definisati kao skup performansi mekog integrisanog sistema i procesa, koje su različito vrednovani, u zavisnosti od toga ko to vrednuje. Iz ovog sledi jasan zaključak da kvalitet nije apsolutna kategorija odnosno stvar, već relativna. Znači kvalitet određuje korisnik stvari, odnosno iz ugla tržišta, kupac. Iz prednjeg proizilazi da kvalitet kao stvar ili polje je skup složenih i raznovrsnih karakteristika posmatrane stvari ili polja [2].

U zavisnosti od toga na koju vrstu sistema se definiše i posmatra kvalitet, kvalitet u najopštijem obliku može biti prirodni, tehnički (vještački) i organizacioni².

Upravljanje kvalitetom predstavlja skup aktivnosti i akcija kojima se utiče na kvalitet proizvoda, rada i organizovanja [5]³. Proces upravljanja kvalitetom čini jedan segment u

² Kako su osnovne funkcije upravljanja: planiranje, organizovanje, vođenje i kontrola, izvodi se zaključak da kvalitete kao sistem upravljanja mora imati takođe navedene četiri funkcije. Znači da se kvalitet mora planirati, organizovati izvršavanje planiranog, voditi proces planiranog i na kraju sve to opet kontrolisati. Znači da je kvalitet dinamična pojava i proces koji mora stalno da se razvija korak po korak po japanskom modelu KAIZEN koji na bazi velikih ideja čini velike promene malim koracima [12]. Kaizen se zasniva na sistemu stalnog poboljšanja sitnim koracima,

okviru šireg sistema, zbog čega je potrebno stalno imati u vidu tu okolnost kako bi se ukazalo na aktivnosti u okruženju ili širem sistemu i na međusobni uticaj tih veza i aktivnosti. Ako proizvodni sistem ili tehnološki sistem posmatramo kao cjelinu, tada je sistem za upravljanje kvalitetom dio takve cjeline. Svaki društveni, ekonomski, tehnološki bilo koji drugi sistem mora da ima svoj sistem upravljanja kvalitetom.

Ako polje upravljanja kvalitetom označimo sa S, ciljeve upravljanja sa G, a skup ograničenja sa L, onda se matematički model upravljanja može napisati u formi:

$$S_e = (S, G, L) \quad (1)$$

Iz ugla integrisanog upravljanja kvalitetom S, G i L su integrisani sistemi: ciljeva, objekta ili polja i ograničenja čiji se kvalitet posmatra. Relativno, je lako dati preciznu definiciju upravljanja i napraviti matematičku formu. Međutim, izuzetno je teško odrediti smisao svakog od elemenata skupa, pogotovo sa aspekta matematičkog modeliranja [4]. Ono što je dodatno složeno i teško to je matematički modelirati sisteme i procese u cilju optimizacije. Međutim to ne znači da je nemoguće i nepotrebno, jer je matematička optimizacija moćan upravljački mehanizam. Ovo navodi na zaključak da se optimizira kvalitet kao funkcija niza faktora koji stvaraju kvalitet ili da se kvalitet posmatra kao nezavisno promenljiva, a optimizira neki od faktora razvoja kvaliteta u okviru integrisanog sistema kvaliteta.

2.3. Integrisana znanja ključ efikasnosti i efektivnosti upravljanja kvalitetom

Zbog izuzetno brzih i intenzivnih promena ne samo globalnog karaktera, već i konkretnih uslova privređivanja svakog entiteta, znanje odnosno ljudski resursi se moraju posmatrati kao razvojno strateško pitanje [9]. Da bi se efikasno upravljalo razvojem, a time i razvojem sistema upravljanja kvalitetom, neophodno je imati dva razvojna procesa. Prvi, razvojni proces koji se bavi pitanjima globalnog karakter i drugi koji se bave internim pitanjima koja su faktori razvoja kvaliteta. Iz ugla integrisanog upravljanja kvalitetom u funkciji efikasnog integralnog privređivanja potrebna su višedisciplinarna znanja integrisana u integrisana tehnološka i integrisana upravljačka znanja.

Istraživanja pokazuju da postoji veliki jaz između teorijski znanja koja se uče na visokoškolskim ustanovama i znanja koja su potrebna praksi-primenjenih znanja. Jaz je

dvosmjernan. Veliki obim znanja koji se uči na univerzitetima nikada se ne koristi u praksi. Međutim, veliki obim stručnih znanja koje danas praksa koristi, a koja su na veoma niskom tehnološkom i upravljačkom nivou, se koristi za izradu nastavnih planova i programa. Problem je nastao zbog toga što je privreda u siromašnim zemljama na niskom sopstvenom tehnološkom razvoju, jer se tehnologije uvoze. S druge strane programe iz teorijskih oblasti kreiramo na osnovu teorijske globalne literature, a ne na osnovu sopstvene primenjene koristi. Korist nastaje kao rezultat istraživanja i razvojnih potreba integrisanih sistema za razne sisteme i procese privređivanja [6]. Znanja koja su u funkciji kvaliteta sistema obrazovanja i kvaliteta sistem transfera nauke u praksu, te sistema koji omogućuje bavljenje nauke primenjenim istraživanjima su ključna znanja bez kojih nije moguć progres. Znači potrebna su nam integrisana tehnološka i upravljačka znanja koja su rezultat naših znanja. Nije dobar opšti naučni stav koji je danas izgrađen da je dobro samo ono što se zove savremeno. Nasuprot tome sve što je tradicionalno se zaboravlja. Istraživanja pokazuju da je dobro ono što je optimalna kombinacija savremenih i tradicionalnih znanja.

Kad je u pitanju upravljanje kvalitetom u većini velikih bivših industrijskih sistema, kao i u svim segmentima vojne industrije postojali su mnogo kvalitetniji sistemi upravljanja kvalitetom od onog što je rezultat transfera znanja od strane razvijenih zemalja.

Privreda je ostala bez istraživačko-razvojnih organizacija, a nauka i obrazovanje bez naučno-istraživačkih organizacija. Ove dve organizacije su bile spona između nauke, obrazovanja i prakse. Spona mora postojati, jer nauka, obrazovanje i praksa nemaju dovoljno dodirnih tačaka. Taj problem su premošćavale naučno-istraživačke i istraživačko-razvojne organizacije. Poseban problem je u oblasti sticanja znanja kroz doktorske studije i znanja koja se publikuju u časopisima i na konferencijama. Članci i radovi nisu u funkciji nauke i struke, već u formalnoj potrebi javnog objavljivanja zbog formalnog napredovanja. Radove na konferencijama niko ne sluša, a radove u časopisima niko ne čita. Najveći broj naučnih-istraživačkih radova su karaktera softverske podrške, dok su istraživanja u funkciji razvoja baznih znanja, a pre svega primenjenih svedena na nizak nivo.

3. UPRAVLJANJE KVALITETOM U FAZI RAZVOJA PROIZVODA

3.1 Razvojna znanja u fazi razvoja proizvoda

Razvoj proizvoda je faza proizvodnog ciklusa u kojem se vrši investiranje u cilju stvaranja dobiti u fazi operativne proizvodnje. Imajući u vidu da su investiciona sredstva potrebna za ulaganje, u fazi razvoja proizvoda ograničenog karaktera. Činjenice da viši nivo kvaliteta proizvoda zahtjeva veće ulaganje u fazi razvoja proizvoda kao i veće troškove u fazi operativne proizvodnje, nameće se potreba optimizacije odnosa ulaganja i nivoa projektovanog kvaliteta proizvoda koji se razvija. Za realizaciju ovakvog istraživačkog zadatka potrebna su integrisana multidisciplinarna znanja. Potrebna su tehnološka i upravljačka znanja. Potrebno je imati znanja iz oblasti: projektovanja i dizajniranja proizvoda, projektovanja tehnologija, istraživanja tržišta, finansiranja investicija, upravljanja investicijama-ocena efikasnosti investicija, upravljanja projektima i druga. Kao logistika za ova znanja potrebno je znati primenjenu matematiku i to modeliranje i optimizaciju. Moraju se znati efikasno koristiti savremeni informacioni sistemi. Kako su ljudski resursi nosioci znanja, menadžeri koji odlučuju na svim nivoima moraju posjedovati određen nivo znanja i z oblasti psihologije i sociologije. Kako mnogi proizvodi koji se razvijaju u sebi imaju i ekološku i bezbjednosnu komponentu, to i znanja iz oblasti ekologije i bezbednosti moraju biti dio integrisanog sistema znanja potrebnog za uspješan razvoj proizvoda. U zavisnosti od strukture proizvoda potrebna su određena specijalistička znanja iz oblasti tehnologije proizvodnje samog proizvoda. Za realizaciju investicionih ulaganja u fazi razvoja potrebna su znanja iz finansija i drugih oblasti ekonomije. Ključno znanje iz oblasti ekonomije u fazi razvoja proizvoda je istraživanje tržišta. Rezultat korišćenja ovih znanja je skup integrisanih upravljačkih i tehnoloških aktivnosti koje se realizuju sa određenim stepenom kvaliteta. Stepem kvaliteta mora biti definisan u samoj fazi razvoja proizvoda u obliku projektovanog kvaliteta. Projektovani kvalitet se mora kontrolisati, odnosno potrebno je razviti i sistem kontrole kvaliteta u fazi razvoja proizvoda. Nivo kvaliteta sistema kvaliteta koji se razvije za praćenje kvaliteta u operativno-tržišnoj fazi proizvodnje može biti na višem i nižem stepenu efikasnosti, a time i složenosti.

3.2 Optimizacija ulaganja u kvalitet proizvoda u funkciji konkurentnosti

Razvoj proizvoda je faza životnog ciklusa u kojoj se vrše investiciona ulaganja sa zadatkom da

se kroz ovu fazu razvije i osvoji proizvod koji će biti konkurentan na tržištu. Zadovoljavajuća konkurentnost treba od kroz fazu operativne proizvodnje razvijenog proizvoda vrati uložena investiciona ulaganja. Veći nivo kvaliteta razvijenog proizvoda zahtjeva viši nivo investicionih ulaganja i obrnuto. Ova zavisnost nije linearnog karaktera. Najčešće ta zavisnost je eksponencijalna. To znači da je za određeni relativni rast stepena kvaliteta u fazama povišenog nivoa kvaliteta potreban znatno veći stepen rasta investicionih ulaganja. U fazama sniženog stepena kvaliteta proizvoda imaćemo obrnutu situaciju. Kad je u pitanju konkurentnost i kvalitet imamo situaciju da viši stepen kvaliteta obezbjeđuje veću konkurentnost na tržištu i obrnuto. Kako je nivo investicionih ulaganja eksponencijalna funkcija stepena kvaliteta, znači da će investiciona ulaganja biti eksponencijalna funkcija i konkurentnosti. Matematička forma ovih zavisnosti biće:

$$NI = f(NK, NQ) \quad (2)$$

gdje je: NI - Nivo investicionih ulaganja, NK – Nivo kvaliteta i NQ – Nivo konkurentnosti.

U cilju kreiranja matematičkog modela optimizacije za primjenu u praksi veoma bitno je da se izvrši matematička improvizacija u što većem stepenu do nivoa greške koja će biti manja od greške rezultat podataka na bazi kojih se matematički model određuje. U konkretnom slučaju moguća su dva rešenja problema. Prvo da se jedna od tri promenljive u formuli (2) definiše kao ograničenje i da se metodama operacionih istraživanja odredi optimalni nivo druge dvije promenljive.

Drugo rešenje je da se problem svede na dve promenljive i da se primenom diferencijalnog računa odredi ekstremna vrednost. Tako određena ekstremna vrednost biće istovremeno i optimalno rešenje proplema optimalnog nivoa investiranja u fazi razvoja proizvoda i optimalnog nivoa kvaliteta kao funkcija zadovoljavajućeg nivoa konkurentnosti budućeg proizvoda na tržištu.

4. ZAKLJUČAK

Primenom integrisanog modeliranja i integrisane optimizacije u praksi stvoriće se uslovi za optimizaciju investicionih ulaganja u fazi razvoja proizvoda odnosno biće moguće upravljati razvojnim promenama uz pomoć matematičkih alata i u uslovima intenzivne dinamičnosti razvojnih promena.

Optimizacija razvnih sistema i procesa, u konkretnom slučaju optimizacija investicionih ulaganja i nivoaa kvaliteta u fazi razvoja

proizvoda je jedan od koraka na putu primene principa ekonomije optimuma i optimalnog privređivanja.

Potrebno je nastaviti sa daljim primenjenim istraživanjima vezano za razvoj modela optimizacije konkretnih: tehničkih, tehnoloških, socijalnih, ekonomskih i drugih sistema i procesa.

5. REFERENCE

- [1] Adičes, I. (2005), Upravljanje promenama , Asee, Novi Sad.
- [2] Bijelić, Z. (2017), Ekonomija optimum – Optimalno privređivanje, Monografija u pripremi za štampu.
- [3] Zelenović, D. (2011), Inteligentno
- [4] Tomović R., Karlpulus, W. (1979), Građevinska knjiga, Beograd.
- [5] Mitrović, Ž. (1985), Osnove integrisanog upravljanja kvalitetom proizvoda, Institut za unapređenje robnog prometa, Beograd.
- [6] Bijelić, Z. (2017), Razvoj modela optimizacije integrisanog upravljanja integrisanim razvojnim promenama, Druga doktorska disertacija – pripremljena za odbranu, FTN, Novi Sad.
- [7] Bijelić. Z. (1980) Modeliranje programa proizvodnje kao dijela poslovnog sistema, Magistarski rad, Intitut za multidisciplinarne studije, Univerzitet u Beogradu, Beograd.
- [8] Bijelić, Z. (2007), Istraživanje efekata i ograničenja transformacije većeg preduzeća u manja, Prva doktorska disertacija, Univerzitet “Braća Karić” Beograd.
- [9] Bijelić, Z., Milanović., B., Bijelić, M. (2017) Integrated science and integrated business studies in the function of integrated development, Međunarodna konferencija NAUKA I PRAKSA 2017, Zbornik radova, p.p. 104-117.
- [10]Tourki, M.(1999) Matematički modeli u ekonomiji, Ekonomski fakultet, Beograd.
- [11]Vujanović, B. (1997), Metode optimizacije, Univerzitet Novi Sad, Novi Sad.
- [12]Imaj, M. (2008), KAIZEN, Ključ japanskog uspeha, Mono i Manjana, Beograd.

Autori: Dr. Zdravko Bijelić.

E-mail: bijeliczdravko51@gmail.com

Chirasatitsin, S., Kojić, S., Stojanović, G.

OPTIMIZATION OF MICROCHANNEL FABRICATION
USING XUROGRAPHIC TECHNIQUE FOR MICROFLUIDIC CHIPS

Abstract: This paper presents the optimisation process of parameters needed for xerographic technique. This is technique for microfabrication of microfluidic channels in thermoplastic material using plotter cutter as device for making the pattern of microchannels, inlets and outlets and lamination process for bonding the microfluidic chip. Used materials, methods and measurements are explicated. Optimisation of parameters for with, angle, step and curvature are varied and discussed.

Key words: xurography, micromachining, microfluidics, thermoplastic, microchannel

1. INTRODUCTION

Constant improvement of accuracy and precision in scientific research techniques and permanent battlefield for low-priced research has always been drifted side by side. Therefore, an accuracy of one low-cost fabrication technique determinates the application and usability of that technique. Moreover, optimization of fabrication technique determinates the edge of its performance.

Trying to reach the highest performance, lowest price or balance both, numerous techniques for microfabrication of microfluidic devices are established [1]. Main directions of development are: silicon-based microfabrication [2] (mainly based on MEMS microfabrication techniques, alternatively in glass [3]), rapid prototyping in polymers (covering elastomers: polydimethylsiloxane, poly(methyl methacrylate), etc. and thermoplastics like 3D printing and microcutting techniques) [4,5] and paper based techniques [6,7].

The choice of the fabrication method depends on its capability to generate the part with the desired features [1]. Xurographic technique is polymer rapid prototyping technique which uses polymer materials such as vinyl, polyvinyl chloride, polyethylene terephthalate, polyester, polyimide, etc. like substrate, cutting plotter as a channel making device and lamination as bonding procedure [1,3].

In this paper optimization of micromachining process of cutting the channel was performed. More precisely: width, angle, step, and curvature of the cut were tested in the available ranges and dimensions of the channels were measured (using SEM), compared and discussed. Furthermore, future usage of limitation was commented for this

type of micromachining technique.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Microchannel fabrication

The equipment and materials are shown in **Error! Reference source not found.** The cutting plotter (CE6000-60 PLUS, Graphtec America, Inc., USA) with the 45° cutting blade (CB09U) were used to engrave microchannels in the plastic laminating films (MBL® 80MIC A4 hot lamination foil, Minoan Binding Laminating d.o.o, Serbia) supported on the cutting mat (12" Silhouette Cameo Cutting Mat). The hot laminator FG320 were employed to bond the xurographic microchannels.

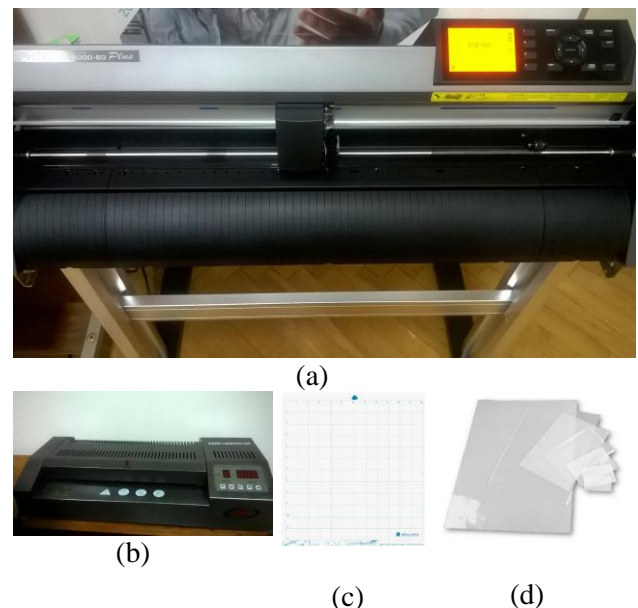


Fig. 1. Xurographic equipment and materials: (a) Cutter, (b) Laminator, (c) Mat, (d) Foils

Additionally, the channel drawing of the dxf

format was produced by an open source 2D-CAD software (LibreCAD, v.2.1.3), then imported to the cutting controller software (Graphtec Pro Studio). Moreover, the command set of the cutting plotter was set to GP-GL with 0.01 mm resolution.

2.2 Microchannel investigation

The carved microchannels were observed by the tabletop scanning electron microscope (TM3030, HITACHI, Japan - courtesy of the BioSense Institute, University of Novi Sad). The SEM micrographs were employed at 5kV with TOPO and Shadow1 modes. The ImageJ software (NIH, USA) was applied for evaluating dimension of microchannel micrographs.

2.3 Microfluidic chip fabrication

The microchannel drawing files were imported to the Graphtec Pro Studio software. Before cutting, the cutting conditions were set such as cutting speed, acceleration and force. This research used the speed of 1 cm/s, the acceleration level 1 and the force of level #1 to #15.

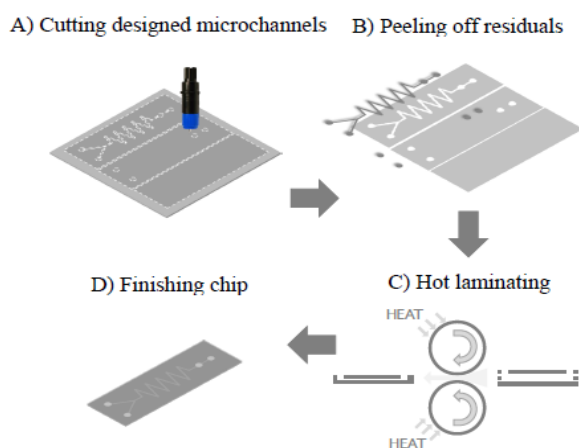


Fig. 2. Fabrication of microfluidic microchannel

The procedure for manufacturing microfluidic microchannels is shown in Fig. 2. Briefly, the channels were carved on the laminating foils supported by adhesive cutting mat. After that the cut foils were peeled off from the mat and the residuals were removed. Basically, to fabricate a microfluidic chip, there are at least three layers of cut foils (i.e. top inlet, core pattern, and bottom supporter layers) are assembled. However, in this research, only two layers were used: the core and the bottom layers, in order to be able to observe the channels via SEM microscopy. Those two layers were laminated through hot rollers at 130°C to bond layers and form the final microfluidic microchannels.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Width of the cut

The microchannels were carved into the laminating foils with different cutting forces from level 1 – 15 (0.12 N – 1.74 N). The shape of the cutting blade is shown in Fig. 3A. The wedge and relief angles were 30° and 45° respectively, therefore the cross section of microchannel was triangular or trapezoidal. The width measured at the ridge of the engrave line were shown in Fig. 3C – D and Fig. 4. The higher force, the wider channel; e.g. at 0.35 N the wide was about 21 μm, whereas at 1.74 N was about 63 μm.

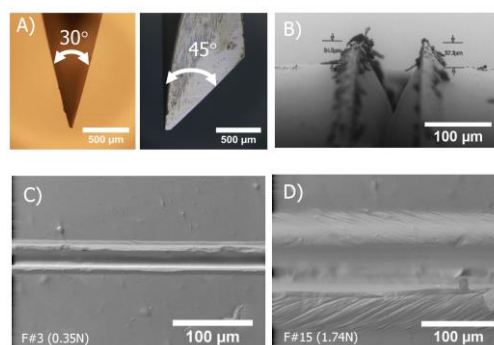


Fig. 3. Cutting blade and engraved microchannels

It was found that the width of cut was proportional to the cutting force from 14 μm width at 0.12 N, then plateaued out at 63 μm width at 1.27 N (to 1.74 N), as can be seen in Fig. 4, called the critical force, according to the thickness of the foils of 80 μm and the wedge angle of the blade. As a result, the foils were cut through. This implies that the thicker are the foils, the wider are the channels. If the desired width is higher than 60 μm, the foil thicker than 80 μm should be used.

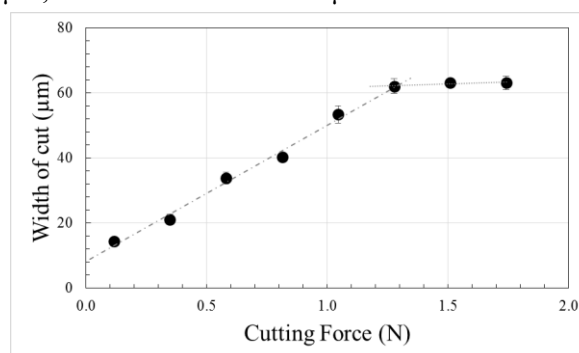


Fig. 4. Graph of the width of cut and cutting forces

The cutting whose force is lower than the critical force was typically called half-cutting, meanwhile one of higher than that was defined as die-cutting. The critical force is influenced by the thickness of the material, the elastic modulus and

the ultimate strength of material as well as the relief angle of cutting blade. Therefore, cutting force should be optimized before microchannel manufacturing.

3.2 Step of the cut

The resolution of blade movement was investigated at the cutting force of level 1 (0.12 N) and varied distance of two parallel lines from 25 μm - 200 μm as shown in Fig. 5. The accuracy of the step motor was very high from 200 μm to 100 μm . However due to the plotter's mechanical resolution of 25 μm , the highest error observed was the same number at drawing distance of 50 μm . Nevertheless, the identification between two lines with 25 μm distance could not be observed.

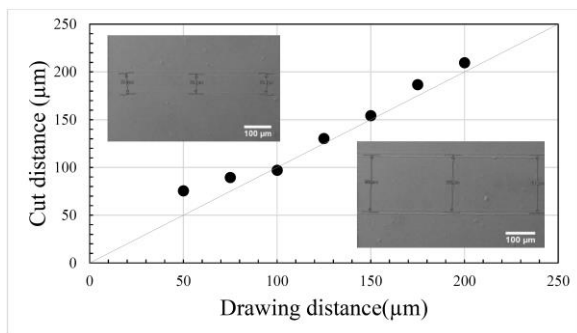


Fig. 5. Graph of designed and cut distances

According to the results of the width of the cut and the step of the cut, the channel width lower than 100 μm could be fabricated by only one pass of engraving with half-cutting. Likewise, the channel wider than 100 μm theoretically could be done by carving two parallel lines with die-cutting. It should be pointed out that the cross section area was always triangular or trapezoidal.

3.3 Angle of the cut

The ability to cut at desired angle was investigated as shown in Fig. 6. The cutting force was set at level 15 (1.74 N) during this experiment. The average error was $4.8^\circ \pm 0.8^\circ$ showing that the angle of the cut was very accurate. However, the overcut at the angle was observed resulting in non-smooth connection line as shown in the inset.

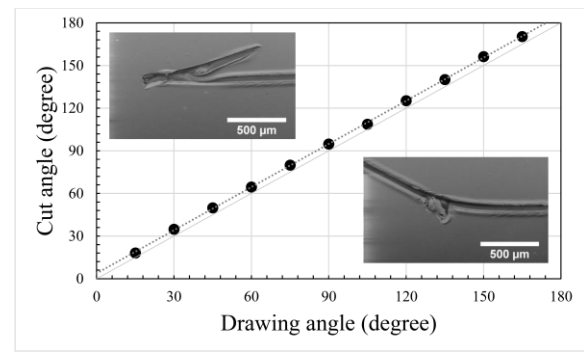


Fig. 6. Angle of the cut

3.4 Curvatures of the cut

The foils were cut in circle and measured in both horizontal and vertical axes as shown in Fig. 7. The length in vertical was slightly longer than in horizontal, so that the vertical's error was higher. This could be the mechanical resolution difference between the motors of the blade and the media movement of the plotter. Even though the step of the cut was very accurate, the combination of vertical (media) and horizontal (blade) motor movement could cause the resolution error as high as 66% at the cut of lower than 100 μm in diameter.

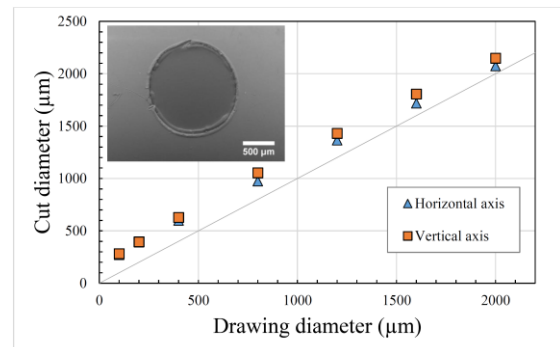


Fig. 7. Curvature of the cut

3.5 Dimension of actual microchannels

The microfluidic microchannel was designed and composed of the two inlets of 2 mm diameter joined with Y-junction, the zigzag micromixing path of 200 μm width, and the detection zone of 2 mm diameter. The SEM micrographs were shown in Fig. 8.

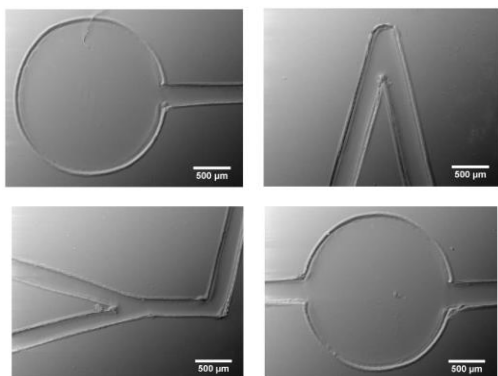


Fig. 8. Dimension of zigzag channel

The diameters of cut circles of inlet and detection zone were, as expected from the previous experimental results, that the vertical axis was slightly longer than the horizontal one. Interestingly, the connection between the circles and straight channels revealed the undercut as the cut direction was changed. Also, the straight channels were wider as the channels were closer to the circles. This could be caused by the unstuck foils to the cutting mat before being carved. Therefore, choosing a higher adhesive force of the mat would solve this.

Unusually, the width of straight channels at the zigzag line at the angle of 75° to the longitudinal axis was about $320\ \mu\text{m}$ on average which was about 60% wider than which of design. This error again could be the influence of the combination of the vertical and horizontal movement of the plotter's motors. However the angle was as designed as 75° . Therefore, the design drawing should be compensated before cutting to obtain the desired dimension.

4. CONCLUSION

When establishing new equipment, it is important to define and optimise all needed parameters for determination of fabrication technique performance, limits and accuracy. This paper presents optimisation procedure for plotter cutter and lamination processes. Results shows that channel width of $63\ \mu\text{m}$, on the $80\ \mu\text{m}$ foil, can be reached using cutting force higher than 1.27 N. Moreover, results of the width of the cut and the step of the cut implies that the channel width lower than $100\ \mu\text{m}$ could be fabricated by only one pass of engraving with half-cutting. While, the channel wider than $100\ \mu\text{m}$ could be made by carving two parallel lines with die-cutting. Measured width of the channel in the chip was 60% wider then on the drawing design. This ratio should be calculated in the measure in the drawing design.

5. REFERENCES

- [1] Galindo-Rosales, F. J., Silverio, V., Cardoso de Freitas, S.: *Complex Fluid-Flows in Microfluidics*, Springer International Publishing AG, 2018.
- [2] Leester-Schadel, M., Lorenz, T., Jurgens, F., Richter, C.: *Microsystems for Pharmatechnology*, Springer International Publishing Switzerland, 2016.
- [3] Silverio, V., Cardoso, S., Gaspar, J., Freitas, P. P., & Moreira, A.L.N.: Design, fabrication and test of an integrated multi-microchannel heatsink for electronics cooling, *Sensors and Actuators A: Physical*, 235, 14–27, 2015.
- [4] Voicu, D., Lestari, G., Wang, Y., DeBono, M., Seo, M., Cho, S., et al.: Thermoplastic microfluidic devices for targeted chemical and biological applications, *RSC Advances*, 7, 2884–2889, 2017.
- [5] Konstantinou, D., Shirazi, A., Sadri, A., & Young, E. W. K.: Combined hot embossing and milling for medium volume production of thermoplastic microfluidic devices, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 234, 209–221, 2016.
- [6] Fu, E., & Downs, C.: Progress in the development and integration of fluid flow control tools in paper microfluidics, *Lab on a Chip*, 2017.
- [7] Posthuma-Trumpie, G. A., Korf, J., van Amerongen, A.: Lateral flow (immuno)assay: its strengths, weaknesses, opportunities and threats, A literature survey. *Analytical Bioanalytical Chemistry*, 393, 569–582, 2009.

Authors: Dr Somyot Chirasatitsin, University of Prince of Songkla University, Faculty of Medicine, Institute of Biomedical Engineering, 15 Karnjanavanich Rd. Hat Yai, Songkhla 90110, Phone: +66 7445 1743, Fax: +66 7445 1744. E-mail: somjot.c@psu.ac.th

M.Sc. Sanja Kojić, Prof. Dr. Goran Stojanović, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Phone.: +381 21 485 2553, Fax: +381 21 4750572. E-mail: sanjakojic@uns.ac.rs sgoran@uns.ac.rs

ACKNOWLEDGEMENT: This work is supported by the H2020 project MEDLEM no. 690876 and partly financed by Provincial Secretariat for Higher Education and Scientific Research project no. 142-451-2508/2016-01.

Kožuh, S., Kolić, M., Holjevac Grgurić, T., Kosec, B., Gojić, M.

MICROSTRUCTURE OF Cu-Al-Mn ALLOY MICROALLOYED WITH TITANIUM

Abstract: *In this paper microscopy analysis (optical microscopy, scanning electron microscopy and energy dispersion spectrometry) and hardness testing of Cu-9Al-7Mn alloy microalloyed with titanium (0.4 wt.%) were carried out. Analysis was performed in as-cast state and after heat treatment (900 °C/30 min/H₂O). Alloy was prepared from pure metals in vacuum electroarc furnace under the protective argon atmosphere. The heat treatment and metallographic preparation were performed after casting. Optical and scanning electron microscopy (SEM) with energy dispersion spectrometry (EDS) were used for microstructural analysis. Differential scanning calorimetry was used for measuring temperatures of phase transformations. For microhardness of samples in as-cast and as-quenched state Vickers method was used. In the as-casted sample martensite phase was not detected, while after heat treatment martensite phase was detected. Phase transformation temperatures were not visible on the DSC curve measured from room temperature to 300 °C. After heat treatment significant increase in microhardness of analyzed alloy was observed.*

Key words: *Cu-Al-Mn, microalloying, shape memory alloys, microstructure, heat treatment*

1. INTRODUCTION

Shape memory alloys (SMAs) belong to a group of metallic materials that have a characteristic property [1]. They can return to the original form when they are under the influence a process that is dependent on temperature or magnetic field. This phenomenon is known as the shape memory effect (SME). A simple example of this process can be in case when the shape memory alloy deformed by applying external force and then heated above a certain temperature it will return to its original shape before deformation. Shape memory alloys can exist in two different phases with three different crystal structures, which gives six possible transformations [2].

The heat treatment procedure has an influence on shape memory properties. Even the small changes in shape memory effect might worsen the applicability of the alloy. The martensitic transformation and the associated mechanical shape reversibility in Cu-based SMAs are strongly influenced by quenching and aging treatments [3]. Also, titanium can have effect on structure and martensitic transformation in these alloys [4].

This paper studies the influence of heat treatment (quenching) on microstructure and microhardness of the Cu-9Al-7Mn alloy microalloyed with titanium. The results obtained after heat treatment will be compared with the results obtained on the sample in as-cast state.

2. EXPERIMENTAL

The investigated Cu-Al-Mn alloy microalloyed with titanium was prepared by arc melting of pure elements: copper (purity 99.99%; pellets 6 mm x 6 mm), aluminium (purity 99.99%; granules 2-10 mm), manganese (purity 99.99%; pieces 3-12 mm) and titanium (purity 99.8%; granules <6 mm). The aim in this work was to produce SMA alloy with nominal composition of Cu-9Al-7Mn-0.4Ti (in wt.%). The melting and casting of ingots was done using the electric-arc furnace, under argon atmosphere (Fig. 1) in a water-cooled, specially constructed copper anode that also served as casting mould. In order to achieve homogeneity in chemical composition, the samples were remelted three times using electric arc, and button-like ingots weighting approximately 6 g were obtained. Cylindrical samples (ingots) with 8 mm in diameter and 15 mm in length were produced by casting process. These ingots were sectioned using a Buehler Isomet low-speed diamond saw to produce specimens for microstructural examinations and microhardness testing. The heat treatment was consisted of annealing at 900 °C (held 15 minutes) and water quenched (WQ) immediately after heating.

Before microstructural analysis the samples were prepared using the standard metallographic techniques, i.e. grinding from 400 to 1200 grit paper (SiC) followed by polishing with 0.3 µm

alumina powder (5 minutes) to mirror finishing and etching with a solution of 2.5 g FeCl₃, 10 mL HCl and 48 mL methanol (5 sec). The microstructure analysis of investigated Cu-9Al-7Mn-0.4Ti SMA alloy was examined using optical microscope (OM) OLYMPUS GX and the Tescan Vega TS 5136 MM scanning electron microscope (SEM) equipped with the device for energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS). After microstructural analysis all samples were exposed to microhardness testing by Vickers method (HV10).

Thermal analysis was carried out using differential scanning calorimeter (DSC) NETZSCH STA 449 F1 in the temperature range from room temperature to 300 °C, in the inert atmosphere of argon with heating/cooling rate of 10 °C/min.

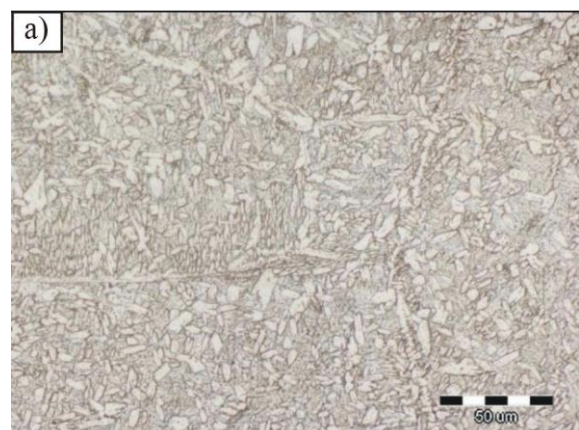


Fig. 1. Photography of the electric-arc furnace for melting and casting

2. RESULTS AND DISCUSSION

Addition of some alloying elements in Cu-Al system can significantly improve its properties (e.g. addition of Mn to binary Cu-Al alloy stabilizes the bcc phase, widens the single phase region to lower temperature and lower Al content and improves ductility in low Al alloys by decreasing the degree of order). Figs. 2 and 3 show results of metallographic analysis by OM and SEM method of ingot in as-cast and as-quenched state. As-casted Cu-9Al-7Mn-0.4Ti alloy shows a regular formation of $\alpha+\beta$ phases which is prerequisite microstructural feature for alloy to form martensitic phase upon quenching and this indicates the potential of the alloy to exhibit shape memory properties. From literature [5] is known that in vertical section of phase

diagram of Cu-Al-10 at.%Mn the single phase region is broadened by addition of Mn and $\alpha+\beta$ microstructure exists. It is known that Cu-Al-Mn alloys undergo a martensitic transformation from β phase. This β phase is stable only at high temperatures. Thereby, three types of martensite may arise: α' (3R), β_1' (18R) and γ_1' (2H), and this depends on amount of Al and Mn. The β_1' martensite is predominant at lower Al content, whereas γ_1' martensite is associated with higher content of Al [6]. As-quenched state of investigated alloy was showed good formation of martensitic structure. Hussain et al. [7] mentioned that both types of martensite, that is, β_1' (18R) and γ_1' (2H) can be obtained in quenched alloy. Both these martensite phases are ductile in nature and show good shape memory properties and Cu-Al-Mn alloy with micro-addition of titanium has the potential for showing shape memory properties. Martensite plates show zig zag orientations. During quenching the β phase undergoes to order-disorder transitions: β (A2) \rightarrow β_2 (A2) \rightarrow β_1 (L2₁). After that the thermoelastic martensitic transformation has occurred as β_1 (L2₁) \rightarrow β_1' (9R or 18R). It is known that the martensitic transformation is a diffusionless phase transition in the solid state [8]. During this transformation the atoms keep on moving comparatively in regard to their neighbours. Shape memory effect is related with transformation from an ordered austenite phase (i.e. β -phase) to the martensite. The EDS analysis confirms some small differences in the chemical composition for all analyzed positions marked on Fig 3. In as-cast state (Table 1) the amount of copper is in the range between 84.7-86.7, aluminium 6.6-7.9, manganese 6.4-6.8 and titanium in the range between 0.3-0,6 (in wt.%). These values confirm that alloy with homogenous chemical compositions was produced (with a slightly lower of aluminium content of the aim). Similar values of alloying elements contents were obtained in the as-quenched state (Table 2).



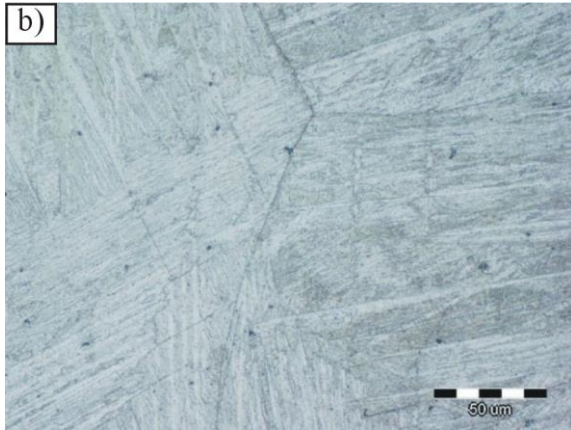


Fig. 2. Optical micrographs of Cu-9Al-7Mn-0.4Ti SMA in as-casted state (a) and in as-quenched state (b); magnification 500X

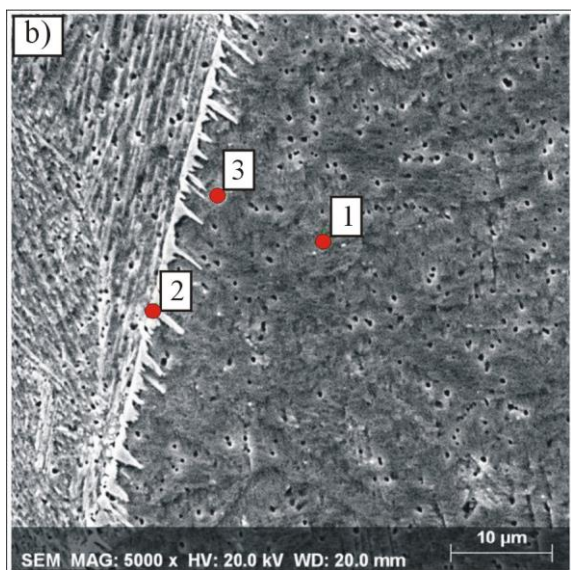
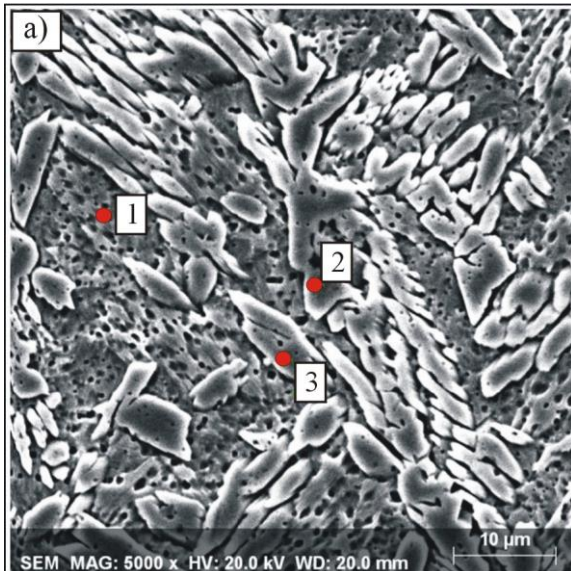


Fig. 3. SEM micrographs of Cu-9Al-7Mn-0.4Ti SMA in as-casted state (a) and in as-quenched state (b) with marked positions for EDS analysis

Table 1. EDS results of Cu-9Al-7Mn-0.4Ti SMA in as-casted state, positions marked on Fig. 3a

Positions	Chemical composition, wt.%			
	Cu	Al	Mn	Ti
1	86.14	7.01	6.45	0.40
2	84.71	7.91	6.76	0.61
3	86.70	6.59	6.38	0.34

Table 2. EDS results of Cu-9Al-7Mn-0.4Ti SMA in as-quenched state, positions marked on Fig. 3b

Positions	Chemical composition, wt.%			
	Cu	Al	Mn	Ti
1	84.93	7.41	6.96	0.70
2	84.81	7.32	7.10	0.77
3	84.81	7.37	7.05	0.76

The differential scanning calorimetry measurements of as-quenched state was performed with heating/cooling rate of 10 °C/min, and heating and cooling curves are shown in Fig. 4. The characteristic austenite and martensite start and finish temperatures (A_s , A_f , M_s and M_f) were not observed by used device NETZSCH STA 449 F1. Since the DSC test has been carried out from room temperature to 300 °C for determination of transformations temperatures, it is necessary to carry out a DSC test on a device which can analysed below room temperature (cryogenic condition).

The results of microhardness testing (mean values) obtained before and after heat treatment are given on Fig. 5. The highest value of microhardness can be observed in as-quenched sample (263.6 HV10). The hardness value of as-cast state was 213.2 HV10.

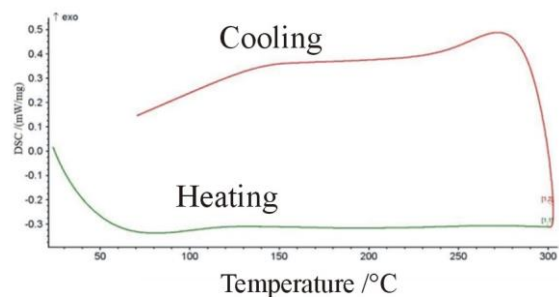


Fig. 4. DSC diagram of Cu-9Al-7Mn-0.4Ti SMA in as-quenched state

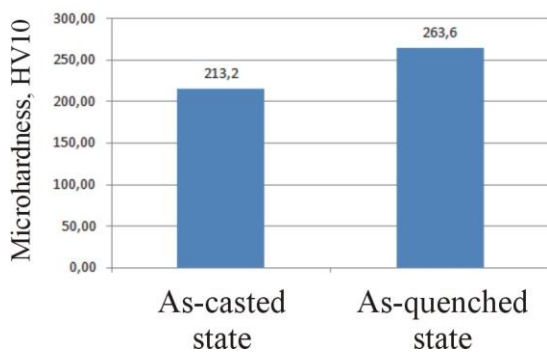


Fig. 5. Microhardness values of Cu-9Al-7Mn-0.4Ti SMA in as-casted and as-quenched state

4. CONCLUSION

After analysis of microstructure and hardness of the casted and quenched Cu-Al-Mn alloy microalloyed with titanium the following can be concluded:

- Optical and scanning electron microscopy showed that in the as-casted state there is no clearly visible martensite, so the as-casted microstructure probably consists only of the β phase. After quenching, the alloy showed a dual phase microstructure (probably β and martensite β_1).
- EDS analysis showed that the as-casted sample contains copper of 84.7 to 86.7 %, aluminum 6.6-7.9 %, manganese of 6.4-6.8 %, and titanium from 0.34 to 0.61 % (in wt. %). Similar values were obtained for the as-quenched state. The EDS analysis showed that a homogeneous alloy composition was produced.
- The hardness value of the sample after quenching was higher than the as-casted state. After measuring the mean hardness of the sample in the as-casted state was 213.2 HV, and the sample in the as-quenched state 263.6 HV.
- DSC analysis was carried out from room temperature to 300 °C and transformations temperatures on the heating and cooling curves not observed. Probably the typical A_s , A_f , M_s , and M_f temperatures of investigated alloy were below room temperature and it device used in investigation can not detected. For determination transformation temperatures the DSC test should be carried out under cryogenic conditions (below room temperature).

Acknowledgements

This work has been fully supported by Croatian Science Foundation under the project IP-2014-09-3405.

5. REFERENCES

- [1] C. LExcellent, Shape-memory Alloys Handbook, John Wiley&Sons Inc., Hobogen, 2013.
- [2] A. Subic, M. Leary, J. Mohd Jani, A review of shape memory alloy research, applications and opportunities, *Materials and Design* 56 (2014), 1078-1113.
- [3] Š. Nevin Balo, N. Sel, Effects of thermal aging on transformation temperatures and some physical parameters of Cu-13.5 wt.%Al-4 wt.%Ni shape memory alloy, *Thermochimica Acta* 536 (2012), 1-5.
- [4] J. Dutkiewicz, T. Czeppe, J. Morgiel, Effect of titanium on structure and martensic transformation in rapidly solidified Cu-Al-Ni-Mn-Ti alloys, *Materials Science and Engineering A273-275* (1999), 703-707.
- [5] Y. Sutou, T. Omori, R. Kainuma, K. Ishida, Grain size dependence of pseudoelasticity in polycrystalline Cu-Al-Mn-based shape memory sheets, *Acta Materialia* 61 (2013), 3842-3850.
- [6] U.S.Mallik, V. Sampath, Effect of composition and ageing on damping characteristics of Cu-Al-Mn shape memory alloys, *Materials Science Engineering A* 478 (2008), 48-55.
- [7] S. Hussain, A.K. Jain, Md. A. Ansari, A. Pandey, R. Dasgupta, Study of effect of Fe, Cr and Ti on the martensite phase formation in Cu-12.5wt%Al-5wt%Mn SMA, *Advanced Materials Proceedings* 2 (2017) 1, 22-25.
- [8] I. Ivanić, M. Gojić, S. Kožuh, Slitine s prisjetljivosti oblika (I. dio): najznačajnija svojstva, *Kemija u industriji* 63 (2014), 9-10, 323-329. (in croatian)

Authors: Associate Prof. Stjepan Kožuh¹, Matko Kolić¹, univ.bacc.ing.met., Associate Prof. Tamara Holjevac Grgurić¹, Full Prof. Borut Kosec², Full Prof. Mirko Gojić¹

¹ University of Zagreb, Faculty of Metallurgy, Aleja narodnih heroja 3, 44 103 Sisak, Croatia, Phone.: +385 44 533 379, Fax: +385 44 533 378.

E-mail: kozuh@simet.hr
kolic.matko@gmail.com
tholjev@simet.hr
gojic@simet.hr

² University of Ljubljana, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenia

E-mail: borut.kosec@omm.ntf.uni-lj.si

**SCIENTIFIC CONFERENCE WITH INTERNATIONAL
PARTICIPATION
NOVI SAD, SERBIA, DECEMBER 6-8, 2017**

Škorić, B., Schrittwieser, R.

**INFLUENCE OF POST-TREATMENT BY N ION BOMBARDMENT
ON THE DUPLEX COATINGS**

***Rezime:** The mechanical properties of new hard coatings based on a multilayer structure have been investigated at the nanometre scale. A multilayer structure consist of nitrided layer on steel substrate and hard coating deposited by Physical Vapor Deposition and Ion Beam Assisted Deposition. In the present investigation the subsequent ion implantation was provided with N₂⁺ ions This paper describes the use of the nanoindentation technique for determination of hardness and elastic modulus. The results are analyzed in terms of load-displacement curves, hardness, Young's modulus, unloading stiffness and elastic recovery. The analysis of the indents was performed by Atomic Force Microscope. Coating is often in tensile stress with greater microhardness. The stress determination follows the conventional $\sin^2\Psi$ method, using a X-ray diffractometer*

***Ključne reči:** coatings, ion implantation, microstructure, adhesion, nanohardness.*

1. INTRODUCTION

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 [1]. In surgical stomatology insertion of bioinert TiN buffer layer at metallic substrate could be used [2]. Ion bombardment during vapour deposition of thin films, called ion beam assisted deposition (IBAD), exerts a number of effects such as densification, changes in grain size, crystallographic orientation, morphology and topography of the films [3]. In this paper, we present the results of a study of TiN films which are deposited by a Physical Vapor Deposition and Ion Beam Assisted Deposition. Subsequent ion implantation was provided with N ions. Ion implantation has the capabilities of producing new compositions and ructures unattainable by conventional means. Implantation may result in changes in the surface properties of a material, including hardness, wear, coefficient of friction and other properties.

2. METHODS

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 (Ra). The specimens were first austenized, 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: Base pressure in the chamber was 1×10^{-5} mbar. During etching, bias voltage was $U_b=1$ kV, current $I_d=50$ mA. During deposition substrate temperature was $T_s=200$ °C, partial pressure of Ar was $P_{Ar}=1 \times 10^{-3}$ mbar and partial pressure of N₂ was $P_{N_2}=3 \times 10^{-4}$ mbar. Prior to entering the deposition chamber the substrates were cleaned.

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 partial pressure of Ar during deposition was $(3.1-6.6) \times 10^{-6}$ mbar and partial pressure of N₂ was $6.0 \times 10^{-6}-1.1 \times 10^{-5}$ mbar. The ion energy ($E_{Ar}=1.5-2$ keV), ion beam incident angle (15°), 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. After deposition, the samples were irradiated with 120 keV, N²⁺ ions at room temperature (RT). The Ion Source is a multiply charged heavy ion injector, based on the electron cyclotron resonance effect (ECR), figure 1. The implanted fluencies were in the range from 0.6×10^{17} to 1×10^{17} ions/cm².

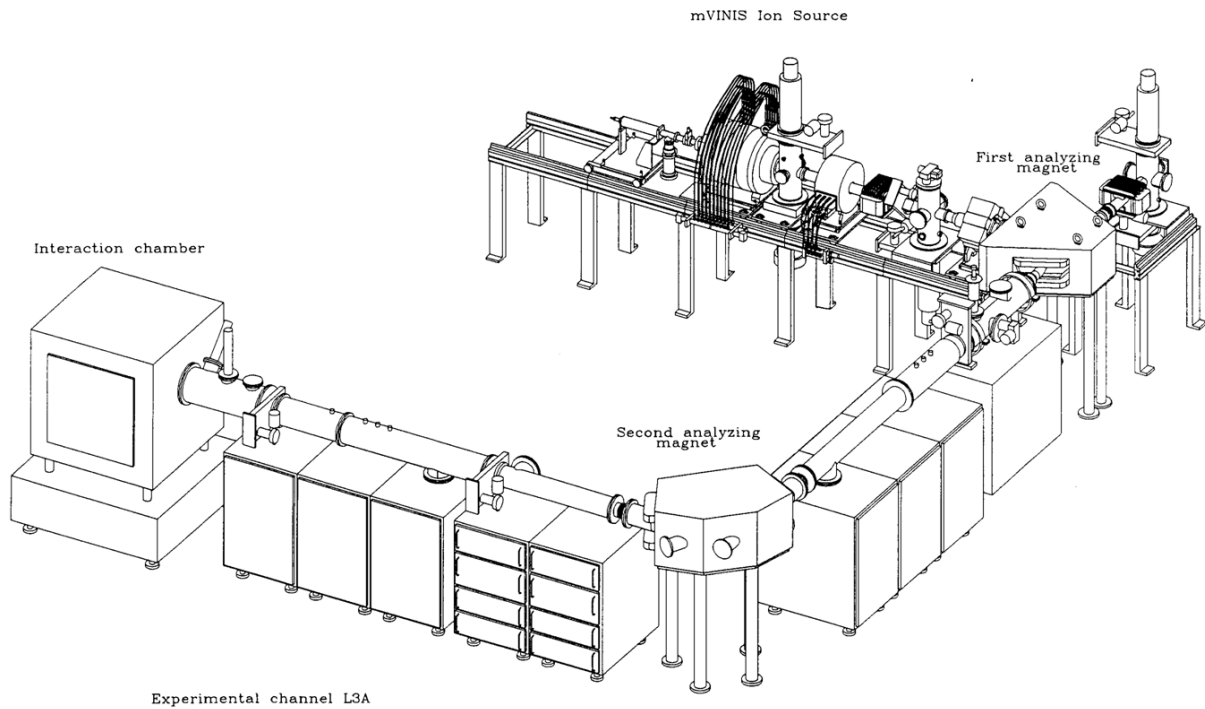


Fig. 1. Experimental channel L3A

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.

The mechanical properties on coated samples were characterized using a Nanohardness Tester (NHT) developed by CSM Instruments. Nanoindentation testing was carried out with applied loads in the range of 10 to 20 mN. A Berkovich diamond indenter was used for all the measurements. The data was processed using proprietary software to produce load–displacement curves and the mechanical properties were calculated using the Oliver and Pharr method.

Scratch adhesion testing was performed using commercially available equipment (REVETEST CSEM) fitted with a Rockwell C diamond stylus (cone apex angle of 120°C, tip radius 200 μm). Acoustic Emission (AE) is an important tool for the detection and characterization of failures in the framework of non-destructive testing. The analyzed AE signal was obtained by a scratching test designed for adherence evaluation. Detection of elastic waves generated as a result of the formation and propagation of micro cracks.

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 CuK with wavelength of 15.443 nm (40

kV, 40 mA) at speed 0.9°/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,

3. RESULTS

The nitrogen to metal ratio (EDX), is stoichiometries for IBAD technology and something smaller from PVD (0.98). For sample with additional ion implantation, value is significantly different, smaller (0.89). It is possibly diffused from the layer of TiN to the interface.

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 nanohardness values are shown in Table 1.

Table 1. Surface nanohardness (load-10mN).

Unit	pn/IBAD	PVD	pn/PVD/II
GPa	21.6	32.6	42.6

The nanoindentation elastic modulus was calculated using the Oliver–Pharr data analysis procedure. The individual values of E are the

different for all measurements, figure 2.

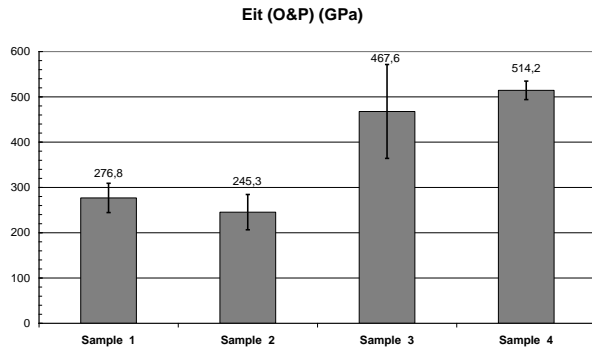


Fig. 2. Young's elastic module.

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.

For each adhesion 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 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

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, figure 3.

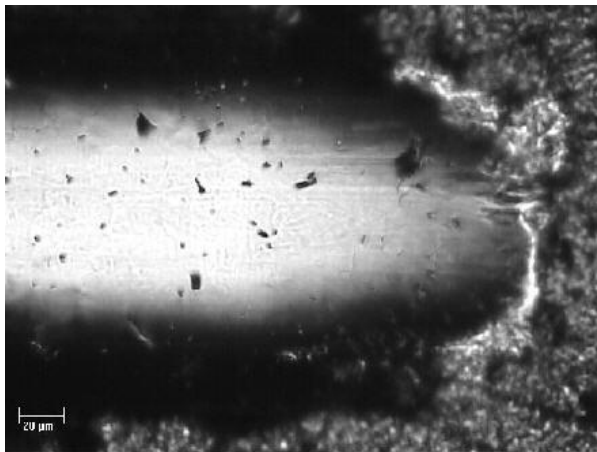


Fig. 3. SEM morphology of scratch test pn/TiN(PVD).

The simplest form of X-ray diffraction (XRD) characterization of thin film microstructure is Cohen-Wagner plot, figure 4.

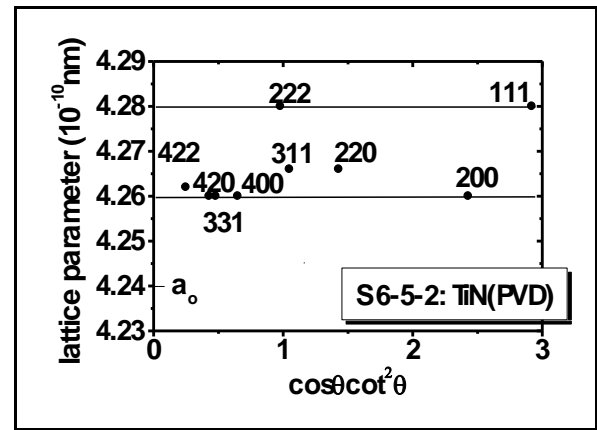


Fig. 4. The Cohen-Wagner plot, lattice parameters a_{hkl} vs. $\cos\Theta\cos2\Theta$.

The anisotropy of lattice parameters, $a_{hkl} \gg a_{h00}$, is characteristic for compact film. The coating morphology was evaluated using the well-known structure zone model of Thornton. All observed morphologies are believed to be from region of zone I (PVD) and from the border of region zone T (IBAD). It has been suggested [5], that the transition from open porous coatings with low microhardness and rough surface, often in tensile stress to dense coatings films with greater microhardness, smooth surface occurs at a well defined critical energy delivered to the growing film.

The microstructure of the TiN film, figure 5, shows a columnar structure reaching from the substrate to the coating surface.

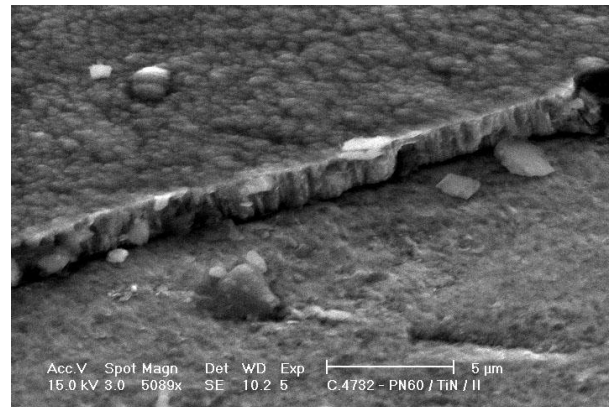


Fig. 5. Surface morphologies of pn/TiN(PVD)/II.

The specimen for these investigation was broken and the fracture surfaces were inspected

The width of column, for plane (422), is derived from the width of the diffraction peaks (Scherrer formula), $t = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \frac{\theta}{\lambda} \cos \theta}$ of TiN

($\lambda=0.154\text{nm}$, $\Theta=62.50$ and $\beta=0.056\text{rad}$), and it is 70 nm. Because of low deposition temperature, it is possible that another planes also have small

width of columns. 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: $\psi_o^1=0^\circ$, $\psi_o^2=18.75^\circ$, $\psi_o^3=27.03^\circ$, $\psi_o^4=33.83^\circ$, $\psi_o^5=40^\circ$. A typical result for compact film, with residual stresses $\sigma = -4.28\text{Gpa}$, has TiN(PVD).

4. CONCLUSIONS

The experimental results indicated that the mechanical hardness is elevated by penetration of nitrogen. Nitrogen ion implantation leads to the formation of a highly wear resistant and hard surface layer.

The deposition process and the resulting coating properties depend strongly on the additional ion bombardment.

Nitrogen implantation into hard TiN coatings increases the surface hardness and significantly reduces the tendency of the coatings to form microcracks when subjected to loads or stresses.

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

5. ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank to The Provincial Secretariat for Higher Education and Scientific Research of Vojvodina, which supported this work by grant.

6. REFERENCES

- [1] S.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, 177-184, 1995.
- [2] Škorić B, Schrittwieser R, Cavaleiro A, *Nano metrology in biomedical engineering*, ETIKUM 2014 International scientific conference, 71-75, 2015.
- [3] W. Ensinger, *Ion bombardment effects during deposition of nitride and metal films*, Surface and Coatings Technology, 99, 1-13, 1998.
- [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, 449,1993.
- [5] M. Griepentrog, et al., *Properties of TiN hard coatings prepared by unbalanced magnetron sputtering and cathodic arc deposition using a uni- and bipolar pulsed bias voltage*, Surface and Coatings Technology, 74-75, 326-332, 1995.

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

Dorđević, V., Mijatović, M.

PROJEKTOVANJE PNEUMATSKOG MERNO-KONTROLNOG SISTEMA

Rezime: Kada imamo velikoserijsku proizvodnju, pored samog procesa proizvodnje proizvoda, i proces merenja i kontrole zahteva dosta vremena. Na osnovu raspoložive konstrukcione i tehnološke dokumentacije, u ovom radu je urađen projekat pneumatskog merno-kontrolnog sistema za kontrolu nosača. Na datom primeru mernih veličina, označenih na crtežu, pokazano je kako je moguće ubrzati proces kontrole, tako što istovremeno kontrolisanje više kota i tolerancija skraćuje vreme kontrole.

Ključne reči: pneumatski merni uređaji, merenje, kontrola, merno-kontrolni sistem.

1. UVOD

Ciklus izrade nekog dela se sastoji iz niza operacija koje se obavljaju uzastopno. Tačnost izvođenja svake operacije je potrebno proveriti merenjem, odnosno odgovarajućom kontrolom. Merenje i kontrola radnih delova čine veoma važan deo industrijske proizvodnje jer obezbeđuju proizvodnju mašinskih delova u okviru zadate tolerancije. U mašinskoj industriji najčešće se meri i kontroliše geometrija proizvoda. Osnovni ciljevi i zadaci merenja i kontrole se ogledaju u eksperimentalnom definisanju kvaliteta i tačnosti, metrološkom obezbeđenju i podizanju nivoa kvaliteta proizvodnje.

2. MERNI I KONTROLNI SISTEMI

Najčešći zadatak u okviru metrologije u mašinskoj industriji je merenje i kontrola geometrije proizvoda koju karakterišu sledeće veličine:

- mere predmeta
- oblik predmeta
- položaj mesta i pravca linija i površina predmeta
- pravilnost (tačnost) obrtanja površine oko izvesnih osa predmeta i
- površinska hrapavost predmeta.

Svaka od ovih veličina predmeta može da ima više mernih veličina.

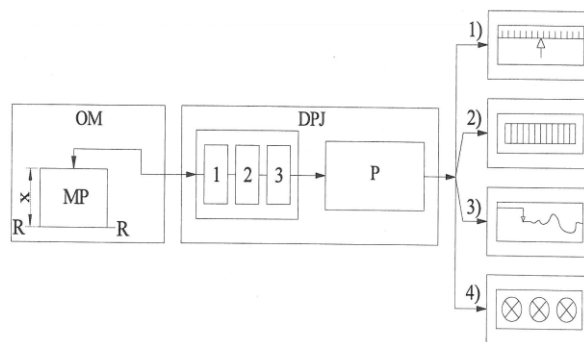
Prema opštoj teoriji sistema, merenje i kontrola su procesi koji se odvijaju u mernim, odnosno kontrolnim sistemima [11]. Prema ovoj teoriji, sistem se sastoji od objekata koje čine elementi, delovi ili sklopovi koji su međusobno povezani u celinu.

Kako je prikazano na slici 1, merno-kontrolni sistem čine: objekat merenja (OM), davačko-pretvaračka jedinica (DPJ) i indikatorska jedinica (1-analogni pokazivač, 2-digitalni pokazivač, 3-

registrator, 4-signalizator). MP je merni predmet, RR je referentna ravan, x je merna veličina, P je pojačavač, 1-merni pipak, 2-pretvarački niz, 3-predajnik.

Svaki merno-kontrolni sistem predstavlja kompleksan pretvarač ulaznog signala $x = x(t)$ u izlazni signal $y = y(t)$.

Primenom mernog sistema dobija se, na indikatorskoj jedinici, izlazni signal različitog oblika, zavisno od namene mernog sistema. Analizom izlaznog signala obezbeđuje se ocena kvaliteta proizvoda i tačnosti tehnološkog postupka izrade.



Sl. 1. Strukturalna šema merno-kontrolnog sistema i načina prikazivanja rezultata [4]

3. PNEUMATSKI MERNO-KONTROLNI SISTEMI

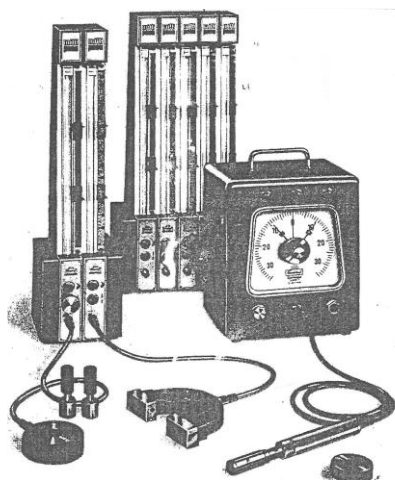
Davač, u merno-kontrolnom sistemu, ima zadatak da kvantitativno "opaža" mernu veličinu preko mernog pipka, da je u pretvaraču transformiše u odgovarajuću fizičku veličinu i, zatim, preko prenosne jedinice preda indikatorskoj jedinici.

Pneumatski davači (senzori) se odlikuju brojnim prednostima u poređenju sa ostalim davačima, od kojih se posebno ističu:

- visoka osetljivost (uvećanje merne

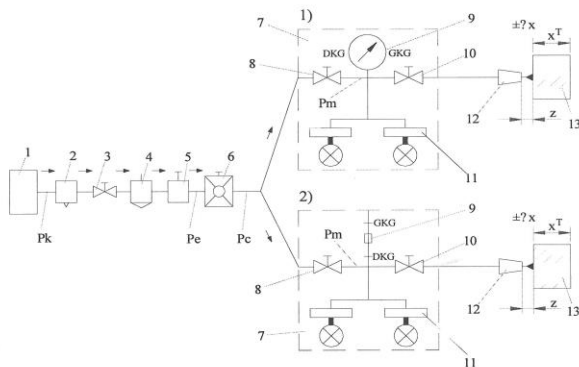
karakterisike Δx do 100000 puta)

- velika tačnost merenja-kontrole, čak do $0.05\mu\text{m}$
- bezkontaktno merenje-kontrola, tj. bez oštećenja mernog pipka
- mogućnost merenja-kontrole na teško pristupačnim mestima
- mogućnost merenja-kontrole na velikim rastojanjima (udaljenost od davača do indikatora čak i do 250m)
- velika brzina merenja-kontrole
- mogućnost merenja-kontrole u uslovima vibracije okoline
- velika mogućnost automatizacije proizvodnih procesa.



Sl. 2. Pneumatski merno-kontrolni uređaji

Princip merenja kod ovih uređaja je pomoću sabijenog vazduha. Vazduh, pod približno konstantnim pritiskom, se propušta kroz zazor između ispusne cevi instrumenta i površine mernog predmeta. U zavisnosti od odstupanja dimenzija mernog predmeta povećaće se ili smanjiti zazor što ima za posledicu povećanje ili smanjenje pritiska vazduha. Merenjem pritiska pomoću osetljivog manometra mogu se utvrditi odstupanja dimenzija mernog predmeta od nominalne mere.



Sl. 3. Funkcionalna šema pneumatskih merno-kontrolnih sistema [4]

Na prethodnoj slici prikazana je šema pneumatskih merno-kontrolnih sistema: 1) indikator sa kružnom skalom i kazaljkom, 2) indikator sa pravom skalom i plovkom, a na slici 2 fotografija ovih uređaja.

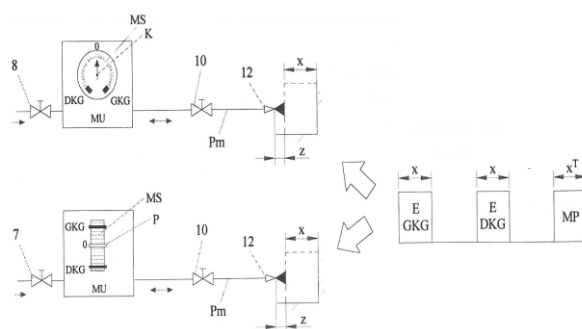
Princip rada:

Vazduh polazi iz kompresorske stanice (1) pod pritiskom P_k , prolazi kroz odvajач vode (2) gde se izdvaja vlaga i kondenzat, a zatim se slavinom (3) propušta kroz filter (4) gde se vrši filtriranje čvrstih nečistoća. Prečišćen vazduh prolazi kroz regulator pritiska (5) kojim se reguliše pritisak sa $P_k \approx 6\text{bar}$ na $P_e = (3.5-5)\text{bar}$. Ovako pripremljen vazduh prolazi kroz precizni regulator pritiska (6) gde se pritisak precizno reguliše na $P_c = 1.5\text{bar}$ i takav uvodi u merni uređaj (7). Merni uređaj (7) sadrži diznu za nultu regulaciju uređaja (8), indikator merne veličine (9), slavinu za kontaktne vodove (10) i signalizator stanja merne veličine (11). Sve navedene komponente su povezane vodovima (plastični, gumeni). Merni uređaj (7) je, takođe, vodom vezan za mernu diznu (12).

Promena merne veličine x za $\pm\Delta x$ menja veličinu mernog zazora z usled čega se smanjuje protok vazduha Q , a povećava pritisak mlaza vazduha u zazoru z . Ovaj pritisak se naziva merni pritisak P_m i očitava na indikatoru (9) uređaja (7).

Pre početka merenja-kontrole vrše se podešavanja "0" uređaja i granične mere merne veličine x (DKG i GKG).

Postupak podešavanja se obavlja etaloniranjem mere x na način kako je prikazano na sledećoj slici.



Sl. 4. Etaloniranje uređaja [4]

Na prethodnoj slici MS je merna skala, koja može imati kazaljku (K) ili plovak (P), MU je merni uređaj, E su etaloni, MP je merni predmet.

Za svaku mernu veličinu x koja je zadata tolerancijom T potrebni su etaloni E, jedan sa X_{GKG} i jedan sa X_{DKG} , pri čemu je $X_{GKG} - X_{DKG} = T$.

Na merno mesto prvo se postavlja etalon E_{GKG} . Pritisak mlaza vazduha (merni pritisak P_m) se pokazuje na mernoj skali uređaja tako što

kazaljka, odnosno, plovak zauzmu odgovarajući položaj na skali. Ako kazaljka, tj. plovak pokazuju položaj van veličine skale (preko GKG) diznom (8) vrši se njihovo štelovanje do povratka na skalu (ispod GKG). Ovaj položaj se verifikuje za položaj GKG i na isti postavlja odgovarajući pokretni klizač. Ako kazaljka, tj. plovak pokazuju položaj van veličine skale (ispod DKG) diznom (8) se, takođe, vrši štelovanje do povratka na skalu i to pri njenom delu za GKG.

Na merno mesto se zatim postavlja drugi etalon E_{DKG} . Pritisak mlaza vazduha (merni pritisak P_m) se pokazuje na mernoj skali uređaja položajem kazaljke, odnosno, plovka. Postupak je isti kao prethodno opisan, za određivanje GKG. Ovaj drugi položaj se verifikuje za položaj DKG i na isti postavlja drugi pokretni klizač. Postavljanjem oba klizača verifikovan je položaj tolerantnog polja T merne veličine x.

Kada se završi proces podešavanja, sledi proces merenja merne veličine x na mernim predmetima iz proizvodnje tako što se umesto etalona na mernom mestu postavljaju merni predmeti. Ako su mere urađene u tolerantnom polju (T), kazaljka, odnosno plovak zauzimaju

položaj na skali između postavljenih klizača (GKG i DKG) i takvi predmeti su kvalitetni. Ako mere nisu urađene u tolerantnom polju kazaljka, odnosno plovak zauzimaju položaj na skali van postavljenih klizača, iznad GKG ili ispod DKG, i takvi predmeti su nekvalitetni, a greška se direktno očitava na skali.

Skale su papirne i mogu da se menjaju u zavisnosti od potrebe mernog područja (opsega merenja).

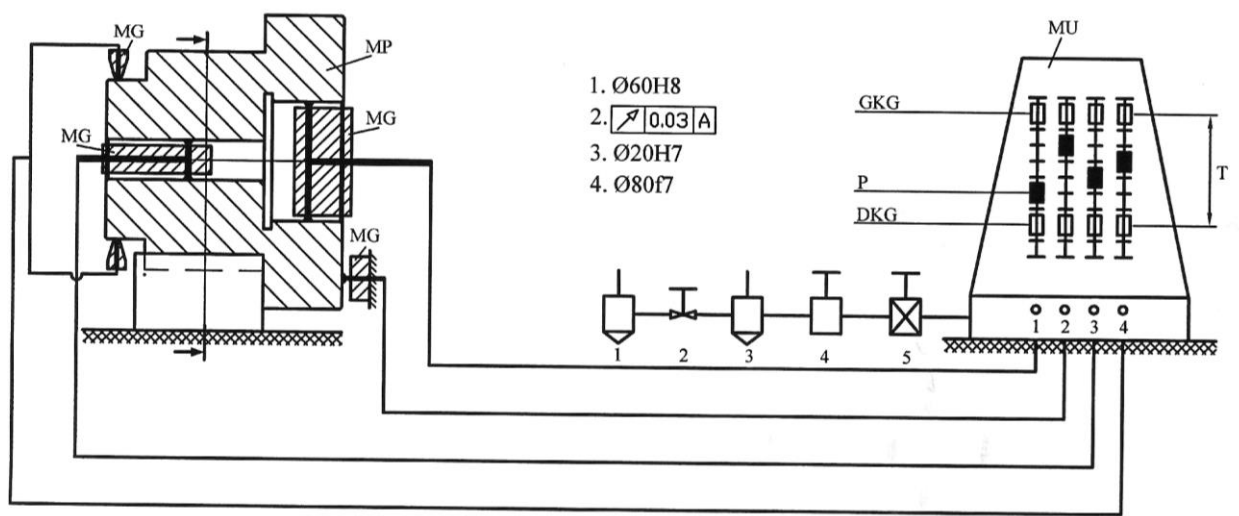
Davačko-pretvarački niz koji se ostvaruje u procesu merenja-kontrole je:

$$x \uparrow \rightarrow z \downarrow \rightarrow Q \downarrow \rightarrow p \uparrow \rightarrow P_m \uparrow$$

$$x \downarrow \rightarrow z \uparrow \rightarrow Q \uparrow \rightarrow p \downarrow \rightarrow P_m \downarrow$$

To znači da kada vrednost merne veličine x raste, veličina zazora z se smanjuje, protok Q se smanjuje, pritisak vazduha p se povećava i merni pritisak P_m se povećava. Takođe, kada se vrednost merne veličine x smanjuje, veličina zazora z se povećava, protok Q se povećava, pritisak vazduha p se smanjuje i merni pritisak P_m se smanjuje. Promenom pritiska menja se položaj kazaljke, odnosno plovka na mernoj skali.

U ovom primeru su korišćeni pneumatski uređaji sa pravom skalom i plovkom.



Sl. 5. Merno-kontrolna šema za merenje, odnosno kontrolu zadatah mernih veličina

4. OPIS RADA MERNO-KONTROLNE ŠEME

Na merno-kontrolnoj šemi su označene mere koje treba kontrolisati, a to su:

- spoljašnji prečnik nosača $\phi 80f7$
- unutrašnji prečnici $\phi 20H7$ i $\phi 60H8$ i
- ravnost obrtanja (aksijalno bacanje) na označenom mestu.

Merni predmet se postavlja u prizmu tako što se oslanja na površinu A (na prečnik $\phi 110f7$) u odnosu na koju se meri ravnost obrtanja. U tom položaju se mogu kontrolisati i ostale zadate kote. Na mernom uređaju baždare se četiri skale i na njima se kontrolišu:

- na prvoj skali, dok se nosač okreće u prizmi, kontroliše se unutrašnji otvor $\phi 60H8$
- u istom položaju, na drugoj skali, kontroliše se ravnost obrtanja (aksijalno bacanje)
- na trećoj skali kontroliše se unutrašnji prečnik $\phi 20H7$ i
- na četvrtoj skali kontroliše se spoljašnji prečnik $\phi 80f7$.

Promena merne veličine x , za sva četiri merenja, menja veličinu zazora z između mernog predmeta MP i merne glave MG, pa se ostvaruje sledeći pretvarački niz:

$$\begin{aligned} & \rightarrow z \uparrow \rightarrow Q \uparrow \rightarrow p \downarrow \rightarrow \text{plovak (P)} \downarrow \\ \pm x \rightarrow \pm z & \\ & \rightarrow z \downarrow \rightarrow Q \downarrow \rightarrow p \uparrow \rightarrow \text{plovak (P)} \uparrow \end{aligned}$$

Prethodno je izvršeno podešavanje kontrolnih granica (GKG i DKG) pomoću odgovarajućih etalona i postavljeni su pokretni klizači koji definišu položaj GKG i DKG za zadate merne veličine.

Ako se plovak (P) nalazi između gornje i donje kontrolne granice kontrolisana mera je dobra.

Ako se plovak (P) nalazi van kontrolnih granica, iznad GKG ili ispod DKG, kontrolisana mera nije dobra.

Na ovaj način u jednom položaju mernog predmeta, primenom četiri merne skale (prikazano na merno-kontrolnoj šemi), znatno se skraćuje vreme kontrole i složenosti sistema merno-kontrolne šeme, pri čemu je moguće vršiti kontrolu mnogo većeg broja komada za kraće vreme, što je posebno korisno kada je u pitanju velikoserijska proizvodnja.

5. ZAKLJUČAK

Neprekidan razvoj i usavršavanje tehnike i tehnologije proizvodnje, zahteva i razvoj metoda i opreme za ocenu kvaliteta proizvoda.

Kvalitet svakog proizvoda zavisi od kvaliteta

njegovih geometrijskih karakteristika koji je ostvaren u procesu proizvodnje. Zato se merenje i kontrola geometrijskih karakteristika proizvoda (dužine, ugla, oblika položaja, tačnosti obrtanja i površinske hrapavosti) javljaju kao najčešći problem u proizvodnoj metrologiji. Izbor merno-kontrolnih uređaja ima važnu ulogu u kompleksu proizvodnog mašinstva, jer se celokupna kontrola kvaliteta proizvoda i upravljanje kvalitetom zasniva na upotrebi merno-kontrolnih uređaja, odnosno pribora i direktnom korišćenju rezultata merenja bez obzira o kojoj se fazi procesa radi (izrada, montaža, ispitivanje).

6. REFERENCE

- [1] Lazić, M.: Osnovi metrologije, Univerzitet Svetozar Marković, Mašinski fakultet Kragujevac, 1987.
- [2] Cogorno, G.: Geometric Dimensioning and Tolerancing for Mechanical Design, McGraw-Hill, New York, 2006.
- [3] Kolarević, M.: Proizvodna metrologija-praktikum za laboratorijske vežbe, Mašinski fakultet Kraljevo, 2005.
- [4] Ivanović, P.: Projektovanje tehnološko-mernih sistema, Visoka Tehnička Mašinska Škola, Trstenik
- [5] Zaimović-Uzunović, N.: Mjerna tehnika, Univerzitet u Zenici, Mašinski fakultet, Zenica, 2006.
- [6] Popović, B., Kamberović, B.: Merenje i kontrola geometrije proizvoda, Naučna knjiga, Beograd, 1986.
- [7] Barišić, R.: Savremena tehnička kontrola proizvodnje, Tehnička knjiga, Beograd, 1982.
- [8] Grupa autora: Merenje i kontrola u mašinstvu, NIRO „Tehnička knjiga“, Beograd, 1982.
- [9] Stanić, J.: Tehnološki merni sistemi, Mašinski fakultet, Beograd, 1991.
- [10] Majstorović, V.: Tehnološki merni sistemi, Mašinski fakultet, Beograd
- [11] Stanković, P.: Mašine alatke i industrijska proizvodnja mašina III-1 sveska-Merenje i kontrola, Naučna knjiga, Beograd, 1954.

Autori: Mast. inž. maš. Violeta Đorđević, Prof. dr Milomir Mijatović, Visoka Tehnička Mašinska Škola Trstenik, Radoja Krstića 19, 37240 Trstenik, Srbija, Tel: +381 37 714 121, Fax: +381 37 714 121.

E-mail: vm1728mm1212@gmail.com
milomir.mijatovic@vtmsts.edu.rs

**SCIENTIFIC CONFERENCE WITH INTERNATIONAL
PARTICIPATION
ETIKUM 2017
NOVI SAD, SERBIA, DECEMBER 6-8, 2017**

Birdahić, V., Hadžistević, M., Imamović, N., Šišić, M.

**ANALIZA EFEKATA IMPLEMENTACIJE STANDARDA ISO 14001 U
ORGANIZACIJAMA METALSKOG SEKTORA**

***Rezime:** U radu su prezentirani rezultati istraživanja efekata implementacije standarda ISO 14001 u organizacijama metalnog sektora u Bosni i Hercegovini na organizacijsko-menadžerske poslove. Efekti implementacije su analizirani primjenom deskriptivnih statističkih veličina. Prezentirani rezultati nedvosmisleno pokazuju da su implementacijom standarda ISO 14001 u organizacijama metalnog sektora najveći pozitivni efekti na organizacijsko-menadžerske poslove postignuti za: Vizije razvoja obavljanja procesa proizvodnje, finansijski plan sredstava za okolinsko upravljanje te organizacionu strukturu proizvodnje. Najmanji uticaj standard za sistem okolinskog upravljanja je imao na korektivne i preventivne mjere i strateško planiranje.*

***Ključne riječi:** standard ISO 14001, organizacijsko-menadžerski poslovi, deskriptivna statistika*

1. UVOD

Sistem okolinskog upravljanja, je dio sistema upravljanja koji se primjenjuje kako bi se upravljalo aspektima okoliša, ispunile obaveze usklađenosti i obradili rizici i prilike.[1]

Standard ISO 14001 zahtjeva struktuiranje procesa, a organizacija po svom izboru može da implementira standard u samo jednom njenom dijelu ili na nivou cijele organizacije.[2] Metalna industrija obuhvata: metaloprerađivačku granu, mašinogradnju, automobilsku industriju, proizvodnju električnih mašina i brodogradnju. Mašinogradnja i proizvodnja automobila su centralne grane i najvažniji proizvodi u privrednoj strukturi svake tehnološki razvijene zemlje.[3] Prikupljanje podataka za istraživanje u radu u certificiranim organizacijama obavljeno je metodom anketiranja, kojom se na temelju anketnog upitnika istražuju, informacije, stavovi i mišljenja o predmetu istraživanja.[4] Upitnik je sastavljen iz više različitih poglavlja kao jedinstven dokument, tako da su različite oblasti razdvojene prema sadržaju i cilju istraživanja. Za interpretaciju rezultata korištene su statističke deskriptivne veličine: aritmetička sredina (M), standardna devijacija (Sd), varijansa (V). Ove veličine predstavljaju mjere varijabilnosti koje govore koliko pojedinačni rezultati variraju oko aritmetičke sredine. Ukoliko je standardna devijacija manja, to je sabijenost podataka oko aritmetičke sredine veća, pa je reprezentativnost podataka veća. Dakle, što je veća standardna devijacija, veća je i varijabilnost.

2. EFEKTI IMPLEMENTACIJE STANDARDA ISO 14001 NA ORGANIZACIJSKO-MENADŽERSKE POSLOVE U ORGANIZACIJAMA

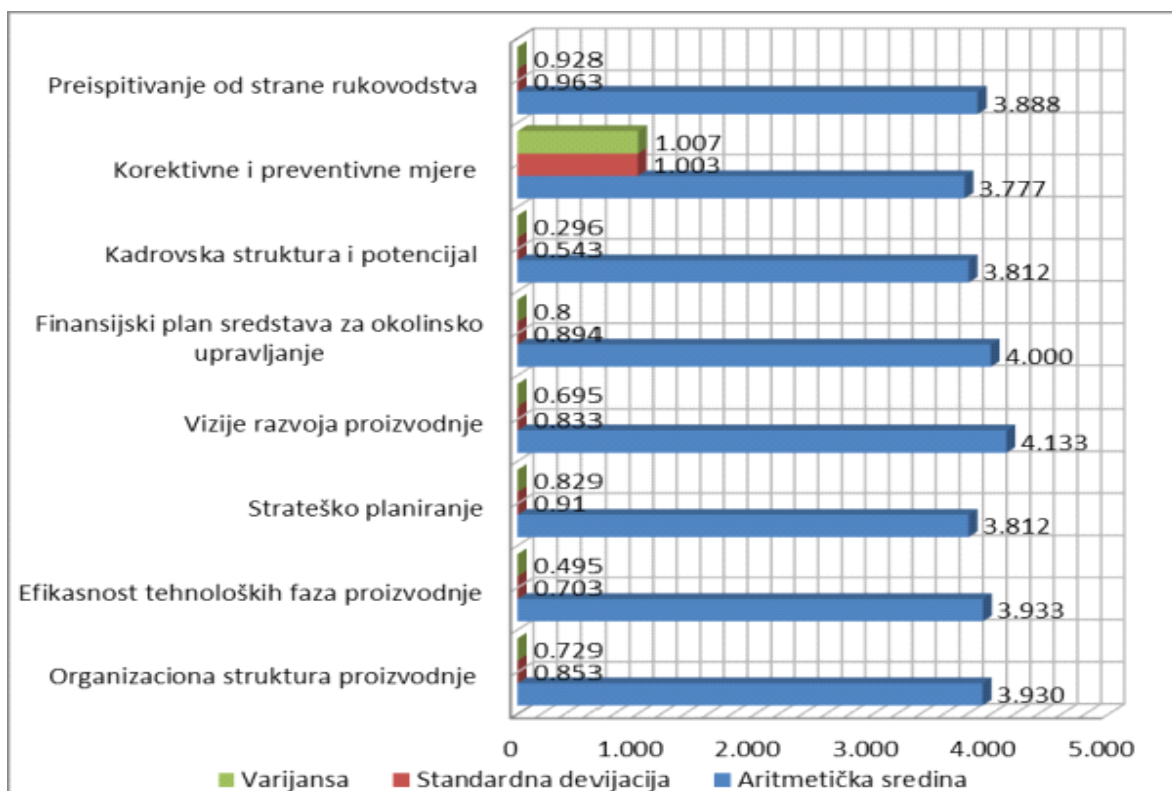
Predmetnim istraživanjem definisano je osam vrsta organizacijsko-menadžerskih poslova datih u Tabeli 1., na koje su ispitanici u istraživanim organizacijama dali ocjene kao odgovore kojima iznose stepen usaglašenosti prema postavljenom pitanju. Analiza uticaja uvođenja sertifikata na organizacijsko-menadžerske poslove je izvršena na osnovu prikupljenih podataka iz organizacija, definisanih kao tvrdnja prema petostepenoj skali Likertovog tipa (vrsta skale stavova koja se sastoji od niza tvrdnji posvećenih različitim aspektima nekog stava). Prikupljanje podataka odnosno ocjena nivoa slaganja izvršena je prema sljedećem značenju ocjena: 1- značajno slabiji (manji), 2- slabiji (manji), 3- jednaki (isti), 4- bolji (veći), 5- značajno bolji (veći). Prikupljeni podaci su dalje statističkom obradom i proračunom statističkih veličina, korišteni za procjenu uticaja uvođenja sertifikata ISO 14001 na organizacijsko-menadžerske poslove. Vrijednosti proračunatih statističkih veličina za istraživane organizacijsko-menadžerske poslove, prikazane su u Tabeli 1.

Tabela 1. Efekat uvođenja certifikata na organizacijsko-menadžerske poslove

Organizacijsko-menadžerski poslovi	Redoslijed uticaja	Deskriptivna statistika			
		Aritmetička sredina	Standardna greška	Stand. devij.	Varijansa
Organizaciona struktura proizvodnje	3	3,937	0,213	0,853	0,729
Efikasnost tehnoloških faza proizvodnje	4	3,933	0,181	0,703	0,495
Strateško planiranje	7	3,812	0,227	0,910	0,829
Vizije razvoja proizvodnje	1	4,133	0,215	0,833	0,695
Finansijski plan sredstava za okolinsko upravljanje	2	4,000	0,223	0,894	0,800
Kadrovska struktura i potencijal	6	3,812	0,135	0,543	0,296
Korektivne i preventivne mjere	8	3,777	0,236	1,003	1,007
Preispitivanje od strane rukovodstva	5	3,888	0,227	0,963	0,928

Prema prikazanim podacima u Tabeli 1., najveći uticaj kada su u pitanju organizacijsko-menadžerski poslovi u svim organizacijama metalnog sektora, uvođenje certifikata je imalo na Vizije razvoja proizvodnje ($M=4,133$; $Sd=0,833$) a zatim na Finansijski plan sredstava za okolinsko upravljanje ($M=4,000$; $Sd=0,894$). Najmanji uticaj certifikat za sistem okolinskog upravljanja je imao na Korektivne i preventivne mjere ($M=3,777$; $Sd=1,003$) i Strateško planiranje ($M=3,812$; $Sd=0,910$). Prema ovim konstatacijama, vidi se da je certifikat doprinio

pozitivnom efektu kod svih organizacijsko-menadžerskih poslova koje uprava organizacije vodi i planira a najviše za Vizije razvoja obavljanja procesa proizvodnje i planiranja Finansijskih sredstava za potrebe okolinskog upravljanja, osim za Korektivne i preventivne mjere. Prema prikazanim podacima u Tabeli 1., kolona Redoslijed uticaja, daje poredak od najvećeg (označen brojem 1), ka manjem (označen brojevima 2, 3, itd.) uticaju standarda na organizacijsko - menadžerske poslove.



Sl.1. Histogram uticaja standarda ISO 14001 na organizacijsko-menadžerske poslove

Na osnovu proračunatih vrijednosti deskriptivnih veličina prikazanih u Tabeli 1., na Slici 1. prikazane su sve vrijednosti statističkih deskriptivnih veličina (aritmetička sredina, standardna devijacija, varijansa. Nadalje, jednosmjernom analizom varijanse (ANOVA) istražen je međusobni uticaj faktora (grupa) na koji je certifikat imao najveći pozitivan efekat (vizija razvoja proizvodnje) i preostalih sedam faktora koji su definisani i analizirani u okviru organizacijsko -menadžerskih poslova.

Dakle, izvršeno je testiranje značajnosti nivoa slaganja faktora na koje je certifikat imao najveći pozitivni uticaj tj. faktor Vizija razvoja proizvodnje prema svim preostalim grupama tj. faktorima vezanih za organizacijsko-menadžerske poslove. Rezultati analize varijanse i homogenosti varijanse, samo u slučajevima gdje je utvrđena značajna statistička razlika nivoa slaganja između faktora, su prikazani u Tabelama 2. i 3.

Tabela 2. Analiza varijanse (ANOVA)

Faktori/Grupe:	Suma kvadrata	df	Sredine kvadrata	F	Sig.
1. Vizija razvoja proizvodnje 2. Strateško planiranje					
Između grupa 1. i 2.	7,325	3	2,442	5,292	0,017
Unutar grupa 1 i 2.	5,075	11	0,461		
Ukupno	12,400	14			

Iz Tabele 2. vidi se da postoji statistički značajna razlika na $p < 0,05$ nivou za dvije grupe faktora tj. grupa na koje je certifikat imao najveći uticaj a to su: 1. Vizija razvoja proizvodnje, i 2. Faktor strateško planiranje. Evidentno je da za vrijednosti Fišerovog testa ($F=5,29$) postoje dva stepena slobode ($df_1=3$, $df_2=11$) za koje je određena tj. proračunata vjerovatnoća $p=0,017$ manja od postavljenog praga značajnosti $\alpha=0,05$ ($p=0,017 < \alpha=0,05$). Na ovaj način, je potvrđeno da između ovih grupa tj. faktora, postoji statistički značajna razlika uticaja uvođenja standarda tj. standard je imao statistički značajno veći uticaj na faktor Vizija razvoja proizvodnje u odnosu na faktor Strateško planiranje u okviru organizacijsko - menadžerskih poslova. U interakciji i testiranju preostalih razlika nivoa slaganja između ovih faktora nisu utvrđene statistički značajne razlike.

tj. varijanse nisu homogene (parametrijska ispitivanja se ne mogu koristiti). Ako je vrijednost testa $\geq 0,05$, varijanse su homogene.

3. ZAKLJUČAK

Prema rezultatima ovog istraživanja, može se zaključiti da je implementacijom standarda ISO 14001 u organizacijama metalnog sektora kada su u pitanju organizacijsko - menadžerski poslovi, utvrđen najveći uticaj standarda na Vizije razvoja obavljanja procesa proizvodnje a zatim na Finansijski plan sredstava za potrebe okolinskog upravljanja. Najmanji uticaj odnosno najmanji pozitivan efekat uvođenjem u organizacijama standard za sistem okolinskog upravljanja, je imao na Korektivne i preventivne mjere te Strateško planiranje. Testiranjem značajnosti nivoa slaganja faktora (vrste poslova) također je potvrđeno da između faktora postoji statistički značajna razlika na $\alpha=0,05$ nivou, odnosno standard je imao statistički značajno veći uticaj na faktor Vizija razvoja proizvodnje u odnosu na faktor Strateško planiranje. Prema ovim konstatacijama, može se zaključiti da implementacija standarda ISO 14001 u istraživanim organizacija doprinosi pozitivnim efektima obavljanja navedenih organizacijsko - menadžerskih poslova, kojima uprave organizacija rukovode i planiraju iste izvršiti u narednom periodu.

Tabela 3. Levene-ov test homogenosti varijanse

Levene-ovtest	df₁	df₂	Sig.
0,166	1	11	0,692

Tabela 3. prikazuje vrijednost Levene-ovog testa (0,166), koji služi za procjenu homogenosti varijanse, što je preduvjet za parametarske testove kao što su t-test i ANOVA. Ako je vrijednost ovog testa manja od 0,05, tada su V-varijanse značajno različite

4. REFERENCE

- [1] Međunarodna norma ISO 14001: 2015, Sustavi upravljanja okolišem – Zahtjevi s uputama za primjenu, Treće izdanje, Ženeva, Švicarska, 2015.
- [2] Aćimović, N.: Kako akreditovati laboratoriju sa aspektom na ISO 14001. Građevinska knjiga, Beograd, 1994.
- [3] Razvoj industrijske politike u FBiH, Mašinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, Fakultet strojarstva i računarstva Sveučilišta u Mostaru, 2009.
- [4] Čekić,Š.:Osnovi metodologije i tehnologije izrade znanstvenog i stručnog djela, FSK, Sarajevo,1999. god., str. 73.

Autori: **mr.sc. Vehid Birdahić**, Ministarstvo unutrašnjih poslova Zeničko - dobojskog kantona Zenica, **Prof. Dr. Miodrag Hadžistević**, Univerzitet Novi Sad, Fakultet Tehničkih Nauka, **Doc. dr. Nusret Imamović**, Univerzitet u Zenici, Mašinski Fakultet Zenica, **mr. sc. Muvedet Šišić**, ALBA Zenica.

E-mail: vehidbirdahic@yahoo.com
miodrags@uns.ac.rs
nimamovic@mf.unze.ba
sisic@alba.ba

**SCIENTIFIC CONFERENCE WITH INTERNATIONAL
PARTICIPATION
ETIKUM 2017
NOVI SAD, SERBIA, DECEMBER 6-8, 2017**

Kolarević, M., Đorđević, V., Milunović, V., Grković V.

STATISTIČKA KONTROLA PROCESA SKLAPANJA SIGURNOSNIH BLAGAJNI

Rezime: Na osnovu raspoložive dokumentacije privrednog društva "PRIMAT OPREMA" DOO Baljevac u radu je urađena statistička analiza procesa sklapanja blagajni STARPRIM/N sigurnosnog stepena od 1-4. proizvedenih u prvom tromesečju 2017. godine. Nakon provere stabilnosti procesa primenom atributivnih kontrolnih karti kvaliteta, sprovedena je analiza brojnosti i selekcija uticajnih grešaka uz pomoć Pareto analize i dat predlog korektivnih i preventivnih mera za unapređenje kvaliteta.

Ključne reči: unapređenje kvaliteta, "c"- karta, Pareto analiza.

1. UVOD

Unapređenje kvaliteta je jedan od osnovnih zahteva standarda ISO 9001:2008. Primena statističke kontrole procesa je neophodna za brzo uočavanje grešaka i selekciju parametara koji utiču na nestabilnost procesa radi preduzimanja korektivnih mera za njeno otklanjanje i konstantno unapređenje kvaliteta proizvoda i procesa.

2. SIGURNOSNE BLAGAJNE

Preduzeće Primat OPREMA DOO - Baljevac proizvodi sigurnosnu opremu koja se koristi za čuvanje dragocenosti kao što su važna dokumenta, novac, nakit i sl. Sva sigurnosna oprema je sertifikovana od strane nemačkog instituta VdS, prema Evropskom standardu EN 1143-1. Ovaj standard definiše visok nivo sigurnosti od protivprovalnih uređaja i meri se u jedinicama otpora RU (Resistant Unit). Značajan deo proizvodnog programa čine sigurnosne blagajne stepena sigurnosti od 1 do 4. Proizvode se u veličinama od 15 do 780 litara i sa stepenom sigurnosti od 1 do 4.



Sl. 1. Modeli blagajni opšte i specijalne namene

S obzirom na to da se ove blagajne koriste u bankama i kancelarijama neophodno je da pored zahteva sigurnosti i estetskog izgleda zadovolje i neke funkcionalne karakteristike kao što su: lako otvaranje i zatvaranje vrata i pouzdano zaključavanje. Iz tog razloga neophodno je pratiti

greške koje utiču na kvalitet ovih karakteristika i preduzeti odgovarajuće korektivne mere za njihovo otklanjanje i sprečavanje njihovog ponovnog nastanka.

3. STATISTIČKA KONTROLA PROCESA

3.1 Kontrola proizvoda

Preduzeće „PRIMAT OPREMA“ DOO – Baljevac primenjuje QMS i usaglašeno je sa zahtevima standarda ISO 9001:2008. Kontrola proizvoda i način evidentiranja rezultata sprovodi se po proceduri za kontrolu proizvoda POB-824-101 koja podrazumeva upotrebu atributivnih kontrolnih karti i Pareto analizu. Tehnološki proces sklapanja blagajni podeljen je u tri faze: spajanje omotača zavarivanjem, montažu vrata i crnu montažu. U zavisnosti od veličine blagajni i stepena sigurnosti postoje različiti oblici kontrole i zahtevi koje proizvod mora da ispuni.

3.2 Klasifikacija grešaka

Greške koje nastaju u procesu sklapanja su klasifikovane po stepenu sigurnosti i iste su za sve modele blagajni u okviru istog stepena sigurnosti. Analiza stabilnosti procesa će biti ilustrovana na blagajnama tipa Starprim 3/N za koje je definisano 26 različitih vrsta grešaka koje treba kontrolisati 100% (tabela 1).

3.3 Analiza stabilnosti procesa

Kontrolisanje je izvršeno u periodu od 13.02.2017. do 21.02.2017. godine na 90 blagajni tipa „Starprim 3/N“ i to: 30 blagajni 3070/N, 40 blagajni 3095/N, 10 blagajni 3175/N i 10 blagajni 3215/N. Podaci o broju ustanovljenih nedostataka su prikazani u tabeli 2. U istoj tabeli je izvršeno sabiranje ukupnog broja grešaka po svakom proizvodu.

Tabela 1. Klasifikacija grešaka na modelu kasa Starprim 3/N

Naziv greške	Oznaka
Poravnatost čaure sa dnom	G1
Ispravno postavljen nosač detek. zvuka	G2
Zavarivanje poklopca	G3
Zavarivanje detektora zvuka	G4
Zavrtanj za zatvaranje	G5
Dovođenje trake	G6
Distributer ispravno postavljen	G7
Unutrašnja visina	G8
Unutrašnja širina	G9
Spoljna visina	G10
Spoljna širina	G11
Spoljna dubina	G12
Upravnost stranica kase	G13
Ravnost stranica	G14
Obrušenost zavara	G15
Očišćenost od ostataka betona	G16
Poravnatost vrata sa kućištem	G17
Zazor između vrata i kućišta	G18
Zazor unutrašnjih vrata	G19
Oštre ivice	G20
Zavarivanje tečajnika	G21
Otvori za nosače polica	G22
Mera od poklopca do otvora za policu	G23
Lažano otvaranje vrata	G24
Prisutvo rastopljenih metalnih kapljica	G25
Prohodnost šipa	G26

Za ocenu stabilnosti proteklog procesa je korišćena c – karta. Vrednost centralne linije za c -

kartu iznosi:

$$CL_C = \bar{c} = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s c_i = \frac{80}{90} = 0,899 \quad (1)$$

gde je:

s – broj uzoraka ($s=90$);

c_i – broj defekata po jedinici proizvoda.

Kontrolne granice iznose:

$$GKG_C = \bar{c} + 3 \cdot \sqrt{\bar{c}} = 3,717 \quad (2)$$

$$DKG_C = \bar{c} - 3 \cdot \sqrt{\bar{c}} = 0,000$$

Granice zona „A“ (oblast između druge i treće standardne devijacije) i „B“ (oblast između prve i druge standardne devijacije) su:

$$\bar{c} + 2 \cdot \sqrt{\bar{c}} = 2,775$$

$$\bar{c} + 1 \cdot \sqrt{\bar{c}} = 1,832 \quad (3)$$

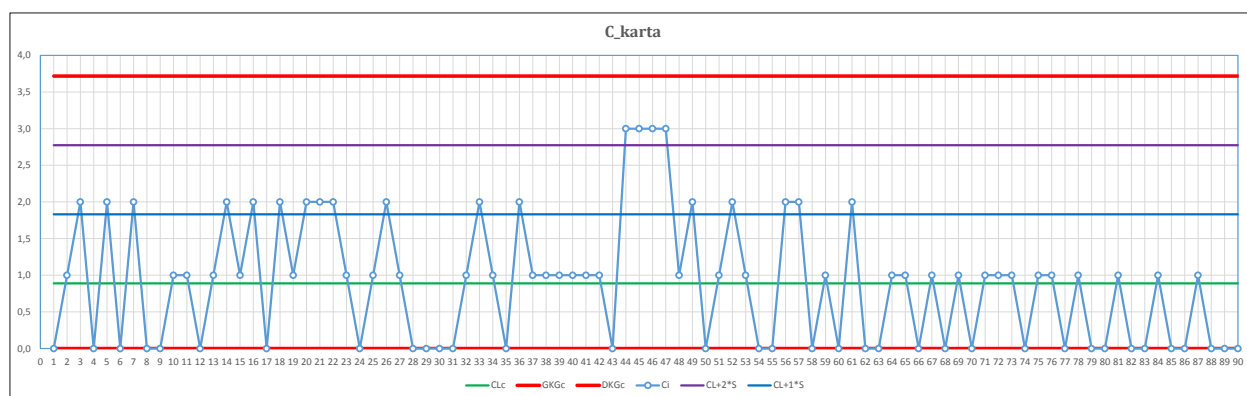
$$\bar{c} - 2 \cdot \sqrt{\bar{c}} = 0,000$$

$$\bar{c} - 1 \cdot \sqrt{\bar{c}} = 0,000$$

Izgled „ c “- karte sa ucrtanom centralnom linijom, kontrolnim granicama i granicama upozorenja pokazuje da se sve tačke nalaze unutar kontrolnih granica (slika 2) i da su ispoštovana sva 4 pravila za ocenu stabilnosti proteklog procesa te se može smatrati da je posmatrani proces bio pod kontrolom tj. stabilan.

Tabela 2. Podaci o greškama u procesu izrade blagajni Starprim 3/N

R. Br.	Proizvod	Šifra	Fabr. Br.	Datum	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	G12	G13	G14	G15	G16	G17	G18	G19	G20	G21	G22	G23G	G24	G25	G26	SUM
1	STARPRIM 3/N - 3070/N	11223203412	37770	17.02.2017																											0
2	STARPRIM 3/N - 3070/N	11223203412	37769	17.02.2017																	1										1
3	STARPRIM 3/N - 3070/N	11223203412	37771	17.02.2017																											2
4	STARPRIM 3/N - 3070/N	11223203412	37772	17.02.2017																1											0
5	STARPRIM 3/N - 3070/N	11223203412	37773	17.02.2017																											2
6	STARPRIM 3/N - 3070/N	11223203412	37775	17.02.2017																						1					0
7	STARPRIM 3/N - 3070/N	11223203412	37774	17.02.2017																1											2
8	STARPRIM 3/N - 3070/N	11223203412	37776	17.02.2017																											0
9	STARPRIM 3/N - 3070/N	11223203412	37777	17.02.2017																											0
10	STARPRIM 3/N - 3070/N	11223203412	37778	17.02.2017																											1
11	STARPRIM 3/N - 3070/N	11223203412	37779	18.02.2017																											1
12	STARPRIM 3/N - 3070/N	11223203412	37780	18.02.2017																											0
13	STARPRIM 3/N - 3070/N	11223203412	37781	18.02.2017																											1
14	STARPRIM 3/N - 3070/N	11223203412	37786	18.02.2017																											2
15	STARPRIM 3/N - 3070/N	11223203412	37787	18.02.2017																											1
16	STARPRIM 3/N - 3070/N	11223203412	37788	18.02.2017																											2
17	STARPRIM 3/N - 3070/N	11223203412	37793	18.02.2017																											0
18	STARPRIM 3/N - 3070/N	11223203412	37783	18.02.2017																											2
19	STARPRIM 3/N - 3070/N	11223203412	37786	18.02.2017																											1
20	STARPRIM 3/N - 3070/N	11223203412	37795	18.02.2017																											2



Sl. 2. C-kontrolna karta za blagajne Starprim 3/N

3.4 Pareto analiza

Na osnovu atributivnih kontrolnih karti može se ustanoviti stabilnost procesa tj. da li je proces pod kontrolom ili ne. Međutim, da bi se ustanovilo koje su greške najbrojnije i da bi se uticalo na njihovo otklanjanje i time postiglo unapređenje kvaliteta proizvoda potrebno je primeniti dodatne metode.

Za selekciju uticajnih grešaka primenjena je Pareto analiza. Razvrstavanjem grešaka prema brojnosti pojavljivanja dobija se tabela 3 u kojoj su greške klasifikovane u tri grupe (sl. 3):

- grupa A koja obuhvata 77,50% svih grešaka
- grupa B koja obuhvata 16,25 % svih grešaka
- grupa C koja obuhvata 6,25 % svih grešaka

Najvažnija za analizu je grupa koju čine greške:

- G15 - Obrušenost zavara (35,00%)
- G16 - Očišćenost od ostataka betona (13,75%)
- G22 - Otvori za nosače polica (12,50%)
- G18 - Zazor između vrata i kućišta (8,75%)
- G17 - Poravnatost vrata sa kućištem (7,50%)

Njihovim otklanjanjem bi se eliminisalo 77,50% svih grešaka koje se pojavljuju u procesu izrade blagajni „Starprim 3/N“. Kako se greška G15 najčešće pojavljuje (udeo ove greške je 35%) to na nju treba obratiti posebnu pažnju i primeniti korektivne mere za njeno otklanjanje.

U drugoj fazi je potrebno razmotriti i greške iz grupe B:

- G14 - Ravnost stranica (6,25%)
- G25 - Pucne-prisutvo rastopljenih metalnih kapljica (6,25%)
- G13 - Upravnost stranica kase (3,75%)

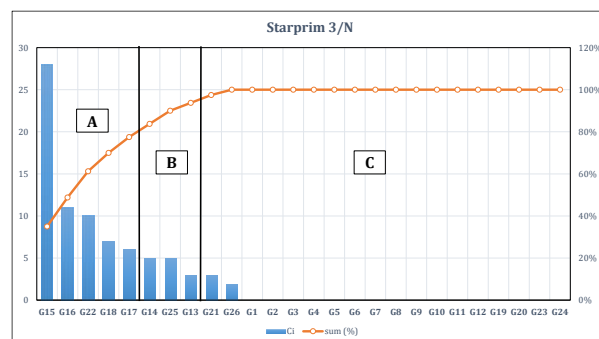
koje čine 16,25% svih grešaka i za njih je u sledećoj fazi neophodno preduzeti određene korake tj. korektivne mere. Greške iz grupe C čine manje od 7% svih grešaka i u ovoj fazi ih nije potrebno razmatrati.

Iz Pareto analize se može uočiti da se od ukupno 26 različitih grešaka pojavljuje samo njih 10 što je rezultat stalnog praćenja kvaliteta izrade ovih proizvoda i konstantnih napora za unapređenje procesa sklapanja ovih proizvoda.

Istom metodologijom je analizirana stabilnost procesa i izvršena selekcija najuticajnijih grešaka i za ostale blagajne stepena sigurnosti 1, 2 i 4. Analizirane su najuticajnije greške za sve tipove kasa klasifikovane u grupe A i B. U razmatranje je uzet i broj izrađenih kasa u posmatranom periodu kako bi se ustanovilo koje su greške najfrekventnije u procesu izrade blagajni tipa Starprim/N stepena sigurnosti od 1 do 4 (tabela 4).

Tabela 3. Klasifikacija grešaka prema brojnosti

STARPRIM 3/N					
Gi	Ci	sum	Ci (%)	sum (%)	Grupa
G15	28	28	35,00%	35,00%	A
G16	11	39	13,75%	48,75%	
G22	10	49	12,50%	61,25%	
G18	7	56	8,75%	70,00%	
G17	6	62	7,50%	77,50%	
G14	5	67	6,25%	83,75%	B
G25	5	72	6,25%	90,00%	
G13	3	75	3,75%	93,75%	
G21	3	78	3,75%	97,50%	C
G26	2	80	2,50%	100,00%	
G1	0	80	0,00%	100,00%	
G2	0	80	0,00%	100,00%	
G3	0	80	0,00%	100,00%	
G4	0	80	0,00%	100,00%	
G5	0	80	0,00%	100,00%	
G6	0	80	0,00%	100,00%	
G7	0	80	0,00%	100,00%	
G8	0	80	0,00%	100,00%	
G9	0	80	0,00%	100,00%	
G10	0	80	0,00%	100,00%	
G11	0	80	0,00%	100,00%	
G12	0	80	0,00%	100,00%	
G19	0	80	0,00%	100,00%	
G20	0	80	0,00%	100,00%	
G23	0	80	0,00%	100,00%	
G24	0	80	0,00%	100,00%	
Σ	80				



Sl. 3. Pareto dijagram za model kasa Starprim 3/N

3.5 Zbirna analiza grešaka

Svakako da je greška *Fina obrušenost zavara* najbrojnija i čini 41,79% svih grešaka kod sva četiri tipa blagajni i da na nju treba obratiti posebnu pažnju. Međutim, potrebno je naglasiti da značaj navedenih grešaka nije isti i da pojedine greške zahtevaju znatno veće vreme za otklanjanje a time izazivaju i veće troškove. Zato je neophodno analizirati uticaj i značajnost svih 13 različitih grešaka koje zajedno čine 94,63% svih grešaka koje se javljaju u procesu sklapanja blagajni. Zbog obimnosti rada i nedostataka podataka ove vrste, ova analiza nije dalje sprovedena.

Tabela 4. Klasifikacija grešaka prema brojnosti za sve modele kasa „Starprim/N“

R. Br.	Greška	PROCENAT GREŠAKA PO TIPU BLAGAJNE								Ukupan %	Kumulativ
		1/N	kom.	2/N	kom.	3/N	kom.	4/N	kom.		
1	Fina obrušenost zavara	41%	40	54%	80	35%	35	28%	50	41,79%	41,79%
2	Ravnost stranica	22%	40		80	6%	90	9%	50	7,36%	49,16%
3	Otvori za nosač polica		40		80	13%	90	15%	50	7,18%	56,33%
4	Položaj zavara na spoljašnjem kućištu	11%	40		80		90		50	1,71%	58,04%
5	Zavarivanje šarke		40	12%	80		90	11%	50	5,88%	63,92%
6	Zavar između vrata i kućišta		40	8%	80	9%	90	11%	50	7,66%	71,58%
7	Očišćenost od ostataka betona		40		80	14%	90	7%	50	6,18%	77,76%
8	Poravnatost vrata sa kućištem	7%	40		80	8%	90		50	3,74%	81,50%
9	Upravnost stranica blagajne	11%	40		80	4%	90	4%	50	3,72%	85,22%
10	Prisustvo rastopljenih metalnih kapljica		40	7%	80	6%	90	7%	50	5,67%	90,89%
11	Lagano otvaranje vrata		40	5%	80		90		50	1,66%	92,55%
12	Poravnatost vrata sa kućištem		40	4%	80		90		50	1,25%	93,80%
13	Ravnost vrata		40	3%	80		90		50	0,83%	94,63%

4. PREDLOG UNAPREĐENJA KVALITETA

Analizom je ustanovljeno nekoliko osnovnih razloga zbog kojih nastaju navedene greške:

1) *Nedovoljna obučenosť radnika* zbog stalne fluktuacije radnika i nemogućnosti da se obezbedi dovoljan broj kvalitetne radne snage. Iako se obuka radnika u privrednom društvu „Primat oprema“ DOO, Baljevac obavlja kontinualno, problem je i nedovoljan broj instruktora i stalna „hitnosć“ radnih naloga zbog čega se ova aktivnost ne može uvek sprovesti dovoljno kvalitetno. Pored toga, preporuka je i da se urade uputstva za izradu za sve operacije sklapanja blagajni sa detaljnim opisom operacije i vizuelnim prikazom pojedinih kritičnih delova operacije.

2) Pojedini šabloni tj. *pribori za zavarivanje pojedinih sklopova nisu dobri* i potrebno je izvršiti njihovu doradu. To je najčešće slučaj sa šablonom za zavarivanje šarke za plašt vrata blagajne.

3) *Nedovoljna motivisanost radnika*, zbog niskih zarada i loših uslova rada.

4) *Nedostatak radne kulture* i sl.

5. ZAKLJUČAK

Na osnovu izvršene analize može se zaključiti da je proces izrade blagajni iz proizvodnog programa sigurnosne opreme u privrednom društvu PRIMAT OPREMA DOO - Baljevac stabilan, ali da postoje značajne mogućnosti za poboljšanje kvaliteta proizvoda. Primena alata kvaliteta i statističke kontrole procesa u ovom privrednom društvu daje rezultate i veoma je korisna i ekonomski opravdana.

6. ZAHVALNICA

Ovaj rad je realizovan u okviru istraživanja na projektu TP 37020. Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog

razvoja Republike Srbije za podršku ovom istraživanju.

7. REFERENCE

- [1] Oakland, S. J.: *Statistical Process Control*, Fifth Edition, Butterworth Heinemann, 2003.
- [2] Chandra, J. M.: *Statistical Quality Control*, ©2001 CRC Press LLC
- [3] Juran J.M., Gryna F.M.: *Планирање и анализе квалитета од развоја производа до коришћења*, Привредни Преглед, Београд, 1974.
- [4] Vulcanović V. i dr.: *Metode i tehnike unapređenja procesa rada*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2003
- [5] Kolarević M., Pantelić T.: *Modification of C-control Chart*, 4-th International Scientific Conference Heavy Machinery 2002, Faculty Of Mechanical Engineering, proceedings, Kraljevo, pp D121-D124, 28-30 june 2002.
- [6] Kolarević M. i dr.: *Improving Product Quality of Security Equipment Using SPC*, 34th International Conference On Production Engineering, Niš 28-30. September 2011.

Autori: Prof. dr Milan Kolarević, Mast. inž. maš. Vukadin Milunović, Mast. inž. maš. Vladan Grković, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, Dositejeva 19, 36000 Kraljevo, Srbija, Tel: +381 36 383 269;

Mast. inž. maš. Violeta Đorđević, Visoka Tehnička Mašinska Škola Trstenik, Radoja Krstića 19, 37240 Trstenik, Srbija, Tel: +381 37 714 121, Fax: +381 37 714 121;

E-mail: kolarevic.m@mfkv.kg.ac.rs
vm1728mm1212@gmail.com
vuki.milunovic@gmail.com
grkovic.v@mfkv.kg.ac.rs

Mitrović, S, Jakovljević Ž.

**PRIMENA DISTRIBUIRANOG SISTEMA UPRAVLJANJA BAZIRANOG NA IEC
61499 I 802.15.4 STANDARDIMA**

Rezime: *Savremene proizvodne sisteme karakteriše potreba za kratkim odzivom na nove tržišne zahteve, uz vrhunski kvalitet proizvoda i maksimalnu efikasnost. Tako visok tehnološki nivo dostiže se primenom fleksibilnih tehnologija, čiji su osnov proizvodna sredstva sa rekonfigurabilnom hardverskom i softverskom strukturom. Distribuirano upravljanje podržava opisani pristup proizvodnji kroz decentralizovano izvršavanje upravljačkog zadatka na više inteligentnih (pametnih) uređaja. Uz adekvatnu primenu, distribuirano upravljanje može dovesti do značajnih ušteda energije, materijala i vremena. U okviru ovog rada opisan je distribuirani sistem upravljanja pneumatskim robotom zasnovan na standardu IEC 61499, uz upotrebu komunikacije bazirane na standardu IEC 802.15.4.*

Ključne reči: *distribuirano upravljanje, IEC 61499, ZigBee, pneumatski robot*

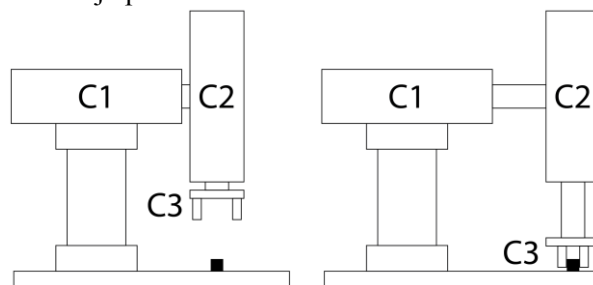
1. UVOD

Kibernetsko-fizički sistemi (*engl. CPS - Cyber-Physical Systems*) i internet stvari (*engl. IoT – Internet of Things*) predstavljaju nove koncepte koji, pod uticajem paradigme masovne kastomizacije i inicijative „Industrie 4.0“, polako pronalaze svoje mesto u industriji. Novi način proizvodnje podrazumeva primenu „pametnih“ (*engl. smart*) uređaja, modularan pristup gradnji sistema, kao i sveprisutnu vertikalnu i horizontalnu povezanost (umreženost) ljudi i uređaja [1]. Povezivanjem fizičkih objekata („pametnih“ senzora i aktuatora) sa digitalnim modelima, uz njihovo istovremeno međusobno povezivanje putem interneta stvari, dostiže se novi nivo apstrakcije koji omogućava upravljanje složenim procesima distribuiranjem upravljačkih zadataka na inteligentne proizvodne resurse [2]. „Pametni“ uređaji su modularni, portabilni i interoperabilni, što otvara mogućnost gradnje sistema koji se lako i brzo rekonfigurišu prema novim zahtevima. Eliminacijom centralnog upravljačkog sistema i distribucijom upravljačkog zadatka na međusobno povezane „pametne“ uređaje, moguće je postići značajne uštede u pogledu upotrebljenog hardvera, pošto se tip i broj komponenta sistema može vrlo precizno prilagoditi konkretnom zadatku, izbegavajući redundantnost koju često nameće tradicionalni pristup. Tehnologija i odgovarajući standardi koji bi trebalo da podrže opisani koncept još uvek su u fazi razvoja. Za eksperimentalne potrebe uglavnom se koriste široko dostupne, univerzalne hardverske platforme sa mikrokontrolerskom ili SoC (*engl. System on Chip*) bazom.

U ovom radu, pomenuti koncepti biće opisani kroz analizu razvijenog distribuiranog sistema upravljanja, implementiranog na eksperimentalnoj platformi koja emulira pneumatskog robota sa dva translatorna stepena slobode kretanja i pneumatskim hvatačem.

2. HARDVERSKA STRUKTURA I ZADATAK UPRAVLJANJA ROBOTOM

Razmatrani pneumatski „pick and place“ robot sadrži tri inteligentna aktuatora – dva cilindra za ostvarivanje translatornog kretanja i hvatač. Svaki od ovih aktuatora, C1, C2 i C3, pored samog pneumatskog cilindra, poseduje električno upravljani monostablinski razvodnik 5/2 za upravljanje radom cilindra, dva krajnja prekidača i sopstveni upravljački sistem – čvor, sačinjen od mikrokontrolera i komunikacionog modula kojim se vrši bežično povezivanje sa preostala dva čvora. Emulirani robot ima za zadatak da podigne objekat u svojoj neposrednoj blizini i premesti ga na predviđenu lokaciju u okviru radnog prostora, kao što je prikazano na slici 1.



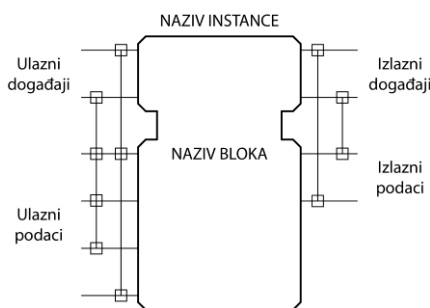
Sl. 1. Skica emuliranog pneumatskog robota

Za vreme rada, robot izvodi kretanje koje je opisano sekvencom:

$C2 + C3 + C2 - C1 + C2 + C3 - C2 - C1 -$, (1)
odnosno, spušta ruku, hvata objekat, podiže ruku, odlazi do lokacije, spušta ruku, ispušta objekat, podiže ruku i vraća se u početnu poziciju.

3. FUNKCIJSKI BLOKOVİ

IEC 61499 je standard koji definiše razvoj, primenu i ponovnu upotrebu funkcijskih blokova u okviru industrijske automatizacije [3]. Funkcijski blok predstavlja osnovni gradivni element za modeliranje ponašanja sistema [4]. Moguće je modelirati kako softverske, tako i hardverske komponente sistema. Suštinski, standard IEC 61499 definiše objektno orijentisani grafički jezik za programiranje centralizovanih i distribuiranih upravljačkih sistema, pri čemu se funkcijski blokovi mogu posmatrati kao klase, čije instance u konkretnim slučajevima služe za obavljanje zadataka. Opšti model funkcijskog bloka prikazan je na slici 2.

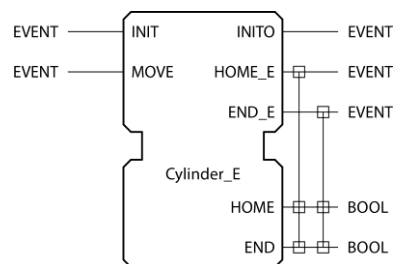


Sl. 2. Opšti funkcijski blok

Gornji deo bloka naziva se glava, unutar koje se definišu ulazni i izlazni događaji. Donji deo bloka naziva se telo, unutar kog se definišu ulazne i izlazne promenljive. Ulazni događaji i promenljive nalaze se s leve, a izlazni događaji i promenljive sa desne strane bloka. Svakom ulaznom/izlaznom događaju pridružene su ulazne/izlazne promenljive, čije vrednosti se očitavaju/osvežavaju u trenutku dešavanja datog događaja. Blok se aktivira, odnosno, započinje obavljanje definisanog zadatka po prispeću odgovarajućeg ulaznog događaja. Po obavljenom zadatku, generiše se odgovarajući izlazni događaj. Unutar bloka definišu se funkcije koje se aktiviraju ulaznim događajima, izvršavaju se nad vrednostima ulaznih promenljivih i generišu vrednosti izlaznih promenljivih i izlazne događaje.

U okviru ovog rada, za modeliranje sistema upravljanja korišćeno je razvojno okruženje FBDK [5], čiji je sastavni deo biblioteka već definisanih funkcijskih blokova potrebnih za razvoj konkretnih aplikacija. Specifični tipovi blokova mogu se posebno razvijati, a moguće je i modifikovati postojeće blokove. U ovom slučaju,

modifikacijom je dobijen novi blok kojim je modelirana hardverska komponenta sistema – pneumatski cilindar (*Cylinder_E*) – slika 3.



Sl. 3. Razvijeni funkcijski blok *Cylinder_E*

Cylinder_E se nakon inicijalizacije signalom INIT ponaša kao dvosmerni pneumatski cilindar – po pristizanju signala MOVE, u zavisnosti od trenutnog stanja, definisanog vrednostima promenljivih HOME (uvučeno) i END (izvučeno), dolazi do izvlačenja ili uvlačenja klipnjače. Po izvršenju postavljenog zadatka, blok generiše događaj HOME_E (završeno uvlačenje) i END_E (završeno izvlačenje), kojim obaveštava sve elemente sistema za koje je ovaj događaj interesantan da je izvršeno zadato kretanje.

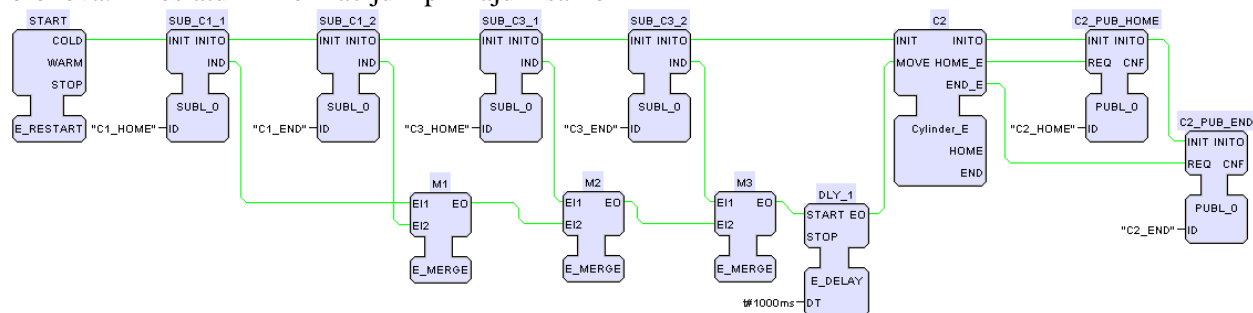
Prilikom kreiranja distribuiranog sistema upravljanja na osnovu standarda IEC 61499 polazna tačka je definisanje aplikacije koju sistem u celini treba da izvršava. Aplikacija se kreira povezivanjem odgovarajućih funkcijskih blokova. Logika razvijenog distribuiranog upravljačkog sistema za razmatrani pneumatski robot data je na slici 4. Osnovu prikazane logike čine funkcijski blokovi *Cylinder_E*, koji je već opisan, i *E_MERGE*, koji nad ulaznim događajima vrši „ILI“ logičku operaciju.

Funkcionalnost celokupnog sistema ostvarena je specifičnim načinom povezivanja ulaznih i izlaznih događaja, a kojim se eliminiše prenos vrednosti promenljivih. Posledično, isključena je potreba za prenosom velike količine podataka. Logika sa slike 4 omogućava funkcionisanje sistema u skladu sa sekvencom (1).

U okviru ovog rada, upravljanje se ostvaruje distribuirano, na tri „pametna“ čvora, po jedan čvor za svaki od tri aktuatora – C1, C2 i C3, pri čemu su čvorovi povezani u funkcionalnu celinu putem međusobne bežične komunikacije. Unutar FBDK okruženja, integralna logika sa slike 4 deli se na čvorove – definiše se koji će deo logike biti izvršavan na kom čvoru. Nakon podele logike, na mestima „preseka“ postavlja se odgovarajući komunikacioni interfejs koji vrši primanje informacija sa drugih čvorova, ili slanje informacija drugim čvorovima.

Na slici 5 prikazan je deo logike neophodan za funkcionisanje bežičnog čvora 2 koji upravlja cilindrom C2. *E_MERGE* blokovi koji su deo

integralne logike celog sistema sa slike 4, čine jezgro upravljačke logike samo za cilindar C2, u programu predstavljenog blokom Cylinder_E. Preostali blokovi su servisni i omogućavaju pravilno funkcionisanje celokupnog distribuiranog sistema ostvarujući komunikaciju između segmenata. Korišćeni su *publish* (PUBL_0) i *subscribe* (SUBL_0) blokovi, koji prenose informacije o događajima do i od ostalih delova distribuiranog sistema, respektivno. Korišćeni SUBL_0 blokovi podešeni su da primaju informacije o stanju prvog čvora (C1) i trećeg čvora (C3), koji mogu biti u uvučenom (HOME) i izvučenom stanju (END). U zavisnosti od informacija dobijenih preko *subscribe* blokova, čvor koji upravlja cilindrom C2 dovodi aktuator u uvučeno, ili izvučeno stanje (HOME ili END). Nakon obavljanja zahtevane radnje, novo stanje Cylinder_E bloka odašilje se putem PUBL_0 blokova. Poslatu informaciju primaju samo



Sl. 5. Prikaz distribuirane logike za čvor koji upravlja cilindrom C2, zajedno sa komunikacionim interfejsom u vidu *subscribe* (SUBL_0) i *publish* (PUBL_0) blokova.

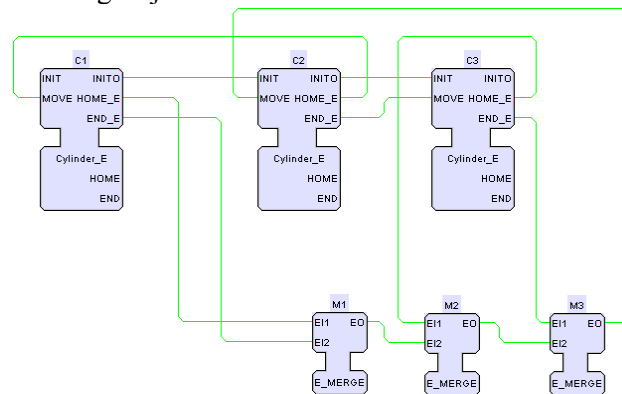
Nakon uspostavljanja virtuelnog modela upravljanja, pomenuti model je simuliran u okviru FBDK softvera u cilju provere ispravnosti rada. Po uspešno obavljenoj simulaciji, usledio je proces „prevođenja“ simulacionog kôda izraženog funkcijskim blokovima u jezik mikrokontrolera.

4. BEŽIČNI ČVOROVI

IEC 61499 je trenutno u fazi razvoja, predstavlja podršku projektovanju distribuiranog upravljanja i još uvek nije na nivou programskog jezika koji se može koristiti neposredno na velikom broju uređaja. Osnovni razlog za to je što proizvođači industrijske opreme ne nude podršku za svoje uređaje u vidu IEC 61499 funkcijskih blokova, što bi u nastavku omogućilo jednostavnu integraciju novih komponenata u odgovarajuće razvojne softverske sisteme.

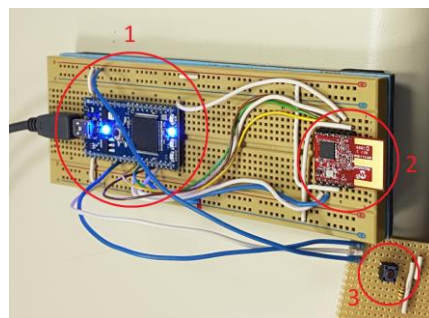
U okviru ovog rada su za implementaciju razvijenog distribuiranog sistema upravljanja korišćena 3 razvojna sistema *mbed NXP LPC1768* [6], svaki sa 32-bitnim ARM Cortex M3 mikrokontrolerom, sa radnim taktom od 96 MHz. Za ove mikrokontrolere ne postoji IEC 61499

čvorovi kojima je ona potrebna. S obzirom na to da se predstavljen oblik upravljanja realizuje bez prenosa vrednosti promenljivih i zavisi samo od promena stanja, on spada u vrstu upravljanja na bazi događaja.



Sl. 4. Upravljačka logika definisana funkcijskim blokovima

podrška. Iz navedenog razloga, mikrokontroleri su programirani programskim jezikom C++ čija se kompilacija odvija na serveru kompanije ARM [7]. C++ kôd za mikrokontrolere napisan je na osnovu aplikacije koja je razvijena u FBDK softveru. Odgovarajuće C++ klase generisane su emulirajući funkcijske blokove sadržane u FBDK aplikaciji kojom je u prvoj fazi izvedena simulacija distribuiranog sistema upravljanja.



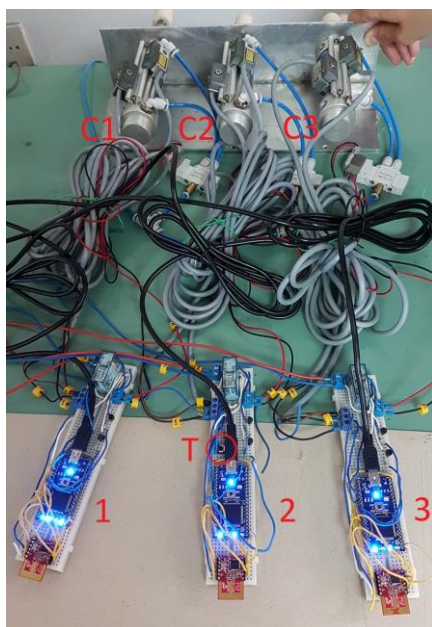
Sl. 6. Razvojni sistem mbed LPC1768 (1), Microchip MRF24J40MA 802.15.4 bežični modul (2) i taster za početak rada (3).

Za ostvarivanje bežične komunikacije između mikrokontrolera korišćen je integralni modul

Microchip MRF24J40MA [8] koji podržava IEEE 802.15.4 standard. Zajedno, mbed LPC1768 i MRF24J40MA čine bežični čvor (slika 6), sistem koji se može adresirati u bežičnoj mreži i čiji se zadaci mogu programirati.

5. EKSPERIMENTALNA PROVERA

Eksperimentalni sistem na kome je izvršena provera čine tri inteligentna pneumatska aktuatora (slika 7), opisana u poglavlju 2. Po puštanju u rad pritiskom na taster (T), sistem se ponašao očekivano. Izvlačenje i uvlačenje klipnjača odvijalo se predviđenim redosledom koji je zadat sekvencom (1). S obzirom na to da je upravljački sistem baziran na diskretnim događajima, od brzine pojavljivanja događaja zavisi brzina rada sistema. Na slici 7 očigledan je veliki broj kablova koji se u realnom sistemu mogu izbaciti postavljanjem čvorova direktno na aktuatore.



Sl. 7. Kompletna eksperimentalna aparatura – bežični čvorovi 1, 2 i 3, dvosmerni pneumatski cilindri C1, C2 i C3 i taster za početak rada T.

U toku testiranja, periodično, bez ustaljenog vremenskog okvira, nakon nasumičnog broja ciklusa, dešavali su se zastoji u radu sistema, prouzrokovani greškama u bežičnoj komunikaciji. Greška je najverovatnije u delu softvera koji upravlja komunikacionim modulom i biće otklonjena u narednoj iteraciji. Iako sistem nije u potpunosti stabilan i zahteva dalje dorade, može se smatrati da je provera koncepta uspešno izvedena.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu ilustrovana je primena novog standarda IEC 61499 kroz projektovanje i izvedbu

varijante distribuiranog upravljačkog sistema zasnovanog na diskretnim događajima. Razvijeni sistem je predviđen za upotrebu na pneumatskom robotu sa tri pneumatska cilindra (konfiguracija TT – kartezijski robot). U ovoj fazi rada izvedeno je rano testiranje upravljačkog sistema, bez povezivanja sa realnim robotom. Upravljački sistem, kroz komunikaciju između čvorova, uspešno obavlja saopšteni zadatak, uz potpuno odsustvo bilo kakvog oblika centralizovanog upravljanja. Celokupan zadatak je podeljen (distribuiran) na tri korišćena čvora koji sinergetskim dejstvom izvode željene akcije. Predstavljeni sistem može se primeniti na pneumatskom robotu, ali je potrebno prethodno izvesti određena unapređenja, koja bi doprinela sigurnijem radu.

7. REFERENCE

- [1] MacDougall, William, *INDUSTRIE 4.0 Smart Manufacturing for the Future*, Berlin, Germany Trade and Invest, 2014.
- [2] Zivana Jakovljevic, Stefan Mitrovic, Miroslav Pajic, *Cyber Physical Production Systems - An IEC 61499 Perspective*, Belgrade, Springer, 2017.
- [3] Valeriy Vyatkin, *IEC 61499 Function Blocks for Embedded and Distributed Control Systems Design*, 2nd edition, ISA, 2012.
- [4] James H. Christensen, Thomas Strasser, Antonio Valentini, Valeriy Vyatkin, Alois Zoitl, *The IEC 61499 Function Block Standard: Overview of the Second Edition*, ISA, 2012.
- [5] HOLOBLOC, INC – izvor FBDK softvera <http://www.holobloc.com/>
- [6] mbed LPC1768 stranica <https://os.mbed.com/platforms/mbed-LPC1768/>
- [7] online mbed ARM kompajler <https://os.mbed.com/accounts/login/?next=%2Fcompiler%2F>
- [8] Microchip MRF24J40MA stranica <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/MRF24J40MA>

Autori: Stefan Mitrović, istraživač-saradnik, Istraživačko-razvojni institut Lola, d.o.o, Kneza Višeslava 70a, 11030, Beograd,

Dr Živana Jakovljević, vanredni profesor, Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, 11120, Beograd.

E-mail: stefan.mitrovic@li.rs
zjakovljevic@mas.bg.ac.rs

Zahvalnica: U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektima pod evidencionim brojevima TR35004 i TR35020 koje finansijski podržava MPNTR Republike Srbije.

Čabrilo, A., Gerić, K.

ENERGIJA UDARA U ZAVARENOM SPOJU PANCIRNOG ČELIKA

Rezime: Pancirni čelici su komplikovani za zavarivanja usled visokog procenta ugljenika. Višenamenska oklopna vozila napravljena od pancirnog čelika su usled kretanja po neravnom terenu pod uticajem dinamičkog opterećenja. Visoka tvrdoća u grubo-zrnoj oblasti ZUT-a i dinamičko opterećenje mogu uzrokovati stvaranje prslina. Na osnovu pomenutog za pancirni čelik je neophodno postići zavareni spoj bez poroznosti ili prslina. U ovom radu je ispitana energija udara u zavarenom spoju pancirnog čelika. Cilj ispitivanja je određivanje vrednosti najslabije zone zavarenog spoja. Rezultati ispitivanja su pokazali da je najosetljivija zona osnovnog metala dok je zona metal šava i linije stapanja postigla visoku otpornost na udarna opterećenja.

Ključne reči: Pancirni čelik, austenitni dodatni materijal, MIG proces zavarivanja i energija udara.

1. UVOD

Oklopna vozila se prave od čelika visoke tvrdoće, tzv. pancirnih čelika. Zbog kretanja po neravnom terenu, vojna oklopna vozila su frekventno pod udarnim opterećenjem i zato je visoka energija udara zahtev koji zavareni spojevi pancirnih čelika treba da ispune. Veoma mali broj istraživanja se bavi određivanjem energije udara u zavarenom spoju pancirnih čelika, te je stoga znanje u ovoj oblasti veoma ograničeno [1].

Ako prslina nastane u bilo kojoj zoni zavarenog spoja kao rezultat procesa zavarivanja, važno je odrediti vrednost udarnog opterećenja za njen dalji rast. Radi detaljne analize ponašanja zavarenog spoja pancirnog čelika, izvršiće se ispitivanje zateznih karakteristike, potom tvrdoće imetalografsko ispitivanje, kao i energija udara.

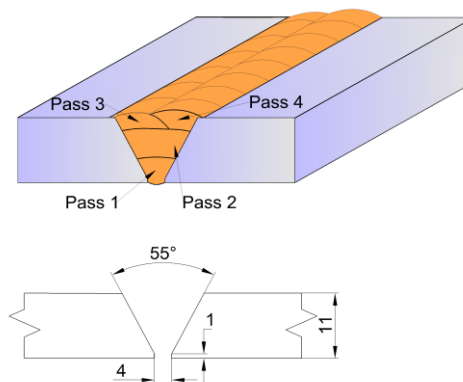
2. MATERIJAL EKSPERIMENT

2.1 Ispitivani materijal i proces zavarivanja pancirnog čelika

Spektro hemijska analiza sastava osnovnog i dodatnog materijala nakon procesa zavarivanja je dobijena uređajem ARL 2460. Hemijski sastav osnovnog metal je 0,27 C, 1,07 Si, 0,71 Mn, 0,054 Al, 0,28 Cu, 1,09 Ni, 0,296 Mo, 0,039 V, 0,01 Sn i 0,64 Cr, dok je hemijski sastav dodatnog materijala 0,08 C, 0,89 Si, 6,29 Mn, 0,01 Al, 0,08 Cu,

Za proces zavarivanja korišćen je austenitni dodatni materijal. Pravac zavarivanja je paralelan sa pravcem valjanja. Hladno valjane ploče debljine 12 mm su isečene na zahtevanu dimenziju (250 mm x 100 mm), dok je V spoj za uglom od

27,5 mm pripremljen Water Jet uređajem, Slika 1. U toku ispitivanja procesa zavarivanja, korišćen je robot Kuka i Citronix 400A, MIG uređaj za zavarivanje. Robot je korišćen da bi se eliminisao uticaj ljudskog faktora, omogućilo fino podešavanje parametara i ponovljivost rezultata. Prečnik žice dodatnog materijala je 1,0 mm, dok je konfiguracija više-prolaznog zavarenog V-spoja prikazana na Slici 1.



Sl. 1. Šematski crtež pripreme zavarenog spoja i pozicije prolaza.

Količina δ -delta ferita u austenitnoj osnovi je određena feritoskop uređajem. Feritoskop je izmerio maseni udeo magnetnog ferita u tri zone zavarenog spoja: u korenu metal šava-donjem delu metal šava, potom u zoni popune-sredina metal šava kao i u pokrivnim prolazima-u gornjem delu metal šava. Za ispitivanje energije udara neophodno je postignuti zavareni spoj bez poroznosti i prslina. Da bi bili sigurni u kvalitet zavarenog spoja, nakon procesa zavarivanja urađeno je radiografsko ispitivanje.

2.2 Ispitivanje zateznih karakteristika

Ispitivanje zateznih karakteristika je urađeno u skladu sa standardom BS EN ISO 4136 [2], na servo-hidrauličnoj kidalici Instron 8033.

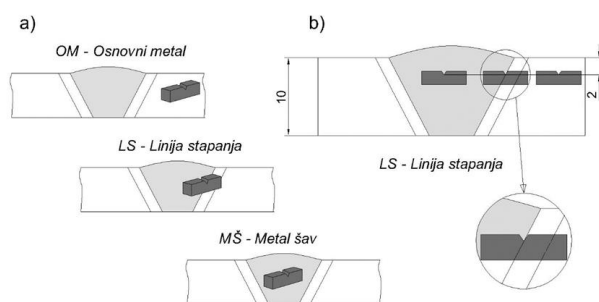
2.3 Metalografija i ispitivanje tvrdoće

Metalografsko ispitivanje zavarenog spoja je urađeno prvobitnim isecanjem uzorka a zatim postavljanjem u epoksidnu smolu. Uzorak je zatim pripremljen brušenjem SiC abrazivnim papirom, a potom poliran dijamantskom pastom. Za razvijanje structure je uzorak nagrizan sa 2% nitalom.

Za karakterizaciju zavarenog spoja izmerena je mikro tvrdoća u skladu sa standarom BS EN ISO 9015-1: 2011 [3]. Ispitivanje mikro-tvrdoće je urađeno 2 mm ispod gornje površine. Za merenje mikro-tvrdoće korišćen je Digital Micro Vickers Hardness Tester HVS1000, Laiznou Huayin Testing Instrument Co, pri čemu je korišćeno opterećenje od 500 gr.

2.4 Ispitivanje energije udara

Energija udara je ispitana instrumentiranim klatnom u metalu šava, liniji stapanja i osnovnom metalu, Slika 2, na temperaturi od 20 °C i -40 °C. Epruvete su izrađene prema standardu ASTM E 23, sa dimenzijama: 10 mm (A) x 10 mm (B) x 55 mm (L). Gde su: A debljina, B širina i L dužina epruvete. V-zarez dubine 2 mm je pod uglom od 45° i radijusom na vrhu od 0,25 mm. Epruveta ispitane na temperature -40° C je ohlađena tečnim azotom. U cilju postizanja termalne ravnoteže, epruvete su držane na zadatim temperaturama od 40 do 50 min dok je temperatura pre ispitivanja proverena termoparovima.



Sl. 2. Šema pozicije zarez, MŠ-metal šava, LS-linija stapanja i OM-osnovni metal.

3. REZULTATI

3.1 Rezultati zateznih karakteristika

Rezultati radiografije pokazuju da u zavarenom spoju nisu prisutne prsline i poroznost. Dok je zavareni spoj ocenjen klasom B.

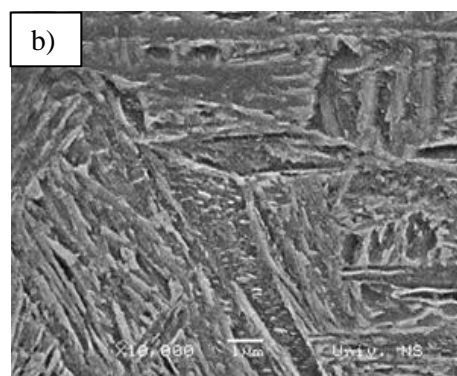
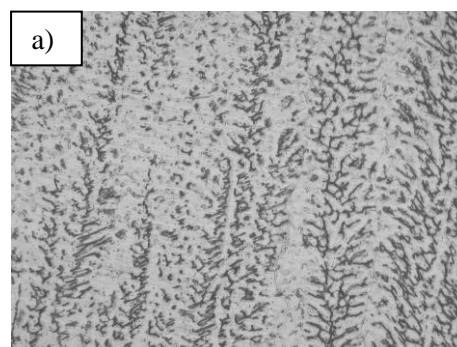
Ispitivanjem zateznih karakteristika utvrđeno je da je lom nastao u metalu šava zavarenog spoja Tabela 1. Zatezna čvrstoća je 833 MPa, dok je napon tečenja u očekivanim granicama od 552 MPa. Razlika između zatezne čvrstoće i napona tečenja je 311 MPa, što ukazuje na visoku duktilnost zavarenog spoja.

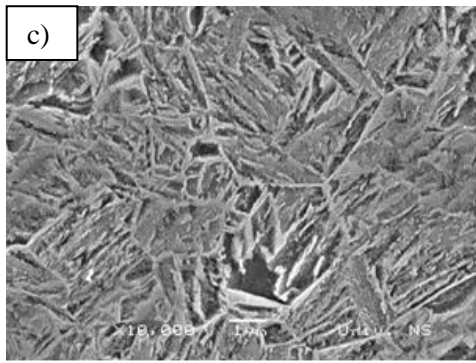
Tabela 1. Zatezne karakteristike zavarenog spoja pancirnog čelika

Broj epruvete	Zatezna čvrstoća [MPa]	Napon tečenja [MPa]	Izduženje [%]
1	825	589	-
2	833	552	5

3.2 Rezultati metalografije i tvrdoće

Mikrostruktura metal šava Slika 3 a) se sastoji iz austenitne osnove i δ -ferita. Količina δ -ferita izmerena feritoskopom u korenu metal šava iznosi 11.7 %mas, u sredini metal šava iznosi 5.4 %mas, dok je u gornjem delu 3.2 %mas. Grubo-zrna oblast ZUT-a Slika 3 b) pokazuje mikrostrukturu beinita i martenzita. Fino-zrna oblast Slika 3 c) se sastoji od beinita.

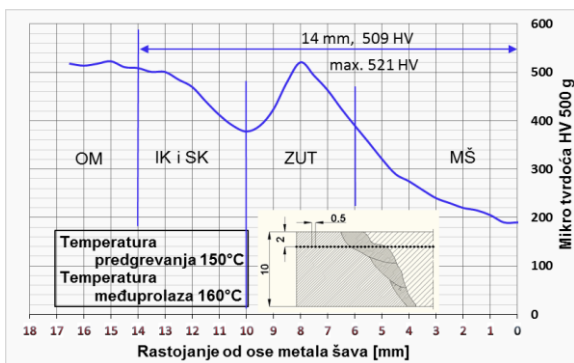




Sl. 3. Mikrostruktura zavarenog spoja pancirnog čelika. a) metal šava, b) grubo-zrna oblast ZUT-a, c) fino-zrna oblast ZUT-a.

Na Slici 4 je prikazana promena tvrdoće 2 mm ispod gornje površine u zonama: metal šava, linije stapanja, ZUT-a i osnovnog metala. Tvrdoća u zoni metal šava (MŠ) je u granicama od 190 HV do 370 HV. Tvrdoća raste od sredine metal šava, gde je vrednost 190 HV, do 350 HV uz liniju stapanja na strani metal šava. Tvrdoća na liniji stapanja na strani osnovnog metala je 420 HV.

Kada je u pitanju ZUT, maksimalna tvrdoća je u grubo-zrnoj oblasti. Tvrdoća dostiže maksimalnu vrednost od 521 HV na rastojanju 8 mm ose metal šava. Nakon maksimuma tvrdoća opada i dostiže minimalnu vrednost 382 HV na rastojanju 11,7 mm od ose šava. Na rastojanju 14 mm od ose metal šava vrednost tvrdoće je ≈ 509 HV što odgovara tvrdoći osnovnog metala.

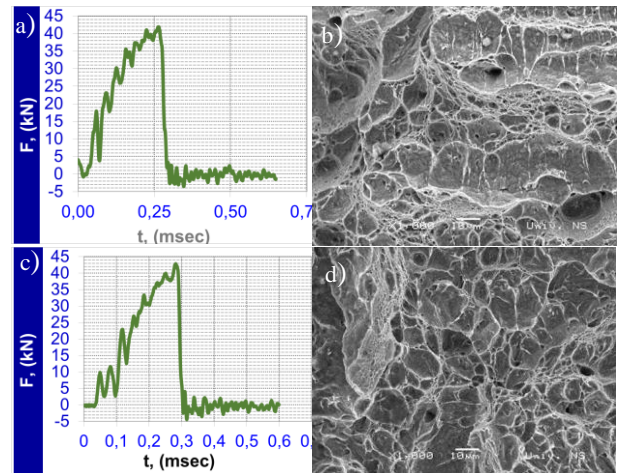


Sl. 4. Profil tvrdoće zavarenog spoja izmerenog 2 mm ispod gornje površine.

3.3 Energija udara

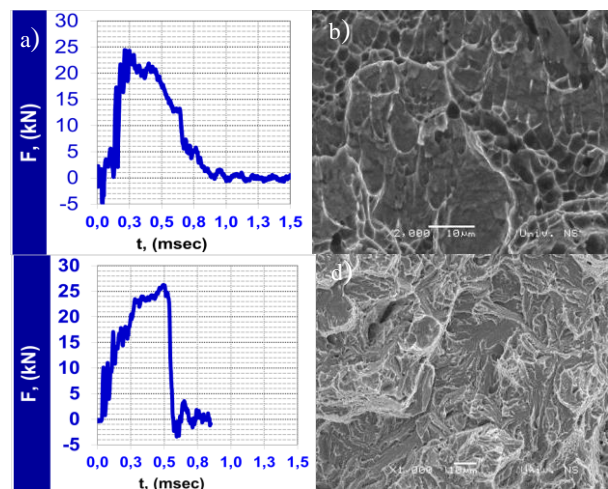
Određivanjem energije udara za oblast osnovnog metala ispitivanog na 20 °C, dobijen je dijagram, Slika 5 a), sa mešovitom krtom i duktilnom površinom preloma Slika 5 b). Za stvaranje prsline kod ove zone izmerena energija udara je 28,6 J, a za rast je utrošeno 5,6 J. Dijagram energija udara za temperaturu -40 °C, Slika 5 c) i d) je izraženiji krti lom. Energija za stvaranje prsline u odnosu na energiju između energije za stvaranje u odnosu na energiju

za rast prsline. Energija za stvaranje prsline od 27,8 J se neznatno smanjila u odnosu na ispitivanja na prethodnoj temperaturi, dok je energija za rast prsline znatno manja i iznosi svega 1,0 J.



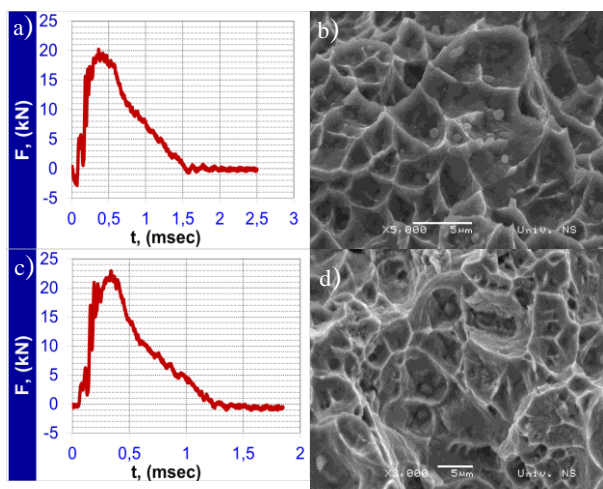
Sl. 5. a) Dijagram energije udara u zoni osnovnog metala na +20 °C, b) fraktografija površine preloma, c) dijagram energije udara u zoni osnovnog metala na -40 °C, d) fraktografija površine preloma.

Određivanjem energije udara za liniju stapanja ispitivanu na 20 °C, dobijen je dijagram Slika 6 a), sa preovlađujuće duktilnom površinom preloma Slika 6 b). Za stvaranje prsline kod ove zone izmerena energija udara je 45,7 J, a za rast je utrošeno 29,6 J. Dijagram energija udara za temperaturu -40 °C, Slika 6 c) i d) je čisto krti lom. Energija za stvaranje prsline od 27,7 J se neznatno smanjila u odnosu na ispitivanja na prethodnim temperaturama dok je energija za rast prsline znatno manja i iznosi 12,3 J.



Sl. 6. a) Dijagram energije udara na liniji stapanja na +20 °C, b) fraktografija površine preloma, c) dijagram energije udara na liniji stapanja na -40 °C i d) fraktografija površine preloma.

Određivanjem energije udara za oblast metal šava ispitanog na 20 °C, dobijen je dijagram sa tipično duktilnom površinom preloma Slika 7 a) i b). Za stvaranje prsline kod ove zone izmerena energija udara je 29,0 J, dok je za rast prsline utrošeno znatno više energije u iznosu od 55,4 J. Dijagram energija udara za temperaturu -40 °C, Slika 7 c) i d) je duktilni lom. Energija za stvaranje prsline od 24,2 J se znatno smanjila u odnosu na ispitivanja na prethodnim temperaturama dok je energija za rast prsline neznatno manja i iznosi 37,3 J.



Sl. 7. a). Dijagram energije udara u zoni metal šava na +20 °C, b) fraktografija prelomljene površine, c) dijagram energije udara u zoni metal šava na -40 °C, d) fraktografija prelomljene površine.

4. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

Problem zavarenog spoja čelika visoke tvrdoće sa austenitnim dodatnim materijalom je niska vrednost zatezne čvrstoće metal šava u odnosu osnovni metal.

U ovom radu dobra kombinacija čvrstoće i žilavosti je postignuta veoma finim skeletom delta ferita u austenitnoj osnovi. Prosečna vrednost δ -delta ferita od približno $\approx 7\%$, koji je ravnomerno raspoređen te metal šava ima potencijalno dobre mehaničke osobine, visoku energiju udara, kao i zateznu čvrstoću.

Tvrdoća veća od 509 HB je postignuta već na rastojanju 14 mm, što znači da je režim zavarivanja ispunio zahtev standarda MIL-STD-1185 [4], da tvrdoća ne sme biti manja od 509 HV na rastojanju 15,9 mm od se metal šava. Maksimalna tvrdoća u grubo-zrnoj oblasti ZUT je 521 HV. Sa tvrdoćom od 521 HV, u grubo-zrnoj oblasti ZUT-a, postignut je dobar balans između balističke zaštite sa jedne i žilavosti sa druge strane.

Visoka energija udara u zoni metal šava na temperaturama od -40 °C i +20 °C je postignuta većim udelom nikla i mangana u dodatnom materijalu. Visoka energija od 55,7 J potrebna za iniciranje prsline je karakteristična za izrazito žilav materijal. Austenitni dodatni materijal je ispoljio smanjenje absorbovane energije sa padom temperature ispitivanja. Na temperaturi -40 °C, energija udara potrebna za iniciranje prsline je značajno smanjena, ali je i dalje visoka. Viša vrednost energije udara od 84 J, u ovom radu, u odnosu na isti dodatni materijal u radu [5], je očekivana, jer su prethodna zatezna ispitivanja to i nagovestila. Visoka energija za inicijaciju kao i za propagaciju prsline na liniji stapanja je očekivana s obzirom da su u ovoj zoni izmerene vrednost tvrdoće od 412 HV. Najniža vrednost energije udara u zoni osnovnog metala je dobijena zbog visoke tvrdoća od 509 HV, dok su rezultati u skladu sa istraživanjima prethodnih autora [6].

5. REFERENCE

- [1] Magudeeswaran, G., Balasubramanian V., R., *Effect of welding processes and consumables on fatigue crack growth behaviour of armour grade quenched and tempered steel joints*. Defence Technology, 10, pp. 47-59, 2014.
- [2] BS EN ISO 4136:2011. *Destructive tests on welds in metallic materials. Transverse tensile test*
- [3] BS EN ISO 9015-1:2011. *Destructive tests on welds in metallic materials. Hardness testing Hardness test on arc welded joints*.
- [4] MIL-STD-1185. Department of defense manufacturing process standard: welding, high hardness armor; 2008 [SUPERSEDES MIL-W-62162].
- [5] Magudeeswaran, G., Balasubramanian, V., Madhushudan, R.G., Balasubramanian, T. S. *Effect of Welding Processes and Consumable on Tensile and Impact properties of High Strength Quenched and Tempered Steel Joints*, Journal of Iron and Steel Research. International. 15 (6) pp. 97-94, 2008.
- [6] Bernetič, J., *Development of model for predicting hardenability of high strength low alloy steels*, Ph. D. THESIS. Ljubljana, 2013.

Autori: M.Sc. Aleksandar Čabrilo, prof. dr Katarina Gerić,

Univerzitet Novi Sad, Fakultet Tehničkih Nauka, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Tel: +381 60 552 14 14,

E-mail: cabrilo@uns.ac.rs
gerick@uns.ac.rs

**SCIENTIFIC CONFERENCE WITH INTERNATIONAL
PARTICIPATION
ETIKUM 2017
NOVI SAD, SERBIA, DECEMBER 6-8, 2017**

Ristić, M., Lužanin, O., Baloš, S., Radusin, T., Rajnović, D., Šidanin, L., Dramićanin, M.

**UTICAJ TEMPERATURE RADNE PLOČE 3D ŠTAMPAČA NA PROCENAT
KRISTALNOSTI PLA UZORAKA IZRAĐENIH FDM TEHNOLOGIJOM**

Rezime: U okviru ovog rada izvršena je analiza uticaja tehnoloških parametara na procenat kristalnosti uzoraka izrađenih od PLA (Polylactic Acid) materijala FDM tehnologijom (Fused Deposition Modelling). DSC analizom utvrđen je procenat kristalnosti. Statistička analiza glavnih uticaja i interakcija omogućena je primenom DSD (Definitive Screening Design) faktornog eksperimenta. Rezultati su pokazali dominantan uticaj debljine sloja i temperature ekstrudiranja na procenat kristalnosti.

Ključne reči: FDM, temperatura ploče, temperatura ekstrudiranja, brzina ekstrudiranja, debljina sloja, kristalnost.

1. UVOD

Tehnologija ekstrudiranja materijala, u koju spada FDM, od početka dvehiljaditih preuzela je primat u pogledu zastupljenosti među brojnim tehnologijama aditivne proizvodnje. Prema podacima Wohlers asocijacije, u 2003. godini, kompanija Strataysys je objavila da je broj prodatih FDM štampača bio gotovo jednak ukupnom broju prodatih tipova mašina za sve ostale aditivne tehnologije [1]. Međutim, pravu popularnost, FDM tehnologija je počela da beleži od 2007. godine, kada je započeo RepRap projekat gradnje open-sources FDM štampača. Tehnološki parametri, pre svega temperature ekstrudiranja i uslovi hlađenja, imaju direktan uticaj na kristalnost materijala, a samim tim i na njegove mehaničko-fizičke karakteristike. Iz tog razloga je važno ostvariti kontrolu nad samim tehnološkim procesom, pri čemu toplotna analiza ponašanja polimernih materijala predstavlja jedan od ključnih alata. U nastavku je dat kratak pregled literature koja se odnosi na predmet istraživanja ovog rada.

Wang i Gramlich [2] su izučavali uticaj tehnoloških parametara štampe (temperatura radne ploče i debljina sloja) na čvrstoću štampanih PLA uzoraka. Analiziran je procenat kristalnosti štampanih PLA uzoraka (DSC, XRD, POM) i uticaj na morfološke, hemijske osobine (SEM, SEC). Rezultati FDM ekstrudiranja su poređeni sa konvencionalnim brizganjem uzoraka od istog materijala. Rezultati su pokazali da temperature radne ploče koja se nalazi znatno iznad temperature stakljenja PLA plastike, dovodi do najveće čvrstoće, i da utiče na povećanje procenta kristalnosti.

Tabi i ostali [3] su ispitivali uticaj termičkog

postprocesiranja injeksiono livene PLA, na kristalnu strukturu. Za potrebe eksperimenta korišćene su izlivenne ploče od PLA plastike, debljine 2 mm, a potom je izvršeno postprocesiranje, tj. rekristalizacija u konvencionalnim pećima, na temperaturama od 60 do 140°C, i vremenskim intervalima od 10 do 60 minuta, kako bi se postigli različiti procenati kristalnosti. Nakon toga su PLA ploče ispitane diferencijalnom skenirajućom kalorimetrijom (DSC), dinamičko mehaničkom analizom (DMA), i širokougaonom rendgenskom difrakcijom (WAXD).

2. KRISTALNOST POLIMERA

2.1 Definicija

Jedna od veoma važnih karakteristika polimernih materijala jeste stepen kristalnosti, koji predstavlja procentualni udeo kristalnih područja u odnosu na amorfnu fazu. Udeo kristalne strukture predstavlja jednu od važnijih karakteristika svakog polukristalnog termoplasta, budući da ostvaruje značajan uticaj na mehaničke i fizičke osobine. Polimeri prema svojoj uređenosti mogu biti amorfni i kristalni, te tako i stepen kristalnosti može da varira od potpuno amorfne, do 95% kristalne strukture. Procenat kristalnosti se izračunava na osnovu sledeće jednačine (1)

$$C(\%) = \frac{(\Delta H_m - \Delta H_c)}{\Delta H_{mo}} \times 100 \quad (1)$$

Gde je.

ΔH_m - entalpija topljenja [J/g],

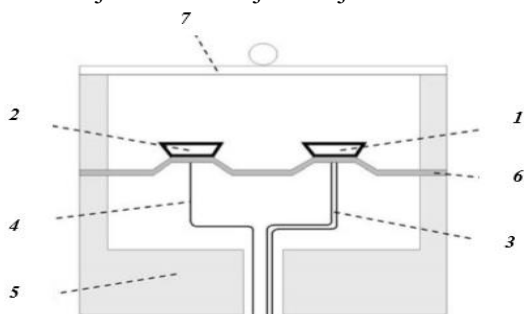
ΔH_c - entalpija kristalizacije [J/g]

$\Delta H_{mo}=93,0$ J/g - teoretska entalpija topljenja za

potpuno kristalni polimer

2.2 Merenje procenta kristalnosti polimera

Diferencijalna skenirajuća kalorimetrija (DSC - *Differential Scanning Calorimetry*) je tehnika koja registruje energetski fluks potreban za održavanje nulte temperaturne razlike između uzorka i referentnog materijala, pri unapred definisanoj brzini grejanja (hlađenja), uz pretpostavku da se oba materijala nalaze pod istim uslovima. DSC se koristi kao metoda koja pruža mogućnost određivanja stepena kristalnosti, temperature stakljenja temperature topljenja i ključanja, promene entalpije i entropije, i druge efekte usled kojih dolazi do promena toplotnog kapaciteta ili latentne toplote [4]. Metoda određuje intenzitet razmene toplote između termoelektričnog diska i uzorka -referentnog dela. Dobijeni toplotni protok je proporcionalan razlici temperatura [5]. Tipična konstrukcija DSC uređaja data je na slici 1.



Sl. 1. Šema uređaja za DSC analizu
1 - posuda sa uzorkom, 2 - posuda sa referentnim materijalom, 3 - termopar za uzorak, 4 - termopar za referentni materijal, 5 - grejno telo, 6 - termoelektrični disk, 7- poklopac.

3. PLAN I REALIZACIJA EKSPERIMENTA

3.1 Dizajn eksperimenta

Tabela 1. Eksperimentalni faktori, nivoi i eksperimentalno izmerene vrednosti procenta kristalnosti

	Temp.ploče	Temp. ekstrudiranja	Brzina ekstrudiranja	Debljina sloja	Procent kristalnosti	Uzorak
1	65	210	30	0.1	34.1	#4
2	80	230	90	0.1	35.7	#5
3	50	210	30	0.3	36.4	#6
4	50	230	30	0.1	33.5	#8
5	65	230	90	0.3	36.8	#9
6	80	230	30	0.2	32.5	#1
7	50	230	60	0.3	33.8	#2
8	50	220	90	0.1	34.3	#3
9	50	210	90	0.2	33.7	#10
10	80	210	60	0.1	33.2	#12
11	80	210	90	0.3	36.1	#11
12	65	220	60	0.2	33.8	#7
13	80	220	30	0.3	40.3	#13

Eksperimentalni rad je organizovan prema principima inženjerskog faktornog eksperimenta.

S tim u vezi, korišćen je DSD (*Definitive Screening Design*) plan faktornog eksperimenta. Prema randomizovanom redosledu, uzorci su odštampani na 3D štampaču. Izabrani faktori i odgovarajuće vrednosti nivoa dati su u Tabeli 1.

3.2 Geometrija uzoraka

Za realizaciju eksperimenta modelirana su dva uzorka prizmatičnog oblika, koji su po dimenzijama osnove bili identični, 60x40 mm, samo su im se razlikovale debljine. Kod uzorka A, debljina je iznosila $VD=0,9$ mm i on je korišćen u eksperimentima se debljinama slojeva od 0,1 ili 0,3 mm. Kod uzorka B, debljina je iznosila $VD=1$ mm, i ovaj model je bio namenjen eksperimentima sa debljinom sloja 0,2 mm. Time je omogućeno da u svim eksperimentima, bez obzira na debljinu sloja, količnik debljine uzorka i debljine sloja bio ceo broj.

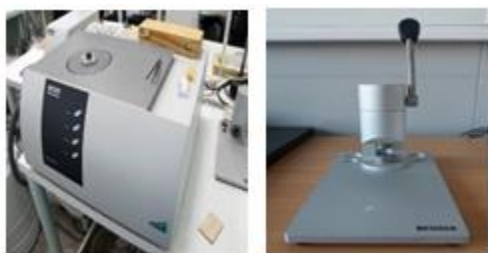
3.3 3D štampa uzoraka

U eksperimentu je, za izradu uzoraka od PLA (*Poly-Lactic Acid*) na osnovu tabele eksperimenta, korišćen 3D štampač *Prusa i3Mk2*. Maksimalna zapremina radnog prostora ovog štampača jeste 250x210x200 mm. Maksimalna temperatura ekstrudera iznosi 280 °C. Zahvaljujući grejanju radne ploče, čija temperatura može ići do 110 °C, ovaj štampač je u mogućnosti da radi sa širim dijapazonom materijala, u koje spadaju: ABS, PLA, Poliamid (najlon), PET, FLEX i razne vrste kompozitnih materijala, kopolimera sa udelom staklenih, ugljeničnih vlakana, itd.

4. DSC ANALIZA PLA UZORAKA

Za ispitivanje toplotnih svojstava trinaest odštampanih PLA uzoraka, korišćena je diferencijalno skenirajuća kalorimetrija (DSC). Za DSC analizu je korišćen uređaj NETSCH, model 204F1 Phoenix slika 2. Takođe su korišćene specijalne aluminijske posudice, koje obezbeđuju optimalnu toplotnu provodljivost i minimalnu reakciju sa uzorcima. Mase trinaest pripremljenih uzoraka su izmerene na analitičkoj vagi, a nakon toga su posudice hermetički zatvorene korišćenjem specijalne prese slika 2.

Pripremljeni DSC uzorci su prikazani na slici 3. Toplotna analiza DSC uzoraka od termoplastičnog polimera izvedena je u temperaturnom intervalu od 25 °C do 200 °C. Merenje je vršeno pri linearnom povećanju temperature koje se odvijalo brzinom od 10 °C u minuti.

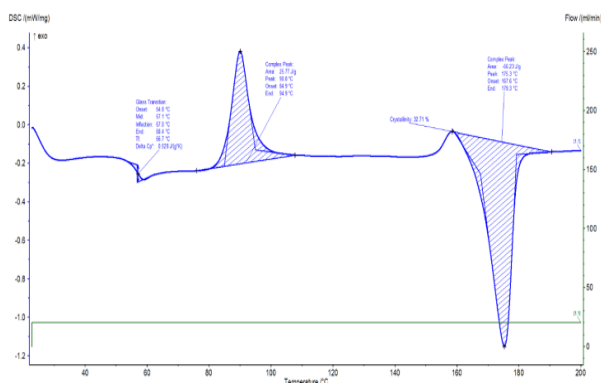


Sl. 2. DSC uređaj NETSCH 204F1 Phoenix i presa za hermetičko zatvaranje



Sl. 3. Uzorci za DSC analizu koji su izvađeni iz središnje sekcije FDM uzorka pod odgovarajućim brojem

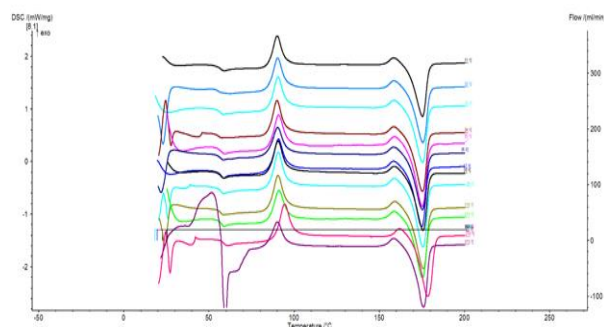
Pomoću indijuma je izvršena standardna kalibracija, temperatura topljenja ovog materijala je 157 °C. Prvo dinamičko zagrevanje, koje se odvija ravnomernom brzinom sve do temperature 200 °C, sprovodi se u cilju uklanjanja termalne istorije; potom sledi proces hlađenja, brzinom od 20 °C u min., do temperature od 25 °C, proces se potom održava na konstantnoj temperaturi 5 min. i zagreva se po drugi put. Tokom hlađenja, uzorak ima dovoljno vremena da kristališe, što se na DSC dijagramu može jasno uočiti, vidljivim pikom kristalizacije slika 4.



Sl. 4. DSC dijagram dobijen za uzorak #1

U ovom radu uzorci su prošli samo prvo dinamičko zagrevanje, budući da je cilj bio da se registruje toplotna istorija koja je nastala FDM procesiranjem. Na slici 5 je prikazan superponirani dijagram na kojem se vide DSC krive za trinaest FDM uzoraka koji su procesirani na osnovu tabele eksperimenta Tabela 1. Procenti kristalnosti su prikazani u tabeli eksperimenta, u pretposljednjoj

koloni tabela 1.



Sl 5. Superponirani dijagram sa trinaest DSC krivih

5. ANALIZA REZULTATA

Na osnovu eksperimentalno dobijenih rezultata, formiran je regresioni model koji uspostavlja zavisnost između procenta kristalnosti i vrednosti ulaznih tehnoloških parametara 3D štampe. Vrednosti aproksimiranih parametara modela date su u tabeli 2, dok su rezultati analize varijanse prikazani u tabeli 3.

U okviru odabranog regresionog modela (Tab.2), faktor brzine ekstrudiranja ne figuriše, dok faktori temperatura ploče i temperatura ekstrudiranja nisu statistički signifikantni. Slede statistički značajni koeficijenti regresione jednačine, a to su: debljina sloja ($p=0,0150$), kvadratni član debljine sloja ($p=0,0108$) i kvadratni član temperature ekstrudiranja ($p=0,0451$) tabela 2. Iz ANOVA tabele tabela 3 se vidi da je usvojeni regresioni model statistički značajan ($p=0,0314$).

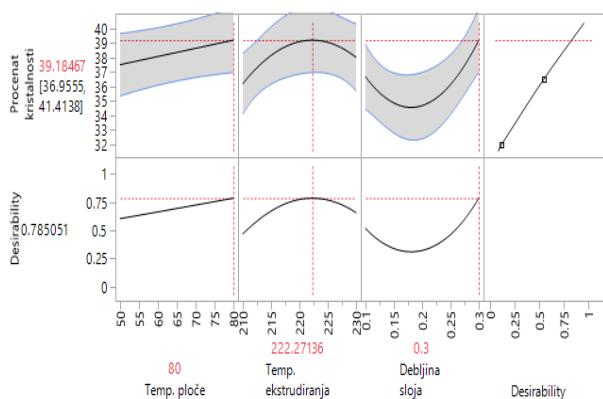
Na slici 6 prikazan je dijagram optimizacije. Sa dijagrama se vidi da je teoretski optimirani procenat kristalnosti približno 39,2%, pri čemu se date i optimirane vrednosti ulaznih tehnoloških parametara.

Tabela 2. Izračunati koeficijenti regresije i njihova statistička značajnost

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
Intercept	33.975472	0.903369	37.61	<.0001*
Temp. ploče(50,80)	0.61	0.373527	1.63	0.1536
Temp. ekstrudiranja(210,230)	-0.12	0.373527	-0.32	0.7589
Debljina sloja(0.1,0.3)	1.26	0.373527	3.37	0.0150*
Temp. ploče*Temp. ekstrudiranja	1.0216981	0.473036	2.16	0.0741
Temp. ekstrudiranja*Temp. ekstrudiranja	-1.984906	0.786536	-2.52	0.0451*
Debljina sloja*Debljina sloja	3.2367925	0.888679	3.64	0.0108*

Tabela 3. ANOVA tabela

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	6	44.179411	7.36324	5.2774
Error	6	8.371358	1.39523	Prob > F
C. Total	12	52.550769		0.0314



Sl 6. Dijagram optimizacije sa teoretskim maksimumom koji iznosi 39,185%

6. ZAKLJUČCI

U ovom radu je realizovano istraživanje uticaja temperature zagrevanja radne ploče štampača, brzine i temperature ekstrudiranja i debljine sloja, na procenat kristalnosti uzoraka koji su izrađeni u FDM tehnologiji. Rezultati koji su dobijeni na osnovu eksperimenta pokazuju da, pri korišćenom izboru tehnoloških parametara, debljina sloja ($p=0,015$) i njen kvadratni član ($p=0,0108$) imaju dominantan, statistički značajan uticaj na vrednost kristalnosti. Pored toga, kvadratni član temperature ekstrudiranja takođe je statistički značajan ($p=0,041$). Optimizacijom na osnovu analize prikazano je da se može dobiti maksimalna vrednost kristalnosti od približno 39%. Kada se ova vrednost upoređi sa procentom kristalnosti filameta od 26,56%, pre procesiranja na 3D štampaču, zaključuje se da dobijeno povećanje kristalnosti iznosi približno 32%.

Značajno je primetiti da je maksimalna vrednost procenta kristalnosti dobijena pri kombinaciji vrednosti tehnoloških parametara koji nisu prethodno definisani u tabeli eksperimenata (temperatura ekstrudiranja 222 °C). Zbog toga su neophodni dopunski eksperimenti za verifikaciju optimuma.

7. ZAHVALNICA

Rezultati prezentovani u ovom radu su realizovani u okviru projekta „Istraživanje i primena savremenih metoda karakterizacije materijala i zavarenih spojeva u proizvodnom mašinstvu“, Departmana za proizvodno mašinstvo, FTN Novi Sad.

8. LITERATURA

- [1] <https://wohlersassociates.com/blog/2016/01/popularity-of-fdm/>
- [2] Tábi, T., Sajó, I. E., Szabó, F., Luyt, A. S. and Kovács, J. G. (2010) ‘Crystalline structure of annealed polylactic acid and its relation to processing’, *Express Polymer Letters*, 4(10), pp.659668.doi:10.3144/expresspolymlett.2010.80.
- [3] Wang L, Gramlich WM, Gardner DJ, Improving the impact strength of Poly(lactic acid) (PLA) in fused layer modeling (FLM), *Polymer*(2017),doi:10.1016/j.polymer.2017.03.011
- [4] V.A.Lihachev, AE Volkov, V. Shudegov, *Continuum theory of defects*, LGU, 1986
- [5] *Materials Measurement Methods*, Ed: Czichos, H., Saito, T., Smith, L., Springer, 2006; pp. 411–413
- [6] Drummer, D. (2012) ‘Suitability of PLA/TCP for fused deposition modeling’, *Rapid Prototyping Journal*, 18(6), pp. 500–507. doi: 10.1108/13552541211272045
- [7] Höhne, G. W., Hemminger, W. F. and Flammerheim, H.-J. (2003) ‘Application of Differential Scanning Calorimetry’, *Differential Scanning Calorimetry*, pp. 147–161.
- [8] Kodre, K. V., Attarde, S. R., R., Y. P., Patil, R. Y. and Barge, V. U. (2014) ‘Differential Scanning Calorimetry: A Review’, *Research and Reviews: Journal of Pharmaceutical Analysis*, 3(3), pp. 11–22.

Autori: Mirjana Ristić, vanr. prof. dr Ognjan Lužanin, vanr. prof. dr Sebastian Baloš, dr Tanja Radusin, doc. dr Dragan Rajnović, prof. emeritus dr Lepasava Šidanin, Miroslav Dramićanin, Univerzitet Novi Sad, Fakultet Tehničkih Nauka, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Tel: +381 21 485 2350, Fax: +381 21 454-495.

E-mail: mirjana.ristic@uns.ac.rs
luzanin@uns.ac.rs
sebab@uns.ac.rs
tanja.radusin@fins.uns.ac.rs
draganr@uns.ac.rs
lepas@uns.ac.rs
dramicanin@uns.ac.rs

Stefanović, Lj., Milutinović, M., Skakun, P.

OPTIMIZACIJA PROCESA INJEKCIONOG PRESOVANJA NUMERIČKOM SIMULACIJOM

Rezime: Osnovna tema rada jeste prikaz optimizacije procesa injektionog presovanja pomoću numeričke simulacije. Kao primer otpreska za koji je izvršena numerička simulacija usvojena je zupčasta (Bowex) spojnica od PA 6.6. U prvom delu rada date su osnovne karakteristike procesa injektionog presovanja i bowex spojnice. Potom su numeričkom simulacijom analizirane određene faze injektionog presovanja i definisani su parametri za svaku od njih. Numerička simulacija je izvršena u programu Moldex3D.

Ključne reči: injektiono presovanje, numerička simulacija, bowex spojnica.

1. UVOD

Injectiono presovanje predstavlja najvažniji ciklični postupak prerade polimernih materijala.

Proces se izvodi tako što se vrši ubrizgavanje rastopljene mase iz injektione jedinice u temperiran kalup. Prema Čatiću tehnologijom injektionog presovanja se može vršiti prerada: termoplasta, termosetova i elastomera [1].

Projektovanje delova od plastičnih masa, kao i alata koji se koriste za njegovu izradu danas se ne mogu zamisliti bez primene CAE softvera za simulaciju procesa prerade. Današnji otpresci dobijeni injektionim presovanjem su sve kompleksniji, zahteva se visok kvalitet, uske tolerancije, kraći rokovi isporuke, niži troškovi izrade itd. [2].

Odgovarajući softveri koji su specijalizovani za simulaciju procesa injektionog presovanja većinom su bazirani na korišćenju metode konačnih elemenata (MKE).

MKE analiza omogućava analizu procesa injektionog presovanja u različitim fazama, počev od faze punjenja kalupne šupljine, delovanje naknadnog pritiska, očvršćavanje, pa do deformacije otpreska u kalupu.

MKE analiza procesa injektionog presovanja se koristi kako bi se uklonili eventualni nedostaci dizajniranog dela, izabranog materijala, dizajna alata, izabrane mašine i parametara ubrizgavanja.

Pomoću softvera za simulaciju procesa injektionog presovanja plasične mase može se uticati na povećanje kvaliteta dobijenih proizvoda, smanjiti vreme potrebno za razvoj novog proizvoda i troškovi koji mogu nastati usled nepravilne konstrukcije proizvoda. Postavljanje ulivnih kanala različitih oblika i na različitim mestima i uz pomoć same simulacije procesa injektionog presovanja može se utvrditi

najpovoljniji oblik i mesto za njihovo postavljanje [3].

MKE analizom se dobijaju rezultati koji se mogu koristiti za proveru:

- pravilnog popunjavanja kalupne šupljine,
- mesta na kojima je moguća pojava linija zavara i zarobljenog vazduha,
- raspored temperature rastopa u kalupnoj šupljini,
- raspored pritiska u kalupnoj šupljini za vreme ubrizgavanja,
- optimalan broj mesta, tipa i dimenzija ulivka,
- zaostalog napona u otprescima nakon procesa, itd. [4].

U radu Godeca analiza procesa injektionog presovanja tankozidnog otpreska, koji je razvijen za potrebe istraživanja, ostvarena je pomoću numeričke simulacije u programu Moldex3D [2]. Trifunović i drugi su analizirali primenu numeričkih simulacija u procesu injektionog presovanja [3]. Randelović i drugi u svom radu koriste FEM analizu procesa injektionog presovanja cevi i sam dizajn kalupa za izradu spomenutog otpreska [5].

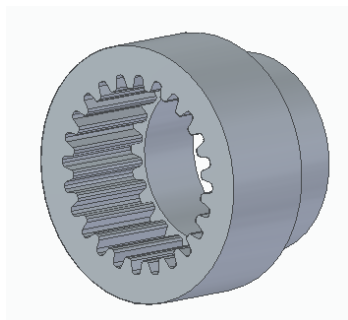
U ovom radu daće se prikaz optimizacije procesa injektionog presovanja primenom numeričkih simulacija. Simulacije su sprovedene u programskom paketu Moldex3D. Studija slučaja sprovedena je na primeru procesa injektionog presovanja bowex spojnice.

Bowex spojnice su fleksibilne spojnice za prenos obrtnog momenta i posebno su pogodne za kompezaciju aksijalnog, radijalnog i ugaonog odstupanja kod nepravilno centriranih vratila.

Osnovne karakteristike bowex spojnice su:

- izrađene su od poliamida (najlona),
- zbog primene ovog materijala nije potrebno posebno održavanje,

- temperaturni opseg im je od $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$,
 - montaža je jednostavna [6].
- Na slici 1 dat je prikaz bowex spojnice.



Sl. 1. Bowex spojnica

2. SIMULACIJA PROCESA INJEKCIONOG PRESOVANJA BOWEX SPOJNICE

Numerička simulacija injektionog presovanja bowex spojnice izvršena je u programu Moldex3D, koji omogućava modeliranje i praćenje promene velikog broja promenljivih, a samim tim i brzu promenu i korekciju kalupne šupljine i alata, odnosno samog materijala, mašine i parametara procesa injektionog presovanja kako bi se eliminisale eventualne greške u procesu.

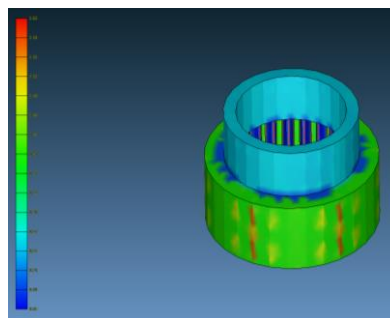
Moldex3D je jedan od svetskih lidera u pronalaženju rešenja vezanih za odvijanje procesa injektionog presovanja. Sa visokim kvalitetom Moldex3D može pomoći u rešavanju najkompleksnijih problema koji se mogu javiti tokom procesa injektionog presovanja. Nepotpuno ispunjenje kalupne šupljine, nepoželjne lokacije linije zavara i nepravilna debljina zida su neka od najčešćih problema prilikom oblikovanja plastičnih masa sa kojim se inženjeri susreću [7].

U ovom radu Moldex3D je korišćen za optimizaciju tj. izbor najpovoljnije lokacije za postavljanje ušća kao i usvajanje optimalne varijante ulivnog sistema, analizu uspešnosti popunjavanja kalupne šupljine i analizu eventualnih mesta na otpresku na kojima može doći do pojave određenih nedostataka.

2.1 Priprema modela za simulaciju

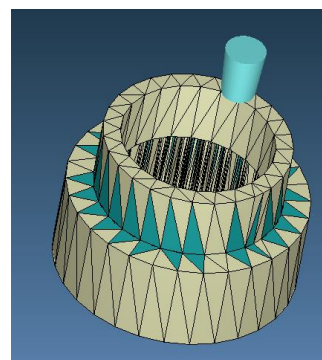
Prvi korak u pretprocesiranju jeste analiza debljine zida dela. Na prikazu modela debljine zidova mreže konačnih elemenata kalupnih šupljina mogu se uočiti eventualni nedostaci vezani za debljinu zidova dizajniranog dela. Sa slike 2 se može zaključiti da je debljina zida polimernog otpreska dosta ujednačena i sa te

strane geometrija obratka je povoljna za tehnologiju injektionog presovanja.

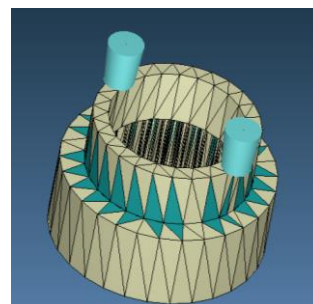


Sl. 2. Analiza debljine zida dela

Potom se određuje lokacija ulivnog sistema. Softver preko odgovarajućeg algoritma automatski sugeriše najpovoljniju lokaciju za postavljanje ušća. U radu su izvršene dve iteracije i to sa jednim i sa dva položaja ušća. Izbor najpovoljnijeg mesta za postavljanje jednog i dva ušća prikazano je na slika 3 i 4.



Sl. 3. Prikaz najpovoljnijeg mesta za postavljanje jednog ušća



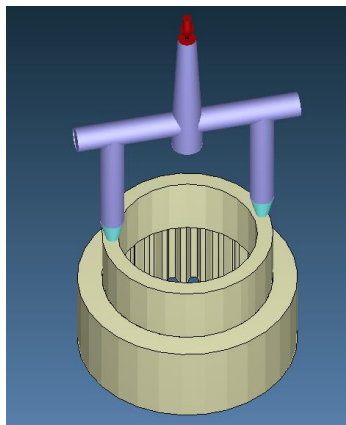
Sl. 4. Prikaz najpovoljnijeg mesta za postavljanje dva ušća

Numeričkom simulacijom se takođe pruža mogućnost definisanja različitih tipova ulivnog sistema. Posle nekoliko iteracija u kojima su primenjeni različiti ulivni sistemi usvojen je ulivni sistem na osnovu dobijenih najpovoljnijih rezultata na kraju procesa.

Ulivni sistem koji je usvojen je kružnog preseka sa dva ušća, koji omogućava brže i uniformno popunjavanje kalupne šupljine.

Usvojeni ulivni sistem obezbeđuje da na otpresku ostaje trag u vidu tačke, pa je naknadna obrada neznatna.

Potom se vrši definisanje razvodnih kanala (prečnik, širina, visina i oblik njihovih krajeva). Na slici 5 je prikaz ulivnog sistema kružnog preseka sa dva ušća.

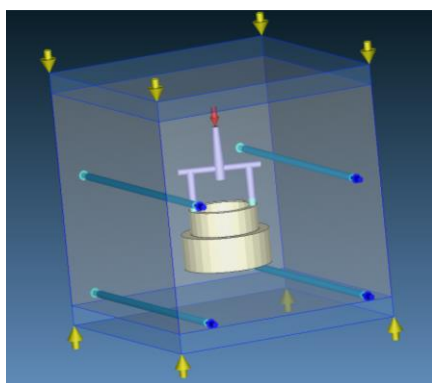


Sl. 5. Kružni ulivni sistem sa dva ušća

Nakon toga se vrši definisanje:

- dimenzija ploča forme alata,
- dizajn rashladnih kanala,
- definisanje ulaza i izlaza rashladne tečnosti,
- provera rashladnih kanala (slika 6).

U radu se za dizajn rashladnog sistema koriste alati programa Moldex3D koji nude gotove oblike kanala i parametarski unos dimenzija, program automatski usklađuje njihove dimenzije, tako da oni ne budu izvan zapremina ploča kalupa. Sve ostale vrednosti izabranog ponuđenog rashladnog sistema (prečnik, dužine, osno rastojanje između kanala, broj kanala,...) unose se parametarski.



Sl. 6. Definisanje dimenzija kalupa i položaja rashladnih kanala

Nakon provere mesta postavljanja rashladnih kanala kada softver ne signalizira ni jedan problem može da se pređe na definisanje parametara i simulaciju procesa.

2.2 Definisanje parametara injektionog presovanja

Da bi se simulacija procesa injektionog presovanja pokrenula neophodno je definisati odgovarajuće parametre (pritisak i brzinu ubrizgavanja, vreme hlađenja, izbor odgovarajućeg materijala itd.).

Kao materijal otpreska izabran je poliamid (PA 6.6) sa tehničko – tehnološkim parametrima koje je propisao proizvođač.

Specifikacije materijala date su na slici 7.

Property	Value	Unit
Polymer (Grade Name) Processor	PA66 SCHULAMID 66 GF 3020 FR1 A, Schul	
Mechanical Properties	Fiber filled polymer - Theoretical properties (Cu)	
Polymer density	1.14	g/cm ³
Polymer Poisson's ratio	0.3	-
Polymer Modulus E	2e+09	(dyn/cm ²)
Polymer CLTE	7.5e-005	(1/K)
Fiber weight percentage	20	(%)
Fiber density	2.55	g/cm ³
Fiber Poisson's ratio	0.2	-
Fiber Modulus E1 (fiber direction)	7e+09	(dyn/cm ²)
Fiber Modulus E2 (transverse direction)	7e+09	(dyn/cm ²)
Fiber Shear Modulus G	2e+09	(dyn/cm ²)
Fiber CLTE E1 (fiber direction)	5e-005	(1/K)
Fiber CLTE E2 (transverse direction)	5e-005	(1/K)
Fiber Length/Diameter (L/D)	20	-

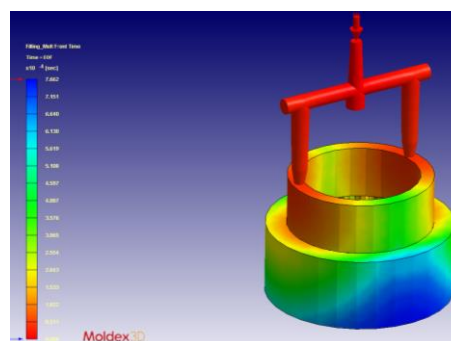
Sl. 7. Specifikacije materijala

Iz baze podataka se takođe bira tip i vrsta mašine. Potom se vrši definisanje parametara koji se zadaju mašini za injektiono presovanje. Parametri mašine se mogu usvojiti na osnovu preporučenih vrednosti od strane programa ili se zadati. U radu su usvojene preporučene vrednosti.

2.3 Rezultati simulacije

U radu su dati rezultati koji se odnose na fazu punjenja i proveru deformacije otpreska nakon hlađenja.

Prva analiza se odnosi na popunjenost kalupne šupljine. Na slici 8 prikazuje se vreme tečenja rastopljene plastične mase. Analizom ove faze ciklusa injektionog presovanja moguće je zaključiti kako će ispunjenje kalupne šupljine biti bez poteškoća, pa je usvojeni ulivni sistem zadovoljio ovaj zahtev.



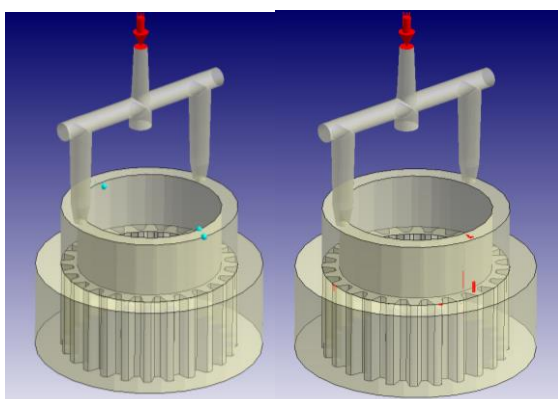
Sl. 8. Vreme punjenja kalupne šupljine

Zarobljen vazduh i linije hladnog spoja (linije

zavara) nastaju uled susreta struja rastopljenih polimera koji teku u suprotnim smerovima. Linije zavarivanja smanjuju jačinu proizvoda i izazivaju estetske defekte.

Zbog podeljenog toka materijala moguća je pojava linija zavarivanja ali u ovom primeru one nisu izražene i locirane su na nefunkcionalnim površinama (slika 9). Kako bi se umanjio izgled šava i povećala jačina zavarenih slojeva može se povećati temperatura kalupa ili temperatura rastopa.

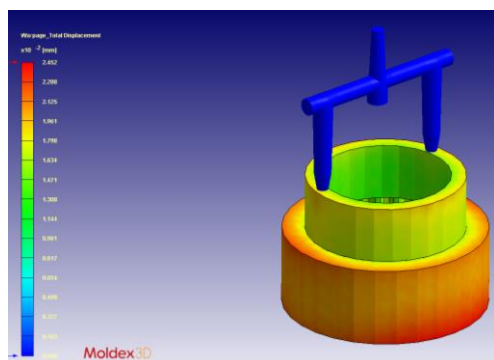
Pojava gasnih uključaka takođe nije izražena, a eliminisanje istih se može izvršiti tako što se prilikom izrade alata postavlja veći broj segmenata za odvođenje gasova (slika 9).



Sl. 9. Prikaz gasnih uključaka (levo) i linija zavara (desno)

Tokom ciklusa injektionog presovanja u kalupnoj šupljini, a posebno nakon vađenja otpreska iz kalupa, otpresak se deformiše tj. dolazi do vitoperenja. Do vitoperenja dolazi zbog nejednakog skupljanja u pojedinim delovima otpreska kao posledica nejednakog hlađenja u kalupnoj šupljini i zbog naknadne kristalizacije nakon njegovog vađenja iz kalupa pri preradi kristalastih plastomera.

Slika 10 prikazuje rezultate analize deformacije otpreska nakon procesa hlađenja.



Sl. 10. Vitoperenje otpreska – deformacija

Sa slike 10 se može zaključiti da opasnost od deformisanja otpreska nakon hlađenja nije velika,

što proizilazi iz ujednačenog hlađenja otpreska.

3. ZAKLJUČAK

Dobijeni rezultati iz simulacije procesa injektionog presovanja su bitni za ostvarivanje visoke tačnosti i kvaliteta procesa injektionog presovanja. Moldex3D omogućuje proveru i optimizaciju osnovnih parametara prerade koji bi trebali rezultirati kvalitetnim otprescima.

U radu je dat samo deo rezultata iz simulacije, dok program nudi uvid i u ostale parametre procesa koji bitno utiču na uspešnost procesa injektionog presovanja.

U radu je numeričkom simulacijom definisan najpovoljniji položaj ulivnog sistema i raspored kanala za hlađenje za konkretan plastomerni otpresak, takođe je dat prikaz potencijalnih mesta na kojima može doći do pojave nedostataka u otpresku.

4. LITERATURA

- [1] Čatić I.: *Proizvodnja polimernih tvorevina*, BIBLIOTEKA POLIMERSTVO SERIJA ZELENA, Zagreb, 2006.
- [2] Godec, D.: *Računalna simulacija procesa injeksijskoga prešanja*, Polimeri, Vol.27, No.1, 2006. pp 13-19
- [3] Trifunović, B., Nedić, B., Erić, M., Janković, M.: *Introduction to digital production of plastic products*, FQ2015 Festival kvaliteta, Kragujevac 2015., pp A-227 – A-234
- [4] Španiček Đ.: *Poliamidi*, Polimeri, Vol.34, No.4, 2014. Pp 113-114
- [5] Randelović, S., Milutinović, M., Nikolić, S., Pepeljnjak, T., Movrin, D.: *Application of FEM for analysis of injection molding process and mold design*, International Conference on Innovative Technologies, IN-TECH 2017, Ljubljana, 13. - 15.09.2017
- [6] <https://www.indiamart.com/ktrcouplingsindia/bowex-coupling.html> 13.8.2017.
- [7] Nikolić, S.: *Modeliranje procesa injektionog brizganja plastičnih masa u zatvorenim alatima*, Magistarski rad, Mašinski fakultet, Niš, 2015.

Autori: M.Sc. Ljiljana Stefanović, Doc. dr Mladimir Milutinović, Doc. dr Plavka Skakun, Univerzitet Novi Sad, Fakultet Tehničkih Nauka, Institut za Proizvodno mašinstvo, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Serbia. Tel: +381 21 485 2349, Fax: +381 21 454-495.

Email: ljiljanastefanovic@uns.ac.rs
mladomil@uns.ac.rs
plavkas@uns.ac.rs

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

**ISPITIVANJE UTICAJA POVRŠINSKE HRAPAVOSTI I TEMPERATURE NA
KOEFIČIJENT EMISIVNOSTI MESINGA**

***Rezime:** U radu je eksperimentalno određen koeficijent emisivnosti mesinga u zavisnosti od površinske hrapavosti i temperature. Autori su sproveli ispitivanje na radnim predmetima različite površinske hrapavosti pri hlađenju primenom infracrvene termografske tehnike (ITT). Rezultati su pokazali da koeficijent emisivnosti mesinga raste sa površinskom hrapavošću i opada tokom hlađenja, kao i da se kreće u granicama od 0.08 do 0.4. Zaključeno je da pri višim temperaturama signifikantniji uticaj površinske hrapavosti na porast koeficijenta emisivnosti. Na kraju, višestrukom regresionom analizom (MRA) je potvrđena jaka korelacija između ispitanih parametara i koeficijenta emisivnosti i određen je višestruki regresioni model.*

***Ključne reči:** ITT, koeficijent emisivnosti, MRA*

1. UVOD

Primena infracrvene termografske tehnike (ITT) za beskontaktno merenje temperature se znatno povećala prethodnih godina u svim sferama gde promene temperature odražavaju kvalitet i stanje proizvoda ili procesa. Ova tehnika je neintruzivna što je čini odličnim alatom za infracrvena nedestruktivna ispitivanja materijala (IRNDT), a zbog mogućnosti merenja temperature na udaljenim i nepristupačnim mesta često se koristi kod preventivnog održavanja i monitoringa stanja sistema [1,2]. Princip rada ITT se zasniva na transformisanju prostornih varijacija u emitovanom infracrvenom zračenju sa površine posmatranog objekta u dvodimenzionalnu infracrvenu (IR) sliku, gde su razlike u temperaturnoj distribuciji prikazane pomoću spektra boja ili tonova [3]. Praktična primena ITT je limitirana zbog poteškoća u raspoznavanju infracrvenog zračenja koje emituje telo od upadnog zračenja iz okoline ili od drugih izvora toplote. Značajan uticaj na količinu infracrvenog zračenja koja će dospeti do optičkog sistema IR kamera ima propusnost atmosfere, vlažnost vazduha, osetljivost infracrvenog detektora, temperatura i koeficijent emisivnosti posmatranog tela [4]. Koeficijent emisivnosti realnog tela predstavlja sposobnost tela da apsorbuje i emituje toplotu u poređenju sa idealnim crnim telom koje pri istoj temperaturi, geometrijskim i spektralnim uslovima zrači najveću količinu infracrvene energije [5]. Njegova vrednost zavisi od mnogih faktora, kao što su vrsta materijala, površinska hrapavost, mikrostruktura, temperatura, talasna dužina zračenja, itd. [6]. Više autora se bavilo

ispitivanjem uticaja navedenih parametara na emisivna svojstva materijala u okviru kojih je najviše pažnje posvećeno metalima i njihovim legurama zbog njihovog niskog i promenljivog koeficijenta emisivnosti. Zhang i dr. su odredili koeficijent emisivnosti čistog titanijuma TA1, oksidiranog nikla i austenitnog nerđajućeg čelika pomoću specijalne merne aparature koristeći monohromator sa difrakcionom rešetkom. U ispitivanom opsegu talasnih dužina od 0.8 μm do 2.2 μm i pri temperaturama od 200 $^{\circ}\text{C}$ do 1000 $^{\circ}\text{C}$ pokazano je da koeficijent emisivnosti ispitanih metala blago opada sa porastom talasnih dužina i raste sa povećanjem temperature [7]. Do sličnih rezultata došli su i autori Zhao i dr. koristeći infracrvenu spektroskopiju sa Furijevom transformacijom (FTIR). Ispitivanje je urađeno pri oksidaciji legura na bazi nikla, K465 i DZ125 u temperaturnom opsegu od 810 $^{\circ}\text{C}$ do 998 $^{\circ}\text{C}$ i pri malim talasnim dužinama [8,9]. Kong i dr. su analizirali koeficijent emisivnosti superlegure nikla, GH536 i pet aeronautičkih legura pomoću FT-IR spektrometra na talasnim dužinama od 1 μm do 5 μm u intervalu temperatura od 127 $^{\circ}\text{C}$ do 927 $^{\circ}\text{C}$. Istraživanja su pokazala da koeficijent emisivnost ispitanih legura raste sa povećanjem temperature i opada sa povećanjem talasnih dužina, dok oksidacija i tretman plamenom dovode do porasta koeficijenta emisivnosti [10,11]. Wen i dr. su u svojim opsežnim istraživanjima koristili multispektralnu radijacionu termometriju (MRT) za određivanje koeficijenta emisivnosti različitih legura aluminijuma u zavisnosti od temperature, površinske hrapavosti i oksidacije. Pokazano je da su emisivni spektri različitih legura pri istoj temperaturi veoma

sličnog oblika, ali usled oksidacije dolazi do znatnih razlika u magnitudi. Porast temperature i površinske hrapavosti uglavnom dovodi do porasta koeficijenta emisivnosti [12,13,14,15].

U prethodnim istraživanjima koeficijent emisivnosti je određivan prilikom zagrevanja uzorka metala. U ovom radu autori su ispitali koeficijent emisivnosti mesinga prilikom hlađenja uz pomoć ITT. Za detaljniju analizu uticaja površinske hrapavosti i temperature na emisivna svojstva mesinga korišćena je višestruka regresiona analiza sa ciljem uspostavljanja višestrukog regresionog modela.

2. METODOLOGIJA

Eksperimentalno određivanje koeficijenta emisivnosti sprovedeno je na uzorcima mesinga. Za potrebe eksperimenta izrađena su četiri radna predmeta dimenzija 150 mm × 150 mm × 10 mm. Jedan radni predmet je obrađen brušenjem, dok su preostala tri obrađena različitim režimima odvalnog glodanja u cilju dobijanja različitog kvaliteta površine – hrapavosti. Merenje hrapavosti radnih predmeta vršeno je kontaktnom metodom pomoću uređaja *MarSurf PSI*. Srednja aritmetička hrapavost, R_a izmerena je u 30 tačaka uniformno raspoređenih na površini radnih predmeta. Prosečna vrednost izmerenih srednjih aritmetičkih hrapavosti, $\overline{R_a}$ je uzeta za površinsku hrapavost radnog predmeta (Tabela 1).

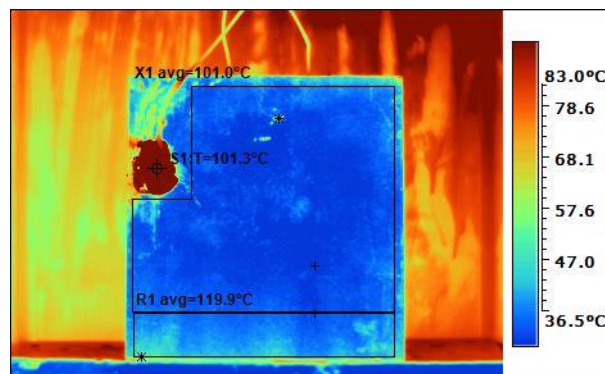
Tabela 1. Površinska hrapavost radnih predmeta

Način obrade	$\overline{R_a}$ [μm]	Oznaka
brušenje	1.23	B ₁
glodanje	3.24	B ₂
	3.38	B ₃
	3.92	B ₄

Uobičajena metoda za određivanje koeficijenta emisivnosti pomoću infracrvene (IR) kamere se zasniva na simultanom zagrevanju radnog predmeta, merenju temperature IR kamerom i merenju referentne temperature na analiziranoj površini. Referentna temperatura se može izmeriti kontaktnim uređajem za merenje temperature ili nanošenjem specijalnog premaza poznatog koeficijenta emisivnosti na ispitivanu površinu unutar vidnog polja IR kamere. Koeficijent emisivnost se određuje podešavanjem vrednosti od 0 do 1 dok se temperatura na IR kameri ne izjednači sa referentnom temperaturom [16]. S obzirom da je u pomenutim istraživanjima pokazano da koeficijent emisivnosti raste sa porastom temperature i površinske hrapavosti prilikom zagrevanja, u ovom radu je ispitano

emisivno ponašanje mesinga u procesu hlađenja. Za zagrevanje radnog predmeta korišćena je peć za termičku obradu u kojoj je pre merenja postavljena crna kutija od lima debljine 2 mm, kako bi se eliminisao uticaj zidova peći na rezultate merenja. Za termografsko snimanje korišćena je IR kamera ThermoPro™ TP8S sa spektralnim opsegom od 8 μm do 14 μm i tačnošću ± 1 °C. Za merenje referentne temperature korišćeni su termoparovi tipa K i crna guma poznate emisivnosti ($\epsilon = 0.95$). Na zadnjoj površini radnog predmeta postavljena su dva termopara, dok je treći termopar učvršćen na prednjoj površini radnog predmeta pomoću crne gume. Nakon montiranja termoparova i postavljanja IR kamere, radni predmet je zagrejan do temperature od 200 °C. Nakon postizanja odgovarajuće temperature radni predmet se hladi pri ambijentalnoj temperaturi od 25 °C. Istovremeno IR kamera beleži IR sliku radnog predmeta tokom hlađenja za svaki pad temperature od 10 °C. Opisani postupak je ponovljen za svaki radni predmet.

Dobijene IR slike su obrađene u programu *Guide IrAnalyser*, gde je određen prosečan koeficijent emisivnosti za izabranu oblast X₁ (Sl. 1). Oblast X₁ obuhvata samo reprezentativne delove površine radnog predmeta, izuzimajući prednji termopar i oblast R₁. Oblast R₁ je izuzeta iz analize zbog upadnog zračenja koje se odbija od poda peći i doprinosi značajnom povećanju temperature.

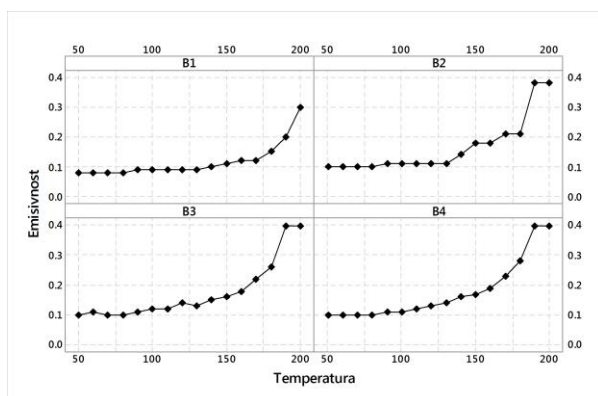


Sl. 1. IR slika radnog predmeta B₁ na 100 °C

Koeficijent emisivnosti je korigovana od 0 do 1 sve dok se prosečna temperatura oblasti, X₁ ne izjednači sa referentnom temperaturom. Prosečna vrednost temperatura izmerenih termoparovima i temperatura crne gume na IR slici su približno iste, te je stoga pri obradi IR slika za referentnu temperaturu korišćena temperatura crne gume u tački S1 sa podešenim koeficijentom emisivnosti 0.95. Opisanom metodom su određeni koeficijenti emisivnosti svih radnih predmeta na temperaturama od 50 °C do 200 °C.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Eksperimentalni podaci pokazuju da koeficijent emisivnosti mesinga uglavnom opada tokom hlađenja i raste sa porastom površinske hrapavosti (Sl. 2). Koeficijent emisivnost se kreće u intervalu od 0.08 do 0.4 što je svojstveno metalima. Na temperaturama većim od 100 °C uticaj površinske hrapavosti na koeficijenti emisivnosti radnih predmeta je signifikantniji.



Sl. 2. Koeficijent emisivnosti mesinga

Primenom višestruke regresione analize moguće je ispitati uticaj temperature i površinske hrapavosti na koeficijent emisivnosti. Izlaz iz primene ovog pristupa je višestruki regresioni model koji u vidu matematičke zakonitosti povezuje uticaj dve nezavisne promenjive na zavisnu promenjivu [17]. U konkretnom slučaju, zavisna promenjiva koeficijent emisivnost, ε se dovodi u vezu sa dve nezavisne varijable temperaturom, T i površinskom hrapavosti, R_a preko sledećeg modela (jed. 1):

$$\varepsilon = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 R_a + r \quad (1)$$

gde β_0 , β_1 , β_2 predstavljaju regresione koeficijente, a r je komponenta slučajne greške.

Za ocenu modela za $n = 64$ opservacija i brojem nezavisnih varijabli $k = 2$ matični oblik jed. (1) je data izrazom (2):

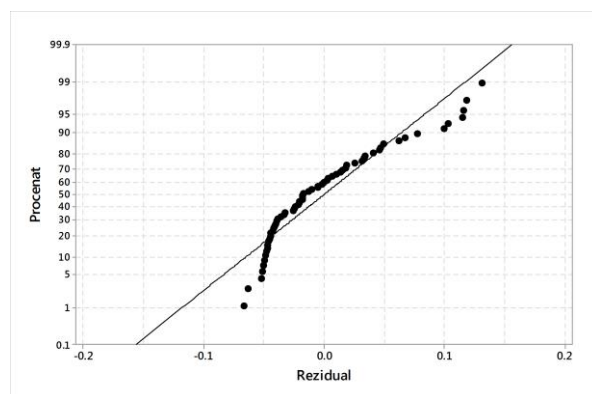
$$Y = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_{64} \end{bmatrix} X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{(64)1} & x_{(64)2} \end{bmatrix} \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} \beta = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_{64} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Rešavanjem matične jednačine prema [18] dobija se sledeći višestruki regresioni linearni model:

$$\varepsilon = 0.0015 T + 0.0237 R_a - 0,1031 \quad (3)$$

Predstavljeni model se može koristiti za temperature od 50 °C do 200 °C i za površinske

hrapavosti od 1.23 μm do 3.92 μm . U ovom slučaju višestruki koeficijent determinacije, R^2 pokazuje da 69.03 % varijacije u koeficijentu emisivnosti potiče od varijacije u temperaturi i površinskoj hrapavosti, dok je preostalih 30.97 % posledica uticaja drugih parametara, kao što su vlažnost vazduha, propusnost atmosfere, temperatura okoline, itd. Model se može koristiti za predikciju vrednosti koeficijenta emisivnosti pri temperaturama i površinskim hrapavostima izvan navedenog opsega, sa nešto nižim koeficijentom determinacije, R^2_{pred} od 65.24 %. Višestrukom regresijom određena je jačina zavisnosti između koeficijenta emisivnosti i posmatranih parametara na osnovu koeficijenta korelacije, r . Koeficijent korelacije iznosi 0.8 što ukazuje da postoji jaka (direktne) linearna zavisnost između temperature i površinske hrapavosti sa koeficijentom emisivnosti. Dijagrama rasipanja (Sl. 3) pokazuje mali stepen odstupanja podataka oko uspostavljene regresione linije, na šta ukazuje vrednost standardna greška, S od 0.05.



Sl. 3. Dijagram rasipanja

4. ZAKLJUČAK

Eksperimentalno određivanje koeficijenta emisivnosti mesinga je pokazalo da se koeficijent emisivnosti kreće u granicama od 0.08 do 0.4, kao i da opada sa smanjenjem temperature i raste sa površinskom hrapavošću. Pri višim temperaturama razlike između koeficijenata emisivnosti radnih predmeta su veće, što je posledica signifikantnijeg uticaj površinske hrapavosti na koeficijent emisivnosti pri višim temperaturama. Premda ITT nije preporučljiva za precizna određivanja koeficijenta emisivnosti metala, post obradom IR slika autori su uspeli da odrede male varijacije u koeficijentu emisivnosti, čak i pri razlikama između IR slika od 10 °C. Višestrukom regresionom analizom je potvrđena jaka korelacija između ispitanih parametara i koeficijenta emisivnosti i određen je višestruki regresioni model. Ovaj model se može primeniti samo za niske i srednje temperature, jer kod viših

temperatura postoji nešto veće odstupanje eksperimentalnih podataka od regresione linije. Razlog tome je neravnomerna temperaturna distribucija na površini radnog predmeta zbog prisustva defekata nastalih pri njegovoj obradi. Istraživanje je pokazalo da je ITT pouzdana metoda za merenje temperature metalnih površina u opsegu od 50 °C do 200 °C i da se može koristiti za procenu rizika od toplotnih opasnosti na opremi za rad.

5. REFERENCE

- [1] S. Bagavathiappan, B.B. Lahiri, T. Saravanan, J. Philip, T. Jayakumar, Infrared thermography for condition monitoring, IP & T, Volume 60, 2013, Pages 35-55.
- [2] J.F. Florez-Ospina, H.D. Benitez-Restrepo, Toward automatic evaluation of defect detectability in infrared images of composites and honeycomb structures, IP & T, Volume 71, 2015, Pages 99-112.
- [3] Practice for Thermographic Inspection of Insulation Installations in Envelope Cavities of Frame Buildings. ASTM International.
- [4] P. Schreivogel, M. Pfitzner, Optical convective heat transfer measurements using IT and FDPT, IJH and MT, Volume 82, 2015, Pages 299-308.
- [5] M. Rathore, R. Kapuno, Engineering Heat Transfer, Jones & Bartlett Publishers, 2011.
- [6] M. Švantner, P. Honnerová, Z. Veselý, The influence of furnace wall emissivity on steel charge heating, IP & T, Volume 74, 2016, Pages 63-71.
- [7] F. Zhang, K. Yu, K. Zhang, Y. Liu, K. Xu, Y. Liu, An emissivity measurement apparatus for near infrared spectrum, IP & T, Volume 73, 2015, Pages 275-280.
- [8] S. Zhao, X. Li, X. Zhou, K. Cheng, X. Huai, Investigation of the effects of Ni-based alloy K465 on the normal spectral emissivity during oxidation, IP & T, Volume 78, 2016, Pages 214-222.
- [9] S. Zhao, X. Li, X. Zhou, K. Cheng, X. Huai, Investigation of the effects of Ni-based alloy DZ125 on the normal spectral emissivity during oxidation, ATE, Volume 109, 2016, Pages 663-671.
- [10] B. Kong, T. Li, Q. Eri, Normal spectral emissivity of GH536 (HastelloyX) in three surface conditions, ATE, Volume 113, 2017, Pages 20-26.
- [11] B. Kong, T. Li, Q. Eri, Normal spectral emissivity measurement on five aeronautical alloys, Journal of Alloys and Compounds, Volume 703, 2017, Pages 125-138.
- [12] C.D. Wen, Issam Mudawar, Emissivity characteristics of roughened aluminum alloy surfaces and assessment of multispectral radiation thermometry (MRT) emissivity models, IJH and MT, Volume 47, 2004, Pages 3591-3605.
- [13] C.D. Wen, Issam Mudawar, Emissivity characteristics of polished aluminum alloy surfaces and assessment of multispectral radiation thermometry (MRT) emissivity models, IJH and MT, Volume 48, 2005, Pages 1316-1329.
- [14] C.D. Wen, Issam Mudawar, Modeling the effects of surface roughness on the emissivity of aluminum alloys, IJH and MT, Volume 49, 2006, Pages 4279-4289.
- [15] C.D. Wen, Tzung-Yuan Chai, Experimental investigation of emissivity of aluminum alloys and application of multispectral radiation thermometry, ATE, Volume 31, 2011, Pages 2414-2421.
- [16] M. Švantner, P. Vacíková, M. Honner, Non-contact charge temperature measurement on industrial continuous furnaces and steel charge emissivity analysis, IP & T, Volume 61, 2013, Pages 20-26.
- [17] M. T. Alexander, D. C. Montgomery, G. Runger, Applied Statistics and Probability for Engineers, Technometrics, 1995.
- [18] R. Singh, R.K. Umrao, M. Ahmad, M.K. Ansari, L.K. Sharma, T.N. Singh, Prediction of geomech. parameters using soft computing and MRA, Measurement, Volume 99, 2017, Pages 108-119.

Autori: M.Sc. Zorana Lanc, prof. dr Milan Zeljković, doc. dr Aleksandar Živković, dr Branko Štrbac, prof. dr Miodrag Hadžistević, Univerzitet Novi Sad, Fakultet tehničkih nauka, Departman za proizvodno mašinstvo, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Tel: 021 485 2306, Fax: 021 454 495.

E-mail:

zoranalanc@uns.ac.rs,
milanz@uns.ac.rs
acoz@uns.ac.rs,
strbacb@uns.ac.rs
miodrags@uns.ac.rs

Karpe, B., Novak, S., Rečnik, S., Kožuh, S., Holjevac Grgurić, T., Kosec, B., Nagode, A.

ANALYSIS OF CHAMBER FURNACE TECHNOLOGICAL PARAMETERS FOR HCS ROLLS HEAT TREATMENT

Abstract: In this paper, industrial control technical measurements of the heat treatment of high chromium steel rolls (HCS), is presented. Measurements were carried out on the gas fired car bottom chamber furnace Bosio PP-KP 70/1150 in the company Valji d. o. o., Štore, Slovenia. Temperature measurements of the individual heating zones of the furnace, rolls surfaces, the external walls of the furnace and gas consumption were monitored throughout the whole process of heat treatment. The temperature profile of the rolls cross-section was calculated using computer simulation. Periodical measurements of CO and NO_x emissions were also carried out with the aim of combustion evaluation and ecological integrity. The successfulness of heat treatment was examined through microstructure observation, hardness measurement and the amount of retained austenite in the heat treated rolls.

Key words: High chromium steel (HCS) rolls, chamber furnace, heat treatment, measurements

1. INTRODUCTION

Company Valji d.o.o. is a manufacturer of industrial rolls for hot and cold rolling of sheet metal and processing of plastics and rubber. In the company strive for the development of new materials and technologies, achieving top quality, and high production. In the paper, control technical measurements of the gas fired car bottom chamber furnace (type PP-KP 70/1150 Bosio d.o.o.) is presented. The furnace was introduced into production in 2008 and used for heat treatment of various types of rolls. Due to the demanding heat treatment, the control measurements of the furnace were performed on a batch of high chromium steel (HCS) rolls. With additional thermocouples, temperature of distinctive areas of the roll surfaces, temperature of individual heating zones in the furnace and temperature of the outer walls was monitored. Temperature distribution in the roller cross-section was calculated by computer simulation (FDM). From the point of view of cost estimation of the heat treatment, the consumption of gas was monitored throughout the entire heat treatment process. As each energy-intensive production is inextricably linked to the release of harmful emissions into the atmosphere, periodic measurements of CO and NO_x gas emissions were also carried out.

Rolls used for hot sheet metal rolling on continuous rolling mills are divided according to their position (stand) in the rolling mill (Figure 1). For initial roughing stand, high chromium iron rolls (HCI), high chromium steel rolls (HCS) or high speed steel rolls (HSS) are used. For initial

finishing stands, HSS rolls, and to a lesser extent, the HCI rolls are most commonly used, while for the final finishing stands the rolls with the working shell made of high-alloyed nickel iron alloy with graphite (ICDP-Indefinite Chill Double Pour) or highly alloyed nickel-iron alloy with niobium and vanadium additions (CE-ICDP (carbide-enhanced ICDP rolls) are most commonly used. All types of the mentioned rolls are also manufactured in the company Valji d.o.o.

2. HIGH CHROMIUM STEEL (HCS) ROLLS

High chromium steel rolls are three layer type rolls (Figure 1) with the pearlite-ferrite nodular cast iron structure (NF 77) of the core, grey cast iron with lamellar graphite structure of intermediate layer and high chromium steel working shell with hardened martensitic structure, approximately 15 % of hard eutectic carbides M₇C₃ (M = Cr, Fe), and small amount of hard MC and M₆C primary carbides, due to vanadium and molybdenum additions. Chemical composition of the working shell is given in table 1.

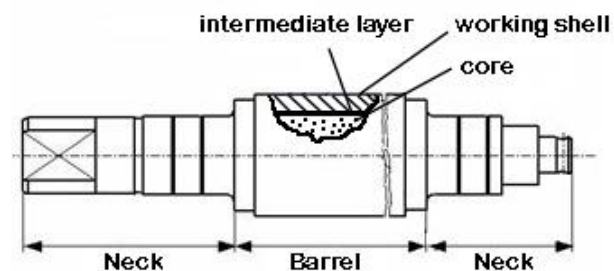


Fig. 1. Roller cross section.

Table 1. Chemical composition of HCS rolls working shell

Wt.%	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V
min	1.0	0.5	0.6	10.0	1.0	1.0	0.2
max	2.0	1.0	1.2	13.0	2.0	2.0	0.5

The minimal thickness of the working shell of the HCS rolls is 70 mm. The HCS rolls have high compressive strength and toughness and are distinguished by their high wear resistance and high resistance to thermal fatigue. Excellent oxidation resistance at elevated temperatures and the formation of a stable oxide film on a working surface that does not peel and prevents the hot steel sheet from bonding to the roller surface, gives them the main advantage when used as rolls in the first roughing stands of continuous mill lines or single reversible roughing stands.

3. MANUFACTURING PROCESS

High chromium rolls (HCS) are cast through a horizontal or vertical centrifugal casting process, in which the rotation of the mould (≈ 470 rpm) creates a sufficiently high centrifugal force to distribute the melt along the inner periphery of the hollow cylindrical die (Figure 2). After the preparation of the melt, roll barrel working shell is poured, followed by the intermediate layer, which has the task to improve adherence between the core and working shell of the roll. When solidified two-layer working shell reaches the prescribed temperature, is transferred to the casting pit together with the die and placed vertically on the pre-prepared mould of the lower roller neck. The mould of the upper roller neck, feeding system, and pouring basin are installed. Temperatures of the working shell and the melt for the roller core play an essential role when casting the core of the roller. The temperature interval in which the roller working shell and the core are well joined is very narrow, only $\pm 10^\circ \text{C}$. At temperatures too low, the working shell and the core will not agglutinate, and at temperatures too high, excessive re-melting of the intermediate layer or even working shell occurs.



Fig. 2. Centrifugal casting of the working shell.

Heat treatment of high chromium steel rolls is a very time consuming process, lasting several weeks. Rolls are slowly heated up to 970°C , into the two phase field ($\gamma_{\text{Fe}} + \text{M}_7\text{C}_3$).

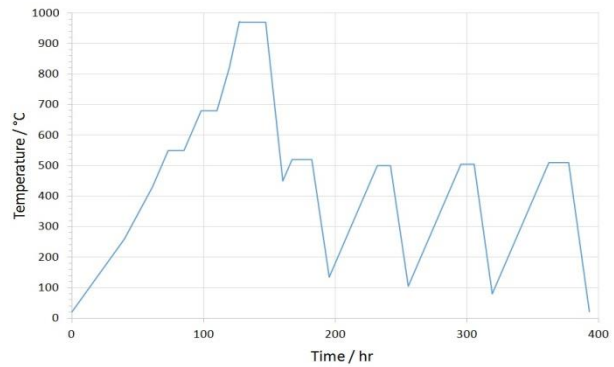


Fig. 3. Heat treatment temperature profile.

Since the rollers are thick-walled castings with a very large mass (>35 tonnes), it is necessary to retain the heat several times in order to equalize the temperature throughout the roller cross-section (Figure 3). The most critical temperature interval is below 500°C , where the steel is not yet sufficiently plastic to compensate the thermal stresses due to unequal thermal expansion of the core and working shell and the release of residual casting stresses. Namely, both types of stresses have the same sign and are aggregated during the heating process, which can lead to cracks and consequently useless roller. Austenitization takes place at a temperature of $980^\circ \text{C}/20\text{h}$. During annealing, the dendritic structure of austenite changes to a polygonal structure with surrounding network of eutectic carbides (Figure 4).

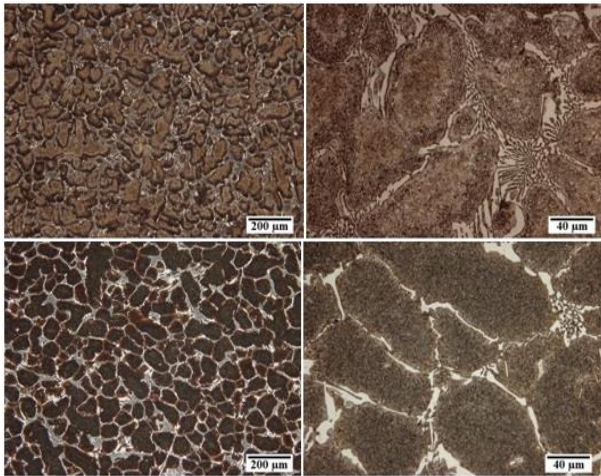


Fig. 5. Microstructure of working shell of HCS rolls. Up: before heat treatment, bellow: after heat treatment.

These types of steels are characterized by the relatively high stability of austenite in a temperature interval between 350 °C and 525 °C. With rapid cooling from the austenitization temperature down to 450 °C and subsequent slow heating (10 °C/hr) up to 520 °C/12hr, the conditions for precipitation of secondary carbides from the austenite matrix are created. In the next phase of heat treatment, rolls are cooled to 135 °C, below the martensite start temperature ($M_s \approx 200$ °C), and the part of the austenite is transformed into martensite. The amount of retained austenite is still high (> 40 %) at this stage and increases with the temperature from which the rolls are quenched and with the carbon concentration in the steel. By repeated heating up to a temperature of 500 °C, 505 °C and 510 °C, and intermediate cooling down to an ever-lower temperature as in the first cooling stage, austenite is progressively transformed into martensite, which in then tempered in the next heating step. Simultaneously, fine secondary carbides $M_{23}C_6$, which help to strengthen the matrix, precipitate from retained austenite. The final microstructure of the roll working shell consists of a tempered martensitic matrix with uniformly distributed secondary carbides $M_{23}C_6$, and small amount of MC and M_6C vanadium and molybdenum primary carbides surrounded by a network of eutectic carbides M_7C_3 .

4. EXPERIMENTAL MEASUREMENTS

Chamber furnace Bosio, type PP-KP 70/1150 serves in the company Valji d.o.o. for the heat treatment of cast rolls. Fuel for heating is natural gas.

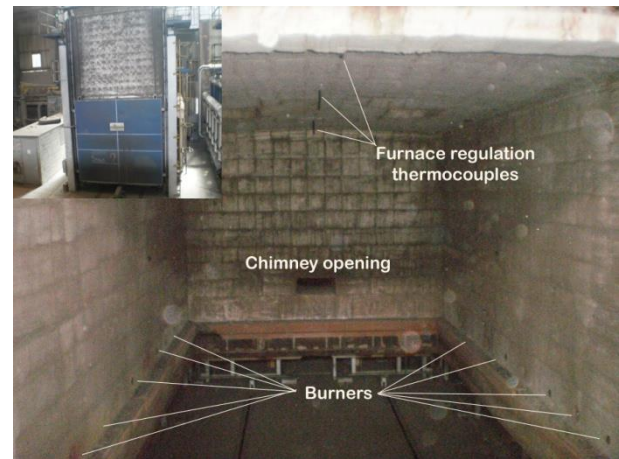


Fig. 6. Furnace chamber.

The temperature in the furnace is controlled by the three thermocouples (PtRh-Pt; Type S) mounted on the furnace ceiling. Burners (12 pcs with 270kW, maximum gas power 330 Nm³/hr) are installed in a horizontal line on both side walls of the furnace, and divided in three temperature zones with individual regulation. The combustion air is preheated to a maximum temperature of 450 °C. Insulation of oven walls: 1. Insulfrax SF layer, thickness 13 mm, and 2. layer Fiberfrax Prismo-Block, quality Durablanket S 170/1200, thickness 300 mm.

The measurement of the surface temperature of the rolls was carried out on two equal HCS rolls, grade CCrS NF 77 (dimensions 1200 X 2000 mm, weight of individual roller 37,5 tons), with K-type thermocouples.



Fig. 7. Protection against sagging.

In order to prevent direct exposure to radiation, thermocouples were protected by high temperature resistant insulating wool ISOFRAX® and refractory brick. The roll necks are lined up due to the sagging at elevated temperatures under the influence of their own weight (Figure 7).

Figure 8 shows the temperature profile on the surface of the rolls measured by the additional thermocouples. The temperature at the roller neck surface is slightly higher, which is understandable, since higher thermal conductivity of the roller core alloy (NF 77), smaller diameter, and the greater thickness of the gas layer above it. A slightly higher temperature on the lower part of the working shell is attributed to the convective influence, due to the direct flow of flue gases from the burners. The measured temperatures of the process in the furnace, the temperatures on the surface of the roller and the set temperature are well-matched, as no major temperature deviations have been detected.

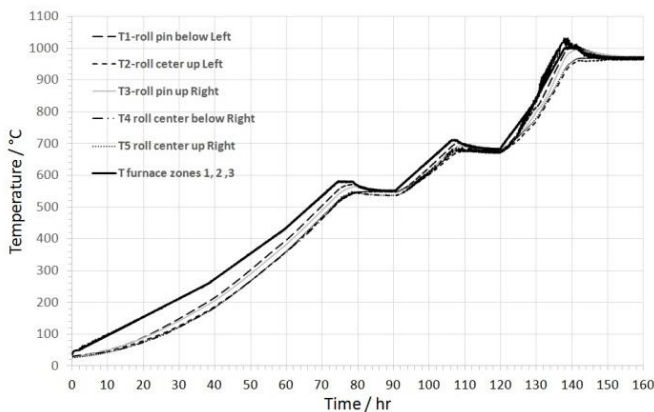


Fig. 8. Temperatures of rolls surfaces and furnace heating zones.

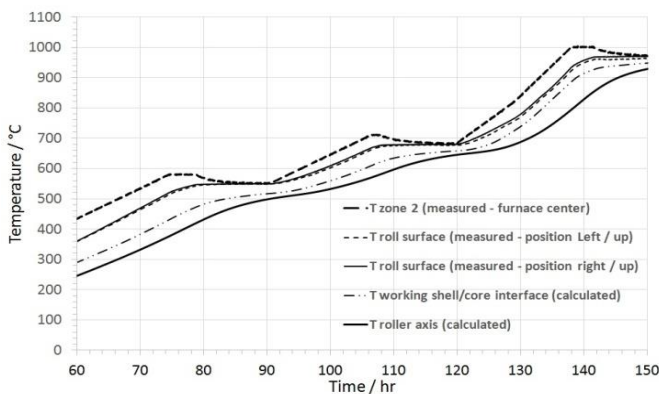


Fig. 9. Temperature profile of the roller cross section.

With the finite difference method (FDM) and computer simulation, it is established that the rolls are uniformly heated (Figure 9) throughout the cross-section with the prescribed temperature regime, and the temperature differences between the surface and the interior of the roll are not so significant to cause critical thermal stresses. Temperatures measured on the rolls surface were taken as boundary conditions for internal calculated temperatures of the roller cross-section.

5. CONCLUSION

Regular control measurements of all production facilities contribute to quality assurance and reduce unnecessary costs due to production failure.

4. REFERENCES

- [1] Internal documentation Valji d. o. o.
- [2] Drobne, M., Vuherer, T., Samardžić, I. Glodež, S. Fatigue crack growth and fracture mechanics analysis of a working roll surface layer material, *Metalurgija* 53, 2014, 481-484.
- [3] Internal documentation Bosio d. o. o..
- [4] Belzunce, F. J., Ziadi, A., Rodriguez, C. Structural integrity of hot strip mill rolling rolls, *Engineering failure analysis* 11, Elsevier, University of Oviedo, Campus Universitario, Gijon, Spain, 2004, 789-797.
- [4] Zihenberger, K. H., Windhager, M. Recent developments in HSM rougher rolls-risks and chances, Eisenwerk Sulzau-Werfen, Tenneck, Austria., The Material Science And Technology Conference And Exhibition, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2005, 38-41.

Authors: Ass. Prof. Dr. Blaž Karpe, Sergej Novak, Simon Rečnik, Assoc. Prof. Dr. Aleš Nagode, Prof. Dr. Borut Kosec, University of Ljubljana, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenia, Phone: +386 1 2000413, Fax: +386 1 4704560. Assoc. Prof. Dr. Stjepan Kožuh, Assoc. Prof. Dr. Tamara Holjevac Grgurić, University of Zagreb, Faculty of Metallurgy, Aškerčeva 6, 1000 Sisak, Croatia, Phone: +385 43 533 381, Fax: +385 43 533 381.

E-mail: blaz.karpe@omm.ntf.uni-lj.si
recnik84@gmail.com
novak@gmail.com
kozuh@simet.hr
tholjev@simet.hr
ales.nagode@omm.ntf.uni-lj.si
borut.kosec@omm.ntf.uni-lj.si

Tanasić, Z., Jotanović, S., Janjić, G., Vranješ, B., Kosec, B.

PRAĆENJE I UNAPREĐENJE PERFORMANSI PROCESA PROIZVODNJE

Rezime: Konkurentnost na tržištu se najčešće meri preko kvaliteta proizvoda, cene i roka isporuke. U procesima poslovnog sistema nema mesta za pojavu škarta, gubitaka, dorade ili loše organizacije posla. Ako su kupci zadovoljni kvalitetom i cenom proizvoda ili usluge direktno dolazi do povećanog tržišnog učešća preduzeća. Za razvoj i unapređenje procesa proizvodnje neophodna je stalna komunikacija između zaposlenih u svim procesima poslovnog sistema kao i uključenost svih stejkholdera. Praćenjem i unapređenjem performansi procesa proizvodnje postižu se pozitivni efekti u poslovnom sistemu, procesima i na tržištu. U radu data je FMEA analiza procesa proizvodnje nosač četkica Comstar. FMEA metoda je jedna od metoda preventivnog upravljanja kvalitetom koja se koristi za procenu načina i efekata potencijalnih otkaza podsistema, komponenti ili funkcija u sistemu.

Cljučne reči: FMEA metoda, analiza rizika, proces proizvodnje

1. UVOD

Preduzeća danas posluju u veoma složenim uslovima. Okruženje u uslovima globalizacije i otvorenog tržišta se karakteriše velikom konkurencijom, brzim tehnološkim promjenama, visokim nivoom turbulencije, te neizvesnošću.

Upravljanje preduzećima u ovakvim uslovima zahteva od rukovodećih ljudi odgovarajuće znanje, neophodano za upravljanje i planiranje, informatičke tehnologije, logistiku i efikasno funkcionisanje preduzeća kao ekonomskog sistema, odnosno socio - tehničkog sistema.

Težnja svakog preduzeća je da plasira na tržište kvalitetan proizvod, koji će osigurati profit, odnosno obezbediti opstanak i razvoj preduzeća. Iz te težnje proizilazi da preduzeća posebnu pažnju treba da posvete povećanju pouzdanosti proizvoda [1].

U radu je predstavljena praktična primena FMEA metode na procesu montaže nosača četkica, a koja je proistekla iz praćenja kvaliteta procesa i proizvoda i specifičnih zahteva kupca.

2. FMEA METODA

Analiza načina otkaza i njihovih posledica – FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) je alat kojim se pronalaze i analiziraju svi mogući načini otkazivanja komponenti sistema, posledica koje ti otkazi, ako se dogode, imaju na sistem i mogućnost izbegavanja otkazivanja ili smanjivanja uticaja otkazivanja na sistem.

FMEA je iterativna metoda koja od inženjera zahteva da odgovori na sledeća pitanja:

- Šta se može pogrešiti na proizvodu ili u procesu, kojim se izrađuje proizvod?

- Koliko se može pogrešiti?

- Šta je potrebno uraditi, da sprečimo greške?

FMEA je važna tehnika u programu osiguravanja pouzdanosti koja se može koristiti za rešavanje raznih problema. Cilj primjene FMEA analize je:

- proceniti efekte i posledice događaja, prouzrokovanih bilo kakvim greškama koje čine sastavni deo sistema,
- odrediti važnost ili kritičnost svakog oblika greške s obzirom na pravilno funkcionisanje sistema i njegov uticaj na pouzdanost i/ili sigurnost postupka,
- distribucija identifikovanih načina otkaza u skladu s mogućnošću njihovog otkrivanja, dijagnoze, testiranja, zamenljivosti delova i
- procena sprovođenja potrebnih mera [2].

Jedan od najznačajnijih faktora za uspešnu primenu FMEA analize je ažurnost. FMEA je zamišljena kao preventivna mera a ne metoda kojom se analiziraju činjenice. Na osnovu FMEA analize treba da se greške konstrukcije ili procesa prepoznaju prije ugradnje u proizvod. Neophodno je uvođenje FMEA analize u što ranijoj fazi, kada je proizvod ili proces još jednostavan i jeftin, kako bi se sprečile izmene proizvoda ili procesa u kasnijoj fazi, kada su izmene mnogo teže i skuplje.

Jedan od pristupa za određivanje prioritarnih akcija je upotreba faktora rizika RPN (Risk Priority Number)

$$\text{RPN} = \text{Ozbiljnost (S)} \times \text{Pojavljivanje (O)} \times \text{Detekcija (D)}$$

Faktor rizika predstavlja proizvod vrednosti: ozbiljnosti oblika greške, vrednosti pojavljivanja greške i vrednosti detekcije greške. U okviru pojedinačnih FMEA analiza ova vrednost može se

kretati između 1 i 1000.

2.1 FTQ i KPI

Kao pomoć za donošenje odluke o upotrebi FMEA analize mogu se koristiti parametri kvaliteta proizvoda ili procesa proizvodnje koji se mere. Merenje parametara kvaliteta proizvoda ili procesa proizvodnje se izvodi pomoću nekoliko različitih metoda, a u okviru ovog rada korišćene su dvije metode i to:

- FTQ (First Time Quality) i
- KPI (Key Performance Indicator).

FTQ se izražava brojem izdvojenih delova na milion izrađenih delova (ppm). Može se meriti na bilo kojem koraku u procesu proizvodnje, gde se delovi izdvajaju. FTQ se izračunava na sledeći način:

$$FTQ(PPM) = ((S+R)/N) \times 1000000$$

Gdje je:

S – broj otpisanih proizvoda,

R – broj popravljenih proizvoda,

N – ukupan broj proizvoda koji se pokušaju izraditi.

KPI ocenjuje uspeh preduzeća ili određene aktivnosti odnosno procesa koja se izvodi.

Ukupna učinkovitost procesa je skup široko prihvaćenih merenja koji odražavaju proizvodni uspeh:

$$OEE = \text{dostupnost} \times \text{učinak} \times \text{kvalitet}$$

$$\text{Dostupnost} = \text{vreme rada} / \text{ukupno vreme}$$

$$\text{Učinak} = \text{Ukupna vrednost} / \text{Ciljna vrednost}$$

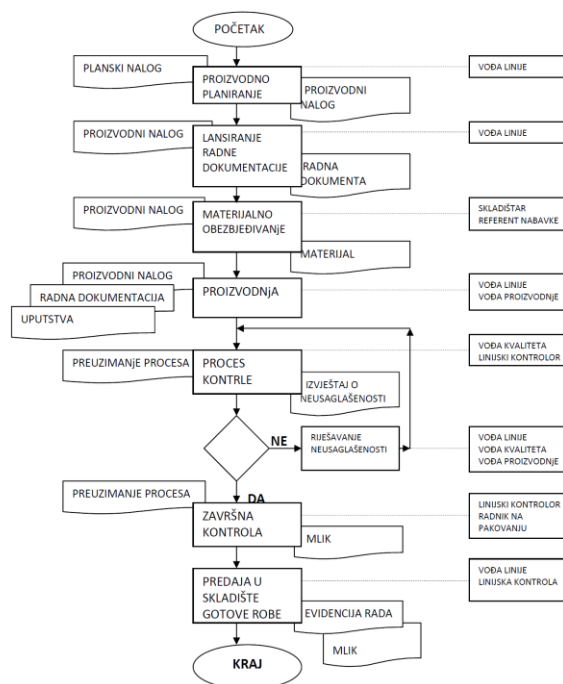
$$\text{Kvalitet} = \text{Vrednost dobrih} / \text{Ukupna vrednost}$$

3. ANALIZA PROCESA PROIZVODNJE

Dijagram toka procesa proizvodnje u preduzeću "Mahle Letrika Laktaši" prikazan je na slici 1. Prilikom praćenja proizvodnje vrši se:

- praćenje toka izrade lansirane količine svakog proizvoda u odnosu na planirane termine, kao i evidentiranje ostvarenih količina. U slučaju kašnjenja sledi intervencija rukovodioca,
- praćenje toka proizvodnje da ne dođe do poremećaja u njenom odvijanju (škart, lomovi alata, kvar opreme, pravovremenost transporta) u saradnji sa rukovodiocem proizvodne linije,
- utvrđivanje gotovosti delova i opreme u skladištu ili na montaži [5].

Početak rada počinje sa „preuzimanjem procesa“, tj. verifikacijom prvih komada od strane vođe linije ili radnika na mašini, kao i verifikacijom od strane linijskog kontrolora. Overen prvi komad se čuva na označenom mestu do kraja serije.



Sl. 1. Dijagram toka procesa proizvodnje

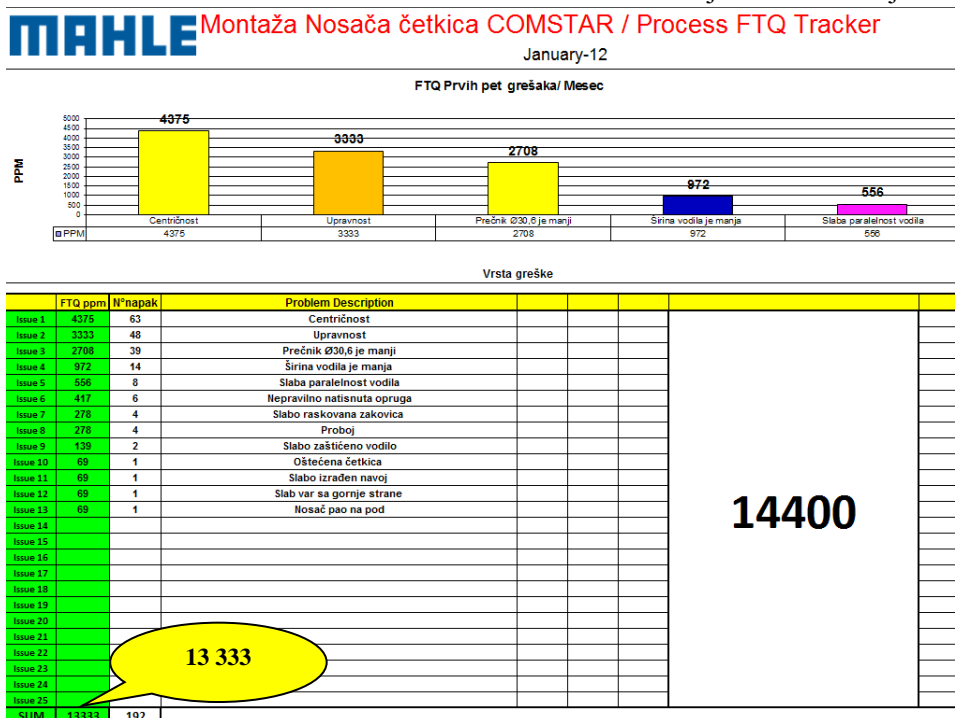
U radu, zbog specifičnih zahteva u pogledu procesa proizvodnje kao i u pogledu kvaliteta izrade proizvoda, predstavljen je nosač četkica Comstar. Proces proizvodnje se sastoji iz dva dela, prvi deo je proces proizvodnje i nabavke sastavnih delova proizvoda, a drugi deo je proces montaže nosača četkica. Za sve procese u proizvodnji nosača četkica Comstar definisani su „vlasnici“ odnosno vođe procesa kao i operateri na svim operacijama procesa. Nakon definisanja postupka odvijanja procesa kao i analize svih operacija u procesu pristupilo se definisanju tima za izradu FMEA procesa. Tim za izradu FMEA analize za proces montaže nosača četkica Comstar činili su: vođa projekta, vođa tehnologije, vođa kvaliteta, tehnolog za izradu podsastava, referent nabave i direktor.

3.1 FMEA analiza procesa

Na osnovu izradene FMEA analize za određene karakteristike proizvoda dobijen je broj prioriteta rizika RPN, a koji su iznad propisane granice od 112. Na osnovu toga proizilazi potreba da za potencijalne greške čiji je RPN iznad propisane granice treba preduzeti određene korektivne mere i definisati rokove za njihovo uvođenje. Korektivne mere i rokovi se takođe upisuju u obrazac FMEA analize čime je okončan postupak izrade analize.

Praćenjem procesa montaže i grešaka koje su se pojavile u procesu dobijeni su rezultati prikazani na FTQ obrascu, Slika 2.

korektivnih mera je dat u sledećoj tabeli.



Sl. 2. FTQ – januar 2012. godine

Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da je ukupan broj grešaka u procesu montaže veći od željenog broja grešaka što je predstavljeno PPM brojem koji je za mesec januar 2012. godine iznosio 13333 PPM, dok je postavljeni cilj od strane kupca maksimalno 10000 PPM. Sa stanovišta postavljenih zahteva i ciljeva za proces montaže zaključuje se da je proces montaže nestabilan. Veća vrednost PPM-a od željene vrednosti ukazuje na potrebu da se u procesu montaže moraju izvršiti određene mere poboljšanja kako bi se ispunili postavljeni zahtevi.

Praćenjem procesa montaže i grešaka koje su se javile u procesu ustanovljeno je da se u procesu montaže javljaju odstupanja od zahtevanih karakteristika proizvoda koja nisu bila razmatrana prilikom izrade FMEA analize. Iz tog razloga izvršena je dopuna već izrađene FMEA analize, a koja se odnosi na uvrštavanje najuticajnijih grešaka, ocenjivanje njihovog uticaja i definisanje korektivnih mera kao i rokova za uvođenje izabranih korektivnih mera. Analizom korektivnih mera za greške obuhvaćene FMEA analizom zaključeno je da su za sve greške izabrane iste korektivne mere i da je osnovni uzrok nastanka grešaka alat za zakivanje nosača četkica.

S obzirom da se postojeće konstruktivno rešenje alata za zakivanje nije moglo doradi, kako bi se ispunili svi navedeni zahtevi, pristupilo se izradi potpuno novog alata za zakivanje.

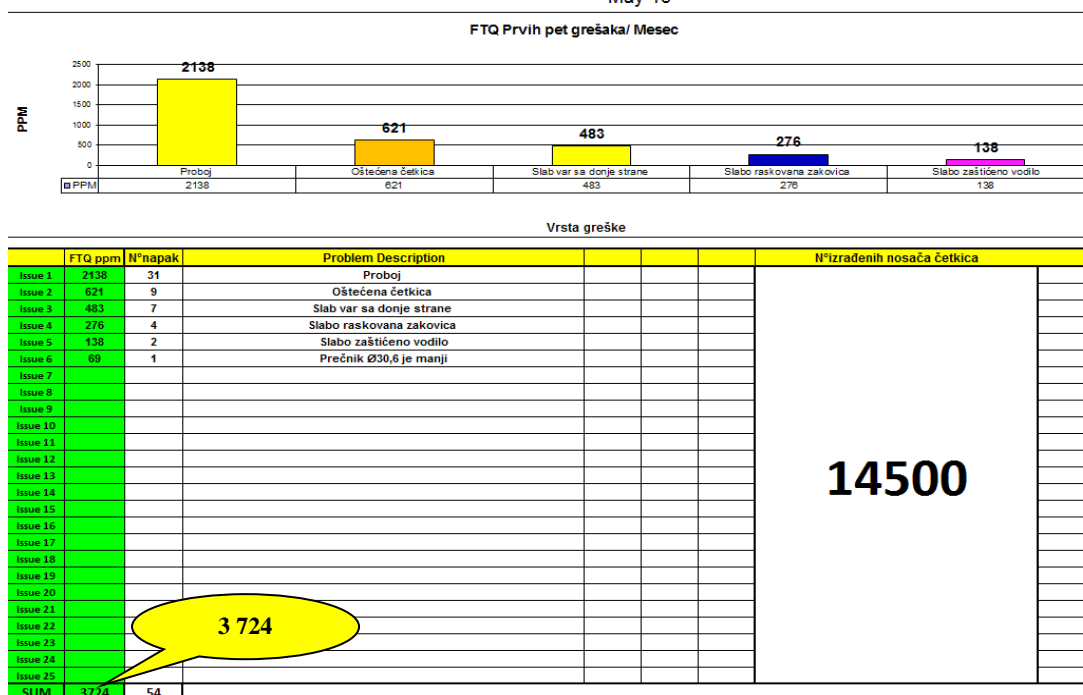
Korektivne mere su uvrštene u FMEA analizu i izvršeno je ocenjivanje njihovih učinaka, što je prikazano u trećoj verziji FMEA, a isečak ocene

Tabela 1. Treća verzija FMEA analize (isečak)

Preporučene mere	Odgovornost i ciljni datum izrade	Rezultati posle aktivnosti				
		Izvedene mere	Termin	Povratnja	Defekcija	RPN
1) Popravka alata za savijanje vodila do februara 2012 2) Dorada alata za zakivanje podsastava na osnovnu ploču	Boriša Radović 1. 30.01.2012 2. 15.04.2013	1) Popravljen alat za savijanje vodila 2) Izrađen novi alat za zakivanje podsastava na osnovnu ploču	8	2	6	96
		1) Popravljen alat za savijanje vodila 2) Izrađen novi alat za zakivanje podsastava na osnovnu ploču	8	2	6	96
		1) Popravljen alat za savijanje vodila 2) Izrađen novi alat za zakivanje podsastava na osnovnu ploču	8	2	6	96

Pozitivni efekti uvođenja mera poboljšanja takođe su vidljivi preko FTQ obrasca za praćenje procesa i pojave grešaka u procesu prikazanom na Slici 3. Ukupan broj grešaka u procesu montaže manji je od željenog broja grešaka što je predstavljeno PPM brojem koji je za mesec maj 2015. godine iznosio 3724 PPM, što je znatno manje od postavljenog cilja max. 10000 PPM.

U slučaju pojave novih grešaka koje nisu uvrštene u trenutnu verziju FMEA analize, ili pojave određenih promena i poremećaja u posmatranom procesu vrši se ažuriranje FMEA analize, njeno ocenjivanje kao i povremeno preispitivanje, a sve u cilju obezbeđenja zadovoljavajućeg kvaliteta proizvoda i ispunjavanja specifičnih zahteva kupca.



Sl. 3. FTQ – maj 2015. godine

4. ZAKLJUČAK

Za proces montaže nosača četkica Comstar i proces proizvodnje sastavnih delova za nosač četkica Comstar, koji se izvode u preduzeću “Mahle Letrika Laktaši” postavljeni su visoki standardi po pitanju kvaliteta izrađenih proizvoda kao i nadzora nad procesima tako da se nametnula potreba za upotrebom neke od metoda unapređenja procesa rada. Na osnovu prethodno navedenog dolazi se do zaključka da se faktor rizika može dovesti u zahtevane granice samo ako se izvrši analiza procesa i sprovedu korektivne mjere za smanjenje pojavljivanja grešaka.

Nakon izvršene analize i predloženih mera za smanjivanje vrednosti pojavljivanja greške pristupilo se izradi predloženih rešenja koja su dala pozitivne rezultate, što je pokazano pri ponovnom ocenjivanju FMEA analize. Pozitivni rezultati uvedenih mera se ogledaju i kroz smanjenje broja grešaka u procesu, a samim tim i u smanjenju udela škarta u procesu montaže. Saznanja koja su stečena primenom FMEA metode za analizirani proces montaže mogu da se primene za dalja unapređenja procesa kao i za druge procese i proizvode u preduzeću.

Na osnovu svega navedenog može se zaključiti da je FMEA živ dokument koji treba kontinuirano preispitivati i po potrebi ažurirati, kad god postoji promena konstrukcije proizvoda ili procesa.

5. LITERATURA

- [1] Vulanović, V., Stanivuković, D., i dr.: Metode i tehnike unapređenja procesa rada, IIS, Novi Sad, 2003.
- [2] Chrysler LLC, Ford Motor Company, General Motors Corporation: FMEA, Fourth edition, June 2008.
- [3] Živković, Ž., Đorđević, P.: Upravljanje kvalitetom, Grafomed Bor, 2013.
- [4] Križman, V., Štrancar, D.: Analiza mogućih napak in njihovih posledic (FMEA), 2010.
- [5] Poslovník kvaliteta i zaštite životne sredine, Mahle Letrika Laktaši, 2014.

Autori: Prof. Dr. Zorana Tanasić, prof. dr Goran Janjić, Mr Biljana Vranješ, Mašinski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci, V. Stepe Stepanovića 71, 78000 Banja Luka, Tel: +381 51 433 001, Fax: +381 51 465085.

Sladán Jotanović, dipl. inž. maš., MAHLE Letrika Laktaši d.o.o., Nemanjima 63a, 78250 Laktaši, Tel: +387 51 30785, Fax: +387 51 35315
Prof. dr Borut Kosec, Univerza v Ljubljana, Naravoslovnotehniška fakulteta, Aškerčeva cesta 12, 1000 Ljubljana;

E-mail: zorana.tanasic@mf.unibl.org
jottanovic@hotmail.com
goran.janjić@mf.unibl.org
biljana.vranjes@mf.unibl.org
borut.kosec@omm.ntf.uni-lj.si

**SCIENTIFIC CONFERENCE WITH INTERNATIONAL
PARTICIPATION
ETIKUM 2017
NOVI SAD, SERBIA, DECEMBER 6-8, 2017**

Vasić, J., Petrović S., Kašiković, N., Milošević, R., Szilágyi, Á.

UTICAJ GRAMATURE PAPIRA NA KVALITET DIGITALNE ŠTAMPE

***Rezime:** Cilj istraživanja predstavlja ispitivanje kvaliteta kao i ponovljivosti kvaliteta štampe otisaka izrađenih digitalnom štampom, u zavisnosti od gramature korišćenog papira. Otisci su štampani elektrofotografskim postupkom na papirima tri različite gramature. Kvalitet štampe kao i njegova ponovljivost je određena merenjem različitih, standardnih parametara kvaliteta štampe, na otiscima štampanim u različitim vremenskim intervalima. Analiza dobijenih rezultata pokazala je da je elektrofotografskom tehnikom štampe moguće postići visoku ponovljivost kvaliteta štampe i da gramatura papira nema značajan uticaj na konačni kvalitet štampe, ukoliko su optičke karakteristike korišćenih papira ujednačene.*

***Ključne reči:** digitalna štampa, kvalitet štampe, elektrofotografija*

1. UVOD

Elektrofotografija danas predstavlja jednu od vodećih tehnika digitalne štampe. Proces štampe je beskontaktni i zasniva se na stvaranju latentne slike na površini fotoprovodnog cilindra koji vrši prenos tonera na podlogu za štampu. Površina ovog cilindra se prvo mora naelektrisati, a zatim oslikati pomoću niza laserskih dioda, što dovodi do neutralizacije generisanog elektrostatičkog naboja na neštampajućim površinama cilindra. Nakon formiranja latentne slike, štampajuće površine fotoprovodnog cilindra privlače i prihvataju čestice tonera suprotnog naelektrisanja čime latentna slika postaje vidljiva [1]. Zatim se toner sa cilindra prenosi na podlogu za štampu posredstvom elektrostatičkih, privlačnih sila, nakon čega se toner na podlozi fiksira pod uticajem toplote (koja izaziva topljenje čestica tonera) i pritiska koji olakšava penetraciju rastopljenog tonera u strukturu podloge za štampu [2].

U digitalnoj tehnici štampe, kakva je elektrofotografija, najveći uticaj na kvalitet otiska imaju karakteristike korišćene podloge za štampu, svojstva tonera, njihove međusobne interakcije, kao i specifičnosti samog procesa štampe [3, 4]. Tip korišćene podloge za štampu umnogome utiče na krajnji izgled odštampanog otiska, koji može u velikoj meri varirati u zavisnosti od odabrane podloge za štampu [5]. Toneri namenjeni ovoj tehnici štampe se sastoje od pigmenta, termoplastičnih smola i aditiva. Veoma bitno svojstvo tonera je veličina čestica pigmenta, gde mala veličina čestica omogućava bolju oštrinu, višu rezoluciju, a samim tim i bolji kvalitet štampe [6].

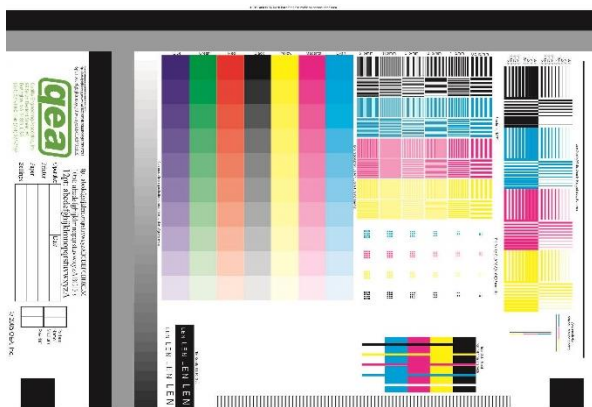
Tehnika elektrofotografije zahteva podloge za štampu sa posebnim svojstvima. Asortiman takvih podloga je širok, a tip i površinska svojstva podloge najviše utiču na krajnji kvalitet otiska [7]. Naime, električna provodljivost podloge mora biti odgovarajuća, kako bi se sprečilo nagomilavanje naelektrisanja koje može da dovede do zaglavljivanja tabaka u mašini za štampu [8]. Ako je provodljivost podloge ispod granične vrednosti, rasipanje tonera može da dovede do gubitaka rasterskih tačaka u delovima otiska sa finim detaljima. Vlažnost podloge takođe predstavlja bitan faktor procesa štampe, pogotovo kod upojnih podloga gde linearno povećanje vlažnosti uzrokuje eksponencijalno smanjenje električne otpornosti podloge. Površinska hrapavost podloge za štampu je parametar koji ima veći značaj kod štampe sa većom rezolucijom, što omogućava bolji kvalitet štampe [3]. Takođe, hemijska svojstva površine i viskoelastična svojstva tonera definišu kvalitet fiksiranja tonera na podlozi za štampu, a time i kvalitet otiska [9].

Postizanje ponovljivosti kvaliteta štampe je veoma bitna jer omogućava ujednačen kvalitet otisaka, a predstavlja kontrolu varijacije kvaliteta štampe između otisaka u okviru tiraža. Jedan od načina procene stabilnosti i ponovljivosti kvaliteta reprodukcije određenog digitalnog štamparskog sistema je analiza kratkoročne ponovljivosti štampe. Ovakav test se vrši na početku štampe, nakon jednog sata i nakon 24 sata. Vrednosti koje se uzimaju kao referentne za kontrolu kratkoročne ponovljivosti štampe podrazumevaju kolorimetrijsku razliku pri kojoj je $\Delta E_{ab} \leq 3$ za polja punog tona (100% tonske vrednosti) za sve četiri procesne boje (cijan C, magentu M, žutu Y i crnu K) [10].

Cilj ovog istraživanja je karakterizacija kvaliteta, kao i ponovljivosti kvaliteta otisaka štampanih digitalnom, tehnikom elektrofotografije, u zavisnosti od gramature korišćenog papira kao podloge za štampu.

2. MATERIJALI I METODE

Kao podloge za štampu, korišćeni su mat premazni papiri tri različite gramature (150 g/m², 200 g/m² i 300 g/m²). Kako bi se ispitala ponovljivost kvaliteta štampe, uzorci su štampani u različitim vremenskim intervalima (prva serija – 0 časova, druga serija 1 čas nakon štampanja prve serije i treća serija 24 časa nakon štampe prve serije – ukupno 9 uzoraka). Korišćena je QEA Test Target rev 4f test karta (210 x 297 mm) (slika 1), štampana pomoću mašine za elektrofotografiju Xerox 1000 (Xerox, SAD), uz upotrebu originalnog tonera istog proizvođača.



Sl. 1. Izgled korišćene test karte za štampu

Nakon štampe izvršeno je merenje sledećih karakteristika podloge i parametara kvaliteta štampe pomoću SpectroDens mernog uređaja (Techkon, Nemačka): optičke karakteristike papira (belina - W_{cie} i žutoća - Y_{1925}), optička gustina i CIE Lab vrednosti pomoću kojih su izračunate razlike u boji (ΔE_{ab}^*) u odnosu na referentni uzorak (prvi odštampani uzorak za svaku gramaturu papira). Merenje svih parametara kvaliteta štampe je izvršeno na poljima punog tona sve četiri procesne boje (CMYK). Svi rezultati su predstavljeni na bazi srednjih vrednosti više ponovljenih merenja. Za izračunavanje razlike u boji (ΔE_{ab}^*) između otisaka, pomoću izmerenih CIE Lab vrednosti, korišćena je sledeća formula:

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2} \quad (1)$$

gde L_2 predstavlja ahromatsku, koordinatu svetline CIE Lab prostora boje testiranog uzorka (L_1 – koordinata svetline referentnog uzorka), a_2 i b_2 su hromatske koordinate CIE Lab prostora boje

testiranog uzorka (a_1 i b_1 su hromatske koordinate referentnog uzorka) [11]. Zabeležene razlike u boji se mogu svrstati u određene kategorije u zavisnosti od njihovih vrednosti:

- $0 < \Delta E_{ab} < 1$ razlika je neprimetna,
- $1 < \Delta E_{ab} < 2$ veoma mala razlika (može je primetiti samo iskusno oko),
- $2 < \Delta E_{ab} < 3,5$ srednja razlika (može je primetiti samo uvežbano oko),
- $3,5 < \Delta E_{ab} < 5$ krupna razlika,
- $\Delta E_{ab} > 5$ masivna razlika [11].

3. REZULTATI

Zabeležene vrednosti beline i žutoće korišćenih papira različite gramature (tabela 1) ukazuju na veoma slične optičke karakteristike papira, gde je kod papira veće gramature zabeležena nešto viša vrednost beline.

Tabela 1. Belina i žutoća papira

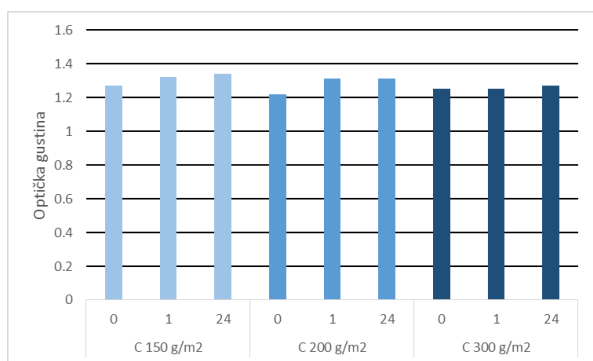
Gramatura [g/m ²]	W_{cie}	Y_{1925}
150	99,68	-6,49
200	101,18	-5,90
300	103,14	-6,62

Na graficima na slici 2 su predstavljene izmerene vrednosti optičke gustine štampanih otisaka, što predstavlja bitan parametar kvaliteta štampe. Sa grafika se uočava da su najmanje vrednosti optičke gustine za sve četiri procesne boje zabeležene na otiscima štampanim na 300 g/m² papiru, dok su najveće vrednosti ovog parametra registrovane na otiscima štampanim na 150 g/m² papiru, što je posledica prvenstveno optičkih karakteristika papira, odnosno vrednosti beline (tabela 1). Dobijene vrednosti ovog parametra ne sugerišu postojanje dominantnog trenda ponašanja ovih vrednosti, a varijacije vrednosti optičke gustine za sve četiri procesne boje (CMYK) štampane na istoj podlozi za štampu su vrlo male, što ukazuje na stabilan proces štampe sa dobrim i ponovljivim kvalitetom reprodukcije. Najmanje varijacije vrednosti optičke gustine su zabeležene na otiscima štampanim na 300 g/m² papiru, a najveće na otiscima štampanim na 200 g/m² papiru.

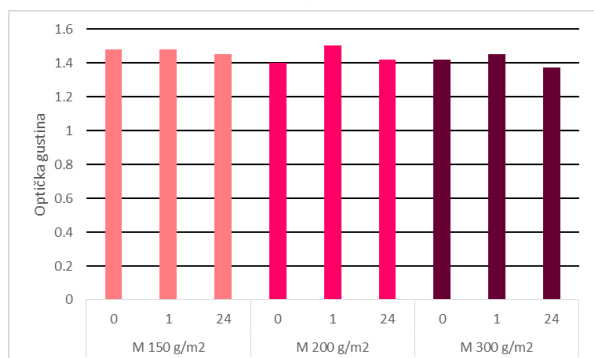
Na graficima na slici 3 su predstavljene razlike u boji (ΔE_{ab}) izračunate pomoću izmerenih Lab vrednosti između otisaka štampanih u tri različita vremenska trenutka za svaku procesnu boju (CMYK). Najmanje ukupne kolorimetrijske razlike, kao i najmanje varijacije između kolorimetrijskih razlika su zabeležene kod otisaka štampanih na papiru gramature od 300 g/m², a

najveće kod otisaka štampanih na papiru gramature od 200 g/m².

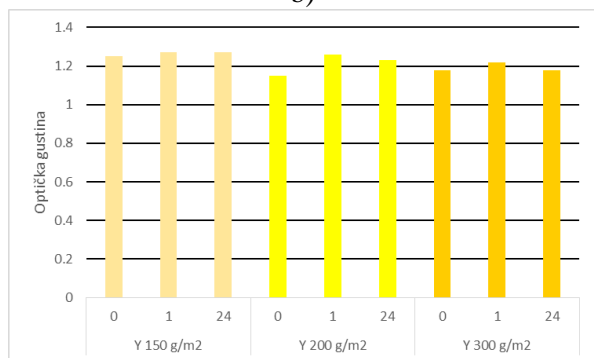
kriterijume kvalitetne i ponovljive štampe ($\Delta E_{ab} \leq 3$ za polja punog tona) [9].



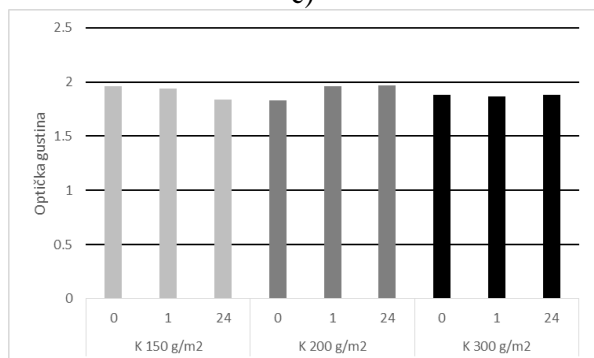
a)



b)



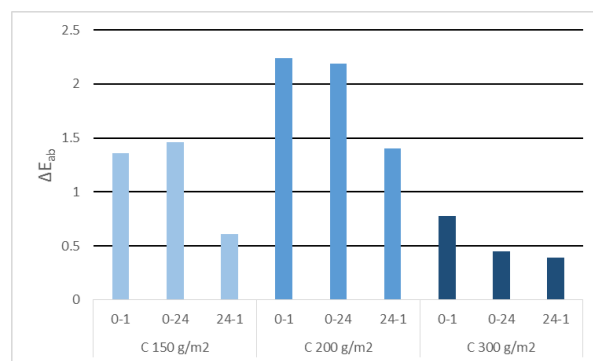
c)



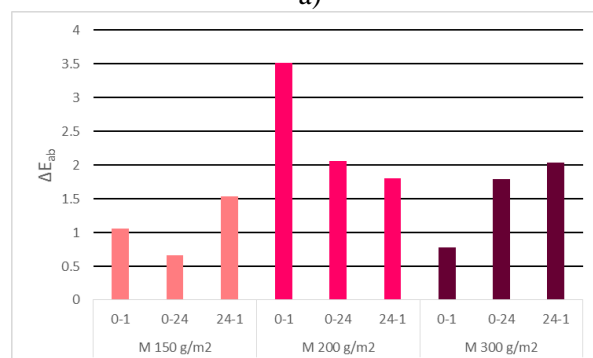
d)

Sl. 2. Optička gustina otisaka za a) cijan, b) magenta, c) žutu i d) crnu boju

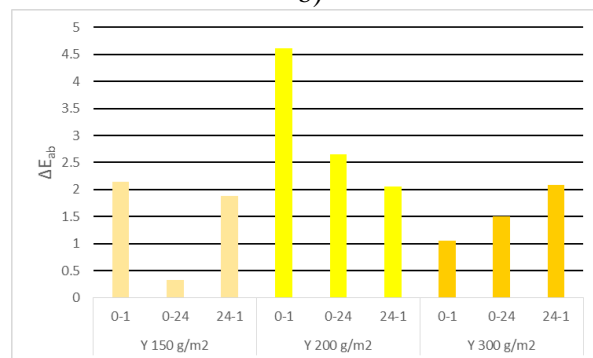
Većina dobijenih kolorimetrijskih razlika između otisaka štampanih na 150 g/m² papiru (za sve procesne boje osim za žutu boju) spada u grupu veoma malih razlika ($1 < \Delta E_{ab} < 2$), što zadovoljava



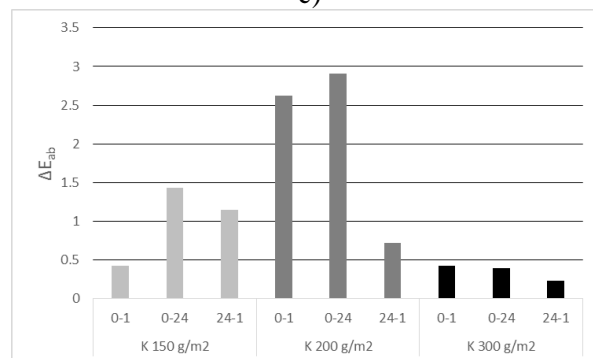
a)



b)



c)



d)

Sl. 3. Međusobne kolorimetrijske razlike otisaka štampanih u tri različita vremenska trenutka (0 časova, 1 čas i 24 časa) za tri gramature papira: a) cijan, b) magenta, c) žuta i d) crna boja

Dobijene ΔE_{ab} vrednosti između otisaka koji su štampani na 300 g/m² papiru, spadaju mahom u grupu

neprimetnih razlika ($0 < \Delta E_{ab} < 1$), dok kod otisaka koji su štampani na 200 g/m^2 papiru, zabeležene kolorimetrijske razlike spadaju u grupu srednjih razlika ($2 < \Delta E_{ab} < 3,5$), što ne ispunjava u potpunosti uslov kvalitetne i ponovljive reprodukcije (konkretno za žutu i magenta boju).

Obzirom da su za dve gramature korišćenog papira (150 g/m^2 i 300 g/m^2) dobijene adekvatne kolorimetrijske razlike vrednosti ($\Delta E_{ab} \leq 3$ za polja punog tona), a samo za otiske štampane na 200 g/m^2 papiru su dobijene veće kolorimetrijske razlike od preporučenih, pretpostavlja se da su varijacije u kvalitetu i ponovljivosti štampe posledica karakteristika podloge (neujednačena debljina premaznog sloja i neuniformne površinske karakteristike papira na čitavoj njegovoj površini), a ne korišćene štamparske mašine za elektrofotografiju.

Rezultati kolorimetrijskih razlika kod otisaka štampanih na 150 g/m^2 papiru ukazuju na to da ne postoji dominantan trend ponašanja ovih vrednosti. Kod otisaka štampanih na 200 g/m^2 papiru, uočljiv je trend stabilizacije i unapređenja kvaliteta štampe sa vremenom (dolazi do smanjivanja razlika u boji u odnosu na prvi, referentni otisak) kod štampe gotovo sve četiri procesne boje (osim kod crne boje). Kod otisaka štampanih na 300 g/m^2 papiru, dolazi do smanjivanja kolorimetrijskih razlika između otisaka za procesne boje cijan i crnu, dok za magentu i žutu, ove razlike rastu kod naknadno odštampanih otisaka.

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu dobijenih rezultata merenja parametara kvaliteta štampe otisaka izrađenih elektrofotografskim postupkom digitalne štampe (optička gustina i Lab koordinate potrebne za izračunavanje kolorimetrijskih razlika) mogu se izvući određeni zaključci.

Tip i karakteristike podloge za štampu utiču na kvalitet i ponovljivost kvaliteta štampe u tehnici elektrofotografije. Optičke karakteristike papira, belina i žutoća, utiču na ostvarenu optičku gustinu odštampanog otiska, gde veća belina papira rezultuje manjom optičkom gustinom, a manja belina omogućava otisak sa većom optičkom gustinom.

Korišćena mašina za štampu obezbeđuje kako visok kvalitet štampe tako i stabilan proces štampe sa dobrim i ponovljivim kvalitetom reprodukcije, što pokazuju male varijacije vrednosti optičke gustine i kolorimetrijskih razlika kod ponovljenih otisaka (štampanih nakon 1 časa i nakon 24 časa).

Gramatura papira ne utiče direktno na kvalitet štampe, dok površinske i optičke karakteristike korišćenog papira kao podloge za štampu utiču.

5. REFERENCE

- [1] Schein, L. B.: Electrophotography and Development Physics, Springer - Verlag, New York, 1992.
- [2] Lahti, J., Tuominen, M.: The effect of surface treatment on digital print quality of excursion coated paperboard, 37th International Research Conference of IARIGAI, Montreal, September 12-15, 2010.
- [3] Sipi, K.M.: Toner layer structure and toner adhesion on coated paper, Proceedings of the IS&T NIP17: 2001 International Conference on Digital Printing Technologies, p.p. 145-150, Fort Lauderdale, September 30 – October 5 2001.
- [4] Sastri, B., Sankaran, V: Medina/toner interactions in laser printing, Proceedings of the IS&T NIP19: 2003 International Conference on Digital Printing Technologies, p.p. 619-622, New Orleans, September 28 – October 3, 2003.
- [5] Malvern Instruments: Toner size and shape characterization using FPIA-2100, FPIA, 2011.
- [6] Szentgyörgyvölgyi, R., Borbély, A.: Quality of electrophotographic prints on foil substrates, Journal of Graphic Engineering and Design, 2 (1), p.p. 1-7, 2011.
- [7] Mortimer, A.: Colour reproduction in a digital age, Pira International – Leatherland, Surrey, 1998.
- [8] Petterson, T., Fogden, A.: Spreading of individual toner particles studied using in situ optical microscopy, Journal of Colloid and Interface Science, 287 (1), p.p. 249-260, 2005.
- [9] Oittinen, P., Saarelma, H.: Printing, Papermaking Science and Technology, book 13, Fapet oy, Helsinki, 1998.
- [10] Kašiković, N., Novaković, D., Jurić, I.: Digitalna štampa – praktikum za vežbe, p.p. 87-88, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2016.
- [11] Smyth, S.: The Print and Production Manual. 11th Ed., Pira International Ltd., Leatherhead, 2009.

Autori: Jelena Vasić, Saša Petrović, Vanr. prof. dr Nemanja Kašiković, Rastko Milošević, Áron Szilágyi, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet Tehničkih Nauka, Departman za grafičko inženjerstvo i dizajn, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Tel: +381 21 485 2350
E-mail: jelena.vasic@uns.ac.rs
petrovic.sasa@uns.ac.rs
knemanja@uns.ac.rs
rastko.m@uns.ac.rs
aeronax@gmail.com

Ilić, V., Doroslovački, R., Žunić, J.

VIŠE-KOMPONENTNI OBLICI I NJIMA PRIDRUŽENE NUMERIČKE KARAKTERISTIKE

Rezime: Posmatraće se relativno novi pristup analizi digitalnih slika, baziran na korišćenju numeričkih karakteristika pridruženih više-komponentnim oblicima, pridruženih realnim objektima predstavljenim na odgovarajućim digitalnim slikama. Posmatrane numeričke karakteristike su jednostavne i brze za računanje jer su bazirane na korišćenju diskretnih momenata pridruženih komponentama definisnih više-komponentnih oblika. Primenljivost posmatranih metoda je ilustrovana odgovarajućim eksperimentalnim rezultatima.

Ključne reči: Više-komponenti oblici, descriptori, mere, momenti.

1. UVOD

Oblik je jedna od osnovnih karakteristika realnih objekata. Intenzivno je korišćen u karakterizaciji realnih objekata, koji se pojavljuju na realnim slikama, zbog toga što dopušta veliki broj numeričkih karakterizacija. Takve karakterizacije su pre svega bazirane na nekim od prepoznatljivih atributa koji se mogu pridružiti posmatranim objektima (kružnost, izduženost, konveksnost, itd.) i metodama za numeričku evaluaciju takvih osobina. Ovde ćemo pomenuti meru konveksnosti, koja treba da numerički oceni koliko posmatrani oblik odudara od idealno konveksnog oblika. Dva postupka se prirodno nameću za takvu ocenu posmatranog oblika S i mi ćemo i označiti kao mere konveksnosti $K1(S)$ i $K2(S)$, pri čemu je

$$(i) K1(S) = \frac{\text{površina}-S}{\text{površina}-CH(S)} \quad (1)$$

$$(ii) K2(S) = \frac{\text{obim}-CH(S)}{\text{obim}-S} \quad (2)$$

gde $CH(S)$ označava konveksni omotač posmatranog oblika S . Obe mere, $K1(S)$ i $K2(S)$, imaju sledeće osobine, vrlo važne pri korišćenju u karakterizaciji realnih objekata, a na osnovu analize njihovih oblika:

- a) $K1(S), K2(S) \in (0, 1]$, za svaki oblik S ;
- b) $K1(S), K2(S) = 1 \Leftrightarrow S$ je konveksan;
- c) $K1(S), K2(S)$ su invarijante u odnosu na transformacije sličnosti (translacija, rotacija, skaliranje).

Osobina a) pokazuje da su obe mere date u normalizovanom obliku. Osobina b) ukazuje da što su vrednosti $K1(S), K2(S)$ bliže vrednosti 1 , može se pretpostaviti da je oblik S više konveksan, odnosno da vrednosti $K1(S), K2(S)$ bliže 0 ukazuju da je oblik S manje konveksan. Osobina c) je neophodna, za svaku meru oblika, jer se oblik, nekog objekta, ne menja pri

translaciji, rotaciji i skaliranju.

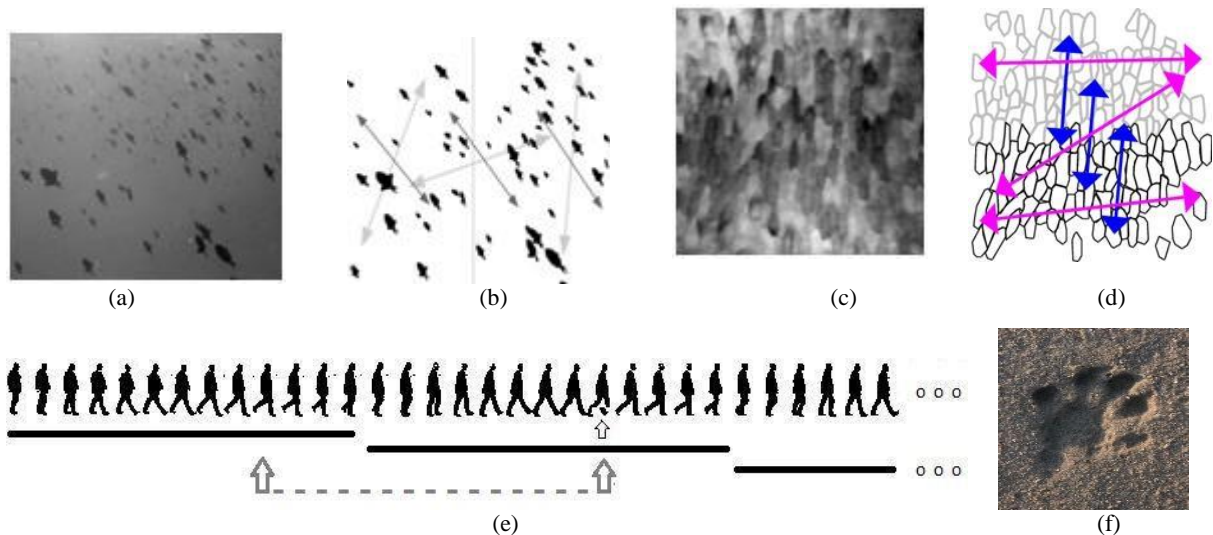
Navedene mere konveksnosti bile su samo ilustrativni primer numeričke evaluacije osobina oblika. Broj takvih mera je jako veliki. Naravno, prvi koncepti uvođenja mera za analizu realnih objekata na osnovu njihovog oblika odnosili su se na jedno-komponentne oblike, nezavisno od pristupa korišćenih za njihovo definisanje (algebarski, geometrijski, statistički, itd.).

Mi ćemo ovde predstaviti jedan relativno novi pristup poboljšanju efikasnosti pri karakterizaciji realnih objekata korišćenjem njihovih oblika. Taj koncept je baziran na predstavljanju objekata pomoću više-komponentnih oblika i njima pridruženih numeričkih vrednosti. Ilustrativni eksperimenti će takođe biti dati.

2. MOTIVACIJA

Koncept baziran na korišćenju više-komponentnih oblika u oblastima procesiranja i analize digitalnih slika je relativno nov (uveden je 2009, u radu [2]). Motivacija je bila višestruka: (a) U raznim situacijama, više objekata deluje i ponaša se kao grupa (jato riba, na slici Sl.1(a), vozila na drumu, itd.). (b) Vrlo često je pogodno posmatrati jedno-komponenti objekat, kao složeni objekat, čije su komponente definisane na neki prirodan način (recimo, embrionalno tkivo predstavljeno na Sl.1(c), ili pak mikrostrukture materijala, itd.). (c) Koncept više-komponentnih objekata može biti korišćen u analizi objekata koji se pojavljuju u uzastopnim kadrovima nekog video zapisa (recimo, 13 uzastopnih kadrova, na slici Sl.1(e) predstavljaju čovečiji hod).

Pošto se radi o relativno novom pristupu analize realnih objekata predstavljenim na digitalnim slikama, ne postoje značajnija iskustva u dometima koje pristup pruža, bez obzira što su inicijalni



Sl. 1. (a) Jato riba i njemu odgovarajuća crno-bela slika (b). (b) Duge (svetle) strelice odgovaraju orijentacijama (računatim standardnim metodom) posebno za levu i desnu polovinu slike, kao i za celu sliku. Kratke (tamne) strelice odgovaraju orijentacijama računatim primenjujući više-komponentni pristup [2]. (c) Embrionalno tkivo. (d) Duge strelice odgovaraju orijentacijama računatim za donju i gornju polovinu slike, kao i celu sliku, primenom standardnog metoda. Kratke strelice odgovaraju orijentacijama računatim za iste slike, ali primenjujući više-komponentni pristup. (e) Ljudsko hodanje može biti predstavljeno 13-to komponentnim oblikom koji se sastoji od silueta sa 13 uzastopnih kadrova datog video snimka. (f) Više-komponentni pristup može biti korišćen za detektovanje prisustva živih organizama uz pomoć otisaka koje ostavljaju na tlu.

rezultati ohrabrujući. Dalja analiza i razvoj novih mera za numeričku karakterizaciju više-komponentnih objekata je svakako neophodan korak u daljem usavršavanju predloženog pristupa i poboljšanju njegovih performansi. Prirodno se nameću sledeći problemi koje treba razmatrati.

(A.) **Proširenje postojećih metoda razvijenih za tretiranje jedno-komponentnih oblika.** Ne postoji direktan metod za modifikaciju postojećih jedno-komponentnih mera i njihova primenljivost na više-komponentne oblike.

(B.) **Pojavljivanje specifičnih zahteva u radu sa više-komponentnim oblicima.** U radu sa više-komponentnim oblicima javljaju se specifični zahtevi. Jedan primer bi mogao biti frejmnezavisnost. Dajemo sledeću ilustraciju. Pri računanju orijentacije jata riba prirodno bi bilo očekivati da izračunata orijentacija ne zavisi od frejma koji je korišćen za računanje orijentacije. Ali to se ne dešava prilikom primene standardnog metoda za računanje orijentacije. Zaista, tri orijentacije izračunate za delove Sl.1(b) se

značajno razlikuju (orijentacije reprezentovane dugim, svetlijim strelicama). Sasvim druga situacija je ako se primeni više-komponentni pristup. Sve tri izračunate orijentacije (predstavljene kratkim, tamnijim strelicama) su gotovo identične.

(C.) **Više-komponentni oblici imaju specifične karakteristike.** Više-komponentni oblici imaju neke specifične osobine, koje takođe treba numerički vrednovati. Jedna od takvih osobina je anizotropičnost, odnosno mera anizotropičnosti koja bi trebala numerički da vrednuje koliko su komponente, nekog više-komponentnog oblika, konzistentno orijentisane. Takva jedna mera je definisana u [5], druga mera, nesvojstvena jedno-komponentnim oblicima bi mogla biti mera nepovezanosti više-komponentnog oblika [4]. Takva mera treba da numerički oceni koliko su komponente nekog više-komponentnog oblika međusobno nepovezane.

3. MERE VIŠE-KOMPONENTNIH OBLIKA

U ovom radu ćemo ilustrovati nekoliko mera definisanih za više-komponentne oblike u radovima [2-3], [5-6]. Za računanje mera korišćeni su centralni momenti $\bar{m}_{p,q}(S)$, definisani na sledeći način:

$$\bar{m}_{p,q}(S) = \iint_S (x - x_c)^p (y - y_c)^q dx dy, \quad (3)$$

gde su x_c i y_c koordinate težišta posmatranog oblika S za koji važi $\bar{m}_{0,0}(S) = m_{0,0}(S)$.

Za dati više-komponentni oblik S , sa komponentama S_1, S_2, \dots, S_n , mere koje ilustujemo su definisane na sledeći način:

$$Imca(S) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_{0,0}(S_i)^2} \sum_{i=1}^n (\bar{m}_{2,0}(S_i) + \bar{m}_{0,2}(S_i)) \quad (5)$$

$$Imcb(S) = \frac{1}{\bar{m}_{2,0}(S) + \bar{m}_{0,2}(S)} \sum_{i=1}^n (\bar{m}_{2,0}(S_i) + \bar{m}_{0,2}(S_i)) \quad (6)$$

$$Imcc(S) = \frac{1}{m_{0,0}(S)^2} \sum_{i=1}^n (\bar{m}_{2,0}(S_i) + \bar{m}_{0,2}(S_i)) \quad (7)$$

$$D(S) = H_1(S) - \frac{1}{m_{0,0}(S_1 \cup \dots \cup S_n)^3} \sum_{i=1}^n m_{0,0}(S_i)^3 H_1(S_i) \quad (8)$$

$$A(S) = \frac{c + \sqrt{A^2 + B^2}}{c - \sqrt{A^2 + B^2}} \quad (9)$$

gde je $C = \sum_{i=1}^n (\bar{m}_{2,0}(S_i) + \bar{m}_{0,2}(S_i)) m_{0,0}(S_i)$,

$A = \sum_{i=1}^n (\bar{m}_{2,0}(S_i) - \bar{m}_{0,2}(S_i)) m_{0,0}(S_i)$ i $B = \sum_{i=1}^n 2\bar{m}_{1,1}(S_i) m_{0,0}(S_i)$.

4. REZULTATI

U ovom poglavlju je prikazano nekoliko eksperimenata koji ilustruju ponašanje mera koje su opisane formulama (5)-(9), a dizajnirane u radovima [2,3,5,6].

Na Slici 2. je prikazano nekoliko slika novčića različitih oblika, rasporeda i veličina. Novčići sa slike se mogu posmatrati kao više-komponentni oblik gde svaki novčić predstavlja jednu komponentu datog više-komponentnog oblika. Posmatrane slike novčića su u boji pa je potrebno njihovo određeno pre-procesiranje kako bismo ih pripremili za primenu opisanih mera. S obzirom da su opisane mere zasnovane na obliku ali ne i na boji, posmatranu originalnu sliku možemo transformisati prvo u sivu sliku, a zatim u crno-belu sliku. U dobijenoj crno-beloj slici beli pikseli oblika mogu biti posmatrani kao pikseli različitih komponenti (više-komponentni oblik) ili pak kao pikseli jedinstvenog jedno-komponentnog oblika.

Da bi se izbeglo generisanje komponenti koje se dobijaju kao rezultat neželjenih efekata u procesu dobijanja željene crno-bele slike, primenom određenih morfoloških operacija, ti efekti se mogu kontrolisati ili pak anulirati. Kao rezultat, dobijena crno-bela slika sadrži onoliko komponenti (novčića) koliko ih sadrži i originalna slika.

U Tabeli 1. prikazane su dobijene vrednosti razmatranih mera za više-komponentne oblike prikazanih na Slici 2. Dobijene vrednosti su u skladu sa našim očekivanjima kao i teorijski dokazanim svojstvima. Posmatrani objekti su prikazani prema vrednosti mere $D(S)$, nazvanoj mera nepovezanosti, u neopadajućem poretku. Vrednosti pridružene meri nepovezanosti više-komponentnih oblika, $D(S)$, jesu saglasne sa očekivanjima jer $D(S)$ zavisi od veličine, oblika i

broja komponenti, njihovog međusobnog rastojanja kao i od oblika celog objekta. Sa druge strane kada se mera $D(S)$ primeni na oblike koji se tretiraju kao jedno-komponentni, tada je njena pridružena vrednost jednaka 0, što je, opet, u skladu sa očekivanjima

Slično tome, dobijeni rezultati mera više-komponentnih oblika: $Imca(S)$, $Imcb(S)$ i $Imcc(S)$, su u skladu sa teorijskim razmatranjima iz [2], ali i u skladu sa našim očekivanjima. Mere, $Imca(S)$ i $Imcc(S)$ su u slučaju jedno-komponentnog oblika zapravo jednake prvoj Huovoj invarijanti $H_1(S)$, (videti [1]) dok je mera $Imcb(S)$, u slučaju posmatranja date slike kao jedno-komponentnog oblika, jednaka 1 (pogledati formulu (6)).

U slučaju više-komponentnog oblika invarijanta $Imca(S)$ ima u većoj meri približno konstantnu vrednost jednaku $1/(2\pi)$ što je vrednost prve Huove invarijante $H_1(S)$ za krug. Naime, posmatrani novčići su u većoj meri kružnog oblika pa je prva Huova invarijanta približno jednaka za sve komponente (približno $1/(2\pi)$). Imajući ovo u vidu, kao i definiciju mere $Imca(S)$, dobijeni rezultati su u saglasju sa očekivanjima. Veće odsupanje se javlja samo u slučaju oblika (e) gde određeni novčići nisu kružnog oblika.

Ako posmatramo oblike na Slici 2. kao više-komponentne oblike tada su oni rangirani u neopadajućem poretku prema pridruženoj vrednosti invarijante $Imcc(S)$ na sledeći način:

(b), (f), (a), (h), (c), (e), (d), (g).

Tako rangirani oblici su u skladu sa očekivanjima s obzirom da je prema definiciji vrednost invarijante $Imcc(S)$ obrnuto proporcionalna zbiru kvadrata površina komponenti posmatranog oblika.

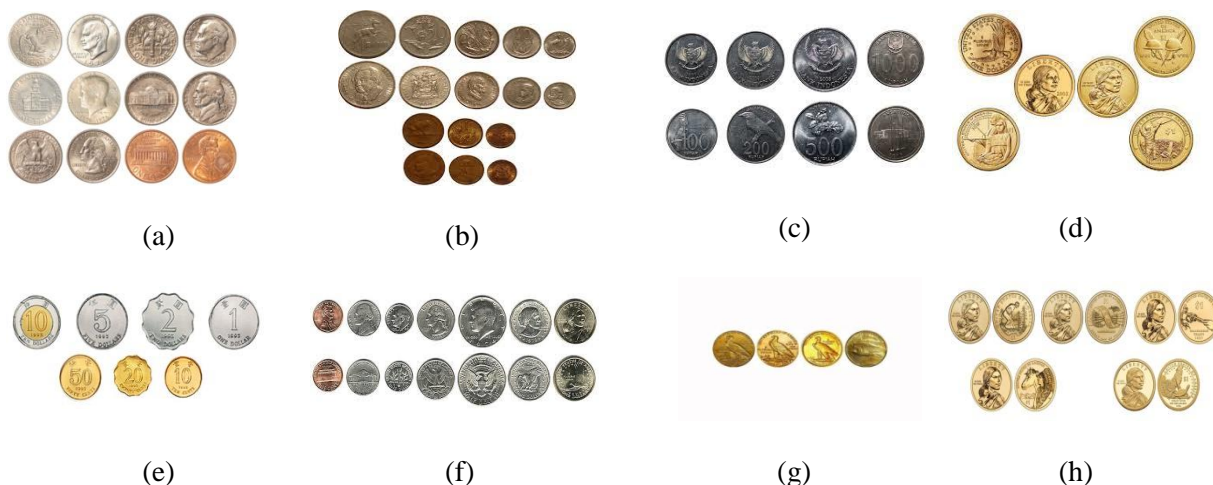
Prema dobijenim vrednostima mere više-komponentnih oblika nazvane mera anizotropije, i označene sa $A(S)$, posmatrani oblici su rangirani u različitom poretku, u zavisnosti da li se razmatrani oblik posmatra kao jedno-komponentni ili kao više-komponentni oblik. Na osnovu pridruženih vrednosti možemo zaključiti da anizotropija $A(S)$ na više-komponentnim oblicima daje rezultate koji nisu u kontradikciji sa očekivanjima. Tako posmatana mera anizotropije daje sledeći poredak oblika:

(h), (a), (c), (e), (d), (g), (f), (b).

Prisetimo da su sve vrednosti bliske 1 jer su komponente, koje se pojavljuju na pridruženim crno-belim slikama, bliske krugovima. U slučaju jedno-komponentnih oblika pridružena anizotropija (elongacija) daje poredak:

(b), (a), (d), (c), (e), (h), (f) i (g)

što je takođe u saglasju sa njenom definicijom za jedno-komponentne oblike.



Sl. 2. Primeri slika novčića različitih oblika, veličina, broja i međusobnog rastojanja.

Tabela 1. Pridružene vrednosti mera na više-komponentnim (MC) i jedno-komponentnim (SC) oblicama prikazanih na Sl.1 (a) – (h) po kolonama.

$A(S)$ MC	$A(S)$ SC	$D(S)$ MC	$D(S)$ SC	$Imca(S)$ MC	$Imca(S)$ SC	$Imcb(S)$ MC	$Imcb(S)$ SC	$Imcc(S)$ MC	$Imcc(S)$ SC	$H_1(S)$
1.0047	1.8332	0.2477	0	0.1590	0.2488	0.0533	1	0.0133	0.2488	0.2488
1.0579	1.3394	0.2831	0	0.1594	0.2841	0.0412	1	0.0117	0.2841	0.2841
1.0065	3.4415	0.3240	0	0.1592	0.3267	0.0623	1	0.0204	0.3267	0.3267
1.0122	3.2406	0.3932	0	0.1592	0.3977	0.0668	1	0.0265	0.3977	0.3977
1.0076	6.4155	0.4205	0	0.1581	0.4244	0.0570	1	0.0242	0.4244	0.4244
1.0210	7.6472	0.4358	0	0.1591	0.4369	0.0291	1	0.0127	0.4369	0.4369
1.0172	22.4869	0.4540	0	0.1588	0.4639	0.0858	1	0.0398	0.4639	0.4639
1.0030	7.5573	0.4900	0	0.1596	0.4916	0.0324	1	0.0159	0.4916	0.4916

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu su ukratko opisane mere koje se primenjuju na više-komponentnim oblicima. Opisane mere predstavljaju veoma moćan alat za generisanje novih numeričkih karakteristika realnih objekata, predstavljenih na digitalnim slikama, u zavisnosti kako posmatrani oblik možemo interpretirati. Različitim procedurama u obradi slike originalni oblik se može transformisati u više-komponentni oblik na različite načine.

6. REFERENCE

- [1] Hu, M.: Visual pattern recognition by moment invariants. IRE Trans. Inf. Th. 8, 179-187 (1961)
- [2] Rhouma, M. B. H., Žunić, J., Younis, Moment invariants for multi-component shapes with applications to leaf classification. Computers and Electronics in Agriculture 142, 326-337 (2017)
- [3] Rosin, L. P., Žunić, J.: Orientation and anisotropy of multi-component shapes from boundary information. Pattern Recognition 44, 2147-2160 (2011)
- [4] Xu, D., Li, H.: Geometric moment invariants. Pattern Recognition 41, 240-249 (2008)

- [5] Žunić, J., Rosin, L. P.: An alternative approach to computing shape orientation with an application to compound shapes. International Journal on Computer Vision 81, 138-154 (2009)
- [6] Žunić, J., Rosin, L. P., Ilić, V.: Disconnectedness: A new moment invariant for multi-component shapes. Submitted.
- [7] Žunić, J., Aktas, M. A.: A family of shape ellipticity measures for galaxy classification. SIAM Journal on Imaging Sciences 6, 765-781 (2013)
- [8] Žunić, J., Žunić, D.: Shape interpretation of second-order moment invariants. Journal of Mathematical Imaging and Vision 56, 125-136 (2016)

Autori: M. Sc. Vladimir Ilić¹, Prof. dr Rade Doroslovački¹, Naučni savetnik, dr Joviša Žunić²

1. Univerzitet Novi Sad, FTN, Trg D. Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija, Tel: +381 21 485 2288

2. Matematički institut - SANU, Knez Mihaila 36, 11001 Beograd, Srbija.

E-mail: vlada.mzsvi@uns.ac.rs

rdoroslovacki@gmail.com

jovisa_zunic@turing.mi.sanu.ac.rs

**SCIENTIFIC CONFERENCE WITH INTERNATIONAL
PARTICIPATION
NOVI SAD, SERBIA, DECEMBER 6-8, 2017**

ETIKUM 2017

Lalić, B., Cvetković, N., Marjanović, U., Medić, N.

**THE IMPACT OF PRODUCTION MANAGEMENT AND CONTROL CONCEPTS ON
QUALITY PERFORMANCES: EVIDENCE FROM THE TRANSITIONAL ECONOMY**

Abstract

Purpose – The objective of this study is to present general findings regarding the use and implementation of production organization and controlling concepts and to examine its relationship with manufacturing firm performances in developing countries.

Design/methodology/approach – For this purpose, data from 280 manufacturing firms in Serbia participating in the European Manufacturing Survey were used for linear regression analysis.

Findings – The results show that companies which apply certain production organization and controlling concepts (i.e. Six Sigma, Value Stream Mapping) demonstrate better quality performance (i.e. capacity utilization, quality issues – rework and scrap). However, the results also demonstrate that utilization of display boards for work processes and work status (e.g. Visual Management) and methods of assuring quality in production (e.g. Total Quality Management and Total Productive Maintenance) do not influence the improvement of quality performances.

Research limitations/implications – The focus of this study is limited to the role of sample. The sample was drawn from a single developing country. Future studies should comparable sample chosen from across different economies, both developed and developing.

Originality value – The findings also suggest that there is still major potential for manufacturing firms in developing countries to adopt and use production-oriented organizational concepts to enhance their organizational performances, especially focusing on operational aspects.

Key words: Production Management; Production Controlling; EMS

1. INTRODUCTION

In today's dynamic and complex business environment, continuous changes are inevitable, challenging firms to constantly strive for the new concepts and techniques requisite for increase of production performance, quality improvement and customer satisfaction [1]. Thus, advanced production management and controlling concepts are playing important role in enabling the effectiveness and efficiency in manufacturing firms.

One of the main objectives of production management are the effective utilization of production resources and maintaining stable production within given constraints [2]. Accordingly, production management and controlling principles should facilitate firms to achieve higher level of efficiency, competitiveness at the lowest cost, high levels of productivity, speed of delivery, minimum stock levels and optimum quality [3].

In this paper the effect of four production management and controlling concepts on process quality performances (capacity utilization and rework/scrap) has been examined using linear

regression analysis.

The production management and controlling concepts included in this study are:

- Utilization of display boards for work processes and work status (e.g. Visual Management).
- Methods of assuring quality in production (e.g. Total Quality Management and Total Productive Maintenance).
- Methods of operations management for mathematical analyses of production (e.g. Six Sigma).
- Value Stream Mapping (VPM).

The findings reveal that only methods of operations management for mathematical analyses of production (Six Sigma) and Value Stream Mapping tool have statistical significance for improvement for capacity utilization and quality issues (rework and scrap reduction).

The paper is structured as follows: the second section represents the theoretical background and states the assumptions on differences in the quality performances. The third section explains the methodology. Fourth section demonstrates the results. Finally, in the fifth section, we discuss results and present conclusions.

2. THEORETICAL BACKGROUND

In response to complex and heavily textual work instructions, which rarely avail the overall operational performance, adoption of visual management (VM) has been gaining on importance. VM can be explained as economically affordable and effective sensory information tools integrated into the workplace to increase the information availability and transparency [4]. VM has demonstrated practical implications such as reduction in process and motion wastes and delivery delays [5], [6] and better utilization of resources.

Methods such as TQM (Total Quality Management) and TPM (Total Productive Maintenance) present the most popular techniques of quality assurance which enable flexible production with an optimum quality in a much shorter time [3].

TQM is an approach to the management of the enterprise as a whole in order to achieve its excellence [7]. TPM is a strategy of maximization of total effectiveness of machines and equipment. According to [8], TPM prescribes continuous improvement of equipment with active involvement of employees responsible for the workplace and maintenance. Its aim is to maximize overall equipment effectiveness, implying that facilities are at maximum utilization level, without malfunctions and scrapped products or semi-final products, eliminating the possibilities for additional costs [9].

Six sigma for organizations that strive for operational excellence provides better improvement in customer satisfaction, cost, quality, process, and speed [10]. Six sigma is focused to reduce variation through error prevention, aiming at creation of more value at lower cost.

Value Stream Mapping facilitates identification of different improvement possibilities necessary for accomplishment of results, such as WIP reduction, reduction of final products inventory and decrease of processing time [11]. VSM is considered cornerstone of the lean strategy on the most important measures of operational performance, i.e. speed, quality, flexibility and cost [12].

Based on abovementioned, four assumptions have been defined:

H1. There is a positive relationship between usage of Visual Management and degree of capacity utilization.

H2. The percentage of rework/scrap decreases with the introduction of Visual Management.

H3. The degree of capacity utilization increases

with the application of methods of assuring quality (TQM, TPM).

H4. The percentage of rework/scrap decreases with the introduction of methods of assuring quality (TQM, TPM).

H5. The degree of capacity utilization increases with the usage Six Sigma method.

H6. The percentage of rework/scrap decreases with the introduction Six Sigma method.

H7. There is a positive relationship between introduction of Value Stream Mapping and degree of capacity utilization.

H8. The percentage of rework/scrap decreases with the application of Value Stream Method.

3. METHODOLOGY

Data from 280 manufacturing firms in Serbia participating in the European Manufacturing Survey [13] (EMS) were included in this study. EMS, coordinated by the Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research - ISI, represents the largest European survey of manufacturing activities. The main focus of the survey is the development and utilization of different types of innovations by companies in the manufacturing industries, and associated performance effects [14].

Our research based on EMS data is from the Serbian subsample from the year 2015. The responding companies were from the manufacturing sector (NACE Rev 2 codes from 10 to 33), having at least 20 employees. In order to obtain representative sample, 828 manufacturing firms evenly distributed by sectors and regions across Serbia were contacted. Total number of companies participating in the survey was 280 (34.4% response rate). About 38.2% of the firms in the sample are small firms between 20 and 49 employees, another 50.4% of the firms have between 50 and 249 employees, and 11.5% of the firms have more than 250 employees. The largest industry in the sample is the manufacturer of food products (NACE 10), followed by manufacture of fabricated metal products, except machinery and equipment (NACE 25) and the manufacture of rubber and plastic products (NACE 22) [15], [16].

Data gathering was performed by the Faculty of Technical Sciences in Novi Sad, firstly through the pre-test phase and two phases of mass distribution.

Multiple regression analysis was used to examine the possible statistical relevance of observed factors for the differences in the degree of capacity utilization and rework/scrap in

manufacturing firms. For this purposes IBM SPSS V.23 software was used.

4. RESULTS

To examine the usage of production management and controlling concepts in Serbian manufacturing industries, firms were asked whether they have introduced or not defined concepts. Figure 1. shows the share of firms that have applied each of the management production and controlling techniques.

Out of 280 firms, 102 firms (35.8%) are using display boards for work processes and work status (Visual Management). Methods of assuring quality in production (TQM, TPM) are introduced by 54.4% of manufacturing firms. Six sigma technique and Value Stream Mapping/Design are applied only in 21.4% and 23.5% out of all firms, respectively.

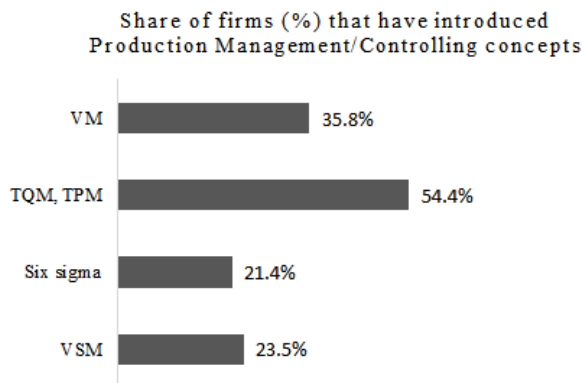


Fig. 1. Share of firms (%) applying defined Production Management and Controlling concepts

The linear regression model was used to examine the hypothesized relationships among the variables. The effects of independent variables (VM, TQM/TPM; Six sigma and VSM) on the quality performances (capacity utilization and percentage of rework/scrap) were analyzed based on data from 280 manufacturing firms in Serbia. Figure 2 depicts the results.

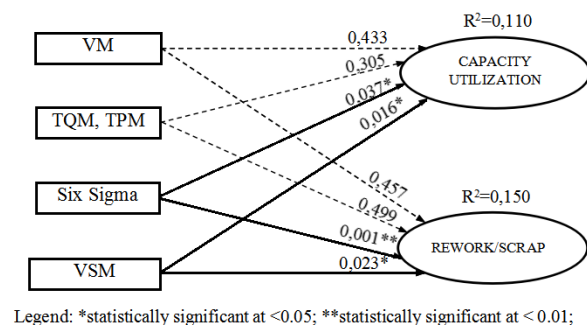


Fig. 2. Research model

The results, based on the value of the significance path coefficients of each variable, show that Visual Management and Methods of assuring quality (TQM, TPM) are not statistically significant (values $> 0,05$) for the capacity utilization level or percentage of rework and scrap. On the other hand, usage of Six sigma method and Value Stream Method have the great positive influence on the degree of capacity utilization with significance path coefficients 0,037 and 0,001 for capacity utilization and 0,016 and 0,023 for level of rework/scrap, respectively (figure 2). The results are discussed in following section.

5. DISCUSSION AND CONCLUSION

The goal of this study was to examine the extent to which the application of Production Management and Controlling concepts impacts quality performances in manufacturing firms (Capacity utilization and Rework/Scrap).

Taking into consideration the results presented in the previous chapter, it can be said that hypothesis 5, 6, 7 and 8 are not rejected. In other words, it is demonstrated that application of Six Sigma method and Value Stream Mapping influences the melioration of capacity utilization and decrease the level of rework and scrap in a production process. What is important to emphasize is that notable lower number of firms have declared to use these two concepts. On the other hand, the Visual Management and methods of assuring quality (TQM, TPM) which are used by 35,8% and 54,4% of firms, respectively, have not shown statistical significance for quality performances improvement. However, these results do not have to strictly imply the general lack of potential for influence of these tools on organization quality performances. There are few possible explanations for this. Few studies have shown that effects of these tools on organizational performances might vary depending on the level of the adoption of the techniques [17]. Authors [18] discuss that factors like timing of concept introduction, scale, and extent of their implementation can influence the real benefit of these techniques. This points the need for understanding the organizational context and other relevant factors when planning the introduction of Production Management and Controlling concepts to achieve desired benefits.

The sample was drawn only from one developing country, probably lacking the diversity that can be expected from a comparable sample chosen from across different economies, both developed and developing. Further research

should test the model and relationships in the manufacturing companies within developed economies from the region (e.g. Slovenia, Croatia).

6. REFERENCES

- [1] Prieto-avalos M.C, Navarro-gonzález, C.R.Medina-león, A.G.: Reduction Waste by Combining Lean Manufacturing and Six Sigma in an Electronics Industry, Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol., vol. 8, no. 13, pp. 1558–1562, 2014.
- [2] Jovan, V., Zorzut, S., Žnidaršić, A.: Utilization of key performance indicators in production control, IFAC Proceedings Volumes, Vol. 39, No. 14, p.p. 173-178, 2006.
- [3] Cuatrecasas Arbas, L., Design of a rapid response and high efficiency service by lean production principles: Methodology and evaluation of variability of performance, International Journal of Production Economics, Vol.80, No.2, pp.169–183., 2002.
- [4] Tezel, A., Koskela, L. and Tzortzopoulos, P: Visual management in production management: a literature synthesis, J. Manuf. Technol. Manag., vol. 27, no. 6, pp. 766–799, 2016.
- [5] Ablanedo-Rosas, J.H., Alidaee, B., Moreno, J.C. and Urbina, J.: Quality improvement supported by the 5S, an empirical case study of Mexican organisations, Int. J. Prod. Res., vol. 48, no. 23, pp. 7063–7087, Dec. 2010.
- [6] Chen, J.C.; Li, Y. and Shady, B.: From value stream mapping toward a lean/sigma continuous improvement process: an industrial case study, Int. J. Prod. Res., vol. 48, no. 4, pp. 1069–1086, Feb. 2010.
- [7] Besterfield D.H.: Quality Control. Pearson Prentice Hall, Ohio 2004.
- [8] Kosieradzka, A., Kakol, U., Krupa, A.: The development of production management concepts, Foundations of Management, Vol. 3, No. 2, pp. 55-74, 2011.
- [9] Kumar, B.S. and Abuthakeer, S.S: Implementation of Lean Tools and Techniques in an Automotive Industry, J. Appl. Sci., vol. 12, no. 10, pp. 1032–1037, Oct. 2012.
- [10] Habidin, N.F. et al: Lean Six Sigma Initiative, Business Engineering Practices and Performance in Malaysian Automotive Industry, IOSR Journal of Engineering, Vol. 2, no.7, pp. 13-18. 2012.
- [11] Al-Muhareb, T., Jasper, G.J.: A review of lean management models at King Khaled International Airport (KKIA), Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol., Vol.4, No,13, pp. 1833-1840, 2012.
- [12] Ablanedo-Rosas, J.H., Alidaee, B., Moreno, J.C. and Urbina, J.: Quality improvement supported by the 5S, an empirical case study of Mexican organisations, Int. J. Prod. Res., vol. 48, no. 23, pp. 7063–7087, 2010.
- [13] Fraunhofer Institute, “European Manufacturing Survey.” [Online]. Available: <http://www.isi.fraunhofer.de/isien/i/projekte/ems.php>. [Accessed: 30-10-2017].
- [14] Lalić, B., Tasić, N., Marjanović, U., Delić, M., & Cvetković, N.: Inter-organizational collaboration for innovation in manufacturing firms. In Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium (Vol. 27, pp. 721–729, 2016.
- [15] Lalic, B., Majstorovic, V., Marjanovic, U., Delić, M., & Tasic, N: The Effect of Industry 4.0 Concepts and E-learning on Manufacturing Firm Performance: Evidence from Transitional Economy. In Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing (Vol. 513, pp. 298–305). Springer, 2017.
- [16] Marjanovic, U., Lalic, B., Delić, M., & Tasic, N.: Industry 4.0: Evidence from Transitional Economy. International Journal of Global Business, 10(1), 26–36., 2017.
- [17] Soković, J., Jovanović, M., Krivokapić, Z. and Vujović, A.: Basic quality tools in continuous improvement process, Stroj. Vestnik/Journal Mech. Eng., vol. 55, no. 5, pp. 1–9, 2009.
- [18] Kumar, B.S. and Abuthakeer, S.S.: Implementation of Lean Tools and Techniques in an Automotive Industry, J. Appl. Sci., vol. 12, no. 10, pp. 1032–1037, Oct. 2012.

Autori: Prof. Dr. Bojan Lalić, MSc Nela Cvetković, Doc. Dr. Uglješa Marjanović, Msc Nenad Medić, Univerzitet Novi Sad, Fakultet Tehničkih Nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Tel:+381 21 485 2144
E-mail:blalic@uns.ac.rs
nelacvetkovic@uns.ac.rs
umarjano@uns.ac.rs
medic.nenad@uns.ac.rs

Vilotić, D., Kraišnik, M.

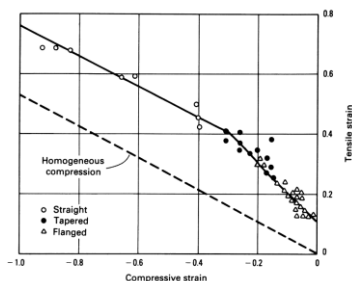
DIJAGRAMI GRANIČNE DEFORMABILNOSTI PRI HLADNOM
ZAPREMINSKOM DEFORMISANJU

Apstrakt: Deformabilnost je sposobnost materijala da se trajno deformiše u određenim uslovima, bez pojave oštećenja strukture materijala. Načelno, deformabilnost zavisi od vrste materijala (hemijski sastav i polazna struktura) i uslova oblikovanja (temperatura obrade, brzina deformacije, naponsko stanje i dr.). U tehnologijama hladnog zapreminskog deformisanja koriste se dva dijagrama granične deformabilnosti, koji predstavljaju grafičku interpretaciju kriterijuma deformabilnosti: a) kriterijum baziran na deformacionom stanju (deformacioni kriterijum), koji reprezentuje zavisnost glavnih deformacija u trenutku razaranja materijala i b) kriterijum zasnovan na zavisnosti deformabilnosti materijala od naponskog stanja (naponski kriterijum), koji reprezentuje zavisnost efektivne granične deformacije od pokazatelja naponskog stanja u zoni razaranja. U ovom radu su prikazani rezultati analize deformabilnosti čelika Č1531 interpretirani pomoću dijagrama granične deformabilnosti dobijenih primenom navedenih kriterijuma.

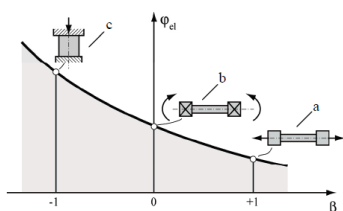
Ključne reči: kriterijumi deformabilnosti, dijagrami granične deformabilnosti

1. UVOD

Predikcija loma pri plastičnom deformisanju materijala vrši se primenom teorije plastičnog loma, odnosno, primenom empirijskih metoda baziranih na: a) deformacionom kriterijumu, odnosno, b) naponskom kriterijumu.



a)



b)

Sl. 1. Dijagram granične deformabilnosti
a) deformacioni kriterijum [1,2], b) naponski kriterijum [3,4,5,6,7]

U prvom slučaju, do razaranja materijala dolazi onda kada dve glavne deformacije u ravni dostignu kritičan iznos, a u drugom, kada efektivna deformacija u određenim naponskim uslovima dostigne kritičan iznos. I u jednom i u drugom slučaju, kriterijumi deformabilnosti su

predstavljani odgovarajućim dijagramima (slika 1), a određuju se eksperimentalno. U prvom slučaju (varijanta a) prati se deformaciono stanje na slobodnoj površini uzorka (cilindričnog, prizmatičnog i drugih oblika) do trenutka pojave pukotine. Glavne deformacije za trenutak razaranja unose se u dijagram. U slučaju dijagrama granične deformabilnosti koji povezuje efektivnu deformaciju sa naponskim stanjem, osim merenja deformacija na mestu razaranja potrebno je odrediti vrednost pokazatelja naponskog stanja β koji je definisan izrazom [5,9]:

$$\beta = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{\sigma_e} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_e} \quad (1)$$

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – komponente normalnih napona u pravcu koordinatnih osa

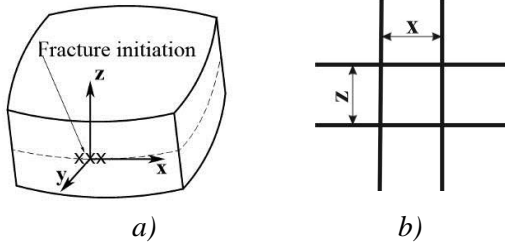
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – glavni normalni naponi

σ_e – efektivni napon

Pokazatelj naponskog stanja β , zavisno od konstelacije napona, može imati različite vrednosti, odnosno, može biti manji od nule (u materijalu vlada pritisno naponsko stanje), ili veći od nule, kada u materijalu vlada zatezno naponsko stanje. Nulta vrednost pokazatelja naponskog stanja postoji pri torziji, odnosno smicanju. Na osnovu dijagrama, slika 1b sledi da se znatno više vrednosti efektivne granične deformacije postiču u uslovima pritisnog naponskog stanja, nego u uslovima zatezanja. Objasnjenje leži u činjenici da pritisno naponsko stanje onemogućuje nastajanje i širenje mikropukotina u materijalu.

Za određivanje pokazatelja naponskog stanja β , za slučaj ravanskog naponskog stanja (slika 2), primenjuju se osnovne relacije teorije plastičnosti:

- veza napon – deformacija
- definicija hidrostatičkog napona
- Misesov kriterijum plastičnog tečenja



Sl. 2. Uzorak (a) nakon deformacije i (b) merna mreža [5]

Metodologija određivanja pokazatelja naponskog stanja prikazana je u radovima [4,5,6,7,8,9]:

$$\beta = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{\sigma_e} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{\sigma_e} = \frac{1 + \frac{1+2\alpha}{2+\alpha}}{\sqrt{1 - \frac{1+2\alpha}{2+\alpha} + \left\{\frac{1+2\alpha}{2+\alpha}\right\}^2}} \quad (2)$$

gde je α koeficijent deformacije koji je određen izrazom:

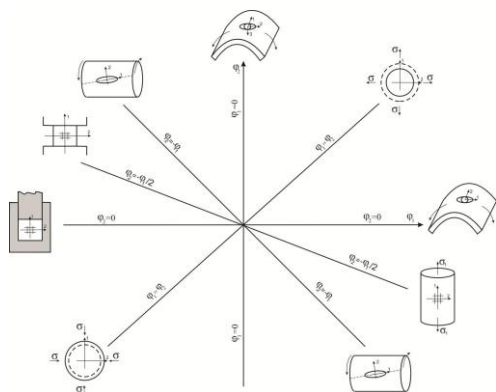
$$\alpha = \frac{d\varphi_x}{d\varphi_z} \quad (3)$$

pri čemu su: φ_x i φ_z – deformacije u pravcu koordinatnih osa x i z u zoni razaranja, a σ_x i σ_z komponente napona, dok su σ_1 i σ_2 glavni normalni naponi. Za određivanje koeficijenta α najpre se eksperimentalno određuje put deformacije, odnosno zavisnost deformaacija u ravni:

$$\varphi_x = f(\varphi_z) = A\varphi_z + B\varphi_z^2 \quad (4)$$

A i B su regresioni koeficijenti.

Put deformacije je karakteristika procesa deformisanja.



Sl. 3. Put deformacije različitih vidova deformacije

Tabela 1. Pokazatelj naponskog stanja u

monotonim uslovima deformacije

R. b.	Proces	Šema procesa	α	β
1.	Dvoosno zatezanje		1	+2
2.	Savijanje		0	$+\sqrt{3}$
3.	Jednoosno zatezanje		-0.5	+1
4.	Torzija		-1	0
5.	Slobodno ravansko sabijanje		-1	0
6.	Jednoosno sabijanje valjka		-0.5	-1
7.	Ravansko sabijanje u kalupu		0	$-\sqrt{3}$
8.	Dvoosno sabijanje		1	-2

U idealnim uslovima deformisanja (kada ne postoji trenje), put deformacije predstavljaju prave linije kod kojih je koeficijent deformacije $\alpha = const.$ (slika 3). U tom slučaju i pokazatelj naponskog stanja ima konstantne vrednosti i takvi procesi predstavljaju procese monotonog deformisanja, kojih u realnim uslovima plastičnog deformisanja ima veoma malo. Vrednosti pokazatelja naponskog stanja za uslove monotonog deformisanja date su u tabeli 1.

Krajnje tačke na putu deformacije predstavljaju granične tačke u dijagramu granične deformabilnosti prema deformacionom kriterijumu.

Primena relacija [2,3,4] pokazuje da se na osnovu aproksimativnih funkcija deformacije može utvrditi promena pokazatelja naponskog stanja tokom procesa deformisanja. U slučaju nemonotonih uslova deformacije (promenljiv koeficijent deformacije α i promenljiv pokazatelj naponskog stanja β), vrednost pokazatelja naponskog stanja, merodavnog za dijagram granične deformabilnosti, izračunava se kao srednja vrednost na putu deformacije [5,10,11,15]:

$$\beta_{av} = \frac{1}{\varphi_e^l} \int_0^{\varphi_e^l} \beta(\varphi_e) d\varphi_e \quad (5)$$

pri čemu $\beta(\varphi_e)$ predstavlja istoriju pokazatelja naponskog stanja na posmatranom putu deformacije; φ_e^l – granična deformacija.




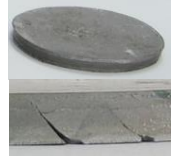
Na osnovu izloženog može se zaključiti da se oba dijagrama granične deformabilnosti mogu konstruisati na osnovu jedinstvenih eksperimentalnih ispitivanja.

2. REZULTATI

U nastavku su prikazani rezultati eksperimentalnih ispitivanja deformabilnosti čelika Č1531 u žarenom stanju. Rezultati se odnose na sledeće eksperimentalne jedinice:

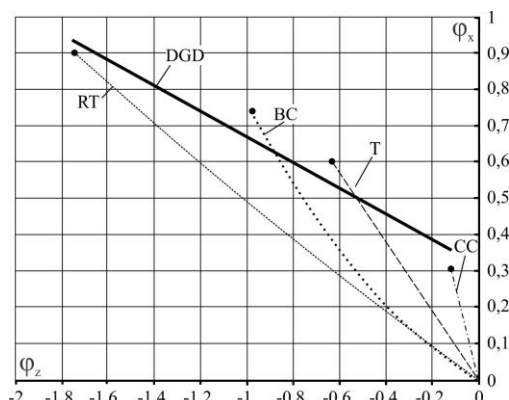
1. Rastegajev test sabijanja;
2. Aksijalno sabijanje valjka u realnim uslovima;
3. Test torzije;
4. Aksijalno sabijanje valjka sa prstenom.

Tabela 2. Rezultati eksperimenta

Test	Fotografija uzorka	β_{av}	φ_e^l
Cilindar sa prstenom (CC) [10]		+1.21	0.32
Torzija (T) [5]		0.00	0.73
Sabijanje valjka (BC) [5]		-0.40	1.12
Rastegajev test (RT) [16]		-0.94	1.74

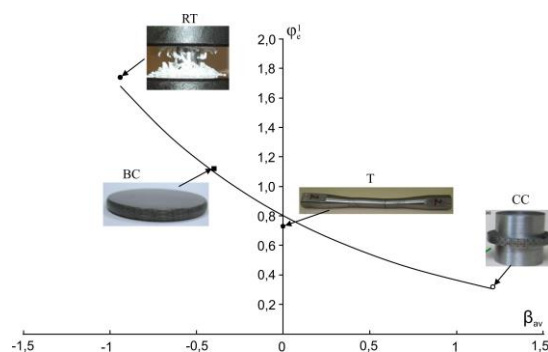
Put deformacije za pojedine modele

deformacije prikazan je na slici 3 u kojoj je ucrtana granična linija deformabilnosti (DGD), određena aproksimacijom krajnjih tačaka na putu deformacije.



Sl. 4. Dijagram granične deformabilnosti (deformacioni kriterijum – Č1531)

Dijagram granične deformabilnosti prema naponskom kriterijumu za iste modele deformacije prikazan je na slici 5.



Sl. 5. Dijagram granične deformabilnosti (naponski kriterijum – Č1531)

3. ZAKLJUČAK

- U tehnologiji hladnog zapreminskog deformisanja egzistiraju dva kriterijuma deformabilnosti materijala i odgovarajući dijagrami: deformacioni, odnosno naponski.
- Deformacioni dijagram granične deformabilnosti je jednostavniji, a primenjuje se isključivo u procesima u kojima razaranje nastaje na spoljnoj površini uzorka. Ovaj dijagram ne respektuje istoriju deformacije i određuje se isključivo na osnovu krajnjih tačaka puta deformacije.
- Dijagram granične deformabilnosti prema naponskom kriterijumu je značajniji, jer ima univerzalnu primenu, bez obzira na

poziciju zone razaranja (spolja ili u unutrašnjosti radnog komada). Naponski kriterijum deformabilnosti posebno je važan zbog činjenice da ukazuje na mogućnost promene uslova deformisanja sa ciljem postizanja minimalnog broja operacija oblikovanja, odnosno ukazuje na mogućnost optimizacije procesa deformisanja uz primenu odgovarajućih kriterijuma obrade.

- U ovom radu pokazano je da je moguća transformacija deformacionog u naponski dijagram granične deformabilnosti, za slučaj da razaranja materijala nastaje na spoljnoj površini uzorka.
- Metodologija transformacije naponskog dijagrama granične deformabilnosti u deformacioni, za iste uslove deformisanja, takođe je moguća a prikazana je u radu [16].

4. REFERENCE

- [1] P. Gänser: *Free-surface ductility in bulk forming processes*, International Journal of Plasticity, 17 (2001), 755-772.
- [2] G. Dieter, H. Kuhn, L. Semiatin: Chapter 2 *Bulk Workability of Metals*, Chapter 3 [3,4,5,6,7], *Handbook of Workability and Process Design*, ASM International, Material Park Ohio (2003), 22-39 .
- [3] V. Vujovic, A. Shabaik: *Workability Criteria for Ductile Fracture*, Trans. ASME J. Engng. Mater. Technol., 108 (1986), 245-249.
- [4] D. Vilotic, M. Plancak, Đ. Cupković, S. Alexandrov, N. Alexandrov: *Free Surface Fracture in Three Upsetting Tests*, Experimental Mechanics, 46 (2006), 115-120.
- [5] D. Vilotić, S. Alexandrov, M. Plančak, D. Movrin, A. Ivanišević, M. Vilotić: *Material Workability at Up-setting by V-Shape Dies*, Steel Research International, Special Edition, (2011), 923-928.
- [6] S. Alexandrov, D. Vilotic: *Theoretical and Experimental Analysis of Fracture Initiation at the Free Surface in Upsetting by Conical Dies*, Steel Research International, 2 (2008), 375-381.
- [7] S. Alexandrov, N. Chikanova, D. Vilotic: *Compression of a Block Between Cylindrical Dies and its Application to the Workability Diagram*, Studies in Applied Mechanics, Advanced Methods in Materials Processing Defects, 45 (1997), 247-256.
- [8] D. Vilotic, N. Chikanova, S. Alexandrov: *Disk Upsetting Between Spherical Dies and its Application to the Determination of Forming Limit Curves*, Journal Strain Analysis, 34 (1999), 17-22.
- [9] D. Vilotic, M. Plancak, S. Grbic, S. Alexandrov, N. Chikanova: *An approach to determining the workability diagram based on upsetting tests*, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 26 (2001), 305-310.
- [10] S. Alexandrov, D. Vilotic, Z. Konjovic, M. Vilotic: *An Improved Method for Determining the Workability Diagram*, submitted to Experimental Mechanics, (2011).
- [11] D. Vilotic, S. Alexandrov, M. Plancak, M. Vilotic, A. Ivanisevic, I. Kacmarcik: *Material Formability at Upsetting by Cylindrical and Flat Dies*, Steel Research International, str. 923–928, 2011, ISBN 1611-3683, Izdavač: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA
- [12] V. L. Kolmogorov: *Mehanika obrabotki metallov davleniem*, UPI, Ekaterinburg, (2001), 664-718.
- [13] M. Brandes in: *The Mechanical behaviour of Materials under Pressure*, edit by H. LI. Pugh The Applied science Publisher, London (1970), 236-298.
- [14] S. Alexandrov, D. Vilotic, R. Goldstein, N. Chikanova: *The Determination of the Workability Diagram*, Mechanics of Solids, 34 (1999), 118-125.
- [15] Vilotić D., Alexandrov S., Plančak M., Ivanišević A.: *Use of Non-Axisymmetric Specimens in Upsetting for Determining the Workability Diagram*, 19. European Conference on Fracture - ECF, Kazan: European Structural Integrity Society, 26-31 August, 2012, ISBN 978-5-905576-18
- [16] Dragisa Vilotic, Sergei Alexandrov, Aljosa Ivanisevic, and Mladomir Milutinovic: *Reducibility of Stress-Based Workability Diagram to Strain-Based Workability Diagram*, International Journal of Applied Mechanics, March 2016, Vol. 08, No. 02, (doi: 10.1142/S1758825116500228)

Autori: Prof. Dr Dragiša Vilotić, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Srbija, **Doc. Dr Milija Kraišnik**, Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Mašinski fakultet, Vuka Karadžića 30, 71123 Istočno Novo Sarajevo

E-mail: vilotic@uns.ac.rs
milija.kraisnik@ues.rs.ba

Lukić, D., Milošević, M., Salak, S., Štrbac, B., Biševac, S., Dramićanin, M.

**POREĐENJE TAČNOSTI OBRADE I ISKORIŠĆENOSTI MATERIJALA PRI
SEČENJU ČELIČNIH PLOČA RAZLIČITIM OBRADNIM PROCESIMA**

***Rezime:** Razvojem novih tehnologija konstantno se unapređuju procesi obrade različitih materijala koji su tačniji, produktivniji i ekonomičniji. Sve je veća preciznost obradnih sistema čime se smanjuje potreba za višestrukim naknadnim obradama. Za sečenje materijala danas se pored konvencionalnih sve više upotrebljavaju nekonvencionalni procesi obrade i odgovarajući obradni sistemi. Poznavanjem karakteristika pojedinih procesa obrade sečenjem, odnosno njihovih mogućnosti i razlika lakše je doneti odluku koji proces u kom slučaju koristiti, odnosno koji je kada optimalan. Osnovna tema ovog rada se odnosi na uporednu analizu tačnosti obrade i iskorišćenosti materijala koje se ostvaruju pri sečenju čeličnih ploča različite debljine plazmom, laserom i abrazivnim vodenim mlazom za proizvodne uslove preduzeća „VOS-System d.o.o.“.*

***Ključne reči:** sečenje, tačnost obrade, iskorišćenost materijala, laser, plazma, abrazivni vodeni mlaz*

1. UVOD

Danas se za obradu pločastih materijala sečenjem pored konvencionalnih sve više upotrebljavaju i nekonvencionalni procesi obrade. Povećanjem preciznosti ovih procesa i odgovarajućih obradnih sistema, smanjuje se potreba za višestrukim naknadnim obradama uz istovremeno postizanje zadovoljavajuće tačnosti, proizvodnosti i ekonomičnosti [1].

Preduzeće „VOS-System d.o.o.“ poseduje tri obradna sistema za sečenje materijala, odnosno obradni sistem za sečenje materijala vodenim mlazom, obradni sistem za sečenje plazmom i od skorijeg datuma obradni sistem za sečenje laserom. Ovi obradni sistemi se koriste u okviru tehnoloških procesa izrade značajnog broja proizvoda iz programa proizvodnje. Pored toga sečenje materijala primenom navedenih obradnih sistema predstavlja jednu od bitnih uslužnih delatnosti preduzeća.

Osnovna tema ovog rada se upravo odnosi na uporednu analizu tačnosti obrade i iskorišćenosti materijala koja se ostvaruje pri sečenju čeličnih ploča različite debljine plazmom, laserom i abrazivnim vodenim mlazom za proizvodne uslove posmatranog preduzeća.

2. OSNOVNE KARAKTERISTIKE PROCESA SEČENJA MATERIJALA

Nekonvencionalni procesi obrade predstavljaju procese obrade skidanjem materijala kod kojih se obrada ostvaruje različitim fizičko-hemijskim mehanizmima. Svaki od ovih procesa je

karakterističan po mehanizmu koji ostvaruje skidanje materijala i svi se međusobno razlikuju. Za razliku od konvencionalnih postupaka, ovde ne dolazi do dodira alata sa obratkom, nema stvaranja strugotine i alat nije veće tvrdoće od obradka, već se materijal odnosi uglavnom topljenjem, isparavanjem, hemijskim nagizanjem, itd. [2].

Obrada plazmom, zbog velike i efikasne koncentracije toplotne energije struje plazme, odlikuje se vrlo visokom proizvodnošću. Međutim, visoka i neujednačena temperatura struje plazme u širokoj zoni obrade ograničava njenu upotrebu u proizvodnim operacijama gde se zahteva visoka tačnost obrade. Na tehnološke karakteristike utiču raznorazni faktori kao što su: izvor napajanja (struja i napon), vrsta i pritisak plazma gasa, dimenzije i položaj plazmatrona, materijal obratka i njegova debljina i proizvodna operacija (topljenje ili zagrevanje).

Tačnost obrade najviše zavisi od debljine materijala ili površine koja se obrađuje, kao i od dimenzija plazmatrona i od energetske karakteristike struje plazme. Greške koje se javljaju prilikom obrade plazmom su: zaobljenost gorenje ivice, suženje donje ivice, neravnomernost širine reza po visini, neparalelnost tj koničnost bočnih površina reza, i dr. [2, 3].

Specifične karakteristike laserskog zračenja omogućile su široku primenu *lasera* za obradu materijala sečenjem, bušenjem, zavarivanjem, površinsku obradu i dr. Tokom godina razvijeni su novi procesi kao što su lasersko oblikovanje, lasersko otvrdnjavanje, nanošenje prevlaka i različiti postupci mikro i nano obrada [4, 5].

Proizvodnost, tačnost obrade i kvalitet obrađene površine zavise od energetskih i geometrijskih karakteristika laserskog zraka, toplotno-fizičkih svojstava materijala obratka, vrste proizvodne operacije, karakteristika kretanja obratka ili radne glave i dr. [5].

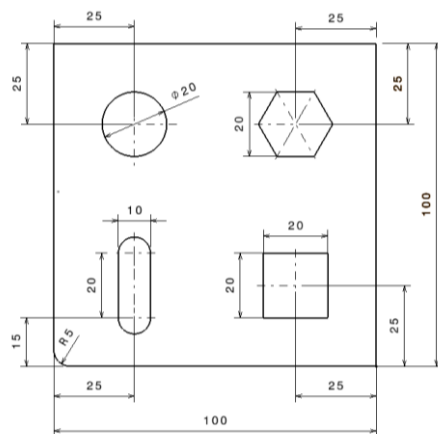
Tačnost obrade laserom zavisi od intenziteta i stabilnosti energetskih parametara laserskog zraka i geometrijskih karakteristika optičkog sistema. Zbog konusnog oblika zraka i zbog velikog zagrevanja materijala tokom obrade dolazi do odstupanja dimenzija i oblika. Međutim i pored tih odstupanja, tačnost obrade laserom je vrlo visoka, naročito kod završne obrade. Kako bi tačnost obrade bila još veća, bitno je ostvariti maksimalno fokusiranje laserskog zraka na površini koja se obrađuje i primeniti bolje režime obrade. Takođe, tačnost se može povećati ugradnjom dodatnih uređaja, rotacijom laserskog zraka i dr. [2, 5].

Postupak skidanja materijala **abrazivnim vodenim mlazom** se bazira na udarnom delovanju mlaza tečnosti pod visokim pritiskom u kom se nalaze abrazivne čestice u materijal obratka [6, 7]. Tehnološke karakteristike procesa obrade vodenim mlazom zavise od niza faktora, kao što su vrsta tečnosti, kvalitet mlaza, karakteristike uređaja visokog pritiska, konstrukcija mlaznika – dizne, vrsta i debljina materijala obratka i dr.

Tačnost obrade zavisi od geometrije mlaznika, radnog zazora, materijala i debljine obratka, brzine pomoćnog kretanja itd. Tačnost obrade vodenim mlazom iznosi od $\pm 0,2 - 0,02$ mm. Greške uglavnom nastaju zbog nedefinisanosti alata, postepenom širenje mlaza sa povećanjem dubine rezanja, njegove koničnosti pa se javlja zaobljenje ivica i dr. [7].

3. POSTAVKA I OPIS EKSPERIMENTA

Iz tri ploče od konstrukcionog čelika S235JR (Č.0361), različitih debljina – 5, 8 i 10 [mm] izvršeno je isecanje obradaka prikazanih na slici 1.



Sl. 1. 2D crtež dela [8]

Obrada je realizovana na mašinama za sečenje plazmom, laserom i vodenim mlazom čije osnovne karakteristike su navedene u tabeli 1.

Tabela 1. Osnovne karakteristike obradnih sistema za sečenje materijala u preduzeću

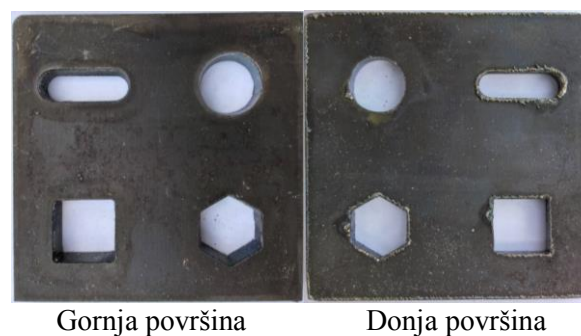
<p>Plazma (PAM) Naziv obradnog sistema: OxyCut EkoFan N2</p> <ul style="list-style-type: none"> • Veličina radnog prostora: 1500 x 3500mm • Maksimalna debljina obratka: 150 mm
<p>Laser (LBM) Naziv obradnog sistema: Bystar 3015</p> <ul style="list-style-type: none"> • Veličina radnog prostora: 3000 x 1500 mm • Maksimalna debljina obratka: 20 mm • Snaga lasera: 3,5kW
<p>Abrazivni vodeni mlaz (AWJM) Naziv obradnog sistema: STM WS1015</p> <ul style="list-style-type: none"> • Veličina radnog prostora: 1300 x 2500 mm • Maksimalna debljina obratka: 30 mm • Snaga: 9 kW

Za proces sečenja su korišćeni preporučeni ili iskustveni parametri obrade na svakoj od mašina, pri čemu isti nisu varirani, odnosno nisu uzeti kao optimizacioni parametri. U tabeli 2 date su brzine obrade v (mm/min) za različite debljine materijala.

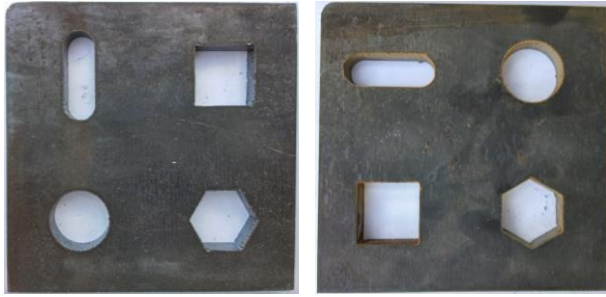
Tabela 2. Brzine rezanja za različite procese i debljine materijala

Debljina materijala a [mm]	Brzina rezanja v [mm/min]		
	PAM	LBM	AWJM
3	3620	2270	270
5	2000	1100	120
8	1500	900	75

U nastavku na slikama 2 i 3 je dat uporedni prikaz sečenih delova za debljinu od 8 mm, sa prikazom gornje površine obrade, u napomenu da je kod obrade plazmom donja površina sa značajnom količinom istopljenog zaostalog materijala u vidu troske (slika 2 desno).



Sl. 2. Prikaz sečenih delova plazmom

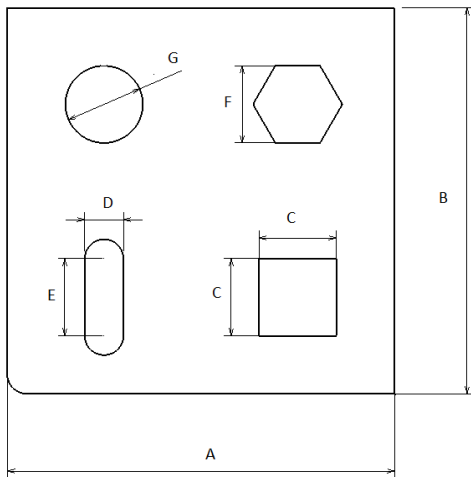


Sl. 3. Prikaz sečenih delova laserom (levo) i abrazivnim vodenim mlazom (desno)

4. PRIKAZ I POREĐENJE REZULTATA MERENJA TAČNOSTI OBRADNE

Dimenziona tačnost predstavlja osnovni uslov za ispunjenje konstrukciono-tehnoloških karakteristika delova koji se ugrađuju u proizvod pri montaži. Shodno tome da bi se određeni proces obrade primenio u praksi potrebno je da prvo zadovoljava dimenzionu tačnost, a potom da ako je moguće nema dodatnih operacija obrade da bi se ova tačnost postigla.

Na slici 4 su prikazane dimenzije koje su merene na obrađenim delovima pomoću pomičnog merila. Za svaku dimenziju izvršeno je merenje u nekoliko tačaka i usvojena je maksimalna odnosno minimalna mera i odgovarajuće odstupanje pojedinih mera.



Sl. 4. Usvojene dimenzije za merenje

U tabeli 3, 4 i 5 dati su podaci maksimalnog odstupanja izmerenih vrednosti dimenzija sa slike 4 za različite debljine sečenog materijala primenom nevedenih obradnih sistema za sečenje nakon skidanja pucni na delovima.

Mašinskim uglomerom je izmeren konus na pripremljenu debljine 10 mm koji je sečen na plazmi i dobijeni ugao konusa iznosi oko 5°, dok je na uzorcima sečenim sa druga dva postupka mnogo manji, kod obrade obrade laserom iznosi 0°-0°30' a kod obrade vodenim mlazom 0°30'-1°.

Tabela 3. Maksimalno odstupanje izmerenih vrednosti pri obradi plazmom

Mera [mm]	Debljina materijala [mm]		
	5	8	10
$A_{max} / A_{min} - A$	0,5	0,6	0,8
$B_{max} / B_{min} - B$	0,6	0,7	0,8
$C_{max} / C_{min} - C$	0,5	0,6	0,7
$D_{max} / D_{min} - D$	0,5	0,6	0,7
$E_{max} / E_{min} - E$	0,3	0,45	0,6
$F_{max} / F_{min} - F$	0,5	0,6	0,8
$G_{max} / G_{min} - G$	0,5	0,7	0,8

Tabela 4. Maksimalno odstupanje izmerenih vrednosti pri obradi laserom

Mera [mm]	Debljina materijala [mm]		
	5	8	10
$A_{max} / A_{min} - A$	0,1	0,15	0,2
$B_{max} / B_{min} - B$	0,1	0,15	0,2
$C_{max} / C_{min} - C$	0,05	0,1	0,2
$D_{max} / D_{min} - D$	0	0,1	0,2
$E_{max} / E_{min} - E$	0	0	0
$F_{max} / F_{min} - F$	0,1	0,15	0,2
$G_{max} / G_{min} - G$	0,1	0,1	0,15

Tabela 5. Maksimalno odstupanje izmerenih vrednosti pri obradi abrazivnim vodenim mlazom

Mera [mm]	Debljina materijala [mm]		
	5	8	10
$A_{max} / A_{min} - A$	0,1	0,1	0,15
$B_{max} / B_{min} - B$	0,05	0,1	0,15
$C_{max} / C_{min} - C$	0	0	0
$D_{max} / D_{min} - D$	0	0	0
$E_{max} / E_{min} - E$	0,05	0,1	0,1
$F_{max} / F_{min} - F$	0,1	0,15	0,15
$G_{max} / G_{min} - G$	0,05	0,1	0,15

Posmatrani procesi obrade sečenja materijala imaju različit stepen iskorišćenja materijala, koje je u ovom slučaju uzeto na bazi širine reza pri obradi, odnosno količine materijala koji se skida pri rezanju.

Na slici 5 dat je uporedni prikaz širine reza za posmatrane procese obrade. Širina reza kod obrade plazmom je najveći i iznosi 2 - 3mm, kod lasera 0,5 - 1mm i kod vodenog mlaza 1 - 2 mm.



Slika 5. Prikaz širine reza pri obradi sečenjem materijala za različite procese obrade

5. ZAKLJUČAK

Poznavanjem karakteristika pojedinih procesa obrade i odgovarajućih obradnih sistema, odnosno njihovih mogućnosti i razlika, lakše je doneti odluku koji proces ili obradni sistem u kom slučaju izabrati, odnosno koji je za koje uslove optimalan. Osnovni cilj istraživanja u ovom radu se odnosio na uporednu analizu procesa obrade sečenja čeličnih ploča debljina 5, 8 i 10 mm plazmom, laserom i vodenim mlazom sa aspekta tačnosti obrade i iskorišćenosti materijala, odnosno širine reza za proizvodne uslove posmatranog proizvodnog sistema. Na osnovu realizovanih eksperimenata, nakon obrade i analize dobijenih rezultata došlo se do sledećih zaključaka, koji su u nastavku predstavljeni.

Kao što se i očekivalo dimenziona tačnost obrade plazmom je najmanja od posmatranih procesa obrade sečenja kao i stepen iskorišćenosti materijala. Sa prednje strane stanje obradaka je prihvatljivo, vidljiva je zona uticaja toplote koja na nekim mestima dostiže i do 8 mm, usled čega dolazi do manje promene tvrdoće materijala na obrađenoj površini. Na zadnjoj strani se javlja taloženje rastopljenog metala u vidu troske, a osim toga nema značajnih promena na površini obradaka. Bočna strana je sjajna, prihvatljivog kvaliteta sa vidljivim tragovima rezanja u vidu brazdanja materijala. Rez je zakošen u obliku konusa oko 5°. Kako bi ovi obradci mogli da se koriste za potrebe montaže ili neke slične namene potrebno je čišćenje troske sa zadnje strane i naknadna obrada konusnih površina. Rastopljeni materijal-troska sa zadnje strane se lako odvaja od osnovnog materijala.

Nakon obrade laserom dobijaju se delovi kod kojih je opšte stanje prihvatljivo a dimenziona tačnost zadovoljavajuća, pa se oni mogu koristiti bez dodatnih obrada pri ugradnji u gotov proizvod. Širina reza je mala a iskorišćenost materijala je najbolja u odnosu na posmatrane procese. Na nekoliko mesta se vide veća brazdanja materijala koja su nastala zbog oštrijih parametara rezanja koji nisu optimalni za ove uslove, već su izabrani na bazi iskustva koje nije veliko, jer je mašina tek nedavno nabavljena. Kako bi se izbegla ova pojava brazdanja potrebno je izabrati kvalitetnije parametre obrade, odnosno izvršiti njihovu optimizaciju. Duž ivice reza se može uočiti vrlo mala zona uticaja toplote koja dostiže širinu do 1mm, i utiče na povećanje tvrdoće obrađene površine. Na bočnim stranama su vidljive brazde i tragovi reza koji su zakošeni u pravcu brzine kretanja laserskog zraka.

Kod obrađenih uzoraka sečenjem abrazivnim vodenim mlazom vidljivo je da su dobijeni čisti i

upotrebljivi delovi bez potrebe za dodatnom obradom površina. Mogu se videti blagi tragovi rezanja i površina reza je matirana usled uticaja vode. Bočna površina obratka je zadovoljavajućeg kvaliteta i tačnosti dimenzija pa se delovi mogu direktno upotrebiti za procese montaže u gotov proizvod.

U cilju poboljšanja tačnosti obrade potrebno je proširiti istraživanje uticaja parametara obrade na tačnost obrade, odnosno njihovu optimizaciju, što predstavlja skladan nastavak ovih istraživanja.

6. REFERENCE

- [1] Groover, M.P.: *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems*, John Wiley & Sons Inc., 2010.
- [2] Gostimirović, M.: *Nekonvencionalni postupci obrade*, FTN izdavaštvo, Novi Sad, 2016.
- [3] Thomas D.J.: *Optimising Plasma Cut-edge Properties for Improving the Durability of Bridge Structures*, International Journal of Steel Structures, Vol.11, No.4, 481-493, 2011.
- [4] Steen, W.M., Mazumder, J.: *Laser Material Processing*, Springer-Verlag London, 2010.
- [5] Madić, M.: *Matematičko modeliranje i optimizacija procesa laserskog sečenja primenom metoda veštačke inteligencije*, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Niš, 2013.
- [6] Baralić, J.: *Energija i kvalitet obrade abrazivnim vodenim mlazom*, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Kragujevac, 2014.
- [7] Wang, J.: *Abrasive waterjet machining of engineering materials*, Trans Tech Publications, Uetikon-Zuerich, Switzerland, 2003.
- [8] Salak, S.: *Uporedna tehnološka analiza procesa obrade sečenjem materijala u preduzeću „VOS-System d.o.o.“*, Diplomski rad, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2017.

Napomena: Rad predstavlja deo istraživanja na projektu ev. broj 142-451-3556/2016-01. koji je finansiran od strane Autonomne Pokrajine Vojvodine.

Autori: Doc. dr Dejan Lukić, Vanr. prof. dr Mijodrag Milošević, Doc. dr Branko Štrbac, BSc Siniša Salak, MSc Sonja Biševac, MSc Miroslav Dramićanin, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet Tehničkih Nauka, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Tel: +381 21 485 2331, Fax: +381 21 454-495.

E-mail: luki@d@uns.ac.rs, mido@uns.ac.rs
sinisa.salak@gmail.com, strbac@uns.ac.rs
sonija93@hotmail.com, dramicanin@uns.ac.rs

Rajnović, D., Maćaš, M., Ristić, M., Janjatović, P., Labus Zlatanović, D., Baloš, S., Šidanin, L.

**NASTANAK KONTAMINIRANOG SLOJA I ZONE BEZ KARBIDA KOD
SUPERLEGURE IN100 PRILIKOM TOPLOG HIDROSTATIČKOG PRESOVANJA**

Rezime: U ovom radu je detaljno opisan proces toplog hidrostatičkog presovanja – HIP, vrste procesa i značaj za odlivke od superlegura. Prikazano je ispitivanje kontaminiranog sloja koji se javlja kao posledica HIP procesa kod superlegure IN100. Konstatovano je da je pojava kontaminiranog sloja posledica difuzije karbida iz metalne osnove na površinu i uticaja nečistoća u atmosferi argona, što uzrokuje stvaranje sloja oksida, nitrida i karbida. Difuzija karbida na površinu za posledicu ima i nastanak zone bez karbida.

Ključne reči: HIP – toplo hidrostatičko presovanje, superlegure, kontaminacija

1. UVOD

1.1 Toplo hidrostatičko presovanje – HIP proces (Hot Isostatic Pressing)

Toplo hidrostatičko presovanje (HIP - Hot Isostatic Pressing) je razvijeno za potrebe nuklearnih elektrana, gde se pri velikim hidrostatičkim pritiscima gasa i velikim temperaturama vršilo spajanje elemenata nuklearnog goriva. Nakon toga, HIP proces se razvio u opšte prihvaćenu tehnologiju za tretman svih vrsta materijala. Razvoj industrijske primene HIP-a je bio postepen [1]. U početku, tokom šezdesetih, HIP postrojenja su bila izrazito skupa i nepouzdana. Daljim razvojem, došlo je unapređenja usled smanjenja cena, razvoja jeftinog laboratorijskog pribora, proizvodnje sa kraćim HIP ciklusima i sa većom pouzdanošću. HIP proces se u sadašnje vreme, koristi za sledeće komercijalne primene [1]: smanjenje ili potpuno uklanjanje poroznosti i istovremena termička obrada odlivaka, revitalizacija komponenata od štete nastale eksploatacijom komponente (puzanje ili zamor materijala), sabijanje metalnog praha, naknadno sabije sinterovanih keramičkih ili metalnih delova, spajanje materijala, kombinovanje infiltracije i sabijanja. Primena toplog hidrostatičkog presovanja za različite materijale je prikazana u tabeli 1.

Glavna pokretačka sila za komercijalno razvijanje HIP tehnologije jeste mogućnost izrade delova preciznih tolerancija bez potrebe za dodatnom obradom. Time je omogućena proizvodnja delova koji ispunjavaju specifikacije u kritičnoj i visokonaponskoj primeni. HIP se posebno koristi za poboljšanje osobina monokristalnih i usmereno kristalnih turbinskih lopatica superlegura koje su proizvedene preciznim livenjem. [2].

Tabela 1. Mogućnosti primene HIP procesa [1]

Kategorije	Komercijalna primena	Moguća primena
Odlivci	Superlegure, Ti	Al, Cu, čelik
Podmlađivanje	Superlegure, Ti	Čelik
Post-sinterovanje	Tvrđi metal, keramički alati, delovi proizvedeni sinterovanjem	Keramički delovi – Si ₃ N ₄
Sabijanje praha	Superlegure, Brzorezni čelici, Nerđajući čelik, Ti, Be, Cr	Metalno – keramički kompoziti
Spajanje	Elementi za nuklearno gorivo, ventili, delovi za avio i nuklearnu tehniku	Keramički motori, kapsulacija nuklearnog otpada
Infiltracija	Karbon/karbonski kompoziti	Hemijske reakcije

HIP proces, je toplotno-mehanički proces koji se primenjuje kod odlivaka kako bi se usled povišene temperature (>1000°C) i pritiska (~180MPa) procesa poboljšala čvrstoća i povećala gustina materijala. Kao radni medijum se najčešće koristi argon, ali osim argona se koristi i azot [3].

Vreme trajanja procesa je veoma važno sa ekonomskog aspekta. Izvesni materijali, kao što su legure Ti, obrađuju na nižim temperaturama i zbog toga zahtevaju duže vreme procesiranja. Drugi materijali se mogu procesirati za kratko vreme, što je ekonomski povoljnije.

1.2 Superlegure

Superlegure su grupa materijala koje mogu biti na bazi Ni-Fe, Ni i Co, i primenjuju se za delove koji rade na temperaturama do 650°C. Glavna osobina legura na bazi Ni je da izdrže opterećenja na visokim temperaturama koje mogu biti i do 0.8 temperature topljenja date legure. Superlegure

poseduju dobru kombinaciju čvrstoće pri visokim temperaturama, otpornosti prema uticaju okoline (nitriranje, oksidacija, naugljeničenje i sulfidizacija), odlične otpornosti prema puzanju i naponskim prslinama, tvrdoće, metalurške stabilnosti, toplotnog širenja, i otpornosti prema toplotnom zamoru i koroziji. Rast upotrebe HIP procesa je bio paralelan sa razvojem naprednih superlegura na bazi Ni, i sa pojavom odlivaka sa vrlo kompleksnom geometrijom kod kojih se obično javlja povećan stepen mikroporoznosti. Ovakvi zahtevi mogu se samo ispuniti pomoću HIP procesa [4].

2. OPIS PROBLEMA

Na površini radnih komada nakon HIP proces dolazi do pojave kontaminiranog sloja. Kontaminirani sloj je vidljiv golim okom u vidu promene boje komada, a debljina tog sloja nije konstantna. Sloj kontaminacije predstavlja problem u vidu: povećanja dimenzija odlivaka, potrebna za dodatnim čišćenjem, i nečistoće na površini mogu biti inicijatori korozije i prslina.

Na osnovu toga, cilj rada je bio da se odredi kako priprema površine utiče na debljinu sloja pri zadatim uslovima HIP procesiranja, da se odredi hemijski sastav kontaminiranog sloja pomoću SEM-u (skening elektronskom mikroskopu) pomoću EDS metode (energetska disperziona spektroskopija X zraka).

3. EKSPERIMENTALNA PROCEDURA

Nakon HIP procesa potrebno je ispitati nastanak kontaminiranog sloja, izmeriti dubinu tog sloja na uzorcima koji su postavljeni unutar peći u tri zone: 3 uzorka u gornju zonu, 3 uzorka u srednju zonu, i 3 uzorka u donju zonu.

Uzorci su dobijeni livenjem super legure Inconel 100. Legura se uspešno koristi za odlivke kao što su: lopatice turbina aviona, rotori i statori gasnih turbina, za sve elemente koji su izloženi radu na povišenim temperaturama. Nominalni hemijski sastav legure je prikazan u tabeli 2.

Tabela 2. Nominalni hemijski sastav IN100

Element	mass %	Element	mass %	Element	mass %
C	0,15-0,20	Al	5-6	Mn	max 0,2
Cr	8-11	V	0,7-1,2	Si	max 0,2
Co	13-17	Zr	0,03-0,09	S	max 0,015
Mo	2-4	B	0,01-0,02	Ni	osnova
Ti	4,5-5	Fe	max 1	-	-

Mehaničke osobine superlegure IN100 propisane su standardom: gustina – 7,75 g/cm³, opseg topljenja – 1260-1335°C, tvrdoća – 30-44 HRC.

Za ispitivanje korišteno je 3 vrste uzoraka različitog kvaliteta površine. Uzorci su grubo brušeni (P240), fino brušen (P 1000) i polirani sa tkaninom i dijamantskom suspenzijom od 1 µm, slika 1. Po završetku procesa sledi određivanje srednje debljine kontaminiranog sloja, pri uvećanju od 1000× izvršeno je 5 merenja na 5 vidnih polja.



Sl 1. Uzorak za ispitivanje kontaminiranog sloja i pripremljeni uzorci (P 240, P 1000, poliran 1 µm)

3.1 Parametri HIP procesa

Odlivci i epruvete za ispitivanje su bili procesirani u standardnom HIP ciklusu koji je propisan za materijal IN100. Maksimalna temperatura procesa je 1200°C u trajanju od 4h, pri pritisku od 1379×10⁵ Pa (20000 psi), a ceo proces je trajao 9h.

3.2 Ispitivanje kontaminiranog sloja

Nakon završetka HIP procesa, epruvete se vade iz korpi i ponovno se zatapaju. Nakon zatapanja uzorci se moraju dodatno brusiti za mikroskopsko posmatranje (brusni papiri P240, P600, i P1000) i potom polirati sa tkaninom i dijamantskom suspenzijom 3 µm i konačno sa 1 µm.

Svetlosni mikroskop (SM) marke Leica DM1750M sa uvećanjem od 1000× je korišten za ispitivanje debljine kontaminiranog sloja. Merenje sloja je vršeno pomoću odgovarajućeg softvera LAS V4.9. Pored toga, izvršena je i analiza kontaminiranog sloja pomoću SEM mikroskopa u Univerzitetkom centru za elektronsku mikroskopiju, Univerziteta u Novom Sadu. Model mikroskopa je JEOL JSM-6460LV, opremljen sa EDS sistemom INCA Oxford Instruments. Ispitivanje je vršeno pri radnom naponu od 20 kV, i različitim uvećanjima. Za dobijanje slika korišteni su moduli SEM-a SE (sekundarni elektroni) i BSE (povratno rasejani elektroni) koji daju različit kontrast slike u zavisnosti od hemijskog sastava. Kvalitativno određivanje hemijskog sastava

kontaminiranog sloja sa BSE je potvrđeno EDS metodom.

4. REZULTATI I DISKUSIJA

Za svaku vrstu pripreme površine uzorka (P240, P1000 i polirano) na slikama 2 do 4 prikazano je 5 merenja na SM mikroskopu kontaminiranog sloja na jednom vidnom polju. Rezultat merenja kontaminiranog sloja uzorka koji je brušen sa P240 je prikazan na slici 2. Slika 3 takođe prikazuje kontaminirani sloj uzorka brušenog sa P1000, dok slika 4 prikazuje rezultat merenja kontaminiranog sloja za uzorak koji je poliran tkaninom i dijamantskom suspenzijom finoće 1 µm. Slike 2 do 4 su date za uzorke koji su vađeni iz prve korpe.



Sl. 2. Kontaminirani sloj uzorka iz prve korpe brušen sa P240 (SM)



Sl. 3. Kontaminirani sloj uzorka iz prve korpe brušen sa P1000 (SM)

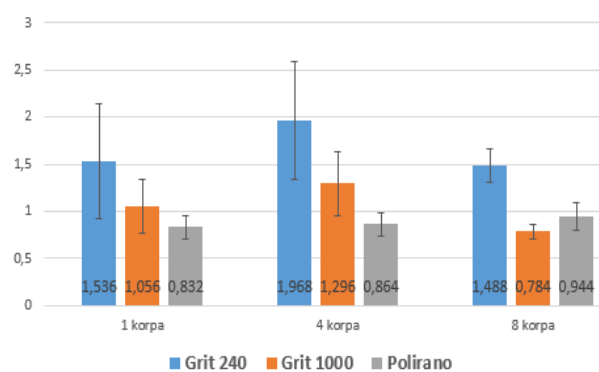


Sl. 4. Kontaminirani sloj uzorka iz prve korpe poliran sa dijamantskom suspenzijom 1 µm (SM)

Srednja vrednost izmerenog sloja kontaminacije i standardne devijacije su date u tabeli 3 i na dijagramu slika 5 u zavisnosti od pripreme uzorka i pozicije u peći. Nakon svih izmerenih vrednosti može se zaključiti da je najveća kontaminacija kod uzoraka iz 4. korpe pripremljenih sa P240 i iznosi 1,968 µm, dok je najmanja 0,784 µm kod uzoraka pripremljenog sa P1000 iz 8. korpe. Iz tabele i sa dijagrama se vidi da je kontaminirani sloj najdeblji na uzorcima koji su brušeni sa P240, srednja vrednost 1,728 µm, dok je najtanji kontaminirani sloj kod uzoraka koji su polirani i iznosi 0,888 µm. Međutim, kod pripreme sa P1000 i poliranja srednje vrednosti sloja su slične, pa samim tim dodatna priprema uzorka poliranjem sa ciljem da se dobije što manji sloj nije potrebna.

Tabela 3. Srednje vrednosti kontaminiranog sloja sa standardnom devijacijom [µm]

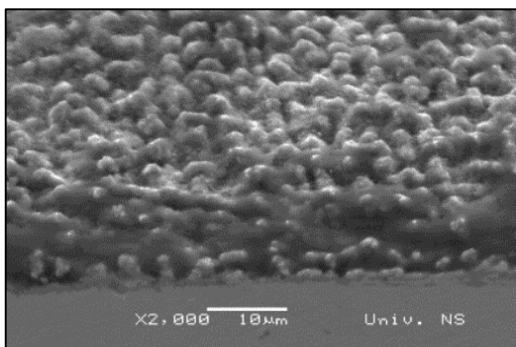
		1. korpa	4. korpa	8. korpa	Sr. vred.
P240	Sr. vr.	1,536	1,968	1,488	1,728
	St. dev.	0,608	0,624	0,176	
P1000	Sr. vr.	1,056	1,296	0,784	1,040
	St. dev.	0,288	0,336	0,080	
Pol	Sr. vr.	0,832	0,864	0,944	0,888
	St. dev.	0,128	0,128	0,144	



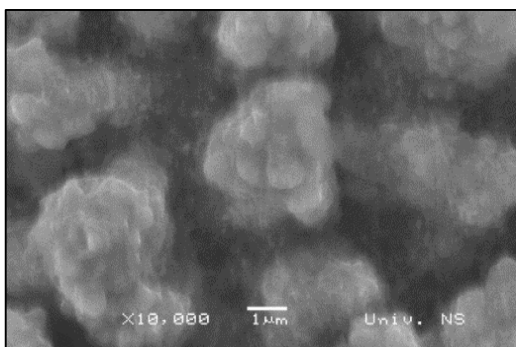
Sl. 5. Dijagram zavisnosti debljine kontaminiranog sloja od pripreme uzorka i mesta merenja kontaminacije

Uz pomoć SEM mikroskopa na slici 6 i 7 prikazan je izgled kontaminiranog sloja. Hrapava površina prikazuje kontaminirani sloj a ravna površina je poprečni presek osnove slika 6.

Na slici 7 prikazan je slojevit rast kontaminiranog sloja u vidu grozdova. Takođe, grozdovi rastu linearno, sledeći tragove brušenja površine, slika 6.

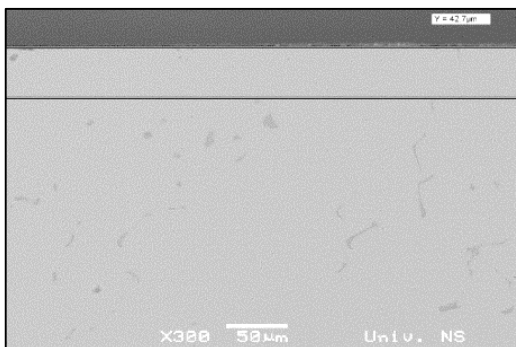


Sl. 6. Kontaminirani sloj (SEM)



Sl. 7. Izgled globula kontaminacije (SEM)

Hemijski sastav kontaminiranog sloja utvrđen EDS analizom je: 8.15% C, 1.03% N, 19.11% O, 10.17% Al, 49.59% Ti, 0.42% V, 1.32% Cr, 1.61% Co, 6.66% Ni, i 1.95% Mo. Na osnovu EDS analize može se zaključiti da globule, koje su nastale na površini superlegure, predstavljaju kombinaciju oksida, nitrida i karbida nastalih usled reakcije nečistoća iz atmosfere (kiseonik i azot) sa legirajućim elementima Al, Ti, Cr, Co, V, Mo koji difunduju na površinu i reaguju sa okolinom pri visokim temperaturama HIP procesa. Posledica difuzije elemenata iz osnove tokom HIP procesa je i nastanak zone bez karbida, koja iznosi do 100 μm, kod uzoraka P240, do 78 μm kod uzoraka P1000, i do 48 μm kod poliranih uzoraka, slika 8. EDS analiza je pokazala da elementi Al, Ti, V, Mo difunduju na površinu superlegure, dok elementi Cr i Co ostaju rastvoreni u osnovi Ni.



Sl. 8. Zona bez karbida (SEM - poliran uzorak)

5. ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata ispitivanja utvrđeno je da:

- Debljina kontaminiranog sloja zavisi od kvaliteta površine. Uzorci brušeni brusnim papirom krupnoće zrna P240 imaju najveću prosečnu debljinu sloja od 1,728 μm, dok najmanju imaju polirani uzorci, 0,888 μm.
- Kontaminirani sloj se sastoji od oksida, nitrida i karbida na površini odlivka koji nastaju usled HIP procesa.
- Kontaminirani sloj nastaje difuzijom karbida iz metalne osnove i rastvorenih elemenata na površinu.
- Nastanak kontaminiranog sloja tokom HIP procesa uzrokuje stvaranje i zone bez karbida ispod površine. Debljina sloja bez karbida je proporcionalna debljini kontaminiranog sloja.

6. ZAHVALNOST

Rezultati prezentovani u ovom radu su realizovani u okviru projekta „Istraživanje i primena savremenih metoda karakterizacije materijala i zavarenih spojeva u proizvodnom mašinstvu“, Departmana za proizvodno mašinstvo, FTN Novi Sad. Posebno se zahvaljujemo Livnici preciznih odlivaka, Ada, u čijim pogonima je izvršeno livenje uzoraka, HIP tretman i svetlosna mikroskopija.

7. LITERATURA

- [1] D. Richter, G. Haour, D. Richon: Hot Isostatic Pressing (HIP), *Materials and Design*, 6, (1985), 303-305
- [2] M. H. Bocanegra-Bernal: Review Hot Isostatic Pressing (HIP) Technology and its applications to metals and ceramics, *Journal of Materials Science*, 39, (2004), 6399-6420
- [3] N. L. Loh, K. Y. Sia: An overview of hot isostatic pressing, *Journal of Materials Processing Technology*, 30, (1992), 45-65
- [4] Matthew J. Donachie, Stephen J. Donachie, *SUPERALLOYS A technical guide*, ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (2002)

Autori: doc. dr Dragan Rajnović, Mario Mačaš, Mirjana Ristić, Petar Janjatić, Danka Labus Zlatanović, vanr. prof. dr Sebastian Baloš, prof. emeritus dr Leposava Šidanin, Univerzitet Novi Sad, Fakultet Tehničkih Nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Tel: +381 21 485 2350, Fax: +381 21 454-495.

E-mail:

draganr@uns.ac.rs; matyas.mario@gmail.com;
mirjana.ristic@uns.ac.rs;

Vukman, J., Lukić, D., Milošević, M., Borojević, S., Đurđev, M., Antić, A.

**TEHNOLOŠKI PROCESI OBRADNE TANKOZIDNIH DELOVA
OD LEGURE ALUMINIJUMA**

***Rezime:** Kao posledica dinamičnog tržišta i globalizacije proizvodnje, pred proizvodne sisteme se postavljaju veoma oštri zahtevi u smislu pronalaženja optimalnih rešenja tehnoloških procesa sa ciljem postizanja maksimalnih tehničkih i ekonomskih efekata. Za potrebe optimizacije tehnoloških procesa obrade razvijen je veliki broj analitičkih i eksperimentalnih metoda i algoritama, koji se mogu koristiti za probleme jednokriterijumske i višekriterijumske optimizacije. Savremeno tržište specijalizovanih proizvoda zahteva upotrebu materijala visokih mehaničkih karakteristika, male mase, relativno niske cene koštanja i dobru obradljivost, što je sve sadržano u legurama aluminijuma. Tankozidne aluminijumske strukture se najviše koriste kao konstrukcioni delovi u vazduhoplovnoj, automobilskoj i vojnoj industriji zbog svoje homogenosti i odličnog odnosa između čvrstoće i težine. U ovom radu prikazan je kraći pregled istraživanja u oblasti projektovanja i optimizacije tehnoloških procesa obrade tankozidnih delova od legure aluminijuma i okvirni prikaz plana sopstvenih istraživanja iz ove problematike.*

***Ključne reči:** Tehnološki procesi obrade, optimizacija, tankozidni delovi, legure aluminijuma.*

1. UVODNA RAZMATRANJA

Za potrebe optimizacije tehnoloških procesa obrade razvijen je veliki broj analitičkih i eksperimentalnih metoda i algoritama, koji se mogu koristiti za probleme jednokriterijumske i višekriterijumske optimizacije. Međutim, svaka od ovih metoda nudi određene prednosti, ali ima i određene nedostatke koji se odnose na efikasnu implementaciju. U većini slučajeva optimizacija tehnološkog procesa se bazira na teoriji optimizacije i uključuje eksperimentalno statističke metode, metode matematičkog modeliranja, metode veštačke inteligencije i dr [1].

Problemi optimizacije tehnoloških i obradnih procesa mogu biti veoma teški za razumevanje i rešavanje od strane inženjera koji nisu eksperti iz ove oblasti. Može se reći da ne postoji univerzalni metod koji bi bio najbolji za optimizaciju tehnoloških procesa obrade, već je to vrlo često kombinacija više različitih metoda i prilaza.

Savremeno tržište specijalizovanih proizvoda zahteva upotrebu materijala visokih mehaničkih karakteristika, male mase, relativno niske cene koštanja i dobru obradljivost, što je sve sadržano u legurama aluminijuma.

U ovom radu prikazan je kraći pregled istraživanja u oblasti projektovanja i optimizacije tehnoloških procesa obrade tankozidnih delova od legura aluminijuma, kao i okvirni prikaz planiranih istraživanja iz ove problematike.

2. TANKOZIDNE STRUKTURE

Tankozidne aluminijumske strukture se najviše koriste kao konstrukcioni delovi u vazduhoplovnoj, automobilskoj i vojnoj industriji zbog svoje homogenosti i odličnog odnosa između nosivosti i težine. Kao primer tih struktura u praksi se mogu javiti sledeći osnovni oblici: uzdužna rebra, poprečna rebra, nosači, pregrade i drugo. Ovakve strukture se veoma često susreću i kao složeni konstrukcioni elementi u alatničarstvu.

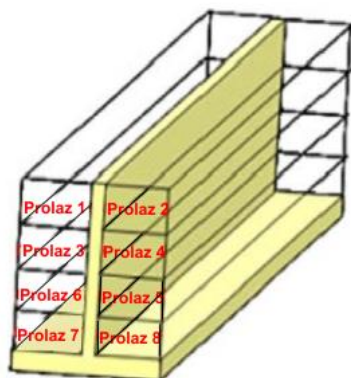
Proizvodnja navedenih tankozidnih struktura uglavnom nastaje uklanjanjem materijala iz punih priprema, čak i do 95% od njegove težine. Proces proizvodnje ovakvih struktura je dugotrajan i veoma zahtevan. Zbog tako velike zapremine skidanja materijala potrebno je postići visoku produktivnost [2, 3, 4].

Sa druge strane visoku produktivnost ograničava nedostatak krutosti tankih zidova što dovodi do pojave grešaka u procesu obrade [5]. Pored toga, javljaju se i trajne deformacije struktura, koje mogu izazvati i pojavu škarta. Na navedene probleme utiču mnogobrojni faktori tehnološkog procesa obrade, kao što su elementi obradnog sistema (mašina, alat, pribor), režimi obrade, strategije putanje alata, SHP i dr [6].

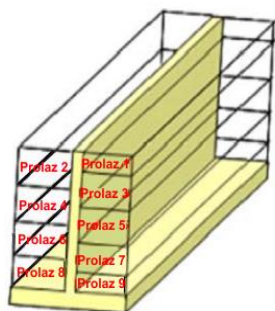
2.1 Trendovi u obradi tankozidnih delova

U trenutnoj industrijskoj praksi, greške koje mogu nastati tokom obrade se otklanjaju pomoću jedne ili više tehnika, kao što su [6]:

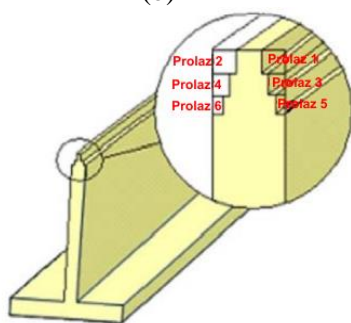
- Izbor odgovarajuće vrste obrade, parametara, strategije obrade kojima se ostvaruje zadata tačnost, kvaliteti obrađene površine i tolerancije;
- Podešavanje/kalibrisanje završnih prolaza u cilju zadovoljenja tačnosti i kvaliteta obrade;
- Dugotrajna i skupa provera validnosti numerički upravljalog procesa obrade i
- Korišćenje prilaza koji se zasnivaju na naizmeničnoj obradi svake strane zida, kao što je prikazano na slici 1.



(a)



(b)



(c)

Sl. 1. Različite tehnike pojedinačnim prolazima pri obradi glodanjem tankozidnih delova:(a) nema preklapanja prolaza sa jedne i druge strane, (b) preklapanje prolaza i (c) stepenasti prolazi [6]

Analizom literature može se zaključiti da primena postojećih tehnika za obradu tankozidnih delova ima za posledicu ostvarivanje manje produktivnosti kao i poteškoće u pogledu ostvarivanja tačnosti delova. Ove teškoće su

naročito izražene kod delova koji su izrađeni od lakih legura aluminijuma.

Kako bi se prevazišli nedostaci koji se javljaju u trenutnoj industrijskoj primeni obrade tankozidnih delova, sve više se primenjuju metode konačnih elemenata (engl. Finite Element Method, FEM) za modeliranje uticaja promene parametara i strategije obrade na greške obrade.

Postoje brojni naučni radovi u kojima je potvrđena uspešnost primene metoda konačnih elemenata u modeliranju procesa obrade. Primenom metoda konačnih elemenata može se izvršiti predikcija grešaka u obradi rezanjem, na osnovu čega se mogu smanjiti ove greške i eliminisati probna podešavanja u proizvodnim pogonima, koja su često veoma skupa, dugotrajna i zahtevaju upotrebu dodatne radne snage. Međutim, ovakav način poseduje i određeni nedostatak zbog toga što je potrebno dugo vreme za računarsku analizu primenom metoda konačnih elemenata. U zavisnosti od složenosti problema, vreme računarske analize može da varira od nekoliko sati do nekoliko dana. Ova dugačka računarska analiza ograničava svakodnevnu industrijsku primenu, zbog toga što se industrija svakodnevno susreće sa novim proizvodnim zahtevima koje je potrebno što pre rešiti [6].

Takođe, ograničene mogućnosti projektovanja u FEM softverima zahtevaju prevođenje modela iz nekog CAD softvera, što za posledicu može imati probleme u pogledu gubitka podataka o organizaciji, nepreciznosti u pogledu prevođenja, promena u broju entiteta i prevelike datoteke.

2.2. Podela tankozidnih delova

Zbog svoje homogenosti, otpornosti na koroziju i odličnog odnosa između nosivosti i mase tankozidne aluminijumske komponente se sve više koriste kao strukturalni delovi u vazduhoplovnoj, automobilskoj, vojnoj i drugim granama elektro-mašinske industrije. Novi dizajn ovih komponenti usmeren je na monolitne delove umesto na veći broj komponenti koje je potrebno nakon obrade sklopiti. Na ovaj način dobija se konstrukcija sa dobrim mehaničkim karakteristikama, boljeg kvaliteta i tačnosti, manje mase, sa manjim vremenom i troškovima proizvodnje [7].

Dosadašnji identifikovani oblici tankozidnih struktura izrađenih postupkom mašinske obrade mogu se uopšteno podeliti na:

- Oblike trougaonog tipa;
- Oblike pravougaonog tipa;
- Oblike šestougaonog tipa;
- Oblike linijskog tipa i
- Složene oblike.

Postoji nekoliko preporuka na osnovu kojih se vrši podela tankozidnih delova. Prema [8] osnovna podela tankozidnih delova moguće je izvesti prema odnosu dimenzija površina:

- Mala visina u odnosu na debljinu 15:1
- Umerena visina u odnosu na debljinu <30:1
- Vrlo velika visina u odnosu na debljinu >30:1.

Postoje mnogi faktori koji utiču na tačnost obrade tankozidnih delova, među kojima su najuticajniji sledeći: *naponi i deformacije, deformacije izazvane vibracijama, pogrešan pravac odvođenja strugotine, toplotne deformacije, neadekvatna vrsta i način obrade, odnosno parametri i strategije obrade* [9].

3. OPTIMIZACIJA PROCESA OBRADE TANKOZIDNIH STRUKTURA

Paralelno sa povećanjem tržišnih zahteva za obradom tankozidnih komponenti (delova) od različitih legura, realizuju se istraživanja koja su orijentisana na optimizaciju konstrukcije u cilju smanjenja mase, deformacija, vibracija, odnosno povećanja nosivosti i čvrstoće, kao i na optimizaciju tehnoloških procesa izrade ovih komponenti u cilju smanjenja vremena i troškova obrade, odnosno povećanja tačnosti mera, oblika i položaja, povećanja kvaliteta obrade, itd.

Optimizacija tehnološkog procesa se bazira na teoriji optimizacije i uključuje eksperimentalno-statističke metode, metode matematičkog modeliranja, metode veštačke inteligencije i dr. Matematički, optimizacija predstavlja postupak definisanja najpovoljnijih rešenja iz skupa mogućih rešenja prema određenim kriterijumima koji se izražavaju matematičkim funkcijama tzv. funkcijama cilja. Formulisanje problema optimizacije obradnih procesa uključuje definisanje funkcija stanja procesa, funkcija ograničenja, funkcija cilja i kriterijuma optimizacije. Kod mašinske obrade najčešće funkcije stanja su npr. postojanost alata, habanje alata, temperatura obrade, otpor, momenat i sila obrade, kvalitet obrade, itd. Funkcije ograničenja su sistematizovane u četiri grupe koje su promenljive u zavisnosti od vrste procesa obrade: dubina obrade, brzina obrade, pomak i složena ograničenja. Najčešće funkcije cilja su: vreme obrade, troškovi obrade, tačnost obrade, proizvodnost, ekonomičnost, profit, stepen iskorišćenja kapaciteta itd. Kriterijum optimizacije predstavlja minimizaciju ili maksimizaciju funkcija cilja [1, 10, 11].

Teorija planiranja eksperimenta predstavlja kvalitativno nov pristup za poboljšanje i optimizaciju proizvoda i procesa koji ima široku

primenu u nauci i inženjerstvu. Planiranje eksperimenta je sistemski pristup koji podrazumeva pripremu, fizičku realizaciju eksperimenta, obradu eksperimentalnih podataka i analizu rezultata prema unapred utvrđenom planu. Jedna od najvažnijih prednosti planiranja eksperimenta je smanjenje broja eksperimenata bez smanjenja količine i kvaliteta informacija koje se mogu dobiti, a na osnovu kojih se mogu doneti validni i objektivni zaključci.

Procedura planiranja eksperimenta je zasnovana na statističkom pristupu i uključuje više aktivnosti [10,11]: (a) prepoznavanje i formulisanje problema, (b) izbor zavisne/ih (izlazne/ih) promenljive/ih (c) izbor nezavisnih (ulaznih) promenljivih, nivoa i opsega intervala, (d) izbor plana eksperimenata, (e) izvođenje eksperimenta, (f) statistička obrada i analiza eksperimentalnih podataka, (g) zaključci i preporuke. Teorija i praksa pokazuju da se u većini slučajeva najčešće koriste linearni, kvazi-linearni i kvadratni modeli. Za razvoj ovih modela razvijen je veliki broj različitih eksperimentalnih planova kao što su: faktorni, parcijalni faktorni, centralni kompozicioni, Tagučijevi eksperimentalni planovi, itd. [11]

Savremeno projektovanje tehnoloških procesa obrade zahteva analizu svih tehničko-tehnoloških i ekonomskih parametara procesa i primenu naučnih metoda u cilju modeliranja i definisanja optimalnih uslova procesa obrade [12]. Modeliranje procesa obrade je privuklo pažnju velikog broja istraživača imajući u vidu značaj modeliranja za ostvarivanje ukupnih tehnoeкономskih efekata izrade proizvoda [13,14]. Matematičkim modelom se simulira ponašanje realnog sistema, procesa ili objekta, a izražava se jednačinom ili sistemom jednačina [15]. Matematičko modeliranje obradnih procesa zasniva se na primeni znanja i predstavlja prvi korak u tehnoeкономskoj optimizaciji. Zapravo, matematičko modeliranje i optimizacija su metode nadgradnje koje imaju za cilj proizvodnju jeftinijih i kvalitetnijih proizvoda uz istovremeno efikasnije iskorišćenje resursa.

4. ZAVRŠNA RAZMATRANJA

U konkretnim proizvodnim uslovima uobičajena je praksa da tehnolozi ili operateri na mašinama biraju vrednosti parametara tehnološkog procesa na osnovu univerzalnih preporuka iz stručne literature, preporuka proizvođača alata i mašina, stečenog znanja ili prethodnog iskustva. Iako je to subjektivan način, a izabrane vrednosti parametara tehnoloških procesa često nisu ni približno optimalne, ovaj

pristup daje relativno prihvatljive rezultate sa aspekta pojedinih tehničkih i ekonomskih kriterijuma. Međutim, potrebno je istaći da često neadekvatan izbor elemenata tehnološkog procesa može dovesti do smanjenja tačnosti i kvaliteta obrade, povećanja troškova i vremena obrade, smanjenja produktivnosti i stepena iskorišćenja kapaciteta, i dr.

Proizvodna preduzeća koja žele da budu konkurentna na globalnom tržištu moraju poboljšati efikasnost zadovoljenjem više performansi tehnološkog procesa istovremeno. Da bi se to ostvarilo potrebno je da se elementi i parametri tehnološkog procesa biraju na kvalitetniji, sistematičniji i inteligentniji način, odnosno da se primenjuje optimizacija tehnoloških procesa obrade i vrši optimalno upravljanje ovim procesima.

5. LITERATURA

- [1] Todić V., Penezić N., Lukić D., Milošević M.: *Tehnološka logistika i preduzetništvo*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, ISBN 978-86-7892-368-5, 2011.
- [2] Hirsch, J., Al-Samman, T.: *Superior light metals by texture engineering: Optimized aluminum and magnesium alloys for automotive applications*. Acta Materialia, Vol. 61, No. 3, pp. 818-843, 2013
- [3] Scippa, A., Grossi, N., Campatelli, G.: *FEM based cutting velocity selection for thin walled part machining*. Procedia CIRP, Vol. 14, pp. 287–292, 2014.
- [4] Huang, X., Sun, J., Li, J.: *Effect of initial residual stress and machining-induced residual stress on the deformation of aluminium alloy plate*. Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, Vol. 61, No. 2, pp. 131 -137, 2015.
- [5] Zhou, X., Zhang, D., Luo, M., Wu, B. (2014). *Toolpath dependent chatter suppression in multi-axis milling of hollow fan blades with ball-end cutter*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 72, No. 4, pp.: 643-651, 2014.
- [6] Popma, M.: *Computer aided process planning for high-speed milling of thin walled parts*, PhD. Thesis, University of Twente, Netherlands, 2010.
- [7] Smith, S., Dvorak, D. (1998). *Tool path strategies for high speed milling of aluminum workpieces with thin webs*. Mechatronics, Vol. 8, No. 4, pp. 291-300.
- [8] Sandvik Coromant: www.sandvik.coromant.com
- [9] Zhang, D., Gao, K., Zhou, T.: *Discussion on NC machining process of thin walled parts technical measures*, Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publications, Switzerland, Vol. 701-702, pp. 864-868, 2015.
- [10] Ukrainczyk M.: *Design of Experimental in Industry*, Croatian journal of food technology, biotechnology and nutrition, Vol. 5, No. 3-4, pp. 96-105, ISSN 1847-7461, 2010.
- [11] Marinković, V.: *Racionalizacija eksperimentalnih istraživanja primenom teorije višefaktornog eksperimenta*, IMK-14 - Istraživanje i razvoj, Br. 13, Izd. 1/2, str. 23–36, 2007.
- [12] Madić M.: *Matematičko modeliranje i optimizacija procesa laserskog sečenja primenom metoda veštačke inteligencije*, Doktorska teza, Mašinski fakultet Niš, 2013.
- [13] Lazarević, A.: *Modeliranje korelacija između parametara procesa rezanja plazmom i analiza toplotnog bilansa metodama veštačke inteligencije*, doktorska teza, Mašinski fakultet Niš, 2010.
- [14] Merchant, M.E.: *Interpretative look on 20th century research on modeling of machining*, Machining Science and Technology, Vol. 2, No. 2, pp. 157–163, 1998.
- [15] Liao, T.W., Chen, L.J.: *Manufacturing process modeling and optimization based on multi-layer perceptron network*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 120, No. 1, pp. 109 – 119, 1998.

Autori: MSc. Jovan Vukman, Doc. dr Dejan Lukić, Vanr. prof. dr Mijodrag Milošević, MSc Mića Đurđev, Vanr. prof. dr Aco Antić, Univerzitet Novi Sad, Fakultet Tehničkih Nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Tel: +381 21 485 2473, Fax: +381 21 454-495.

E-mail: vukman@uns.ac.rs
lukicd@uns.ac.rs
mido@uns.ac.rs
mdjurdjev@live.com
antica@uns.ac.rs

Doc. dr Stevo Borojević, Univerzitet u Banja Luci, Mašinski fakultet Banja Luka, Vojvode Stepe Stepanovića 71, 78000 Banja Luka, Bosna i Hercegovina, + 387 (0)51 433 000.

E-mail: stevo.borojevic@unibl.rs

Napomena: Rad predstavlja deo istraživanja na projektu "Savremeni prilazi u razvoju specijalnih rešenja uležištenja u mašinstvu i medicinskoj protetici", ev. broj projekta TR 35025 koji finansira Ministarstvo prosvete i nauke Republike Srbije, kao i na projektu „Primena kolaborativnog inženjerstva u unapređenju procesa održive proizvodnje“ koji je finansiran od strane Autonomne Pokrajine Vojvodine, ev. broj projekta 142-451-3556/2016-01.

**SCIENTIFIC CONFERENCE WITH INTERNATIONAL
PARTICIPATION
ETIKUM 2017
NOVI SAD, SERBIA, DECEMBER 6-8, 2017**

Pećanac, M., Dramićanin, M., Janjatović, P., Labus Zlatanović, D., Rajnović, D., Šidanin, L., Baloš, S.

**RUČNO–ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE RUTILNIM ELEKTRODAMA SA
MODIFIKOVANOM OBLOGOM**

Rezime: Cilj ovog rada je da se prikaže uticaj nanočestica TiO_2 na karakteristike zavarenog spoja, ostvarenog ručnim–elektrolučnim zavarivanjem niskougleničnog čelika. Izvršeno je ispitivanje mehaničkih osobina, mikrostrukture i hemijskog sastava. Pri procesu zavarivanja korišćene su obložene rutilne elektrode sa infiltriranim nanočesticama TiO_2 . Rezultati su upoređivani sa kontrolnim uzorkom koji je zavaren elektrodom bez nanočestica. Na osnovu rezultata utvrđeno je da prisustvo nanočestica pri optimalnim parametrima povoljno utiče na mehaničke osobine i mikrostrukturu zavarenog spoja.

Ključne reči: Ručno–elektrolučno zavarivanje, obložene rutilne elektrode, nanočestice TiO_2 , mikrostruktura, mehaničke osobine.

1. UVOD

Ručno–elektrolučno zavarivanje predstavlja postupak zavarivanja materijala topljenjem uz prisustvo dodatnog materijala u vidu topljive obložene elektrode. Izvor toplote predstavlja električni luk koji se obrazuje između osnovnog materijala i elektrode. Obložene elektrode se sastoje iz metalnog jezgra i obloge koje mogu imati različiti sastav u zavisnosti od upotrebe [1]. Zavarivanjem niskougleničnih čelika unutar metala šava se stvara mikrostruktura od alotriomorfog, Widmanstätten-ovog i igličastog ferita. Pored ovoga, može da se pojavi i perlit, martenzit, zaostali austenit i beinit. Na poboljšanje mehaničkih osobina metala šava se utiče putem izbora elektrode, odnosno sastava njene obloge. Odabirom odgovarajuće obloge može se u velikoj meri uticati na pojavu odgovarajuće mikrostrukture, pretežno od iličastog ferita, čime se poboljšavaju mehaničke osobine metala šava i omogućava dostizanje optimalnog odnosa čvrstoće i žilavosti. Suštinski mehanizam ojačavanja koji se postiže igličastim feritom, u odnosu na Vidmanštetenov ili alotriomorfni, jeste ojačavanje granicama zrna [2]. Uticaj na formiranje igličastog ferita, može imati dodatak oksida titana (TiO , Ti_2O_3 i TiO_2), koji imaju uticaj na efikasnu inokulaciju i formiranje većeg broja zrna tokom kristalizacije. Ti se oksidi mogu uneti preko obloge elektrode [3–5]. Cilj ovog istraživanja je ispitivanje uticaja infiltriranih nano čestica TiO_2 na poboljšanje mikrostrukture i mehaničkih osobina metala šava ručnim – elektrolučnim zavarivanjem obloženom rutilnom elektrodom [5–6].

2. EKSPERIMENTALNI RAD

U radu, korišćen je osnovni materijal u vidu konstrukcionog čelika hemijskog sastava prikazanog u tabeli 1. Kao dodatni materijal, korišćene su rutilne obložene elektrode Elvaco EL58C prečnika jezgra $d_e=2,5$ mm. Za infiltraciju obloge elektrode korišćene su hidrofilne nanočestice Aeroxide TiO_2 P25. U tabeli 2 su prikazane mehaničke osobine osnovnog materijala.

Tabela 1. Hemijski sastav osnovnog materijala u %

C	Si	Mn	S	Cr	P
0,11	0,16	0,52	0,039	<0,002	0,011
Al	Cu	Mo	Ni	Ti	
0,006	0,35	0,012	0,083	<0,002	

Tabela 2. Mehaničke osobine osnovnog materijala

Napon tečenja R_{eH} [MPa]	Zatezna čvrstoća R_m [MPa]	Izduženje A [%]
339	457	28

Eksperiment je izveden sa četiri grupe elektroda. Tri grupe elektroda su infiltrirane nanočesticama TiO_2 , dok je jedna grupa kontrolna, bez infiltracije:

- I grupa – vreme infiltracije 1 min;
- II grupa – vreme infiltracije 5 min;
- III grupa – vreme infiltracije 10 min;
- IV grupa – bez infiltracije.

Pre infiltracije nanočestica u oblogu elektrode, neophodna je priprema nanočestica. Nanočestice su prvo stavljene u staklenu posudu, u količini od 5 mg, a zatim je dodato 95 ml destilovane vode. Nakon toga je izvršeno njihovo mešanje u

ultrazvučnoj kadi Emag Emmi-5 u odgovarajućem trajanju. U tako pripremljenu homogenu disperziju su potapane elektrode i infiltrirane u zavisnosti od predviđenog vremena. Pripremljene elektrode su nakon infiltracije stavljene u peć, gde su sušene na temperaturi od 100°C u trajanju od 60 min. Nakon sušenja, elektrode su ostavljene u peći, kako bi se postepeno hladile do sobne temeperature. Uzorci su obeleženi u zavisnosti od toga kojom grupom elektroda su zavarivani, odnosno od vremena infiltracije. Osnovni materijal je označen na sledeći način: R0 – kontrolni uzorak (IV grupa elektroda); R1 (I grupa); R5 (II grupa) i R10 (III grupa). Zavarivanje je izvršeno postupkom ručnog–elektrolučnog zavarivanja obloženom elektrodom u dva prolaza. Spoj je izveden kao sučeoni sa pripremom ivica u vidu I–šava sa razmakom između limmova od 2,5 mm što odgovara prečniku jezgra elektrode. Položaj zavarivanja je horizontalan (PA). Za zavarivanje je korišćen aparat za zavarivanje Iskra Avtomatika E10, a parametri zavarivanja su bili isti za sve uzorke i dati su u tabeli 3.

Tabela 3. parametri režima zavarivanja

Prečnik elektrode d_e [mm]	Napon luka U [V]	Jačina struje I [A]
2,5	22	80
Brzina zavarivanja V_z [mm/s]	Vrsta struje	Položaj zavarivanja
1,68	DC (+)	PA

Nakon zavarivanja prešlo se na pripremu uzoraka za mehanička, metalografska i ispitivanja hemijskog sastava. Za potrebe mehaničkih ispitivanja, napravljeni su uzorci u vidu standardnih epruveta, sa poprečnim presekom 4x3 mm i početne merne dužine 20 mm, isečene iz metala šava, kako bi se dobile zatezne karakteristike samog metala šava, što bi se uporedilo sa osnovnim materijalom. Pre isecanja epruveta, izvršeno je skidanje nadvišenja šava. Ispitivanje zatezanjem je izvršeno na mehaničkoj kitalici WPM ZDM 5/91, na sobnoj temperaturi. Ispitivanje tvrdoće je izvršeno na uzorcima za metalografska ispitivanja, isečenim poprečno u odnosu na šav, nakon analize mikrostrukture. Ispitivanje je izvršeno na poprečnom preseku zavarenog spoja po metodi Vickers, sa opterećenjem od 5 kg, na dubini od 2 mm ispod površine uzorka, linijski, sa rastojanjem između otisaka od 0,5 mm. Korišćen je uređaj WPM HPO-250. Za metalografska ispitivanja primenjena je standardna priprema uzoraka na opremi Struers. Uzorci su isečeni na mašini za sečenje uzoraka Struers Discotom. Nakon isecanja uzorci su potapani u dvokomponentni autopolimerizujući akrilat Simgal-R. Tako zatopljeni uzorci su brušeni

vodobrusnim papirima na mašini za brušenje Struers Knuth Rotor. Poliranje uzoraka je izvršeno na mašini Struers DP-U2. Izvršeno je njihovo nagrizanje Nitalom (3% HNO₃ i 97% etanol). Analiza mikrostrukture uzoraka je izvršena pomoću svetlosnog mikroskopa Leitz Orthoplan. Na uzorcima u poliranom stanju, izvršena je analiza slike, sa ciljem dobijanja broja i veličine nemetalnih uključaka, softverom ImageJ. Analiza hemijskog sastava osnovnog materijala i metala šava je izvršena na optičko–emisionom spektrometru ARL-2460.

3. REZULTATI

3.1. Hemijski sastav

Pri analizi hemijskog sastava metala šava, utvrđeno je da se povećanjem vremena infiltracije elektrode smanjuje sadržaj C, Si i Mn dok sadržaj Ti konstantno raste, tabela 4.

Tabela 4. Hemijski sastav metala šava

	%C	%Si	%Mn	%S
R0	0,08	0,28	0,402	0,027
R1	0,08	0,26	0,380	0,028
R5	0,07	0,25	0,367	0,026
R10	0,07	0,23	0,334	0,033
	%Cr	%P	%Al	%Ti
R0	0,055	0,014	0,005	0,001
R1	0,044	0,012	0,005	0,005
R5	0,047	0,014	0,005	0,009
R10	0,042	0,013	0,005	0,009

3.2. Zatezne karakteristike

U tabeli 5 su date vrednosti zatezne čvrstoće ($R_{p0,2}$), napona tečenja (R_m) i izduženja (A) osnovnog materijala i metala šava zavarenih uzoraka.

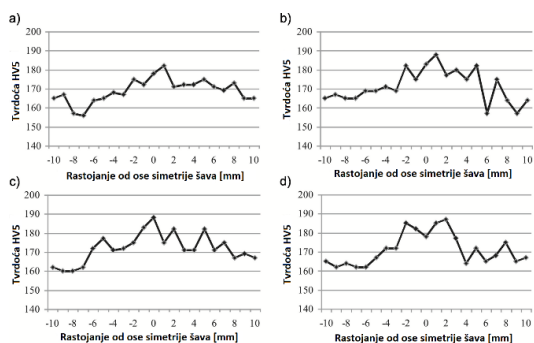
Tabela 5. Vrednosti zateznih karakteristika uzoraka.

Uzorak	$R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A(%)
O. M.	339	457	28
R0	362	472	26
R1	372	482	26
R5	378	492	28
R10	350	440	20

U tabeli 5 se može videti da metal šava uzorka R0 (zavaren nemodifikovanim elektrodama) ima veći napon tečenja i zateznu čvrstoću, odnosno nešto niže izduženje u odnosu na osnovni materijal. Modifikacijom elektroda dolazi do poboljšanja mehaničkih osobina materijala, posebno na uzorku R5. Međutim, na uzorku R10 sa najdužim vremenom infiltracije, dolazi do pada mehaničkih osobina.

3.3. Ispitivanje tvrdoće

Na slici 1 su prikazani dijagrami promene tvrdoće u odnosu na rastojanje ispitivanog mesta od ose simetrije šava.

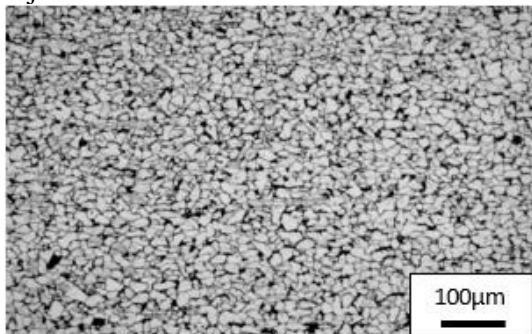


Sl. 1. Dijagrami promene tvrdoće u odnosu na udaljenost od ose simetrije šava, za svaki uzorak, gde su: a) R0; b) R1; c) R5; d) R10.

Najmanji rast tvrdoće u metalu šava u odnosu na osnovni materijal je primećen kod uzorka R0. Kod uzorka R1 i R5 se primeti najveći skok u tvrdoći a naročito kod uzorka R1, gde se primeti veća tvrdoća i u zoni uticaja toplote (ZUT).

3.4. Mikrostruktura

Mikrostruktura osnovnog materijala je prikazana na slici 2. Na kojoj se vidi da je materijal sačinjen od ferita i perlita što je u skladu sa hemijskim sastavom.



Sl. 2. Mikrostruktura osnovnog materijala

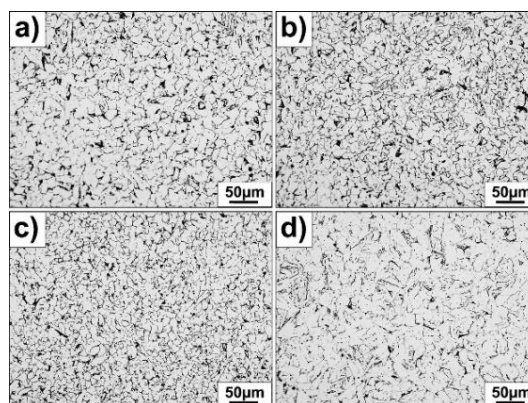
Rezultati analize slike mikrostrukture metala šava, izvršene u programu za analizu ImageJ, su prikazani u tabeli 6.

U tabeli 6 se može uočiti povećanje količine uključaka, ali i njihove veličine, osim kod uzorka R10 gde se smanjuje broj uključaka, što je rezultat njihovog rasta i samim tim olakšane migracije u šljaku.

Tabela 6. Rezultati analize nemetalnih uključaka

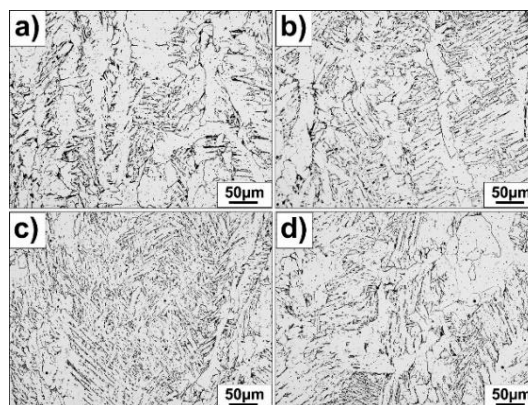
Uzorak	Broj nemetalnih uključaka	Prečnik nemetalnih uključaka	Prosečni prečnik nemetalnih uključaka	Procenat nemetalnih uključaka na posmatranoj površini
R0	657	0,097–15,24	0,32	1,29
R1	692	0,106–15,68	0,34	1,32
R5	712	0,118–15,68	0,38	1,38
R10	487	0,106–25,55	0,60	1,81

S obzirom da se zavarivanje izvodilo u dva prolaza, prvi prolaz (završni, koreni) je normalizovan i njegova mikrostruktura je data na slici 3. Može se primetiti da je feritna mikrostruktura uzoraka R1 i R5 slične krupnoće, dok je kod uzorka R10 mikrostruktura krupnija. Takođe je kod uzorka R10 primećena pojava beinita, što je posledica izotermalne transformacije kao posledica unosa toplote tokom drugog prolaza.



Sl. 3. Izgled mikrostrukture prvog prolaza, nakon normalizacije (drugog prolaza), gde je: a)R0; b)R1; c) R5; d)R10

Na slici 4 je prikazana mikrostruktura drugog prolaza koji nije normalizovan, već ima, za metal šava, stubastu mikrostrukturu.

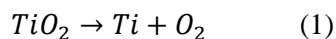


Sl 4. Mikrostruktura drugog prolaza, gde je: a)R0; b)R1; c)R5; d)R10.

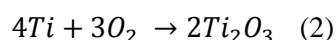
Uzorak zavaren elektrodom R0 pokazuje izraženi krupnozrni alotriomorfni ferit sa malom količinom Vidmanštetenovog i vrlo malo igličastog ferita. Dodavanje nanočestica u oblogu elektrode dovodi do značajne rafinacije feritnih zrna, što se naročito vidi kod uzorka R5. Kod uzorka R1 se primećuje fino zrna granica zrna između alotriomorfne i igličastog ferita, i mala količina Vidmanštetenovog ferita. Na uzorku R10 se primećuju krupna zrna alotriomorfne ferita, uz određenu količinu Vidmanštetenovog i vrlo malo igličasto ferita.

4. DISKUSIJA

Tokom formiranja električnog luka, stvara se veoma visoka temperatura koja utiče na disocijaciju infiltriranog TiO_2 u Ti i O_2 :



Pri hlađenju, dolazi do oksidacije elemenata. Kako i Si i Mn i Ti stvaraju okside, prvi će nastati oni koji se obrazuju na najvišoj temperaturi: Ti_2O_3 na 2130 °C; TiO 1700 °C; TiO_2 1843 °C; MnO 1945°C, SiO_2 1713°C. Prvo će nastati Ti_2O_3 , s obzirom na najvišu temperaturu topljenja/očvršćavanja. Proces dobijanja ovog oksida je:



Ovi oksidi predstavljaju inokulante za stvaranje MnO a samim tim i stvaranje zona osiromašenog Mn oko nemetalnih uključaka usled čega dolazi do formiranja Si oksida oko tih kompleksnih Mn-Ti oksida. Najveća zrna ferita su primećena u uzorku R10 što je uslovljeno manjom brzinom hlađenja, ali i manjom količinom nemetalnih uključaka koji su migrirali iz metala šava u šljaku. Uzrok smanjenoj brzini hlađenja je pojava beinita u zoni koja je ponovo zagrevana (prvi prolaz). Uzorak R10, pored najvećih nemetalnih uključaka, sadrži i najmanji njihov broj, tako da je broj centara kristalizacije ujedno najmanji, što rezultuje najkrupnijom mikrostrukturom i najboljim mehaničkim osobinama. S druge strane, kod uzorka R5 koji ima najviše zatezne karakteristike, mikrostruktura sadrži najviše igličastog ferita, što je rezultat najvećeg broja centara kristalizacije, u vidu relativno sitnih nemetalnih uključaka.

5. ZAKLJUČCI

- Pri očvršćavanju, slobodni Ti reaguje sa kiseonikom i stvara se Ti_2O_3 koji predstavlja centar stvaranja Mn i Si oksida. Tako stvoreni nemetalni uključci predstavljaju centre kristalizacije feritnih zrna

- Veći broj nemetalnih uključaka uzrokuje povećanje količine igličastog ferita, koji nakon normalizacije rezultuju sitnijim poligonalnim feritom, koji daje više zatezne karakteristike zavarenog spoja.
- Povećana količina nano čestica uzrokuje pojavu krupnijih nemetalnih uključaka, koji lakše migriraju u šljaku, te usporavaju brzinu hlađenja i uz smanjen broj uključaka, uzrokuju pojavu krupnozrne mikrostrukture.

6. ZAHVALNICA

Rezultati prezentovani u ovom radu su realizovani u okviru projekta „Istraživanje i primena savremenih metoda karakterizacije materijala i zavarenih spojeva u proizvodnom mašinstvu“, Departmana za proizvodno mašinstvo, FTN Novi Sad.

7. LITERATURA

- [1.] Palić V., *Zavarivanje I*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1976
- [2.] Bhadeshia H. K. D. H., "Case Study: Weld Microstructure", Department of Material Science & Metallurgy, University of Cambridge, izvod sa predavanja
- [3.] Fattahi M., Nabhani N., Vaezi M. R., Rahimi E., "Improvement of impact toughness of AWS E 6010 weld metal by adding TiO_2 nanoparticles to the electrode coating", Materials Science and Engineering A 528, 2011., str. 8031–8039
- [4.] Horvat M., Bilić M., Kondić V., *Primjena REL zavarivanja u izradi čeličnih konstrukcija*, Tehnički Glasnik 7, 2013,
- [5.] Horikoshi S., Serpone N., *Microwaves in nanoparticle synthesis*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGNA, 2013
- [6.] Koparde V. N., *Study of titanium dioxide nanoparticles via molecular dynamics solutions*, Doktorska disertacija, Nashville, Tennessee, 2006.

Autori: Milan Pećanac, Miroslav Dramićanin, Petar Janjatović, Danka Labus Zlatanović, Doc. dr Dragan Rajnović, Prof. emeritus dr Lepasova Šidanin, Vanr. prof. dr Sebastian Baloš, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Tel: +381 21 485 2339, Fax: +381 21 454-495.

Email: pecanac.milan@uns.ac.rs
dramicanin@uns.ac.rs janjatovic@uns.ac.rs
danlabus@uns.ac.rs draganr@uns.ac.rs
lepas@uns.ac.rs sebab@uns.ac.rs

Pećanac, M., Dramićanin, M., Janjatović, P., Labus Zlatanović, D., Rajnović, D., Šidanin, L., Baloš, S.

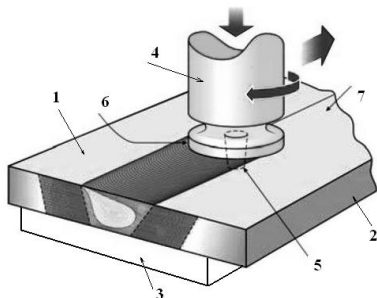
UTICAJ GEOMETRIJE RAMENA ALATA NA OSOBINE ZAVARENIH SPOJEVA DOBIJENIH ZAVARIVANJEM TRENJEM SA MEŠANJEM

Rezime: U ovom radu je opisan postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem (ZTM) sa teoretskim osnovama procesa, kao i primena, prednosti i nedostaci ovog postupka. Analizirana je geometrija alata, a naročito ramena alata, kao i brzina zavarivanja. U radu je korišćena legura Al5052 H32, koja je zavarivana sa alatima različite geometrije, pri različitim brzinama zavarivanja. Ispitivane su zatezne karakteristike, savijanje, tvrdoća, a izvršeno je i metalografsko ispitivanje. Pokazalo se da najpogodnije karakteristike obezbeđuje alat sa koncentričnim rezervoarima, pri najmanjoj brzini zavarivanja i identifikovani su relevantni parametri zavarivanja. Optimalni alat i parametri zavarivanja obezbeđuju više zatezne karakteristike zavarenog spoja u odnosu na osnovni materijal, uz mogućnost da se uzorak savije do 180°, što je uobičajen zahtev kod ispitivanja zavarenih spojeva.

Ključne reči: Zavarivanje trenjem sa mešanjem (ZTM), parametri procesa, rame alata

1. UVOD

Zavarivanje trenjem sa mešanjem (ZTM) spada u grupu zavarivanja trenjem i patentiran je krajem 1991. godine na Britanskom institutu za zavarivanje (eng. *The Welding Institute*) [1]. Proces ZTM je specifičan po tome što se u procesu zavarivanja koristi alat koji vrši spajanje osnovnog materijala [1–6]. Velika prednost ovog postupka se ogleda u tome je što ne dolazi do topljenja osnovnog materijala što negativno utiče na promenu mikrostrukture (rast zrna), ovim postupkom je moguće spajanje raznorodnih materijala (materijali čije se temperature topljenja razlikuju) i teško se zavaruju postupcima topljenjem [6–7]. Takođe, moguće je zavarivanje bez dodatnog materijala i zaštitnih gasova. Šema procesa zavarivanja trenjem sa mešanjem je prikazana na slici 1.



Sl. 1. Šema zavarivanja trenjem sa mešanjem [7]

Zavarivanje trenjem sa mešanjem se vrši na sledeći način. Osnovni materijal (1 i 2) je sučeono

postavljen i stegnut u priboru (3). Alat (4) cilindrućnog oblika se sastoji iz trna (5) i ramena (6), generiše toplotu neophodnu za proces spajanja i istovremeno daje pritisnu silu, dodatno fiksirajući osnovni materijal. Alat je pozicioniran tako što se njegova osa poklapa sa linijom dodira osnovnog materijala (7). Tokom procesa zavarivanja alat prati (translatorno kretanje alata) liniju dodira osnovnog materijala i forira šav umešavanjem materijala [8–9].

Alat se sa stoji od trna i ramena. Trn i rame alata mogu imati različite geometrije koje utiču na brzinu zavarivanja i mehaničke osobine zavarenog spoja. Geometrije ramena mogu biti: ravna geometrija, konkavna i konveksna geometrija [2–3]. Uz to, navedene geometrije mogu imati različite profile koji potpomažu tok materijala tokom procesa zavarivanja. Trn može imati nekoliko različitih oblika, od cilindrićnog, sa zavojnicom, poligonalni, itd. [2–6]. Postupak ZTM se izvodi na namenskim uređajima, kao i na glodalicama [7–10]. Parametri koji definišu postupak ZTM su: aksijalna (pritisna) sila alata na osnovni materijal, brzina obrtanja alata, brzina zavarivanja (pomak alata) i nagib alata. Zavarivanje trenjem sa mešanjem je postupak koji sve više dobija na značaju i sve se češće sreće u automobilskoj industriji, brodogradnji, kosmonautici, itd [1].

2. EKSPERIMENTALNI RAD

U eksperimentu su korišćene ploče izrađene od legure aluminijuma Al 5052 H32, debljine 5 mm.

Hemijski sastav legure dat je u tabeli 1, a mehaničke osobine su date u tabeli 2.

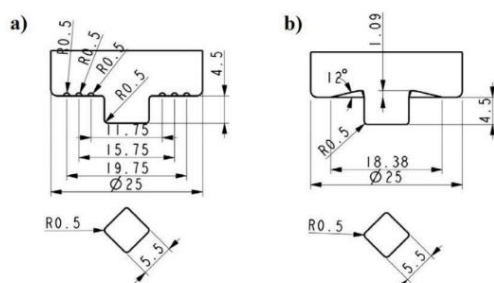
Tabela 1. Hemijski sastav legure Al5052 H32 (maseni %)

Cu	Mn	Mg	Si	Fe	Zn	Ti
0,09	0,09	2,78	0,24	0,38	0,046	0,015

Tabela 2 Mehaničke osobine legure Al 5052 H32

R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	Tvrdoća HV10
124	193	22	60

Kao uređaj za zavarivanje je korištena modifikovana vertikalna glodalica Prvomajska "UHG 200". Tokom eksperimenta su se koristila dva alata sa različitim geometrijama ramena. Jedan sa koncentričnim rezervoarima, a drugi sa jednim rezervoarom, slika 2.



Sl. 2. Alati za zavarivanje

Materijal od kojeg su alati izrađeni je X38CrMoV5-1 (Č 4751, UTOP MO1), a hemijski sastav je dat u tabeli 3.

Tabela 3. Hemijski sastav čelika za alat

C	Si	P	S	Cr	Mo	V
0,37	1,01	0,017	0,0005	4,85	1,23	0,32

Osnovni materijal je pozicioniran i stegnut šapama u specijalnom proboru dimenzija 400x370x35 mm, koji je montiran na radni sto glodalice. Sa gornje strane pribora nalazi se žleb 130 mm širine i 5 mm dubine po celoj dužini pribora radi boljeg prihvatanja i stezanja uzorka. Parametri zavarivanja tokom eksperimenta su dati u tabeli 4.

Tabela 4. Parametri zavarivanja

Alat	Redni br. uzorka	n [min ⁻¹]	s [mm/min]
Alat sa rezervoarom	1	925	17
	2	925	46
	3	925	91
Alat sa koncentričnim rezervoarima	4	925	17
	5	925	46
	6	925	91

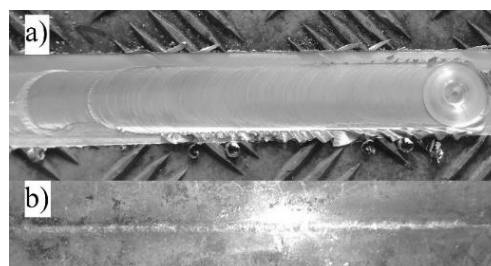
Iz tabele se vidi da je brzina obrtanja držana konstantna, dok su se varirale brzine zavarivanja.

Tokom procesa i nakon procesa zavarivanja vršena je vizuelna kontrola zavarenih spojeva sa ciljem utvrđivanja da li je došlo do pojave grešaka (tunela) na površini osnovnog materijala. Zatim je vršeno ispitivanje zateznih karakteristika šava na mehaničkoj kraljici WPM, ZDM 5/91, savijanje preko lica i korena šava do ugla od 180° je vršeno na istom uređaju. Ispitivanje tvrdoće je vršeno na uređaju WPM HPO 250 sa opterećenjem od 5 kg, razmak između centara otisaka je bio 1,5 mm. Tvrdoća je merena od povratne strane šava ka napredujućoj strani šava. Makroskopska i mikroskopska ispitivanja vršena su na svetlosnom mikroskopu Leitz Orthoplan, nakon standardne procedure pripreme uzoraka (isecanje, montiranje, brušenje, poliranje i nagrizanje 10% fluorovodoničnom kiselinom).

3. REZULTATI

3.1. Vizuelna kontrola

Nakon vizuelne kontrole utvrđeno je da na uzorcima nema pojave grešaka (tunela), na slici 3 je reprezentativno prikazan izgled lica i korena šava uzorka 1.



Sl. 3. a) Lice i b) Koren šava uzorka 1

3.2. Zatezne karakteristike

Rezultati zateznih karakteristika šavova su dati u tabeli 5.

Tabela 5. Rezultati zateznih karakteristika

Alat	Redni br. uzorka	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]
Alat sa rezervoarom	1	162	198
	2	138	161
	3	109	129
Alat sa koncentričnim rezervoarima	4	148	181
	5	141	181
	6	111	148

Na osnovu rezultata ispitivanja zateznih karakteristika uočava se da uzorci 1 i 4 imaju najveće vrednosti zateznih karakteristika u odnosu na ostale ispitane uzorke, a pomenuti uzorci su izvođeni sa najmanjom vrednosti brzine zavarivanja (17_{mm}/min).

3.3. Ispitivanje savijanjem

Savijanje zavarenih spojeva se vršilo preko lica i preko korena šava. Svi uzorci ispitivani preko lica šava su izdržali savijanje do ugla od 180°, a u tabeli 6 su prikazani rezultati savijanja preko korena šava.

Tabela 6. Rezultati ispitivanja savijanja preko korena šava

Alat	Redni br. uzorka	Ugao pri nastanku prve prsline [°]	Ugao preloma [180°]
Alat sa rezervoarom	1	26	Bez preloma
	2	16	Bez preloma
	3	12	Bez preloma
Alat sa koncentričnim rezervoarima	4	Bez prsline	Bez preloma
	5	55	Bez preloma
	6	18	Bez preloma

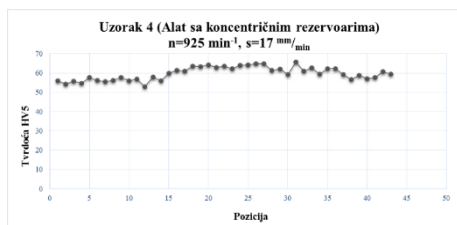
Iz tabele 6 se vidi da su svi uzorci izdržali savijanje do vrednosti ugla od 180° bez loma materijala, a da je jedino uzorak 4 savijen do 180° bez pojave prsline.

3.4. Ispitivanje tvrdoće

Raspodela vrednosti tvrdoće po Vickersu (HV5) reprezentativnih uzoraka su prikazani na slikama 4 i 5.



Sl. 4. Raspodela vrednosti tvrdoće za uzorak 1

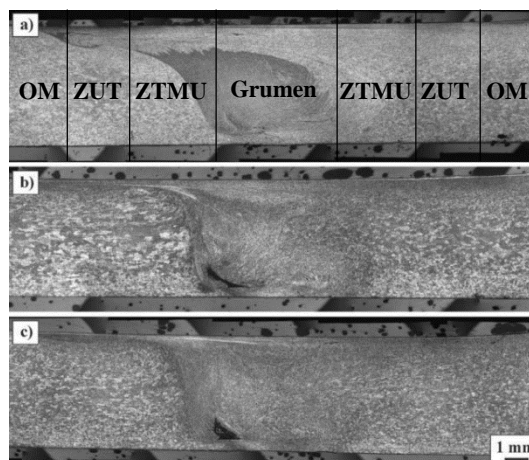


Sl. 5. Raspodela vrednosti tvrdoće za uzorak 4

Na slikama se uočava da se najveće vrednosti tvrdoće nalaze pri sredini ispitanih uzoraka, što odgovara lokaciji zone grumena u materijalu.

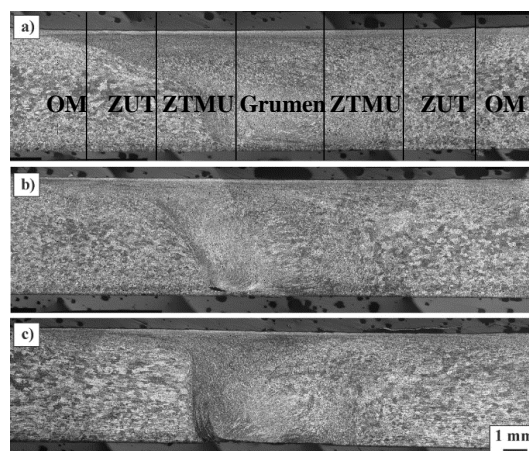
3.5. Metalografska ispitivanja

Makro prikaz struktura materijala zavarenih alatom sa rezervoarom su prikazani na slici 6.



Sl. 6. Makro prikaz zavarenih spojeva izrađenih alatom sa rezervom, brzine zavarivanja: a) 17 mm/min, b) 46 mm/min, c) 91 mm/min.

Sa slike 6 se zapaža da kod uzoraka 2 i 3 (na slici b i c) postoji greška (tunel) u materijalu. Na lici 7 su dati makro prikazi zavarenih spojeva zavarenih alatom sa koncentričnim rezervoarima.



Sl. 7. Makro prikaz zavarenih spojeva izrađenih alatom sa koncentričnim rezervoarima, brzine zavarivanja: a) 17 mm/min, b) 46 mm/min, c) 91 mm/min.

Sa makro prikaza na slici 7 se vidi da na uzorcima zavarenih alatom sa koncentričnim rezervoarima nema pojave tunela, osim kod uzorka 5. Kod kojeg se obrazovao tunel pri levoj strani korena šava.

4. DISKUSIJA

U tabeli 6 je dat prikaz efektivnosti zavarenih spojeva.

Tabela 6. Efektivnost zavarenih spojeva

Alat	Redni br. uzorka	Po naponu tečenja [%]	Po zateznoj čvrstoći [%]
Alat sa rezervoarom	1	125	103
	2	111	83
	3	97	76
Alat sa koncentričnim rezervoarima	4	129	103
	5	125	102
	6	101	80

Iz tabele 6 se vidi da uzorci 1 i 4 imaju najveće vrednosti efikasnosti zavarenog spoja po naponu tečenja i zateznoj čvrstoći, ti uzorci su izvođeni najmanjim vrednostima brzine zavarivanja i time je postignut velik stepen deformacionog ojačavanja, što za rezultat ima povećane mehaničke osobine šava i eliminiše pojavu tunela u materijalu. Prisutan je i mehanizam ojačavanja granicama zrna.

5. ZAKLJUČCI

- Najbolje mehaničke karakteristike su kod uzoraka 1 i 4, koji su dobijeni sa najmanjom vrednošću brzine zavarivanja (pomaka) od $17^{mm}/min$.
- Najmanja brzina zavarivanja od $17^{mm}/min$ se pokazala kao adekvatan pomak pri kojem se eliminiše pojava grešaka (tunela) u materijalu.
- Najveće zatezne i savojne karakteristike su dobijene na uzorcima koji su zavarivani alatom sa koncentričnim rezervoarima.

6. ZAHVALNICA

Rezultati prezentovani u ovom radu su realizovani u okviru projekta „Istraživanje i primena savremenih metoda karakterizacije materijala i zavarenih spojeva u proizvodnom mašinstvu“, Departmana za proizvodno mašinstvo, FTN Novi Sad.

7. LITERATURA

- [1.] Stotler, T., Bernath, J.; *Friction stir welding*, Švedska, 2009, 1–5
- [2.] Mishra, R. S., Ma, Z. Y. *Friction stir welding and processing*; Materials Science and Engineering R: Reports, 50, 2 – 7

[3.] Misara, R., Mahoney, M.: *Friction stir welding and processing*, University of Missouri, Rolla, 2007

[4.] Reddy D., Supraja B. *Effect of Tool Geometry and Process Parameters on Mechanical Properties and Micro Structure of Various dissimilar Aluminium Alloys Welded by Friction Stir Welding–Review*, International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences, 2, 2015

[5.] Burford, D., Tweedy, B. Widner, C., *Influence of Shoulder Configuration and Geometric Features on Fsw Track Properties*, 6th International Symposium on Friction Stir Welding, Montréal, Canada, 2006

[6.] Radisavljević I, Radović, N., Živković, A., *Influence of Process Parameters on Quality of FSW Welded Plates*,

[7.] Mijajlović, M., Miličić D., Đurđanović M., Grabulov V., Živković A., Popović M.: *Osnovni pojmovi kod postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem prema ASW*, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 2/2012

[8.] Baloš, S., Šidanin, L., Rajnović, D., Vucic V., *Zavarivanje trenjem sa mešanjem*, XIX Konferencija o međulaboratorijskim ispitivanjima materijala, Užice 2.10.-4.10.2013.

[9.] Meilinger, Á., Török, I., *The importance of friction stir welding tool*, Production Processes and Systems, vol. 6., University of Miskolc, Department of Mechanical Technology, 2013.

Autori: Milan Pećanac, Miroslav Dramićanin, Petar Janjatović, Danka Labus Zlatanović, Doc. dr Dragan Rajnović, Prof. emeritus dr Leposava Šidanin, Vanr. prof. dr Sebastian Baloš, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Tel: +381 21 485 2339, Fax: +381 21 454-495.
Email:

pecanac.milan@uns.ac.rs

dramicanin@uns.ac.rs

janjatovic@uns.ac.rs

danlabus@uns.ac.rs

draganr@uns.ac.rs

lepas@uns.ac.rs

sebab@uns.ac.rs

Šimunović, G., Svalina, I., Vukelić, Đ., Šimunović, K., Šarić, T., Kljajin, M., Lujić, R., Havrlišan, S.

**PROCJENJIVANJE HRAPAVOSTI OBRADENE POVRŠINE NA TEMELJU ZNAČAJKI
DIGITALNE FOTOGRAFIJE**

***Rezime:** U radu je opisano istraživanje hrapavosti obrađene površine na temelju značajki digitalne fotografije nastale nakon tehnološke operacije glodanja. Podaci za istraživanje su dobiveni faktorskim planom pokusa s dva ponavljanja. Ulazne varijable (faktore) predstavljaju osnovni parametri obrade pri čeonom glodanju: broj okretaja (na pet razina: 2000; 3500; 5000; 6500; 8000 okr/min), posmak po zubu (na šest razina: 0,025; 0,1; 0,175; 0,25; 0,325; 0,4 mm/z) i dubina rezanja (na dve razine; 1; 2 mm). Izlazna varijabla ili odziv je najčešće korišteni parametar hrapavosti površine-srednje aritmetičko odstupanje profila Ra. Za svaki je ispitni uzorak izrađena digitalna fotografija obrađene površine. Na temelju plana pokusa i dobivenih rezultata merenja hrapavosti je kreirana baza ulaznih podataka (značajki) dobivenih iz digitalnih fotografija obrađenih površina uzoraka. Ova baza je kasnije poslužila za generisanje sustava neizrazitog zaključivanja za predviđanje hrapavosti površine pomoću metode prilagodljivog neuro-neizrazitog sustava zaključivanja (ANFIS). Greška procenjivanja, odnosno uporedba procenjene vrednosti Ra koje daje sustav sa stvarnim vrednostima Ra, je iskazana prosečnim normalizovanim korenom srednjeg kvadratnog odstupanja (RMSE) i iznosi 0,0698 ili 6,98 %.*

***Ključne reči:** površinska hrapavost, čeonu glodanje, digitalna fotografija, adaptivni neuro-fazi sistem*

1. UVOD

Površinska hrapavost je značajan tehnološki parametar i pokazatelj kvalitete obrađene površine. Zahtevi za nižim vrednostima površinske hrapavosti istovremeno utiču na produljenje tehnološkog vremena i povećanje troškova proizvodnje.

Veliki je broj znanstvenih istraživanja usmerenih upravo na predviđanje i kontrolu površinske hrapavosti. Definirani modeli u ovim istraživanjima se mogu podeliti na regresijske (statističke), analitičke (matematičke) i modele temeljene na primeni umetne inteligencije (AI). Često se prilikom kontrole, odnosno procene površinske hrapavosti obrađenih površina koriste značajke digitalne fotografije obrađene površine. Značajke fotografije su ulazne varijable za model procenjivanja [1, 2], a uglavnom su predstavljene statističkim veličinama kao što su aritmetička sredina i standardna devijacija [3], raznim vrstama normi kao što su Euklidova i Hammingova norma [4], valnim transformacijama kao što je Harr-ova valna transformacija [5] i dvodimezionalnom Fourier-ovom transformacijom [6], itd. Uglavnom primenjuvane metode za procenjivanje su prilagodljivi neuro-neizraziti sistem (ANFIS) [7, 8], umetne neuronske mreže (ANN) [9, 10], regresijska analiza [11] i druge.

Istraživanja su usmerena na izgradnju sustava (machine vision system) kojim bi se u realnom vremenu, brže i jeftinije kontrolirala, odnosno procenjivala hrapavost obrađenih površina. Istraživanja u ovom radu još su jedan doprinos procenjivanju hrapavosti obrađene površine na temelju značajki digitalne fotografije uz primenu prilagodljivog neuro-neizrazitog sustava zaključivanja (ANFIS).

2. PROVOĐENJE EKSPERIMENTA

Istraživanje je provedeno na materijalu uzoraka Al6060 T66 (prema evropskim normama EN AW-6060 T66 [AlMgSi]). Dimenzije uzoraka su 100×60×10 [mm]. Uzorci su izrađeni iz plosnatih šipki poprečnog preseka 60×10 [mm]. Za tehnološki zahvat čeonog glodanja površine 100×60 [mm] je korištena vertikalna CNC glodalica proizvođača HASS tip VF-2 i čeonu glodalo promjera 40 mm proizvođača Walter s četiri pločice (oznaka držača: F 4042.B.040.Z04.15 i oznaka za pločice: ADMT160608R-F56 WKP35S). Obrada se odvijala na temelju CNC programa koji je ponavljao jednaku putanju alata. Menjani su parametri obrade: broj okretaja, posmak po zubu i dubina rezanja redom koji je definiran izabranim planom pokusa. Za stezanje uzoraka je korišten hidraulični strojni škripac Alfa NCO-A.

Kako će u nastavku primenjeni sustav neizrazitog zaključivanja imati tri ulaza,

predloženi plan pokusa ima tri faktora. Detaljnom analizom obzirom na ukupni broj ulazno/izlaznih eksperimentalnih podataka za fazu treniranja i fazu proveravanja neizrazitog sustava zaključivanja, odabran je faktorski plan pokusa s dva ponavljanja. Ulazne varijable (faktore) predstavljaju osnovni parametri obrade pri čeonom glodanju: broj okretaja (na pet razina: 2000; 3500; 5000; 6500; 8000 okr/min), posmak po zubu (na šest razina: 0,025; 0,1; 0,175; 0,25; 0,325; 0,4 mm/z) i dubina rezanja (na dve razine: 1; 2 mm). Sve druge značajke specifične za čeonu glodanje: preklap alata između susednih staza, broj prolaza, ukupna duljina puta su konstantne. Korišteno je rashladno sredstvo Maxol tvrtke Forol d.o.o. Alat (čeonu glodalo) i materijal uzorka tokom pokusa se nisu menjali.

3. PRIMIJENJENA METODOLOGIJA

Metoda prilagodljivog neuro-neizrazitog sustava zaključivanja (ANFIS) za generiranje sustava neizrazitog zaključivanja zahteva skup ulazno/izlaznih eksperimentalnih podataka. Sustav neizrazitog zaključivanja ima tri ulazne varijable. Pri generiranju neizrazitog sustava zaključivanja je korištena metoda prilagodljivog neuro-neizrazitog sustava zaključivanja s tri funkcije pripadnosti po svakom ulazu. Dakle, bazu neizrazitih pravila čini 27 različitih neizrazitih pravila.

Za prvi red sustava neizrazitog zaključivanja baza neizrazitih pravila se može zapisati kao:

Pravilo 1: Ako x je A_1 I y je B_1 I w je C_1 tada z je $f_1(x, y, w)$

Pravilo 2: Ako x je A_2 I y je B_2 I w je C_2 tada z je $f_2(x, y, w)$

...

Pravilo 27: Ako x je A_3 I y je B_3 I w je C_3 tada z je $f_{27}(x, y, w)$

gde su: x, y i w ulazi ANFIS-a, A_j, B_j i C_j neizraziti skupovi, a $f_i(x, y, w)$ je prvi red polinoma i predstavlja izlaz prvog reda Sugeno sustava neizrazitog zaključivanja. Sustav sadrži prilagodljive (parametri skupova koji su promjenjivi-prilagodljivi) i fiksne (parametri skupova koji su fiksni-nepromjenjivi) čvorove. Izlazi iz čvorova se dogovorno označavaju kao $Q_{l,i}$ gdje " l " predstavlja razinu, a " i " broj čvora.

Srednje aritmetičko odstupanje Ra se može izraziti kao:

$$Ra = \sum_{i=1}^n \bar{\omega}_i \cdot f_i = \sum_{i=1}^n \bar{\omega}_i (k_{i0} + k_{i1} \cdot n + k_{i2} \cdot f_z + k_{i3} \cdot a) \quad (1)$$

$$\text{gde } k = \begin{bmatrix} k_{10}, k_{11}, k_{12}, k_{13}, k_{20}, k_{21}, k_{22}, k_{23}, \\ \dots, k_{n0}, k_{n1}, k_{n2}, k_{n3} \end{bmatrix}$$

predstavlja vektor parametara zaključka, n broj okretaja, f_z posmak po zubu, a_p dubinu rezanja, $\bar{\omega}_i$ omjer i -te snage 'okidanja' pravila sa sumom snaga 'okidanja' svih pravila i kao izlaz Ra srednje aritmetičko odstupanje profila površine.

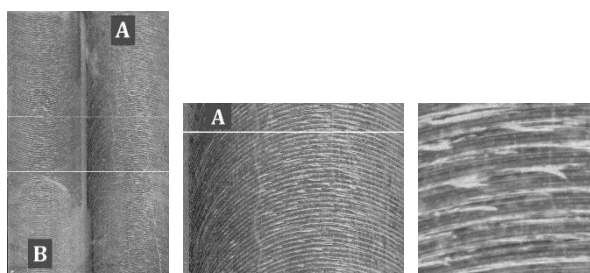
Svako neizrazito pravilo ima izlaz povezan s izlaznom funkcijom koju definiiraju tri različita parametra zaključka. Iz prethodno navedenog se može zaključiti da se pri treniranju sustava prilagođava 81 parametar, a što nadalje uslovljava minimalno 81 slog ulazno/izlaznih eksperimentalnih podataka za treniranje sustava neizrazitih zaključivanja za procenjivanje površinske hrapavosti. Osim za fazu treniranja, ulazno/izlazni eksperimentalni podaci su potrebni i za fazu proveravanja. Za fazu proveravanja potrebno je osigurati 10 % ulazno/izlaznih eksperimentalnih podataka.

4. REZULTATI I RASPRAVA

Na slici 1 je prikazan obrađeni uzorak. Srednje aritmetičko odstupanje profila površine Ra je mereno prema standardu ISO 4288 pomoću prenosnog uređaja za merenje hrapavosti proizvođača Taylor & Hobson model Surtronic S128. Srednje aritmetičko odstupanje Ra je mereno na središnjem delu uzoraka (između dve bijele horizontalne linije) kako je prikazano na slici 4 za svaki prolaz posebno. Gornje i donje linije su udaljene 40 [mm] od krajeva uzoraka tako da je širina središnjeg dela 20 [mm]. Srednje aritmetičko odstupanje Ra je mereno okomito na tangente tragova alata na liniji gde su tragovi alata najudaljeniji, a ta linija se nalazi 10 [mm] udaljena od levog i desnog ruba uzorka i paralelna je s njima. Za obradu mernih rezultata korišten je Talyprofile software proizvođača Taylor & Hobson dizajniran za korišćenje s instrumentima Surtronic serije S-100.

Nakon pokusa je provedena akvizicija digitalnih fotografija obrađenih površina svih uzoraka koristeći stolni skener Scanjet 3100. Korištena je optička rezolucija skenera od 1200 tačaka po inču u svrhu dobivanja grayscale fotografije, odnosno fotografije nijansi sive boje. Za fotografiju nijansi sive boje je korišteno 8 bitova po pikselu, a vrednosti tonova sive boje su prikazane u 256 razina. Nakon akvizicije su sve digitalne fotografije zapisane u matičnom obliku iz kojega se kvantificiraju ulazne varijable: srednja vrednost sivosti svih članova matrice digitalne fotografije, standardna devijacija sivosti svih članova matrice digitalne fotografije i

entropija matrice sivosti digitalne fotografije koje se uz izmereno srednje aritmetičko odstupanje Ra koriste kao baza ulazno/izlaznih podataka pri kreiranju sustava neizrazitog zaključivanja za procenjivanje površinske hrapavosti.



Sl. 1 Obradeni uzorak i mesta merenja hrapavosti

Srednja vrednost sivosti svih članova matrice digitalne fotografije se definira kao:

$$Mean = \frac{1}{N \times N} \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N f(x, y) \quad (2)$$

gde je: N-broj stupaca i broj redaka matrice digitalne fotografije, $f(x, y)$ vrednost intenziteta sivosti člana matrice digitalne fotografije određenog sa x i y.

Standardna devijacija sivosti svih članova matrice digitalne fotografije (N=250) se može opisati kao:

$$Std = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N (f(x, y) - \bar{f})^2} \quad (3)$$

gde je: N-broj stupaca i broj redaka matrice digitalne fotografije, a \bar{f} je srednja vrijednost sivosti matrice digitalne fotografije.

Entropija matrice sivosti digitalne fotografije statistička je mera slučajnosti koja se može koristiti za karakterizaciju tekture ulazne slike. Entropija sivosti matrice digitalne fotografije se opisuje kao:

$$E = \sum_{i=1}^{256} (p_i \times \log_2 p_i) \quad (4)$$

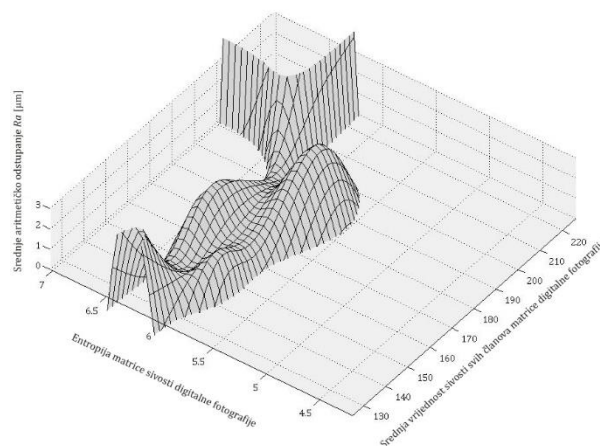
gde je E skalarna vrednost koja predstavlja entropiju sivosti slike I, a p je vektor koji sadrži histogramске vrednosti.

Sve digitalne fotografije koje su korištene u ovom radu su imale rezoluciju 250×250 piksela. Korištena rezolucija predstavlja veličinu digitalnih fotografija obrađene površine koje sadrže mesto merenja srednjeg aritmetičkog odstupanja Ra i okolnu površinu. Površina prikazana korištenim digitalnim fotografijama se nalazi između bijelih horizontalnih linija uzoraka prikazanih na slici 1 za svaki prolaz posebno. Za potrebe ovoga rada su korištene digitalne fotografije onih prolaza na kojima je izmerena veća vrednost srednjeg

aritmetičkog odstupanja Ra. Matrica digitalne fotografije ima 250 redak i 250 stupac.

Dobivene vrednosti hrapavosti te ulazne varijable za kreiranje sustava neizrazitog zaključivanja (Srednja vrednost, Standardna devijacija i Entropija) su poslužili za generiranje sustava neizrazitog zaključivanja za procenjivanje hrapavosti površine pomoću metode prilagodljivog neuro-neizrazitog sustava zaključivanja (ANFIS). Ovaj sustav procenjuje vrednosti Ra na temelju digitalnih fotografija obrađenih površina i njihovih značajki. Greška procenjivanja, odnosno uporedba koje daje sustav sa stvarnim vrednostima Ra, je iskazana prosečnim normalizovanim korenom srednjeg kvadratnog odstupanja (NRMSE). Sustav neizrazitog zaključivanja dobiven istraživanjem u ovom radu ima grešku procenjivanja 0,0698 ili 6,98 %.

Na slici 2. su izdvojeni primjenjivi delovi odzivne površine u ovom konkretnom slučaju. Ono što se može videti iz slike 2. je da vrlo male promene u ulaznim varijablama znatno utiču na izlaznu varijablu, odnosno srednje aritmetičko odstupanje profila površine Ra.



Sl. 2. Primjenjivi dio odzivne površine

Kroz eksperimentalna istraživanja je mereno srednje aritmetičko odstupanje profila površine Ra koje se kreće u rasponu od 0,194 [μm] do 1,68 [μm]. Izmereni izlazi se rasprostranjuju kroz četiri klase površinske hrapavosti: N3 (od 0,1 do 0,2 [μm]), N4 (od 0,2 do 0,4 [μm]), N5 (od 0,4 do 0,8 [μm]), N6 (od 0,8 do 1,6 [μm]) i N7 (od 1,6 do 3,2 [μm]). U radovima koji se bave procenjivanjem hrapavosti obrađenih površina na temelju značajki digitalne fotografije može se uočiti da na razinu greške procenjivanja veliki uticaj ima raspon izmerenih hrapavosti. Što je raspon izmerenih hrapavosti veći, uz ravnomernu raspodjeljenost po klasama hrapavosti, greška procenjivanja je

manja. Na grešku procenjivanja u ovom radu (6,98 %), bitno su uticale outlier vrednosti. Naime, u klase hrapavosti N4, N5 i N6 pripada gotovo 97% izmerenih vrednosti hrapavosti. Preostale vrednosti i deo vrednosti hrapavosti u klasi N6 su outlier-i. Bez outlier-a je za očekivati da bi greška procenjivanja hrapavosti obrađene površine bila značajno manja.

5. ZAKLJUČAK

Provedeno istraživanje zalazi u područje visokobrzinske obrade i stoga su površine vrlo kvalitetno obrađene, a izmerene hrapavosti vrlo male. Značajke digitalnih fotografija tako postaju vrlo slične i za očekivati je veću grešku procenjivanja. Sustav neizrastog zaključivanja dobiven istraživanjem u ovom radu ima grešku procenjivanja 6,98 %. Međutim, i uz ovakvu grešku ne bi trebalo doći do narušavanja tehnički zahteva postavljenih na radni predmet u smislu kvalitete obrade.

Plan je proširiti istraživanja za postojeći materijal, ali i provesti istraživanja za druge materijale. Na taj bi se način širila baza digitalnih fotografija i njihovih značajki i akumulirala dovoljna količina znanja koja bi uticala na smanjenje greške procenjivanja.

6. REFERENCE

- [1] Samtas, G.: *Measurement and evaluation of surface roughness based on optic system using image processing and artificial neural network*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 73 (1-4), pp. 353–364, 2014.
- [2] Nammi, S., Ramamoorthy, B.: *Effect of surface lay in the surface roughness evaluation using machine vision*, Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 125 (15), pp. 3954–3960, 2014.
- [3] Lee, K.C., Ho, S.J., Ho, S.Y.: *Accurate estimation of surface roughness from texture features of the surface image using an adaptive neuro-fuzzy inference system*, Precision Engineering, 29 (1), pp. 95–100, 2005.
- [4] Jeyapoovan, T., Murugan, M.: *Surface roughness classification using image processing*, Measurement. 46 (7), pp. 2065–2072, 2013.
- [5] Morala-Argüello, P., Barreiro, J., Alegre E.: *A evaluation of surface roughness classes by computer vision using wavelet transform in the frequency domain*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 59 (1-4), pp. 1–8, 2011.
- [6] Palani, S., Natarajan, U.: *Prediction of surface roughness in CNC end milling by machine vision system using artificial neural network based on 2D Fourier transform*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 54 (9-12), pp. 1033–1042, 2011.
- [7] Ho, S.Y., Lee, K.C., Chen, S.S., Ho, S.J.: *Accurate modeling and prediction of surface roughness by computer vision in turning operations using an adaptive neuro-fuzzy inference system*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 42 (13), pp. 1441–1446, 2002.
- [8] Simunovic, G., Svalina, I., Simunovic, K., Saric, T., Havrlisan, S., Vukelic, D.: *Surface roughness assessing based on digital image features*. Advances in Production Engineering & Management. 11 (2), pp. 93–104, 2016.
- [9] Priya, P., Ramamoorthy, B.: *The influence of component inclination on surface finish evaluation using digital image processing*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 47, (3-4), pp. 570–579, 2007.
- [10] Lee, B.Y., Yu, S.F., Juan, H.: *The model of surface roughness inspection by vision system in turning*, Mechatronics, 14, (1), pp. 129–141, 2004.
- [11] Nathan, D., Thanigaiyarasu, G., Vani, K.: *Study On the Relationship between Surface Roughness of AA6061Alloy End Milling and Image Texture Features of Milled Surface*, Procedia Engineering, 97, pp. 150 – 157, 2014.

Autori: prof. dr Goran Šimunović, dr Ilija Svalina, prof. dr Katica Šimunović, prof. dr Tomislav Šarić, prof. dr Milan Kljajin, prof. dr Roberto Lujic, mag. Sara Havrlisan, Sveučilište u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, Trg Ivane Brlić Mažuranić 2, 35000 Slavonski Brod, Hrvatska; vanr. prof. dr Đorđe Vukelić, Univerzitet Novi Sad, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija.

E-mail: gsimun@sfsb.hr
isvalina@sfsb.hr
vukelic@uns.ac.rs
ksimun@sfsb.hr
tsaric@sfsb.hr
mkljajin@sfsb.hr
rlujic@sfsb.hr
shavrlisan@sfsb.hr

Havrlišan, S., Šimunović, K., Šarić, T.

ISTRAŽIVANJE OTPORNOSTI LEGURA NIKLA, BORA I SILICIJA NA EROZIJSKO
TROŠENJE SUHIM ČESTICAMA

Rezime: Cilj rada je istražiti otpornost legura nikla, bora, silicija (NiBSi) i kroma (NiCrBSi) nanesenih postupkom naštrcavanja pomoću plinskog plamena s istovremenim utaljivanjem na erozijsko trošenje suhim česticama. Ulazne varijable menjane na dve razine su: vrsta legure nikla iz iste skupine – NiCrBSi i NiBSi te udaljenost plamenika od radnog predmeta – mala i velika. Izlazna varijabla je gubitak mase usled erozijskog trošenja pod kutom udara erodenta od 30° nakon 5 minuta. Osim istraživanja otpornosti na erozijsko trošenje dve vrste prevlaka u ovisnosti o udaljenosti plamenika od radnog predmeta, cilj je uporediti trošenje prevlaka s trošenjem različitih materijala podloge: čelik X38CrMOC5-1 (meko žaren i poboljšan) te čelik S275JR+AR.

Ključne reči: legure nikla, bora i silicija, naštrcavanje pomoću plinskog plamena s istovremenim utaljivanjem, erozijsko trošenje

1. UVOD

Komponente tehničkih sustava su često izložene različitim oblicima trošenja usled čega dolazi do oštećenja površina i potrebe da se pojedine komponente zamene. Postupcima toplinskog naštrcavanja nanose se prevlake na oštećene i istrošene delove s ciljem produljenja životnog veka i smanjenja troškova održavanja te se koriste i za zaštitu novih delova od trošenja i/ili korozije te povišenih temperatura. Postupcima naštrcavanja mogu se nanositi gotovo sve vrste materijala prevlaka (metali, keramike, polimeri), a često primenjive su legure nikla, železa i kobalta.

Legure nikla primenjuju se u uvetima gde se zahteva dobra otpornost na trošenje, povišene temperature i koroziju te su stoga istražene s gotovo svih aspekata, odnosno istraživanja su usmerena na otpornost ovih prevlaka kod različitih oblika trošenja (klizno, abrazijsko, erozijsko), na koroziju te vanjska mehanička opterećenja [1-4].

U istraživanjima erozijskog trošenja suhim česticama autori [5-10] su uz parametar kut udara

erodenta menjali i parametre kao što su temperatura na kojoj se provodi ispitivanje (pri sobnoj i povišenoj temperaturi) [6] i vrstu erodenta [11] te su došli do zaključka da kut udara erodenta kao i vrsta erodenta utiču na erozijsko trošenje.

Stoga je cilj ovog rada istražiti otpornost legura nikla, bora, silicija (NiBSi) i kroma (NiCrBSi) nanesenih postupkom naštrcavanja pomoću plinskog plamena s istovremenim utaljivanjem na erozijsko trošenje pri kutu udara erodenta od 30° na sobnoj temperaturi te uporediti trošenje prevlaka s trošenjem različitih materijala podloge.

2. EKSPERIMENTALNI DIO

Postupkom naštrcavanja pomoću plinskog plamena s istovremenim utaljivanjem, na materijal podloge čelik S275JR+AR, čiji je kemijski sastav prikazan u tabeli 1, nanese su dve vrste legura nikla – NiCrBSi i NiBSi, čiji je kemijski sastav prikazan u tabeli 2.

Tabela 1. Kemijski sastav materijala podloge

Kemijski element, % mase	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe
S275JR+AR	0,10	0,20	0,57	0,016	0,012	0,14	0,27	0,06	0,46	ostatak

Tabela 2. Kemijski sastav praška za naštrcavanje

Kemijski element, % mase	C	Cr	Fe	B	Si	Ni
NiCrBSi	0,7	15	3,5	3,2	4,4	ostatak
NiBSi	0,1	0,5	0,5	2,5	3	ostatak

Prije postupka naštrcavanja, podloga na koju će se prevlaka nanositi pripravljena je prema standardnoj proceduri: odmaščivanje, ohrapvljivanje te predgrijavanje na temperaturi oko 200 °C.

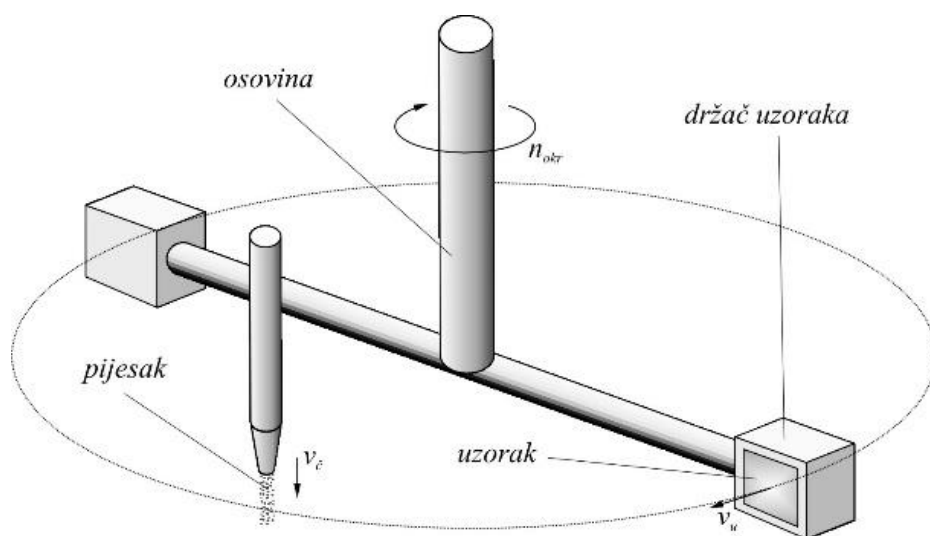
Za naštrcavanje pomoću plinskog plamena s istovremenim utaljivanjem korišten je SuperJet Eutalloy oksii-acetilenski pištolj pri tlaku acetilena 50 kPa i tlaku kisika 200 kPa. Uzorci su nakon postupka naštrcavanja i hlađenja na zraku strojno obrađeni glodanjem kako bi se dobila površina potrebna za ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje.

U tabeli 3 prikazan je plan ispitivanja prema kojem je provedeno ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje na uređaju koji je shematski prikazan na slici 1.

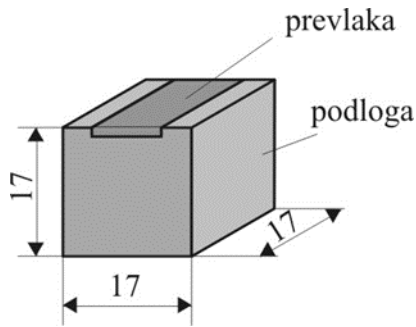
Uzorci, čije su dimenzije i oblik prikazani na slici 2, učvršćeni su u držače tako da se tokom pokusa troši samo prevlaka (gornja površina uzorka), dok su ostale površine zaštićene.

Tabela 3. Plan ispitivanja otpornosti na erozijsko trošenje suhim česticama

Vrsta materijala	Parametri ispitivanja
NiCrBSi prevlaka mala udaljenost plamenika	Erodent: kvarcni pesak Ottawa AFS 50/70
NiCrBSi prevlaka velika udaljenost plamenika	
NiBSi prevlaka mala udaljenost plamenika	Brzina vrtnje osovine: 1440 okr/min.
NiBSi prevlaka velika udaljenost plamenika	Vreme trajanja ispitivanja: 5 min
Čelik X38CrMoV5-1 meko žaren	Kut udara uzorka u mlaz erodenta: 30°
Čelik X38CrMoV51 poboljšan	
Čelik S275JR+AR	Dimenzije uzorka: 17x17x17 mm



Sl. 1. Shematski prikaz detalja uređaja za ispitivanje erozijskog trošenja



Sl. 2. Oblik i dimenzije uzorka za ispitivanje erozijskog trošenja

Držači se nalaze na osovini koja rotira te na svom putu uzorci smešteni u držače udaraju u čestice kvarcnog peska usled čega dolazi do erozijskog trošenja prevlake. Uređaj na sebi ima mogućnost podešavanja kuta udara čestica. Na slici 3 je prikazano erozijsko trošenje uzorka pod kutom udara erodenta od 30°.



Sl. 3. Detalj uređaja za ispitivanje erozijskog trošenja pri kutu udara erodenta od 30°

3. REZULTATI ISPITIVANJA

Uzorci su prije i nakon ispitivanja otpornosti na erozijsko trošenje očišćeni u ultrazvučnoj kupki kako bi se uklonile nečistoće i odstranile čestice peska te su nakon čišćenja vagani na analitičkoj vagi METTLER B5C 1000, tačnosti 10⁻⁴, g. Vaganjem uzoraka prije i nakon ispitivanja određen je gubitak mase prema izrazu:

$$\Delta m = m_1 - m_2 \quad (3.1)$$

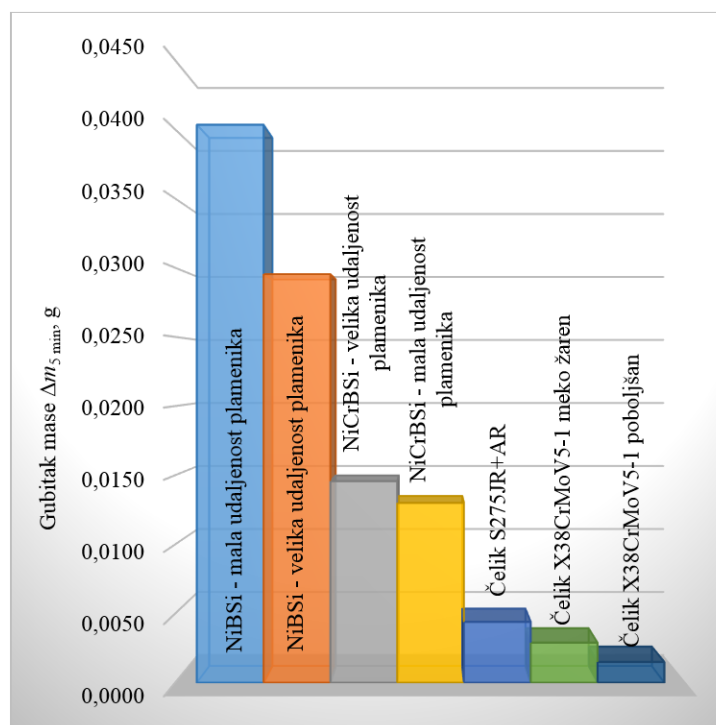
gde je:

Δm – gubitak mase, g

m_1 – masa uzorka prije ispitivanja, g

m_2 – masa uzorka nakon ispitivanja, g.

Na slici 4 je dan dijagramski prikaz rezultata ispitivanja gubitka mase usled erozijskog trošenja nakon 5 minuta za kut udara erodenta od 30°, gde su upoređeni rezultati erozijskog trošenja NiCrBSi i NiBSi prevlaka s rezultatima trošenja materijala podloge.



Sl. 4. Dijagramski prikaz gubitka mase usled erozijskog trošenja nakon 5 minuta za kut udara erodenta od 30°

4. RASPRAVA I ZAKLJUČAK

U poredbom gubitka mase materijala prevlake (NiCrBSi i NiBSi naštrcane uz malu i veliku udaljenost plamenika) te materijala podloge (čelik X38CrMoV5-1 poboljšani i meko žaren i čelik S275JR+AR) može se zaključiti da materijali podloge imaju daleko manji gubitak mase usled erozijskog trošenja nakon 5 minuta pri kutu udara erodenta od 30°. Najmanji gubitak mase pokazuje poboljšani čelik X38CrMOV5-1, nakon kojega sledi isti čelik meko žaren te čelik S275JR+AR. Promatrajući materijali prevlake, najmanji gubitak mase pokazuje NiCrBSi prevlaka i to naštrcana uz veliku udaljenost plamenika, dok najveći gubitak mase pokazuje NiBSi prevlaka naštrcana uz malu udaljenost plamenika.

Na kraju, može se zaključiti da navedene prevlake – NiCrBSi i NiBSi naštrcane uz malu i veliku udaljenost plamenika ne bi imalo smisla primeniti za zaštitu od erozijskog trošenja navedenih materijala podloge pri kutu udara erodenta od 30°, no možda bi ih imalo smisla primeniti za zaštitu drugih materijala podloge.

5. REFERENCE

- [1] Šimunović, K., Šarić, T., Šimunović, G., *Different Approaches to the Investigation and Testing of the Ni-Based Self-Fluxing Alloy Coatings - A Review. Part 1: General Facts, Wear and Corrosion Investigations*, Tribology Transactions, 57, 2014, 6, str. 955-979
- [2] Šimunović, K., Šarić, T., Šimunović, G., *Different Approaches to the Investigation and Testing of the Ni-Based Self-Fluxing Alloy Coatings - A Review. Part 2: Microstructure, Adhesive Strength, Cracking Behavior, and Residual Stresses Investigations*, Tribology Transactions, 57, 2014, 6, str. 980-1000
- [3] Fauchais, P., Vardelle, A., Dussoubs, B., *Quo Vadis Thermal Spraying?*, Journal of Thermal Spray Technology, 10, 2001, 1, str. 44-66
- [4] Vardelle, A., Moreau C., Akedo J., Ashrafizadeh, H.; Berndt, C. C., Oberste Berghaus J., Boulos, M., Brogan J., Bourtsalas, C. A., Dolatabadi, A., Dorfman, M., Eden, J. T., Fauchais, P., Fisher, G., Gaertner, F., Gindrat, M., Henne, R., Hyland, M., Irissou, E., Jordan, H. E., Khor Khiam, A., Killinger, A., Lau, Y. C., Li, C. L., Li, L., Longtin, J., Markocsan, N., Masset, J. P., Matejicek, J., Mauer, G., McDonald, A., Mostaghimi, J., Sampath, S., Schiller, G., Shinoda, K., Smith, F. M., Ansar Syed, A., Themelis, J. N., Toma, F. L., Trelles, J. P., Vassen, R., Vuoristo, P., *The 2016 Thermal Spray Roadmap*, Journal of Thermal Spray Technology, 25, 2016, 8, str. 1376-1440
- [5] Kulu, P., Hailing, J., *Recycled Hard Wear-Resistant Composite Coatings*, Journal of Thermal Spray Technology, 7, 1998, 2, str. 173-178
- [6] Kulu, P., Hussainova, I., Veinthal, R., *Solid Particle Erosion of Thermal Sprayed Coatings*, Wear, 258, 2005, 1-4, str. 488-496
- [7] Kulu, P., Pihl, T., *Selection Criteria for Wear Resistant Powder Coatings under Extreme Erosive Wear Conditions*, Journal of Thermal Spray Technology, 11, 2002, 4, str. 517-522
- [8] Kulu, P., *Selection of Powder Coatings for Extreme Erosion Wear Conditions*, Advanced Engineering Materials, 4, 2002, 6, str. 392-397
- [9] Šimunović, K., Grilec, K., Ivušić, V., *An Investigation of the Erosive Wear Resistance of Flame Sprayed and Fused NiCrBSi Coatings*, Tehnički vjesnik-Technical Gazette, 14, 2007, 1-2, str. 59-64
- [10] Hejwowski, T., Szewczyk, S., Weronki, A., *An Investigation of the Abrasive and Erosive Wear of Flame-Sprayed Coatings*, Journal of Materials Processing Technology, 106, 2000, 1-3, str. 54-57
- [11] Tu, J. P., Liu, M. S., Mao, Z. Y., *Erosion Resistance of Ni-WC Self-fluxing Alloy Coating at High Temperature*, Wear, 209, 1997, str. 43-48

Autori: Sara Havrlišan, mag. ing. mech., Prof. Dr. Katica Šimunović, Prof. Dr. Tomislav Šarić, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, Trg Ivane Brlić Mažuranić 2, 35000 Slavonski Brod, Hrvatska, Tel. +385 35 493 445, Fax. +385 35 446 446.

E-mail: shavrlisan@sfsb.hr
ksimun@sfsb.hr
tsaric@sfsb.hr

Štrbac, B., Jotić, G., Hadžistević, M.

**ANALIZA GREŠKE RAVNOSTI NA RAZLIČITIM KOORDINATNIM MERNIM
SISTEMIMA**

***Rezime:** Koordinatni merni sistemi su dugi niz godina vodeći merni instrumenti u oblasti proizvodne metrologije. Širok je dijapazon ovih instrumenata i karakteriše ih različita tačnost, preciznost, merna nesigurnost, sistem uzorkovanja koordinata tačaka – merni senzor, hadverska struktura i softverska obrada podataka. Zajednička osobina ovih mernih sistema je da skupljaju koordinate tačaka sa površine radnog predmeta i u nezavisnoj softverskoj analizi određuju rezultat merenja. Cilj ovog rada analiza greške ravnosti koja se meri različitim mernim sistemima. Za analizu greške ravnosti koristi se univerzalno programsko rešenje – rotacija kroz jednu tačku.*

***Ključne reči:** ravnost, koordinatni merni sistemi, rotacija kroz jednu tačku*

1. UVOD

Procena usaglašenosti dimenzionalnih i geometrijskih karakteristika kvaliteta uglavnom se sprovodi na mernim instrumentima koji imaju osobinu da realnu geometriju predstave u vidu skupa koordinata uzorkovanih tačaka. Ove koordinate tačaka (x,y,z) su izražene u odnosu na neki koordinatni sistem ili referentnu tačku. Tačnost u detektovanju položaja mernih tačaka zavisi pre svega od tipa koordinatnog mernog sistema (hadverska struktura), sistema uzorkovanja (merni senzor), načina uzorkovanja tačaka, itd. [1]. Koordinatni merni sistemi (KMS) se mogu podeliti u dve grupe: sistemi koji uzorkuju tačke na diskretan način i sistemi koji prikupljaju tačke u vidu skeniranja [2]. U prvu grupu spadaju mašine sa serijskom kinematikom (konvencionalne koordinatne merne mašine (KMM) i merne ruke), jedno-dužinski sistemi sa dva ugla (laser trackeri, laserski radar i laserske stanice) i sistemi sa više uglova (mapiranje zasnovano na triangulaciji, konvergentna fotogrametrija i GPS sistemi). U skenirajuće sisteme spadaju: tačkasti skeneri, linijsko – laserski skeneri, sistemi ivičnih projekcija i kompjuterska tomografija. Skenirajući merni sistemi su u razvoju i smatra se da za potrebe merenja u mašinskoj industriji još nisu adekvatni zbog neuniforme merne nesigurnosti [3]. Najširu primenu imaju KMM koje mogu biti opremljene sa različitim tipom sistema senzora. Senzori koji se koriste kod KMM se mogu podeliti na kontaktne i beskontakne. Najpopularniji kontaktne merni senzori kod KMM su definitivno senzori „tačka po tačka“. Kada prilazi površini radnog predmeta, senzor dodirne površinu i merni pipak

se savija. Skretanje se detektuje preko senzora merne glave i preko okidača mašine se očitava pozicija osa. Uzimajući u obzir prečnik vrha mernog pipka, može se odrediti položaj tačke na površini. Takođe, postoje skenirajući merni senzori koji, ne samo da detektuju skretanje (tj. kontakt) mernog pipka, nego čak mere iznos ugiba mernog senzora. Pošto je otklon mernog senzora poznat, ova informacija može da se iskoristiti kao povratna informacija za KMM. Ovo daje mogućnost skeniranja dela dok je merni senzor u stalnom kontaktu sa radnim predmetom. Merni senzori koji koriste skenirajući mod mogu biti manje precizni zbog ubrzanja i promenljivog trenja tokom skeniranja ali imaju mogućnost da mere veći broj tačaka za manji period. U beskontaktnu grupu senzora spadaju: laserski senzori u tački, linijski laserski senzori i optički merni senzori. Najpopularniji iz ove grupe senzora su laserski linijski skeneri koji za kratak vremenski period mogu da mere više od deset hiljada tačaka. Ovo ih čini veoma pogodnim za merenje složenih površina kao što su. npr. karoserija automobila i proizvoda od plastike. Tačnost laserskog linijskog senzora još uvek nije konkurentna sa kontaktnim mernim sensorima. Merne ruke su nesumljivo jedne od najnovijih i najbrže rastućih koordinatnih mernih sistema. Ovi KMS su stekle ogromnu popularnost uglavnom zbog mobilnosti i relativno dobre tačnosti [4].

Preciznost i tačnost ovih različitih mernih sistema se oslikava u ispravnosti detektovanja koordinata tačaka. Nakon toga, u nezavisnim softverskim analizama, na bazi izmerenih tačaka, se procenjuju karakteristike kvaliteta proizvoda. U ovoj studiji analizirana je greška ravnosti merena na različitim koordinatnim mernim sistemima a

evaluacija greške je izvršena u istom programskom sistemu.




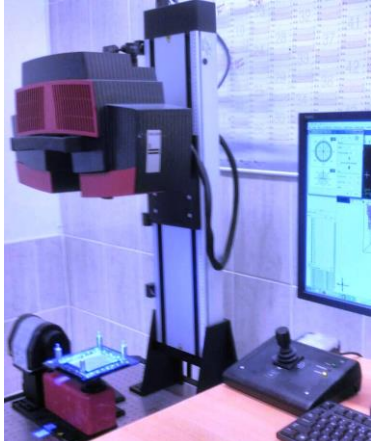
2. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Na radnom predmetu dimenzija $100 \times 100 \times 10$ mm merena je ravnost površine koja je obrađena glodanjem. Ravnost je merena na četiri različita koordinatna merna sistema i to: konvencionalna KMM sa kontaktnim senzorom “tačka po tačka”, dve merne ruke i jedan linijski laserski skener. Karakteristike ovih KMS su date u tabeli 1. Prema

specifikaciji najveću tačnost poseduje KMM KMM Carl Zeiss, zatim Nikon merna ruka te G2X merna ruka. Tačnost laserskog linijskog skenera nije definisana prema specifikaciji jer ne postoji standard za proveru tačnosti. U radu [5] dati su neki evaluacioni testovi za proveru tačnosti linijskih lasera.

Nakon izvršenih merenja koordinate uzorkovanih tačaka se uvoze u programski sistem “rotacija kroz jednu tačku” za procenu greške ravnosti prema kriterijumu minimalne zone.

Tabela 1. Koordinatni merni sistemi i karakteristike

<p>KMM Karl Ceiss Contura G2 RDS</p>  <p>$MPE_E = 1.9 + L/330$ μm (L u mm)</p>	<p>Merna ruka microscribe G2X digitizer</p>  <p>Tačnost ± 0.23 mm</p>
<p>Merna ruka MCAx Nikon, model MCAx 20+</p>  <p>Tačnost ± 0.033 mm</p>	<p>Linijski skener Gom Atos triple Scan</p>  <p>Proširena merna nesigurnost $U = 5 \mu m$</p>

2.1 MZ metoda za procenu greške ravnosti – rotacija kroz jednu tačku

Procena odstupanja oblika na KMS se uglavnom sprovodi prema metodi minimalne zone (MZ) koju preporučuje standard. Međutim, rešenje minimalne zone nije jednoznačno kao na primer kod metode najmanji kvadrati i ono se ogleda u sposobnosti programskog rešenja da tako postavi referentnu ravan gde će rastojanje dve ekstremne tačke biti minimalno. U dosta slučajeva programski sistem “rotacija kroz jednu tačku” se

pokazalo kao adekvatan. Metoda rotacija kroz jednu tačku se bazira na osobinama referentne ravni koja predstavlja osnovu za procenu greške ravnosti. Iz analitičke geometrije je poznato da su tri koordinate normalnog vektora ravni jedini parametri koji utiču na vrednost greške ravnosti. Pritom položaj stvarne ravni nije značajan iz razloga što njegove ortogonalne transformacije ne utiču na ravnost. To znači da u jednačini referentne ravni date preko formule (1):

$$z = -\frac{Ax + By + D}{C} \quad (1)$$

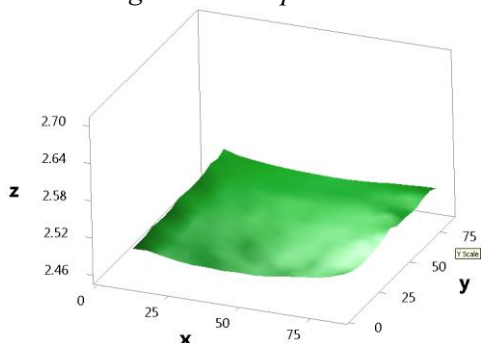
A, B i C predstavljaju koordinate vektora normale ravni a D je konstanta koja je definisana sa položajem ravni. Parametar D je beznačajan i nema uticaja na procenu greške ravnosti. Ovo navodi na zaključaj da ako se uzme bilo koja ravan sa specifičnim vektorom normale definisanim preko parametra A, B i C rezultat

procene greške ravnosti će biti isti. Drugim rečima rečeno, položaj ravni određen preko rotacije vektora normale i činjenice da tačka A pripada ravni, definisaće vrednost parametra D koji se koristi za izračunavanje ortogonalnih rastojana od generisanih ravni i procenu greške ravnosti. Na osnovu ove tvrdnje razvijeno je odgovarajući programski sistem u MatLab-u.

Tabela 2. Rezultati greške ravnosti, referentne ravni i oblik digitalizovane površine

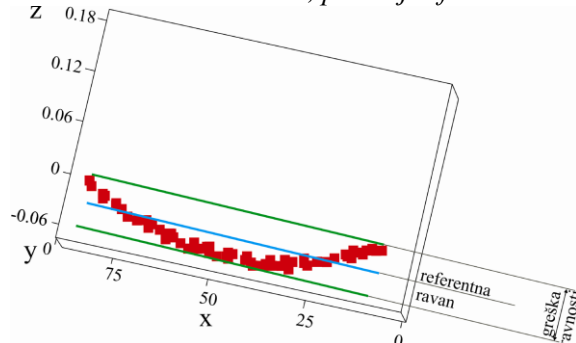
KMM Karl Ceiss Contura G2 RDS

Digitalizovana površina



Greška ravnosti $\delta=0.05191$ mm

Uzorkovane tačke, položaj referentne ravni

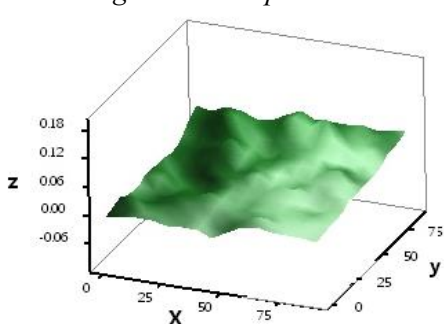


Jednačina referentne ravni

$$z = 9.755 \times 10^{-5} x + 1.039 \times 10^{-4} y + 2.48387$$

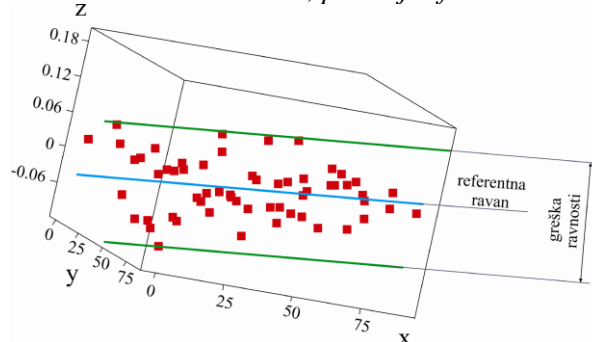
Merna ruka microscribe G2X digitizer

Digitalizovana površina



Greška ravnosti $\delta= 0.19697$ mm

Uzorkovane tačke, položaj referentne ravni

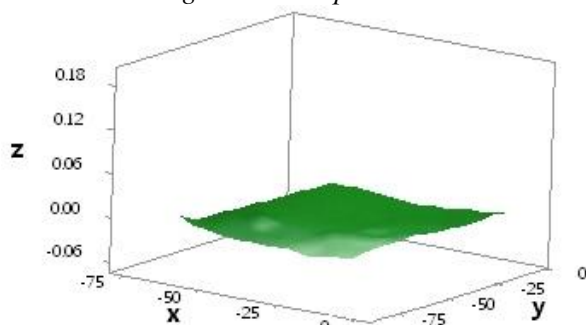


Jednačina referentne ravni

$$z = 3.948 \times 10^{-4} x + 7.902 \times 10^{-4} y - 0.03803$$

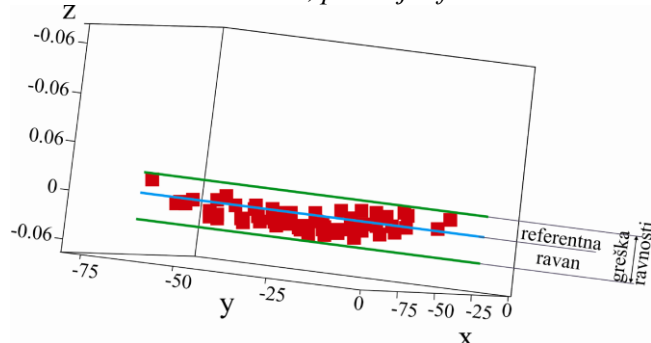
Merna ruka MCAx Nikon, model MCAx 20+

Digitalizovana površina



Greška ravnosti $\delta= 0.0427$ mm

Uzorkovane tačke, položaj referentne ravni

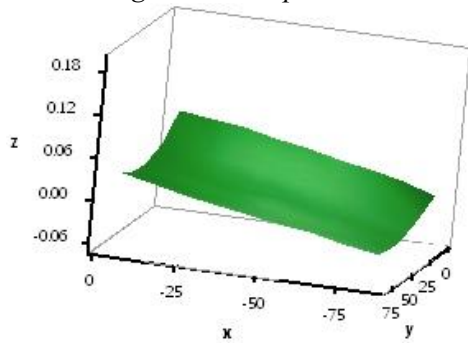


Jednačina referentne ravni

$$z = -5.68 \times 10^{-5} x - 1.2081 \times 10^{-4} y - 0.0073$$

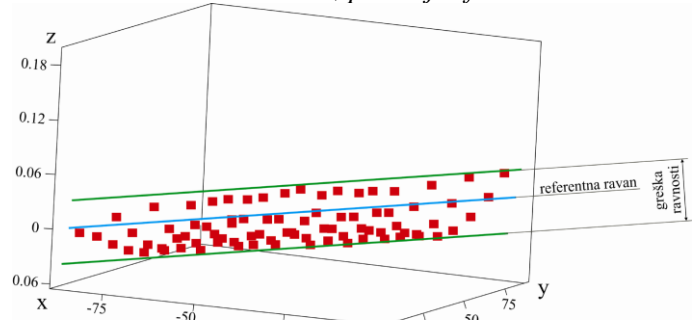
Linijski skener Gom Atos triple Scan

Digitalizovana površina



Greška ravnosti $\delta = 0.0635$ mm

Uzorkovane tačke, položaj referentne ravni

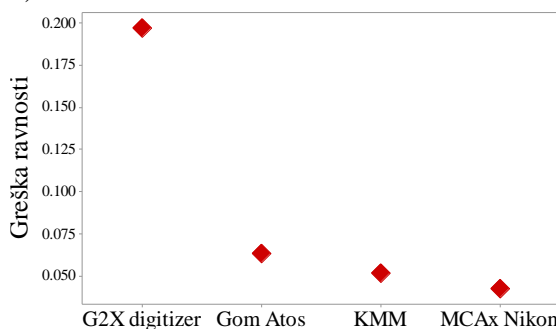


Jednačina referentne ravni

$$z = 7.383 \times 10^{-4} x - 3.835 \times 10^{-4} y + 0.0639$$

3. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Pre analize rezultata ravnosti potrebno je napomenuti da je MZ metoda osetljiva na strategiju uzorkovanja (broj i položaj mernih tačaka) naročito u slučajevima grube obrade sa znatnim odstupanjem oblika. Kako je bilo nemoguće izvršiti uzorkovanje posmatrane površine u istim položajima tačaka ovo je jedan od faktora koji čini da poređenje nije uzelo u obzir samo tačnost koordinatnog mernog sistema. U sva četiri slučaja uzorkovanje je vršeno u 60 mernih tačaka. Rezultati greške ravnosti, referentna ravan i oblik digitalizovane površine su dati u tabeli 2. Iz tabele se može zaključiti da merenje sa mernom rukom microscribe G2x digitizer značajno odskaka u odnosu na ostale merne sisteme (slika 1).



Sl. 1. Vrednosti greške ravnosti na različitim KMS

4. ZAKLJUČAK

Ovaj rad analizira greške ravnosti ravne glodane površine merene na različitim koordinatnim mernim sistemima. Istraživanja su pokazala interesante rezultate gde je, zbog obima rada, izostala ozbiljnija naučna diskusija. U cilju dokazivanja tačnosti KMS za ovaj merni zadatak potrebno je izvršiti kalibraciju ravne površine u cilju dobijanja referentne vrednosti.

5. REFERENCE

- [1] Weckenmann, A., Estler, T., Peggs, G., McMurtry, D.: *Probing systems in dimensional metrology*, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 53 (2), 657-684, 2004.
- [2] Pereira, P.H., Hocken, R.J.: *Characterization and compensation of dynamic errors of a scanning coordinate measuring machine*, Precision Engineering, 31(1), 22-32, 2007.
- [3] Kruth, J.P., Bartscher, M., Carmignato, S., Schmitt, S., De Chiffre, L., Weckenmann, A.: *Computed tomography for dimensional metrology*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 60(2), 821 - 842, 2011.
- [4] Ostrowska, K., Gaska, A., Kupiec, R., Sladek, J., K. Gromczak, K.: *Verification of articulated arm coordinate measuring machines accuracy using Laser Tracer system as standard of length*, MAPAN-Journal of Metrology Society of India, 31(4), 241-256, 2016.
- [5] Brajliah, T., Tasic, T., Drstvensek, I., Valentan, B., Hadzistevic, M., Pogacar, V., Balic, J., Acko, B.: *Possibilities of using three - dimensional optical scanning in complex geometrical inspection*, Strojniški vestnik, 57(11), 826-833, 2011.

Autori: Doc. dr Branko Štrbac, Prof. Dr. Miodrag Hadžistević, Univerzitet Novi Sad, Fakultet Tehničkih Nauka, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Tel: +381 21 485 2316. Goran Jotić, Univerzitet u Banja Luci, Mašinski Fakultet, Bulevar vojvode Stepe Stepanovića 71, Banja Luka 78000, Bosna i Hercegovina, Tel: +387 51 433109.

e-mail: strbacb@uns.ac.rs
miodrags@uns.ac.rs
goran.jotic@unibl.rs

SCIENTIFIC CONFERENCE WITH INTERNATIONAL PARTICIPATION
ETIKUM 2017

PROCEEDINGS

Session 2:
METROLOGY AND QUALITY CONTROL IN THE
BIOMEDICAL ENGINEERING

Novi Sad, 06 – 08 December 2017.

**SCIENTIFIC CONFERENCE WITH INTERNATIONAL
PARTICIPATION
ETIKUM 2017
NOVI SAD, SERBIA, DECEMBER 6-8, 2017**

Kostevšek, U., Brajljli, T., Balič, J., Moličnik, A., Vogrin, M., Hadžistević, S., Drstvenšek, I.

**INTERDISCIPLINARY COMMUNICATION IN ORTHOPEDIC SURGICAL
PLANNING**

***Abstract:** The paper describes a process of 3D planning of replacement of an acetabular component on a case of a defect with a huge bone loss estimated at level IIIa according to Paprosky. The planning was based on CT scans of the affected area and performed in interdisciplinary cooperation among surgeons and mechanical engineers. This cooperation combined surgical experiences and knowledge of surgeons with knowledge of engineers in using 3D design tools and mechanical calculation. The cooperation resulted in a virtual 3D plan and 3D printed communication models that enabled flawless communication among the team members. This led to a definition of optimal hip parameters (centre of rotation, inclination and version angles) in a virtual computer space. To transfer the virtually planned parameters and shapes into a real environment surgical equipment were custom made for the particular patient. These were surgical guides used to help the surgeon resect the femoral neck and to hold and guide the reamer while reshaping the acetabular cave. This way the centre of rotation, inclination and version angles were precisely transferred from a virtual computer space into the patient's hip. The implementation of the described procedure required some changes in the surgical process. To that purpose special documentation has been prepared that enables the surgeon to approve the surgical plan. Additionally, a user's guide was written that lists and describes all patient specific instruments and their use to enable a flawless surgical process.*

***Key words:** 3D pre-operative planning, selective laser sintering, hip, medical devices*

1. INTRODUCTION

Aging society and unhealthy life style leads to a raising number of total hip replacement interventions. Since the primary THRs are performed on ever younger patients the number of revisions is in a constant raise too [1]. Due to severe bone defects a major intervention is needed when replacing a worn out or displaced hip endoprosthesis. Two dimensional pre-operative planning [2], which is due to a simple process still in general use has several disadvantages that often lead to longer surgical procedures [3], inaccurate positioning of endoprosthesis [4], additional bone loss [5], limb length discrepancy [6], longer rehabilitation and also in increased overall costs [7].

Pre-operative estimation of bone structure, its potential loss and optimal positioning of endoprosthesis is difficult or almost impossible to implement when using 2D data taken from conventional x-rays. Only three-dimensional, spatial data of a bone defect provide enough information for precise positioning of endoprostheses, accurate preoperative planning and flawless surgical process.

Y. Inaba et al. [8] investigated the efficacy of pre-operative planning for implant placement with

consideration of pelvic tilt in THA, and the accuracy of a CT based computer navigation for implant positioning. The research found that the Mean absolute error of combined anteversion between preoperative planning and post-operative measurement was 5° with use of the CT based navigation.

A. J. Hughes et al [9] have conducted a 3D pre-operative plan for surgery of two patients on the life size 3D models of the pelvis, which were manufactured from computed tomography scans by selective laser sintering. Acetabular reconstruction was planned, trialed, and managed efficiently with improved surgical precision and reduced complications. The accuracy and cost effectiveness of this technique were impressive and its increasing use should prove invaluable as a tool to aid clinical practice and education in the future.

Our research goes beyond the described investigation methods by providing the surgeons with patient specific resection guides that assure correct placement of the endoprostheses and less complications during the surgery.

2. METHOD

Conventional 2D pre-operative planning is

performed on the anteroposterior (AP) pelvic radiography which directly provides the data about the inclination angle and the centre of hip's rotation. The version angle can only be calculated indirectly given that the lesser trochanter is visible in the radiograph and that its size can be reliably defined. This fact and a lack of reliable anatomical landmarks accessible during the surgery make 2D planning outdated and inappropriate for modern THA operations [10].

2.1 A. Identifying anatomical landmarks on the bone structures

Anatomical landmarks are intra-operational, easily accessible bone structures that are clearly visible on the radiographic images. These usually include medullary canal (shaft), the greater and lesser trochanter, the acetabular roof, saddle and the teardrop [10].

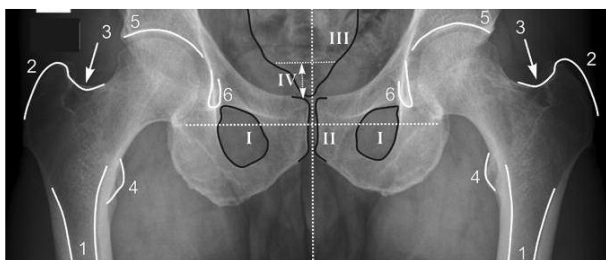


Fig. 1. Anatomical landmarks: 1. Femoral shaft; 2. Greater trochanter; 3. "Saddle"; 4. Lesser trochanter; 5. Acetabular roof and 6. Teardrop [10].

The problem of anatomical landmarks is that most of them are only visible on the radiographic images (some even as a result of overlapping bone structures) but most of them cannot be seen "in vivo" during the surgery.

2.2 B. Identifying mechanical references

Mechanical references are distances among different landmarks that define the functionality of the hip joint.

After the THA operation, the hip movement has to be restored into its anatomical state. This can only be assured by a proper definition of mechanical references, e.g. original acetabular and femoral rotation center, the femoral and acetabular offset and the leg length.

The measurements shown in Fig. 2 are unreliable because they depend on the circumstances of the 2D radiograph acquisition its magnification factor and the influence of the version angles unidentifiable in the 2D plane of the radiograph [10]. In a 3D space obtained from the CT, datasets all the measurements are done

directly and their precision only depends on the accuracy of the CT scanner, which is always precise enough for the surgical purposes as has been shown in this research.

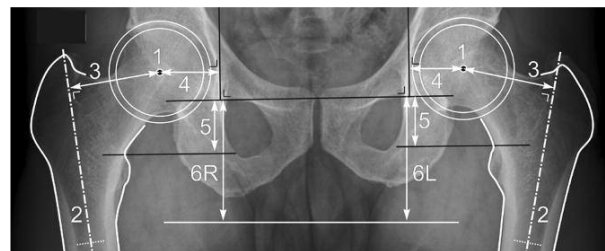


Fig. 2. Mechanical references: 1. Hip rotation centre; 2. Longitudinal axis of the proximal femur; 3. Femoral offset; 4. Acetabular offset; 5. Hip length. ("Leg length discrepancy" - distances between the 6L and 6R) [10].

2.3 Optimizing implant positioning to restore hip biomechanics

Positioning of endoprostheses in the 2D plane of the radiograph relies on different templates provided by the implant manufacturer. By placing the template over the radiograph the surgeon defines the direction, the centre of rotation, position and size of the endoprosthesis [10]. The accuracy of this process depends on the magnification of the radiograph. In the 3D space the surgeon can use 3D models of implants that can be virtually placed into the femur thus simulating the real outcome of the THA. Additionally, the size of the defect, bone density and its quality can be foreseen in the 3D model. 3D planning includes, a full overview of the shape of the bone structures and size of the defect.

2.4 3D pre-operative planning

To overcome the obstacles of 2D surgical planning we have combined its benefits with the possibilities of the 3D space. This is obtained by the reconstruction of bone structures from the CT scans. The reconstruction starts by segmentation of DICOM data and transformation of the segmented dataset into a 3D file, usually in STL format.

Prior to the 3D surgical planning process a coordinate system has to be defined, which corresponds to the established surgical practice. According to the method of the research Baauw M. et al. [11] we defined the Cartesian coordinate system of three planes (sagittal coronal and transversal) using 3D landmarks found in the STL model. The 3D planning consist of two phases. In the first phase we defined the anatomical parameters of the hip joint and in the second phase we have modelled the devices to transfer the

defined parameters into the patient's body.

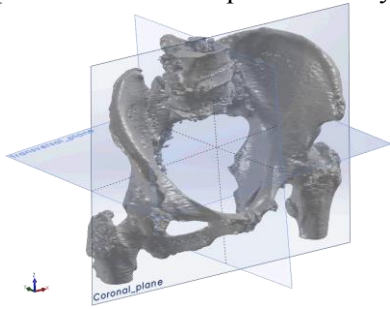


Fig. 3. Individual Cartesian coordinate system of three planes (sagittal coronal and transversal).

The anatomical parameters are version and inclination angles and the center of rotation. In the 3D space they can be precisely defined by the use of geometrical primitives and Boolean operators provided by the CAD software package. By placing the primitives into the virtual bone structure we have measured and calculated the anatomical parameters of the hip with the accuracy and reliability not possible in the 2D planning process. By Boolean operators we have subtracted the bone structure from the geometrical primitives in order to model the devices that can be produced in the reality. These devices were used during the surgery as patient specific resection guides that helped the surgeon to maintain the calculated anatomic parameters in the operational space. Resection guide is intended solely for the inter-operational use to transfer the references of the virtual coordinate system into the patient's body, thus facilitating the achievement of planned parameters (CR, INC AV).

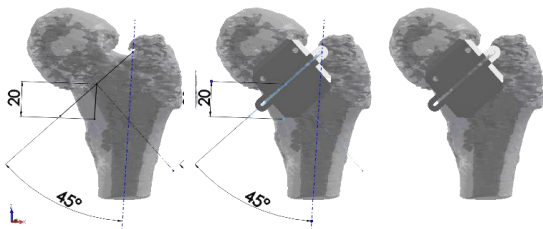


Fig. 4. Individual medical devices for the femoral resection.



Fig. 5. Guides for the femoral resection.

3. RESULTS

The described method has been clinically tested on 5 patients. We have obtained the

informed consent. For all of them the above described method has been used. In the continuation we are presenting the results of post-operative CT analysis of the patient that suffered from primary osteoarthritis type IIA according to the Paprosky classification system.

Table 1 shows the difference between the planned and post-operative position (Centre of Rotation) of the implant.

Table 1. Data of planned and post-operative centers of rotation in the mm

Transversal plane	Planned	Post-operative	Difference
CR_FE	95,82	95,77	0,05
CE_AC	95,82	95,50	0,32
Sagittal plane	Planned	Post-operative	Difference
CR_FE	46,87	46,28	0,59
CE_AC	46,87	46,32	0,55
Coronal plane	Planned	Post-operative	Difference
CR_FE	1,91	2,97	1,06
CE_AC	1,91	3,16	1,25

The results in Table 1 show that the largest deviation between the planned and actual position occurs in the coronal plain (1,25 mm). The absolute spatial difference is 1.40 mm. The differences are at the border of the CT scanner's accuracy and therefore negligible.

Table 2 represent the differences in the orientation of the implanted endoprosthesis (INC and AV).

Table 2. Comparison of planned and post-operative angles of inclination (INC)

Inclination	Planned	Post-operative	Difference
INC_FE	135 °	132,73 °	2,27 °
INC_AC	40,75 °	41,53 °	0,78 °

Table 3. Comparison of planned and post-operative angles of anteversion (AV)

Anteversion	Planned	Post-operative	Difference
AV_FE	15,13 °	13,98 °	1,15 °
AV_AC	26,73 °	24,77 °	1,96 °

The difference between planned and post-operative inclination of the femur is relatively high as compared to other orientation angles (2,27°). This is due to an unreliable definition of the femoral anteversion that can only be defined according to the direction of the condyles in the knee joint, which are not visible in the CT of the

pelvis area. Therefore, the femoral anteversion has been measured against the position of the pelvis. This measurement depends on the position of the leg during scanning. Even though the difference of the femoral anteversion is almost negligible if compared to the results of the conventional, 2D planning. Much less difference occurred between planned and post-operative inclination of the acetabulum, which measures 0,78 °.

4. CONCLUSION

One of the main challenges in hip arthroplasty is correct determination of kinematic relations in the hip joints. Accurate insertion of the hip endoprosthesis according to a pre-operationally planned position and orientation is still a problem. Conventional determination of size and position of the prosthesis based on 2D radiographic image often leads to intra-operational complications, because of the lack of data in the 2D radiographic image and because of the missing “in vivo” references that would enable the surgeon to position the implant exactly into the planned position. The surgeons are trying to compensate the disadvantages of 2D planning with their experience. An increase in the requirements for revision surgery suggests that more attention should be paid to the exact restoration of the hip biomechanics. The 3D reconstruction of pelvic bones from the CT scanning data, and 3D pre-operational planning simplifies the operational process and makes it more accurate. The accuracy of the implant’s insertion is ensured by patient specific resection guides that fit perfectly to the morphology of the patient’s pelvic bones, thus assuring the planned positioning and functioning of the prostheses.

5. REFERENCES

- [1] Levašič V., Pišot V., Milošev I.: *Arthroplasty Register of the Valdoltra Orthopaedic Hospital and implant retrieval program*, Article in Zdravniški vestnik 78, Ljubljana, 2009
- [2] Huppertz A., Radmer S., Wagner M., Roessler T., Hamm B., Sparmann M.: *Computed tomography for preoperative planning in total hip arthroplasty: what radiologists need to know*. Skeletal Radiol 43:1041–1051 DOI 10.1007/s00256-014-1853-2, (2014)
- [3] Blackley HR,: *Planning and management of the difficult primary hip replacement: preoperative planning and technical considerations*. Instr Course Lect: 49, 2000

- [4] McAuley JP,: *Preoperative planning to prevent dislocation of the hip*, Orthop Clin North Am;32:4., 2001
- [5] Haddad FS,: *Femoral bone loss in total hip arthroplasty: classification and preoperative planning*. Instr Course Lect :49, 2000
- [6] Suh KT,: *Comparison of preoperative templating with postoperative assessment in cementless total hip arthroplasty*, Acta Orthop Scand ;75:1, 2004
- [7] Goldstein WM,: *Leg length inequality in total hip arthroplasty*. Orthopedics; 28(9 Suppl), 2005
- [8] Inaba Y., Kobayashi N., Suzuki H., Ike H., Kubota S., Saito T,: *Preoperative planning for implant placement with consideration of pelvic tilt in total hip arthroplasty: postoperative efficacy evaluation*, BMC Musculoskeletal Disorders, 17:280, DOI 10.1186/s12891-016-1120-x, 2016
- [9] Hughes A. J., DeBuitelir C., Soden P., O’Donnchadha B., Tansey A., Abdulkarim A., McMahon C., Hurson C. J.: *3D Printing Aids Acetabular Reconstruction in Complex Revision Hip Arthroplasty Hindawi Publishing Corporation, Advances in Orthopedics, Volume, Article ID 8925050, 7 pages, 2017*
- [10] Scheerlinck T,: *Primary hip arthroplasty templating on standard radiographs A stepwise approach*. Acta Orthop. Belg., 76, 432-442, 2010.
- [11] Baauw M., Hellemond van G.G., Hooff van M.L., Spruit M,: *The accuracy of positioning of a custommade implant within a large acetabular defect at revision arthroplasty of the hip*. Bone Joint J; VOL.97-B: No.6, 780-785, 2015

Authors: Urška Kostevšek MSc, Assis. dr. Tomaž Brajljih, prof. dr. Jože Balič, Assis. dr. Andrej Moličnik, prof. dr. Matjaž Vogrin, dr. Snezana Hadžistević, and prof. dr. Igor Drstvenšek,

Institute: Faculty of Mechanical Engineering, University of Maribor; University Medical Centre Maribor and Medical Faculty, University of Priština-Kosovska Mitrovica
City: Maribor and Priština-Kosovska Mitrovica
Country: Slovenia and Serbia

Email: urska.kostevsek@um.si,
tomaz.brajlih@um.si,
joze.balic@um.si,
andrej.molicnik@gmail.com,
matjaz.vogrin@um.si,
s.hadzistevic@med.pr.ac.rs,
igor.drstvensek@um.si

Karpe, B., Vodlan, M., Kopač, I., Nagode, B., Puškar, T., Pavlič, A., Taubmann, H., Gojić, M., Bizjak, M., Kosec, B.

THERMAL PROPERTIES OF DENTAL MATERIALS

Abstract: Today almost all manufacturers of dental materials in their certificates of material quality describe material chemical composition, mechanical properties, process ability and aesthetic characteristics, while information about thermal properties are not available.

Within the interdisciplinary and international teamwork, thermal properties of five selected dental materials were measured, by modern transient plane source method (Hot disk) in accordance with standard ISO 22007-2. Thermal properties were measured at temperature interval between 7 °C and 45 °C.

Key words: Dental materials, Thermal properties, Measurement.

1. INTRODUCTION

The thermal properties of dentine and tooth enamel affects the rate of response of the tooth nervous system to the temperature changes to which the tooth is exposed on a daily basis. In addition to strength and aesthetic requirements, artificial dental materials must also provide a similar thermal protection for the tooth pulp. Likewise, implants and artificial tooth crowns must transfer similar heat flow to the bone as is transferred by a natural tooth, which has a strong influence on the patient's general acceptance of the foreign body (Figure 1).

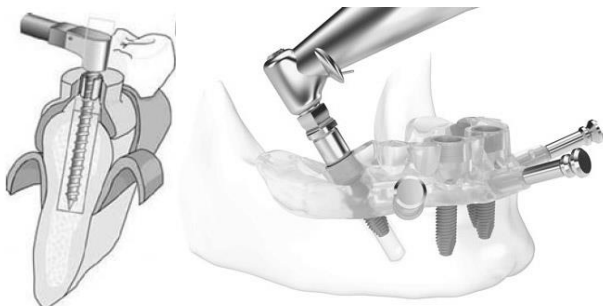


Fig. 1. An example of insertion of the dental implant into the jawbone.

Manufacturers of dental materials in their certificates of material quality describe chemical composition, mechanical properties, machinability and aesthetic characteristics, while thermal properties of the material are rarely given.

The reported values of human teeth thermal properties show significant discrepancies, with data for thermal conductivity of dentine between 0.11 to 0.98 Wm⁻¹ K⁻¹, and 0.7 to 0.8 Wm⁻¹ K⁻¹ for tooth enamel, while thermal diffusivity varies

between 0.058 to 0.269 mm²/s and 0.092 to 0.42 mm²/s for dentin and enamel respectively. The significant discrepancy between the reported results may be attributed to several challenges associated with the measurements, like tooth heterogeneous microstructure and associative anisotropic thermal properties, difficulties at establishing perfect thermal contact or lack of precise emissivity data when axial heat flow or laser flash measuring methods are applied. Thermal conductivity, specific heat and thermal diffusivity are basic thermal properties of material that determine the heat transfer in the system under consideration. Despite the remarkable progress of measuring methods and techniques, it is still difficult to determine them with an error of less than ±2 %, even for bulk materials.

In our research, we used one of the most advanced instruments for determining the thermal properties, Hot Disk TPS 2200, a product of Hot Disk AB company, Gothenburg, Sweden. The instrument can be used for determining thermal properties of various materials including pure metals, alloys, minerals, ceramics, plastics, glasses, powders and viscous liquids with thermal conductivity in the range from 0.01 to 500 W/mK, thermal diffusivity from 0.01 to 300 mm²/s and heat capacity up to 5 MJ/m³K. Measurements can be performed in a temperature interval between -50 up to 750 °C.

Hot disk measuring method is a transient plane source technique (TPS). Based on the theory of TPS, instrument utilizes a sensor element in the shape of 10 μm thick double spiral (Figure 2), made by etching from pure nickel foil. Spiral is mechanically strengthened and electrically insulated on both sides by thin polyimide foil (Kapton ®Du

Pont) for measurements up to 300 °C or mica foil for measurements up to 750 °C. Sensor acts both as a precise heat source and resistance thermometer for recording the time dependent temperature increase. During measurement of solids, encapsulated Ni-sensor is sandwiched between two halves of the sample and constant precise pre-set heating power is released by the sensor, followed by 200 resistance recording in a pre-set measuring time, from which the relation between time and temperature change is established. Based on time dependent temperature increase of the sensor, thermal properties of the tested material are calculated.



Fig. 2. Sensor element (yellow-Kapton, gray-Mica) (left), sensor sandwiched between two halves of a sample during measurement (right).

In our study, we measured thermal properties of five important dental materials, used at the Department of Dental Prosthesis of the Medical Faculty, University of Ljubljana. Tested materials were Yttrium stabilized Zirconium ceramics (3Y-TZP), polymer material PMMA, 99 % pure titanium, titanium alloy TiAl6V4, and CoCr alloy. Thermal properties were measured in the temperature interval that teeth are most frequently exposed, 7 °C, 22 °C, and 45 °C.

2. EXPERIMENTAL WORK

Measurements and analysis of thermal properties of selected dental materials were performed in accordance with ISO 22007-2 standard in the Laboratory for measurements, Chair of Thermal Engineering, Faculty of Natural Sciences and Engineering, University of Ljubljana (Figure 3).

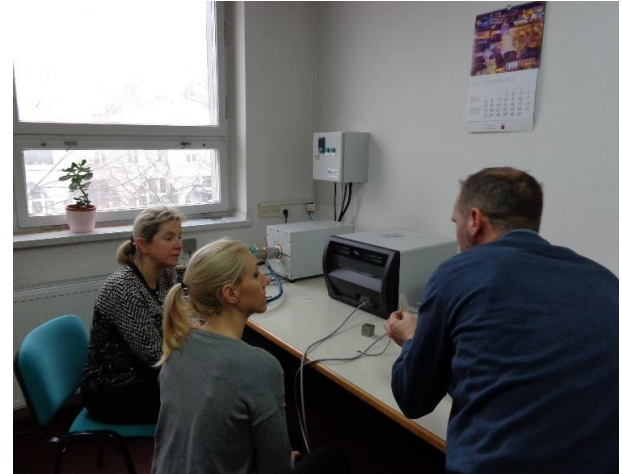


Fig. 3. Measurements in the Laboratory for measurements, Chair of Thermal Engineering, Faculty of Natural Sciences and Engineering, University of Ljubljana.

A few decades ago, yttria (Y_2O_3) stabilized zirconium oxide ceramics (3Y-TZP (3mol.% yttrium tetragonal zirconia polycrystals)), with significantly improved mechanical properties compared to silicate ceramics and glass ceramics was introduced into dental medicine. 3Y-TZP is available in dentistry for the fabrication of dental crowns and fixed partial dentures. Its flexural strength reaches 900 – 1200 MPa and fracture strength about $9 - 10 \text{ MPa(m)}^{1/2}$.

Dental crowns are processed either by soft machining of pre-sintered blocks followed by subsequent sintering, or by hard machining of fully sintered blocks. Thermal properties were measured on pre-sintered blocks, so an approximately 10 % higher values can be expected when fully sintered, due to density increase. Differences of thermal properties at various temperatures were below normal error ($\pm 2 \%$) of the measuring method.

Table 1. Thermal properties of 3Y-TZP pre-sintered blocks (temperature interval form 7 to 45 °C)

Measurement	Thermal conductivity [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	Thermal diffusivity [mm^2s^{-1}]	Thermal capacity [$\text{MJm}^{-3}\text{K}^{-1}$]
Average	0.502207	0.345667	1.4532
SD	0.003668	0.005445	0.023825

The first use of polymethyl methacrylate (PMMA) as a dental material was for the fabrication of complete denture bases. Today's practise use multilayered CAD/CAM milling disks for long-term temporary restorations, short-term provisionals and as a prototype for implant restorations. Our tested PMMA material is intend for the production of temporary crowns and bridges or provisional units. Compared to 3Y-TZP ceramics, it is better insulating material. Measurements show no significant change of thermal properties in the temperature interval from 7 °C to 45 °C.

Table 2. Thermal properties of PMMA blocks (temperature interval form 7 to 45 °C)

Measurement	Thermal conductivity [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	Thermal diffusivity [mm ² s ⁻¹]	Thermal capacity [MJm ⁻³ K ⁻¹]
Average	0.198583	0.111883	1.783583
SD	0.002878	0.008506	0.113532

Titanium and its alloys are used in dentistry because of their resistance to electrochemical decomposition, excellent compatibility with live tissues, easily combine with bone (osseointegration), are relatively light (4,61g/cm³) and have high tensile (450 MPa) and yield (275 MPa) strength. Titanium forms a very persistent oxide layer on the surface, formed in a few nanoseconds. Because of this oxide layer, it is corrosion-resistant and biocompatible. It is used for manufacturing of dental implants, crowns, braces, bridges, partial prostheses and orthodontic wires. Commercially pure titanium (impurities < 1%) disks were measured in the temperature interval between 7 °C and 45 °C, and as expected, changes of thermal properties were negligible.

Table 3. Thermal properties of pure Ti disks (impurities < 1%, temperature interval form 7 °C to 45 °C)

Measurement	Thermal conductivity [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	Thermal diffusivity [mm ² s ⁻¹]	Thermal capacity [MJm ⁻³ K ⁻¹]
Average	22.546	6.7196	3.36
SD	0.356573	0.265174	0.123366

TiAl6V4 (Grade 5: 6% Al, 4% V, 0.25% > Fe and 0,2% > O (bal. Titanium)) is the most commonly used titanium alloy in dentistry. It is significantly stronger ($R_m > 895$ MPa, $R_{p0,2} > 828$ MPa) than commercially pure titanium while having the same stiffness. This grade is an excellent combination of strength, corrosion resistance, weldability and machinability, and has good osseointegration properties. Alloying elements reduce thermal conductivity and

diffusivity considerably compared to commercially pure titanium. In the temperature interval between 7 and 45 °C thermal properties can be considered as constant.

Table 4. Thermal properties of TiAl6V4 disks (temperature interval form 7 °C to 45 °C)

Measurement	Thermal conductivity [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	Thermal diffusivity [mm ² s ⁻¹]	Thermal capacity [MJm ⁻³ K ⁻¹]
Average	6.668286	2.809286	2.375857
SD	0.051146	0.083763	0.073172

Co-Cr alloys exhibit material properties considered suitable for dental reconstructions, such as high tensile (900 - 1000 MPa) and yield (640 - 700 MPa) strength, high modulus of elasticity (> 200 GPa), and high corrosion resistance, and are the most common base-metal alternative for patients known to be allergic to nickel. They are relatively inexpensive compared to noble alloys and somewhat easier to manipulate than titanium alloys.

Table 5: Thermal properties of CoCr dental alloy (temperature interval form 7 °C to 45 °C)

Measurement	Thermal conductivity [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	Thermal diffusivity [mm ² s ⁻¹]	Thermal capacity [MJm ⁻³ K ⁻¹]
Average	10.735	2.82825	3.79775
SD	0.01118	0.063637	0.083431

In dentistry, Co-Cr alloys are commonly used for the fabrication of metallic frameworks of removable partial dentures, as metallic substructures for the fabrication of porcelain-fused-to-metal restorations and implant frameworks. The increased worldwide interest in utilizing Co-Cr alloys for dental applications is related to their low cost, excellent biocompatibility and adequate mechanical properties. Chemical composition of tested sample is complex including 63% Co, 24% Cr, 8% W, 3% Mo, 1% Si, ≈1% Nb and trace elements < 0.1%. As with other samples, thermal properties can be considered as constant in measuring temperature interval.

3. CONCLUSIONS

Measurements and analysis of the thermal properties of selected characteristic dental materials were performed using the Hot Disk method on the Hot Disk TPS 2200 in accordance with ISO 22007-2 in the Laboratory for measurement of the Chair of Thermal Engineering, Department of Materials and Metallurgy, Faculty of Natural Sciences and

Engineering, University of Ljubljana. The teeth and dental supplements are most often exposed to temperatures at an interval between 0 °C and 50 °C, which was the reason why we selected this temperature interval to perform our measurements. We found that for all dental materials there is no significant difference in thermal properties in this temperature interval and can be considered as constant. As expected, metallic materials transmit heat much faster than tooth structure, while ceramics have thermal properties similar to teeth. With the performed measurements, we have completed the existing material quality certificates of dental materials with their thermal properties.

4. REFERENCES

- [1] B. Kosec, B., Karpe, Instrument for thermal properties analysis Hot Disk TPS 2200, IRT3000, 70 (2017),. 67.
- [2] Internal script Hot Disk AB; Hot Disk Thermal Constants Analyser, Instruction Manual, Revision date 2014-03-27.
- [3] A. B. Auklend Kroh, Measurement of conductivity of intumescent materials (Degree of Master of Science). University of Bergen, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Bergen, 2009.
- [4] C. Scheller-Sheridan, Basic Guide to Dental Materials, Wiley-Blackwell. Dublin, 2010.
- [5] I. Budak, B. Kosec, M. Sokovic, Application of contemporary engineering techniques and technologies in the field of dental prosthetics, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 54(2012) 2, 233-241.
- [6] J. J. Manappallil, Basic Dental Materials, Jaypee Brothers, New Delhi, 2003.
- [7] Certificate CC DISK Ti2, Interdent d.o.o., Celje, 2014.
- [8] Certificate CC DISK Ti5, Interdent d.o.o., Celje, 2014.
- [9] Certificate CC DISK NF Co-Cr, Interdent d.o.o., Celje, 2014.

Authors: Ass. Prof. Dr. Blaž Karpe, Assoc. Prof. Dr. Aleš Nagode, Prof. Dr. Milan Bizjak, Prof. Dr. Borut Kosec, University of Ljubljana, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenia, Phone: +386 1 2000413, Fax: +386 1 4704560. **Mateja Vodlan**, LEK d.d., Verovškova 57, 1526 Ljubljana, Phone: +386 1 5802111, Fax: +386 1 5683517. **Assoc. Prof. Dr. Igor Kopač**, **Assoc. Prof. Dr. Alenka Pavlič**, University of Ljubljana, Faculty of Medicine, Korytkova 2, 1000 Ljubljana, Slovenia, Phone: +386 1 5224268, Fax: +386 1 5222504. **Assoc. Prof. Dr. Tatjana Puškar**, University of Novi Sad, Faculty of Medicine, Hajduk Veljkova 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Phone: +381 21 526120, Fax: +381 21 6613262.

Henry Taubmann, C3 Prozess und Analysentechnik GmbH, Peter Henlein Str. 20, Munich, Germany, Phone: +49 89 45600670, Fax: +49 89 45600670. **Prof. Dr. Mirko Gojić**, University of Zagreb, Faculty of Metallurgy, Aškerčeva 6, 1000 Sisak, Croatia, Phone: +385 43 533 381, Fax: +385 43 533 381.

E-mail: blaz.karpe@omm.ntf.uni-lj.si
vodlan@gmail.com
igor.kopac@mf.uni-lj.si
ales.nagode@omm.ntf.uni-lj.si
tpuskar@uns.ac.rs
alenka.pavlic@mf.uni-lj.si
h.taubmann@c3-analysentechnik.de
gojic@simet.hr
milan.bizjak@omm.ntf.uni-lj.si
borut.kosec@omm.ntf.uni-lj.si

Pantić, M., Mitrović, S., Babić, M., Džunić, D., Jevremović, D., Jevremović, A., Kanjevac, T.

IN VIVO STUDY OF THE NANOMECHANICAL PROPERTIES OF LEUCITE GLASS CERAMIC PREPARED WITH DIFFERENT SURFACE FINISHING PROCEDURES

Abstract: This paper reports the nanomechanical properties of Leucite glass ceramic prepared with three different surface finishing procedures: polishing, glazing and grinding, using the Nanoindenter. Also, AFM analysis was done in order to determine the roughness parameter R_a . The nanoindentation were performed in order to define the hardness (HV) and Young's modulus (E) of the surface structure using Berkovich diamond pyramid and the experiment was organized in a 3x4 array. Indentation imprints were investigated using the optical and Atomic Force Microscopy. The obtained results of nanomechanical properties mostly depend of applied surface finishing procedures.

Key words: Leucite glass ceramic (LGC), different finishing procedure, nanoindentation, AFM analysis.

1. INTRODUCTION

The aesthetic and biomechanical properties of dental materials mostly depend of the distribution and particles size, as well as the concentration of the crystals in the structure of material itself [1]. Leucite glass ceramic (LGC) is all-ceramic system which is characterized by high aesthetic quality thanks to the high and flexible translucency of the material itself. LGC have flexural strengths of 120-150 MPa and material usually can be used in the dental restoration such as veneers, inlays, onlays and one anterior crowns [2,3].

The mechanical properties of ceramic materials largely depend of the surface roughness and structural defects of the material itself. Porosity has a major influence on the mechanical properties of ceramic materials, where the mechanical properties of the material significantly decreasing with pronounced porosity [4]. The indentation test allows useful information's about mechanical properties of investigated material, such as hardness, Young's modulus, induced stresses, work hardening and residual thermal stresses [5,6].

The aim of this study is to identify the nanomechanical properties of Leucite (*IPS e.max CAD, Ivoclar Vivadent*), prepared with three different finishing procedures: polishing, glazing and grinding, using the *Anton Paar* Nanoindenter. The obtained results of nanoindentation measurements were performed in order to define the hardness (HV) and the Young's modulus (E) of the surface structure as a function of the applied indentation load.

2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

2.1 Material and sample preparation

Commercial material *IPS Empress CAD (Ivoclar*

Vivadent, Lichtenstein) is all-ceramic material based on the leucite phase system $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$ designed for CAD/CAM technology. Chemical composition of Leucite is: SiO_2 60-65% wt., Al_2O_3 16-20 % wt., K_2O 10-14 % wt., Na_2O 3.5-6.5 % wt., others oxides 0.5-7 % wt. and pigments 0.2-1 % wt.

Experimental investigations were realised on 3 samples with dimensions 18x14x12 mm.

Before testing, all samples were firstly crystallized in a furnace at a prescribed temperature according to manufacturer's instructions. The contact surfaces of samples were prepared with different finishing procedure: polishing, glazing and grinding. The first sample was polished using different diamond sandpaper (280, 400, 600, 800, 1200 and 2000) by polishing machine. After that was done fine polishing using the liquid emulsion with grain size of 6 and 0.04 μm (DP-suspension, and the O-M In Suspension). The contact surface of the second sample was glazed according to the manufacturer's recommendations (with vacuum, 400 °C entry temperature, 730 °C high temperature for 1 min) [7]. On the end, contact surface of the third samples was grinded by using diamond borer (Medin, ISO: 806 314 146 534 016, 150 μm – max).

The surface of the all samples was cleaned with 70 % alcohol before every test, in order to remove any remaining surface contaminants.

2.2 Nanoindentation

Nanoindentation of LGC samples was done using *Anton Paar* Nanoindenter.

Table 1 shows the defined conditions of nanoindentation test. The experiment was realized in a 3x4 array and hence each test was repeated three times. Distance between centres of imprints was 30 μm . The Poisson's ratio for LGC is 0.225 [8].

Table 1. Defined conditions of nanoindentation test

Test method
- Berkovich three-sided diamond pyramid
- Ambient temperature: 23±2 °C
Loads
- 50, 100, 200 and 400 mN
The loading and unloading rate
- 100 mN/min for load of 50 mN
- 200 mN/min for load of 100 mN
- 400 mN/min for load of 200 mN
- 800 mN/min for load of 400 mN
Maximum load holding time
- 10 s

The study obtained values of Hardness (HV) and Young's modulus (E) on all samples. All indentation imprints were analysed by the optical and AFM microscopy.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Nanomechanical tests were preceded by the AFM analysis in order to determine the roughness parameters Ra of polished surface (Ra = 6.773 nm), glazed surface (Ra = 19.708 nm) and grinding surface (Ra = 0.686 μm). AFM have been described thoroughly in a previous publication [9].

Surface roughness has a big influence on the many things as well as aesthetic of the contact surface of material itself, changing color on the dental restoration, secondary caries and gingival irritation, and the mutual wear of contact surfaces of teeth and antagonists (natural tooth or dental restoration). The most main goal in esthetic dentistry is that the finishing procedure of the contact surface of material should be as smooth as possible [2,8].

The Figure 1 shows the obtained results of nanoindentation values, hardness (HV) and Young's modulus (E). Results are presented as mean values of all measured parameters obtained as the arithmetic mean of the three repeated tests.

From the presented Figure 1 it can be clearly seen that the highest value of hardness and Young's modulus has a glazed sample. Also, Figure 1 shows clearly visible trend for polished and glazed surfaces that hardness and elastic modulus decreases in a very

small range with increasing normal load. Grinding does not have a trend as polished and glazed surfaces probably due to the pronounced surface roughness at the place of testing. The contact between the Berkovich indenter and the surface of the sample is realized mostly per tops of roughness.

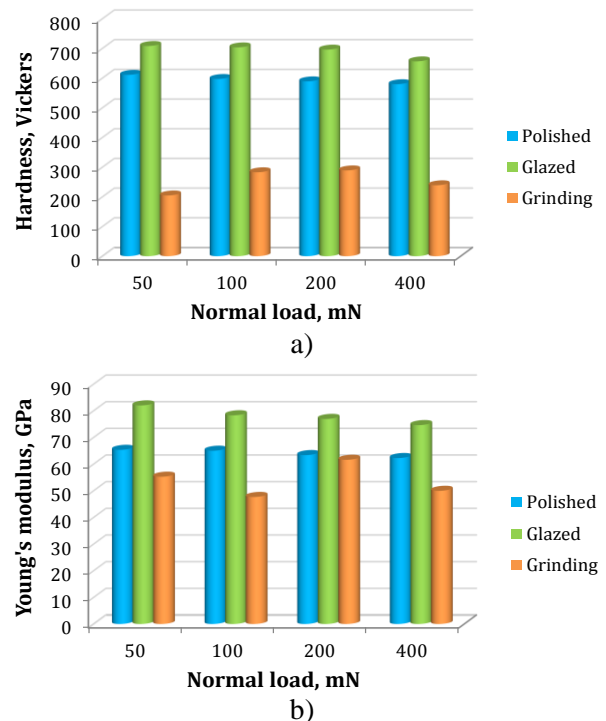


Fig. 1. Nanoindentation values of LGC under different finishing procedures: a) Hardness (HV) and (b) Young's modulus (E).

The phenomenon of decreasing hardness by increasing the indentation load is known under the term "Indentation size effect (ISE)" [10,11]. Figures 1a and 1b clearly show that the glaze has a significant impact on the obtained results, ie, provides better mechanical properties of the material itself. The mean value of glazed hardness is ~ 70 Vickers larger compared to the polished surface.

Figure 2 shows the load-displacement curves for different prepared samples of LGC as mean values of three indentations for loads 50, 100, 200 and 400 mN. The curves have proper form and clearly show that it is maximum load holding time properly selected [12,13].

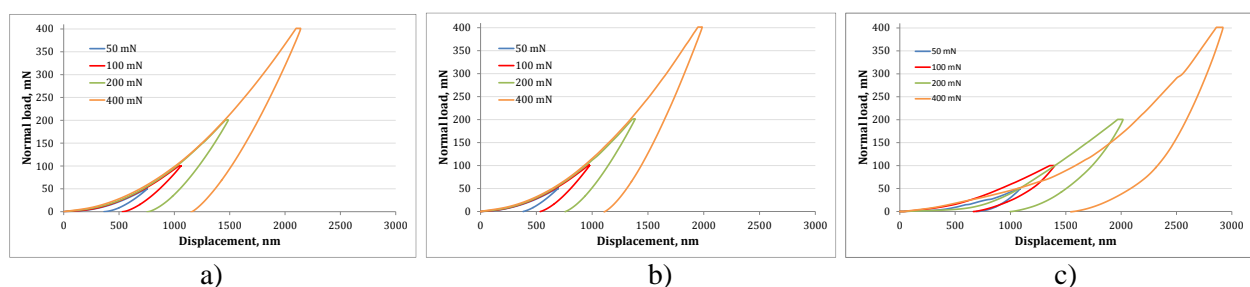


Fig. 2. Load-displacement curves for LGC under: a) polished, b) glazed and c) grinding.

The Figure 2 show that the indenter displacement is proportionally increasing with the increase of normal load. It can be clearly seen from presented curves that there is no differences in indentation curves for polished and glazed tested samples (Figures 2a and 2b), while the grinding curve (Figure 2c) has a mild deviation from the previous two surfaces. What is obvious is that the different surface roughness in the contact zone have a big impact on the obtained results.

Figure 3 shows representative indentation imprints (400 mN) of LGC under different finishing

procedure, obtained on optical (x100) and Atomic Force Microscopy. Nanoindentation on grinding sample was presented just by optical microscopy because it was impossible to find indentation imprints on AFM due to their small size of imprints and big surface roughness of the material.

Indentation imprints are clearly formed with visible edges in the surface layer of material. On Figures 3a and 3b around imprints it can be noticed mild plastic deformation (brighter zone), as a result of displacement of material (piling-ups) during the penetration of indenter.

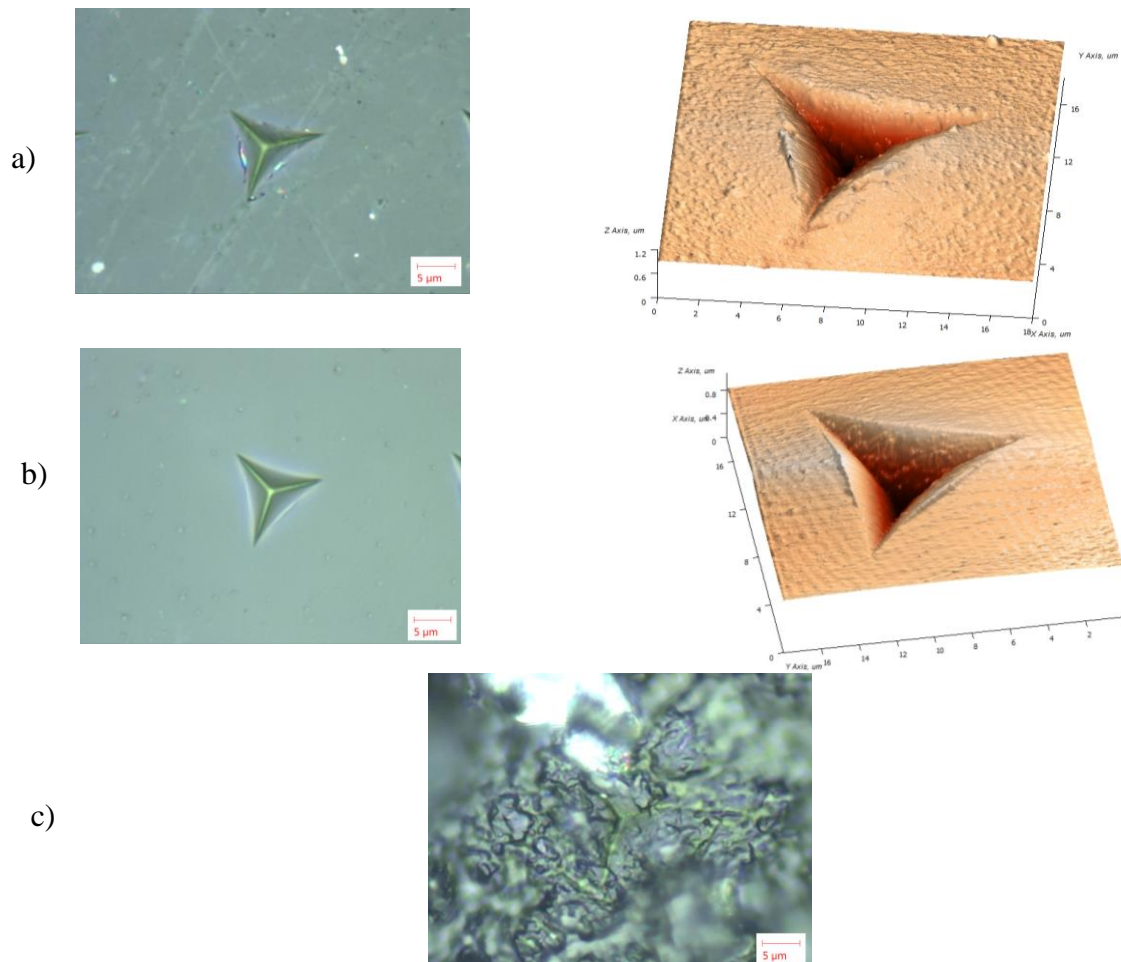


Fig. 3. Indentation imprints of LGC under different finishing procedure analysed by optical (left, x100) and AFM microscopy (normal load of 400 mN) (right): a) polished surface; b) glazed surface; c) grinding surface.

Plastic creep of material on the along the side of the indentation marks can be considered as the basic physical process softening the material due to the phenomenon of shear [14]. The reason for this is that the plastic creep of material by shearing causes certain structural changes in the field of the material itself, which means that the deformation in that zone is much faster than in the other zone of the material [15]. Materials that move from the piling-up condition to the sinking-in condition, become much more elastic [16]. This also shows the importance of the Young's modulus, which

present a measure of the stiffness of the material. Since the polished and glazed surfaces are most common in practice, mechanical properties of materials has big importance on lifetime of dental restoration because they mostly depends on quality of the finishing procedure.

Presented results may assist in better understanding of the mechanical behaviour of LGC under different finishing procedure and thus facilitate the design and CAD/CAM manufacture for dental restorations.

5. CONCLUSION

The obtained results of nanomechanical properties mostly depend of applied surface finishing procedures. The hardness (HV) and Young's modulus (E) of polished and glazed decreased in a small range when the applied normal load increased. The phenomenon of decreasing HV and E by increasing the indentation load is known under the term "Indentation size effect (ISE)". Grinding sample does not have a trend as polished and glazed. The reason for that is a different surface roughness, the contact between the indenter and surface is realized mostly per tops of roughness.

The highest value of hardness and Young's modulus has a glazed sample. The glaze, as a finished procedure, has a significant impact on the obtained results, ie, provides better mechanical properties of the material itself.

AFM analysis indicates the occurrence of plastic deformation of the material, as a result of displacement of material (piling-ups) during the penetration of indenter.

6. ACKNOWLEDGMENTS

Research presented in this paper was supported by Ministry of Education, Science and Technology Development of Republic of Serbia, Grant TR-35021.

7. REFERENCES

- [1] Pantić, M.: *Tribological Characterization of Advanced Dental Materials*, PhD thesis, University of Kragujevac, Faculty of Engineering, 2017.
- [2] Shen, J.Z., Kosmač, T.: *Advanced Ceramics for Dentistry*, Elsevier, USA, 2014.
- [3] Bühler-Zemp, P., Völkel, T., Fischer, K., *Scientific Documentation IPS Empress CAD*, Ivoclar-Vivadent AG, Schaan, 2011.
- [4] de Jager, N., Feilzer, A.J., Davidson, C.L., *The influence of surface roughness on porcelain strength*, Dent. Mater., Vol. 16, p.p. 381-388, 2000.
- [5] Bucaille, J., Stauss, S., Felder, E., Michler, J.: *Determination of plastic properties of metals by instrumented indentation using different sharp indenters*, Acta Materialia, Vol. 51, No. 6, p.p. 1663-1678, 2003.
- [6] Gouldstone, A., Chollacoop, N., Dao, M., Li, J., Minor, A., Shen, Y.: *Indentation across size scales and disciplines: Recent developments in experimentation and modeling*, Acta Materialia, Vol. 55, No. 12, p.p. 4015-4039, 2007.
- [7] Lawson, N.C., et al.: *Wear of enamel opposing zirconia and lithium disilicate after adjustment, polishing and glazing*, Journal of Dentistry, Vol. 42, p.p. 1586-1591, 2014.
- [8] Castiglia Gonzaga, C., Francisco Cesara, P., Gomes Miranda Jr., W., Naoyuki Yoshimura, H.: *Slow crack growth and reliability of dental ceramics*, Dental Materials, Vol. 27, No. 4, p.p. 394-406, 2011.
- [9] Pantić, M., Mitrović, S., Babić, M., Jevremović, D., Kanjevac, T., Džunić, D., Adamović, D.: *AFM Surface Roughness and Topography Analysis of Lithium Disilicate Glass Ceramic*, Tribology in Industry, Vol. 37, No. 4, p.p. 391-399, 2015.
- [10] Bull, S.J., Page, T.F., Yoffe, E.H.: *An explanation of the indentation size effect in ceramics*, Journal Philosophical Magazine Letters, Vol. 59, p.p. 281-288, 1989.
- [11] Pöhl, F., Huth, S., Theisen W.: *Detection of the indentation-size-effect (ISE) and surface hardening by analysis of the loading curvature C*, International Journal of Solids and Structures, Vol. 84, p.p. 160-166, 2016.
- [12] Oliver, W.C., Pharr, G.M.: *An improved technique for determining hardness and elastic modul ususing load and displacement sensing indentation experiments*, J. Mater. Res. Vol. 7, p.p. 1564–1583, 1992.
- [13] Džunić, D., Mitrović, S., Babić, M., Bobić, I., Pantić, M., Adamović, D., Nedeljković, B.: *Nanoindentation of Za-27 Alloy Based Nanocomposites Reinforced with Al₂O₃ Particles*, Tribology in Industry, Vol. 37, No. 4, p.p. 413-420, 2015.
- [14] Sergueeva, A.V., Mara, N.A., Kuntz, J.D., Lavernia, E.J., Mukherjee, A.K.: *Shear band formation and ductility in bulk metallic glass*, Philos. Mag., Vol. 85, p.p. 2671–2687, 2005.
- [15] Alao, A.-R., Yin, L.: *Nano-mechanical behaviour of lithium metasilicate glass-ceramic*, Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, Vol. 49, p.p. 162–174, 2015.
- [16] Alcalá, J., Barone, A.C., Anglada, M.: *The influence of plastic hardening on surface deformation modes around Vickers and spherical indents*, Acta Mater., Vol. 48, p.p. 3451–3464, 2000.

Authors: Dr. Marko Pantić, Prof. Dr. Slobodan Mitrović, Prof. Dr. Miroslav Babić, Dr. Dragan Džunić, University of Kragujevac, Faculty of Engineering, Sestre Janjić 6, 34000 Kragujevac, Serbia, Prof. Dr. Danimir Jevremović, Doc. Dr. Ana Jevremović, University Business Academy, School of Dentistry, Pančevo, Serbia, Assoc. prof. Dr. Tatjana Kanjevac, University of Kragujevac, Department for Preventive and Pediatric Dentistry, Faculty of Medical Sciences, Kragujevac, Serbia.

E-mail: pantic@kg.ac.rs dr.danimir@sbb.rs
boban@kg.ac.rs dranalapcevic@gmail.com
[babac@kg.ac.rs](mailto:babic@kg.ac.rs) tatjanakanjevac@gmail.com
dzuna@kg.ac.rs

**SCIENTIFIC CONFERENCE WITH INTERNATIONAL
PARTICIPATION
ETIKUM 2017
NOVI SAD, SERBIA, DECEMBER 6-8, 2017**

**Milekić, B., Puškar, T., Jeremić-Knežević, M., Đurović-Koprivica, D., Laban-Terzija, J., Gušić, I.,
Marković, D.**

**MOGUĆNOSTI PRIMENE I PRECIZNOST LASERA U STOMATOLOŠKOJ
PROTETICI**

Rezime: *Od trenutka njihovog izuma pa sve do danas, u savremenom svetu, primena i razvoj laserskih sistema dovela je do toga da su oni široko rasprostranjeni svuda oko nas. Takođe nema grane stomatologije u kojoj nisu zastupljeni. Prednost njihove primene leži u smanjenju bola i invazivnosti, bržoj regeneraciji i reparaciji tkiva, pa samim tim i kraćem postoperativnom tretmanu, smanjenom krvarenju, uklanjanjanju mikroorganizama i slično. U stomatološkoj protetici se najviše koriste u okviru predprotetske pripreme i to tzv. meki laseri za hirurške zahvate kojima se modifikuju tvrda i meka oralna tkiva. Ekspanzija i prosperitet "laserske stomatologije" će se u budućnosti dešavati zahvaljujući sve većoj dostupnosti laserskih sistema, edukovanosti i stručnosti terapijskog kadra, protokolima za primenu, jedinstvenim terapijskim parametrima za sve specifične intervencije, a samim tim i sve većom preciznošću laserskih sistema.*

Ključne reči: *laserski sistemi, meki laseri, stomatološka protetika, primena*

1. UVOD

Otkriće lasera smatra se jednim od najvećih dostignuća dvadesetog veka. Mogućnosti intenzivnog tehničkog i tehnološkog razvoja različitih vrsta laserskih sistema i inovativnih metoda lečenja, dovele su do njihove sve šire upotrebe u svim granama stomatologije. Danas se laserska tehnologija u stomatološkim granama razvila do nivoa svakodnevne kliničke primene. Zato je potpuno očekivan razvoj onog što u svakodnevnoj kliničkoj praksi nazivamo "laserska stomatologija".

Naziv LASER je ustvari akronim engl. reči (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) koji opisuje pojačanje svetlosnog zračenja stimulisanom emisijom zraka [1]. Važna osobina laserskog zraka je njegova mogućnost fokusiranja na malu površinu pri čemu se sa minimalnom, kontrolisanom količinom energije ostvaruje ogromna preciznost izvođenja postupaka [2]. Laserski zraci primenjeni u stomatologiji su različitih talasnih dužina u zavisnosti od vrste lasera i njegove primene. Grupe slova kojima se označavaju laseri predstavljaju u stvari hemijske elemente, molekule ili komponente koje čine sastavne delove lasera (Argon laser, diodni, Nd:YAG, Ho:YAG, Er, Cr:YSGG, Er:YAG ili CO₂). Postoje mnoge podele lasera [3]. Najobuhvatnija istraživanja u oblasti laserskih tehnologija u dentalnoj medicini išla su u dva pravca, odnosno proučavan je efekat lasera na mekim i tvrdim tkivima, pa je tako i najčešća podela laserskih

sistema na meke i tvrde lasere. Razlika između njih je prvenstveno u apsorpciji svetla u različitim tkivima. Prednosti lasera u stomatologiji u odnosu na konvencionalne metode su:

1. Određene intervencije traju mnogo kraće i znatno su manje invazivne, pa je i sam postupak znatno brži i jednostavniji. Manji je zamor za pacijenta, stomatologa i osoblje. Samim tim tretman laserom zahteva i manji broj poseta.
2. Potreba za anestezijom bitno je smanjena, a u mnogim slučajevima ona nije ni potrebna.
3. Brži je postoperativni oporavak jer visokoenergetska zraka reducira broj i virulenciju bakterija i sterilizuje područje zarastanja, smanjen je postoperativni edem i minimalno oštećenje tkiva.
4. Laserskom tehnologijom bitno se smanjuje krvarenje zahvaljujući pozitivnom hemostatskom efektu, jer svetlo visoke energije pomaže brže zgrušavanje krvi pa je lečenje za pojedine indikacije ovim laserom pogodno i kod pacijenata sa problemom poremećaja koagulacije.
5. Sve intervencije su mnogo tiše i ugodnije za pacijenta.
6. Laserske zrake ne oštećuju zdravo tkivo, nema ožiljaka na mekim tkivima, naravno uz pravilno rukovanje i izbor same energije [2].

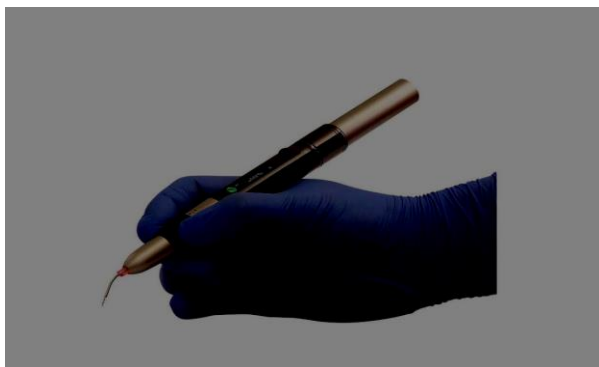
Potpuno razumevanje interakcije između različitih laserskih talasnih dužina i ciljnih tkiva bitno je kako bi se osigurali optimalni rezultati lečenja. Talasna dužina od ultraljubičastog do

daleko infracrvenog raspona uopšteno se koristi u medicinskoj praksi i kreće se od 193 nm do 1060 nm.

Osnovni cilj ovog rada bio je da se predstave osnovne osobine i mogućnosti primene lasera u stomatološkoj protetici kao i preciznost izvođenja tretmana laserskim sistemima u odnosu na konvencionalne terapijske metode.

2. MEKI LASERI

S obzirom da predstavljaju manje invazivnu tehniku rada laseri nude hirurgiju bez krvi, uz minimum postoperativnih komplikacija, a u zavisnosti od energije svelosnog zraka meko tkivo može se kontrahovati ili koagulisati pri čemu je naravno intervencija gotovo bezbolna. Klinička istraživanja su potvrdila da postoje razlike u reakciji tkiva u zavisnosti da li je incizija u mekom tkivu urađena skalpelom ili CO2 laserom. Naime, posle upotrebe CO2 lasera uočeno je brže zarastanje i značajno manji ožiljak, redukcija postoperativnog bola i znatna ušteda vremena [4,5]. Predstavnik kontinuiranog snopa su Diodni laseri različitih talasnih dužina. Imaju manju snagu i gotovo uvek rade u nekom kontinuiranom modu. Diodni se laser upotrebljava samo kod mekog tkiva i za dezinfekciju, ali ne toliko duboko kao laseri pulsog tipa. Kod njih se ne mogu menjati ni pulsevi ni njihova talasna dužina i zbog toga se nikako ne može postići velika snaga. Posebno jednostavna primena u stomatologiji je diodnih, mekih lasera izgleda poput olovke (Slika 1.).



Sl. 1. Diodni laser oblika olovke

3. PRIMENA U STOMATOLOŠKOJ PROTETICI

U savremenoj stomatologiji gotovo da nema ni jedne grane niti oblasti u kojoj se danas ne primenjuju laseri. Njihova najveća primena je ipak u okviru hirururških zahvata u sklopu oralne i maksilofacijalne hirurgije, estetske i rekonstruktivne stomatologije, ortodoncije, implantologije i stomatološke protetike.

U okviru stomatološke protetike primena je višestruka.

3.1. Fiksna protetika

Najčešća primena u fiksnoj protetici je u domenu produženja kliničke krune zuba [6]. Indikacije za to su situacije kada nema dovoljno zdravog zubnog tkiva za izradu nadogradnje ili postavku posta (Ferrule efekat), kao i karijes ili frakture ispod nivoa gingive usled čega je nemoguća aplikacija fiksnih protetskih nadoknada. Ne treba zaboraviti ni njihovu primenu kod insuficijencija kliničke krune zuba, kratkih krunica, odnosno promene nivoa linije krunice zbog promene biološke visine zuba, neestetski izgled nivoa gingivalnog pripoja i kozmetički tretmani (gummy smile). Često je aplikacija mekih lasera u ovim indikacijama apsolutno sredstvo izbora, samo treba obratiti pažnju na pravilno aplikovanje i rukovanje, jer moguća su oštećenja okolnih tkiva, pogotovo koštanih struktura do stepena sa nekrozom kosti [7]. Laseri omogućavaju optimalnu kontrolu terapeuta, fino prati linije urezivanja i precizno oblikuje rub gingive.

Takođe laser se upotrebljava za preoblikovanje gingivalnog tkiva nastalog usled hroničnih upala, prethodnih subgingivnih restauracija ili postojanja subgingivalnog kamenca. Ima svoju namenu i u tzv. sulkusnoj gingivoplastici, koja podrazumeva postavljanje retrakcijskog konca pre otiska. Prednost primene lasera u ovom području leži u kontrolisanoj hemoragiji, lokalnoj sterilizaciji i boljoj vidljivost područja sulkusa, što ujedno utiče na kvalitetniji otisak u fiksnoj protetici. Ova tehnika svodi na minimum i kasniju pojavu recesije gingive [8,9]. Tu se često koriste Galijum-Aluminijumski laseri i NeodymiumYAG (Nd YAG) laseri.

Sve veća je i uloga primene lasera u završnoj obradi demarkacione linije pre intraoralnog skeniranja kamerom u izradi krunica CAD/CAM tehnologijom [10]. Laserska terapija niskog nivoa (LLLT) kao što je AsGaAl (galijev aluminij arsenid) 660 nm laser koristi se u gingivalnom sulkusu, gingivnom tkivu koji okružuje krunu za promociju bio-modulacije mekog tkiva i to na način da se eliminišu svi potencijalni upalni procesi pre završnog postupka. Jasno je zato da primena lasera dovodi do veće preciznosti u fazi otiskivanja a samim tim i preciznosti definitivnog radnog modela i buduće fiksne protetske nadoknade.

Gingivoplastika se radi najčešće argon laserima snage do 1.0W, kontinuiranog zraka sa fokusom na hemoglobin pa tako imaju odličnu sposobnost

hemostaze a samim tim i koagulacije i regeneracije tkiva. Primena argon lasera se posebno ogleda u preparaciji mekih gingivalnih tkiva kod primene keramičkih faseta.

Niskoenergetski meki laseri se koriste za fotobiomodulaciju tkiva. To znači da i rane brže zarastaju uz analgetički i antiinflamatorni efekat, kao i bržu proliferaciju fibroblasta i kolagenih vlakana [7]. Ovaj efekat lasera na tkiva se primenjuje za uklanjanje tkivnih pigmentacija i tamnih rubnih prebojenosti tkiva od metala starih fiksnih nadoknada. LASER (HLLT) na visokom nivou koristi se kao zadnji korak pri konačnog cementiranja krune zbog njihovog boljeg prodiranja u dentinsko tkivo i sposobnosti mikrobne inhibicije.

Izuzetno je korisna i precizna upotreba lasera kod uklanjanja keramičkih ljuspica i luminira. Restauriranje se može izvesti bez rezanja pomoću laserskih zraka. Razlog za to leži u činjenici da laserska energija prolazi kroz porculansko staklo i ne utiče i pri tom apsorbuje molekule vode prisutna u kompozitnom cementu. Debondiranje se odvija na nivou spajanja silana i smole, tako da je ceo postupak bezbedan za zube i ne uzrokuje bilo kakvu traumu na njima.

3.2. Mobilna protetika

Primena lasera u mobilnoj protetici prvenstveno se odnosi na predprotetsku pripremu, tačnije preoblikovanje mekih i tvrdih tkiva bezubih i krezubih područja kako bi se postigla što bolja estetika i funkcija završnih nadoknada. Predprotetska laserska hirurgija u mobilnoj protetici obuhvata redukciju hiperplastičnog ili hipertrofičnog mekog tkiva tubera i torusa donje i gornje vilice, uklanjanje frenuluma i bukalnih plika, terapiju bilo kojeg dela hiperplastične oralne sluznice te uklanjanje fibroma, papiloma i cista mekih tkiva usne šupljine [11,12]. Meko tkivni laseri se koriste za tretiranje koštanih egzostoza, a erbijumskim laserima YAG se uglavnom tretiraju druge koštane redukcije uz obavezno vodeno ili vazdušno hlađenje struktura [13]. Glavna prednost korištenja Er: YAG lasera je smanjenje pregrevavanja, dekontaminacija, biostimulacija i odsustvo proizvodnje slojnog razmaza koji se prekida procesom ozdravljenja.

Takođe i sposobnost tkiva da se brže regeneriše pod uticajem bilo kojeg meko tkivnog laserskog sistema omogućava njihovu primenu u domenu tretiranja ulceracija nastalih mehaničkom iritacijom mobilnih protetskih nadoknada. Laserska zraka ne samo da pomaže u ablaciji površinskog epidermalnog sloja kontaminiranog bakterijama ili kandidom, već sprečava i upalu

susedne normalne sluznice. Postoperativni recept antibiotika ili nesteroidnih protuupalnih lijekova (NSAID) neće biti potrebni budući da sam laser djeluje virucidno i baktericidno.

Nd: YAG laser se koristi za izradu protetske konstrukcije u procesu izrade skeletirane proteze. Sa laserskim zavarivanjem mogu se postići 20% - 50% veća vučna čvrstoća, trajnost i veća preciznost nego što se postiže postupkom lemljenja.

Terapijski pristup u lečenju kranioandibularnih disfunkcija podrazumeva primenu lasera, čija je dobrobit u ovoj oblasti prvenstveno u tome što smanjuje bol i otok u regiji mastikatornih mišića i temporomandibularnih zglobova. Pacijenti oseće olakšanje već nakon prvog aplikovanja diodnog lasera, LED jedinice za odgovarajuću površinu do tri minute. Preciznost u ovom postupku sa ovom vrstom lasera se postiže u jasnom ograničenju vremena i broja tretmana, tačnom aplikovanju laserskog nastavka i izboru programa, odnosno moda primene [14].

4. ZAKLJUČAK

Primena laserskih sistema u stomatološkoj protetici je još uvek ograničena. Odgovornost svakog terapeuta za odgovarajući postupak u stomatološkoj protetici leži u preciznom odabiru talasne dužine laserskog zračenja uz primenu minimalne količine energije koja će postići maksimalan rezultat. Njihova sve šira primena i razvoj "laserske stomatologije" u budućnosti će se dešavati zahvaljujući sve većoj dostupnosti laserskih sistema, edukovanosti i stručnosti terapijskog kadra, protokolima za primenu, jedinstvenim terapijskim parametrima za sve specifične intervencije i sve većom preciznošću razvijenih savremenih laserskih sistema.

Obavezna je stručnost i sprovođenje mera zaštite svih učesnika u toku izvođenja terapije laserima. Moraju biti redovno servisirani, sa preciznim originalnim uputstvom za bezbedno rukovanje i održavanje.

Njihovo vreme tek dolazi, ali već sada je sigurno da je stomatologija 21 veka nezamisliva bez primene laserskih sistema u svakodnevnoj kliničkoj praksi. Kao i da na njihovoj osobini, preciznost u radu, kao jednoj od mnogih prednosti lasera, počiva razvoj i budućnost savremene stomatologije.

5. REFERENCE

- [1] Meserendino, LM., Pick, RM.: Lasers in dentistry. Quintessence books, 1995.
- [2] Colluzi, D., Parker, S. *Lasers in Dentistry*,

- Springer International Publishing, San Francisco, 2017.
- [3] Coluzzi, D.: *What laser does your practical need alpha omegan*. J of Laser Den, 101:202-205, 2008.
- [4] Živković, S., Blažič, L., Kolar, M.: *Primena lasera u stomatologiji*, Stom Glas Srbije, 51:146-152, 2004.
- [5] Loumanen, M., Virtanen, I.: *Healing of laser and scalpel incision wounds of rat tongue mucosa as studied with cytokeratin antibodies*, J Oral Pathol, 16:139-144, 1997.
- [6] Durrani, S.: *Laser and it is Application in Prosthetic Dentistry*, Int J Dent Med Res, 1(6):183-188, 2015.
- [7] Parker, S.: *The use of laser in fixed prosthodontics*, Dent Clin N Am, 48:971-998, 2004.
- [8] Lukram, A., Sachdeva, N., Sahu, K., Yadav, A.: *Application of Laser in Prosthetic Dentistry: A review*, Int J Dent Med Res, 1(4):99-102, 2014.
- [9] Convissar, R.A.: *The biologic rationale for the use of lasers in dentistry*, Dent Clin N Am, 48:771-798, 2004.
- [10] Eduardo, CP.: *The state of the Art of lasers in esthetic and Prosthodontics*, J Oral Laser Applications, 5:135-143, 2005.
- [11] Ailing, C., Guy, AC.: *Laser application in oral and maxillofacial surgery*, Int J of Clin Dent , 6(3):238, 1997.
- [12] Nagaraj, K.R.: *Use of lasers in prosthodontics: A review*, Int J of Clin Dent, 5(1):91-112, 2012.
- [13] Ramya, J. et al.: *Lasers in Prosthetic dentistry*, Indian Journal of applied Reserch, 3(4):369-370, 2013.
- [14] Fujiyama, K., Deguchi, T., Murakami, T., Fujii, A., Kushima, K., Takano-Yamamoto, T. *Clinical effect of CO2 laser in reducing pain in orthodontics*, Angle Orthod, 78:299-303, 2008.

Autori: Doc. dr Bojana Milekić, Vanr. prof. dr Tatjana Puškar, Doc. dr Milica Jeremić-Knežević, Doc. dr Danijela Đurović-Koprivica, dr Jovana Laban-Terzija, Doc. dr Ivana Gušić i Prof. dr Dubravka Marković. Univerzitet Novi Sad, Klinika za stomatologiju Vojvodine, Medicinski fakultet Hajduk Veljkova 12, 21000 Novi Sad, Serbia, Tel: +381 21 622222.

E-mail:

bojana.zagorka@gmail.com

Petronijević Šarčev, B., Krstonošić, V., Šarčev, I., Puškar, T., Maletin, A.

**MERENJE VISKOZNOSTI KOMPOZITNOG MATERIJALA
ZA PRIMENU U STOMATOLOGIJI**

***Rezime:** Kor materijali su grupa restaurativnih materijala koji se koriste u stomatologiji. Odlično imitiraju svojstva dentina, čime se postiže precizna i kontrolisana preparacija zuba odmah nakon restauracije kruničnog dela zuba. Kvalitet restauracije zavisi od viskoziteta kor materijala, koji može biti niskog (tečni) i visokog (gusti) viskoziteta. Predmet istraživanja je određivanje viskoelastičnih svojstava kor materijala i razvijanje frakcionih modela za procenu viskoelastičnih svojstava koje imaju uticaj na kliničku primenu ovih materijala. **Ključne reči:** restauracija zuba, kor materijali, viskoznost*

1. UVOD

Kor materijali (core materials) su grupa restaurativnih materijala koji se primenjuju u stomatologiji za direktnu preprotetsku nadoknadu kruničnog dela zuba (core build-up). Prema hemijskom sastavu, kor materijali su dimetakrilati (BisGMA, TEGDMA) sa različitom ukupnom količinom neorganskih čestica (52-75% masenog udela) i veličinom čestica od 0,01-75 μ m.

Njihova primena omogućava jednoseansnu nadoknadu kruničnog dela zuba i pripremu zuba nosača za buduću veštačku krunicu. Mogu da se primene i za cementiranje kompozitnog kočića u kanalu korena zuba, jednovremenu restauraciju kruničnog dela zuba, a i za cementiranje definitivne veštačke krunice [1].

Kor materijali se proizvode i pakuju u tubama, kertridžima (dva šprica) sa pištoljem za disperziju uz aplikatore, u bočicama, kao i u kapsulama za pojedinačne doze sa aplikatorom. Prema načinu polimerizacije, podeljeni su na hemijski, svetlosno i dvojno polimerizujuće materijale. Podela kor materijala prema viskoznosti je na paste manje (tečni) i veće viskoznosti (gusti) što ih opredeljuje za različite namene.

Postoje različite tehnike postavljanja materijala i to slojevita tehnika i bulk tehnika. Restauracija zuba kor materijalima je moguća u bulk tehnici do 8mm visine, čime se izbegava

slojevita tehnika postavljanja materijala i ubrzava se postupak restauracije.

Odgovarajuća viskoznost kor materijala omogućava jednostavnu aplikaciju, ne lepe se za instrumente, a odlično se adaptiraju uz preostali deo zuba i kočić, bez razlivanja. Kor materijali imaju značajno smanjenu polimerizacionu kontrakciju, kao i higroskopsku ekspanziju [2,3]. Imaju poboljšana mehanička svojstva u poređenju sa kompozitima za ispune. Kor materijali imaju nizak moduo elastičnosti čime pokazuju bolju apsorpciju i distribuciju stresa pri funkcionalnom opterećenju, smanjujući pri tom koncentraciju stresa na dodirnoj površini sa dentinom [4].

Kvalitet restauracije zavisi od viskoznosti kompozitnog materijala. Tečni kompoziti pokazuju bolju adaptaciju za površinu fiber kočića i odličan integritet kora [6], ali imaju veću polimerizacionu kontrakciju i pokazuju slabija mehanička svojstva [7].

Viskoznost dvojnopolimerizujućih kor materijala omogućava njihovu laku primenu i adaptaciju na zidove kaviteta zuba [6].

Hemijski polimerizujući kor materijali visoke viskoznosti obezbeđuju stabilnu osnovu za veštačku krunicu. Hemijski polimerizujući kor materijali pokazuju slab integritet kora, sa prisustvom blazni, kao i lošu adaptabilnost uz površinu fiber kočića, uočeno je SEM analizom [8]. S druge strane, kor materijali niže viskoznosti, kao što su tečni i

svetlosnopolimerizujući kompozitni materijali, lakši su za rukovanje i imaju bolju integraciju za površinu kočica, čime se sprečava mogućnost stvaranja blazni i praznih prostora na dodirnoj površini sa kočicom [6].

U naučnoj-stručnoj literaturi nema dovoljno podataka koji se odnose na viskoznost kor materijala. Takođe, kreiranje matematičkih modela koji proizilaze iz reoloških svojstava kor materijala prema našim saznanjima do sada nije rađeno.

Materijali u stomatologiji se neprestano razvijaju i usavršavaju, a sa razvojem novih materijala, razvijaju se i tehnike za ispitivanje i merenje reoloških svojstava novih materijala. Rezultati tih ispitivanja i merenja predstavljaju putokaz u sintezi novih materijala u zavisnosti od njihove primene.

U ovom radu biće prikazano merenje viskoznosti na rotacionom viskozimetru čime su dobijene kvalitetne informacije o reološkim svojstvima materijala.

Predmet istraživanja je određivanje viskoelastičnih svojstava kor materijala (core materials) i razvijanje frakcionih modela za procenu viskoelastičnih svojstava koje imaju uticaj na kliničku primenu ovih materijala

2. MATERIJAL I METODE

Ispitivan materijal je kompozitni kor materijal Bisco Light-Core Build-Up Composite® svetlosno polimerizujući (slika 1.).



Sl. 1. Kompozitni kor materijal

Reološke svojstva emulzija ispitivane su na rotacionom viskozimetru HAAKE Mars Rheometer (ThermoFisherScientificProcessInstr

uments, Karlsruhe, Germany) na konstantnoj temperaturi od $25\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ pri čemu je korišćen pribor ploča-ploča prečnika 20mm (rastojanje između ploča 1 mm).

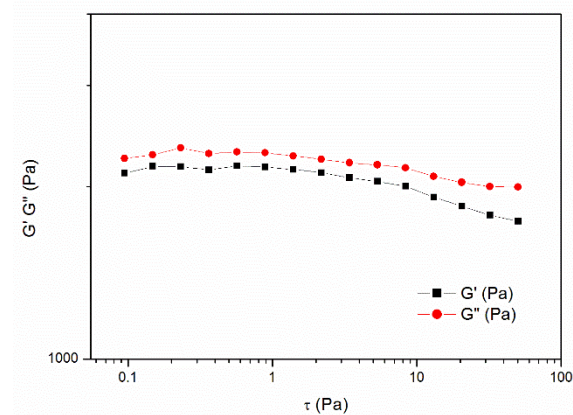
Merenja su vršena u zamračenoj prostoriji, a materijal je bio zaštićen u toku merenja od uticaja svetla.

U cilju ispitivanja uzoraka oscilatornim merenjima kreirani su sledeći programi:

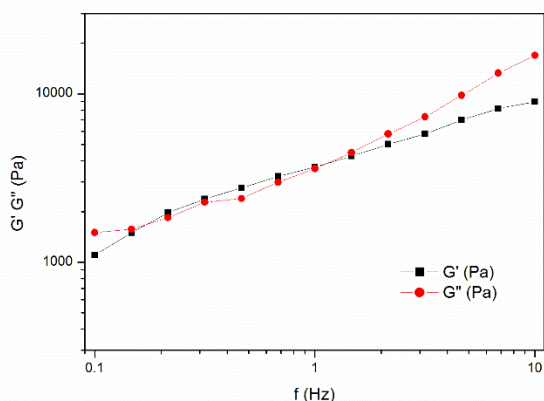
Amplitude Sweep gde su merenja vršena u režimu promene amplitude oscilovanja pri konstantnoj frekvenciji od 1 Hz u intervalu napona smicanja od 0,1 Pa do 50 Pa. Ovim programom se određuje određuje linearni viskoelastični region. Vrednost napona smicanja sredine ovog regiona se koristi u daljim ispitivanjima. Rezultati su prikazani kao zavisnost elastičnog i viskoznog modula G' i G'' od napona smicanja.

Frequency Sweep gde su vršena merenja u režimu promene frekvencije oscilovanja od 0,1 do 10 Hz pri konstantnom naponu smicanja od 0,3 Pa (ova vrednost je određena kao sredina linearnog viskoelastičnog regiona dobijnog pomoću amplitude Sweep testa). Rezultati su prikazani kao zavisnost elastičnog i viskoznog modula G' i G'' , od frekvencije (Hz).

3. REZULTATI



Sl.2. Zavisnost viskoznog i elastičnog modula od napona smicanja



Sl. 3. Zavisnost viskoznog i elastičnog modula od frekvencije

4. DISKUSIJA

Većina realnih materijala pokazuju u isto vreme osobine i viskoznih i elastičnih tela, zbog čega se nazivaju viskoelastični materijali. Viskozni deo se pokorava Njutnovom zakonu, dok je elastični deo u skladu sa Hukovim zakonom.

Oscilatornim testovima su praćeni parametri koji pokazuju uticaj viskozne i elastične komponente na ponašanje ispitivanog materijala. Moduo G' predstavlja elastičnu komponentu materijala, dok moduo G'' pokazuje uticaj viskozne komponente. Najpre je merenjem zavisnosti modula G' i G'' određen linearni viskoelastični region (Slika 2) i vrednost napona smicanja (0,3 Pa) koji će biti korišćen prilikom dalje analize. Sa Slike 1 se vidi da viskozni moduo dominira nad elastičnim. Na osnovu toga može se zaključiti da analizirani materijal pokazuje karakteristike fluida u linearno viskoelastičnom regionu.

Na grafiku zavisnosti elastičnog i viskoznog modula od frekvencije očigledno je da se vrednosti elastičnog i viskoznog modula pri frekvencijama nižim od 1 Hz značajno ne razlikuju, dok pri višim frekvencijama dominira viskozni moduo (Slika 3). Na osnovu toga se može zaključiti da je struktura ispitivanog materijala takva da ne postoje umreženi polimerni lanci i dadominiraju osobine tečnosti.

Budući da kvalitet restauracije kruničnog dela zuba zavisi od viskoziteta kor materijala, cilj je da se reološkim merenjima dobiju podaci o viskoelastičnim osobinama ispitivanih

materijala koje su u vezi sa njihovom kliničkom primenom. Kreiranje matematičkih modela, koji proizilaze iz reoloških osobina, omogućice karakterizaciju ispitivanih materijala i predviđanje načina, mogućnosti i kvaliteta njihove kliničke primene

5. ZAKLJUČCI

Rotacionim viskozimetrom mogu se dobiti objektivni podaci viskoznosti koja se ispituje. Struktura analiziranog kor materijala pokazuje karakteristike fluida u linearno viskoelastičnom regionu.

6. LITERATURA

- [1] Land, MF., Rosenstiel, SF.. *Contemporary Fixed Prosthodontics*. Elsevier-Mosby, p. 174-205.(Mouth preparation (Chapter 6)) 2006.
- [2] Stavridakis, MM., Kakaboura, AI., Krejci, I.. *Degree of remaining C=C bonds, polymerization shrinkage and stresses of dual-cured core build-up resin composites*. Oper Dent;30:443–452. 2005.
- [3] Chutinan, S., Platt, JA., Cochran, MA.. Moore BK. *Volumetric dimensional change of six direct core materials*. Dent Mater ;20:345–351. 2004.
- [5] Pilo, R., Cardash, HS., Levin, E., Assif D.. *Effect of core stiffness on the in vitro fracture of crowned, endodontically treated teeth*. J Prosthetic Dent ;88:302–306. 2002.
- [6] Monticelli, F., Goracci, C., Ferrari, M.. *Micromorphology of the fiber post-resin core unit: a scanning electron microscopy evaluation*. Dent Mater ;20:176-183. 2004.
- [7] Labella, R., Lambrechts, P., Van Meerbeek, B., Vanherle G.. *Polymerization shrinkage and elasticity of flowable composites and filled adhesives*. Dent Mater ;15:128-137. 1999.
- [8] Monticelli, F., Goracci, C., Grandini, S., Garcia-Godoy, F., Ferrari, M.. *Scanning electron microscopic evaluation of fiber post-resin core units built up with different resin vomposite materials*. Am J Dent;18:61-65. 2005.

Autori: **Doc. dr Branislava Petronijević Šarčev, Van. prof. dr Veljko Krstonošić, Doc dr Ivan Šarčev, Van. prof dr Tatjana Puškar, Doc. dr Aleksandra.** MaletinUniverzitet u Novom Sadu, Medicinski fakultet, Hajduk Veljkova 3, 21000 Novi Sad, Serbia, Tel: +381 21420670, Fax: +381 21 66 24 153.

e-mail: brislava.petronijevic@mf.uns.ac.rs
aleksandra.maletin@mf.uns.ac.rs
tpuskar@mf.uns.ac.rs
ivan.sarcev@mf.uns.ac.rs
veljkokrst@yahoo.co.uk

**SCIENTIFIC CONFERENCE WITH INTERNATIONAL
PARTICIPATION
ETIKUM 2017
NOVI SAD, SERBIA, DECEMBER 6-8, 2017**

**Đurović Koprivica, D., Budak, I., Puškar, T., Jeremić Knežević, M., Milekić, B., Pivaš, B.,
Marković, D.**

**PRIMENA KOMPJUTERA I RAČUNAROM VOĐENIH SISTEMA U ANALIZI
OKLUZALNIH KONTAKATA (T-SCAN SISTEM)**

***Rezime:** Kontakti između antagonističkih zuba gornje i donje vilice u položaju maksimalne interkuspidacije, njihov broj, distribucija i karakteristike se razlikuju kod svake individue i imaju važnu primenu protetičkoj, ortodontskoj i parodontalnoj terapiji, kao i u analizi funkcije stomatognatog sistema i terapiji temporomandibularnih disfunkcija. Za razliku od kvalitativnih, široko rasprostranjenih, postupaka analize gde sam terapeut određuje prirodu kontakta uz upotrebu standardnih artikulacionih hartija i drugih pomoćnih materijala, T-Scan predstavlja posebno konstruisan kompjuterski sistem koji, osim beleženja rasporeda kontakata, daje informacije i o broju i redosledu uspostavljanja kontakata, njihovom vremenu trajanja i relativnom intenzitetu sile koja se uspostavlja pri svakom pojedinačnom kontaktu.*

***Ključne reči:** okluzalni kontakti, analiza okluzije, T-Scan sistem*

1. UVOD

Maksimalna interkuspidacija (MIK) je granični položaj donje vilice prilikom kojeg zubi gornjeg i donjeg dentalnog luka ostvaruju najveći broj i najveću površinu međusobnih kontakata, zbog čega se veoma često upotrebljava u kliničkoj praksi i u naučnoistraživačke svrhe. Jedan od osnovnih zahteva tzv. fiziološki optimalne okluzije i ciljeva okluzalne rehabilitacije jeste ostvarivanje simultanih kontakata između svih antagonističkih zuba odnosno ostvarenje svih okluzalnih kontakata u istom trenutku pri zatvaranju donje vilice u položaj MIK (Slika 1). Međuzubni kontakti u MIK se razlikuju kod svake individue. Razlike postoje u broju, položaju i simetričnosti kontakata, a dokazana je varijabilnost broja i položaja kontakata u zavisnosti od doba dana, aktivnosti mastikatornih mišića, starosti ispitanika, kao i vrste protetičkog rada [1-4].



Sl.1. Okluzalni kontakti u položaju maksimalne interkuspidacije

Prirodni zubi, posebno zubi u interkaninnoj odnosno frontalnoj regiji, imaju izuzetno izražen

taktilni senzibilitet. Naime, pojedini zubi imaju sposobnost identifikacije partikula veličine 8-10 μ [5]. Svaki nesanimiran prevremeni tzv. interferentni kontakt može biti uzrok oboljenja parodonticijuma opterećenog zuba, što konsektivno može da se odrazi i na ceo stomatognati sistem, povećavajući rizik od nastanka raznih oblika temporomandibularnih disfunkcija (TMD) [6]. Princip svake rekonstruktivne terapije okluzije jeste da restaurirani zubi preuzmu potpuno funkcionalno opterećenje prilikom mastikacije, kao i prirodni zubi. S obzirom na to, analiza okluzalnih kontakata je metoda koja se široko upotrebljava u svakodnevnoj stomatološkoj praksi, prilikom konzervativne, protetičke i ortodontske rehabilitacije zuba, ali isto tako i tokom funkcionalne analize okluzije prilikom dijagnostike i terapije TMD.

Za iznalaženje i analizu zubnih kontakata koriste se dve vrste postupka: kvalitativni i kvantitativni [7, 8].

2. KVALITATIVNE METODE ANALIZE OKLUZALNIH KONTAKATA

2.1 Okluzalni markeri (indikatori)

Kvalitativne metode su široko prihvaćene u svakodnevnoj kliničkoj praksi usled jednostavne primene i pristupačne cene. Indikatori koji su u upotrebi za kvalitativnu analizu okluzije su artikulacione hartije, voskovi za registrate, svilene i aluminijumske trake, specijalni silikonski materijali, specijalni lakovi, a neretko i kombinacija ovih materijala (Slika 2 a) [7-9].

2.2 Analiza okluzije

Klinička primena ovih okluzalnih indikatora, posebno artikulacionih hartija koje se najšire primenjuju, podrazumeva i oslanja se na subjektivnu procenu terapeuta o adekvatnosti i prihvatljivosti postojećih kontakata za svaki pojedinačni slučaj [9]. Usled navedene specifičnosti i velikog senzibiliteta prirodnih zuba po pitanju taktilne osetljivosti na strano telo, okluzalni markeri bi trebalo da budu što tanji (8μ - 20μ), a najčešće korišćene artikulacione hartije su debljine između 50μ i 100μ [8, 10]. Ne postoje naučni dokazi koji govore u prilog tome da obeleženi tragovi na zubima pokazuju jačinu samog kontakta, ali je u primeni opšteprihvaćeno tumačenje obeleženih kontakata koje može da ukaže na međusobne razlike u okluzalnim silama koje prihvataju pojedinačni kontakti. Tačkasti otisci boje artikulacione hartije približne veličine i istog intenziteta obojenosti, smatraju se kontaktima koji se ostvaruju istovremeno odn. simultano i trpe podjednaku jačinu sile prilikom mastikacije. Tragovi na zubima koji imaju veću površinu i tamniju boju od susednih, smatraju se kontaktima koji trpe jače okluzalno opterećenje, dok se kontakti obeleženi manjim i svetlijim tragom smatraju tzv. slabijim kontaktima (Slika 2 b) [10].



Sl. 2. a) Okluzalni indikatori; b) Kontakti zuba u položaju MIK obeleženi artikulacionom hartijom

Opisan način analize okluzalnih kontakata je ustaljena praksa kontrole okluzije prilikom raznih dijagnostičkih i terapijskih procedura, ali je preciznost, tačnost i pouzdanost informacija koje pruža diskutabilna, jer daje samo relativne podatke o kvalitetu okluzalnih kontakata, bez podataka o njihovom broju.

3. KVANTITATIVNA ANALIZA OKLUZIJE

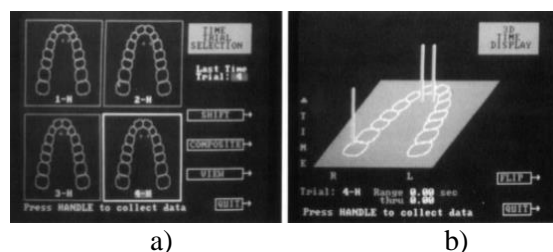
Sa ciljem da se prevaziđu svi nedostaci koji prate kvalitativne metode okluzalne analize, krajem 80-tih godina prošlog veka, predstavljen je specijalizovan kompjuterski sistem koji omogućava registraciju okluzalnih kontakata uz upotrebu vremena kao primarne dijagnostičke varijable (Maness i sar., 1986.) [11]. Sistem, nazvan *T-Scan* (po proizvođaču, Tekscan Inc.,

Boston, MA, USA), ima mogućnost registrovanja ukupnog broja kontakata u MIK, vremena trajanja kontakata, kao i relativnu silu svakog pojedinačnog kontaktnog odnosa [7, 11, 12].

3.1 Razvoj *T-Scan* Sistema

Od momenta pojavljivanja na tržištu do danas razvijene su tri generacije *T-Scan* Sistema.

Prva generacija, *T-Scan* I sistem, se sastojao od IBM kompatibilnog personalnog računara, posebne *T-Scan* jedinice, kabla i skromnog softvera koji je omogućavao registraciju centralnih kontakata u dvodimenzionalnom - 2D i trodimenzionalnom - 3D prikazu tokom perioda od prvog kontakta do maksimalne interkuspacije (Slika 3). On je ubrzo zamenjen novim, tačnijim i preciznijim sistemom *T-Scan* II, koji je prevazišao brojne nedostatke sistema prve generacije, kao što su velika debljina senzora, crno-beli prikaz registrovanih rezultata, ograničena baza podataka itd [13].



Sl. 3. *T-Scan* I sistem; a) 2D prikaz; b) 3D prikaz

T-Scan II sistem se pojavio na tržištu 1997. godine u SAD-u, sa složenijim softverskim mogućnostima i savšenijim prikazom registrovanih kontaktnih odnosa. Senzor debljine 60μ je najvažniji deo *T-Scan* II sistema. Na njegovoj gornjoj i donjoj površini postavljene su trake koje čine mrežu od 1500 senzornih tačaka (Slika 4).

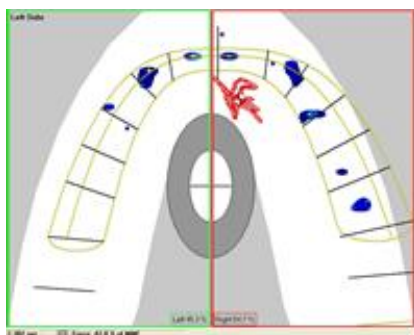


Sl. 4. Senzor *T-Scan* II sistema (desno) povezan sa centralnom jedinicom (levo)

Softver (*T-Scan II Windows*) omogućava analizu i prikaz podataka o kontaktima izmerenih pomoću senzora. Rad sa ovim sistemom ima nekoliko nivoa: prikaz u stvarnom vremenu, snimanje, prikaz položaja registrovanih kontakata,

prikaz ravnoteže okluzalnih kontakata, , relativnih sila i centra sila, kao i prikaz za poređenje. Intenzitet i površina kontakata su prikazani su putem jednostavnih kontura u boji, od crvene, za najintenzivnije kontakte, do plave koja označava kontakte slabijeg intenziteta. Sistem je, osim softvera i senzora, opremljen centralnom jedinicom i paralelnim ručnim konvertorom podataka, personalnim računarom i neophodnim kablovima koji povezuju sve komponente sa adapterom za struju [7, 8, 13].

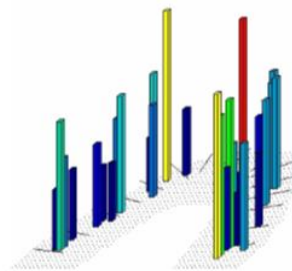
Zahvaljujući unapređenom softverskom programu ovaj sistem, za razliku od prve generacije *T-Scan*-a, ima mogućnost da u togu same registracije kontaktnih tačaka prikaže i jačinu i centar okluzalnih sila (COF), kao i njegovu putanju i vreme. Mogućnost prikaza centra okluzalnih sila u MIK i putanje COF-a ima veliki klinički značaj pri analizi okluzalnih kontakata, jer predstavlja ilustraciju mesta prevremenih kontakata i distribucije štetnih okluzalnih sila i omogućava uravnoteženje okluzije sprečavajući neželjene efekte interferentnih kontakata na strukture stomatognatog sistema. Dislokacija markera COF-a u odnosu na postavljeni centar eliptičnih polja ukazuje na asimetriju raspodele okluzalnog opterećenja, odnosno izloženost pojedinih zuba ili grupe zuba većem opterećenju u odnosu na preostale zube u zubnom nizu (Slika 5) [7, 13, 14].



Sl. 5. Grafički prikaz kontakata -“centra okluzalnih sila”(COF)

Ovaj sistem pruža i mogućnost prikaza prevremenih kontakata u trodimenzionalnom formatu pomoću obojenih stubića, gde crveno obojeni stubići ukazuju na lokaciju najintenzivnijeg kontakta u zubnom nizu (Slika 6). *T Scan* II sistem ima široku kliničku primenu u svetu i kod nas u analizi okluzije nakon protetičke, implantološke, parodontalne, konzervativne i ortodontske terapije i u toku reverzibilne okluzalne terapije TMD [7, 13]. Poslednja generacija *T-Scan* sistema predstavljena je *T-scan* III sistemom, čija se najnovija softverska verzija 9.0 pojavila u maju 2015. godine. Sistem se sastoji iz:ručnog konvertora podataka, personalnog

računara, *T-Scan* III Windows softvera, malih i velikih držača za ultra tanke senzorske folije koji su direktno kablom povezani sa računarom (Slika 7).



Sl. 6. Trodimenzionalni prikaz distribucije kontakata u položaju MIK u vidu obojenih stubića

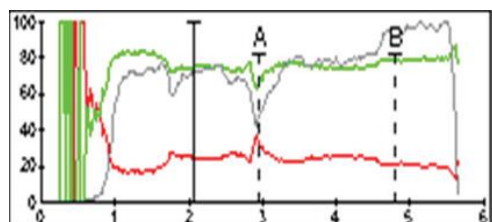
Jednostavniji je i precizniji od prethodnih generacija ovog sistema [14, 15].



Sl. 7. *T-Scan* III sistem

3.2 Princip rada sa *T-Scan*-om

Pre samog snimanja položaja i broja zubnih kontakata sa pacijentom je potrebno uvežbati zatvaranje u MIK sa senzorom u ustima kako bi se greške registracije svele na minimum. Takođe je potrebno prilagoditi širinu modela zubnog luka pacijenta u odnosu na izmerenu širinu centralnog sekutića koja se unosi kao parametar modela zubnog luka.. Na početku merenja *T-Scan*-ov softver automatski postavlja osetljivost na srednji nivo. Softver menja taj parametar ako je raspon sila zagrižaja pojedinog ispitanika presnažan ili preslab i tačno podešava individualnu osetljivost. Različite jačine sila zatvaranja u MIK mogu se grafički prikazati spektrom boja od najmanjih sila (plava/crna), preko srednjih sila (zelena/žuta), do najvećih sila (crvena/narandžasta). Preporučeni nivo osetljivosti je kada postoji samo nekoliko crvenih zona koje su okružene ili su blizu žute, zelene ili plave zone kontakta. Još jedan od sofisticiranih kvaliteta softvera koji sadrži *T-Scan* je grafikon relativnih sila u odnosu na stvarno vreme kojim je omogućeno beleženje redosleda i vremena trajanja sila zubnih kontakata (Slika 8). Siva linija sila prikazuje promene ukupne sile okluzije tokom zatvaranja na obe strane zubnog luka. Zelena linija sila prikazuje promene sila leve polovine zubnog luka.



Sl. 8. Grafikon sila u odnosu na vreme

Crvena linija sila prikazuje promene sila desne polovine zubnog luka. Uspravna puna crna linija opisuje trenutak u stvarnom vremenu segmenta filma. Postavljanjem miša u grafikonu i klikom na drugu vremensku tačku u grafikonu linija vremena se pomera na odabranu tačku. Istovremeno se dijagram sila prebacuje na odgovarajući segment u filmu prikaza sila [13-15].

4. ZAKLJUČAK

Usled brže i jednostavnije primene, preciznosti registracije zubnih kontakata i brojnih drugih prednosti u poređenju sa kvalitativnim metodama analize okluzalnih kontakata, *T-Scan* sistem predstavlja veliki potencijal u dijagnozi i terapiji poremećaja okluzije.

5. REFERENCE

- [1] Moller, E., Bakke, M.: *Occlusal harmony and disharmony: frauds in clinical dentistry?*, International dental journal, 38, p.p. 7-18, 1988.
- [2] McDevitt, W. E., Warreth, A. A.: *Occlusal contacts in maximum intercuspation in normal dentitions*, Journal of oral rehabilitation, 24, p.p. 725-734, 1997.
- [3] Molligoda, M. A., Abuzar, M., Berry, D. C.: *Measuring diurnal variations in the dispersion of occlusal contacts*, The Journal of prosthetic dentistry, 60, p.p. 235-238, 1988.
- [4] Alajbeg, I. Z., Valentic-Peruzovic, M., Alajbeg, I., Cifrek, M.: *The influence of age and dental status on elevator and depressor muscle activity*, Journal of oral rehabilitation, 33, p.p.94-101, 2006.
- [5] Tryde, G., Frydenberg, O., Brill, N.: *An assessment of the tactile sensibility in human teeth. An evaluation of a quantitative method*, Acta Odontol Scand, 20, p.p. 233-256, 1962.
- [6] Okeson J.: *Management of Temporomandibular Disorders and occlusion, 4th ed.*, MO: CV Mosby and Co, St. Louis, 1998.
- [7] Qadeer, S., Kerstein, R., Kim, R. J., Huh, J.B., Shin, S. W.: *Relationship between articulation paper mark size and percentage of force measured with computerized occlusal analysis*, The journal of advanced prosthodontics, 4, p.p.7-12, 2012.
- [8] Afrashtehfar, K. I., Qadeer, S.: *Computerized*

- occlusal analysis as an alternative occlusal indicator*, Cranio : the journal of craniomandibular practice, 34, p.p.52-57, 2016.
- [9] Millstein, P., Maya, A.: *An evaluation of occlusal contact marking indicators. A descriptive quantitative method*, J Am Dent Assoc, 132, p.p. 1280-1286, 2001.
- [10] Harper, K. A., Setchell, D.J.: *The use of shimstock to assess occlusal contacts; a laboratory study*, Int J Prosthodont, 15, p.p. 347-352, 2002.
- [11] Mannes, W. L., Benjamin, M., Podoloff, R., et al.: *Computerized occlusal analysis: a new technology*, Quintess International, 15, p.p. 287-292, 1986.
- [12] Gonzales Sequeros, O., Garrido Garcia, V. C., Garcia Cartagena, A.: *Study of occlusal contact variability within individuals in a position of maximum intercuspation using T-Scan system*, J of Oral Rehabil, 24, p.p. 287-290, 1997.
- [13] Lazić, V., Todorović, A., Živković, S., Martinović, Ž.: *Computerized occlusal analysis in bruxism*, Srp Arh Celok Lek, 134, p.p. 22-29, 2006.
- [14] Qadeer, S., Abbas, A. A., Sarinnaphakorn, L., Kerstein, R. B.: *Comparison of excursive occlusal force parameters in post-orthodontic and non-orthodontic subjects using T-Scan(R) III*, Cranio : the journal of craniomandibular practice, p.p. 1-8, 2016.
- [15] Lila-Krasniqi, Z. et al.: *Differences between Subjective Balanced Occlusion and Measurements Reported With T-Scan III*, Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences, [S.l.], 5, p.p. 667-672, aug. 2017.

Autori: Asist. dr Daniela Đurović-Koprivica, Vanr. prof. dr Tatjana Puškar, Doc. dr Milica Jeremić-Knežević, Doc. dr Bojana Milekić, dr Bojana Pivaš, Prof. dr Dubravka Marković,

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.

Vanr. prof. dr Igor Budak. Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad; Telefoni:+381 21 485 2320;+381 21 450 366, Fax: +381 21 454 495

E-mail:daniela.djurovic-koprivica@mf.uns.ac.rs

tpuskar@uns.ac.rs

milica.jeremic-knezevic@mf.uns.ac.rs

bojana.milekic@mf.uns.ac.rs

bojanapivash@gmail.com

dubravka.markovic@mf.uns.ac.rs

budaki@uns.ac.rs

Zahvalnica: U ovom radu su prikazani rezultati postignuti u okviru Projekta br. 114-451-2723/2016-03 finansiranog od strane Pokrajinskog sekretarijata za visoko obrazovanje, i u okviru projekta TR-35020, koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

**SCIENTIFIC CONFERENCE WITH INTERNATIONAL
PARTICIPATION
ETIKUM 2017
NOVI SAD, SERBIA, DECEMBER 6-8, 2017**

**Jeremić Knežević, M., Marković, D., Knežević, A., Đurović Koprivica, D., Milekić, B., Pivaš, B.,
Puškar, T.**

UPOTREBA CBCT I MAGNETNE REZONANCE U STOMATOLOGIJI

Rezime: Magnetna rezonanca (MR) predstavlja neinvazivnu, nekontrastnu dijagnostičku metodu, bez prisustva jonizujućeg zračenja. MR kao imidžing metoda predstavlja "zlatni standard" u detekciji pozicije diskusa artikularisa temporomandibularnog zgloba (TMZ), prisustva sinovijalne tečnosti u TMZ, stanja retrodiskalnog tkiva i signala koštane srži mandibularnog kondila. Poznavanje parametara i standardnih dimenzija TMZ je od izuzetnog značaja u stomatologiji, posebno protetici, ortodonciji i maksilofacijalnoj hirurgiji.

Cone beam kompjuterska tomografija (CBCT) se koristi pri planiranju ugradnje dentalnih implantata, u vizualizaciji cista, apscesa, osteomijelitisa, kao i oboljenja TMZ (trauma, razvojnih anomalija i degenerativnih oboljenja). Prednost ove metode je niža doza zračenja i mogućnost dobijanja 3D slike.

Ključne reči: magnetna rezonanca, CBCT, dijagnostika, stomatologija

1. UVOD

Stomatološka dijagnostika i planiranje terapije značajno su unapređeni uvođenjem trodimenzionalnih (3D) snimanja. Primena magnetne rezonance (MR) i Cone beam kompjuterizovane tomografije (CBCT) u stomatologiji predstavlja najnovije tehnološko dostignuće iz oblasti moderne digitalne radiologije. Stoga, CBCT i MR predstavljaju najčešće korišćene dijagnostičke metode u oblasti imidžinga u stomatologiji.

Doprinos 3D CBCT u oblasti stomatologije je od izuzetnog značaja pri postavljanju dijagnoze, planiranju lečenja obolelih kraniofacijalnih struktura, kao i proceni stanja koštanih struktura temporomandibularnog zgloba (TMZ) [1].

CBCT je optimalna metoda za procenu koštane strukture, dok je MR je standardna metoda za vizualizaciju mastikatornih mišića, ligamenata i fibrokartilaginoznog diskusa artikularisa TMZ.

Ipak, budućnost radiologije predstavlja hibridni MR i CT koji su nedavno uvedeni u praksu i koriste se u proceni stanja koštanih i mekih struktura istovremeno.

Cilj ovog rada je da sistematski predstavi i analizira dostupnu literaturu u pogledu važnosti, primenljivosti i praktičnosti primene CT i MR u stomatologiji.

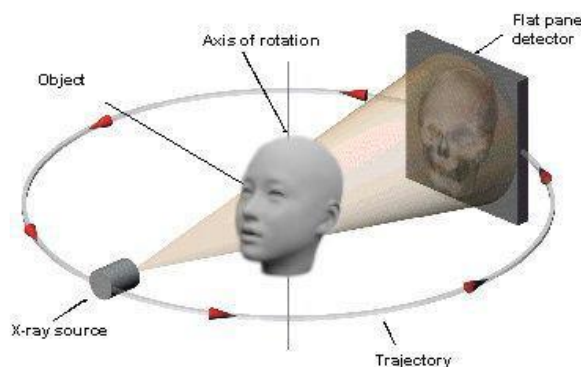
2. CBCT

CBCT skener sadrži rotirajući nosač, na koji su fiksirani izvori X-zraka i detektor. Izvor

jonizujućeg zračenja ima oblik divergentnog konusa ili piramide i usmeren je kroz centar regije interesa ka detektoru X-zračenja koji se nalazi na suprotnoj strani (Slika 1 i 2). Promer zraka varira između 4 cm i 30 cm. Rendgenska cev i digitalni detektor brzo rotiraju i tako omogućavaju dobijanje preciznih 2D i 3D snimaka [2].



Sl. 1. Izgled divergentnog konusa CBCT skenera.

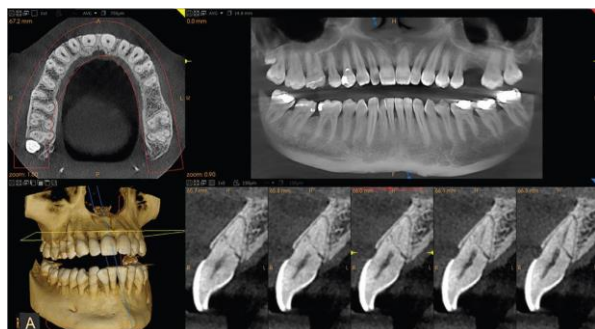


Sl. 2. Rotacija rendgenske cevi i digitalnog detektora.

U softverima za analizu CBCT snimaka mogu se generisati ortopantomogrami koji su jasniji od konvencionalnih, usled izostanka superponiranja vratnog dela kičmenog stuba i kontralateralne strane, kao i projekcionih artefakata. Način prikazivanja, svetlina i kontrast mogu se adaptirati, a snimci presecati u različitim ravnima. Takođe, postoji opcija renderovanja (kompjuterizovanog iscrtavanje 3D objekta) snimka u 3D sliku, koja se može okretati, presecati i adaptirati kako bi se bolje videle određene anatomske strukture [3].

2.1. Analiza denticije pomoću CBCT-a

Multidimenzionalna priroda volumetrijskih snimaka omogućava sveobuhvatnu vizualizaciju denticije (Slika 3), što olakšava pronalaženje neizniklih, impaktiranih i prekobrajnih zuba, određivanje stadijuma razvoja i redosleda nicanja stalnih zuba, merenje veličine zuba, detekciju karijesa eksterne resorpcije, fraktura ili nepravilnosti korenova, koštanih ili dentogenih cista, apscesa, osteomijelitisa, odontoma, mukoznih retencionih cista i drugih ograničenja koja mogu ometati ili sprečavati nicanje ili pomeranje zuba.



Sl. 3. Analiza denticije pomoću CBCT snimka i generisanog OPT snimka

2.2. Analiza impaktiranih zuba pomoću CBCT

Trodimenzionalni snimci omogućavaju tačnu lokalizaciju ektopičnih zuba, procenu njihovog odnosa sa susednim zubima i planiranje najmanje invazivne terapije (Slika 4). Ortodonti mogu da isplaniraju pozicioniranje bravica i pravac delovanja sila, a hirurzi manju inciziju i konzervativnije podizanje režnja. Impaktirani zub može pomeriti, ometati nicanje i/ili izazvati eksternu resorpciju susednih zuba, što se na CBCT snimcima može detaljno analizirati. Kliničke studije rađene na 3D snimcima, pokazale su da je resorpcija korenova susednih zuba mnogo češća pojava nego što se ranije mislilo. Oralni hirurzi takođe mogu da odrede položaj impaktiranih umanjaka i njihov odnos sa mandibularnim

kanalom[4].

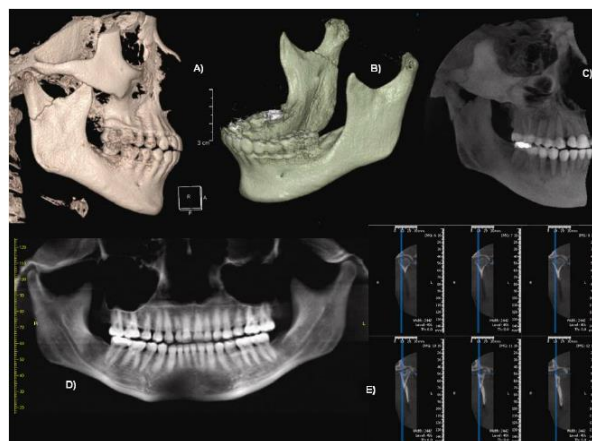


Sl. 4. CBCT snimak vilica sa impaktiranim gornjim očnjacima

2.3. Analiza stanja temporomandibularnog zgloba pomoću CBCT-a

Analizom TMZ-a pomoću različitih radiografskih tehnika utvrđeno je da je procena pomoću CBCT-a bolja od tradicionalne radiografije i konvencionalnog CT-a. Kvalitet dijagnostike i niži nivo zračenja, kao i veća osetljivost i prednost prilikom uočavanja nepravilnosti kondila u poređenju sa CT-om, čini CBCT sredstvom izbora u dijagnostici koštanih promena na nivou TMZ-a[5]. TMZ se na CBCT snimcima može vizualizirati kao zapremina ili posmatrati u sagitalnim, transferzalnim i frontalnim presecima, kao i paralelnim ili upravnim na uzdužnu osovinu kondila. Na taj način mogu se porediti koštane komponente TMZ-a u sve 3 ravni prostora.

Pomoću CBCT mogu se dijagnostikovati frakture (Slika 5), urođeni, razvojni i stečeni poremećaji.

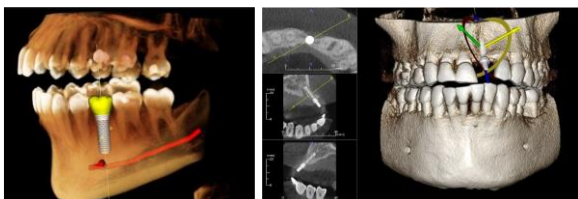


Sl. 5. A) Različita mogućnost vizualizacije TMZ kompleksa upotrebom CBCT-a, u slučaju frakture kondila mandibule. B) Prikazana je raširenost frakture. C) Radiografski »mode«. D) Panoramski

snimak. E) Presek na različitim nivoima u radiografic »modu».

2.4. Primena CBCT u implantologiji

Svoju primenu CBCT skeneri su našli i pri planiranju postavljanja dentalnih implanata (Slika 6). Položaj određenih anatomskih struktura, količina preostale kosti, gustina kosti, rastojanje od maksilarnog sinusa i pozicija n.alveolaris inferiora se lakše utvrđuje korišćenjem 3D snimaka, što omogućava preciznije postavljanje implanata i bolje estetske rezultate.

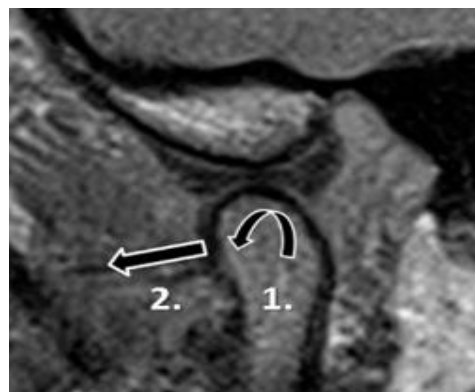


Sl. 6. Planiranje postavljanja dentalnog implanta u donjoj i gornjoj vilici pomoću CBCT.

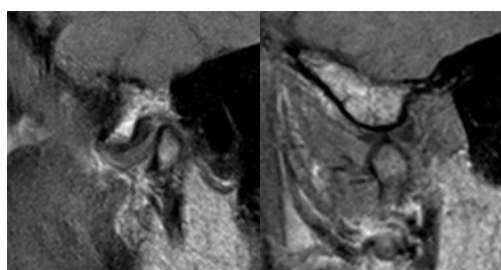
3. MAGNETNA REZONANCA

MR predstavlja neinvazivnu, nekontrastnu dijagnostičku metodu, bez prisustva jonizujućeg zračenja. MR se bazira na interakciji između jezgra vodonika, kojim su bogata sva biološka tkiva, i magnetnog polja koje generiše i kontroliše sistem MR. Prvi humani snimak pomoću MR je načinjen 1977.godine, dok je prvi snimak TMZ objavio Helms 1984.godine[6].

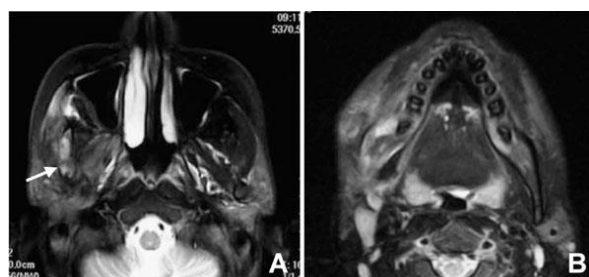
Kao imidžing metoda, u stomatologiji dominantno se koristi u postavljanju dijagnoze temporomandibularnih disfunkcija (TMD), koje mogu dovesti do degeneracije diskus articularisa i inflamatornih stanja koja zahvataju kosti i meka tkiva [7]. Takođe se koristi u proceni stanja pljuvačnih žlezda, maksilarnih sinusa, maseteričnih mišića, u detekciji ranih promena na kostima pri sumnjanju na tumor, inflamaciju i hematom[8]. Nešto manje je prisutna u endodonciji. MR predstavlja "zlatni standard" u detekciji pozicije diskus articularisa TMZ (Slika 7), prisustva sinovijalne tečnosti u TMZ, stanja retrodiskalnog tkiva i signala koštane srži mandibularnog kondila [9]. Koristi se za utvrđivanje dislokacije artikularnog diska (Slika 8), postojanja inflamatornih promena u TMZ (Slika 9), postojanja tumorskih masa (Slika 10), kao i u detekciji degenerativnih promena na zglobnim površinama TMZ (Slika 11). Nedavno, MR je našla primenu u implantnoj stomatologiji pružajući preciznije informacije o visini i gustini kosti.



Sl. 7. Prikaz normalne pozicije diska, eminencije articularis i kondila pri otvorenim ustima kao i translacije kondila na MR (1.) koje rotira a zatim pravi kombinovanu kretnju rotacije i translacije anteriorno (2.)



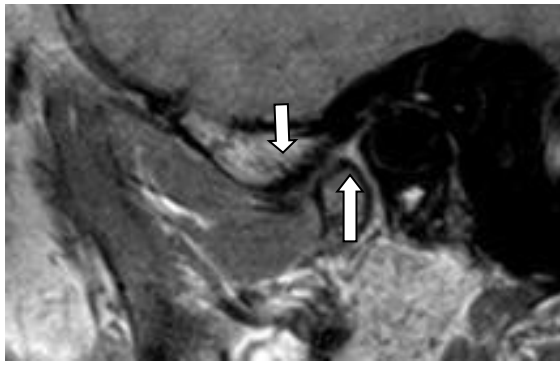
Sl. 8. Prednja dislokacija diska sa redukcijom u položaju zatvorenih i otvorenih usta. U položaju zatvorenih usta, zadnja zona diska je smeštena ispred „pozicije diska na 12 sati“, dok je pri otvorenim ustima u normalnom položaju



Sl. 9. Inflamacija u predelu desnog TMZ, deformacija kondila mandibule i destrukcija kosti



Sl. 10. Aksijalni i sagitalni snimak TMZ na MR. Tumorska masa unutar m.pterygoideus lateralis, koja pritiska diskus articularis, metastaze iz glave kondila mandibule



Sl. 11. Osteoartrične promene na kondilu mandibule i mandibularnoj jami

4. ZAKLJUČAK

Pored velikog broja prednosti koje donosi upotreba CBCT-a, postoji i određen broj mana, kao što su izloženost zračenju, cena aparata, kao i potreba obučavanja stomatologa za tumačenje kompletnog snimka. Osim toga, ova tehnika pokazuje slabije rezultate kada je u pitanju analiza struktura kao što su mišići i tetive u odnosu na MR. Takođe, kod snimaka mekih tkiva, softver nije u stanju da sam generiše podatke o boji, te je potrebna određena manipulacija kako bi se postigao realističan izgled, nalik fotografiji. Ipak, postoje indikacije u kojima je CBCT metoda izbora.

CBCT omogućava 3D vizualizaciju koja je kompleksija i tačnija od analogne i digitalne radiografije. Ona ima brojne indikacije u oralnoj i maksilofacijalnoj regiji uz nižu dozu zračenja od CT. Indikovana je pri ugradnji dentalnih implanata, identifikaciji impaktiranih zuba, u ortodontiji, pri proceni stanja koštanih struktura TMZ, u endodontiji u detekciji i lečenju kanala korena višekorenih zuba i periapikalnih lezija.

Magnetna rezonanca je biološki sigurna metoda koja ne koristi jonizujuće zračenje. Ona pruža jasniju sliku temporomandibularnih zglobova, položaja dentalnih implanata, tumora pljuvačnih žlezda, a koristi se i u dijagnostici najkompleksnijih slučajeva koji zahvataju TMZ. Ova tehnika takođe, omogućava preciznu digitalizaciju površine zuba koja je adekvatna za nadoknadu zuba i detektuje resorpciju korena zuba koja je naročito nepoželjna kod ortodontskih pacijenata.

5. REFERENCE

[1] Honda K, Larheim TA, Maruhashi K, Matsumoto K, Iwai K. Osseous abnormalities of the mandibular condyle: diagnostic reliability of cone beam computed tomography compared with helical computed

tomography based on an autopsy material. *Dentomaxillofac Radiol*, 35(3):152-7, 2006

[2] Scarfe WC, Farman AG. *What is Cone-Beam and how does it work?* *Dent Clin N Am*, 52:707-730, 2008

[3] Mah JK, Danforth RA, Bumann A, Hatcher D. *Radiation absorbed in maxillofacial imaging with a new dental computed tomography.* *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 96:508-513, 2003

[4] Chaushu S, Chaushu G, Becker A. *The role of digital volume tomography in the imaging of impacted teeth.* *World J Orthod*, 5:120-132, 2004

[5] Tsiklakis K, Syriopoulou K, Stamatakis HC. *Radiographic examination of the temporomandibular joint using cone beam computed tomography.* *Dentomaxillofac Radiol*, 33:196-201, 2004

[6] Helms CA, Richardson ML, Moon KL, Ware WH. *Nuclear magnetic resonance imaging of the temporomandibular joint: preliminary observations.* *The Journal of cranio-mandibular practice*, 2(3):219-24, 1984

[7] Lav Kumar Niraj et al., *MRI in Dentistry*, *Journal of Clinical and Diagnostic Research*, Vol-10(10), 2016

[8] Al-Saleh et al. *MRI and CBCT image registration of temporomandibular joint: a systematic review.* *Journal of Otolaryngology Head and Neck Surgery*, 45:30, 2016

[9] Tomas J PJ, Berenguer J, Quinto L. *MR imaging of temporomandibular joint dysfunction: a pictorial review.* *Radiographics*, 26:765-81, 2006

Autori: Doc. dr Milica Jeremić Knežević, Univerzitet u Novom Sadu, Medicinski fakultet, Hajduk Veljkova 3, 21000 Novi Sad, Srbija.

E-mail: milica.jeremic-knezevic@mf.uns.ac.rs
dubravka.markovic@mf.uns.ac.rs
aleksandar.knezevic@mf.uns.ac.rs
daniela.djurovic-koprivica@mf.uns.ac.rs
bojana.milekic@mf.uns.ac.rs
bojanapivash@gmail.com
tatjana.puskar@mf.uns.ac.rs

Vicko, K., Puškar, T., Santoši, Ž., Eggbeer, D.

PRIMENA 3D TEHNOLOGIJA KOD IZRADE DENTALNIH MOBILNIH APARATA

***Rezime:** Svrha ovog istraživanja je bio da se prikaže proces tehnološke izrade ortodontskog mobilnog aparata aditivnom tehnologijom, metodom 3d štampanja i uporedi sa izradom aparata na konvencionalan način. Za digitalizaciju gipsanih modela sa konstrukcionim zagrižajem korišćena je fotogrametrijska metoda 3D digitalizacije. Monoblok sa svim elementima je dizajniran u FreeForm Plus (v2016, Geomagic, 3d-Systems, USA) softveru podržan sa haptičke rukom. 3D štampanje je rađeno u MarkForged Mark Two printeru od najlona (poliamidi). Debljina materijala u slojevitom štampanju je bila 0.1mm. Štampanje je trajalo oko 4 sata, a suportivne strukture su uklonjene za manje od jednog minuta. Tehnološki razvoj omogućio je digitalizaciju postupka rada, što dovodi do veoma ubrzanog procesa izrade, međutim potrebna su bolja svojstva najlona kao materijala za intraoralnu primenu.*

***Ključne reči:** 3D tehnologije, monoblok, 3D digitalizacija, 3D štampa*

1. UVOD

Računarom podržani sistemi (CAD/CAM/AM) se uspešno koriste u različitim oblastima stomatologije, prevashodno u polju protetike i implantologije [1,2,3]. Što se tiče drugih oblasti kao što je ortodoncija, CAD/CAM/AM korišćen je za izradu okluzalnih splintova, ali ne i za izradu drugih mobilnih ortodontskih aparata. Sasani i Roberc utvrđuju da je moguće izraditi telo mobilnih aparata ali ne i da mogu uspešno da se inkorporiraju žice u odštampani 3D model pomoću CAD/CAM/AM tehnologije [4]. CAD/CAM/AM tehnologija u ovoj oblasti koristi se danas za izradu Invizalajn (Align Technology) folija i individualnih lingvalnih bravica. Grupa autora [5] su dokazali da je moguće izraditi 3D model sa žicama koje se naknadno inkorporiraju u telo aparata. Usled relativno ograničene primene 3d tehnologije u izradi mobilnih aparata, ovaj rad prikazuje izradu monobloka kao retencionog aparata nakon završene fiksne ortodontske terapije.

2. MATERIJALI I METODE

Nakon završene ortodontske terapije uzeti su otisci alginatom za izradu gipsanih modela gornje i donje vilice, kod pacijenta kod koga je planirana izrada retencionog ortodontskog aparata u vidu monobloka. Nakon otisaka uzet je kontrukcioni zagrižaj pacijenta na osnovu čega se određuje međusobni vertikalni, sagitalni i transverzalni odnos gipsanih modela gornje i donje vilice Slika 1.



Sl.1. Gipsani modeli gornje i donje vilice sa konstrukcionim zagrižajem od voska.

2.1 3D digitalizacija

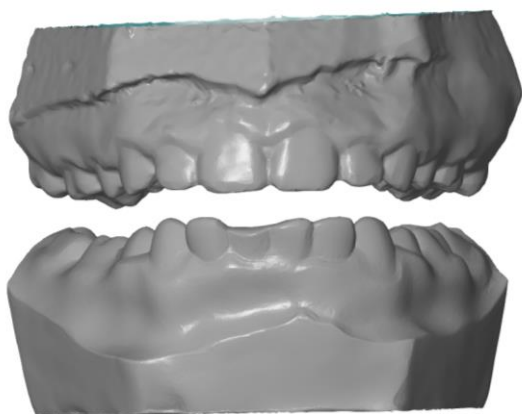
Transformacija fizičkog u digitalni 3D objekat predstavlja jedan složeni prilaz koji se sastoji od nekoliko koraka. Prvi i najvažniji korak jeste 3D digitalizacija, koja upravo vrši prikupljanje podataka sa površine fizičkog objekta i prevodi ih u računarski razumljiv oblik. Rezultat 3D digitalizacije se ogleda u uređenom skupu tačaka zapisanih u Dekartovim koordinatama X,Y,Z. Do danas je razvijen velik broj metoda 3D digitalizacije koje su zasnovane na različitim principima rada, među kojima su najzastupljenije optičke metode. Prednost optičkih metoda u odnosu na druge metode je ta što daju najbolje rezultate gledajući odnos: tačnost, cena, brzina akvizicije, veličina i materijal objekta 3D digitalizacije. Za ovu studiju slučaja izabrana je fotogrametrijska metoda 3D digitalizacije

zasnovane na „proceni strukture iz kretanja“ (eng. Structure from motion). Ova metoda zasniva se na snimanju objekta sa više različitih pozicija i softverskom obradom fotografija. Na slici 3 prikazana je postavka za 3D digitalizaciju.



Sl. 3. Postavka fotogrametrijske 3D digitalizacije

Akvizicija fotografija vršena je sa DSLR fotoaparatom koji poseduje APS-C senzor sa faktorom umanjavanja (crop faktor) od 1,6 i objektivom sa promenljivom žižnom daljinom od 18 do 55mm. Objekat je postavljen na obrtni sto na kome su bili postavljeni referentni markeri poznate udaljenosti koji su služili za definisanje razmere 3D modela. Ukupno je napravljeno 3 seta fotografija tj. rekonstruisana su 3 3D modela. Cilj je bio da se dobije 3D model u konstrukcionom zagrižaju ali bez voska između modela. Prvi 3D model je kreiran u sklopu (zagrižaju) kako bi se odredio međusobni položaj gornje i donje vilice. Zbog same geometrije sklopa moguće je bilo rekonstruisati samo spoljašnje površine, dok su unutrašnje površine i nalegajuće površine ostale ne rekonstruisane. Kako bi se rešio ovaj problem sklop je rastavljen i pojedinačno je rekonstruisan model gornje i donje vilice.



Sl. 4. 3D model gornje i donje vilice u konstrukcionom zagrižaju

Pojedinačni 3D modeli vilica postavljeni su u relativno jedan u odnosu na drugi poravnavajući ih sa referentnim 3D modelom sklopa. Kada su pojedinačni 3D modeli vilica poravnati njihova pozicija je sačuvana, a referentni 3D model sklopa je izbrisan (slika 4.).

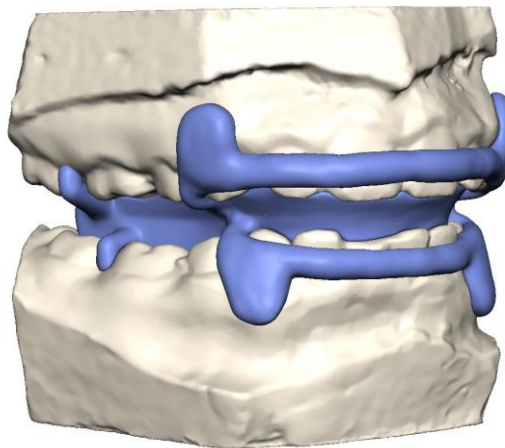
2.2 Virtuelno modeliranje

Postupak virtuelnog modelovanja se odnosi na kreiranje ili obradu već postojećih 3D modela pomoću specijalizovanih hardverskih uređaja. Ovi specijalizovani uređaji pružaju korisniku povratne informacije u vidu odziva (eng. feed back) u odnosu na definisana svojstva dodeljenog materijala 3D modela. Drugim rečima ukoliko se 3D modelu dodeli manja tvrdoća ili neko drugo svojstvo, korisnik uređaja će to moći i da oseti.



Sl. 5. Haptička ruka i monoblok pravljen u softveru Freeform Plus (v2016, Geomagic, 3d-Systems, USA)

Primer ovakvog uređaja dat je na slici 5. Naime radi se o haptičkoj ruci koja je povezana sa računarem i omogućava obradu 3D modela u softverskom paketu Freeform.



Sl. 6. Izmodeliran 3D monoblok na osnovu 3D modela gornje i donje vilice u konstrukcionom

zagrižaju

Na slici 6. prikazan je izmodeliran 3D monoblok na osnovu 3D modela gornje i donje vilice u konstrukcionom zagrižaju. Na dizajn ovog monobloka uticao je pre svega materijal i način izrade. Potrebno je bilo obezbediti dobro naleganje kao i minimalne dimenzije, ali zadržati funkcionalnost i vek trajanja monobloka. Nakon što je 3D model monobloka bio završen prešlo se na sledeću fazu a to je njegova izrada.

2.3 3D štampa

3D štampa je proces suprotan 3D digitalizaciji, što znači da pomoću 3D štampe virtuelni 3D modeli postaju fizički. Sama tehnologija se zasniva na dodavanju materijala sloj po sloj. U ovoj studiji slučaja za izradu monobloka korišćen je dostupni 3D štampač zasnovana na FFF (eng. Fused Filament Fabrication) tehnologiji MarkForged Mark Two (Slika 7.), gde je kao gradivni element korišćen najlon (poliamidi).

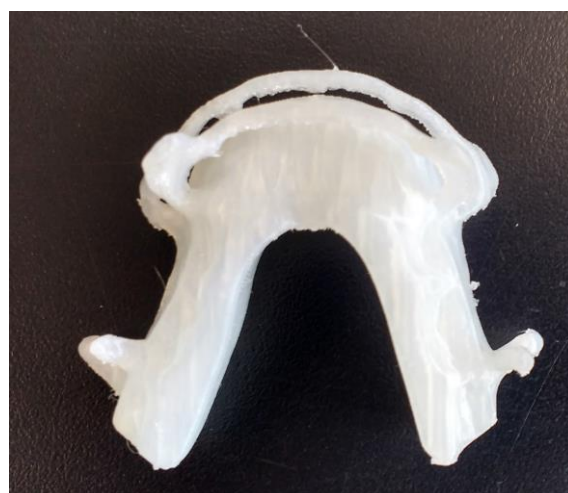


Sl. 7. MarkForged Mark Two 3D štampač

Rezolucija ovog štampača iznosi 0,1mm, a maksimalna radna zapremina iznosi 320x132x154mm. Zbog samog principa rada štampača i geometrijske složenosti monobloka prilikom štampe uz monoblok morili su da se grade potporni nosači. Ovi nosači su neophodni prilikom štampe složenih oblika ovom tehnologijom. Nedostatak tačnosti ili nusušnog štampanja može da se javu usled njihove loše distribucije. Prikaz gotovog odštampanog monobloka sa još uvek ne uklonjenim potpornim nosačima može se videti na slici 8. dok je na slici 9. prikazan monoblok sa uklonjenim potpornim nosačima. Na sliici 10. prikazan je montiran odštampani monoblok na gornjoj i donjoj gipsanoj vilici.



Sl. 8. Odštampan monoblok sa potpornim nosačima



Sl. 9. Monoblok sa uklonjenim potpornim nosačima



Sl. 10. Gipsani modeli gornje i donje vilice sa odštampanim monoblokom

3. DISKUSIJA

Izrađen 3D model neadekvatno naleže na gipsani model, pa se zbog toga ne može očekivati dobra adaptacija monobloka u ustima pacijenta. Ovaj problem nastaje pre svega zbog karakteristika korišćenog materijala. Naime najlon koji se koristio za izradu monobloka ne bi se mogao primenjivati u kliničkim uslovima kod pacijenta, usled izrazite neravne površine i hrapavosti diktirane od strane rezolucije 3D štampača uzrokovale bi iritacije i neudobnost kod pacijenta. Takođe krtost i nedovoljna čvrstoća izrađenog monobloka čine ovaj aparat nepodobnim za kliničke uslove. Pored toga prednosti 3D dizajniranja je u tome što daje mogućnost određivanja tačne debljine i dimenzija aparata. Veliki potencijal leži i u mogućnosti povezivanja 3D štampanja sa intraoralnim skeniranjem, koje omogućava izbegavanje faze uzimanja otisaka i faze izrade gipsanog modela, što samim tim dovodi do ubrzanja samog procesa izrade mobilnog aparata.

4. ZAKLJUČAK

Rad prikazuje da 3D tehnologije mogu biti primenjeni za izradu monobloka, međutim neophodno je postići poboljšanja mehaničkih svojstva najlona (u ovom slučaju) kao materijala za štampanje, odnosno izabrati drugi podobniji materijal za primenu u kliničkim uslovima. Iako je proces izrade monobloka 3D tehnologijama u ovom trenutku veoma složen i skup proces u odnosu na konvencionalnu izradu aparata, benefiti uvođenja 3D tehnologija u druge grane stomatologije su već opravdane, prisutne i od velikog značaja.

5. REFERENCE

- [1] S., Baloš, M., Milutinović, M., Potran, J., Vuletić, T., Puškar, T., Pepelnjak, "The mechanical properties of moulded and thermoformed denture resins", *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, vol. 61, no. 2, pp.138-145, 2015.
- [2] J., Hodolič, T. Puškar, I., Bešić, "Current status and future trends in dental CAM restorative systems", *Proceedings of the 34th international conference on production engineering*, pp. 28-29, 2011.
- [3] S., Mirković, I., Budak, T., Puškar, A., Tadić, M., Šokac, Ž. Santoši, T., Đurđević-Mirković, "Application of modern computer-aided technologies in the production of individual bone graft: A case

report", *Vojnosanitetski pregled*, vol.72, no. 12, pp.1126-1131, 2015.

- [4] F., Sassani, S., Roberts, "Computer-assisted fabrication of removable appliances", *Comput Industry*, vol.29, pp.179-95. 1996.
- [5] N., Al Mortadi, , D., Eggbeer, J., Lewis, R.J., Williams, "CAD/CAM/AM applications in the manufacture of dental appliances", *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol.142, no.5, pp.727-733, 2012.

Autori:

M.Sc. Kristina Vicko¹, Vanr. prof. Tatjana Puškar¹

Katedra za stomatologiju, Medicinski fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Hajduk Veljkova 3, Srbija;

M.Sc. Željko Santoši², Univerzitet Novi Sad, Fakultet Tehničkih Nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija, Tel: +381 21 485 2350, Fax: +381 21 454-495.

Dominic Eggbeer³

Dominic Eggbeer, Metropolitan University Cardiff

E-mail: kvicko@uns.ac.rs

tpuskar@uns.ac.rs

zeljkos@uns.ac.rs

degbeer@pdronline.co.uk

Napomena:

U ovom radu su predstavljeni rezultati ostvareni u okviru Projekta br. 114-451-2723/2016-03 finansiranog od strane Pokrajinskog sekretarijata za obrazovanje, nauku i tehnološki razvoj, odnosno u okviru projekta TR - 35020 iz Programa tehnološkog razvoja Ministarstva za obrazovanje, nauku i tehnološki razvoj R. Srbije.

Laban Terzija, J., Milekić, B., Puškar, T., Mirković, S., Pivaš, B., Santoši, Ž., Šokac, M.

REŠAVANJE PROBLEMA RETENCIJE I STABILIZACIJE GORNJE TOTALNE PROTEZE POMOĆU IMPLANATA

Rezime: Totalna proteza je mobilna zubna nadoknada kojom nadoknađujemo izgubljene žvačne jedinice, delove alveolarnog grebena izgubljene koštanom resorpcijom i vraćamo funkcije stomatognatog sistema. Kada ne postoje dobri anatomsko-morfološki uslovi za postizanje adekvatne retencije i stabilizacije gornje totalne proteze pacijentu su otežane funkcije žvakanja, govora, gutanja, narušen je izgled, pa čak i psihičko stanje. Upotrebom endosealnih implantata u preprotetičkoj pripremi može se prevazići neadekvatna morfologija potpornih tkiva gornje vilice i obezbediti adekvatna retencija i stabilizacija. Postavljanje indikacija i planiranje mesta i pozicije za ugradnju implanata vrši se nakon analize CBCT snimka regije od interesa. Nakon ugradnje implanata pristupa se izradi implantno nošene i implantno retinirane gornje totalne proteze. Protetička suprastruktura bira se na osnovu analize položaja impanata i međuviličnog prostora. Abatmenti sa kuglanma u prikazanom kliničkom slučaju su obezbedili dobru retenciju i stabilizaciju proteze uz postizanje optimalnih estetskih rezultata.

Ključne reči: Dentalni implantati; Zubne nadoknade sa implantima; Retencija gornje totalne proteze

1. UVOD

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

Totalna proteza je mobilna zubna nadoknada kojom nadoknađujemo izvađene zube, delove alveolarnog grebena i vraćamo izgubljene funkcije stomatognatog sistema. Smatra se da totalna proteza, kako bi se uspešno nosila, mora zadovoljiti zahteve potpore, retencije i stabilizacije [2,3].

Ležište baze gornje totalne proteze čine alveolarni greben, tvrdo nepce, tuber maksile i krista zigomatiko-maksilaris, iza koje se u bezubim ustima nalazi paratubarni prostor koji je važan za retenciju totalne proteze [4].

Nakon ekstrakcije zuba alveolarni nastavak gubi svoju funkciju i počinje da podleže resorptivnim promenama. Kao posledica ovih promena alveolarni nastavak se najčešće neravnomerno snižava i sužava. Rezultat svega je da postoje različiti oblici i dimenzije bezubih alveolarnih nastavaka gornje vilice, što direktno utiče na oblik i dimenziju protezne ploče.[5] Pojava neravnomerno i potpuno resorbovanog grebena u praksi stvara ozbiljne probleme za kvalitetnu protetsku rehabilitaciju bezubih pacijenata [6].

Pod pojmom retencije totalnih proteza podrazumeva se svojstvo proteze da se suprotstavi silama koje teže da je pomere iz ležišta u okluzalnom pravcu, da se odupre sili gravitacije, lepljivosti hrane i silama koje deluju pri otvaranju usta.

Stabilnost totalnih proteza označava kvalitet proteza da što mirnije, uravnoteženo i trajno leže u svom ležištu pri dejstvu sila koje se javljaju u funkciji, posebno pri žvakanju [5].

Ukoliko totalna zubna proteza nema adekvatnu retenciju i stabilizaciju funkcije žvakanja, gutanja i govora biće otežane. Biće narušen i izgled pacijenta, a takvo stanje može imati i negativan uticaj na psihičko stanje pacijenta. Na loše retiniranu i loše stabilizovanu protezu pacijent će se teško navići, te nepovoljni anatomske uslovi za proteziranje bezubih pacijenata predstavljaju indikaciju za izradu implantima retinirane i stabilizovane proteze.

U svakodnevnoj kliničkoj praksi srećemo se sa relativno velikim brojem pacijenata kojima zahtevaju implantološko-protetski tretman, a kod kojih je gubitkom jednog, više ili svih zuba došlo do značajnog deficita kosti rezidualnog alveolarnog grebena [7]. U slučaju izražene resorpcije alveolarnog grebena, rešavanje problema bezubih pacijenata podrazumeva hi- rušku pripremu, to jest ugradnju dentalnih implantata s izradom suprastrukture u obliku prekrivajuće proteze ili mostova [8].

Problem rehabilitacije krezubih i bezubih

pacijentata nije vezan samo za nerazvijene zemlje. Više od 60 % stanovništva u visoko industrijalizovanim zemljama zahteva implantološko-protetsku rehabilitaciju, što je razlog godišnjeg porasta proizvodnje i ugradnje implantata za oko 15% [9].

2. CILJ

Prikaz slučaja rešavanja problema retencije i stabilizacije gornje totalne proteze pomoću endosealnih implantata.

3. PRIKAZ SLUČAJA

3.1 Planiranje terapije i hirurška faza

Planiranje terapije i priprema za ugradnju endosealnih implantata obuhvata anamnezu, klinički pregled i analizu RTG snimka. Pomoću CBCT snimka, pre postavke implantata, na osnovu podataka o dimenzijama raspoložive alveolarne kosti, može se izabrati veličina implantata i mesto za njegov plasman (Slika 1).



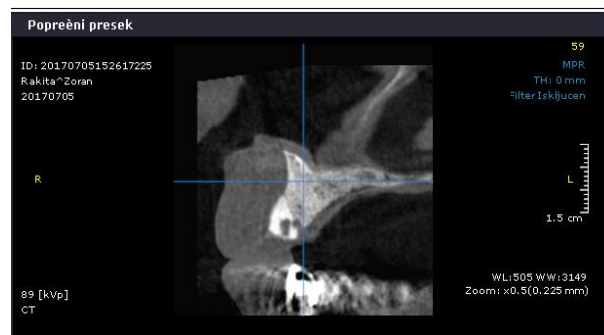
Sl. 1. CBCT pacijenta, panoramski prikaz

CBCT nam omogućava da izmerimo gustinu, visinu i buko-lingvalnu širinu alveolarne kosti, kao i da vizuelizujemo patološke procese, inklinaciju rezidualnih alveolarnih grebena i analizu položaja vitalnih anatomskih struktura, kao što su npr. pod maksilarnog sinusa, (Slika 2 i 3).

Na Slici 1 prikazan je transverzalni presek na CBCT snimku gornje vilice pacijenta (Slika 1). Uočava se da je rezidualni alveolarni greben izrazito resorbovan. Na Slici 2 vidi se 3D prikaz gornje vilice sa prisutnim gonjim centralnim sekutićima i gornjim levim očnjakom, koji su indikovani za ekstrakciju, dok se na Slici 3 vidi poprečni presek u regiji gornjeg levog očnjaka. Adekvatne dimenzije rezidualnog alveolarnog grebena za ugradnju endosealnih implantata utvrđene su u interkaninnoj regiji.



Sl. 2. CBCT pacijenta 3D prikaz



Sl. 3. CBCT pacijenta poprečni presek

U toku kliničkog pregleda urađena je detaljna inspekcija mekotkivnih i koštanih struktura i procena stanja rezidualnog alveolarnog grebena. Nakon toga, pristupilo se hirurškoj fazi terapije, odnosno ugradnji endosealnih implantata u kost. Incizijom tj. otvorenom hirurškom tehnikom sa odizanjem mukoperiostalnog režnja, ugrađena su 4 endosealna implantata u rezidualni alveolarni greben gornje vilice.

3.2. Protetička faza

Pre početka izrade implantno retinirane totalne proteze potrebno je odrediti međuvilične odnose kod pacijenta. Na osnovu analize raspoloživog prostora između gornjeg rezidualnog alveolarnog grebena i donjih zuba utvrđeno je da se kao abatmenti mogu koristiti kugle. One su ekonomski povoljnije od abatmenta sa lokatorima, koji su indikovani u slučaju veoma malog prostora i skoro paralelno postavljenih implanata.

Pošto se radi o endosealnim implantatima u nivou kosti, nakon 3 meseca od njihove ugradnje postavljeni su gingiva formeri koji su formirali mekotkivni profil. Nakon 14 dana započeta je izrada mobilne zubne nadoknade odnosno gornje totalne proteze. Skinuti su gingiva formeri. Na Slici 4 vidi se izgled mekotkivnog profila gingive nakon odvrtnja gingiva formera. Pomoću parodontalne sonde izmerena je visina mekog tkiva da bi se odredila visina vratnog dela suprastrukture-abatmenta sa kuglom (Slika 5).

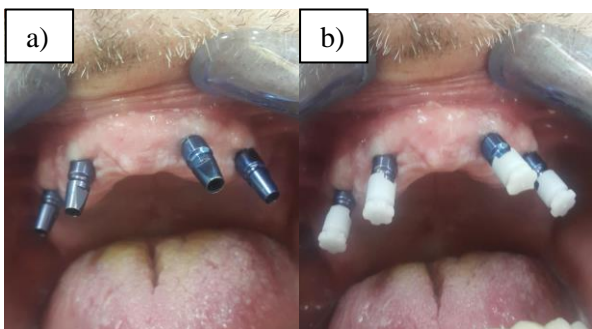


Sl. 4. Izgled mekotkivnog profila nakon vađenja gingiva formera.



Sl. 5. Merenje dubine mekotkivnog profila.

Visina mekog tkiva bila je 2 mm u regiji gornjeg levog i desnog očnjaka i desnog sekutića, dok e u regiji levog sekutića bila 1 mm. Nakon toga su zavrnuti transferi (Slika 6a) i na njih su stavljene plastične kapice (Slika 6b).



Sl. 6. a) Zavrnuti transferi b) Plastične kapice

Uzeta je fabrička kašika i u nju je stavljen viskozni adicioni silikon, a oko transfera je stavljen adicioni silikon srednje viskoznosti.

Kašika sa otisnom masom je uneta u usta pacijenta. Nakon vezivanja materijala kašika je izvađena iz usta, a plastične bele kapice su ostale

u otisku. One su omogućile tačno pozicioniranje transfera u otisak nakon njihovog odvrtnja sa implantata i vađenja iz usta pacijenta. Pre vraćanja transfera u otisak na transfere su zavrnuti analozi implantata. Ovakav način uzimanja otiska naziva se otisak u zatvorenoj kašici.

Zubni tehničar je izlio radni model i u analoge implantata postavio je abatmenti sa kuglama (Slika 8).



Sl. 8. Abatmenti sa kuglama na radnom modelu

Na definitivnom radnom modelu izrađeni su zagrižajni bedemi. Zatim je usledila faza određivanja međuviličnih odnosa. Pomoću obraznog luka zagrižajne šablone su prenete u artikulator i ugipsani su radni modeli. Izbor boje oblika i veličine veštačkih zuba za protezu izvršen je na osnovu raspoloživog međuviličnog prostora i na osnovu morfoloških i estetskih pokazatelja. Nakon završene postave zuba u laboratoriji, urađena je proba postave zuba u ustima pacijenta. Nakon završetka laboratorijske faze izrade gornje totalne proteze, abatmenti sa kuglama su postavljeni u usta pacijenta i zavrnuti silom od 35N pomoću specijalnog ključa za kugle (Slika 9).



Slika 9. Abatmenti sa kuglama u ustima pacijenta.

Gornja totalna proteza je postavljena na gornju bezubu vilicu (Slika 10). Proverena je okluzija i artikulacija. Pacijentu je objašnjeno na koji način treba da koristi i održava zubnu protezu, a nakon 24h je načinjena kontrola radi eventualne korekture proteze.



Sl. 10. Izgled gotove gornje totalne proteze retinirane i stabilizovane implantatima.

4. ZAKLJUČAK

Loša retencija i stabilizacija gornje totalne proteze rešena je na optimalan način izradom implantatima retinirane i stabilizivane gornje totalne proteze.

5. REFERENCE

- [1] Mirković S; Mini dentalni implanti; Univerzitet u Novom Sadu, medicinski fakultet, 2013;p 7.
- [2] Hurčak I, Badel T. Estetika i funkcija postave prednjih zubi u potpunim protezama [diplomski rad]. Zagreb: Stomatološki fakultet; 2011.
- [3] McCord FJ. Contemporary Techniques for Denture Fabrication. J Prosth Dent. 2009;18:106-11
- [4] Suvin M. Biološki temelji protetike-totalna proteza. Zagreb: Školska knjiga; 1984. Pp. 1-83.
- [5] Krstić M, Petrović A, Stanišić-Sinobad D, Stošić Z. Stomatološka protetika: totalna proteza. Beograd: Velarta; 2006.
- [6] Jurišić M, Stamenković D, Marković A, Todorović A, Leković V, Dimitrijević B et al. Oralna implantologija. 1st ed. Beograd: Stomatološki fakultet Beograd; 2008.

- [7] 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
- [8] Marković D. Totalne zubne proteze i resorpcija rezidualnog alveolarnog grebena (doktorska disertacija). Beograd: Stomatološki fakultet; 2003.
- [9] Peterson K, Pamenius M, Eliasson A, Narby B, Holender F, Palmqvist S& Hakansson J. 20-year follow-up of patients receiving highcost dental care within the Swedish Dental

Autori:

Dr Jovana Laban Terzija¹, doc. dr Bojana Milekić¹, vanr. prof. dr Tatjana Puškar¹, prof. dr Siniša Mirković¹, dr Bojana Pivaš¹, M.Sc. Željko Santošić², M.Sc. Mario Šokac².

¹Univerzitet Novi Sad, Medicinski fakultet, Hajduk Veljkova, Hajduk Veljkova 3, 21000 Novi Sad, Srbija.

²Univerzitet Novi Sad, Fakultet Tehničkih Nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija, Tel: +381 21 485 2350,

E-mail: jovana.laban@gmail.com
bojana.milekic@mf.uns.ac.rs
tatjana.puskar@mf.uns.ac.rs
sinisa.mirkovic@uns.ac.rs
bojanapivash@gmail.com
zeljkos@uns.ac.rs
marios@uns.ac.rs

Napomena:

U ovom radu su predstavljeni rezultati ostvareni u okviru Projekta br. 114-451-2723/2016-03 finansiranog od strane Pokrajinskog sekretarijata za obrazovanje, nauku i tehnološki razvoj, odnosno u okviru projekta TR - 35020 iz Programa tehnološkog razvoja Ministarstva za obrazovanje, nauku i tehnološki razvoj R. Srbije.

**SCIENTIFIC CONFERENCE WITH INTERNATIONAL
PARTICIPATION
ETIKUM 2017
NOVI SAD, SERBIA, DECEMBER 6-8, 2017**

Matin, I., Vukelić, Đ., Hadžistević, M., Štrbac, B., Potran, M.

**UNAPREĐENJE KVALITETA IZRADE METALNE SUBSTRUKTURE ZA
METALOKERAMIČKU KRUNICU KORIŠĆENJEM SOFTPREL-A**

***Rezime:** Precizno livenje predstavlja najzastupljeniju tehnologiju livenja u stomatologiji. Ovo livenje omogućava ekonomičnu proizvodnju geometrijski zahtevnih metalnih odlivaka koji su obradivi metodama skidanjem strugotine. U radu se prikazuju faze projektovanja metalne substrukture podržane ekspertnim sistemom "SOFTPREL", koji obezbeđuje izradu odlivka klase površinske hrapavosti N7 određene na osnovu srednjeg odstupanja profila. Vrednosti srednjeg aritmetičkog odstupanja profila su dobijene korišćenjem usko pojasnog Gausovog filtera u skladu sa standardom ISO 4287.*

***Ključne reči:** precizno livenje, odlivak, softver, hrapavost*

1. UVOD

Prednost preciznog livenja u odnosu na ostale tehnologije izrade metalne substrukture za metalokeramičku krunicu ogleda se u odličnoj reprodukciji složenih geometrijskih oblika, relativno niskoj ceni, minimalnoj hrapavosti i minimalanom gubitku materijala [1]. Pattnaik i dr. [2] su razvili ekspertni sistem za određivanje glavnih parametara preciznog livenja (temperatura, vreme ulivanja, pritisak, koeficijent linernog širenja i kvalitet obrađene površine). Ekspertni sistem obezbeđuje povećanje tačnosti odlivaka. Zhou i dr. [3] i Zhang i dr. [4] su razvili ekspertni sistem zasnovan na numeričkoj simulaciji livenja. Er i dr. [5] su razvili ekspertni sistem za izbor tehnologije livenja primenom produkcionih pravila. Kritične modelske forme za izbor su: debljina zida, otvor, rupa, radijus, oborena ivica, nagib, rebro, tolerancija slobodne mere, tolerancija oblika i položaja, kvalitet obrađene površine, veličina i masa odlivka. Goo i dr. [6] su razvili ekspertni sistem za određivanje površinske hrapavosti nakon poliranja stomatoloških legura baziranih na ZrO_2 . Kara i dr. [7] određuju srednje aritmetičko odstupanje profila statističkom analizom (ANOVA i Tukey testom). Površinska hrapavost je merena pomoću elektronskog mikroskopa. Khanlou i dr. [8] su razvili hibridni ekspertni sistem za predviđanje kvaliteta površinske hrapavosti bio kompatibilnih Ti legura koristeći adaptivni neuro-fazi sistem neizrastog zaključivanja. Autori određuju srednje aritmetičko odstupanje profila statističkom analizom rezultata dobijenih elektronskim mikroskopom i profilometrom.

Na tačnost i kvalitet odlivaka najveći uticaj

imaju dimenziona tačnost simulacionog modela, materijal, struktura i parametri livenja. Što je dimenziona tačnost odlivka veća, manji su dodaci za naknadnu obradu (brušenjem i poliranjem). U cilju smanjenja površinske hrapavosti, odnosno smanjenja dodatka za obradu rezanjem razvijen je "Softver za precizno livenje metalnih substrukture za metalokeramičku krunicu-SOFTPREL".

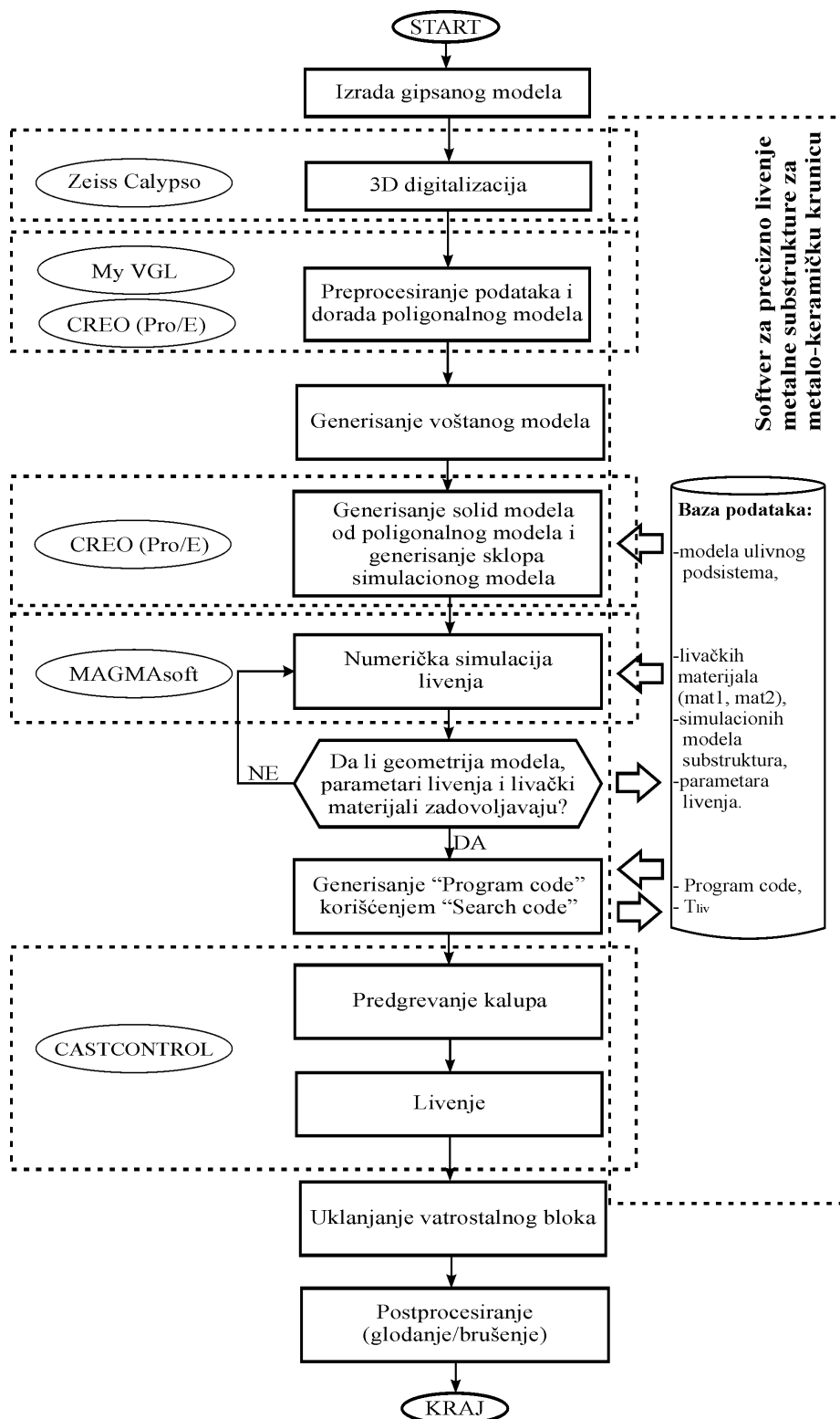
SOFTPREL je ekspertni sistem, mrežno integrisan sa aplikacijama za CAD, CAE i CAI što omogućava razvoj simulacionog modela od faze CT skeniranja, modeliranja simulacionog modela substrukture, simulacije livenja, livenja i/ili CAD inspekcije (GOM Inspect), ako za to postoji potreba. SOFTPREL poseduje parametarsku i objektno orijentisanu bazu podataka i bazu znanja neophodnu za izbor optimalnih parametara procesa livenja [9-14]. Ovo integrisano CAD/CAE programsko rešenje, uz primenu komercijalnih aplikacija ima za cilj:

- Smanjenje manualnih nekreativnih aktivnosti u okviru modeliranja,
- Automatizovano modeliranje simulacionog modela na osnovu oblaka tačaka dobijenih CT skenerom;
- Razvoj i primenu odgovarajuće baze podataka za izbor modela ulivnog sistema, materijala substrukture, i dr.;
- Razvoj i primenu odgovarajuće baze znanja;
- Određivanje parametara livenja simulacijom;
- Izbor programskog koda livačke mašine;
- Smanjenje vremena izrade odlivka, i
- Povećanje kvaliteta odlivka sa stanovišta povećanja kvaliteta obrađene površine i dimenzione tačnosti.

2. FAZE PROJEKTOVANJA I IZRADE METALNE SUBSTRUKTURE

Faze projektovanja i izrade metalne substrukture za metalokeramičku krunicu podržane SOFTPREL-a prikazane su na slici 1. SOFTPREL je podržan od sledećih aplikacija (slika 1):

- Zeiss Calypso,
- My VGL,
- Creo Parametric (Pro/E),
- MAGMASoft i
- CAST CONTROL.



Sl. 1. Faze projektovanja i izrade metalne substrukture za metalokeramičku krunicu

Simulacioni model sadrži oblak tačaka generisan pomoću CT skenera “Zeiss Metrotom 1500”. Aplikacije “Zeiss Calypso” i “My VGL” se koriste za obradu tačaka i formiranje poligonalnog modela. Dobijeni poligonalni model, se dalje rekonstruiše i transformiše u solid primenom programskog sistema “PTC Creo Parametric”. Nakon toga, u okviru numeričke simulacije u MAGMASOFT-u vrši se određivanje parametara preciznog livenja, izbor materijala, i geometrije ulivnog sistema. Parametri livenja, stomatološke legure i modela ulivnog sistema ili nekog njegovog sastavnog elementa se učitavaju iz baze podataka. Nakon automatizovanog izbora programskog koda, manualno se aktivira upravljački sistem “CASTCONTROL” mašine za livenje “BEGO Nautilus CC+” [12-14]. Postprocesiranje odlivka predstavlja poslednju fazu izrade (slika 1). Operacije glodanja i brušenja je potrebno svesti na minimum i tako izbeći obradu na celokupnoj spoljašnjoj površini odlivka. Površina odlivka koja poseduje klasu površinske obrade N7 se ne mora obrađivati, i na nju se može kvalitetno naneti porcelanska prevlaka. Geometrijski i tehnološki parametri [11-14], su sastavni elementi baze podataka (slika 1), a dobijeni su korišćenjem produkcionih pravila s ciljem obezbeđenja zadovoljavajućeg kvaliteta odlivka bez postprocesiranja većeg dela površine. Postprocesiranje je neophodno samo na površinama spoja odlivka i ulivnog sistema.

3. REZULTATI






Površinska hrapavost predstavlja skup mikrogeometrijskih nepravilnosti na površini odlivka, prouzrokovanih postupkom livenja. Vrednost srednjeg aritmetičkog odstupanja hrapavosti se dobija primenom usko pojasnog Gausovog filtera u skladu sa standardom ISO 4287, pomoću uređaja za merenje hrapavosti “Mahr MARSURF PS1”. Zbog izvođenja merenja u automatskom režimu uređaja naknadna statistička analiza rezultata nije potrebna [15]. Srednje aritmetičko odstupanje profila (Ra) od srednje linije je aritmetička vrednost rastojanja svih tačaka efektivnog profila od srednje linije (n) na referentnoj dužini (l). Srednje aritmetičko odstupanje profila može se predstaviti pomoću jednačina (1) i (2), [16]:

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l y(x) dx \quad (1)$$

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (2)$$

Standardna referentna dužina za sve odlivke iznosi $l_c=2,5\text{mm}$ a izmerene vrednosti srednjeg aritmetičkog odstupanja profila se kreću u granicama od $1,935\mu\text{m}$ do $2,778\mu\text{m}$. Vrednosti srednje aritmetičke hrapavosti odlivka, i standardne devijacije modela substrukture i odlivka su prikazane u tabeli 1.

Tabela 1. Srednje aritmetičko odstupanje profila i standardna devijacija modela substrukture i odlivka

Broj odlivaka	Model	Ra (μm)	σ (μm)
2		1,935	0,022
3		2,233	0,016
4		2,012	0,018
6		2,778	0,009
11		2,431	0,015

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu dobijenih rezultata se može zaključiti da ispitivani odlivci pripadaju klasi površinske hrapavosti N7. Ovaj nivo hrapavosti je dovoljan za nanošenje porcelanske prevlake.

SOFTPREL je obezbedio projektovanje substrukture i izradu odlivaka ujednačene klase hrapavosti. Dodatna obrada brušenjem i poliranjem je potrebna samo na delovima površina odlivka gde se uklanja ulivni sistem.

Ovaj metod merenja hrapavosti je brz, precizan i lako primeljiv u proizvodnji.

Radi jasnijeg prikaza rezultata merenja i profila neravnina je moguće povezati uređaj za merenje hrapavosti sa računarnom pomoću aplikacije “MarSurf XR 20”.

5. REFERENCE

- [1] Atwood, R.C., Lee, P.D., Curtis, R.V., Maijer, D.M.: *Modeling the investment casting of a titanium crown*, Dental Materials, Vol. 23, p.p. 60-70, 2007.
- [2] Pattnaik, S., Karunakar, D.B, Jha, P.K.: *Multi-characteristic optimization of wax patterns in the investment casting process using grey-fuzzy logic*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 67, No. 3-8, p.p. 1577-1587, 2013.
- [3] Zhou, H., Shi, S., Ma, B.: *Virtual Injection Molding System Based on Numerical Simulation*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 40, No. 3-4, p. p. 297-306, 2009.
- [4] Zhang, X.P., Chen, G., Xiong, Sh.M., Xu, Q.Y.: *Computer simulation of the solidification of cast titanium dental prostheses*, Journal of Material Science, Vol. 40, p.p. 4911-4916, 2005.
- [5] Er, A., Dias, R.: *A rule-based expert system approach to process selection for cast components*, Knowledge-Based Systems, Vol. 13, p. p. 225-234, 2000.
- [6] Goo, C.L., Yap, A.U.J., Tan, K.B.C., Fawzy, A.S.: *Effect of polishing systems on surface roughness and topography of monolithic zirconia*, Operative Dentistry, Vol. 41, No. 4, p.p. 417-423, 2016.
- [7] Kara, O., Ozturk, A.N.: *The effect of surface treatments on the bonding strength of ceramic inlays to dentin*, Journal of Adhesion Science and Technology, Vol. 31, No. 22, p.p. 2490-2502, 2017.
- [8] Khanlou, H.M., Ang, B.C., Barzani, M.M.: *Prediction, modeling and characterization of surface texturing by sulfuric etchant on non-toxic titanium bio-material using artificial neural networks and fuzzy logic systems*, Science and Engineering of Composite Materials, Vol. 23, No. 4, p.p. 423-433, 2016.
- [9] Matin, I., Potran, M., Hadzistevic, M., Hodolic, J., Vukelic, D., 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.
- [10] 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.
- [11] Matin, I., Hadžistević, M., Hodolić, J., Vukelić, Đ., Trifković, B., Potran, M., Brajljić, T.: *Primena integrisanog sistema za precizno i brzo precizno livenje u stomatologiji*, JUPITER, p.p. 91-95, Mašinski fakultet, Beograd, oktobar 2014.
- [12] Matin, I., Hadžistević, M., Hodolić, J., Vukelić, Đ., Trifković, B., Potran, M., Drstvenšek, I., Brajljić, T.: *Primena ekspertnog sistema za livenje u stomatologiji*, ETIKUM, p.p. 37-40, Novi Sad, FTN, Novi Sad, jun 2015.
- [13] Matin, I., Hadzistevic, M., Vukelic, D., Trifkovic, B., Potran, M., Brajljić, T., Drstvensek, I.: *Advanced procedure for fabrication of substructure in dentistry*, Metalurgija, Vol. 55, No. 4, p.p. 761-764, 2016.
- [14] Matin, I., Hadzistevic, M., Vukelic, D., Potran, M., Brajljić, T.: *Development of an expert system for the simulation model for casting metal substructure of a metal-ceramic crown design*, Computer Methods and Programs in Biomedicine, Vol. 146C, p.p. 27-35, 2017.
- [15] *Operating instruction MarSurf PS1 manual*, Mahr GmbH, Carl-Mahr-Straße 1 D-37073 Göttingen, Germany, www.mahr.de.
- [16] Gadelmawla, E.S., Koura, M.M., Macksoud, M.M.A., Elewa, I.M., Soliman, H.H.: *Roughness parameters*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 123, p.p. 133-145, 2002.

Autori: Dr Ivan Matin, Dr Đorđe Vukelić, Dr Miodrag Hadžistević, Dr Branko Štrbac, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet Tehničkih Nauka, Institut za Proizvodno mašinstvo, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Srbija, Tel: +381 21 485 2332, Fax: +381 21 454-495.
E-mail: matini@uns.ac.rs
vukelic@uns.ac.rs
miodrags@uns.ac.rs
strbacb@uns.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

**SCIENTIFIC CONFERENCE WITH INTERNATIONAL
PARTICIPATION
ETIKUM 2017
NOVI SAD, SERBIA, DECEMBER 6-8, 2017**

Šokac, M., Budak, I., Santoši, Ž., Spasić, A., Jakovljević, Ž.

**ULOGA STATISTIČKIH EVALUATORA I NJIHOVA PRIMENA KOD ANALIZE
TAČNOSTI SEGMENTIRANIH MEDICINSKIH SNIMAKA**

***Rezime:** Neosporna je uloga i primena medicinskih snimaka u današnjoj oblasti medicine i stomatologije jer je na osnovu njih moguće izvršiti tačnu dijagnozu kod pacijenata. Međutim, primenom savremenih uređaja za akviziciju ovih snimaka, mogu se pojaviti određene anomalije u vidu artefakata na medicinskim snimcima. Uporedo sa ovim problemom, razvijale su se i metode za obradu medicinskih snimaka. Kako bi se verifikovala njihova primena i dokazala uspešnost njihove primene, tako su se razvijale i mnoge metode i evaluatori za analizu i statističku obradu ovih snimaka. U ovom radu biće prikazane neke od najčešće primenjivanih statističkih metoda i evaluatora koji se koriste kod analize medicinskih snimaka.*

***Cljučne reči:** Statističke metode, obrada slike, segmentacija, MR*

1. UVOD

Broj medicinskog osoblja koji koristi 3-dimenzionalne (3D) podatke (slike) tokom faze planiranja dijagnoze i tretmana kontinualno raste [1]. Moderni sistemi za akviziciju proizvode masivnu količinu podataka koji se mogu iskoristiti za dobijanje kritičnih 3D informacija o ciljanim mernim područjima. Statističke analize i eksperimentalni dizajn kvantitativnih eksperimenata slike su važni za razumevanje funkcionisanja ovih komponenata usled različitih značajnih faktora u složenom procesu funkcionisanja ljudskog tela [2].

Akvizicija snimaka kao razvijeno područje pruža različite uvide za dijagnozu za različite istraživače (kao što su lekari, stomatolozi i biolozi) primenom različitih alata. Modaliteti za akviziciju kao što su kompjuterska tomografija (CT), magnetna rezonanca (MR), ultrazvuk i mikroskopija se uveliko koriste u kliničkoj rutini za različite ciljeve i u različite svrhe [3].

Akvizicija medicinskih snimaka obično radi na principu ravnomerno uzorkovanih podataka u prostornom domenu sa x-y-z koordinatama (2D slike i zapreminski setovi snimaka). Na svakoj tački uzorka podaci su uobičajeno predstavljeni u integralnom obliku kao što su 16-bitni zapisi, iako zapisi u 8-bit-nom *char* ili čak i do 32-bitnog zapisa nisu neuobičajeni.

Posebno značenje podataka na tački uzorka zavisi od modaliteta: na primer, akvizicija podataka primenom CT uređaja sakuplja vrednosti sakuplja podatke o stepenu atenuacije x zraka u tkivima objekta snimanja, dok MR može sakupljati T1 ili T2 vrednosti ponderisane slike.

Uzdužne, vremenski promenljive akvizicije, mogu ili ne mogu dobiti slike sa redovnim vremenskim koracima. Modalitet kao što je ultrazvuk je takođe uobičajen i zahteva različite reprezentativne i algoritamske tehnike za obradu. Drugi oblici podataka obuhvataju slike s leve strane usled naginjanja glave prilikom akvizicije; i nestruktuirane mreže, kao što su heksaedrične i tetraedarne forme, koje se koriste u naprednoj biomehaničkoj analizi (npr., deformacija tkiva, vaskularni transport, implantirani kostiju) [4]. Takođe, evaluacija difuznih i fokalnih patoloških promena predstavlja preliminarni korak u mnogim medicinskim procedurama.

Međutim, primena svih ovih modaliteta sa sobom povlači i određene probleme. Naime, primenom ovih modaliteta u određenim slučajevima (loš izbor parametara, slaba prodorna moć uređaja za akviziciju, i dr.) dolazi do pojave određenih nepravilnosti u vidu artefakata na generisanim snimcima koji, u manjoj ili većoj meri, utiču na rezultate analize i donošenja tačne dijagnoze. S razvojem i unapređenjem modaliteta snimanja, dolazi i do unapređenja softverske podrške u vidu raznih algoritama koji se koriste za obradu ovih snimaka [5,6]. Danas postoji veliki broj razvijenih algoritama koji se koriste za poboljšanje rezultata akvizicije. Međutim, kako bi se izvršila njihova valorizacija neophodno je njihovo testiranje i poređenje sa rezultatima eksperata kako bi se utvrdio njihov stepen podudaranja, a samim tim i tačnosti. Statističke metode, kao alati za analizu slike dolaze do značaja u ovim situacijama kada je neophodno numerički klasifikovati tačnost novih algoritama.

U ovom radu biće prikazane najčešće korišćene

statističke metode za analizu medicinskih snimaka, kao i njihova primena na jednom slučaju MR snimka.

2. STATISTIČKE METODE

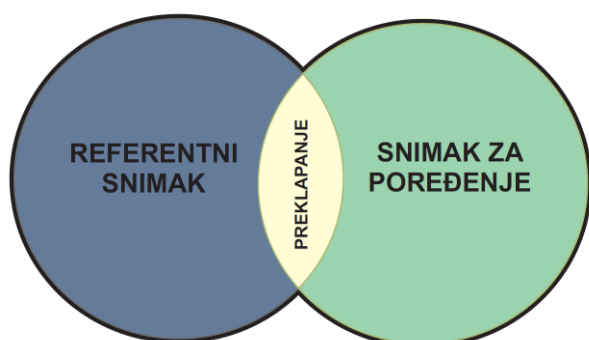
Brojne sofisticirane matematičke metode ulaze na velika vrata kada su u pitanju medicinski snimci, i već su implementirane u različitim softverskim paketima. Ovo uključuje pristupe zasnovane na parcijalnim diferencijalnim jednačinama (PDJ) za poboljšanje, segmentaciju i registraciju medicinskih snimaka.

Statističke metode kombinuju oblast medicinskog snimanja sa savremenim računarskim alatima, mašinskim učenjem i prepoznavanjem uzoraka. Tokom poslednje decenije, nekoliko velikih skupova podataka je javno dostupno (na primer [7]), delom zbog saradnje između različitih instituta i istraživačkih centara. Ovo povećanje količine podataka zahteva nove algoritme koji mogu da se menjaju i otkrivaju suptilne promene u slikama za rešavanje kliničkih problema. U nastavku će biti prikazani neki od najčešće primenjivanih evaluatora u literaturi koji su našli svoju primenu kada je u pitanju statistička analiza slike.

2.1 Binarni statistički evaluatori

Kao što sama reč kaže, u pitanju su evaluatori koji se koriste kod analize binarnih 2D slika, odnosno slika dobijenih kao rezultat segmentacije.

Ove metode se koriste pri komparaciji dva snimka, a to su referentni snimak (ručno segmentiran snimak od strane radiologa) i novogenerisani snimak koji se koristi za komparaciju (dobijen sa nekom od metoda za segmentaciju) - Slika 1.



Sl. 1. Preklapanje segmentiranog i referentnog snimka

Osnovna podela ovih statističkih metoda je na evaluatore:

- za analizu greške površine kod binarnih snimaka (engl. *area error metrics*),

- za analizu tačnosti granica kod binarnih snimaka (engl. *boundary error metrics*)

Osnovna razlika između ove dve podele ogleda se u tome što se kod analize greške površine na binarnim 2D snimcima u obzir uzima celokupna površina segmentiranih objekata na snimku. Kod analize tačnosti granica, u obzir se uzimaju samo odstupanja granica objekata.

Za analizu greške površine kod binarnih snimaka u literaturi se kao najčešće primenjivani statistički evaluatori koriste Žakarov indeks i Dajsov koeficijent [8].

Kod ovih evaluatora opseg preklapanja referentne i analizirane slike kreće se u rasponu od 0 do 1, gde 1 definiše potpuno preklapanje segmentirane slike sa referentnom slikom. Ovo odstupanje se takođe može izraziti u procentima. Ovi evaluatori su definisani na osnovu sledećih formula:

Žakarov indeks:

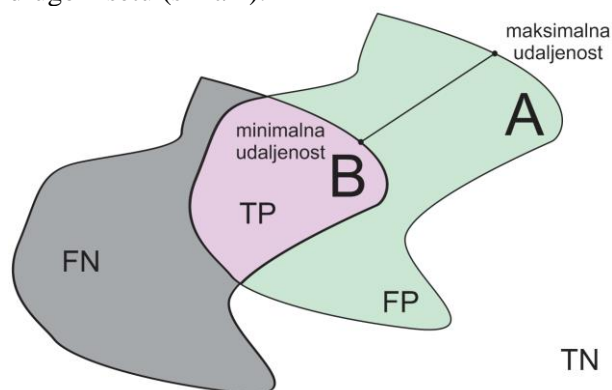
$$JI = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|} \quad (1)$$

Dajsov koeficijent:

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

gde je A binarna slika referentne slike, i B binarna slika koji se upoređuje sa njom.

Pored ovih evaluatora, takođe se koriste i evaluatori tačnosti granica. Kao najčešće primenjivan evaluator ovog tipa koristi se tzv. modifikovana Hausdorfova udaljenost (u literaturi se još spominje i kao Hausdorfova dimenzija ili distanca) [9]. Hausdorfova udaljenost obezbeđuje sredstva za utvrđivanje sličnosti u jednom setu (snimku) podataka u odnosu na drugi set (snimak), ispitivanjem jednog dela tačaka (odnosno piksela) u jednom setu koji leže u blizini tačaka (piksela) u drugom setu (slika 2).



Sl. 2. Definisavanje Hausdorfove udaljenosti između seta A (segmentiran region) i seta B (referentni region) i prikaz parametara TP, TN, FP i FN

Upotreba Hausdorfove udaljenosti za analizu binarnih slika i njenu primenu u oblasti kompjuterske vizije prvobitno je predložena od strane Huttenločera [10]. Ukoliko imamo dva seta podataka (odnosno dve slike) $A = \{a_1, \dots, a_p\}$ $B = \{b_1, \dots, b_p\}$ Hausdorfova udaljenost je definisana kao [11]:

$$HD(A, B) = \max(h(A, B), h(B, A)) \quad (3)$$

gde je:

$$h(A, B) = \max_{a \in A} \min_{b \in B} \|a - b\| \quad (4)$$

gde operator $\| \cdot \|$ predstavlja udaljenost između tačaka u setovima A i B (najčešće je to Euklidova udaljenost).

Pored ovih statističkih evaluatora, performanse predloženog pristupa se takođe evaluiraju primenom četiri pokazatelja uspešnosti klasifikacije, a to su osetljivost, specifičnost, tačnost i preciznost (slika 2). Osetljivost se definiše kao broj pravilno klasifikovanih piksela koji je podeljen sa brojem piksela na referentnoj slici dok se specifičnost definiše kao odnos broja piksela koji su ispravno klasifikovani kao pozadina i broja piksela definisanih kao pozadina na referentnoj slici. Tačnost klasifikacije se definiše kao odnos zbira pravilno i nepravilno klasifikovanih piksela, s jedne i ukupnog broja piksela na slici s druge strane, dok preciznost predstavlja odnos ispravno klasifikovanih piksela i ukupnog broja piksela klasifikovanih kao segmentirani objekat od interesa. Oni se definišu prema sledećim formulama:

$$Osetljivost = \frac{TP}{TP + FN} \quad (5)$$

$$Specifičnost = \frac{TN}{FP + TN} \quad (6)$$

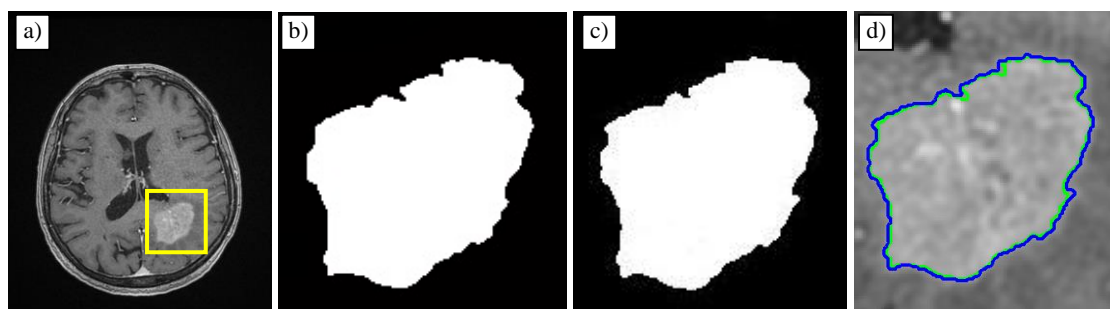
$$Tačnost = \frac{TP + TN}{TP + FN + TN + FP} \quad (7)$$

$$Preciznost = \frac{TP}{TP + FP} \quad (8)$$

gde TP (*true positive*) predstavlja broj piksela koji su ispravno klasifikovani kao segmentirani objekat i TN (*true negative*) predstavlja broj piksela koji predstavljaju pozadinu snimka. FN (*false negative*) označava broj piksela koji pripadaju segmentiranom regionu, ali su pogrešno klasifikovani kao pikseli koji pripadaju pozadini snimka, i FP (*false positive*) je broj piksela koji su pogrešno klasifikovanih kao pikseli koji pripadaju segmentiranom regionu.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Kako bi se prikazala efektivnost upotrebe ovih statističkih evaluatora, oni su primenjeni na jednom snimku MR na kojem se nalazi tumor. Kako bi se dobili referentni snimci,iskusni radiolog je izvršio ručnu segmentaciju MR snimka. Kao metoda za komparaciju korišćena je metoda fazi isodata (još se zove i metoda fazi C klasterizacija). Kako bi se izvršila adekvatna analiza, izvršena je lokalizacija tumora na snimku. Snimak koji je korišćen za analizu prikazan je na slici 3 zajedno sa svojim referentnim i segmentiranim 2D snimkom. U tabeli 1. su prikazani rezultati statističkih evaluatora poređenjem MR snimka generisanog primenom fazi isodata metode sa referentnim snimkom.



Sl. 3. Prikaz a) Originalni MR snimak, b) ručno segmentiran tumor od strane radiologa, c) segmentiran tumor primenom fazi isodata metode i d) preklapanje granica ručno segmentiranog snimka (zelena boja) i snimka generisanog primenom fazi isodata metode (plava boja)

Tabela.1. Rezultati statističkih evaluatora

Snimak	Žakarov indeks [%]	Dajsov koeficijent [%]	Hausdorfova udaljenost [mm]	Osetljivost [%]	Specifičnost [%]	Tačnost [%]	Preciznost [%]
MR	95,98	97,95	0,1184	99,97	99,94	99,94	95,97

Sa slike 3d može se uočiti visok stepen preklapanja ručno segmentiranog snimka i snimka segmentiranog upotrebom fazi isodata metode, što ukazuje na to da fazi isodata daje dobre rezultate u segmentaciji tumora. Vrednosti statističkih evaluatora iz tabele 1 su u potpunoj saglasnosti sa ovom konstatacijom – Žakarov indeks i Dajsov koeficijent su bliski vrednosti 1, a Hausdorfova udaljenost je ispod 0,15 mm (piksel je dimenzije xx x xx mm). Četiri pokazatelja uspešnosti klasifikacije, a to su osetljivost, specifičnost, tačnost i preciznost su takođe pokazali visoke vrednosti preklapanja kada je u pitanju evaluacija metode za segmentaciju sa 99,97%, 99,94%, 99,94% i 95,97%, respektivno.

4. ZAKLJUČAK

Mnogi statistički alati i metode su našli svoju primenu u različitim oblastima. Svaki od ovih alata je drugačije definisan sa nekim sopstvenim osobinama. Neki koriste prostu brojčanu razliku, dok neki koriste komplikovanu korelaciju. U ovom istraživanju su prikazani neki od najčešće korišćenih statističkih alata za evaluaciju segmentacije medicinskih snimaka. Svi predstavljeni statistički pokazatelji su primenjeni na jednom MR snimku. Ovaj rad je imao za svrhu da predstavi primenu ovih evaluatora gde na osnovu njihovih osobina istraživači mogu izabrati odgovarajuće statističke metode za analizu snimaka, i to u različitim domenima.

5. ZAHVALNICA

U ovom radu su prikazani rezultati postignuti u okviru Projekta br. 114-451-2723/2016-03 finansiranog od strane Pokrajinskog sekretarijata za visoko obrazovanje, i u okviru projekta TR-35020, koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

6. REFERENCE

- [1] Grauer D., Cevidanes L., Proffit W.: *Working with DICOM craniofacial images*, American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, Vol. 136, pp. 460–470, 2009.
- [2] Nailon W.: *Texture Analysis Methods for Medical Image Characterisation*, Biomedical Imaging, pp. 75–100, 2012.
- [3] Ahmadvand A., Reza Daliri M.: *A Review on Texture Analysis Methods in Biomedical Image Processing*, OMICS Journal of Radiology, Vol. 5, pp. 2–3, 2016.
- [4] Budak I., Mirkovic S., Sokac M., Santosi Z., Puskar T., Vukelic Dj.: *An approach to*

modelling of personalized bone grafts based on advanced technologies, International Journal of Simulation Modelling, Vol. 15, pp. 637–348, 2016.

- [5] Bhadauria H, Singh A., Dewal M.: *An integrated method for hemorrhage segmentation from brain CT Imaging*, Computers and Electrical Engineering, Vol. 39, pp. 1527–1536, 2013.
- [6] Eklund A., Dufort P., Forsberg D., LaConte S.: *Medical image processing on the GPU - Past, present and future*, Medical Image Analysis, Vol. 17, pp. 1073–1094, 2013.
- [7] Petersen R., Aisen P., Beckett L., Donohue M., Gamst A., Harvey D.J., et al.: *Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative (ADNI): Clinical characterization*, Neurology, Vol. 74, pp. 201–209, 2009.
- [8] Seung-Seok C, Sung-Hyuk C., Tappert C.: *A Survey of Binary Similarity and Distance Measures*, Journal of Systemics, Cybernetics & Informatics, Vol. 8, pp. 43–48, 2010.
- [9] Dubuisson M., Jain A., Lansing E.: *A Modified Hausdor Distance for Object Matching*, Pattern Recognition, Vol. 27 pp. 566–568, 1994.
- [10] Huttenlocher D. Klanderman G., Rucklidge W.: *Comparing images using the Hausdorff distance*, IEEE transactions on pattern analysis and machine learning, Vol. 15 pp. 850–863, 1993.
- [11] Takács B.: *Comparing Face Images Using the Modified Hausdorff Distance*, Pattern Recognition, Vol. 31, pp. 1873–1881, 1998.

Autori: Mast.inž. Mario Šokac, Vanr. prof. dr Igor Budak, mast.inž. Željko Santoši, Univerzitet Novi Sad, Fakultet Tehničkih Nauka, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Tel: +381 21 485 2332.

E-mail:

marios@uns.ac.rs

budaki@uns.ac.rs

zeljkos@uns.ac.rs

dr.med. Aleksandar Spasić, Univerzitet u Novom Sadu, Medicinski fakultet, Hajduk Veljkova 3, Novi Sad, Tel.: 021 420 677.

E-mail: a_spasic@yahoo.com

Vanr. prof. dr Živana Jakovljević, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16 11120 Beograd, Tel.: 011 3302 264

E-mail: zjakovljevic@mas.bg.ac.rs

SCIENTIFIC CONFERENCE WITH INTERNATIONAL PARTICIPATION
ETIKUM 2017

PROCEEDINGS

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

Novi Sad, 06 – 08 December 2017.

**SCIENTIFIC CONFERENCE WITH INTERNATIONAL
PARTICIPATION
NOVI SAD, SERBIA, DECEMBER 6-8, 2017**

ETIKUM 2017

Ertem-Kappler, F. C., Acheampong, M.

**FLEXIBLE HEAT PRODUCTION CONCEPT AT BIOGAS PLANTS FOR DISTRICT
HEATING SYSTEMS**

***Abstract:** This study focuses on the impacts of demand driven energy production on the heat generation. Data from an agricultural biogas plant located in the Midwest of Germany was analyzed. The plant generates yearly 2,086,380 m³ biogas (55 % methane) from the anaerobic digestion of 6,000 tons chicken manure, 2000 tons grass silage and 4000 tons sunflower silage under mesophilic conditions. Produced heat is used for district heating of households. Flexible energy production concept was analyzed and the changes in the heat waste were observed. If the biogas production is switched from flexible into demand driven production, it is possible to reduce the amount of wasted heat by 20%.*

***Key words:** heat energy; biogas; district heating; demand driven energy production*

1. INTRODUCTION

There are almost 8,100 biogas plants currently in operation in Germany. These plants run with agricultural feedstock, sewage and other substrates such as industrial food and beverage and bio-waste [1]. In 2013, it is estimated that total biogas production was equal to 65,731 GWh (24,419 GWh of electricity and 34,762 GWh of thermal energy) [1].

Most biogas plants produce electricity and feed the produced electricity into the power grid. However, most of the heat produced in the process is often unused. While there are decent practice models on the prosperous heat use from biogas plants, a broader application of heat use concepts is still absent [2].

The use of thermal energy from Combined Heat & Power (CHP) units is a critical issue for feasibility of biogas plants for both economic and environmental concerns. Without a comprehensive model to utilize the produced heat, biogas projects might not be reasonable to develop. If planned well and enough in advance, heat conceptions can be established for most biogas plants [3]. The choices for the use of waste heat increases based on the flexibility of the legal framework. The legal framework deals with issues including the site of the plant, heat costumer, legal issues, etc. [4].

In order to support the utilization of thermal energy from biomass and bioenergy production in Germany, Erneuerbare Energien WärmeGesetz-Renewable Energy Heat Act (EEWärmeG) came into effect on 1 January 2009 [5]. The act targets a 14% minimum Renewable Energy (RE) share in heating sector by the year of 2020. Based on the law, 30% of this heat energy should be supplied

through biogas plants. Furthermore, provision of EEWärmeG places the owners of newly built buildings under compulsion to use RE to meet a portion of their heat requirements [4, 6, 7]. Under the Act, bioenergy may only be used, if it is created using highly efficient technology like biogas at CHP plants [7]. Therefore, biogas at CHP plants is expected to play a greater role in the heat supply in the upcoming years in order to meet the 2020 targets [4].

In 2015 energy consumed by private households in Germany equaled about 636 terawatt hours (TWh) or 2,289 petajoules (PJ). This value accounts for one-quarter of the total final energy consumption of the whole country (2,466 TWh) [7]. Households needed more than two-thirds of their final energy consumption to heat rooms. To meet such enormous heating needs, households consumed mainly natural gas and mineral oil. The third energy source was the RE sources and was followed by district heating systems as fourth.

Biogas plants produce uninterruptedly excessive amount of waste heat. This amount reaches its highest value especially during summer. With the latest amendment from EEG 2017, heat utilization is compulsory for a low electricity price; therefore it has become more essential to generate sustainable heat utilization concepts for biogas plants [4, 8]. Due to provided incentives and legal scheme, demand driven biogas production will have a greater role in the upcoming years in Germany. The swiftly changing energy system obliges biomass heat concepts to be flexible and compatible in regard to heat demand with other energy technologies like weather dependent RE sources [9]. The current studies in

the field have successfully focused on the flexible energy production and how the electricity can be fed in grid. However, no study has paid attention on how this new energy production concept will affect the heat generation at the plants. Therefore, in this study, we analyze data from an agricultural biogas plant located in the Midwest of Germany, which uses its produced heat for the district heating. The changes in the heat waste when the production converted from baseload into flexible were assessed.

2. METHODOLOGY

To adapt a flexible heat production a biogas plant which has an average electrical capacity of 500 kW was assessed. The plant originally runs on a base load production (8700 h a⁻¹) and produces biogas in order to supply heat energy for 3 households and a school. Energy efficiency of two operation concepts; demand driven and base load biogas production are compared by means of reduced waste heat.

2.1 Study Region

The study region has a temperate–Oceanic climate with relatively mild winters and cool summers. Its average annual temperature is 10 °C (50 °F): 13.3 °C (56 °F) during the day and 6.7 °C (44 °F) at night. The average annual precipitation is 934 mm (37 in). The coldest month of the year is January, when the average temperature is 2.4 °C (36 °F). The warmest months are July and August, with an average temperature of 18 °C (64 °F). The record high is 36.6 °C (98 °F) and the record low is –24 °C (–11 °F) [10].

2.2 Biogasplant and heat production

Biogas production was recorded continuously with an electronic gas flow meter, and the composition of the biogas (CH₄, CO₂) was measured with a gas analyzer. Later on, calculations are performed in order to boost the plant efficiency by adapting a flexible energy production.

The plant produces yearly 2,086,380 m³ biogas (55 % methane) from the anaerobic digestion of 6,000 tons chicken manure, 2000 tons grass silage and 4000 tons sunflower silage under mesophilic conditions. Substrate characteristics are illustrated in Tab 1. The manure content equals to 50% of the substrate mixture. Plant flow chart is illustrated in Figure 1.

The quantity of heat that is available for external use reaches its highest amounts during summer. Therefore, when the flexible heat production concept was developed, energy

production from other RE sources like wind and solar power plants was taken into account. Produced thermal heat at the biogas plant was used in district heating of 3 households and one school. Amount of waste heat based on two different energy production concepts were determined; baseload and flexible production. Flexible production requires biogas to be stored at the times when there is less demand and produce more heat and electricity at the times, when the energy demand of the customer is higher. Consequently, it is crucial to have enough biogas storage and CHP power to burn the necessary amount of biogas. If not, it is essential to invest a supplementary gas storage and CHP unit. In this case, the selected biogas plant had 1,372 m³ gas storage at the top of the fermenter, which allows produced biogas to be stored for several hours. In order to burn the stored biogas to produce higher amounts of heat, 250 kW el CHP was installed (total 750 kW el). CHP unit installed at the biogas plants have an electrical efficiency of 39.8% and thermal efficiency of 46.2%.

Heat production at CHP was adapted to produce more energy especially from 6 to 10 am in the morning and after 7 pm at night on a typical summer day. To do so, produced biogas was stored during the times the heat need was relatively less. Fermenters and digestate storage tanks were equipped with double membrane gas storage, lower layer of the membrane either sinks or expands, depending on the amount of the stored biogas.

3. RESULTS

Besides the overall heat demand of the fermenter per year, its distribution per month is also very important. Depending on the climatic conditions, this distribution can vary considerably. In order to reduce the amount of heat resulting from biogas production processes, it is necessary to adapt the biogas production. Figure 2 illustrates the flexible heat and electricity production at CHPs from biogas based on the biogas store principle. Stored biogas is burnt at the CHPs flexibly in order to provide heat depending on the energy demand of 3 households and a school. Changes in the energy demand of the customers are shown in Figure 3. Energy demand of the school reaches the highest amount during the day between 6 am to 5 pm. Household energy demand increases early morning times and especially after 5 pm till evening.

Flexible heat production at CHPs reduces the amount of waste heat by nearly 20%. Through based load production (base load is a production

in which always same type and amount of same amount of biogas is produced), only 23% of the produced heat which is available after internal use could be used for district heating. By flexible production concept this value increases up to 40%.

Unfortunately, many biogas plants are placed in the areas where heat use concepts cannot be implemented as potential heat consumers are too far away. In general, the heating market still lacks legislative improvements. Therefore, proper incentives could improve this situation.

Since the owners of newly constructed buildings are put under obligation to use renewable energy to meet a portion of their heat requirements, the development of district heating networks is essential for heat use from biogas plants. Transporting heat might be very costly and energy losses are inevitable. In order to be able to employ the vast amount of heat produced at biogas plants, the biogas plant should be closer to the heat user. Suitable sites are characterized based on the chance to sell heat and to feed electricity into the grid. 38% of the RE sources (148.1 TWh) are used for thermal energy production according German ministry of environment (February, 2017). Since energy consumption at households equals to one third of total energy consumption, this equals to 49.4 TWh thermal energy. According to data from the Umweltbundesamt, the carbon dioxide (CO₂) emissions in the "German electricity mix" are 559 g / kWh for the year 2013. For a CHP that have electrical efficiency of 39.8% and thermal efficiency of 46.2%, this amount would equal to 481.5 g CO₂eq pro kWh thermal energy produced. If the thermal energy for households were

feedstock mixture are fed at the fermenters and the supplied by district heating from biogas plants based on demand driven production concepts, it was possible to save 9.8 TWh heat energy and 4,719,315 tons CO₂ each year.

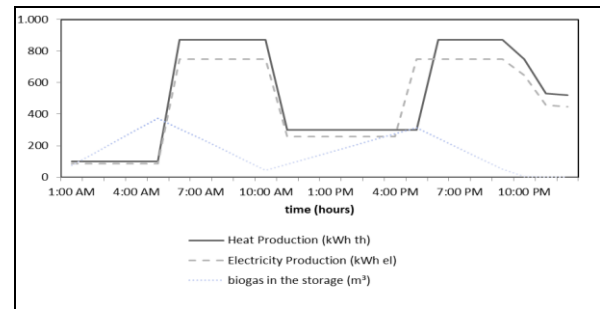


Fig. 2. Changes in the energy production and the amount of biogas being stored based on flexible production concept on a typical summer day

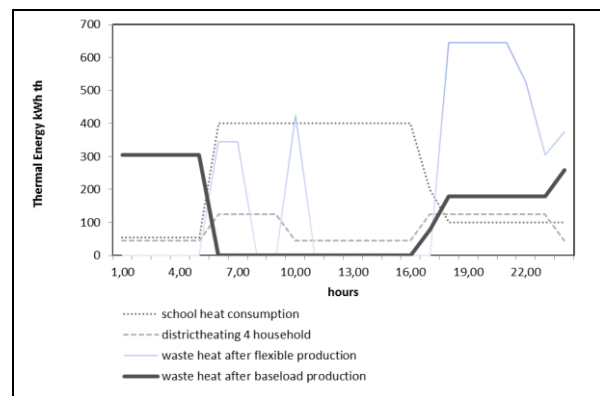


Fig. 3. Changes in the heat demand – district heating and the comparison of flexible and baseload production

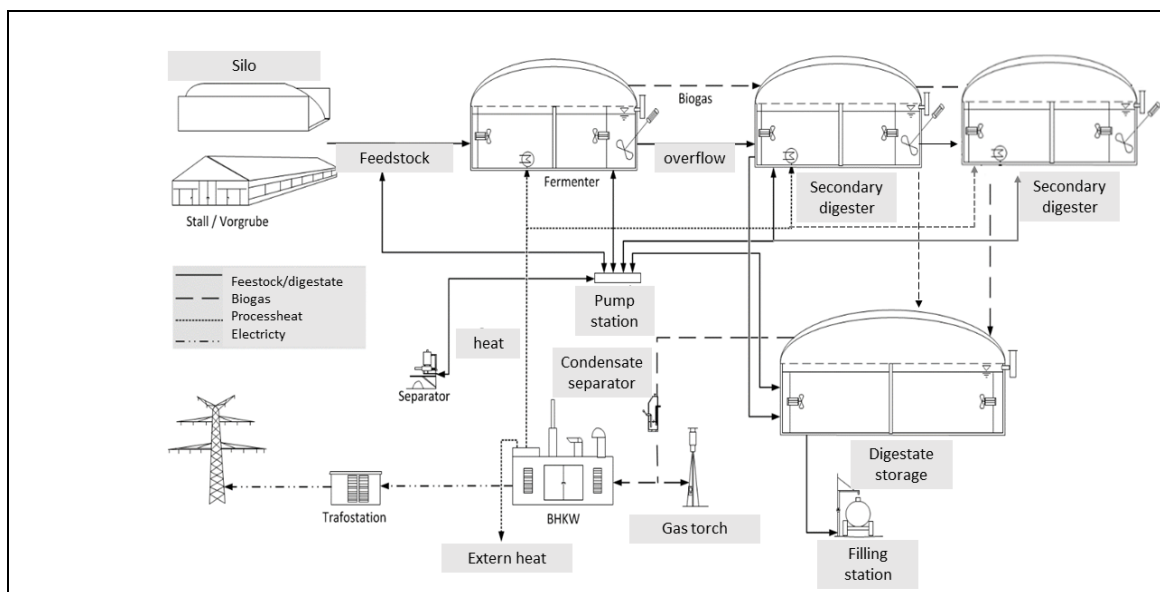


Fig. 1. Biogasplant flow chart

Table 1. Substrate characteristics

	Chicken manure	Grass-silage	Sunflower silage
TS (%FM)	50	30	27
oTS (%TS)	75	90	90
Biogas yield ($1 \times \text{kg}^{-1}$ oTS)	542	615	550
Methane content (%)	55	52	57

4. CONCLUSIONS

In general, from small scale to large scale biogas plants, all the plants produce more heat than they could internally use. Produced heat and accompanying waste percentage increases by size of plant.

If the biogas production is switched from based load production into demand driven production, it is possible to reduce the amount of wasted heat by nearly 20% for the district heating of households. Through based load production, only 23% of the produced heat which is available after internal use could be used for district heating. By flexible production concept this value increases up to 40%.

The use of waste heat from CHP must be promoted more. Therefore, the implemented laws and amendments should adjust their strategies and consider the whole potential of heat use for energy efficiency, energy security and phasing-in of RES. Future binding biogas targets should include realistic, but ambitious heat utilization targets. Incentives should be provided for heat production and should not be only based on the electricity generation.

5. REFERENCES

- [1] Torrijos M.: *State of Development of Biogas Production in Europe*. Procedia Environmental Sciences. 2016;35:881-9.
- [2] Dzene I, Rochas C, Rutz D, Janssen R, Ramanauskaite R, Kulisic B, et al.: *Development of Sustainable Heat Markets for Biogas Plants*. Proceedings of the 20th European Biomass Conference and Exhibition 2012.
- [3] Rutz D, Mergner R, Janssen R.: *Sustainable heat use of biogas plants*. A Handbook, Biogas Heat, WIP Renewable Energies, Munich, Germany. 2012.
- [4] Purkus A.: *Concepts and Instruments for a Rational Bioenergy Policy: A New Institutional Economics Approach*: Springer; 2016.
- [5] Bundestag D.: *Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich. Erneuerbare-Energien-WärmeGesetz–EEWärmeG. Bundesgesetzblatt (36)*. 2008:1658-65.
- [6] Thrän D, Hennig C, Rensberg N, Denysenko V, Fritsche UR, Eppler U.: *IEA Bioenergy Task 40: Country Report Germany 2014*. Leipzig, Darmstadt, Berlin: DBFZ (German Biomass Research Centre), UFZ (Helmholtz Centre for Environmental Research), IINAS (International Institute for Sustainability Analysis and Strategy). 2015.
- [7] Fischer S.: *Die Verarbeitung der Richtlinie 2009/29/EG in der deutschen Erneuerbare-Energien-Politik. Die Energiewende und Europa*: Springer; 2017. p. 259-68.
- [8] Bieber T.: *Die Einführung des wettbewerblichen Vergütungssystems der Ausschreibungen im EEG 2017: Eine kritische Analyse*: GRIN Verlag; 2016.
- [9] Fuchs G.: *Lokale Impulse für Energieinnovationen: Bürgerwind, Contracting, Kraft-Wärme-Kopplung, Smart Grid*: Springer-Verlag; 2017.
- [10] Climates W.: *Average temperature (°C) and Rainfall (mm) in west Germany*. 2016.

Authors: M.Sc. Funda Cansu Ertem-Kappler, Technische Universität Berlin, Chair of Bioprocess Engineering, Department of Biotechnology Ackerstr. 76, ACK24, 13355 Berlin, Germany. M.Sc. Michael Acheampong, University of South Florida, College of Arts and Sciences, School of Geosciences, 4202 E. Fowler Avenue, NES 107 Tampa, FL 33620-5550, USA. E-mail: fcertem@mailbox.tu-berlin.de macheampong@mail.usf.edu

**SCIENTIFIC CONFERENCE WITH INTERNATIONAL
PARTICIPATION
NOVI SAD, SERBIA, DECEMBER 6-8, 2017**

Arzate, J.A., Cruz Bournazou, M.N., Neubauer, P., Junne, S.

**OPTIMIZATION OF ANAEROBIC DIGESTION FROM ENERGY CROPS AND
MANURE FOR BIOGAS PRODUCTION USING ASPEN**

Abstract: *Anaerobic digestion (AD) for converting waste to energy is a technology with increasing applications. Biogas plants (BGPs) need to efficiently produce methane and require techniques to improve the operation. This study applies the AD model AM2 and an optimization tool to stabilize the biogas process. An optimization of a co-digestion process by the test VOA/TA (Volatile Organic Acids/Total Alkalinity) was performed using ASPEN Custom Modeler (ACM) V8. The digester volume was 228 m³ and feed of 1000 tons per year. The optimizer output presents better results in terms of energy production (an increment of 4.9 %) and process stability.*

Key words: *Optimization, anaerobic digestion, biogas process, AM2, ASPEN*

1. INTRODUCTION

Renewable energy from biomass is able to mitigate global climate change [1]. Recent studies have shown that biomass is increasingly used for energy production [2], [3]. In 2016, the total amount of renewable energy utilization for electricity generation from biomass was 8.6 percent of Germany's gross electricity consumption. The amount of electricity produced from biomass has increased 10 times since year 2000 [4]. For this reasons, the growing demand for efficient systems for the production of methane from biomass requires the developing of control strategies assuring the best performance and stability of the process. In fact, the lack of flexibility to produce electricity from renewable resources is well known. However, the biogas process is the only one that can fulfil the energy demand in flexible form.

The biogas process is complex in which uncountable and relatively slow microbial reactions occur and still presents problems to be predicted and controlled it. Nowadays, in the case of large-scale biogas plants the control of substrate feeding to the process is many times performed by operator's experience, or with a simple calculation after applying several trials [5]. In best cases, the process engineer's knowledge is used; however, the question arises, what optimization method should be applied to the process? Although there have been also some attempts to determine the optimal operating conditions, for example, using the ADM1[6], it retains high rigidity and can only be applied with equal complex techniques. Therefore, the ADM1 seems to be too complex for its application to the usual monitoring capabilities

in biogas plants. An anaerobic digestion model can associate all the processes and reactions within the system through mathematical equations, variables and parameters to achieve a real process. The models include the relevant information of the process to realistically describe the system; such as the characterization of substrates, effects of dilution, temperature or hydraulic behavior among others. In the last five decades, the digestion of several substrates has been investigated with great interest. Angelidaki, et al 1993 [7] designed experiments and developed a model to investigate the effects of ammonia on digestion of manure. The results clearly demonstrated that at a certain level of ammonia concentration the process can be stable after an initial adaptation period. However, a reduction in methane yield was obtained with an increase in the concentration of volatile organic acids in the medium. As part of such a study, it was shown that organic acids have an important effect on the process. Indeed, the parameter VOA/TA (Volatile Organic Acids / Total Alkalinity) better known as FOSTAC for its acronym in german (Flüchtige Organische Säuren Totals Anorganisches Carbonat), is a key parameter to control the digestion of raw material. This ratio represents the ability of the digester buffer capacity to resist a pH decrease due to the accumulation of VOA, which has been reported to be 0.3-0.4 for a stable digestion [8]. Normally, several parameters are requested to analyze the process in BGP (pH, alkalinity, volatile organic acids, dry matter content and organic material and C/N ratio). Therefore, the quality of the measurement is expensive, consuming a lot of time. In contrast, FOSTAC method presents several advantages.

The stability of the anaerobic degradation process can be promptly, easily and continuously determined. The result is a unique value depending on the ratio of the two parameters [8]. Some other studies have been published in which the FOSTAC, the methane content (%) and the pH were used as parameters to control the stability of the digester; in digestion of chinese cabbage silage (CCS) [9]; with waste of chinese cabbage juice (CCJ) and swine manure (SM) [10]; it was investigated the co-digestion of a variable amount of fruits and vegetable residues [11] and [12].

The model AM2 [13] is a simpler model to simulate the AD process for the production of biogas. It was originally formulated for wastewater from an industrial wine distillery as a raw material. Recently, it has also been applied for maize silage to predict biogas and methane [14]. Furthermore, a new version of AM2 model also includes the prediction of state variables as biomass (X), organic matter (S1), volatile fatty acids (S2), alkalinity (Z), and inorganic carbon (C) [15]. In this study, the AM2 was written in ASPEN plus and optimize the process using a statistical method for a co-digestion of the three most applied substrates in Germany (maize, grass and cattle manure). The relevant of the study is the process control through VOA/TA using the feed loading as a decision variable in the optimizer. Thus, the maximum biogas and methane production and the recommended VOA/TA value of 0.3 for process stability were the objective functions.

2. METHODS

The new version of AM2 describes the anaerobic digestion in three steps: hydrolysis, acetogenesis and methanogenesis, which can be observed in Fig. 1 [15].

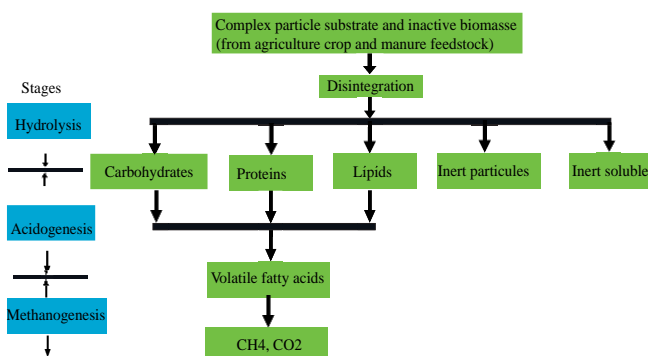


Fig. 1. The anaerobic digestion model AM2 including biochemical processes

The anaerobic digestion involves the bacterial hydrolysis of the input materials. Insoluble organic polymers, such as carbohydrates, proteins, lipid, inert particles and inert soluble are broken down to soluble derivatives that become available for other bacteria. Acidogenic bacteria then convert the sugars, amino acids and long fatty acids into volatile fatty acids. Finally, methanogens convert these products to methane and carbon dioxide.

The AM2 was written in ACM, which is a subprogram inside ASPEN plus to easily execute customized models. The model in the ACM platform was dynamically simulated and tested by changing the feedstock type and the conditions of the process as the organic loading rate (OLR). In the first part of the study, simulations of mono-digestion of the three substrates were carried out and the results of methane production were compared vs. KTBL [16] (a data base of biogas production from BGPs in Germany). The specifications of the substrates were the following: The maize silage and grass silage were considered as 35%TM and 95% organic oTM; The cattle manure as 10%TM and 80% organic oTM.

The optimization method used in the program was the Sequential Quadratic Programming (SQP), which is a highly effective tool for solving constrained optimization problems with smooth nonlinear functions in the objective and constraints. The maximum methane production and the recommended VOA/TA value of 0.3 for process stability [8] were the objective functions; the substrate feed was the decision variable.

The simulation was conducted for co-digestion of maize, grass and cattle manure of a large scale BGP with a volume digester of 228 m³ and 1000 tons of feed per year. The optimization of the bioprocess was performed by the test VOA/TA.

3. RESULTS

The simulation of the process was performed for the prediction of methane production using the AM2 and compared with the data base of KTBL and literature. The comparison was carried out for each substrate. Results are satisfied in each substrate and are depicted in Tabs. 1 and 2, respectively.

The results showed an optimized process including feed composition and methane production vs. the normal process. Optimized values of substrates feed, FOSTAC and methane production are given in Tab. 3.

Table 1. Comparison of methane production between AM2 vs KTBL [16]

	KTBL [mlCH ₄ /gVS]	AM2 [mlCH ₄ /gVS]	Diff. %
Maize silage	337.9	324.4	4.0
Grass silage	289.6	272.2	6.0
Cattle manure	26.5	25.0	5.7

Table 2. Comparison of methane production between AM2 vs literature

	Literature [17] [mlCH ₄ /gVS.]	AM2 [mlCH ₄ /gVS]
Maize silage	181.3	181.5
Grass silage	155.5	194.3
Cattle manure	33.5	25.5

The optimizer outputs present better results in terms of energy production and process stability. Furthermore, it confirms the higher energetic value of maize silage than manure and higher inhibition of the biogas process of manure due to higher amount of ammonia produced than maize.

Table 3. Process optimization results. Codigestion of maize silage, grass silage and cattle manure

	Unit	Normal process	Optimized process
Feed of maize	Ton d ⁻¹	0.8	1.2
Feed of grass	Ton d ⁻¹	0.8	0.8
Feed of cattle manure	Ton d ⁻¹	1.2	0.8
FOSTAC	[-]	0.08	0.29
Methane production	m ³ d ⁻¹	253	265

The results showed an optimized process with a feed loading of 1.2, 0.8 and 0.8 tons d⁻¹ of maize, grass and cattle manure, respectively, the amount of maize increased 0.4 tons d⁻¹ vs. the normal process with an increment in the methane production (4.9%).

4. DISSCUSION

Biogas plants (BGPs) can efficiently produce methane by AD from agricultural or industrial wastes. The efficiency of the biogas process depends not only on installations but on ability of operators to handle the optimal process. The combination of an AD model and optimization tools can help to address the complex metabolic

pathway of the bioprocess and perform efficient operation. This study explores the anaerobic digestion process for biogas production in terms of operation, drawing on the example from a BGP with a volume of the digester vessel of 228 m³ and feed of 1000 tons per year using maize, grass and cattle manure as feedstock. It also provides an optimizer to stabilize the bioprocess by the test VOA/TA (Volatile Organic Acids/Total Alkalinity). This ratio can be used as a key operational parameter to control the digestion of feedstock. The optimizer uses the AD model AM2 which was coded in ASPEN Custom Modeler (ACM) V8 to simulate the process. The normal FOSTAC value for the process was 0.08, after optimization a value of 0.29 was reached that is the recommended value for anaerobic digestion systems, which ensures the stability of digestion. This program can be used to perform optimizations for any other substrate, taking into consideration that the AM2 model must be calibrated for a new feedstock.

5. CONCLUSIONS

The simulation is not only useful when predicting the process, the aim is also to avoid production failures or disturbances, whereby, along with optimization approach, it is possible to enhanced profitability. Aspen Plus is able to incorporate the dynamic model in a platform to create simulations for analysis of plant behavior. In this study, once the new extended version of AM2 was written in ASPEN, the simulation and the optimization of the process were successfully carried out due to the feasibility of the program to handle customized models. Results showed the benefits of a program to establish the basis of the process control. The feed control of large-scale biogas plants is commonly carried out by operator experiences in the process. A first attempt towards a closed loop control is the availability of a suitable model. One objective of this study was to evaluate the performance of AM2 for the application at dynamic process operation when fluctuating feedstock load is present in the process. Very slow reactions occur when anaerobic microorganisms are fed in a dynamic real-time process, so the optimization using a non-complex and non-linear process model seems to be a suitable approach.

Results confirm the higher energetic value of maize than cattle manure and higher inhibition caused by manure on the biogas process due to higher amount ammonia produced compare to maize. Additionally, the optimization indicated a better dosage of the nutritional components in the

process. This tool will enable operators to easily evaluate the process and take actions for better performance in real time.

6. REFERENCES

- [1] Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Kadner, S., Zwickel, T., & Matschoss, P. (Eds.). (2011). *Renewable energy sources and climate change mitigation: Special report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press.
- [2] McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource technology*, 83(1), 37-46.
- [3] Jingura, R. M., & Matengaifa, R. (2009). Optimization of biogas production by anaerobic digestion for sustainable energy development in Zimbabwe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(5), 1116-1120.
- [4] Bioeconomy BW. <https://www.biooekonomie-bw.de/en/articles/news/flexible-biogas-plant-operation-new-concepts-for-stabilising-bioenergy-provision/>
- [5] Gaida, D., Luis, S. B. A., Wolf, C., Back, T., Bongards, M., & McLoone, S. (2011). Optimal control of biogas plants using nonlinear model predictive control. ISSC 2011, Trinity College Dublin, June 23-24
- [6] Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S. V., Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., & Vavilin, V. A. (2002). *The IWA anaerobic digestion model no 1 (ADM1)*. *Water Science and Technology*, 45(10), 65-73.
- [7] Angelidaki, I., & Ahring, B. K. (1993). Thermophilic anaerobic digestion of livestock waste: the effect of ammonia. *Applied Microbiology and biotechnology*, 38(4), 560-564.
- [8] Lili, M., Biró, G., Sulyok, E., Petis, M., Borbély, J., & Tamás, J. (2011). Novel approach on the basis of FOS/TAC method. *Analele Universității din Oradea, Fascicula: Protecția Mediului*, 17, 713-718.
- [9] Kafle, G. K. (2009). Effective Treatment of Swine Manure with Chinese Cabbage Silage through Serial Anaerobic Digestion. *강원농업생명환경연구*, 21(단일호), 191-191.
- [10] Kafle, G.K., Kim, S.H., Shin, B.S., (2012). Anaerobic digestion treatment for the mixture of Chinese cabbage waste juice and swine manure, *Journal of Biosystems Engineering* 37(1) 58-64.
- [11] Scano, E. A., Asquer, C., Pistis, A., Ortu, L., Demontis, V., & Cocco, D. (2014). Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: experimental results on pilot-scale and preliminary performance evaluation of a full-scale power plant. *Energy conversion and management*, 77, 22-30.
- [12] Di Maria, F., Sordi, A., Cirulli, G., Gigliotti, G., Massaccesi, L., & Cucina, M. (2014). Co-treatment of fruit and vegetable waste in sludge digesters. An analysis of the relationship among bio-methane generation, process stability and digestate phytotoxicity. *Waste management*, 34(9), 1603-1608.
- [13] Bernard, O., Hadj-Sadok, Z., Dochain, D., Genovesi, A., & Steyer, J. P. (2001). Dynamical model development and parameter identification for an anaerobic wastewater treatment process. *Biotechnology and bioengineering*, 75(4), 424-438.
- [14] Arzate, J. A., Bournazou, M. C., Kirstein, M., Neubauer, P., Junne, S., & Habermann, B. (2014). Modeling and parameter estimation of a biogas plant using maize silage in a two step model. *Engineering Optimization*, 2014, 415.
- [15] Arzate, J. A., Kirstein, M., Ertem, F. C., Kielhorn, E., Ramirez Malule, H., Neubauer, P., & Junne, S. (2017). Anaerobic Digestion Model (AM2) for the Description of Biogas Processes at Dynamic Feedstock Loading Rates. *Chemie Ingenieur Technik*, 89(5), 686-695.
- [16] KTBL (2014): Datensammlung Betriebsplanung Landwirtschaft 2014/15. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt.
- [17] Zhou, H., Löffler, D., & Kranert, M. (2011). Model-based predictions of anaerobic digestion of agricultural substrates for biogas production. *Bioresource technology*, 102(23), 10819-10828.

Authors: MSc. Juan Antonio Arzate Salgado, 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 72190, Fax: +49 30 314 27577.

E-mail: j.arzate@mailbox.tu.berlin.de
mariano.n.cruzbournazou@tu.berlin.de
peter.neubauer@tu.berlin.de
stefan.junne@tu.berlin.de

**SCIENTIFIC CONFERENCE WITH INTERNATIONAL
PARTICIPATION
ETIKUM 2017
NOVI SAD, SERBIA, DECEMBER 6-8, 2017**

Muránsky, J.

**TRANSITION OF MECHANICAL ENGINEERING WORKS TO THE
GREEN ECONOMY**

***Abstract :** According to the Bratislava process for the green economy, during the next years, mechanical engineering works would have to produce products made and delivered with the highest quality, and during this processes the natural energy and material sources are the most effectively used and applied.*

***Key words:** Green Economy, Mechanical Engineering Works, Automotive Industry*

1. INTRODUCTION

According to the International Conference „Transition to the Green Economy (T2gE)“, organised by the Slovak Ministry of Environment, and Slovak Environmental Agency (September 6 – 7, 2016) in Bratislava, „The Bratislava Process for the Green Economy“ will be based and applied to the Middle European Region. In principle, the green economy represents such a function of economy, according to its growth and development of society are guaranteed, and during this processes the natural energy and material sources are most effectively used and applied.

According to the vision book „Through Engineering Our Vision“ [8], mechanical engineering is all about taking science and using it to produce things. It`s about translating theoretical research into practical solutions and applications which are used by society.

2. TRANSITION TO THE GREEN ECONOMY AND MECHANICAL ENGINEERING WORKS

It is relatively a new concept, because in history the emphasis has been concentrated to the biggest consumption, but in the last years the most rational production has the priority. It is well-known, that the world natural resources are exhausted. We must respect this reality – capacities and possibilities of our planet are exhausted. We must be responsible,

and to have respect to our climate, biodiversity, atmosphere, water and land. Transition to the green economy needs visionary and courageous decisions.

Mechanical engineering and the mechanical engineering works (MEW) represent the important part of the Slovak industry. According to the transition to the green economy, during the next years mechanical engineering works would have to produce products made and delivered with the highest quality at the last cost **with the lowest possible consumption of resources**. The model of the MEW, and its structure according to this transition is illustrated in Fig. 1. [2, 3, 4]

3. APPLICATION IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

Automotive industry in Slovakia represents their important part. Transition to the green economy will be demonstrated in this part. Vehicle manufacturing and assembly (VMA) and its simple starting model is illustrated in Fig. 2.

Detailed product life cycle from mining to reuse can be illustrated according to Fig. 3.

Detailed activities in the vehicle manufacturing and assembly demonstrates the Fig. 4, see Sullivan et al - [6].

Relations and binding, demonstrated in the Fig. 1 and Fig. 4, represents the starting points for the transition of vehicle production to the green economy, and including to it the Fig. 2 and Fig. 3, too!

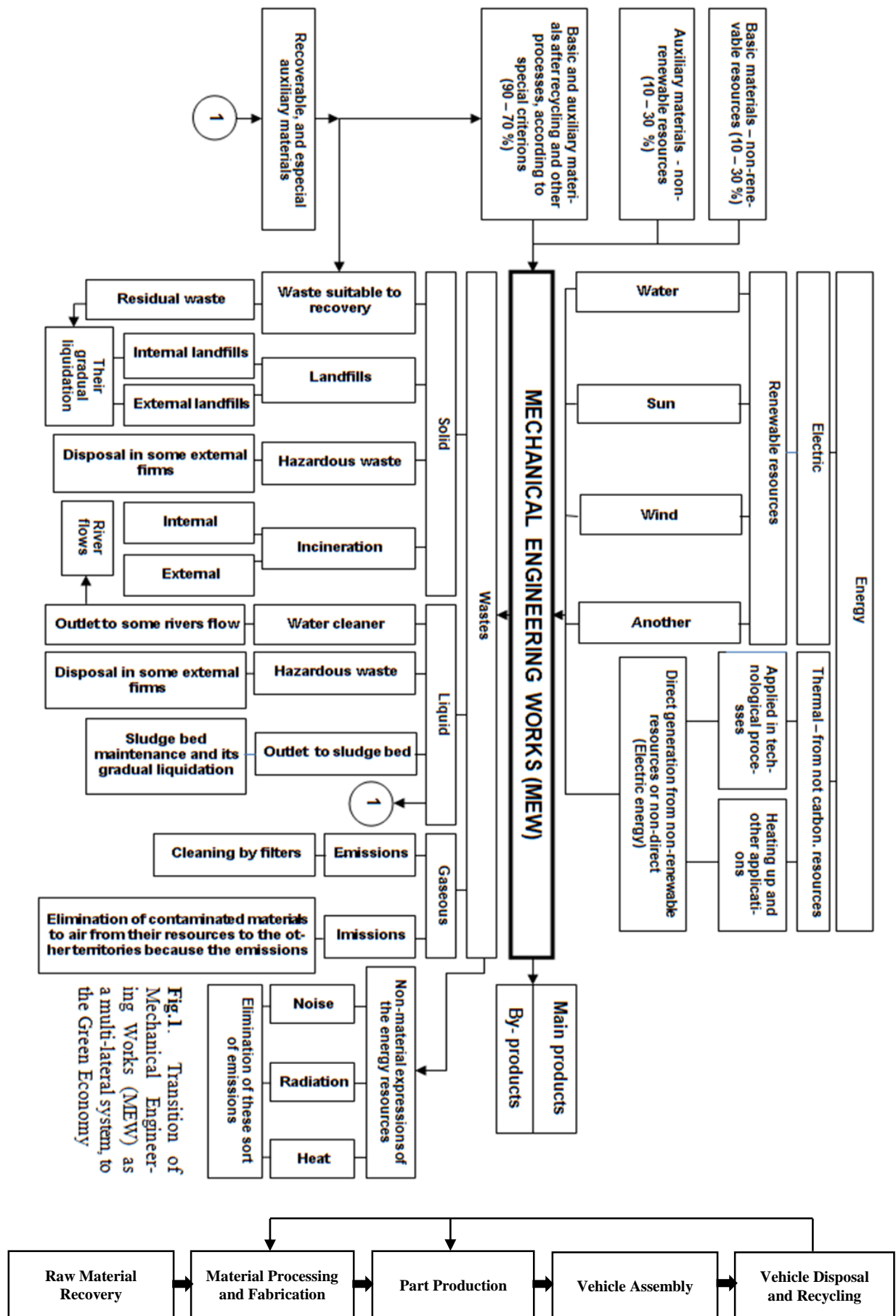


Fig. 2. Green Vehicle – Cycle Stages

Detailed product life cycle from mining to reuse can be illustrated according to Fig. 3

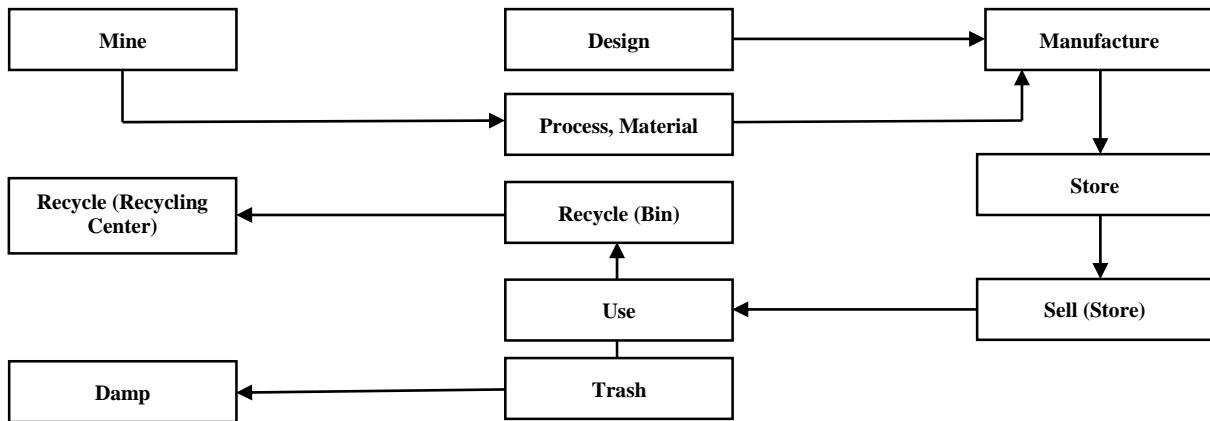


Fig. 3. Product life cycle: From mining to reuse

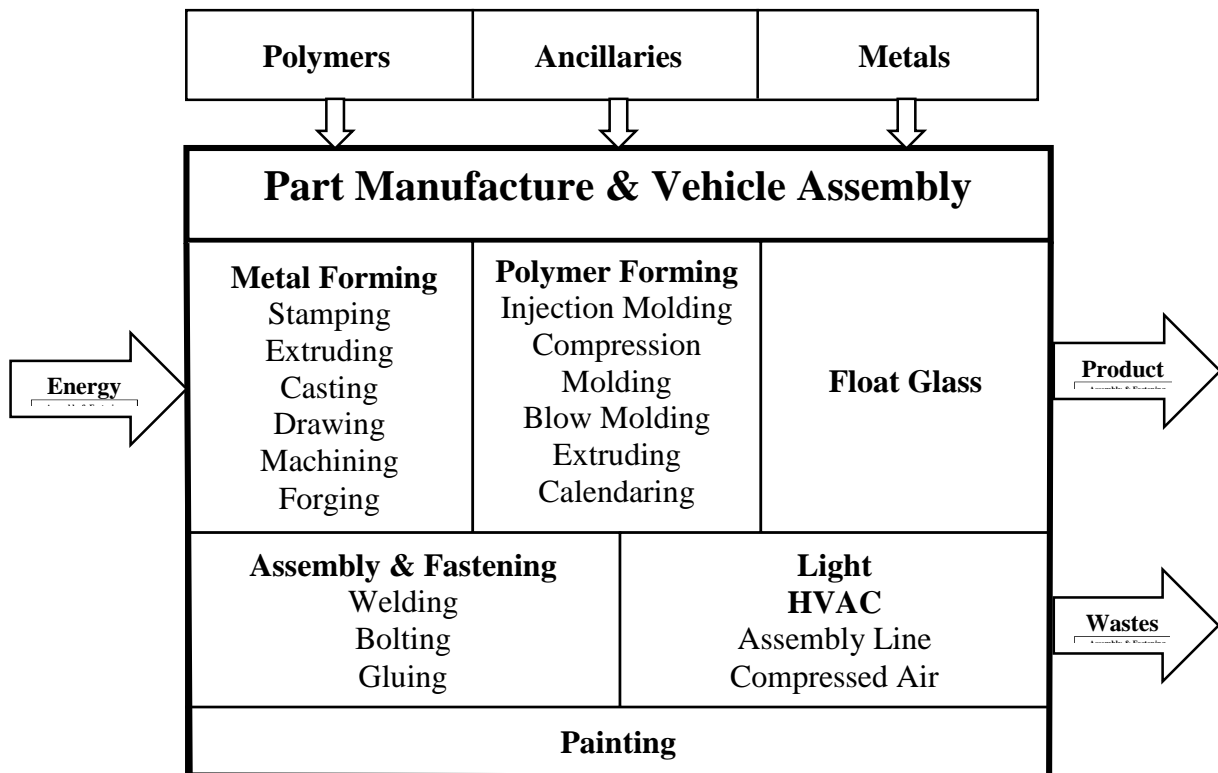


Fig. 4. Activities in the vehicle manufacturing and assembly, stage of the Life Cycle

Relations and binding, demonstrated mainly in the Fig. 1 and Fig. 4, represents the starting points for the

Transition of Vehicle Production to the Green Economy!

4. FORMAL EXPRESSIONS OF THE RELATIONS IN VEHICLES MANUFACTURING AND ASSEMBLY

Production and assembly, where $\{PZM\}$ is the basic list for both part manufacture and vehicle assembly, $\{AN\}_i$ is the basic vector for vehicle component i , m is the number of components or part that are assemble into a complete vehicle by an OEM`s assembly plant. $\{AN\}^*$ is the basic vector for the assembly and finishing operations at the OEM`s assembly plant. $\{AN\}^*$ is comprised of two terms – for details see [6, 7].

5. CONCLUSION

Keeping the economic growth and the effective drawing of natural resources, and minimalizing of influences on the environment requires the new procedures. Conception of the green economy is one the important means of our successful future. Conception of the green economics produces scope of our successful future, too. The best way for it is optimum and perfect of products concept and its construction, production process, better systems of management from the standpoint of the environment.

According to the COP 21 Climate Summit and other authorities - [1], in the year 2040 37 % of electric energy will be produced from the regenerative sources, about on 50 % will be bigger the natural gas demand, greenhouse gases, produced in energetics will be represent 0.5 % only, the number of electric vehicles will be represent 150 millions (in the present time they are 1.3 millions), mining of crude – oil go down more than 10 %, etc.

6. REFERENCES

- [1] Cziria, E.: Sun, wind, and gas wrestle coal and crude – oil. In: Verity, Nov.21.2016, pp.7 – 8.
- [2] Muránsky, J. : Mechanical Engineering and the COP 21 Climate Summit. In : Transactions of the Universities of Košice, No.2/2016, pp. 48 – 52, ISSN 1335-2334
- [3] Muránsky, J. : Quality of Environment and its Quantitative Determination in Mechanical Engineering. In : Proc. Int. Scientific Conf. ETIKUM 2015, Novi Sad, 19th – 20th June 2015, ISBN 978-86-7892-616-7
- [4] Muránsky, J. : Transition of Mechanical Engineering Works to the Green Economy. In : Transactions of the Universities of Košice. No.1/2017, pp. 56 – 61, ISSN 1335-2334
- [5] SAZP : Green Economy–Expectation for Future. In : Enviro-magazine, 4/2016, pp.10 - 11
- [6] Sullivan, J.L., Burnham, A., Wang, M., : Energy-Consumption and Carbon Emission Analysis of Vehicle and Component Manufacturing Center for Transportation Research Energy System Division, Argone National Laboratory, 2010, pp. 47 – 68
- [7] Sullivan, J.L. at al : Values of Life Cycle Energy Consumption and CO₂ Emissions for the Average Vehicle. Argone National Laboratory, Research Tabs, 2015
- [8] Shankar, A.L. : Improving the World Through Engineering. Larsen & Toubro Infotech Ltd, 2016.

Šišić, M., Imamović, N., Birdahić, V.

ANALIZA UTICAJA PEPELA U POSTUPKU KOMPOSTIRANJA SMESE MULJA S KOMUNALNIH UREĐAJA ZA PREČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA I BIOOTPADA

Rezime: U radu je predstavljeno istraživanje uticaja dodatka drvnog pepela u postupku kompostiranja smese mulja i biootpada kao dio kompleksnijeg istraživanja mogućnosti kompostiranja mulja sa komunalnih prečišćavača otpadnih voda i njegove upotrebe u poljoprivredi kao poboljšivača tla. U postupku kompostiranja su praćene različite kombinacije, odnosno, supstrati za kompostiranje u kontrolisanim uslovima okoline sa prisilnom, aeracijom. Dodatak pepela osnovnom supstratu doprinosi uspostavljanju optimalnih uslova za startanje procesa kompostiranja i zavisno od veličine udela utiče na parametre procesa i kvalitet proizvedenog komposta.

Ključne reči: mulj, biootpad, proces kompostiranja.

1. UVOD

U postupcima prečišćavanja komunalnih otpadnih voda kao nusprodukt pojavljuje se mulj. Zbrinjavanje ovog mulja predstavlja poseban problem zato što se po svom karakteru i hemijskom sastavu ne može odlagati na deponije komunalnog otpada a ujedno često ima i štetne efekte. To podrazumijeva da se ovaj mulj mora kontrolirano zbrinjavati. Tretman mulja s komunalnih postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda i mogućnost njegove primene u poljoprivredi u skladu sa načelima održivog razvoja u današnje vreme sve više dobiva na važnosti. Razgradnjom organske materije u mulju do anorganske postupkom kompostiranja, one se ugrađuju u glinaste i humusne čestice i postaju dostupne biljkama za rast [1]. Detaljna analiza parametara procesa kompostiranja i uspostavljanje optimalnog sistema (optimalne recepture i uslova procesa) i modela za praćenje postupka može doprinijeti definisanju konačnog sistema zbrinjavanja muljeva i projektovanju postrojenja za obradu istih.

2. MATERIJALI I METODE

Za potrebe istraživanja korišten je mulj sa prečišćavača komunalnih otpadnih voda i miješani biootpad. Početne karakteristike analiziranog mulja su sljedeće : vlažnost - 84%, organska materija - 61,29%, pH vrijednost - 8,0, sadržaj C - 47,80 mg/kg, sadržaj N-3,10 mg/kg. Biootpadi dodavani mulju su: kuhinjski biootpad (kora krompira, jabuke mrkve, i ostaci zelenih dijelova biljaka), zeleni biootpad (pokošena trava, lišće bjelogorice, ostaci i stabljike biljaka), drvenasti

biootpad (usitnjeno granje, slama pšenice, suhe stabljike kukuruza). Ovako pripremljen biootpad dodavan je mulju sa različitim procentualnim učešćem formirajući različite kompostne smese - uzorke prikazane u Tabeli 1.

Tabela 1. Kompostne smese

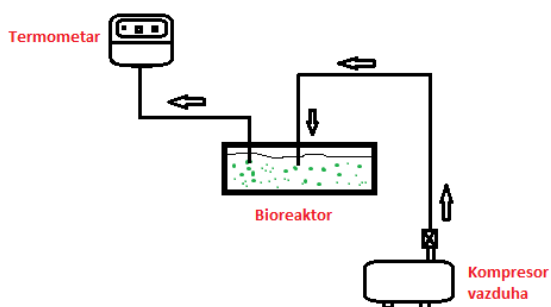
Br. uzorka	Udio mulja (%)	Udio mešanog biootpada (%)	Udio pepela (%)
1	48,5	48,5	3
2	47	47	6
3	45,5	45,5	9
4	68,5	28,5	3
5	67	27	6
6	65,5	25,5	9

Svi uzorci su postavljeni u laboratorijske bioreaktore, plastične spremnike zapremine 6,4 dm³ (slika 1.).



Sl.1. Sistem povezanih međusobno izoliranih bioreaktora

Opšti koncept kontrolisanog aerobnog kompostiranja predstavljen je shemom na slici 2.

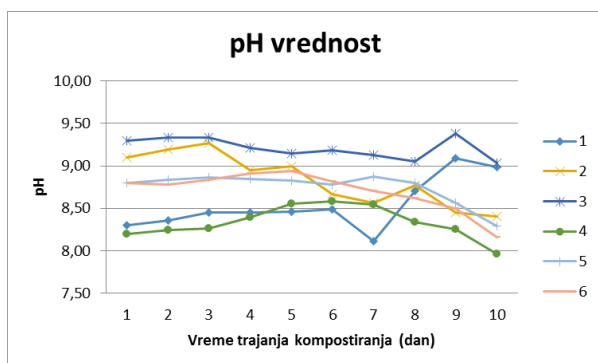


Sl. 2. Shema opšteg koncepta kontrolisanog postupka kompostiranja

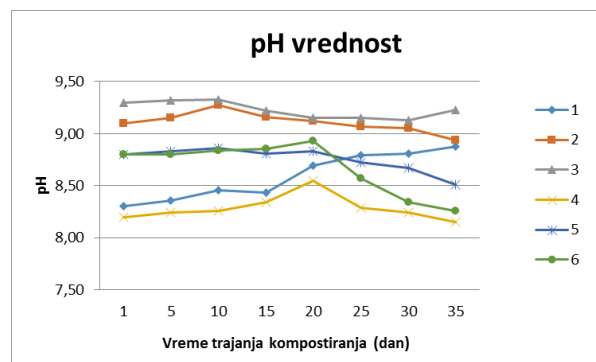
Prosti sistem za kontrolisano kompostiranje se sastoji od sledećih komponenti: laboratorijskog bioreaktora, kompresora vazduha i plastičnih cevi kojima se dovodi zrak do bioreaktora. Svim spremnicima je sistemom plastičnih cevi omogućena svakodnevna aeracija povezivanjem na vanjski kompresor. Prostorija u kojoj su postavljeni uzorci zaštićena je od vanjskih uticaja. Proces kompostiranja je za iste uzorke praćen na dva temperaturna nivoa, 25°C i 35°C. U radu je provedeno eksperimentalno istraživanje uz korišćenje odgovarajućih analitičkih i statističkih metoda.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Vrednost pH generalno utiče na brzinu razgradnje organske materije (regulišući brojnost i aktivnost mikrobiološke populacije), kao i na raspoloživost hranjiva i toksičnih elemenata [2]. Većina bakterija, gljivica i aktinomiceta razvija se kod pH vrednosti između 5,5 i 8 pa je to i optimalna vrijednost za kompostiranje. Tokom razgradnje organske materije dolazi do izdvajanja amonijaka, koji dovodi do povećanja pH vrijednosti, dok nakon termofilne faze i u uslovima dobre prozračnosti amonijak oksidira u nitrate, što postepeno smanjuje pH vrijednost [2]. Periodično su merene pH vrednosti a rezultati tih merenja su prikazana na Slici 3 i Slici 4.



Sl. 3. Dinamika promene pH vrednosti tokom kompostiranja uzoraka na 25°C

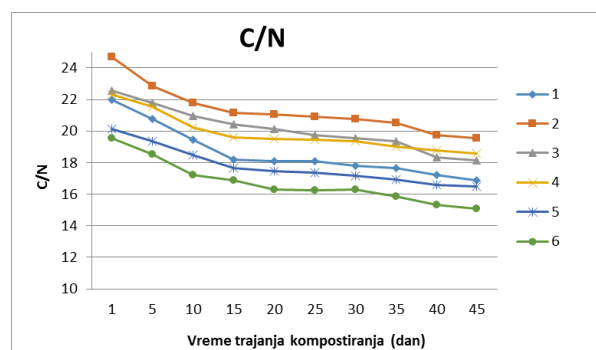


Sl. 4. Dinamika promene pH vrednosti tokom kompostiranja uzoraka na 35°C

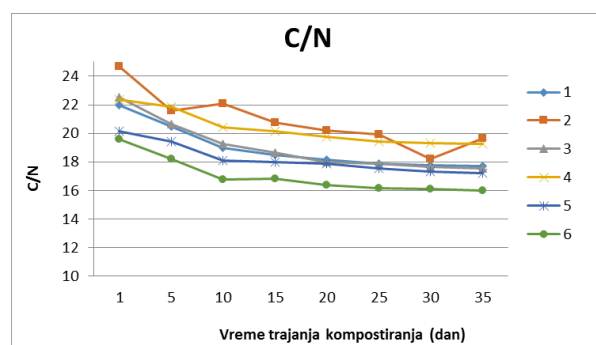
Kod svih uzoraka primetna je visoka početna pH-vrednost (>8). Najveću pH vrednost imao je uzorak 3 (9,3). Tokom kompostiranja pH vrednost nije značajno varirala. Zbog sadržaja pepela koji nije dozvoljavao "zakiseljavanje" procesa, pH vrednost nije imala uticaja na startanje procesa.. Takođe, tokom procesa primijeti se težnja da proces ide ka neutralnom području. Krajnja pH-vrednost u kompostu takođe nije bila ispod 8.

Na temperaturi okoline od 35°C uzorci 2 i 3 su tokom procesa dostizali pH-vrednost iznad 9. Ostali uzorci su bili u preferiranom intervalu. Izraženo alkalni komposti (komposti sa pH većom od 9) mogu imati nepovoljan uticaj na razvoj biljaka u zemljištu na koje su aplicirani [2].

Izmerene vrednosti sadržaja C i N, odnosno odnosa C/N prikazane su na Slici 5 i Slici 6.



Sl. 5. Dinamika promene C/N odnosa tokom kompostiranja uzoraka na 25°C



Sl. 6. Dinamika promene C/N odnosa tokom kompostiranja uzoraka na 35°C

Brza razgradnja organske materije rezultira padom organskog ugljika i akumulacijom hranjiva i mikrobiološke biomase što dovodi do smanjenja C/N odnosa, mada tok razgradnje zavisi i od C/N odnosa, početne smjese za kompostiranje [3]. Minimalna početna vrednost C/N odnosa na kojoj će doći do odvijanja procesa kompostiranja je 14 [4]. Početni C/N odnos analiziranih uzoraka se kretao od 19,57 (uzorak 6) do 24,71 (uzorak 2) dok je nakon 35 dana odnos C/N pao na vrijednosti između 14 i 21.

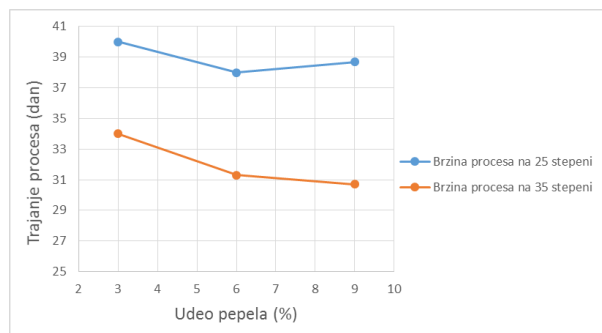
Posmatrajući dinamiku promjene C/N odnosa u pojedinim smesama, može se uočiti da je kod svih uzoraka, i na 25°C i na 35°C, evidentan postepen pad odnosa C/N tokom procesa kompostiranja.

Tabelom 2 su predstavljeni rezultati merenja maksimalno postignute temperature i dužine trajanja procesa kompostiranja za sve uzorke u oba temperaturna nivoa.

Tabela 2. Maksimalna temperatura i dužina trajanja procesa kompostiranja

Br. uzorka	Temperatura okoline (°C)	Max. temperatura kompostiranja (°C)	Trajanje procesa (dan)
1	25	53,1	40
	35	59,2	34
2	25	53,8	38
	35	58,2	31,3
3	25	53,7	38,7
	35	58,3	30,7
4	25	48,9	41
	35	55,3	32
5	25	52,3	42
	35	60,2	35
6	25	53,2	39,3
	35	58,5	36,7

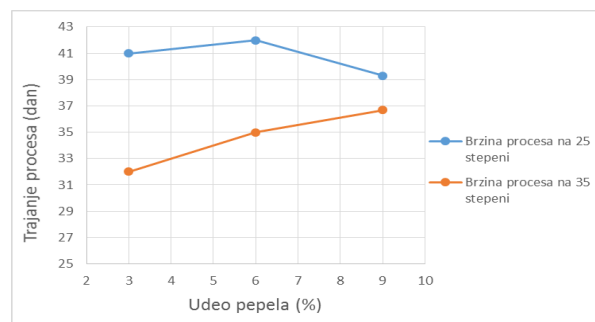
Uticaj sadržaja pepela na brzinu procesa kompostiranja prikazana je Slici 7 i Slici 8.



Sl.7. Uticaj dodatka pepela na brzinu procesa kompostiranja kod uzaka 1,2 i 3

Kod uzoraka sa jednakim udelom mešanog

biootpada i mulja (uzorci 1,2 i 3), povećanje udela pepela ima za rezultat određeno ubrzanje procesa. Na temperaturi okoline 35°C vreme trajanja procesa kompostiranja se smanjuje sa povećanjem udela pepela, dok se na temperaturi 25°C vreme trajanja procesa smanjuje do udela pepela od 6%, a posle toga se povećava sa povećanjem udela pepela.



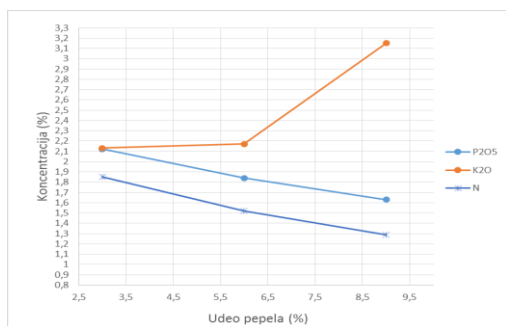
Sl. 8. Uticaj dodatka pepela na brzinu procesa kompostiranja kod uzaka 4,5 i 6.

Kod uzoraka 4,5 i 6, na temperaturi od 35°C vreme trajanja procesa kompostiranja se povećava sa povećanjem udela pepela, dok se na temperaturi 25°C vreme trajanja procesa blago povećava do udela pepela od 6%, a posle toga se smanjuje sa povećanjem udela pepela. Na temperaturi od 25°C, udio pepela ubrzava proces oko 1 dan za uzorke sa jednakim udelom mulja i mešanog biootpada, dok na temperaturi okoline od 35°C udio pepela može ubrzati proces i do 4 dana.

U gotovom kompostu su analizirane vrednosti nutrijenata koji karakterišu kvalitet komposta. Rezultati ove analize prikazani su Tabelom 3.

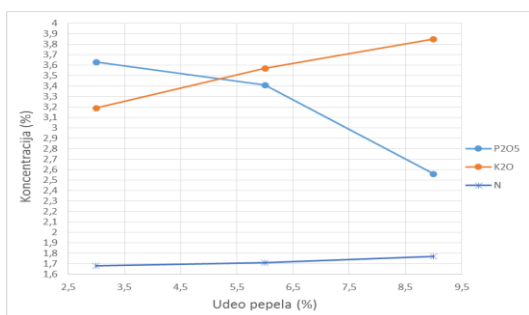
Tabela 3. Hemijska svojstva gotovog komposta

Hemijska svojstva gotovog komposta	Uzorak					
	1	2	3	4	5	6
C %	32.7	32.9	29.0	28,8	29.4	28.2
N %	1.8	1.5	1.2	1,7	1.7	1.8
Organska materija %	48.5	48.1	39.6	45,2	44.1	48.9
P ₂ O ₅ %	2.1	1.8	1.6	3,6	3.4	2.5
K ₂ O %	2.1	2.1	3.1	3,2	3.5	3.8
Mg %	1.2	1.1	1.0	1,2	1.1	1.4
P %	2,6	2,0	1,9	2,2	3,5	3,1
K %	2,5	2,6	3,4	3,3	3,8	3,9
Ca %	1.8	2.3	2.5	2,1	2.1	2.3
Vlaga %	53.2	56.2	59.3	56,3	62.	61.2
pH	9.2	8.9	9.2	8,1	8.5	8.2



Sl. 9. Zavisnost kvaliteta komposta od sadržaja pepela za uzorke 1,2 i 3

U uzorcima 1,2 i 3 kod kojih su jednaki udeli mulja i biootpada sadržaj P₂O₅, K₂O i N je iznad vrednosti koje se propisuju za ove vrste gnojiva [5]. Povećanjem udela pepela sadržaj K₂O raste a P₂O₅ i N opada.



Sl. 10. Zavisnost kvaliteta komposta od sadržaja pepela za uzorke 4,5 i 6

Kod uzoraka 4,5 i 6 kod kojih je udio mulja veći od udela biootpada vrednosti glavnih nutrijenata su iznad zahtevanih vrednosti kao i kod prethodne grupe uzoraka. Povećanjem udela pepela sadržaj K₂O raste a P₂O₅ opada. Ako posmatramo koji uzorci „proizvode“ najveće količine hranljivih sastojaka, možemo videti da su to uzorci kod kojih je udio miješanog biootpada manji od udela mulja.

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu dobivenih rezultata možemo zaključiti sledeće:

- dodatkom pepela u odgovarajućem omeru obezbeđuje se optimalna pH vrednost kompostne smese za startanje postupka kompostiranja kod supstrata sa niskom pH vrednošću (zakiseljeni supstrati),

- u kontrolisanim uslovima okoline i kontrolisanim doziranjem drvnog pepela moguće je uticati na dužinu trajanja postupka kompostiranja smese mulja s komunalnih pečištača otpadnih voda i biootpada.

- u kontrolisanim uslovima okoline i kontrolisanim doziranjem drvnog pepela moguće

je uticati na sadržaj nutrijenata koji karakterišu kvalitet komposta dobivenog u postupku kompostiranja smese mulja s komunalnih pečištača otpadnih voda i biootpada.

5. ZAHVALNICA

Rad predstavlja deo istraživanja u projektu koji je finansiran od strane Federalnog ministarstva obrazovanja i nauke.

6. REFERENCE

- [1] Kulcu, R., Yaldiz, O.: *Composting dynamics and optimum mixture ratio of chicken manure and vineyard wastes*, Waste Management & Research 23, 101-105. 2005
- [2] Jeris, S., Regan, W.: *Controlling Environmental Parameters For Optimum Composting. Part III: Effect of pH, Nutrients*, Compost Science & Utilization No 3, 16-22, 1973.
- [3] Nakasaki, K., Sasaki, M., Shoda, M., Kubota, H.: *Effect of Seeding during Thermophilic Composting of Sewage Sludge*, Applied and Environmental Microbiology, No. 3, 724-726, 1985.
- [4] Larsen, K.L., McCartney, D.M.: *The Effect of Carbon to Nitrogen (C/N) Ratio on Bench-Scale Composting of Pulp & Paper Biosolids*, Proceedings of the 8th Annual Conference of the Composting Council of Canada, Ottawa, 1998.
- [5] Bernal, M.P., Paredes, C., Monedero, M.A.S., Cegarra, J.: *Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes*. Bioresource Technology 63, 91-99, 1998.
- [6] Kulikowska, D., Klimiuk E.: *Organic matter transformations and kinetics during sewage sludge composting in a two-stage system*, Elsevier, Bioresource Technology, 2011.
- [7] Belyaeva, O.N., Haynes, R.J., Sturm, E.C.: *Chemical, physical and microbial properties and microbial diversity in manufactured soils produced from co-composting green waste and biosolids*, Elsevier, Waste Management, 2012.

Autori: V.as. mr. Muvedet Šišić, Doc. dr Nusret Imamović, V.as. mr. Vehid Birdahić, Univerzitet u Zenici, Mašinski fakultet, fakultetska 3, 72000 Zenica, BiH, Tel: +387 32 449 120, Fax: +387 32 246 612.

E-mail: sisic@alba.ba
nimamovic@mf.unze.ba
vehidbirdahic@yahoo.com

Imamović, N.

ENERGIJSKI INDEX KOD RADA CSTR ANAEROBNOG DIGESTORA

Rezime: U radu je predstavljen energijski index kao mera energijske efikasnosti rada CSTR (Continued Steered Tank Reactor) pri anaerobnom digestiranju odabranih mešavina razgradivog otpada iz mesne industrije. Energijski indeks je definisan i izračunat na bazi dobijenog ekvivalenta električne energije po jedinici ulaznog supstrata otpada u reaktor, te na osnovu utrošene električne energije za mešanje i zagrevanje supstrata u reaktora tokom procesa po odabranim eksperimentalnim tačkama. Kao ulazni supstrat u procesu anaerobnog digestiranja uzet je odgovarajući omer goveđeg stanjaka i ostataka otpada iz mesne industrije, koji je pokazao najveći stepen potencijala biorazgradivosti, a što je izvršeno u prelininarnim istraživanjima.

Cljučne reči: energijski index, CSTR bioreaktor, anaerobna digestija

1. UVOD

Dostupna literatura uglavnom daje nivo produkcije bioplina u bioreaktorima za najrazličitiji spektar primjene AD u prilično širokom procentualnom udelu metana (50-85 vol.%) kao i drugih primesa. Budući da ovakav interval ne daje preciznu projekciju nastanka biometana na kraju procesa AD, otvara se pitanje do kojih količina i kvaliteta nastalog čvrstog otpada u MI je opravdana izgradnja bioreaktora i adekvatna eksploatacija u cilju postizanja iskoristivih količina i kvaliteta bioplina sa ekonomskog i energijskog aspekta [1,2]. - Procentualni udio metana u bioplinu zavisi od nivoa realizacije pojedinih faza AD. Predmet-interesovanja postaju količina i kvalitet biogasa (biometan) kao funkcija parametara procesa za odgovarajući sistem bioreaktora, te količina i kvalitet ulaznih komponenti (fizičko-hemijska analiza). Također, jako je važno definisati karakter (nivo, jačinu) uticaja pojedinih, istovremeno promatranih parametara procesa: temperature odvijanja AD, brzine mešanja supstrata u bioreaktoru, na produkciju biogasa, odnosno biometana kod CSTR biorektora (Standardni protočni kotlasti bioreaktor sa stalnim mešanjem) [1,2,3].

Posebno je važno izraziti efikasnost rada bioreaktora preko energijskog indeksa koji se definiše na osnovu količine i kvaliteta biogasa, odnosno njegove energijske vrijednosti, te ukupne utrošene energije za rad bioreaktora. Na ovaj način, dodatno se evaluira održavanje potrebne temperature (zagrijavanje) bioreaktora i uloga mješača (broj okretaja), budući da ovi parametri pri radu bioreaktora uslovljavaju kontinuitet

procesa produkcije biometana kojeg neminovno prati određena potrošnja električne energije. Do sada se potrošnja ove energije za postizanje navedenih parametara uzimala orjentaciono (grubo procenjena) [1,4,5].

2. MATERIJAL I METODE

Vrste čvrstog otpada koje se generišu u pogonu mesne industrije "Bajra" d.o.o. Dolac na Lašvi Travnik i za koje se pretpostavilo da su vrlo pogodni za tretman AD korišteni su kao supstrat u ovom eksperimentu [6,7,8]: stajnjak iz stočnog depoa, transportnih vozila za prevoz stoke i sadržaj iz želuca, neupotrebljivi i nejestivi ostaci od klanja životinja i prerade mesa,

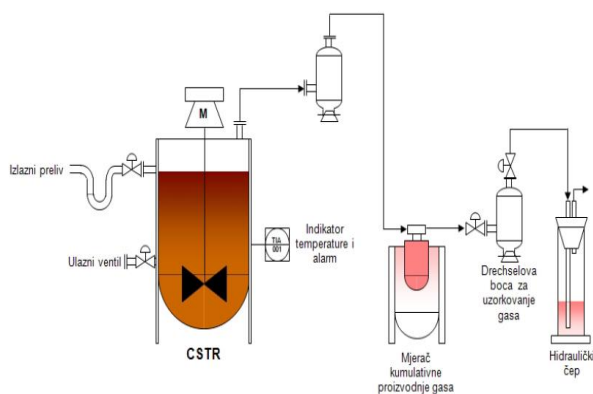
Pri ovom izboru vodilo se računa da otpad bude raspoloživ i istog kvaliteta tokom cele godine, tačnije da se ne radi o sezonskoj industriji (produkciji otpada). S obzirom na date okolnosti lokacije mesta izvođenja eksperimenta i mesta produkcije otpada, kao i na, ovaj pogon mesne industrije se smatra dobrim izborom izvora čvrstog otpada kao supstrata u procesu anaerobnog kodigestiranja u cilju definisanja prinosa biogasa sa energijskom evaluacijom procesa.

U većem delu eksperimenta, prevashodno u smislu početne karakterizacije otpada, korišten je otpad iz navedene mesne industrije „Bajra“ d.o.o. U nastavku eksperimenta, u nekoliko navrata se snabdevalo klaoničkim otpadom iz klaonice „Mujanović“ d.o.o. Kobilja Glava iz Sarajeva koji potpuno odgovara predmetnom, odabranom (kategoriziranom) otpadu MI „Bajra“ d.o.o [1,3].

Definisanje i određivanje energijskog indeksa je sprovedeno na (CSTR) bioreaktoru. On se odlikuje jednostavnim i pouzdanim dizajnom i predstavlja tipični jednofazni bioreaktor u kome se sve biometanske reakcije odvijaju u jednom, praktično savršeno izmešanom kotlu.

Radni volumen CSTR bioreaktora je 5 l. Otpad je doziran dnevno kroz ulazni ventil koji se nalazi u visini propelera mešača, što osigurava trenutno mešanje sa bioreaktorskim sadržajem.

Tretirani otpad je pražnjen preko izlaznog sifona koji onemogućava prodor zraka u bioreaktor. Količina doziranog i ispražnjenog otpada je jednaka kako bi se očuvao konstantni volumen otpada u bioreaktoru. Bioreaktorom je operirano u šaržnom modusu rada, što znači da su izlazni i ulazni ventil otvarani samo u trenutku punjenja odnosno pražnjenja sistema. Mešač u bioreaktoru je radio kontinuirano na dva nivoa broja okretaja, pri kojima je pored promene temperature istražen prinos biogasa (biometana). Shematski prikaz CSTR bioreaktora je dat na slici 1[1,2,5].



Sl. 1. Shema standardnog protočnog kotlastog bioreaktora.

Nakon “start-up” faze usledila je varijacija eksperimentalnih parametara procesa prema kombinacijama (tačkama) s konstantnom dnevnom dozom otpada od 50 g, za 15 dana ispitivanja.

U tabeli 1. je data plan matrica i ukupni rezultati prikupljenog biogasa, odnosno biometana i potrošnje električne energije.

Tabela 1. Plan matrica eksperimenata za CSTR [9,10].

kombinacija	Prirodne vrijednosti faktora		Kodirane vrednosti faktora	
	t	n	A	B
	(°C)	(o/min)		
(1)	25	10	-1	-1
a	35	10	1	-1
b	25	20	-1	1
ab	35	20	1	1

Uspješnost procesa, između ostalog, utvrđuje se mjerenjem veličina koje ukazuju na količinu dobivene i utrošene energije za izvođenje procesa. Takav pristup, primjenjen je na laboratorijskom CSTR modelu bioreaktora anaerobne digestije, primjenom *Black box metode* za definiranje *energijskog indeksa*. Utrošena električna energija je vrednost *ulaza*, dok je dobivena količina biogasa, odnosno biometana, konvertovana u energiju koja se ostvaruje transformacijom hemijske energije goriva (biogasa, biometana) u električnu energiju (sa odgovarajućim stepenom iskorištenja), predstavlja vrednost *izlaza*. Odnos vrijednosti *izlaza* i *ulaza* se definiše kao energijski indeks i predstavlja meru energijske uspešnosti tretmana otpada iz mesne industrije u procesu anaerobne digestiji na odabranom laboratorijskom modelu.

Tokom svih dana ispitivanja prinosa biometana na CSTR modelu anaerobnog digestora po svim eksperimentalnim tačkama, na uređaju za merenje potrošnje, registrovana je potrošnja električne energije (kWh). Električna energija je utrošena na zagrevanje bioreaktora i mešanje supstrata unutar istog konstantnog volumena (5 l). U tabeli 2. su date vrednosti utrošene električne energije po eksperimentalnim tačkama za zagrevanje i mešanje bioreaktora konstantnog sadržaja (kWh/kg supstrata), data je količina dobivenog metana sa njegovom konverzijom u odgovarajući ekvivalent električne energije po doziranoj masi ulaznog otpada (kWh/ kg otpada), te vrijednosti definisanog energijskog indeksa. Ekvivalent dobivene električne energije (EI) predstavlja izlaznu vrijednost *black box-a*, a dobiva se kao umnožak ukupne količine prikupljenog metana po količini doziranog otpada (m³/kg), a dozirano je 50 g/dan, prosečne energetske vrijednosti metana (9,55 kWh/m³ CH₄) i stepena uspešnosti konvertovanja biometana u električnu energiju od 38 %. Dakle, kada se količina dobivenog biometana preračuna u njegovu energetske vrijednost, te izrazi preko potencijalno ostvarive električne energije po kilogramu doziranog otpada

i podijeli sa količinom utrošene električne energije za mešanje i zagrevanje bioreaktora po masi tretiranog supstrata, dobije se tzv. energijski indeks. Na osnovu ovoga, a poznavajući ukupnu potrošnju električne energije po eksperimentalnim tačkama (UE), energijski indeks (E_i) se može izraziti kao (1) [1]:

Tabela 2. Vrednosti energijskog index-a i značajni parametri za izračun istog

eksperimentalne tačke	ukupna količina CH ₄ (l)	IE (kWh/kg)	UE (kWh/kg)	E _i
(1)	35,84	0,173	0,178	0,97
a	71,25	0,345	0,195	1,77
b	58,04	0,281	0,185	1,52
ab	58,97	0,285	0,246	1,16

$$E_i = \frac{IE}{UE} \quad (1)$$

gde su:

E_i - energijski indeks,

IE - ekvivalent dobivene električne energije (kWh/kg),

UE - ukupna potrošnja električne energije po eksperimentalnim tačkama (kWh/kg).

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Za četiri eksperimentalna nivoa maksimalna vrednost energijskog indeksa od 1,77 govori da je udio dobivene prema utrošenoj električnoj energiji najpovoljniji u eksperimentalnoj tački (a) kada je temperatura procesa 35 °C, a broj okretaja mešača 10 o/min. To znači da je dobivena vrednost električne energije 1,77 puta veća od uložene u proces digestiranja. Ovako ostvarena eksperimentalna tačka za date uslove ispitivanja, sa aspekta definisanog energijskog indeksa, daje maksimalan prinos biometana, a ujedno ne stvara maksimalnu potrošnju električne energije, koja je zabežena kod tačke (ab) u iznosu od 16,27 kWh. Najnepovoljniji energijski indeks je registrovan kod tačke (1). Vrijednost od 1,16 ima tačka (ab), odnosno 1,52 tačka (b).

Komparacijom vrednosti energijskog indeksa tačaka (a) i (b), može se zaključiti da se povoljan prinos biometana, odnosno da se manja potrošnja električne energije na opskrbu procesa, ostvaruje kod srednjih vrijednosti temperatura od 30 °C, odnosno brzina mešanja od 15 o/min. Na ovaj način se ukazuje na potrebu ispitivanja ovog procesa i u centralnim tačkama dvofaktornog eksperimentalnog plana, što upućuje na puteve nekih budućih istraživanja [1].

Imajući u vidu aspekte MI u tretmanu odabranih vrsta otpada za date uslove ispitivanja (još kroz BMP test-što je navedeno u aptraktu rada kao glavna aktivnost preliminarnih istraživanja, gdje je načinjen izbor najbolji izbor omera otpada) na opserviranim laboratorijskim modelima bioreaktora, može se doći do neophodnih kapaciteta snage postrojenja koja bi se (eventualno) mogla instalirati u pogonu MI. Ako se sada uzme najpovoljnija tačka (a) sa aspekta definisanog E_i i poznata količina otpada koja se produkuje u pogonu MI, može se doći do kapaciteta snage potencijalne elektrane na biogas. Nakon toga može se izračunati ukupna novčana vrijednost dobivene električne energije koja bi se po zagarantovanoj ceni isporučivala u gradsku mrežu.

Zagarantovana otkupna cena električne energije u FBiH za elektrane na biogas je izdiferencirana u četiri nivoa s obzirom na nazivnu snagu, i iznosi [10]:

-0,1484 KM/kWh za snagu do 150 kW,

-0,1459 KM/kWh za snagu od 150kW do 1 MW;

-0,1434 KM/kWh za snagu od 1MW do 10 MW;

-0,1410 KM/kWh za snage preko 10 MW.

Referentna cena električne energije u Federaciji Bosne i Hercegovine iznosi 0,1226 KM/kWh, a za izračunavanje se koristi Uredba o korištenju obnovljivih izvora energije i kogeneracije ("Službene novine Federacije BiH", broj: 36/10, 11/11, 88/11).

4. ZAKLJUČCI

Za četiri eksperimentalna nivoa maksimalna vrijednost energijskog indeksa od 1,77 govori da je udio dobivene prema utrošenoj električnoj energiji najpovoljniji u eksperimentalnoj tački (a) kada je temperatura procesa 35 °C, a broj okretaja mešača 10 o/min. To znači da je dobivena vrijednost električne energije 1,77 puta veća od uložene u proces digestiranja.

Navedena eksperimentalna tačka za date uvjete ispitivanja, sa aspekta definisanog energijskog indeksa, daje maksimalan prinos biometana, a ujedno ne stvara maksimalnu potrošnju električne energije, koja je zabeležena kod tačke (ab) u iznosu od 16,27 kWh.

Najnepovoljniji energijski indeks je registrovan kod tačke (1). Vrijednost od 1,16 ima tačka (ab), odnosno 1,52 tačka (b). Ostvarena vrijednost energijskog indeksa je jako mala i ne daje velika očekivanja investiranja u projektovanje, izgradnju i eksploataciju ovakvog jednog, u industrijskoj formi (full-scale) i u realnom okruženju značajne

kvalitete i količine predmetnog otpada, CSTR anaerobnog digestora. Ovakav zaključak se odnosi isključivo na promatranu potrošnju i dobijenu vrijednost energije bioplina (metana), u kontekst naglašenih ulova rada mezofilnog procesa digestiranja otpada iz mesne industrije. U domenu ovih promatranja potpuno su zanemareni svi drugi troškovi, materijali, energija, organizacija i konkretan rad na svim glavnim i popratnim poslovima tokom izvođenja ovog eksperimenta.

5. REFERENCE

- [1] Imamović, N.: *Istraživanje prinosa bioplina u procesu anaerobne digestije otpada iz mesne industrije*, doktorska disertacija, Univerzitet u Zenici, 2014.
- [2] Imamović, N., Goletić, Š., (2014): *Testing the Biomethane Yield of Degradable Wastes of Meat Industry by BMP Test, Chemical and Biochemical Engineering Quarterly (CABEQ)*, Original scientific paper, ISSN 0352-9568, 28 (1) 153-159.
- [3] Imamović, N., Goletić, Š., Silajdžić, I.: *Modelling of daily methane yield from the laboratory scale CSTR anaerobic bioreactor treating slaughterhouse waste*, Proceeding of the 19th International Research/Expert Conference TMT 2015, Barcelona, Spain, Ed.: Sabahudin Ekinović, Senay Yalcin, Joan Vivacos, 19 (1): 241-244, 2015.
- [4] Imamović, N., Goletić, Š., Silajdžić, I., Agarski, B.: *Modelling of daily methane yield from the laboratory scale plug flow anaerobic bioreactor*, TMT 2016, Mediterranean Sea Cruising, 24th September – 1st October 2016.
- [5] Goletić, Š., Duraković, J., Imamović, N.: *Elaborat o procjeni uticaja na okoliš za kompleks klaonice mesne industrije „Bajra“ d.o.o.* Dolac, Travnik, Mašinski fakultet Univerziteta u Zenici, 2010.
- [6] Goletić, Š., Duraković, J., Imamović, N.: *Elaborat o procjeni uticaja na okoliš za pogon i postrojenja prerade mesa mesne industrije „Bajra“ d.o.o.* Dolac, Travnik, Mašinski fakultet Univerziteta u Zenici, 2010.
- [7] Pravilnik o životinjskom otpadu i drugim neopasnim materijalima prirodnog porijekla koji se mogu koristiti u poljoprivredne svrhe ("Sl.novine FBiH", broj: 8/08).
- [8] Montgomery, C. D., Runger, C. G., Hubel, N. F.: *Engineering Statistics, second edition*, John Wiley&Sons, 2001.
- [9] Stanić, J.: *Metode inženjerskih mjerenja*, Univerzitet u Beogradu, 1981.
- [10] Kako izračunati važeću otkupnu cijenu električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije (OIEiK), www.ferk.ba/hr/index.php/dozvole/upute, pristupljeno: januar 2014. godine.

Autor: Dr. Sc. Nusret Imamović, docent na Univerzitet u Zenici, Mašinski fakultet u Zenici, Fakultetska 1, 72000 Zenica, B&H, Tel: +387 32 449 120,
E-mail: nimamovic@mf.unze.ba

Iskra, M., Budak, I., Soković, M., Agarski, B., Kosec, B.

LCA IN STEEL PRODUCTION AS A BASE FOR TYPE III ENVIRONMENTAL DECLARATION

Abstract: Application of Life Cycle Assessment (LCA) as quality improvement tool in steel production firm was studied as a base for Type III Environmental Declaration. Type III Environmental Declarations, in practice referred to as Environmental Product Declarations (EPD), are primarily intended for use in business-to-business communication. Initially, cradle to gate LCA study of austenitic stainless steel in form of hot rolled coil was performed, furthermore, for the purpose of EPD, product category rules (PCR) for comparability purpose of EPD were selected. Finally, cradle to gate Environmental Product Declaration was created covering raw material supply, transport to manufacturer and manufacturing. Primary energy demand presented renewable and non-renewable resources used for production. Environmental impacts were expressed in form of acidification potential, eutrophication potential, global warming potential and photochemical ozone creation potential. Material outputs were revealed in form of disposal and recovery. Recommendations for life cycle environmental impacts improvement were given in conclusions.

Key words: Environmental Product Declaration, Type III, LCA, Quality, Steel production

1. INTRODUCTION

Steel making industry is a type of heavy industry, which has, rightly or wrongly, attached a prejudice of carrying heavy burden for the environment. Climate change and the sustainable use of natural resources are among the main challenges for society today, Fig. 1 [1,2].

With a mind-set like that, products of steel making industry are easily deemed environmentally unfriendly. That could lead decision makers into selecting alternative materials for projects, instead of steel [3,4,5].

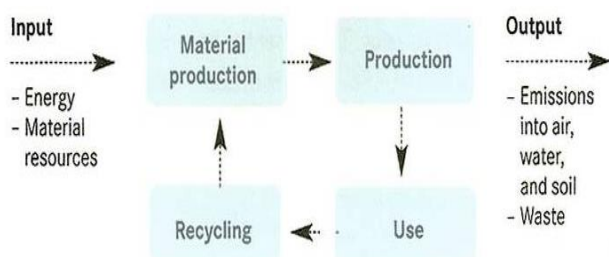


Fig. 1. Life Cycle Assessment (LDA) [3]

Study has been done on theme, how to transparently present steel product's actual environmental impact, Fig. 2. Additionally, recommendations were given on how to improve process in order to improve environmental footprint. Type III Environmental Declaration, based on Life Cycle Assessment, has been used

for that purpose. To maintain clarity and transparency, declaration has been prepared in a form of Environmental Product Declaration.

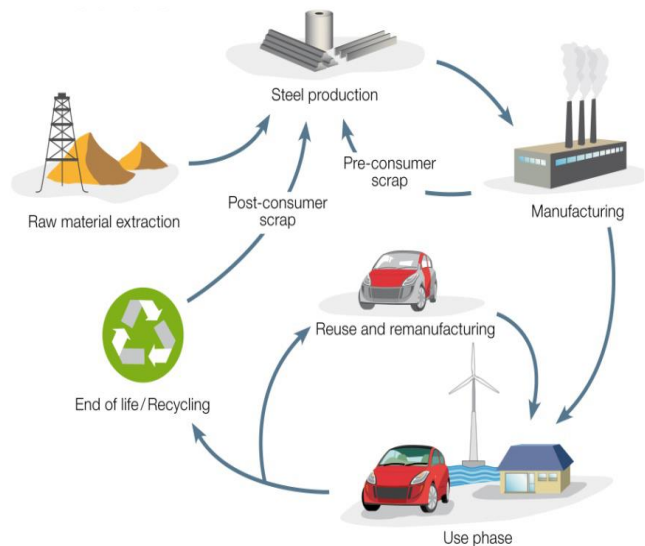


Fig. 2. The life cycle of steel [6]

EPDs solve the problems associated with manufacturers of products publishing undifferentiated, selective, unverified, misleading, un-comparable and often-incomprehensible environmental data derived through non-standardised methodologies. The important foundation that an EPD is built upon is the Life Cycle Assessment. LCA compiles and evaluates, according to standard ISO 14040, the inputs, outputs and the potential environmental impacts of

a product system throughout its life cycle. Information generated from the process will be relevant, verified and comparable, Fig. 3 [4].

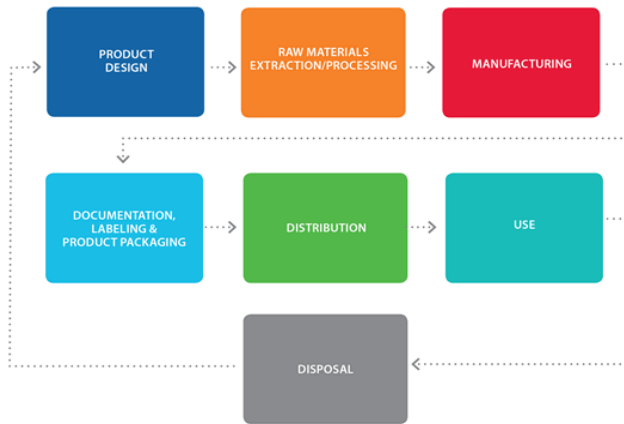


Fig. 3. Product life cycle [3]

2. METHODOLOGICAL FRAMEWORK

Global warming, climate change and tendency for sustainable development have all grown into main challenges of modern industry. On the other hand, customers (final consumers or in business-to-business commerce) became more and more aware of their impact on environment, by having a choice in selection of products. Eventually that

lead into a situation, where companies have urgency to show their products as transparent as possible, for customers to have clear picture and the most information of the product. By doing so, from business-to-business or final consumer point of view, explained impact on environment has been shown.

LCA with its comprehensive approach to assess the environmental impact from cradle to gate, has been used to support characterisation of a product from environmental point of view [5]. Cradle to gate LCA study of austenitic stainless steel (EN 1.4301, AISI 304) in form of hot rolled coil was performed. Fig. 4 shows cradle to gate LCA system used for product's environmental performance during manufacturing [6].

Based on LCA study, Type III Environmental Declaration under ISO 14025 was used as a tool which is able to comprehensively present product's environmental impact. A form of Type III Environmental Declaration is cradle to gate Environmental Product Declaration, which is a label that discloses the life cycle environmental performance of product using pre-determined parameters [7].

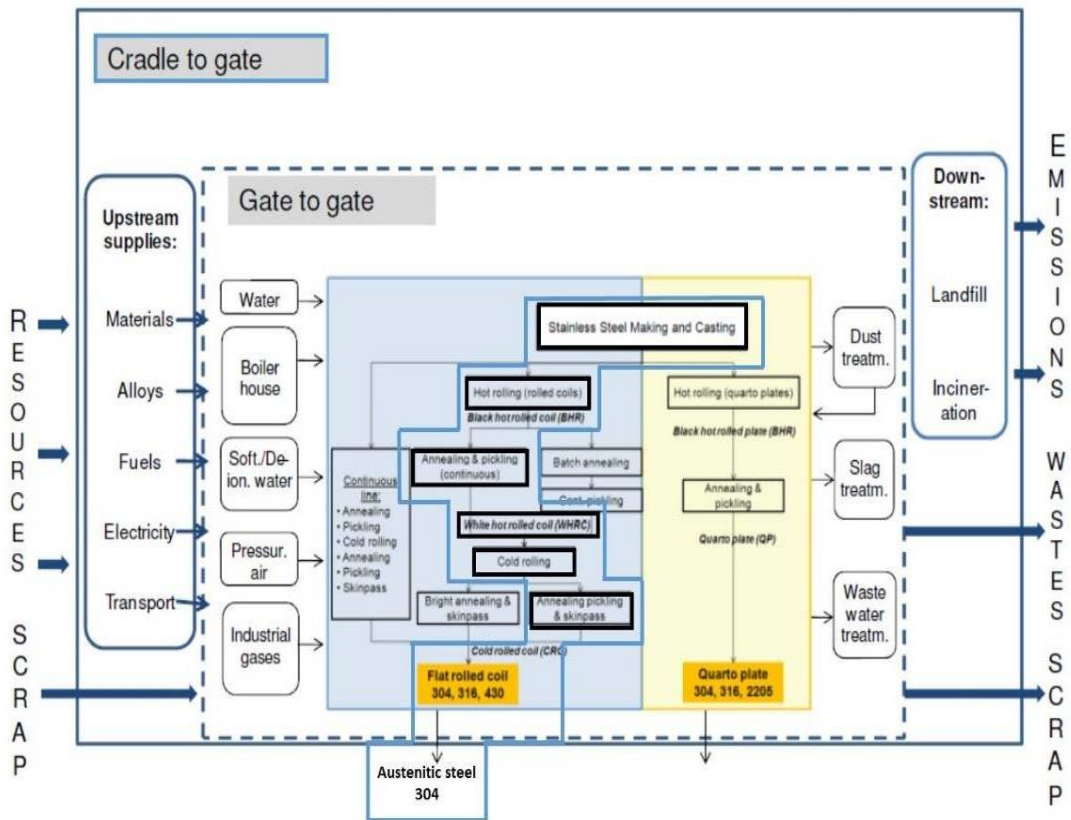


Fig. 4. Cradle to gate LCA system [6]

For the purpose of EPD, product category rules for were selected. That improves potential comparability between two or more products. Flow chart showing process steps of obtaining EPD is presented in Fig. 5.

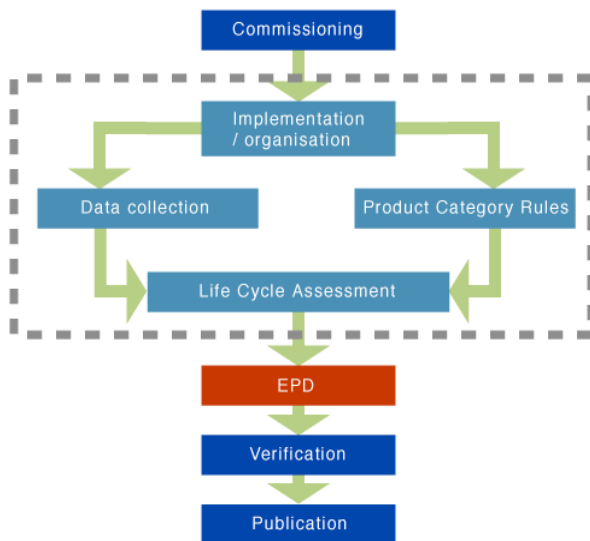


Fig. 5. EPD obtaining process [4]

Cradle to gate Environmental Product Declaration was created covering raw material supply, transport to manufacturer and manufacturing. Primary energy demand presented renewable and non-renewable resources used for production. Environmental impacts were expressed in a form of acidification potential, eutrophication potential, global warming potential and photochemical ozone creation potential.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Environmental Product Declaration contains complete information about the product. It could be understood as product's curriculum vitae in layman's terms. Summary of all data required for customer. Results contained in EPD will be presented in this section.

EPD is initially presented with general information about the owner of declaration, programme holder–publisher, declared product, unit, product category rules and scope. What follows is detailed information about the actual product. Further sections give details about LCA, calculation rules, scenarios and additional technical information, results and interpretation. EPD concludes with requisite evidence and references sections.

Environmental impact categories are broken down by ratio of effect of each life cycle inventory sector in Fig. 6. Results are presented in a 100 % stacked column graph, showing relative contribution of input materials, energy, gate to

gate, steel scrap and transport on each of the life cycle impact assessment categories.

Graph in Fig. 6 shows relative contribution of main input parameters from cradle to gate. Main contributor through all impact categories and primary energy demand is upstream material production, ranging from 69.0 to 94.2 %.

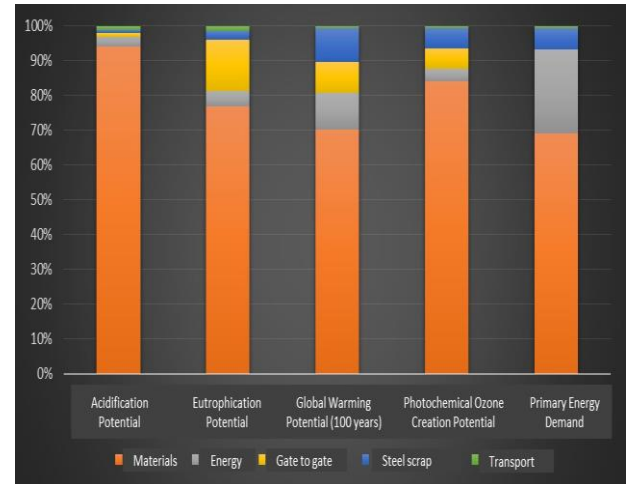


Fig. 6. Life cycle impact category and primary energy demand graph

Only the Primary Energy Demand has an additional relevant contribution of 24.4 %, related to the upstream energy production.

Fig. 7 is showing further breakdown of environmental impacts of upstream materials production. Same as above, Figure 4 represents relative effects on environmental impact. Only this time, materials are broken down into each alloy. The most exposing factor through all impact categories is nickel and iron based alloy. In average it accounts for 50.6 % of total environmental impact. Second place is taken by iron and chromium based alloy. In average it accounts for 42.5 % of total environmental impact.

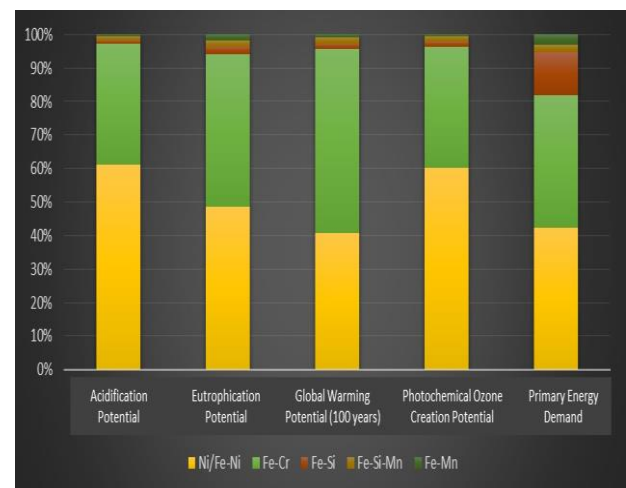


Fig. 7. Upstream materials environmental impact

4. CONCLUSIONS

Document Environmental Product Declaration has been done for two reasons. Initial one was to present product to customer. It helps customer having detailed picture of the product. It also provides governing bodies and managers with additional edge at decision making due to improved capability of comparability, if right conditions are met.

Secondly, results of Life cycle assessment, included in EPD revealed flows, which potentially have high environmental impact. Such flows are upstream material inputs, with main two being nickel and chromium based iron alloys. If by having clearer image due to LCA and EPD structure, mentioned flows could be challenged, potential environmental impact of product could be substantially decreased to lower level.

5. ACKNOWLEDGEMENT

This paper was made possible by support of SIJ Acroni d.o.o., Jesenice, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana, and Faculty of Natural Sciences and Engineering, University of Ljubljana.

6. REFERENCES

- [1] World Steel Association: *"Life cycle assessment in the steel industry"*, World Steel Association, Brussels, 2010.
- [2] H.F. Lund, The McGraw: *Hill Recycling Handbook*, McGraw, Hill, New York, 2001.
- [3] Daimler Sustainability Report 2013, Muenchen, 2014.
- [4] GreenSpec: *Environmental Product Declarations (EPDs): Type III labels to ISO 14025*", 15 10 2017. [Elektronic]. Available: <http://www.greenspec.co.uk/epds-type-iii-labels-to-iso-14025/>.
- [5] ISO 14040: *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*, ISO, Geneva, 2006.
- [6] D. N. H. F. Julia Pflieger: *"Life Cycle Inventory Study on Stainless Steel Production in the EU"*, PE INTERNATIONAL GmbH, Leinfelden – Echterdingen, 2011.
- [7] ISO 14025: *Environmental labels and declarations - Type III environmental declarations - Principles and procedures*, ISO, Geneva, 2006.

Authors: Matic Iskra, BSc, Honda of the UK Manufacturing, Highworth Road, Swindon SN3 4TZ, United Kingdom, Phone: +44 1793 831183, Fax: +44 1793 831177.

Assoc. Prof. Dr. Igor Budak, Assist. Prof. Dr. Boris Agarski, University of Novi Sad, Faculty Technical Sciences, Trg D. Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Phone: +381 21 4852255, Fax: +381 21 4852313.

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. Borut Kosec, University of Ljubljana, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenia, Phone: +386 1 2000413, Fax: +386 1 4704560.

E-mail: iskra11@gmail.com
budaki@uns.ac.rs
agarski@uns.ac.rs
mirko.sokovic@fs.uni-lj.si
borut.kosec@omm.ntf.uni-lj.si

Kecić, V., Prica, M., Kerkez, Đ., Bečelić-Tomin, M., Tomašević Pilipović, D., Leovac Maćerak, A., Pavlović, Ž., Rapajić, S.

TRETMAN VODENOG RASTVORA CIJAN FLEKSO GRAFIČKE BOJE PRIMENOM NANO NULA VALENTNOG GVOŽĐA

Rezime: *Otpadne vode generisane nakon procesa flekso štampe, obogaćene brojnim organskim i neorganskim zagađujućim materijama, sa tendencijom dospevanja u podzemne i površinske vode, predstavljaju toksične i kancerogene kontaminante životne sredine. Zbog toga je sve veća pažnja usmerena ka uklanjanju zagađujućih materija iz otpadnih voda neposredno pre njihovog odlaganja ili izlivanja u efluent. Cilj rada se zasniva na ispitivanju procesa uklanjanja grafičke cijan flekso boje iz vodenog rastvora, primenom nano nula valentnog gvožđa sintetisanog iz ekstrakta lišća hrasta. Efikasnost obezbojavanja vodenog rastvora grafičke boje je praćena usled promene uticaja parametara: doze nanomaterijala, početne koncentracije boje, pH vrednosti i reakcionog vremena.*

Ključne reči: *cijan flekso boja, nano nula valentno gvožđe, adsorpcija, obezbojavanje, grafička industrija*

1. UVOD

Ubrzan tehnološki razvoj grafičke industrije doprinosi generisanju značajne količine potencijalno kontaminiranih otpadnih grafičkih proizvoda. Usled nedostatka adekvatnog tretmana, efluent generisan nakon procesa štampe kontaminiran je brojnim neorganskim i organskim polutantima i često se direktno ispušta u recipijent, bez prethodnog tretmana [1].

Adsorpcija je dobro poznata i efikasna metoda koja se komercijalno primenjuje za prečišćavanje otpadnih voda, te zauzima istaknuto mesto među tretmanima za smanjenje koncentracije neorganskih i organskih polutanata u industrijskim efluenatima. Jeftini i efikasni adsorbenti mogu da se dobiju iz mnogih prirodnih materijala, ali i otpadnih materijala i proizvoda iz industrijskih i poljoprivrednih aktivnosti [2].

U novije vreme sve se više primenjuju tretmani prečišćavanja efluenata primenom čestica nano nula valentnog gvožđa (nZVI), koje se pokazalo kao izuzetno efikasno u degradaciji velikog broja polutanata vode, poput halogenovanih ugljovodonika, nitroaromatičnih jedinjenja, azo i ftalocijanskih boja, perhlorata, nitrata i jona teških metala [3,4]. Različite mikroskopske i spektroskopske studije su pokazale da se nZVI čestice u vodenim rastvorima sastoje od jezgra koje sadrži Fe⁰ i površinskog sloja od Fe-oksida Fe(OOH), i kreću se u prečniku od 10 do 100 nanometara. Time su čestice nZVI reaktivnije u odnosu na jednostavni pasivni oksidni sloj formiran na zrnastim ZVI materijalima, čime je omogućeno odvijanje brojnih reakcionih

mehanizmima, poput redukcije, sorpcije, površinske mineralizacije i precipitacije [5].

U poslednjih nekoliko godina razvijeni su ekološki pogodniji načini produkcije nZVI, poput sinteze nZVI iz prirodnih proizvoda. Ovakvi pristupi zasnivaju se na primeni lišća biljaka ili kore citrusa koji imaju visok sadržaj polifenolnih komponenti i veliki prirodni antioksidativni kapacitet. Komponente prisutne u ovakvim ekstraktima reaguju sa jonima Fe(III) u rastvoru, formirajući nZVI čestice. Pored lišća drveta hrasta koje je korišćeno u ovom radu, kao ekstrakti za sintezu nZVI mogu se koristiti i aloe vera, zeleni čaj, cimet, limun, narandža, korijander, nana, pomelo, itd [6].

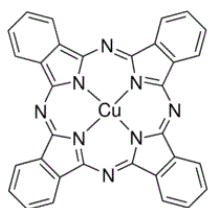
Cilj rada se zasniva na ispitivanju efikasnosti obezbojavanja vodenog rastvora grafičke cijan (cyan) flekso boje primenom sintetisanog nZVI iz ekstrakta lišća hrasta. Ispitivanje uticaja procesnih parametara: koncentracije boje, doze nanomaterijala, pH vrednosti i reakcionog vremena na efikasnost uklanjanja cijan flekso boje iz vodenog rastvora, vršeno je primenom RSM (*response surface methodology* - metodologija odzivne površine) i CCD (*Central Composite Design* - centralno kompozitni dizajn) analize, koja je omogućila određivanje optimalnih procesnih parametara za postizanje maksimalne efikasnosti obezbojavanja vodenog rastvora grafičke boje.

2. EKSPERIMENTALNI DEO

2.1 Korišćeni materijali i hemikalije

Uzorak otpadne vode generisane nakon

štampanja cijan bojom uzet je iz flekso štamparije u Novom Sadu. Odabrana štamparija ispušta otpadne vode u recipijent bez prethodnog tretmana, zagađujući na taj način životnu sredinu u manjoj ili većoj meri. Analize ispitivanih uzoraka su vršene direktno, bez prethodnog tretmana, a korišćene hemikalije su bile čistoće *pro analysi*. Odabrana flekso grafička boja (C.I.: PB15:3, hemijska formula: $C_{32}H_{16}CuN_8$, molarna masa: 576,07 g mol/L, λ_{max} : 636 nm) spada u grupu ftalocijanskih boja i proizvedena je od strane Flint grupe. Strukturna formula cijan boje je prikazana na slici 1.



Sl. 1. Strukturna formula cijan boje

Određivanje koncentracije boje u uzorku otpadne vode vršeno je metodom kalibracione krive, pri čemu je ustanovljena koncentracija boje od 9,76 g/l. Utvrđivanje koncentracije boje u uzorku otpadne vode je neophodno kako bi se postavio plan ispitivanja u pogledu pravljenja model sistema vodenih rastvora sa različitim koncentracijama boja.

2.2 Sinteza nanomaterijala

Sinteza nanomaterijala je sprovedena korišćenjem lišća hrasta koji raste u Nacionalnom

parku Fruška gora. Sakupljeno lišće je samleveno u kuhinjskom bledneru i prosejano kroz sito dimenzija pora 2 mm. Dobijeni materijal veličine manje od 2 mm je sušen tokom 48 sati u sušnici na temperaturi od 50 °C. Ovako pripremljeno lišće je korišćeno dalje za ekstrakciju nZVI, pri čemu je 37 g osušenog lišća hrasta pomešano sa 1000 ml dejonizovane vode, a reakciona smeša mešana 20 min na magnetnoj mešalici na 80 °C. Nakon isteka reakcionog vremena, ohlađena smeša je filtrirana kroz *Büchnerov* vakuum levak, a filtrat je korišćen za produkciju „zelenog” nZVI. Ohlađen filtrat je pomešan sa 0,1M rastvorom Fe(III) u razmeri 3:1, pri čemu je na taj način postignuta koncentracija gvožđa od 1,395 g/l u nanomaterijalu [7].

2.3 Dizajn eksperimenta

Doza nanomaterijala (X_1), početna koncentracija boje (X_2), pH vrednost rastvora (X_3) i vreme mešanja (X_4) su definisane kao četiri nezavisne promenljive, pri čemu je ispitivan njihov uticaj na zavisnu promenljivu - efikasnost obezbojavanja. Za generisanje četiri faktora pomoću centralno kompozitnog dizajna korišćen je softver Wolfram Mathematica 8. Ukupan broj potrebnih eksperimenata je 29, a izračunat na osnovu jednačine (1):

$$N = 2^k + 2k + C_p \quad (1)$$

gde je: N - broj eksperimenata, k - broj promenljivih, C_p - broj centralnih tačaka.

Plan eksperimenata za ispitivanje efikasnosti obezbojavanja rastvora cijan boje dat je u tabeli 1.

Tabela 1. Plan eksperimenata za ispitivanje efikasnosti obezbojavanja rastvora cijan boje u zavisnosti od različitih eksperimentalnih uslova pomoću central composite design-a

Promenljiva	Jedinica	Kodirana vrednost	Nivo				
			-2	-1	0	1	2
doza nanomaterijala	mg/l	X_2	5	15	25	35	45
koncentracija boje	g/l	X_3	2	5	8	11	14
pH	-	X_1	2	4	6	8	10
reakciono vreme	min	X_4	20	40	60	80	100

2.4 Efikasnost obezbojavanja

Ispitivanje efikasnosti obezbojavanja vodenog rastvora grafičke boje vršeno je serijom eksperimenata na aparaturi za JAR test (*FC6S Velp scientific, Italija*). Eksperimenti su sprovedeni mešanjem vodenog rastvora grafičke boje u koncentraciji 2 - 14 g/l sa zapreminom 0,25 l u koje je dodata određena doza nanomaterijala. Nakon podešavanja pH vrednosti, dodatkom 0,1 M rastvora ccH_2SO_4 ili NaOH, uzorci su mešani u različitim vremenskom periodu od 20 do 100 minuta, pri brzini mešanja

od 120 o/min i konstantnoj temperaturi od 23 °C. Nakon isteka reakcionog vremena, merena je apsorbancija (A) na talasnoj dužini za cijan boju ($\lambda_{max} = 636$ nm). Sva spektrofotometrijska merenja, uključujući određivanje apsorpcionih maksimuma za ispitivanu boju kao i praćenje promene apsorbancije tokom eksperimenata, vršena su primenom UV-VIS spektrofotometra *UV-1800 PG Instruments Ltd T80+ UV/VIS, model: UV 1800 (Shimadzu, Japan)*. Merenje pH vredosti izvršeno je pomoću pH-metra *inoLab pH/ION 735 (WTW GmbH,*

Germany).

Efikasnost obezbojavanja izračunata je prema jednačini (2):

$$E (\%) = A_0 - A / A_0 * 100 \quad (2)$$

gde je: A_0 – početna apsorbancija obojenog efluenta; A – apsorbancija rastvora obojenog efluenta nakon primenjenog tretmana.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Tabela 2. Rezultati ANOVA testa

	SS	Suma kvadrata	Varijansa	F vrednost	P vrednost
Model	14	15036,12	1074,01	2,73	0,035
Greška	14	5500,61	932,901		
Suma	28	20536,70			

U okviru ANOVA testa srednje vrednosti kvadrata izračunate su deljenjem sume kvadrata svake varijacije po stepenima slobode, a nivo pouzdanosti od 95% je korišćen za određivanje statističke značajnosti u svim analizama. Rezultati su analizirani na osnovu dobijenih deskriptivnih faktora: koeficijenta determinacije (R^2), P-vrednosti i F-vrednosti. Velika F vrednost ukazuje na to da se najveće varijacija u efikasnosti obezbojavanja mogu objasniti regresionim jednačinama. P-vrednost se koristi za procenu da li je F vrednost dovoljno velika da ukaže na statistički značaj, a niža od 0,05 ukazuje na statističku značajnost modela.

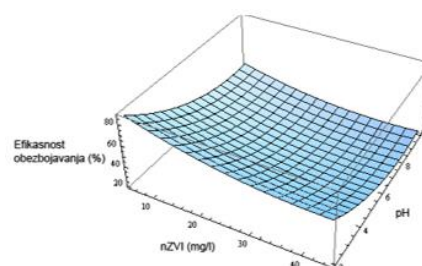
Koeficijent determinacije za sorpcioni proces iznosi 0,73, pri čemu je 73% varijanse za efikasnost uklanjanja cijan boje objašnjeno nezavisnom varijablom, a ostatak od 27% ukupne varijanse nije pokriven modelom.

Optimizacija procesnih uslova je rađena pod ograničenjima ispitivanih promenljivih: $5 \leq x_1 \leq 45$; $2 \leq x_2 \leq 14$, $2 \leq x_3 \leq 10$, $20 \leq x_4 \leq 100$. Dobijeni rezultati ukazuju da se maksimalna funkcija obezbojavanja postiže pri sledećim uslovima: doza nanomaterijala = 45 mg/l, koncentracija boje = 14 g/l, pH = 2, reakciono vreme = 100 min. Pod ovim uslovima efikasnost obezbojavanja realnog efluenta generisanog nakon procesa štampe je iznosila 38%.

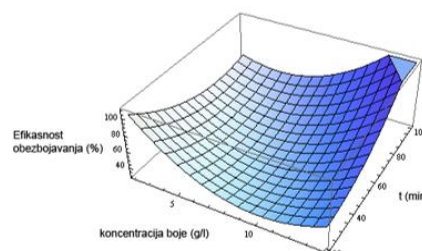
Softver Wolfram Mathematica 8 je korišćen za konstrukciju trodimenzionalnih (3D) regresionih površina, kako bi se ustanovio međusobni uticaj ispitivanih parametara, ali i uticaj ispitivanih faktora na efikasnost obezbojavanja vodenog rastvora cijan grafičke boje. Na slikama 2 i 3 je prikazana funkcija odgovora dva faktora, dok su preostala dva faktora fiksirana, a odabrane regresione površine predstavljaju centralne tačke u eksperimentu.

Izmerene vrednosti postignutih efikasnosti obezbojavanja vodenog rastvora cijan boje su bile u opsegu od 2,26 do 96,35%.

U tabeli 2 su prikazani rezultati analize varijanse (ANOVA), sa ciljem da se ispita statistička značajnost i adekvatnost primenjenog modela.



Sl. 2. Regresiona 3D površina efikasnosti obezbojavanja u funkciji doze nanomaterijala i pH vrednosti



Sl. 3. Regresiona 3D površina efikasnosti obezbojavanja u funkciji koncentracije boje i vremena

Inicijalna koncentracija boje ostvaruje značajan uticaj na efikasnost obezbojavanja. Ustanovljeno je da sa povećanjem koncentracije boje opada efikasnost obezbojavanja, što dalje ukazuje na činjenicu da je reduktivna degradacija slaba usled male doze nZVI primenjene za uklanjanje velikih koncentracija boje. Pored toga, pri nižim koncentracijama boje ostvaruje se bliska veza između nanomaterijala i molekula boje. Pored reakcionog vremena, koje je ostvarilo najveći uticaj na proces obezbojavanja vodenog rastvora cijan boje, pH vrednost predstavlja značajan parametar u sprovedenom eksperimentu. Značajnost uticaja pH vrednosti se objašnjava samim razelektrisanjem molekula boje, koje se najviše ogleda pri niskim pH vrednostima 2 i 4. Time je potvrđena činjenica da se molekuli boje

ne sorbuju na površini nanomaterijala, već se pod uticajem promene pH vrednosti razelektrišu i izdvajaju u vidu taloga. Na taj način se boja prevodi iz tečnog u čvrst oblik, dajući određenu količinu mulja. Izdvojenii mulj zahteva dalji tretman nakon odvajanja od bezbojnog rastvora.

Grafičke flekso boje imaju veoma negativno naelektrisanje u suspenziji i flotiraju u baznoj sredini. Pojava povećanja efikasnosti obezbojavanja može se objasniti aglomeracijom sitnih čestica na niskim pH vrednostima. Pri većim koncentracijama boje potrebna je i veća doza nZVI, samim tim je potrebno i duže vreme vezivanja molekula boje za površinu nZVI, a na osnovu toga se može zaključiti da je od ispitivanih faktora nZVI ostvario najmanji uticaj na uklanjanje boje iz vodenog rastvora.

4. ZAKLJUČAK

U radu je vršeno ispitivanje efikasnosti obezbojavanja vodenog rastvora grafičke flekso cijan boje primenom sintetisanog nZVI iz ekstrakta lišća hrasta. Ispitivanje uticaja procesnih parametara: koncentracija boje, doze nanomaterijala, pH vrednosti i reakcionog vremena na efikasnost uklanjanja cijan flekso boje iz vodenog rastvora, vršeno je primenom RSM i CCD analize, koji su omogućili određivanje optimalnih procesnih parametara za postizanje maksimalne efikasnosti obezbojavanja vodenog rastvora grafičke boje. Efikasnost obezbojavanja vodenog rastvora je varirala u opsegu od 2,26 do 96,35%. Na osnovu rezultata statističke obrade podaka zaključuje se da niža pH vrednost i niža koncentracija boje uslovljavaju veću efikasnost obezbojavanja.. Iako brojna istraživanja pokazuju da je nano nula valentno gvožđe sintetisano iz ekstrakta lišća hrasta efikasan katalizator i ekološki pogodan materijal, te da je primenjena RSM metodologija efikasna u optimizaciji celokupnog sorpcionog procesa, dobijeni rezultati pri optimalnim uslovima ukazuju da je efikasnost obezbojavanja efluenta cijan boje iznosila 38% što ukazuje na činjenicu da se organska komponenta boje nije u potpunosti razgradila primenom datog procesa, te je neophodno primeniti dodatni tretman ili izvršiti dodatnu optimizaciju.

5. REFERENCE

- [1] Kiurski, J., Marić, B., Aksentijević, S., Oros, I., Kecić, V.: *Occupational hazards in printing industry*, International Journal of Environmental Science and Technology, 13, p.p. 955-972, 2016.
- [2] Markandeya, A., Dhiman, N., Shukla, S.P.,

Kisku, G.C.: *Statistical optimization of process parameters for removal of dyes from wastewater on chitosan cenospheres nanocomposite using response surface methodology*, Journal of Cleaner Production, 149, p.p. 597-606, 2017.

- [3] Cong, X., Xue, N., Wang, S., Li, K., Li, F.: *Reductive dechlorination of organochlorine pesticides in soils from abandoned manufacturing facility by zero-valent iron*. Science of the Total Environment 408, 3418–3423, 2010.
- [4] Li, S., Wang, W., Liang, F., Zhang, W.: *Heavy metal removal using nanoscale zero-valent iron (nZVI): Theory and application*, Journal of Hazardous Materials, 322A, 163-171, 2017.
- [5] Yan, W., Herzing, A.A., Kiely, C.J., Zhang, W-X.: *Nanoscale zero-valent iron (nZVI): Aspects of the core-shell structure and reactions with inorganic species in water*, Journal of Contaminant Hydrology, 118 96-104, 2010.
- [6] Irvani, S.: *Green synthesis of metal nanoparticles using plants*, Green Chemistry, 13, 2638-2641, 2011.
- [7] Machado, S., Pinto, S.I., Grosso, J.P., Nouws, H.P.A., Albergaria, J.T., Delerue-Matos, C.: *Green production of zero-valent iron nanoparticles using tree leaf extracts*, Science of the Total Environment, 1-8, 445-446, 2013.

Zahvalnica

Istraživanja predstavljena u radu su realizovana u okviru projekta TR34014 i III43005, finansiranih od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Autori: Msc Vesna Kecić, Vanr. prof. dr Miljana Prica, Vanr. prof. Živko Pavlović, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet Tehničkih Nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Tel: +381 21 485 2350. **Doc. dr Đurđa Kekrez, Vanr. prof. dr Milena Bečelć-Tomin, Doc. dr Dragana Tomašević Pilipović, dr Anita Leovac Maćerak, Vanr. prof. Sanja Rapajić**, Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 3, 21000, Novi Sad.

E-mail: kecic@uns.ac.rs
miljana@uns.ac.rs
djurdja.kerkez@dh.uns.ac.rs
milena.becelic-tomin@dh.uns.ac.rs
dragana.tomasevic@dh.uns.ac.rs
anita.leovac@dh.uns.ac.rs
zivkopvl@uns.ac.rs
sanja@dmi.uns.ac.rs

**SCIENTIFIC CONFERENCE WITH INTERNATIONAL
PARTICIPATION
ETIKUM 2017
NOVI SAD, SERBIA, DECEMBER 6-8, 2017**

Kustudić, M., Šunjević, M.

INCREASING THE EFFICIENCY OF PICO SOLAR SYSTEMS WITH SOLAR TRACKING SYSTEMS IN LIBERIA

***Abstract:** Due to the socio-economic situation in Liberia, it is difficult to provide a stable electrical supply to both urban and rural parts of the country. There is a high need for renewable energy generation since the main source of electrification are highly polluting diesel generators widely used, beginning with the national electrical company. This work intends to show how Pico solar systems can be employed, together with solar trackers, to increase energy output for institutions which need electricity the most, such as clinics and schools.*

***Key words:** solar panels, renewable energy, tracking systems, Pico system*

1. INTRODUCTION

Liberia was founded by the freed slaves from the United States and the Caribbean and it also stands as the oldest republic in Africa. The country and its governing system are entirely based off the United States model of liberty and freedom for everyone. [1] Due to strong ties with the US and Europe the country was fairly developed in the past. Unfortunately, the country is currently considered as one of the poorest in the world. The following thesis discusses various positive and negative sides of having a foreign owned and driven business in the country. Taken into consideration are the needs of the people and it is discussed how to suit them. The main stakeholders for partnering and sales are analysed due to specific and different ways of interacting with them, as it is routinely done in Europe or the USA.

2. ENERGY SITUATION IN LIBERIA

In mid-2012, Liberia still has possibly the lowest rate of access to public electricity in the world—at 0.7% nationwide and 2.4% in the capital city (the only area reached by grid power).[2] This situation is directly attributable to the 14-year civil war, which left the country’s infrastructure in ruins and its human capacity severely diminished. Since 2006, donor support and more recently investments planned by the Government of Liberia have resulted in restoration of the country’s utility, the Liberia Electricity Corporation (LEC), and a small grid system covering parts of Monrovia. The LEC grid currently supports nearly 10,000 customers covering institutional, commercial, industrial, and residential categories. The installed grid capacity of 22

megawatts (MW) is based on high-speed diesel generation, but rehabilitation of the Mt. Coffee hydropower plant is also a big addition to the potential. [3] The plant can produce up to 88 MW and it has been operational since December of 2016. Overall statistics regarding electrification are shown in the next table [4]:

Table 1. Statistics of electrification according to different fields

Electrification in Liberia	Population w/o electricity (mil)	National electrification rate	Urban electrification rate	Rural electrification rate
	4	10%	8	11%

Since the products are eagerly awaited in the country and there is potential for partnerships as a way of expanding distribution. All of the participants in these ways of distribution will be able to succeed in the goals they have, being that profit or help to the communities. These institutions are: corporations, government institutions, business associations, mobile network providers, micro finance institutions and commercial banks, NGOs.

2. 1. Major users of electricity

There is a difference in households regarding their electricity potential mainly due of their financial status, proximity to the main grid line or in other terms, how rural are they. Only a limited number of households have access to electricity, mainly in Monrovia. Households in rural areas mainly use alternatives to the Liberian Electricity Company (LEC). Possibilities are LED torches or Chinese lights, small generators, palm oil, candles, kerosene powered lamps and of course Pico solar systems and mini grids when possible and available.

[5] The LEC is usually not reliable, there are power shortages and the quality of electricity is not good. Even the people in central Monrovia need to secure themselves regarding electricity and light so it is not uncommon to have some back up products ready for use when the electricity goes out. This is also differentiated according the financial status. Rich people living in wealthy compounds can afford a big generator which can run for hours. This generator of course uses a lot of diesel which costs a lot and pollutes the environment heavily. The main problem regarding the combination of LEC and the generators is the time it is needed to start the generator – there is a time gap, and most common way of turning on the generator is by hand. This delay between the power running out and the generator turning on, threatens computers and other items which need constant power supply, and also constant voltage quality.

3. ANGLE CONSIDERATIONS

The amount of solar energy incident on a solar collector in various time scales is a complex function of many factors including the local radiation climatology, the orientation and tilt of the exposed collector surface and the ground reflection properties. The performance of a solar collector is highly influenced by its orientation and its angle of tilt with the horizon.[6] This is due to the fact that both the orientation and tilt angle change the solar radiation reaching the surface of the collector. Reaching the maximum possible solar power generation is done by varying the tilt angle and slope using solar trackers.

The best way to collect maximum daily energy is to use tracking systems. A tracker is a mechanical device that follows the direction of the sun on its daily sweep across the sky. The most effective tracking could be achieved by mounting the collector on a two-axis tracker that continuously tracks the Sun by the hour and through the seasons. [7] Due to the complexity and needs of sturdiness, these solar trackers are extremely expensive and are not commonly used. The solar tracker we are considering is built out of common materials found in a classic metalworker's shop – metal bars which are welded together to form the constriction. To be able to gather as much sunrays as possible it is necessary to follow the sun on the previously mentioned 2-way axis. The first axis is dependent on the monthly angle the sun has while it travels across the sky. In Monrovia the sun path is 46°88' wide, can be seen on the figure 2.

Looking at the monthly amount of solar radiation, we see that there is a significant difference

in radiation. This is primarily due to the fact that the different months of the year are more or less cloudy

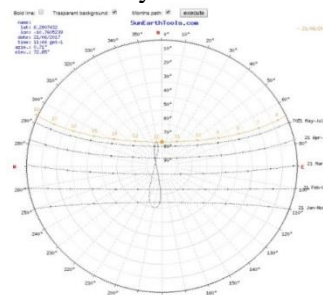


Fig. 2. Annual sun path in Monrovia

and precipitation is much higher than in dry months, during winter, this phenomenon we can see also see on the Figures 3. and 4. It is precisely for this reason that it is justified to increase efficiency in lesser months. This way, we have a settlement of efficiency in order to be able to conduct activities in schools and clinics throughout the year.

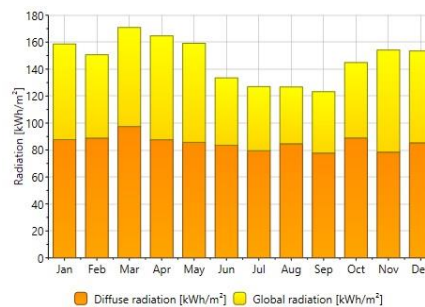


Fig. 3. Monthly amounts of radiation

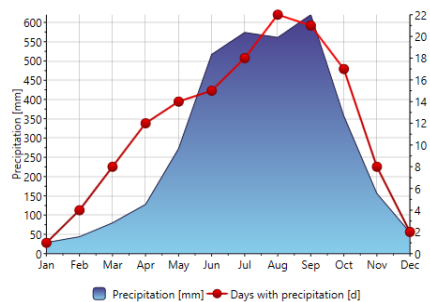


Fig. 4. Monthly amounts of precipitation

4. PARTS OF THE SYSTEM

The main goal of this research is to analyze the possibilities of creating a solar tracker system combined with standard Pico systems, which will improve energy yield in rural areas and increase overall life quality. Using the combined system following improvements are expected[8]:

Lifestyle

- Children study time prolonged
- Safety light
- Entertainment and information possibility (radio and TV)
- Healthier

- No toxic fumes
- Better light quality
- Safer - no fire danger

Technical

- Clean energy and protection of the environment
- High quality elements and highly durable products (LED, battery)
- Reliable energy supply
- Easy to use, Plug & Play
- Maintenance free
- Programmable – various light modes
- Intelligent battery management:
 - Energy conserving mode
 - USB current balance system
- Modular system elements
- Flexible in mounting and using the system

Business aspect

- Saves money
- Money stays in the community
- PAYG system – dividing the payments how it suits the customer
- Great potential for earning money

The proposed combined collector part of the system could be positioned on a roof of a school, clinic or some similar institution which needs electricity. The ease of manufacturing of the tracker system is that it can be created according to the needs of the user. Depending on how big is the tracker system and how many solar panels are installed, that many Pico solar systems could be employed. The storage system is positioned within the building or the room and is connected to the collectors via suitable cables. The users of the electricity are positioned where needed and are connected to the storage systems. Following are the different parts of the system itself:

- Collector System
 - Solar Tracker
 - Solar Panels
- Storage Systems
 - Pico Systems
- Users
 - Lamps
 - Fans
 - Other Elements

Pico solar system is an autonomous system which contains a solar panel, batteries, PCBA module for power input/output control and communication with the user, input slots for power users (such as mobile phones, lights and other systems). Because it is running on 13V and has large battery capacity it can be used to run a TV, lamps, radio and a fan simultaneously. Battery capacities are 1.5 Ah, 3 Ah, 4.5 Ah, 7.5 Ah and 10.5 Ah. [9] The solar panel is crystalline silicone. With the standard 4 Fosera ports it comes also with 2 USB

ports, making it more versatile and a good base for a phone charging kiosk business.



Fig. 5. Pico solar system with additional components

One thing that could be done with systems which are 12V is connecting them to a laptop. This means that a scanner and printer could be also integrated, together with internet from a mobile phone. This is a great possibility for creating a mini office for doing daily tasks or learning, for students.

Next part of the combined system is the solar tracker. In essence, it functions as a solar tracker which tracks the sun, while it goes around its yearly path. The goal of it is to keep the angle of the sun's rays as close to optimum as possible.

On the graph losses are shown, in percentage, which the panel has due to misalignment – in regards to the optimal setting. For example, trackers that have accuracies of $\pm 5^\circ$ can deliver greater than 99.6% of the energy delivered by the direct beam plus 100% of the diffuse light.[10]

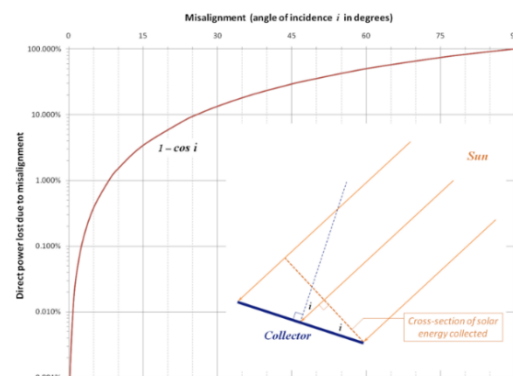


Fig. 6. Losses due to misalignment of the angle

That angle adjustment (yearly) is done by adjusting the tilt of the solar panels using a simple lockable mechanism. This will have several possible fixtures. As it has been said (Figure 6.) even with the 5 possible rotational positions the angle of the incoming sunray is around $\pm 5^\circ$ and can deliver greater than 99.6% of the energy. The formula for calculating the direct power lost (%) due to misalignment (angle i) is:

$$\text{Lost efficiency} = 1 - \cos(i)$$

2nd angle to consider is the daily angle. This angle is more difficult to adjust, since the sunpath changes significantly during a single day. The goal is to have the incoming sunray approach with the least possible

angle. For example $\pm 5^\circ$ will result with more than 95% of the energy.

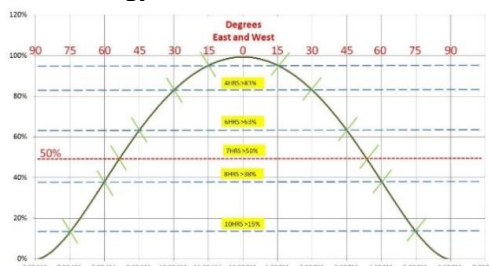


Fig. 7. Daily solar panel power output curve

Here we have several possibilities; all of them pose a different cost for the investor and complication for the maintenance crew – but of course, in return they give more energy. First possibility is to not include the adjustment system. This keeps the adjustments to a single axis tracker with fair yield.

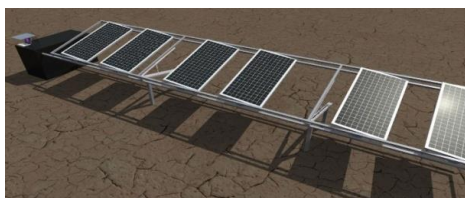


Fig. 8 Model of the solar tracking system

Second option is a manual one; this means that an operator must adjust the bars during the day to be within the $\pm 15^\circ$ where about 83% efficiency is possible. This is a labor intensiveness systems handling, which could be beneficial in the rainy season.



Fig. 9 Model of the solar tracking system

Third option is an automatic one; a sealed „black box“ should be constructed and placed by the tracker system. Within it there is a small motor which is connected to the daily adjustment bar with a chain and a sprocket. The motor is 12V and it can be powered by the batteries from the system, keeping it completely autonomous. The command to operate the motor/change the angle is given by the Raspberry Pi type computer, which is pre-programmed. On the next graph we see the combined sun path both daily and monthly. The solar tracking system allows the panel to follow the sun at any given stage.

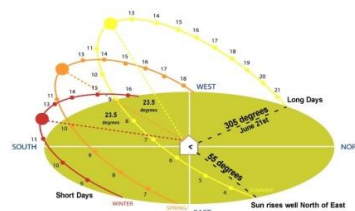


Fig.10. Solar panel angle consideration example

5. CONCLUSION

Even though it seems that a few percent of increase in energy production it actually represents a significant difference overall. The way of dealing with small numbers in Liberia is completely different, nothing can be wasted. During the rainy season there are times when the sun does not shine for days, due to heavy rain and clouds - exactly then there is a need for maximum possible output. Taking into consideration that the children need to learn and hospitals need to function this investment is justified and will be paid off in a short time span. Using this solar system, the amount of CO₂emissions is going to be significantly reduced impacting positively not only the local but also the global environment.

6. REFERENCES

- [1]. <https://history.state.gov/milestones/1830-1860/liberia>
- [2]. Mark Hankins, Federico Hinrichs, and Samuel P Jackson, *Renewable Off-Grid Power & Lighting Market Development in Liberia*, Prepared for the Rural and Renewable Energy Agency, Oct.2012
- [3]. U.S. Government Coordinator Africa, *Investment Brief for the Electricity Sector in Liberia*, 2016
- [4]. IEA, *World Energy Outlook*, Electricity access in Africa – 2014 (31.5.2017.)
- [5]. Rural and Renewable Energy Agency (RREA), *Renewable Off-Grid Power & Lighting Market Development in Liberia*, October 2012.
- [6]. Amita Chandrakar, Yogesh Tiwari, *Optimization of Solar Power by varying Tilt Angle/Slope*, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol. 3, Issue 4, April 2013
- [7]. Soulayman Soulayman, Alhelou Mohammad, Nouredine Salah, *Solar Receivers Optimum Tilt Angle at Southern Hemisphere Department of Electromechanical Systems*, Higher Institute for Applied Sciences and Technology, Syria 2016
- [8]. Mijat Kustudic, *Developing a Solar Business Company in Liberia*, Master thesis, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, 2017
- [9]. http://fosera.com/wpcontent/uploads/2017/05/Data-sheet_PL-LSHS_rev06.pdf
- [10]. <https://www.revolvly.com/main/index.php?s=Solar%20tracker> (31.10.2017.)

Authors: M.Sc. Mijat Kustudic, M.Sc. Miljan Sunjevic; University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Tel: +381 21 455 587, E-mail: mijat.k.ntc@gmail.com msunjevic@uns.ac.rs

**NAUČNA KONFERENCIJA SA MEĐUNARODNIM
UČEŠĆEM
ETIKUM 2017
NOVI SAD, SRBIJA, 6-8 DECEMBAR, 2017**

Adamović, S., Prica, M., Szilágyi, Á., Kašiković, N., Milošević, R., Banjanin, B.

FIZIČKO-MEHANIČKA I OPTIČKA KARAKTERIZACIJA TETRA PAK AMBALAŽE

Rezime: Cilj iztraživanja je ispitivanje fizičko-mehaničkih karakteristika tetra pak ambalaža za mleko. Takođe, ispitan je i uticaj ambijentalnih uslova (svetlosti i temperature) na kvalitet štampe plave i crvene boje tetra pak ambalaža tokom perioda izlaganja od 30 dana. Fizičko-mehaničke osobine tetra pak ambalaža omogućavaju uspešnu primenu i očuvanje integriteta upakovanog sadržaja mleka. Boje uzoraka tetra pak ambalaža postojane su na dejstvo svetlosti i temperature na +23°C i mraka u frižideru na +5°C. Postojanost plave boje uzoraka potvrđuju vrednosti $\Delta E_{sr} < 1$. Crvena boja je manje postojana od plave jer su posle 15. dana njene vrednosti $\Delta E_{sr} > 1$.

Ključne reči: tetra pak ambalaža, kvalitet štampe, fizičko-mehaničke i optičke karakteristike

1. UVOD

Mleko je, kao hranljiv supstrat, podložno mikrobiološkim i oksidativnim promenama, pa ga je neophodno zaštititi od mikroorganizama, svetlosti i kiseonika. Zato je odabir ambalažnog materijala i načina pakovanja veoma važan za očuvanje zdravstvene ispravnosti i vrednosti mleka [1].

Tokom istorije, mleko je pakovano u različite ambalažne materijale. Tako se staklene boce za mleko koriste od početka 20. veka, dok se od polovine 20. veka mleko pakuje u kartonske kutije, plastične boce i plastične kese [2]. Od 1950. godine za pakovanje mleka primenjuje se i tetra pak ambalaža. Sastav tetra pak ambalaže čine: 75% papir, 20% polietilen i 5% aluminijum ili 91% papir i 9% polietilen [3].

Redosled slojeva tetra pak ambalaže je: plastična folija – polietilen, grafika plus papir, plastična folija – polietilen, aluminijska folija i dva sloja plastične folije [2,4]. Postavlja se pitanje: „Zašto toliko raznovrsnih materijala?“. Odgovor leži u prednostima samih slojeva tetra pak ambalaže. Papir daje krutost i držanje, a polietilenski slojevi čuvaju supstrat od mikroorganizama. Aluminijska folija služi za zaštitu supstrata od vazduha, svetlosti i drugih spoljašnjih uticaja [2,3]. Svi ovi slojevi su potrebni da se proizvod ne pokvari, trajno skladišti i bezbedno transportuje [2].

Trendovi i potrebe savremenog društva u cilju estetike i veće potrošnje proizvoda, usloveli su štampu ambalažnih materijala. Sama grafička proizvodnja veliku pažnju poklanja grafičkom dizajnu ambalažnog proizvoda. Krajnji rezultat

štampe i grafičke dorade je što vernija reprodukcija pripremljenog grafičkog dizajna, ali i postojanost proizvoda na spoljašnje uticaje (svetlost, temperaturu, vlagu, atmosferalije, hemikalije, itd.). Kontrola konačnog kvaliteta štampe na ambalažnom materijalu vrši se numeričkim i komparativnim ispitivanjem optičkih svojstava koja moraju da budu postojana na navedene spoljašnje uticaje.

Cilj rada je ispitivanje fizičko-mehaničkih karakteristika i uticaja ambijentalnih uslova (svetlosti i temperature) tokom određenog perioda izlaganja na optičke karakteristike tetra pak ambalaža za mleko proizvođača iz Srbije i Mađarske.

2. EKSPERIMENTALNI DEO

2.1. Fizičko-mehanička karakterizacija tetra pak ambalaže

Za uzorke tetra pak ambalaže za mleko odabrana su dva proizvođača, „IMLEK“ iz Srbije (S1 i S2 uzorci) i „ALFÖLDI TEJ KFT“ iz Mađarske (M3 i M4 uzorci).

Pre merenja, uzorci tetra pak ambalaža za mleko su klimatizovani 24 sata u laboratoriji, u uslovima $50 \pm 2\%$ relativne vlažnosti i $23 \pm 1^\circ\text{C}$ temperature. Fizičko-mehanička svojstva tetra pak ambalaža za mleko ispitana su prema standardnim procedurama [3,5,6]:

1. gramatura prema ISO 536:2012,
2. debljina prema SRPS G.S2.73 i ISO 534:2011,
3. zapreminska masa prema SRPS G.S2.73,
4. zatezna čvrstoća i izduženje prema SRPSG.S2.734 i ISO 1924-1:0992.

Debljina uzoraka tetra pak ambalaža određena je ručnim mikrometrom (Feinmesszeu-gfabrik Suhl, Nemačka) preciznosti 0,01 mm. Gramatura uzoraka je određena merenjem masa epruveta uzoraka primenom tehničke vage PS 2100/C2 (RADWAG, Poljska). Za određivanje zatezne čvrstoće u uzdužnom (T_{SL}) i poprečnom pravcu (T_{ST}), kao i izduženja u uzdužnom (ϵ_L) i poprečnom (ϵ_T) pravcu ispitivanih uzorka tetra pak ambalaža primenjena je AMSLER kidalica (F_{max} od 2000 N).

2.2. Uticaj ambijentalnih uslova na kvalitet štampe tetra pak ambalaže

Druga faza istraživanja obuhvatala je ispitivanje uticaja ambijentalnih uslova (temperature i svetlosti) na kvalitet štampe tetra pak ambalaže, odnosno na kvalitet optičkih karakteristika plave boje S1 i M4 uzoraka i crvene boje S2 i M3 uzoraka. Za ispitivanje uticaja ambijentalnih uslova, otisci tetra pak ambalaža podeljeni su u dve grupe.

Prva grupa plavih i crvenih otisaka tetra pak ambalaža izlagana je dejstvu svetlosti na sobnoj temperaturi (+23°C) tokom 30 dana. Druga grupa otisaka uzoraka stajala je u mraku i frižideru na temperaturi od +5°C tokom 30 dana. Određenim danima (1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 14, 15, 20, 25 i 30) izmerene su tri pojedinačne Lab vrednosti obe grupe otiska tetra pak ambalaža primenom refleksionog spektrofotometra Spectro Dens 3.0 (Techkon, Germany).

Na osnovu očitanih srednjih Lab vrednosti referentnih uzoraka i uzoraka izlaganih dejstvu različitih ambijentalnih uslova, apsolutna kolorimetrijska razlika dve boje (ΔE) određena je prema jednačini (1) [7,8]:

$$\Delta E = [(L_B - L_S)^2 + (a_B - a_S)^2 + (b_B - b_S)^2]^{1/2} \quad (1)$$

gde se L_S , a_S , b_S veličine odnose na referentni uzorak otiska, dok se L_B , a_B , b_B veličine odnose na ispitivani uzorak otiska boje koji je izlagan odgovarajućim ambijentalnim uslovima. ΔE boja definiše se brojem i odgovara ukupnoj vizuelnoj razlici između dve boje (tabela 1) [7].

Tabela 1. Vizuelna razlika dve boje [7]

ΔE između 0 i 1	Razlika se ne može primetiti
ΔE između 1 i 2	Veoma mala razlika, može je primetiti samo iskusno oko
ΔE između 2 i 3,5	Srednja razlika, može je primetiti samo uvežbano oko
ΔE između 3,5 i 5	Krupna razlika
ΔE preko 5	Masivna razlika

3. REZULTATI I DISKUSIJA

3.1. Fizičko-mehanička svojstva tetra pak ambalaža

Vrednosti gramature ispitivanih uzoraka tetra pak ambalaža opadaju u nizu: S2 (361 g/m²) > M3 (357 g/m²) > S1 (323 g/m²) > M4 (321 g/m²). Vrednost gramature S2 tetra pak ambalaže iz Srbije je veća 1,1, 11,8 i 12,5% u odnosu na uzorke M3, S1 i M4, redom.

Rezultati merenja debljine pokazuju da su debljine ambalaža srpskog proizvođača S1 (0,479 mm) i S2 (0,475 mm) veće 3,7 i 3% u odnosu na uzorke M3 (0,462 mm) i M4 (0,461 mm) mađarskog proizvođača, redom. Proizvođač iz Srbije koristi deblji materijal za pakovanje mleka od proizvođača iz Mađarske.

Na osnovu izmerenih podataka vrednosti zapreminske mase M3 i M4 uzorka tetra pak ambalaža iz Mađarske su veće 1,3 i 3,0% u odnosu na S2 i S1 uzorke iz Srbije, redom.

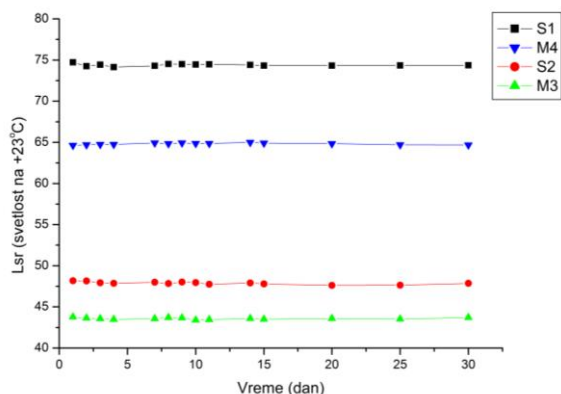
Vrednosti zatezne čvrstoće uzoraka tetra pak ambalaža opadaju u nizu: M4 > S1 > M3 > S2 (uzdužni pravac) i S1 > M4 > M3 > S2 (poprečni pravac). Rezultati merenja zatezne čvrstoće uzoraka pokazuju da su vrednosti u uzdužnom pravcu očekivano veće u intervalu od 20 do 41,9% u odnosu na poprečni pravac.

Vrednosti izduženja uzoraka tetra pak ambalaža opadaju u nizu: S2 > S1 = M3 > M4 (uzdužni pravac) i S2 > M4 > S1 = M3 (poprečni pravac). Vrednosti izduženja ispitivanih uzoraka u poprečnom pravcu su veća u intervalu od 22,2 do 185,7% u odnosu na uzdužni.

3.2 Analiza uticaja ambijentalnih uslova na kvalitet štampe tetra pak ambalaža

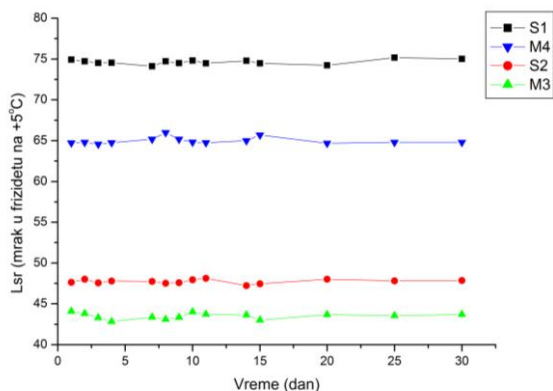
Srednje vrednosti svetline (L_{sr}) CIE Lab prostora boja (plave i crvene) u definisanim ambijentalnim uslovima (svetlosti na +23°C) tokom 30 dana opadaju u nizu: plava boja S1 > plava boja M4 > crvena boja S2 > crvena boja M3 (slika 1). Uočava se da su L_{sr} vrednosti plave boje uzoraka S1 iz Srbije i M4 iz Mađarske veće u odnosu na L_{sr} vrednosti crvene boje uzoraka S2 iz Srbije i M3 iz Mađarske. Dobijeni rezultati pokazuju da su vrednosti L_{sr} plave boje S1 u intervalu od 74,13 do 74,72 i da su razlike L_{sr} vrednosti (ΔL_{sr}) $\leq 0,8\%$ tokom 30 dana. Za plavu boju M4 vrednosti L_{sr} su u intervalu od 64,63 do 64,99 sa $\Delta L_{sr} \leq 0,6\%$ tokom 30 dana. Vrednosti L_{sr} crvene boje S2 su u intervalu od 47,62 do 48,18, sa $\Delta L_{sr} \leq 1\%$ tokom 30 dana. Za crvenu boju M3 vrednosti L_{sr} su u intervalu od 43,39 do 43,77 sa $\Delta L_{sr} \leq 0,9\%$ tokom 30 dana. Dakle, dobijeni rezultati pokazuju da se vrednosti L_{sr} na merenim

uzorcima tetra pak ambalaža menjaju sa odstupanjem $\leq 1\%$, odnosno da su plave i crvene boje uzoraka tetra pak ambalaža postojane na dejstvo svetlosti i temperature od $+23^{\circ}\text{C}$ u periodu od 30 dana.



Sl. 1. Vrednosti L_{sr} uzoraka tetra pak ambalaža izloženih dejstvu svetlosti na $+23^{\circ}\text{C}$ tokom 30 dana

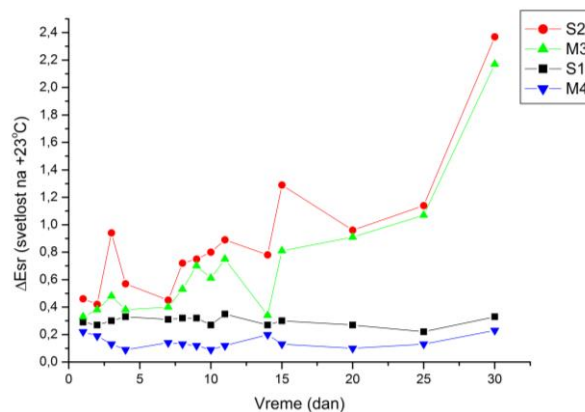
Promene L_{sr} plave boje S1 i M4 i crvene boje S2 i M3 uzorka tetra pak ambalaža pod dejstvom mraka u frižideru na $+5^{\circ}\text{C}$ tokom 30 dana opadaju u nizu: plava boja S1 > plava boja M4 > crvena boja S2 > crvena boja M3 (slika 2). Uočava se da su L_{sr} vrednosti plave boje uzoraka S1 i M4 veće u odnosu na L_{sr} vrednosti crvene boje uzoraka S2 i M3.



Sl. 2. Vrednosti L_{sr} uzoraka tetra pak ambalaža izloženih dejstvu mraka u frižideru na $+5^{\circ}\text{C}$ tokom 30 dana

Dobijeni rezultati pokazuju da su vrednosti L_{sr} plave boje S1 u intervalu od 74,11 do 75,18 sa $\Delta L_{sr} \leq 1,4\%$ tokom 30 dana. Za plavu boju M4 vrednosti L_{sr} su u intervalu od 64,57 do 65,98 sa sa $\Delta L_{sr} \leq 2,2\%$ tokom 30 dana. Vrednosti L_{sr} crvene boje S2 su intervalu od 47,24 do 48,13, sa $\Delta L_{sr} \leq 1,9\%$ tokom 30 dana. Za crvenu boju M3 vrednosti L_{sr} su u intervalu od 42,82 do 44,09 sa sa $\Delta L_{sr} \leq 3\%$ tokom 30 dana. Dakle, dobijeni rezultati pokazuju da se vrednosti L_{sr} na ispitivanim uzorcima tetra pak ambalaža menjaju

sa odstupanjem $\leq 3\%$, odnosno da su boje uzoraka tetra pak ambalaža postojane na dejstvo mraka u frižideru na $+5^{\circ}\text{C}$ periodu od 30 dana.



Sl. 3. Vrednosti ΔE_{sr} uzoraka tetra pak ambalaža izloženih dejstvu svetlosti na $+23^{\circ}\text{C}$ tokom 30 dana

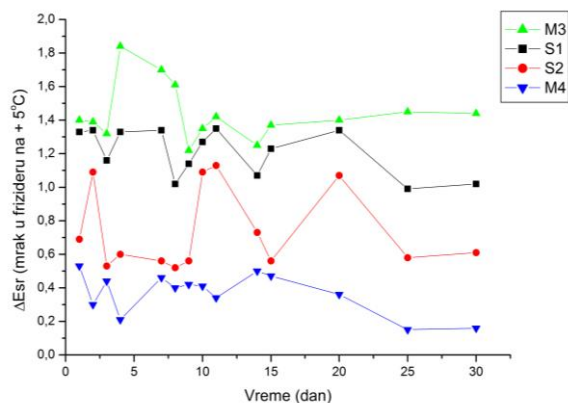
Promene srednje vrednosti apsolutne kolorimetrijske razlike (ΔE_{sr}) uzoraka izloženih dejstvu svetlosti na $+23^{\circ}\text{C}$ tokom 30 dana monitoringa opadaju u nizu: crvena boja S2 > crvena boja M3 > plava boja S1 > plava boja M4. Dakle, veće vrednosti ΔE_{sr} pokazuje crvena u odnosu na plavu boju i za uzorke tetra pak ambalaže iz Srbije i Mađarske (sl. 3). ΔE_{sr} uzoraka su u intervalima: od 0,09 do 0,23 (30. dan) za plavu boju M4, od 0,22 do 0,39 (30. dan) za plavu boju S1, od 0,23 do 2,17 (30. dan) za crvenu boju M3 i od 0,42 do 2,37 (30. dan) za crvenu boju S2. Dakle, 30. dana uočavaju se najveće ΔE_{sr} vrednosti za sve uzorke tetra pak ambalaža.

Za plavu boju S1 i M4 uzorka vizuelna razlika dve boje se ne uočava (ΔE_{sr} od 0 do 1), čime se definiše postojanost plave boje uzoraka tetra pak ambalaža na dejstvo svetlosti i temperature $+23^{\circ}\text{C}$ u periodu od 30 dana. Međutim, crvene boje S2 i M3 uzorka su postojane do 15. dana, od 15. dana vrednosti ΔE_{sr} su > 1 (veoma mala razlika), dok se 30. dana uočava se srednja razlika boja (ΔE_{sr} od 2 do 3,5) koju može primetiti samo uvežbano oko.

Rezultati tokom 30 dana izlaganja uzoraka tetra pak ambalaža dejstvu mraka u frižideru na $+5^{\circ}\text{C}$ (slika 4) pokazuju da ΔE_{sr} vrednosti opadaju u nizu: crvena boja M3 > plava boja S1 > crvena boja S2 > plava boja M4. ΔE_{sr} uzoraka su intervalima: od 0,15 do 0,53 (1. dan) za plavu boju M4, od 0,53 do 1,13 (11. dan) za crvenu boju S2, od 0,99 do 1,35 (11. dan) za plavu boju S1 i od 1,22 do 1,84 (4. dan) za crvenu boju M3.

Dobijeni rezultati pokazuju da su ΔE_{sr} za boje ispitivanih uzoraka tetra pak ambalaže u intervalu između 0 i 2, odnosno da razliku boja tokom 30 dana izlaganja dejstvu mraka u frižideru na $+5^{\circ}\text{C}$ može primetiti samo iskusno oko. Nagli skokovi

ΔE_{sr} vrednosti u pojedinim danima mogli bi se objasniti kompleksnom interakcijom ambalažni material /grafička boja/ ambijentalni uslovi. Takođe, pojedinačna svojstva i komponente grafičkih boja, kao što su veličina čestica pigmenta, aditivi, mogu doprineti različitim otpornostima boja na dejstvo ambijentalnih uslova [8].



Sl. 4. Vrednosti ΔE_{sr} uzoraka tetra pak ambalaža izloženih dejstvu mraka u frižideru na +5°C tokom 30 dana

4. ZAKLJUČAK

Mehaničke osobine tetra pak ambalaže su važne za uspešnu primenu i očuvanje integriteta upakovanog proizvoda. Rezultati fizičko-mehaničke karakterizacije tetra pak ambalaža pokazuju da:

- Proizvođač iz Srbije koristi deblje tetra pak ambalaže za mleko od proizvođača iz Mađarske.

- Vrednost gramature S2 uzorka tetra pak ambalaže iz Srbije je veća 1,1, 11,8 i 12,5% u odnosu na uzorke M3, S1 i M4, redom.

- Zapreminske mase tetra pak ambalaža iz Mađarske su veće 1,3 i 3,0% u odnosu na uzorke iz Srbije.

- Vrednosti zatezne čvrstoće uzoraka u uzdužnom pravcu očekivano su veće od 20 do 41,9% u odnosu na poprečni pravac.

- Vrednosti izduženja ispitivanih uzoraka u poprečnom pravcu su veća od 22,2 do 185,7% u odnosu na uzdužni pravac.

Ispitivanjem uticaja ambijentalnih uslova (svetlosti i temperature) u periodu od 30 dana na optičke karakteristike tetra pak ambalaža za mleko zaključuje se da:

- Postojanost plave boje uzoraka tokom 30 dana izlaganja dejstvu svetlosti na +23°C koju potvrđuju ΔE_{sr} vrednosti koje su u intervalu 0 do 1. Međutim, crvene boje uzoraka su postojane do 15. dana, od 15. dana monitoringa uočava se veoma mala razlika ($\Delta E_{sr} > 1$), dok se od 30. dana

uočava srednja razlika boja (ΔE_{sr} od 2 do 3,5) koju može primetiti samo uvežbano oko.

- Boje uzoraka su manje postojane na dejstvo mraka u frižideru na +5°C tokom 30. dana, jer su ΔE_{sr} vrednosti do 2 i može ih primetiti samo iskusno oko.

5. LITERATURA

- [1] Nemet, N.: *Ambalaža i procesna oprema za pakovanje mleka i mlečnih proizvoda*, 2008, Online: www.tehnologijahrane.com/enciklopedija/ambalaza-i-procesna-oprema-za-pakovanjemleka-i-mlecnih-proizvoda
- [2] Vizirozsa, Az italos karton doboz alias Tetra Pak, Online: http://zoldfu.blog.hu/2013/05/08/az_italos_karton_doboz_alias_tetra_pak
- [3] Szabó, A.M., Koltai, L., Fodor, L.: *Comparative Analysis of Aluminum and Aluminum Free Recycled Multilayered Beverage Carton Packaging*, Journal of Graphic Engineering and Design, 4 (2), p.p. 13-19, 2013.
- [4] Szabó Attila Vajk, Az italos karton (Tetra-Pak) doboz felépítése, Online: http://www.szelektiv.hu/hir.170.az_italos_karton_tetrapak_doboz_felepítése, 2009
- [5] Lazić, V., Novaković, D.: *Packaging and environment materials*, Faculty of Technology Novi Sad, 2010, pp. 86-94.
- [6] Filipović, N., Lazić, V., Filipović, J., Gvozdenović, J., Novaković, D.: *Packaging material characteristics contributing to shelf-life of rusk*, Romanian Biotechnological Letters, 17(2), p.p. 7125-7135, 2012.
- [7] Mijin, D.: *Grafičke boje i lepkovi*, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 2012.
- [8] Szentgyörgyvölgyi, R., Borbély, Á.: *Weather resistance of inkjet prints on plastic substrates*, Journal of Graphic Engineering and Design, 6 (1), p.p. 11-14, 2015.

Autori: Doc. dr Savka Adamović, Van. prof. dr Miljana Prica, Van. prof. dr Nemanja Kašiković, Asistent MSc Rastko Milošević, Asistent MSc Bojan Banjanin, 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 2631. **Áron Szilágyi**, Óbudai University, Sándor Rejtő Faculty of Light Industry and Environmental Protection Engineering, Doberdó út 6, HU 1034, Hungary.
E-mail: adamovicsavka@uns.ac.rs; miljana@uns.ac.rs; aronax@uns.ac.rs; knemanja@uns.ac.rs; rastko.m@uns.ac.rs; bojanb@uns.ac.rs

Karić, M., Živković, M., Nikolić, R.

**REKUPERACIJA OTPADNE TOPLOTE KLIPNOG KOMPRESORA KAO MERA
POBOLJŠANJA ENERGETSKIH I EKOLOŠKIH KARAKTERISTIKA
PNEUMATSKOG SISTEMA**

***Rezime:** Primena vazduha pod pritiskom u savremenoj proizvodnji i životu je velika. Za njegovu proizvodnju troši se oko 10% električne energije upotrebene u industriji, a od ukupno uložene energije za pogon kompresora, svega 10-25% bude predato potrošaču, a ostatak predstavlja gubitak. Primenom raznih mera za efikasniju proizvodnju mogu se očekivati velike potencijalne uštede. U radu se razmatra mogućnost rekuperacije otpadne toplote dvostepenog kompresora koristeći toplotu hlađenja tokom kompresije i međuhlađenja kao izvor toplote za druge korisne svrhe. Pri komprimovanju vazduha pored povećanja pritiska raste neminovno i temperatura, iako je to nepoželjna pojava. Radi snižavanja temperature izlaznog vazduha kompresori se hlade čime se postiže bolji rad kompresora i njegovo podmazivanje, smanjuje potreban rad za kompresiju kao i gubici trenja. Na osnovu sprovedene analize došlo se do zaključka da godišnja ušteda električne energije, ostvarena korišćenjem otpadne toplote klipnog kompresora, kapaciteta 500l/s i radnog pritiska 8 bara, iznosi oko 140000kWh, što bi iznosilo 57,5% ulazne (pogonske) energije. Realizacija ove mere rezultirala bi značajnom godišnjom novčanom uštedom. Svaka ušteda pri potrošnji energije istovremeno znači aktivan doprinos zaštiti životne sredine, jer se energija, još uvek, uglavnom proizvodi iz fosilnih goriva, čije sagorevanje prati velika emisija štetnih materija koje snažno opterećuju životnu sredinu.*

***Ključne reči:** pneumatski sistem, kompresor, rekuperacija otpadne toplote, energetska efikasnost, očuvanje životne sredine*

1. UVOD

Pneumatski sistem je tehnički sistem za pretvaranje i prenos energije kao i upravljanje energijom. Pneumatski uređaji i sistemi bili su poznati još krajem XIX veka. Od tada pa do danas pneumatika se razvila kao samostalna disciplina koja se bavi proučavanjem procesa prenosa i obrade gasova pod pritiskom različitim od atmosferskog. Primena komprimiranog vazduha u savremenoj proizvodnji i životu je vrlo velika. Najčešće se koristi kao prenosnik energije potrebne za provođenje mehaničkih radnih zadataka, npr. za pogon pneumatskih čekića, bušilica i ostalih alata, pneumatski transport, rashladne uređaje, hemijske procese i dr. Vazduh pod pritiskom je jedan od najrasprostranjenijih energenata koji se koristi u industriji. Opisuje se kao četvrto pogonsko sredstvo, pa iako nije sveprisutan kao struja, nafta i gas, ipak predstavlja fundamentalni deo modernog sveta. Sistemi vazduha pod pritiskom su pouzdani, sigurni i pogodni za obavljanje mnogih funkcija u industriji, ali se o njihovoj ekonomičnosti retko vodi računa. Kada se vazduh pod pritiskom koristi kao pogonsko sredstvo nema opasnih izduvnih gasova niti drugih štetnih proizvoda.

Dobijanje vazduha pod pritiskom ima značajnu cenu. U značajnom broju industrijskih postrojenja kompresori za proizvodnju vazduha pod pritiskom troše više električne energije nego bilo koja druga oprema. Pored svih prednosti vazduha pod pritiskom on može, zbog nepravilne upotrebe da postane najskuplji oblik energije za obavljanje rada u industrijskim postrojenjima. Povećanje energetske efikasnosti, pored uštede u potrošnji energije, u širem smislu uključuje i zaštitu okoline a vrlo često i minimizaciju otpada. Racionalna potrošnja energije i rekuperacija otpadne toplote su dva najvažnija načina smanjenja troškova. Uštede se mogu postići kod svakog pojedinačnog uređaja kao i sistema u celini. Samim tim energetska analiza sistema i njegovo konstantno poboljšanje postavljaju se kao conditionsin equanon (uslov bez koga se ne može) u svakom industrijskom postrojenju za proizvodnju i distribuciju vazduha pod pritiskom.

U ovom radu analizirana je jedna od mera koja doprinosi povećanju eko-energetske efikasnosti pneumatskog sistema, a to je mogućnost rekuperacije otpadne toplote koja se stvara procesom kompresije. Dobro projektovanim sistemom za rekuperaciju može se povratiti preko 80% ove toplote.

Cilj rada je da ukaže da realizacije ove mere može doprineti značajnim godišnjim novčanim uštedama, ukoliko se rekuperirana toplota upotrebiti kao zamena za neki izvor energije koji predstavlja troškove. Svaka ušteda pri potrošnji energije istovremeno znači aktivan doprinos zaštiti životne sredine.

2. MATERIJAL I METOD RADA

2.1 Kompresori

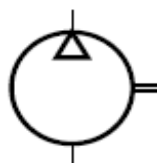
Kompresor je komponenta pneumatskog sistema, konstruisana i izvedena od čvrstih mašinskih elemenata, sa ciljem da mehanički rad pogonskog motora prenese na radni fluid (gas ili paru) kompresijom. Kompresijom se radni fluid prevodi iz jednog energetskog stanja u drugo energetski vrednije stanje. Veličine koje određuju energetsko stanje gasa su pritisak p i temperatura T . Pri sabijanju gasa troši se mehanički rad koji se najčešće osigurava elektromotorom ili motorom s unutrašnjim sagorevanjem. Pri tome se neminovno povećava temperatura komprimiranog gasa iako to samo po sebi nije cilj.

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (1)$$

Hlađenjem komprimiranog gasa omogućuje se bolji rad kompresora i njegovo podmazivanje i ujedno smanjuje potreban rad za komprimiranje gasa.

Kompresori se mogu podeliti po principu rada (zapreminski i strujni princip) u dve glavne grupe: zapreminski i dinamički kompresori. Povećanje pritiska kod zapreminskih se ostvaruje smanjenjem zapremine radnog prostora, a kod dinamičkih naglim ubrzavanjem vazdušne struje pri čemu znatno poraste kinetička energija, koja se u difuzorima pretvara u potencijalnu uz porast pritiska. Na zapreminskom principu grade se klipni kompresori koji s obzirom na konstrukciju svojih potisnih elemenata su klipni kompresori sa pravolinijskim kretanjem klipa i rotorni kompresori s rotirajućim potisnim elementima.

Reč „kompresor“ predstavlja namenu uređaja dok reč turbo, klipni, rotacioni, zavojni govori o načinu funkcionisanja.



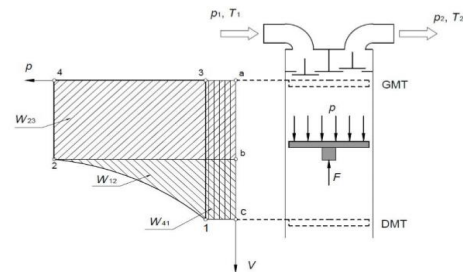
Sl. 1. Simbol kompresora

Simbolom kompresora se ne definiše konstrukcijsko rešenje i veličina elementa već se jednoznačno određuje njegova funkcija.

2.2 Klipni kompresori s pravolinijskim kretanjem klipa

Kod klipnih kompresora vazduh se sabija pod dejstvom klipa koji se kreće u cilindru tj. smanjivanjem zapremine koji on zauzima. Kompresori s pravolinijskim kretanjem klipa dopremaju periodički pulsirajući komprimirani vazduh. Uobičajeno se koriste s rezervoarom za apsorbanje rezultata pulsirajućeg efekta i osiguravanje stabilnog pritiska dopremljenog komprimovanog vazduha. Kod analize rada u početku ćemo smatrati da se štetni prostor (kompresioni) može zanemariti. Takođe ćemo pretpostaviti da je radni fluid idealni gas.

Način rada jednostepenog klipnog kompresora jednosmernog dejstva i odgovarajući indikatorski dijagram prikazani su na slici.



Sl. 2. Rad jednostepenog klipnog kompresora

Teorijski ciklus jednostepenog kompresora sastoji se iz sledećih osnovnih procesa:

3-1 izobarsko usisavanje do zapremine V_1 atmosferskog vazduha

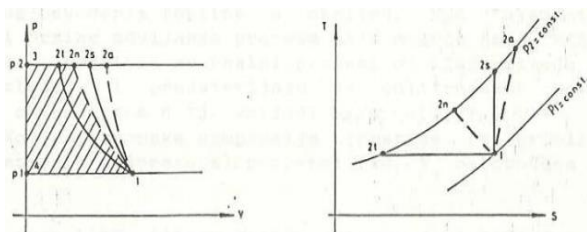
1-2 politropsko sabijanje vazduha od p_1 do p_2

2-4 sabijeni vazduh stanja 2 potiskuje se ka rezervoaru.

Neka se klip nalazi u gornjoj mrtvoj tački (GMT), odnosno uz samu glavu cilindra tako da između njih nema gasa, $V_3 = V_4 = 0$. Okretanjem kolenastog vratila, preko klipnog mehanizma dolazi, dolazi do linearnog pomeranja klipa na dole, otvaranja usisnog ventila, ulaska vazduha kroz usisni vod i punjenja cilindra vazduhom stanja 1 (p_1, T_1). Punjenje traje do donje mrtve tačke (DMT) u kojoj je zapremina cilindra na maksimalnoj vrednosti V_1 . (tačka 1).

Daljim zakretanjem kolenastog vratila, klip se pomera na gore, povećavajući pritisak u cilindru, zbog čega se zatvara usisni ventil i počinje komprimovanje vazduha. Komprimovanje traje sve dok se u cilindru ne postigne pritisak koji vlada u potisnom vod u p_2 , pri kojem se otvara potisni ventil (tačka 2). Daljim pomeranjem klipa do gornje mrtve tačke istiskuje se sav komprimovani vazduh, dolazi do zatvaranja potisnog ventila i završetka ciklusa (tačka 3).

Time je obavljen jedan kompletan okret kolenastog (pogonskog) vratila, i kod svakog idućeg obrtaja celokupan proces se ponavlja. Vrednost temperature T_2 zavisi od procesa kompresije tj. od razmene toplote s okolinom tokom procesa $1-2$. U opštem slučaju proces kompresije moguće je vršiti na mnogo načina: adijabatski a, izentropski s, politropski n, izotermiski t.



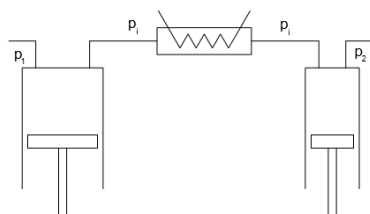
Sl.3. Izotermiski proces

Najefikasniji kompresor je onaj koji će svoju funkciju izvršiti uz minimalno dovedeni mehanički rad. Minimalni rad komprimiranja je kada je $n=1$ tj. kod izotermiske kompresije. Proces komprimiranja gasa u kompresoru treba odvijati što bliže izotermiskom. U slučaju velikog odnosa pritisaka p_2/p_1 to se najbolje ostvaruje u više stepeni. Nakon svakog stepena kompresije hladimo ugrejani sabijeni gas na temperaturu što bližu početnoj T_1 . Time se pored svih pogodnosti (boljeg rada kompresora, boljeg podmazivanja, poboljšanja zapreminskog stepena korisnosti,...) smanjuje i utrošeni rad.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Za ilustraciju energetske analize kompresora navešćemo primer:

Dvostepeni kompresor hlađen vodom ima nazivni kapacitet 500 l/s vazduha normalnog radnog pritiska 700 kPa (relativni). Kompresor se pokreće elektromotorom preko pogonskog remena.



Sl. 4. Dvostepeni kompresor

Nazivni podaci motora su:

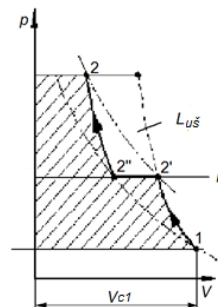
- nazivni napon, $U_n = 380\text{ V}$;
- nazivna struja, $I_n = 286\text{ A}$;
- broj faza, $Y = 3$;
- nazivni faktor snage, $\cos\varphi_n = 0,91$.

Merenjem su dobijene sledeće vrednosti:

- izmereni napon, $U = 379\text{ V}$;

- izmerena struja, $I = 271\text{ A}$;
- izmereni faktor snage, $\cos\varphi = 0,91$;
- ulazni pritisak, $p_{1v} = -4,6\text{ kPa}$ (relativni);
- izlazni pritisak vazduha, $p_{m2} = 691\text{ kPa}$ (relativni);
- protok vazduha na pritisku p_2 , $\dot{V}_i = 81,9\text{ l/s}$;
- temperatura ulaznog vazduha, $t_1 = 10,3^\circ\text{C} \Rightarrow T_1 = 283,45\text{ K}$;
- temperatura vazduha na izlazu, $t_2 = 99,7^\circ\text{C} \Rightarrow T_2 = 372,85\text{ K}$;

Kompresor radi godišnje 2000 sati, a cena električne energije je 8 din./kWh .



Sl. 5. Indikatorski dijagram za mašinu sa dvastepena

$L_{u\dot{s}}$ -ušteda u radu dobijena među hlađenjem.

Protok vazduha na izlazu sveden na standardne uslove:

$$\dot{m} = \dot{V}_i \cdot \rho_i = \dot{V}_0 \cdot \rho_0 \quad (2)$$

$\dot{m} = \text{const.}$ – zakon održanja mase

$$\dot{V}_0 = \frac{\dot{V}_i \cdot \rho_i}{\rho_0} = \dot{V}_i \cdot \frac{p_2 \cdot T_0}{p_0 \cdot T_2} = 469,18 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

Tok politropske kompresije:

$p_1 \cdot T_1^{\frac{n}{1-n}} = p_2 \cdot T_2^{\frac{n}{1-n}}$ – jednačina politrope u $p - T$ koordinatnoj ravni

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{n}{1-n}} / \log \quad (3)$$

$$\frac{n}{1-n} = \frac{\log \frac{p_2}{p_1}}{\log \frac{T_1}{T_2}} = -7,7 \Rightarrow n = 1,15$$

Optimalni pritisak međuhlađenja određuje se pod uslovom da je odnos pritisaka na svakom stepenu kompresora jednak.

$$\frac{p_i}{p_1} = \frac{p_2}{p_i} \Rightarrow p_i = \sqrt{p_1 \cdot p_2} = 283,3\text{ kPa}$$

Potrebna snaga za kompresiju u svakom stepenu:

$$P_{\text{pot}} = \frac{n}{n-1} \cdot \dot{m} \cdot R \cdot T_1 \cdot \left[\left(\frac{p_i}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \approx 54\text{ kW}$$

Indicirana snaga kompresora:

$$P_{\text{ui}} = P_{1 \text{ stepena}} + P_{2 \text{ stepena}} = 2 \cdot P_{\text{pot}} = 108\text{ kW}$$

Faktor opterećenja motora – odnos izmerene ulazne snage prema nazivnoj snazi punog opterećenja:

$$f_0 = \frac{I \cdot U \cdot \cos \varphi}{I_n \cdot U_n \cdot \cos \varphi_n} \approx 1,01 \Rightarrow$$

⇒ elektromotor ima efikasnost 0,92

Izlazna snaga elektromotora:

$$\eta_{m_0} = \frac{P_{mi}}{P_{mu}} \Rightarrow P_{mi} = P_{mu} \cdot \eta_{m_0} = U \cdot I \cdot Y \cdot \cos \varphi \cdot \eta_{m_0}$$

$$P_{mi} \approx 149 \text{ kW}$$

Gubici pogona prenosa remenom kod izlazne snage motora 149 kW su 2,8% pa je efikasnost prenosa:

$$\eta_p = 1 - \frac{2,8}{100} = 0,97$$

Ulazna snaga na vratilu kompresora:

$$\eta_p = \frac{P_{cu}}{P_{mi}} \Rightarrow P_{cu} = \eta_p \cdot P_{mi} = 144,4 \text{ kW} \approx 145 \text{ kW}$$

Efikasnost kompresora se određuje iz odnosa indicirane snage kompresora i ulazne snage na vratilu kompresora:

$$\eta_c = \frac{P_{ui}}{P_{cu}} = \frac{108}{145} \approx 0,75 (75\%)$$

Toplota se odvodi na sva tri dela procesa, pa je jednaka zbiru:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot (q_{12}' + q_{2'2}'' + q_{2'2}') \quad (4)$$

$$q_{12}' = c_n (T_{2'} - T_1) = c_v \frac{n - \gamma}{n - 1} (T_{2'} - T_1) = -48,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$T_{2'}$ - temperatura na kraju niskopritisne kompresije.

$$\frac{T_{2'}}{T_1} = \left(\frac{p_i}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \Rightarrow T_{2'} = T_1 \left(\frac{p_i}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 323,7 \text{ K}$$

$$q_{2'2}'' = c_p (T_{2''} - T_{2'}) = -40,65 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$q_{12}' = q_{2'2}'' = -48,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{m} = \rho_0 \cdot \dot{V}_0 = 1,29 \cdot 0,469 = 0,605 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{Q} = \dot{m} (|q_{12}'| + |q_{2'2}''| + |q_{2'2}'|) = 83,27 \text{ kW}$$

\dot{Q} – toplotna energija oslobođena iz kompresora u jedinici vremena

Toplotna energija oslobođena iz kompresora iznosi 57,5% ulazne energije.

Uz pretpostavku da se 85% ove toplote može iskoristiti za predgrevanje vode:

$$\dot{Q}_k = 0,85 \cdot 83,27 \approx 71 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_k = 71 \frac{\text{kJ} \cdot 10^3 \frac{\text{MJ}}{\text{kJ}}}{\text{s} \cdot \frac{1}{3600} \frac{\text{h}}{\text{s}}} = 255,6 \frac{\text{MJ}}{\text{h}} = 255600 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

Iznos vraćene energije postaje ušteda kada se ova toplota upotrebi da zameni neki izvor energije koji predstavlja troškove.

Godišnja ušteda u troškovima, za električnu energiju, ostvarene korišćenjem (otpadne) toplote kompresora može se aproksimirati jednačinom:

$$G_{u\check{s}ee} = \dot{Q}_k \cdot c_e \cdot h \quad (5)$$

gde je: c_e – cena električne energije,

h – vreme rada kompresora u satima.

$$G_{u\check{s}ee} = 255600 \frac{\text{kJ} \cdot 2,77 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kWh}}{\text{kJ}}}{\text{h}} \cdot 8 \frac{\text{din}}{\text{kWh}} \cdot 2000 \text{ h}$$

$$G_{u\check{s}ee} = 1.132.819,2 \text{ din.}$$

Racionalizacijom potrošnje energije štedimo novac i životnu sredinu!

4. ZAKLJUČAK

Jedna od mera koja može najviše doprineti povećanju energetske efikasnosti pneumatskih sistema je rekuperacija toplote koja se stvara procesom kompresije. Svaki kompresor koristi neki oblik hlađenja za snižavanje temperature izlaznog vazduha. Na osnovu sprovedene analize došlo se do zaključka da godišnja ušteda električne energije, ostvarena korišćenjem otpadne toplote klipnog kompresora, kapaciteta 500 l/s i radnog pritiska 8 bara, iznosi oko 140000 kWh, što bi iznosilo 57,5% ulazne (pogonske) energije. Realizacija ove mere rezultirala bi značajnom godišnjom novčanom uštedom. Svaka ušteda pri potrošnji energije istovremeno znači aktivan doprinos zaštiti životne sredine, jer se energija, još uvek, uglavnom proizvodi iz fosilnih goriva, čije sagorevanje prati velika emisija štetnih materija koje snažno opterećuju životnu sredinu.

5. LITERATURA

- [1] Tomšić, Ž. (2014): *Industrijski energetske sustavi i energetska učinkovitost*, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb
- [2] Korbar, R. (2007): *Pneumatika i hidraulika*, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac
- [3] Dedić, A. (2015): *Pneumatika i hidraulika u drvnoj industriji sa primerima rešenih zadataka*, Beograd
- [4] Šešlija, D. (2003): *Sistemska prilaz povećanju energetske efikasnosti pneumatskih sistema*, Procesnatehnika, broj 1, str. 237-240.
- [5] Karić, M. (2014): *Tehnička termodinamika* (skripta), Visokatehnička mašinska škola strukovnih studija, Trstenik
- [6] Živković, M. (2013): *Osnovi hidraulike i pneumatike* (skripta) Visoka tehnička mašinska škola strukovnih studija, Trstenik

Autori: dr Marina Karić, prof. str. studija, dr Milutin Živković, prof. str. sudija, dr Radovan Nikolić, prof. str. studija, Visoka tehnička mašinska škola strukovnih studija, Radoja Krstića 19, 37240 Trstenik, Srbija, Tel. +381 714 121

E-mail: karicmarina@gmail.com milutinživkovića@gmail.com
rasa62nikolic@gmail.com

Obrovski, B., Mihajlović, I., Bajić, J., Vojinović Miloradov, M., Bežanović, V., Rajs, V.

**PROCENA KONTAMINACIJE REKE DUNAV NA ISPUSTIMA OTPADNE VODE U
NOVOM SADU**

***Rezime:** Utvrđivanje i praćenje nivoa kontaminacije zagađujućih materija u površinskim vodama je od velikog značaja za upravljanje kvalitetom vodnog tela sa ciljem poboljšanja hemijskog, mikrobiološkog i ekološkog statusa životne sredine. Porast kontaminacije životne sredine, zahteva monitoring kvaliteta vodnih tela i predstavlja važan segment upravljanja istih. U radu je posmatran uticaj mešovite otpadne voda na tri ispusta u Novom Sadu i okolini. Da bi smo utvrdili parametre koji najviše doprinose negativnom opterećenju reke kao i lokacije gde je kontaminacija najveća, primenjena su statističke metode analiza glavnih komponenti (AGK) i klaster analiza (KA). Podatci dobijeni u okviru istraživanja će nam pomoći da poboljšamo monitoring program i odredimo lokacije koje su najviše podložne kontaminaciji.*

***Cljučne reči:** Površinska voda, otpadna voda, AGK, KA*

1. UVOD

U Srbiji izuzetan i ozbiljan problem predstavlja direktno ispuštanje netretiranih otpadnih voda u životnu sredinu. Glavni izvori zagađenja površinske vode predstavljaju netretirane mešovite industrijske i komunalne otpadne vode koje se bez ikakvog prečišćavanja direktno ispuštaju u površinske recipijente i mogu da poremete dinamičko-ravnotežne procese i negativno utiču na ekološki status vodnog tela[1,2,3].

Dunavski sliv je najznačajniji vodni sistem u Srbiji i veoma je važno pratiti hemijski status rečnog sistema. Netretirane otpadne vode iz industrije i poljoprivrednih sistema, prirodnih procesa i antropogenih aktivnosti narušavaju kvalitet vodnog tela reke Dunav koji je u fokusu naših istraživanja.

Ne postojanje adekvatne baze podataka o trenutnom stanju površinske vode Dunava zahteva kvalitetan nadzorni i istraživački monitoring program. Dobijanje pravovremenih, pouzdanih, in-situ podataka će obezbediti izradu baze o trenutnom stanju kvaliteta površinske vode reke Dunav[4,5]. Baza podataka o kvalitetu selektovanog vodnog tela je osnov za pravovremeno reagovanje u slučaju akcidenta akutne kontaminacije vodnog tela i preduzimanje preventivnih mera za sprečavanje i

minimizaciju nekontrolisanog akcidentnog zagađenja.

Procena uticaja selektovanih neorganskih parametara na kvalitet reke Dunava na odabranim lokacijama nam omogućava prikaz stepena kontaminacije posmatrane reke. Određivanjem i praćenjem koncentracionih nivoa zagađujućih supstanci u površinskoj vodi stvara se platforma za utvrđivanje zagađujućih supstanci od interesa radi mogućnosti izrade procene rizika po životnu sredinu i zdravlje ljudi.

Statističke multivarijacione tehnike koje su primenjena u ovom radu su analiza glavnih komponentata (AGK) i hijerarhijska klaster analiza (KA). AGK predstavlja multivarijacionu tehniku koja se upotrebljava za identifikaciju i razumevanje zajedničkih karakteristika za više varijabli kao i za redukovanje velikog broja varijabli u analizi podataka uz vrlo mali gubitak informacija[6,7].

AGK identifikuje sve izvore varijacija u skupu varijabli i izdvaja glavne komponente (faktore). Cilj primene ove statističke metode je da se od velikog broja varijabli pronađe kombinacija istih, na osnovu kojih bi se izračunale nove varijable koje nisu u korelaciji i predstavljaju glavne komponente koje opisuju varijacije podataka. Kod AGK broj varijabli uključen u istraživanje će se zameniti sa istim brojem glavnih komponenti (linearna kombinacija originalnih promenljivih), međutim

samo će nekoliko glavnih komponenti imati velikog udela. Odabrane glavne komponente su od značaja i omogućavaju lakše razumevanje informacija koje su sadržane u dobijenim podacima. Zbog toga se ova statistička tehnika primenjuje za redukciju velikog broja podataka, i ima za cilj dobijanje minimalnog broja glavnih komponenti koje će objasniti veliki deo u ukupnoj varijansi originalnih podataka.

Klaster analiza predstavlja statističku tehniku koja se upotrebljava za utvrđivanje relativno sličnih grupa objekata. U klaster analizi nije poznata pripadnost objekta kao ni konačan broj grupa, nego je cilj da se utvrde slične grupe ili klasteri. Ukoliko klaster analiza prikaže neočekivano grupisanje objekata, postoji verovatnoća da su pronađene određene relacije između objekata koje su do tada bile nepoznate.

U radu je sproveden monitoring reke Dunava na ispustima mešovite vode u Novom Sadu. Takođe su primenjene multivarijacione statističke tehnike da bi se proceni stepen kontaminacije površinske vode Dunava na reprezentativnim lokacijama.

2. METODOLOGIJA

Uzorci površinske vode iz reke Dunav u Novom Sadu su prikupljeni na sedam reprezentativnih lokacija za laboratorijsku analizu. Prva lokacija uzorkovanja je odabrana jer prikazuje stanje Dunava pre ispusta otpadne vode i daje nam podatke o kvalitetu površinske vode pre kontaminacije. Tri lokacije (2, 4 i 6) se nalaze pre kolektora ispusta mešane industrijske i komunalne otpadne vode, dok se tri lokacije (3, 5, 7) nalaze posle kolektora koji sakuplja i ispušta otpadnu vodu. Uzorci su prikupljeni u plastične boce od 1 L i transportovani u laboratoriju u ručnom frižideru na 4 °C. Analize su sprovedene u akreditovanoj Laboratoriji za monitoring deponija, otpadnih voda i vazduha na Departmanu za inženjerstvo zaštite životne sredine i zaštite na radu, Fakulteta tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu.

Monitoring kvalitet reke Dunav kroz analizu fizičko-hemijskih parametara u laboratorijskim uslovima biće sprovedeno tokom četiri meseca (April, Maj, Jul i Septembar), gde je tokom svakog meseca urađeno po tri analize. U reci Dunav analizirano je prisustvo devet fizičko-hemijskih parametara. Laboratorijskim analizama je ispitano prisustvo sledećih parametara: ortofosfati, sulfati, nitriti, nitrati, hrom (Cr⁶⁺), ukupan hlor, fluoridi, hloridi i

amonijak. Analize fizičko-hemijskih parametara ortofosfata urađena je primenom EPA metoda (metoda EPA 365.3 za ortofosfate), dok su sulfati, nitriti, nitrati, hrom (Cr⁶⁺), ukupni hlor, fluorida, hlorida i amonijaka urađeni prema HACH metodama (HACH metoda 8021 za sulfate, HACH metoda 8507 za nitrite, HACH metoda 8192 za nitratre, HACH metoda 8023 za hrom, HACH metoda 8167 za ukupan hlor, HACH metoda 8029 za fluoride, HACH metoda 8113 za hloride i HACH metoda 8155 za amonijak). Koncentracije svih parametara su merene na UV-VIS spektrofotometru (DR 5000, HACH, Nemačka).

U radu su primenjene dve metode statističke obrade podataka: faktorska analiza (analiza glavnih komponenti) i klaster analiza (hijerarhijska klaster analiza). Obe multivarijacione statističke tehnike analiziraju međuzavisnost. Cilj tehnika analize međuzavisnosti je da se utvrdi obrazac popnašanja varijabli, odnosno da se utvrde međusobne sličnosti između posmatranih varijabli.

3. REZULTATI

U okviru tri ispusta na potezu reke Dunava u okolini Novog Sada direktno se ispuštaju pomešane komunalne i industrijske vode koje čine najveći izvor akvatične kontaminacije. Zbog toga je izuzetno važno pratiti kvalitet površinske vode Dunava koja se inače koristi za navodnjavanje, rekreaciju, ribarstvo, kao tehnička voda, u industriji i kao izvoriste u aluvionu Dunava za proizvodnju vode za piće.

Razvoj nove baze podataka će obezbediti bolju evaluaciju analitičkih rezultata. Na osnovu dobijenih rezultata, omogućiće se selekcija ključnih fizičko-hemijskih parametara kao indikatora zagađenosti površinskih voda. Izbor ključnih fizičko-hemijskih parametara kao indikatora zagađenosti površinskih voda je važan za definisanje pouzdanog monitoring programa i procenu kvaliteta posmatranog vodnog tela.

Analizom površinske vode Dunava prikupljeno je 84 uzorka i za svaki uzorak je posmatrano 9 fizičko-hemijskih parametara, da bi se dobio podatci o kvalitetu Dunava u okolini Novog Sada. Dobijeni podatci predstavljaju multivarijacione podatke zbog čega je primenjena multivarijaciona statistička obrada podataka. Uglavnom se multivarijacione statističke tehnike kombinuju, u našem slučaju

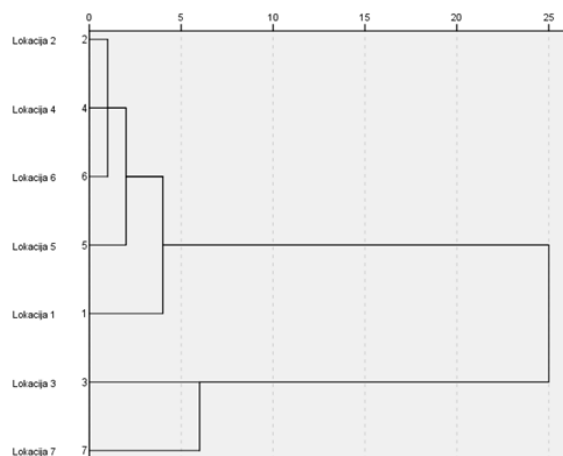
smo kombinovali analiza glavnih komponenti sa klaster analizom. Cilj multivarijacione analize je otkrivanje međusobne zavisnosti između različitih varijabli, koje bi inače bilo teško uočive, kao i povećanje količine upotrebljivih podataka koje mogu da se koriste za dobijanje korisnih informacija o posmatranom procesu.

Tabela 1. Opterećenje varijabli dobijenih analizom glavnih komponenti.

Parametri	Faktor 1	Faktor 2
Ortofosfati	0,793	0,542
Sulfati	0,624	0,670
Nitrati	0,791	0,605
Nitriti	0,934	-0,156
Amonijak	0,797	0,587
Ukupan hlor	0,687	0,656
Hloridi	0,750	0,563
Fluoridi	-0,030	0,926
Hrom (VI)	0,953	0,257
Varijansa [%]	56,613	34,992
Kumulativni procenat	56,613	91,605

Obrada podataka AGK se sastoji iz nekoliko faza. U prvoj fazi se izračunava koeficijent korelacije između originalnih podataka. Tabela koeficijenata korelacije (Tabela 1.) doprinosi boljoj identifikaciji, imenovanju i razumevanju faktora. U radu je korišćen MSA (measure of sampling adequacy) preko 0,6 za kvantifikaciju stepena korelacije između fizičko-hemijskih parametara i opravdanosti faktorske analize. Dobili smo dve glavne komponente (faktore) koje imaju najveći uticaj (najveće faktorsko opterećenje) i obuhvata 91% varijabiliteta podataka. Ulazni parametri su redukovani na dva faktora, i oni najbolje opisuju uticaj fizičko-hemijskih parametara na kvalitet reke Dunava.

Klaster analiza se započinje izračunavanjem glavnih komponenti da bi se smanjio broj originalnih varijabli. Klaster analiza posmatrane lokacije grupiše u klase tako da se lokacije sa najslabijim koncentracijama za posmatrane parametre nalaze u istoj klasi (klasteru).



Sl. 1. Dendrogram klusterske analize za odabrane parametre u uzorcima vode.

Rezultati dobijeni klaster metodom su u potpunosti u skladu sa dobijenim analitičkim rezultatima. Na dendrogramu su izdvojena dva glavna klastera. U prvom klasteru su izdvojene lokacije 2,4,6,5 i 1. Koncentracije za sve parametre na ovim lokacijama su u dozvoljenim granicama i nema velikog odstupanja. Lokacije 2,4 i 6 se nalaze pre ispusta mešovite otpadne vode i koncentracije posmatranih parametara na ovoj lokaciji su približno slične. Lokacija 1 se nalazi pre svih ispusta, dok je lokacija 5 nakon ispusta. Lokacija 5 je specifična jer se uzorak prikupljao 200 metara nakon ispusta. Koncentracija parametara na ovoj lokaciji zavisi od vremena kada je ispuštena otpadna voda i brzine protoka. Veliki protok i udaljenost od ispusta omogućava razblaženje otpadne vode, i koncentracije svih parametara su relativno niske. U drugom klasteru su lokacije 3 i 7. Ove dve lokacije su smeštene 30 metara nakon ispusta otpadne vode. Koncentracije svih parametara na ovoj lokaciji su povećane u odnosu na ostale lokacije. Koncentracije amonijaka i ortofosfata su povišene i ukazuju na razgradnju organske materije iz komunalnih otpadnih voda što utiče na kvalitet reke Dunava.

4. ZAKLJUČAK

Multivarijacione statističke metode se koriste u zaštiti životne sredine za procenu kvaliteta vodnih tela. Statističkom obradom podataka smo ustanovili kontaminaciju postojećih lokacija što je izuzetno važno za dobijanje pouzdane baze podataka. Cilj rada je bio utvrđivanje najznačajnije fizičko-hemijske parametre. Dalje istraživanje će biti usmereno na razvoj nove senzorske metode kojom ćemo sprovesti

monitoring površinskih tela za parametre koje su od izuzetnog značaja.

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] Y. Ouyang, P. Nkedi-Kizza, Q.T. Wu, D. Shinde, C.H. Huang: *Assessment of seasonal variations in surface water quality*, Water Research, 2006, Vol. 40, Issue 20, pages 3800-3810.
- [2] M. Vojinovic-Miloradov, I. Mihajlovic, O. Vyviurska, F. Cacho, J. Radonic, N. Milic, I. Špánik: *Impact of wastewater discharges to Danube surface water pollution by emerging and priority pollutants in the vicinity of Novi Sad, Serbia*, Fresenius Environmental Bulletin, 2014, Issue 23, pages 2137-2145.
- [3] V. Micić, M. Kruge, P. Körner, N. Bujalski, T. Hofmann: *Organic geochemistry of Danube River sediments from Pančevo (Serbia) to the Iron Gate dam (Serbia–Romania)*, Organic Geochemistry, 2010, Issue 41, pages: 971-974.
- [4] S. Kolarevic, J. Knezevic-Vukcevic, M. Paunovic, J. Tomovic, Z. Gacic, B. Vukovic-Gacic: *The anthropogenic impact on water quality of the river Danube in Serbia: Microbiological analysis and genotoxicity monitoring*, Archives of Biological Sciences, 2011, Issue 63, pages: 1209-1217.
- [5] B. Vrana, V. Klučárová, E. Benická, N. Abou-Mrad, R. Amdany, S. Horáková, A. Draxler, F. Humer, O. Gans: *Passive sampling: An effective method for monitoring seasonal and spatial variability of dissolved hydrophobic organic contaminants and metals in the Danube river*, In Environmental Pollution, 2014, Vol. 184, pages 101-112.

- [6] M. Markovic, M. Vojinovic-Miloradov, Lj. Ignjatovic, B. Obrovski, A. Cavic, I. Mihajlovic: *Ecological status of artificial accumulation lake Vrutci case study*, Serbia Fresenius Environmental Bulletin. 2017, Vol. 26 Issue 8, pages 5184-5189.
- [7] M. Djogo, J. Radonic, I. Mihajlovic, B. Obrovski, D. Ubavin, M. Turk-Sekulic, M. Vojinovic-Miloradov: *Selection of optimal parameters for future research monitoring programmes on MSW landfill in Novi Sad, Serbia*, Fresenius Environmental Bulletin, 2017, Vol. 26, Issue 7, pages 4867-4875.

Autori: M.Sc. Boris Obrovski, Assist. Prof. Dr. Ivana Mihajlović, Prof. Dr. Mirjana Vojinović Miloradov, M.Sc. Veselin Bežanović, 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.
Dr. Jovan Bajić, Dr. Vladimir Rajs, 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: borisobrovski@uns.ac.rs
ivanamihajlovic@uns.ac.rs
miloradov@uns.ac.rs
veselin.bezanovic@gmail.com
bajic@uns.ac.rs
vladimir@uns.ac.rs

**SCIENTIFIC CONFERENCE WITH INTERNATIONAL
PARTICIPATION
NOVI SAD, SERBIA, DECEMBER 6-8, 2017**

Šunjević, M., Vojinović-Miloradov, M., Obrovski, B., Kustudić, M.

**NEW EMERGING MATERIALS BETWEEN
ARCHITECTURE AND ENVIRONMENTAL PROTECTION**

Abstract: *Twenty first century brought many new technologies and research possibilities. We are witnesses of research boom that gave us a product many different emerging materials. Through smart evolution and correspondence between different research fields inducted through new scales (micro and nano) of material observation and interaction life was given to these states of art materials. Without any direct or indirect use, emerging materials are basically useless. In this paper properties and performances of emerging materials will be examined and analyzed in correspondence with architecture and environmental protection. This way new approaches for protection of environment (air, water, soil and biota) will be made possible.*

Key words: *emerging materials, architecture, environmental protection*

1. INTRODUCTION

Since humans first learned to use wood and stones to create tools, human race have manipulated the materials around them, and invented new materials to make lighter, stronger, more efficient, and higher performing products. Modern day life would be hard to imagine in any aspect which has not been improved through advances in materials science and technology. The construction industry consumes more natural resources than any other industry. The increase in public awareness and rise of the needs and demands of sustainable development and environmental conservation has passed large burden on to building industry. The industry has been given task to evolve their practices to satisfy the needs of our current generation, without restraining the resources of future generations to meet theirs. For example, concrete is by far the most important building material, with billions of tons produced each year worldwide, and without which the nation's infrastructure is unthinkable. Considerable progress and breakthroughs have been made in recent years in concrete technology, which have largely gone unnoticed by the public at large.

It is said that more progress has been made in the last 25 years than in the previous almost 200 years since Portland cement was invented. Modern cement composites can now be modified to have strengths similar to those of steel, very low energy squandering and durability properties that can make it last principally indefinitely, while giving it decorative and aesthetically pleasing futures as natural stone, but with superior mechanical properties. Composites reinforced with fibers in the aerospace and automotive industries decades ago and are now finding their way into civil engineering structures. Smart materials, defined as those materials that can change their properties in response to external conditions, are also starting to be used in civil infrastructure systems, and so are new

developments in metals, with new high-strength steel alloys and non-corrosive steels that are changing engineering practice.

All of these advanced materials are essential for an efficient renewal and maintenance of our infrastructure. The variety of possibilities offers exciting prospects for vibrant research areas. But one of the main goals all of these research efforts should be guided by the overarching goal of reducing footprint on planet from the construction industry.

Realizing the needs and the requirements of modern age, care about environment is becoming extremely important topic, which is present in all fields. Working towards lowering and positively influencing environment, architecture must achieve sustainability. Sustainable architecture includes green technologies and materials needed to design and construct energy-efficient, environmentally friendly, and sustainable buildings. Smart – sustainable Architecture adopts new developments, innovative techniques, and advanced technologies that helps it restore the balance between the user and the natural environment.

Advanced materials role is all present and evolving in the fields of architecture and environmental protection as one of the most carriers of the interrelations and progress.

2. DEFFINING ADVANCED MATERIALS

Understanding the fact that buildings forma part of the environment and that in that process cause a large part of environmental pollution, we can conclude that environment and architecture are inseparable. And there for the following equation stands:

$$\int (he) = Ka * Ke * Km * Ko \quad (1)$$

This equation represents dependence of healthy environment on architectural coefficient (Ka) in

correlation with environmental coefficient (Ke), material coefficient (Km) and other less important influences (Ko). Having set basic relations we can see how huge role advanced materials have in maintaining relations of architecture and environment.

Great attention should be given to the use of innovative smart materials which enhance environmental sustainability, cost-effectiveness and security. New technologies and high-performance materials are being developed to meet those needs, offering innovative and creative solutions for long standing problems, especially for negative impact on environment. Providing benefits, whether to structural stability, the environment or to the maintenance and repair process, they affect positively architectural design thinking. One of the major goals of these materials is to find new class of advanced materials, considered as multipurpose materials, that is required for creative architecture and constructions through sustainability.

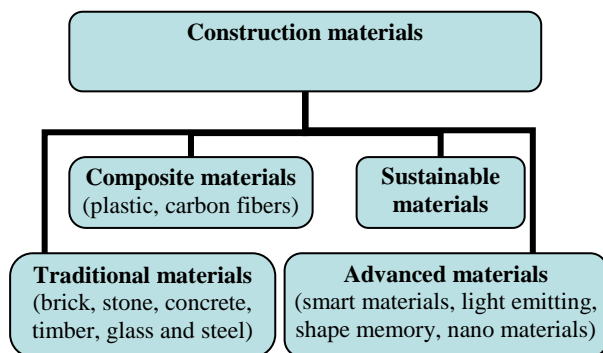


Fig. 1. Construction materials layout

Architectural materials are generally deployed in very large quantities and building systems needs to tend to be highly integrated into the building to maintain homogeneous interior conditions. Materials and systems must also withstand very large range of temporary exterior conditions. The combination of these two general requirements tends to result in buildings of high thermal and mechanical inertia, and highly interconnected with environment.

Advanced materials can be considered as engineered materials which are able to provide a unique beneficial response when a particular change occurs in its surrounding environment. They can also be considered as materials that remember configurations and can reform to them when given a specific stimulus. In environmental terms we can consider as advanced materials those materials that sense environmental events, a process that sensory information, and then act on the environment. In architectural terms, advanced materials are high technological materials that when placed in a building they respond intelligently to the climatic changes. These materials responsively react to changes in interior and exterior environments through material properties or material synthesis. They are considered to be a logical extension of the trajectory in materials development toward more selective and specialized performances, and they are in a way similar

to living beings- having the ability to sense and are capable of adapting to changes in the environment. Exploiting these materials, a complicated part in a system consisting of individual structural, sensing and actuating components can now exist in a single component, in that way reducing in general size and complexity of the system, but they can never replace system fully.

3. ARCHITECTURAL MATERIALS INFLUENCING ENVIRONMENT

Whether a molecule, a material, a composite, an assembly, or a system, advanced materials and technologies implementing them needs to demonstrate the following characteristics:

- Immediacy – to respond in real-time
- Transiency – to respond to more than one environmental state
- Self-actuation – intelligent to activate it self
- Selectivity – to be able to respond on selected stimulus
- Directness – to respond directly to activating source
- Environmental friendly- to positively influence on surrounding environment

3.1 Advanced material types

Taking into account all stated above we can separate materials in following groups, based on their abilities:

- Thermochromic – an input of thermal energy (heat) to the material alters its molecular structure. The new molecular structure has a different spectral reflectivity than does the original structure. As a result, the material changes color – its reflected radiation in the visible range of the electromagnetic spectrum.
- Magnetorheological – the application of a magnetic field causes a advanced material change in micro-structural orientation, resulting in attribute change.
- Thermotropic – an input of thermal energy (or radiation for a phototropic, electricity for electrootropic and so on) to the material alters its micro-structure through a phase change. In a different phase, most materials demonstrate different properties, including conductivity, transmissivity, volumetric expansion, and solubility.
- Shape memory – an input of thermal energy (which can also be produced through resistance to an electrical current) alters the microstructure through a crystalline phase change. This change enables multiple shapes in relationship to the environmental stimulus.
- Photovoltaic – an input of radiation energy from the visible spectrum (or the infrared spectrum for a thermo-photovoltaic) produces an electrical current (the term voltaic refers more to the material which must be able to provide the voltage potential to sustain the current).

-Thermoelectric – an input of electrical current creates a temperature differential on opposite sides of the material. This temperature differential produces a heat engine, essentially a heat pump, allowing thermal energy to be transferred from one junction to the other.

-Piezoelectric – an input of elastic energy (strain) produces an electrical current. Most piezoelectrics are bi-directional in that the inputs can be switched and an applied electrical current will produce a deformation (strain).

-Photoluminescent – an input of radiation energy from the ultraviolet spectrum (or electrical energy for an electroluminescent, chemical reaction for a chemoluminescent) is converted to an output of radiation energy in the visible spectrum.

-Electrostrictive – the application of a current (or a magnetic field for a magnetostrictive) alters the inter-atomic distance through polarization. A change in this distance changes the energy of the molecule, which in this case produces elastic energy – strain. This strain deforms or changes the shape of the material.

3.2 Cutting edge advanced materials

The following building materials represent cutting edge technologies that will help to restore unity between architecture and environment.

3.2.1 Colored solar thermal cladding

One main barrier to the acceptability of façade use of solar thermal collectors is their black appearance and the visibility of piping or absorber irregularities through the glazing. Developments focused on producing colored thermal collectors suitable for smooth façade integration. To facilitate façade integration, material is developed with selective filters reflecting only a small part of the solar spectrum in the visible range while letting the rest of the radiation heat the absorber.

These filters were successfully produced and combined with a diffusing glass treatment. They have achieved the desired masking effect with only a minor impact on the collector efficiency (less than 10%). Glasses of various colors combined with several diffusing finishing (acid etching, structured glass etc...) can be produced that are able to hide the absorber. Such glazing will allow the use of the same product both on façade areas equipped with solar absorbers (as collector external glass) and in front of the non exposed areas (as façade cladding), opening the way to a broad variety of active façade designs.

3.2.2 Self-Healing Concrete

Also known as bio-concrete, it is usually used to fill up cracks in the existing concrete. This kind of concrete uses a simple process to close the formed crack. The main mechanism is achieved by making a concrete

mixture that contains a precursor like calcium lactate ($\text{Ca}(\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_2)_2$) and bacteria planted in micro capsules or just added to the mixture that will later germinate, once the water reaches the crack. As soon as the bacteria germinate, they produce limestone (CaCO_3) caused by the multiplying bacteria. Incorporating bacteria in concrete adds a double layer shield in order to prevent corrosion in steel, it also employs oxygen present which would then benefit the process of steel corrosion. The bacteria which are applied in this kind of concrete are spore-forming and alkali-resistant bacteria. Using bacteria as a healing mechanism is one of the best mechanisms to produce this kind of concrete because of its sustainable organic properties.

3.2.3 Photocatalytic TiO_2 self-cleaning coatings

The coating is made of a superfine titanium dioxide (TiO_2), a pollution-fighting technology that is activated by ambient daylight. This is the nano photocatalytic version of conventional TiO_2 commonly used as pigment and already known for its self-cleaning and germicidal qualities. It requires only small amounts of naturally occurring UV light and humidity to effectively reduce air pollutants into harmless amounts of carbon dioxide and water. When positioned near pollution sources, the coated surfaces breaks down and neutralize NO_x (nitrogen oxides) and VOCs (volatile organic compounds) directly where they are generated. The most adequate way of using this coating is to design facades or modules that will be coated, so that they will have more surfaces to maximize the effect of TiO_2 , capturing omni-directional light where light is dense or scarce.

4. CONCLUSION

The application of advanced technologies and smart materials has the ability to significantly improve the sustainability of buildings and the environment. Many of the advantages offered by these materials and technologies can be appropriated by a greater diversity of designs for new and retrofitting existing buildings. Material properties are determined by either molecular structure or microstructure. So, architects have to understand all material behavior in relation to the phenomena and environments they create. Architects must consider advanced materials as a functional element in design, especially as their abilities can help improve environment.

The twenty-first century has steered in a period of pressing threats to the environment, rising energy costs and a firming resolve that sustainable architectural design can gain in long-term resource preservation and overall quality of life. Using sustainable ideas we can create clean technology products and processes that not only protect environment, but do so profitably.

We must achieve high level of understanding of advanced materials, their correlation, compound, interactive and complex connection between architecture and environment. Understanding these relations is primary step in adoptions of advanced

materials and their quality use. Considering all of this, advanced materials are to be regarded as a key driver of

architectural innovative design, new smart materials which start to appear in the architecture field, emphasizes this design approach, and it gives us new possibilities and potentials which affect the way we think.

5. REFERENCES

- [1] Abeer, S. Y. M.: *Smart Materials Innovative Technologies in Architecture; Towards Innovative Design Paradigm*, International Conference – Alternative and Renewable Energy Quest, AREQ 2017, 1-3 February 2017, Spain International Conference – Alternative and Renewable Energy Quest, AREQ 2017, 1-3 February 2017, Spain
- [2] Klassen, F.: *Material innovations: Transparent, lightweight, malleable & responsive*, obtain from <http://www.ryerson.ca/> on 30.11.2017.
- [3] Niroumand, H., Zain, M.F.M., Jamil, M.: *The role of Nanotechnology in Architecture and Built Environment*, Second Cyprus International Conference on Educational Research, (CY-ICER), 2013
- [4] Addington, M., Schodek, D.: *Smart materials and new technologies*, Architectural press, Oxford, UK, 2005.

- [5] Mueller, H.S., Haist, M., Moffatt, J.S., Vogel, M.: *Design, materials properties and structural performance of sustainable concrete*, Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials, SCESECM, 2016
- [6] Yoshimura, M.: *Importance of soft processing (low-energy production) of advanced materials for sustainable society*, Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials, SCESECM, 2016.

Authors: MSc. Miljan Šunjević, Prof. Emeritus Dr Mirjana Vojinović-Miloradov, MSc. Boris Obrovski, MSc. Mijat Kustudić, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Phone.: +381 21 485 2350, Fax: +381 21 454-495.

E-mail: msunjevic@uns.ac.rs
miloradov@uns.ac.rs
borisobrovski88@gmail.com
mijat.k.ntc@gmail.com

Agarski, B., Budak, I., Ilić Mićunović, M., Kosec, B., Vukelić, Đ.

**OCENJIVANJE ŽIVOTNOG CIKLUSA ZBORNIKA RADOVA ETIKUM
KONFERENCIJE**

Rezime: *Primena digitalnih medija kod objavljivanja konferencijskih zbornika radova je česta praksa sa ciljem zamene štampanih izdanja. Urađena je prva iteracija kod ocenjivanja životnog ciklusa kako bi se procenili uticaji životnog ciklusa konferencijskog zbornika radova na životnu sredinu. Istraživanje je sprovedeno na slučaju zbornika radova ETIKUM konferencije. Svi prikupljeni podaci su bili pripremljeni kako bi se modelirala i analizirala desetčasovna upotreba zbornika radova ETIKUM konferencije od strane čitaoca. Rezultati ocenjivanja životnog ciklusa pokazuju da zbornik radova ETIKUM konferencije objavljen na USB memoriji ima manji uticaj na životnu sredinu od zbornika koji je odštampan.*

Ključne reči: *ETIKUM konferencija, ocenjivanje životnog ciklusa, zbornik radova.*

1. UVOD

Ocenjivanje životnog ciklusa (engl. Life cycle assessment - LCA) je sveobuhvatni i kredibilan metod za procenu uticaja životnog ciklusa procesa na životnu sredinu [1]. Prva iteracija kod LCA je pogodna za brzu identifikaciju uticaja životnog ciklusa proizvoda ili procesa na životnu sredinu [2]. Kratko i pojednostavljeno LCA može da pruži odgovore na pitanje da li su potrebne detaljnije informacije i izvođenje kompletne studije LCA koja je kompatibilna sa ISO standardom.

Istraživanje uticaja na životnu sredinu koji su vezani za životni ciklus digitalno ili štampano objavljenog medija sprovelo je nekoliko autora. Moberg i drugi [2] su izvršili prvu iteraciju kod LCA životnih ciklusa štampanih novina i e-novina objavljenih za čitanje na tabletu. Bull i Kozak [3] su procenili uticaj na životnu sredinu papinog i digitalnog medija primenom uporednog LCA. Karapetyan i drugi [4] su sproveli uporedno LCA štampanih i elektronskih vizit karti. Hitschier i drugi [5] su primenom LCA procenili uticaje na životnu sredinu od strane časopisa objavljenog u elektronskoj verziji za tablet uređaje i štampane verzije časopisa.

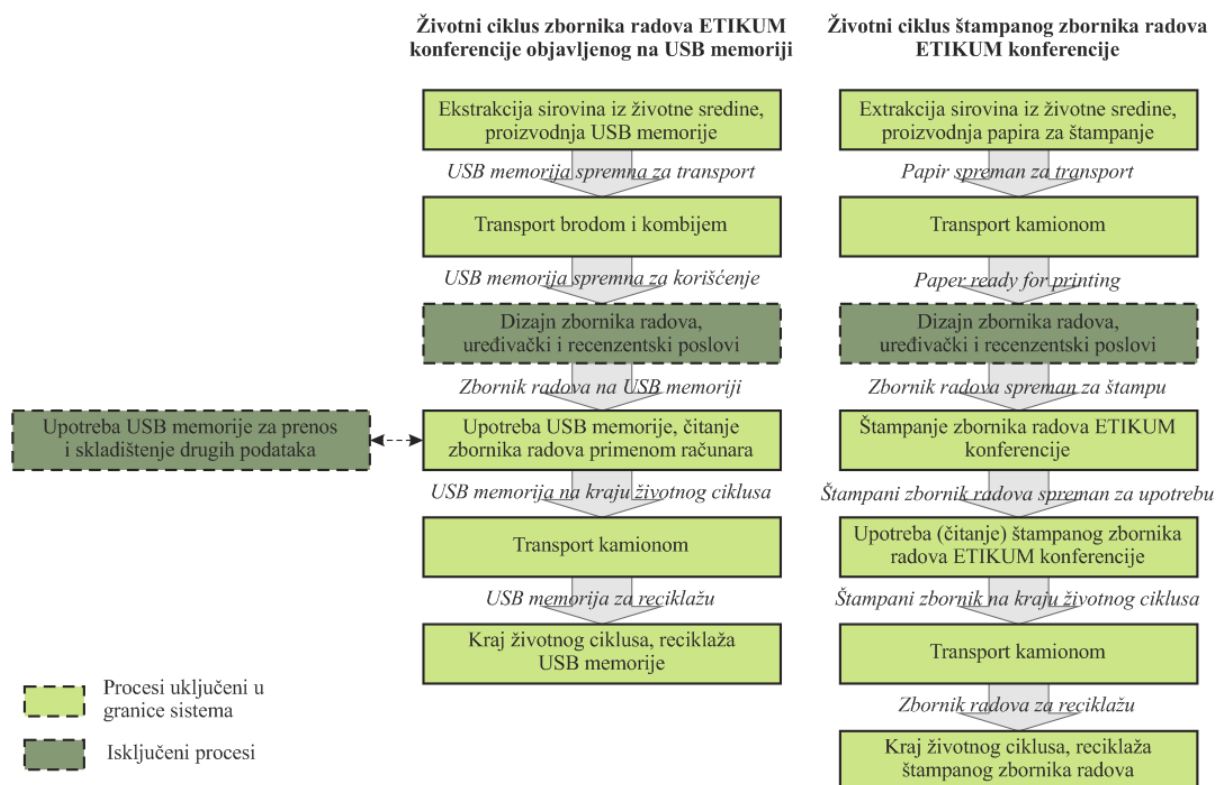
Za razliku od prethodnih istraživanja, nije sprovedena studija LCA koja poredi životne ciklus zbornika radova sa konferencije objavljenog na USB (eng. Universal Serial Bus) memoriji i životnog ciklus štampanog zbornika radova. Stoga, predmet istraživanja je procena uticaja životnih ciklusa štampanog i USB zbornika radova na životnu sredinu. Istraživanje je sprovedeno na studiji gde je zbornik radova ETIKUM konferencije analiziran u prvoj iteraciji LCA.

2. MATERIJALI I METODE

Cilj studije LCA je brza analiza uticaja na životnu sredinu vezanih za životne cikluse štampanog i zbornika radova ETIKUM konferencije objavljenom na USB memoriji. Funkcionalna jedinica je jedan zbornik radova sa 200 strana koji korisnik čita 10 časova. Granice ispitivanih sistema su prikazane slikom 1 gde su uključene sledeće faze životnih ciklusa: ekstrakciju sirovina i proizvodnju poluproizvoda, transport, štampanje, upotrebu, transport do reciklažnog centra i reciklažu. Pretpostavke kod LCA zbornika radova ETIKUM konferencije su:

- Dizajnerski, uređivački i recenzentski procesi, kao i štampanje korica zbornika su izuzeti iz granica sistema;
- Iako USB memorija može da podrži elektronske dokumente sa velikim brojem strana, u ovoj analizi funkcionalna jedinica je ograničena na upotrebu zbornika radova, ili upotreba USB memorije za ostale svrhe nije uzeta u obzir;
- Dodatne informacije o onaliziranim životnim ciklusima i inventaru procesa nalaze se u koloni sa komentarima tabela 1 i 2.

Podaci za inventar životnih ciklusa dobijeni su iz Ecoinvent baze podataka v2.0 [6]. Inventari životnih ciklusa za zbornike radova ETIKUM konferencije prikazani su tabelama 1 i 2. Nakon prikupljanja inventara materijalnih i energetskih tokova za oba životna ciklusa, primenjena je IMPACT 2002+ [7] metoda za ocenu uticaja na životnu sredinu, a rezultati LCA su iskazani kroz kategorije uticaja krajnjih tačaka: ljudsko zdravlje, kvalitet ekosistema, klimatske promene i resursi.



Sl. 1. Granice sistema za zbornik radova ETIKUM konferencije objavljen na USB memoriji i štampani primerak

Tabela 1. Inventar životnog ciklusa za zbornik radova ETIKUM konferencije objavljen na USB memoriji

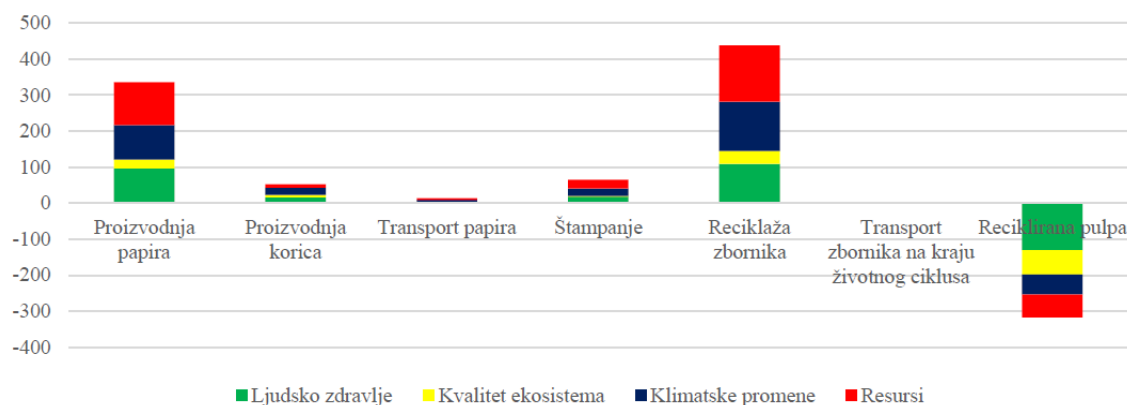
Materijal/energija	Proces iz Ecoinvent baze podataka	Količina i jedinica	Komentar
<i>Ulazni tokovi</i>			
Proizvodnja materijala plastičnog kućišta	Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer, ABS, at plant/RER S	4 g	Kućište USB memorije.
Proizvodnja plastičnog kućišta	Injection moulding/RER S	4 g	Proizvodnja plastičnog kućišta USB memorije.
Štampana ploča USB memorije	Printed wiring board, mixed mounted, unspec., solder mix, at plant/GLO S	5 g	Proizvodnja štampane ploče USB memorije.
Transport brodom	Transport, transoceanic freight ship/OCE S	135 kg·km	Transport iz Šangaja, Kina (15000 km).
Transport kombijem	Transport, van <3.5t/RER S	7,2 kg·km	Transport od luke do korisnika 800 km.
Čitanje zbornika radova ETIKUM konferencije	Use, computer, desktop with LCD monitor, active mode/CH S	10 hr	Korišćenje računara od strane korisnika.
Transport kamionom	Transport, lorry 3.5-7.5t, EURO5/RER S	0,45 kg·km	Transport do reciklažnog postrojenja 50 km.
<i>Izlazni tokovi</i>			
Objavljeni zbornik radova ETIKUM konferencije na USB memoriji	-	1 komad	Konačni proizvod.
Reciklaža plastičnog kućišta USB memorije	Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer, ABS, at plant/RER S	0,8 g	20 % ekonomske vrednosti novog ABS materijala je vrednost izdvojenog plastičnog materijala za reciklažu.
Reciklaža štampane ploče USB memorije	Disposal, treatment of printed wiring boards/GLO S	5 g	Tretman otpadnih štampanih ploča USB memorije.

Tabela 2. Inventar životnog ciklusa štampanog zbornika radova ETIKUM konferencije

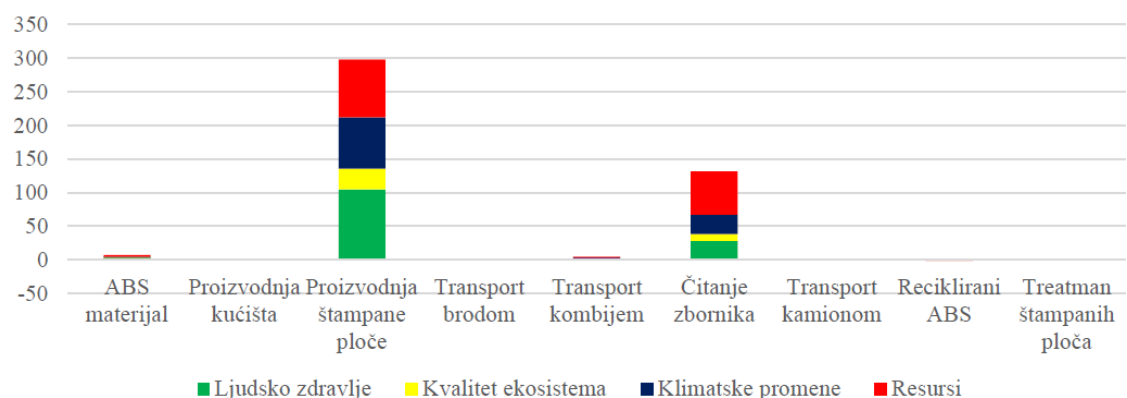
Materijal/energija	Proces iz Ecoinvent baze podataka	Količina i jedinica	Komentar
<i>Ulazni tokovi</i>			
Proizvodnja papira	Paper, newsprint, DIP containing, at plant/RER S	0,9 kg	Težina jedne A4 stranice je 4,5 g, stoga 200 stranica ima masu od 900 g.
Proizvodnja korica	Solid bleached board, SBB, at plant/RER S	80 g	Težina jedne A4 korice je 40 g.
Transport kamionom	Transport, lorry 7.5-16t, EURO5/RER S	180 kg·km	Transport 200 km od proizvodnje papira do štamparije.
Štampanje zbornika radova ETIKUM konferencije	Use, printer, laser jet, b/w, per kg printed paper/RER S	0,9 kg	Proces štampanja.
Transport kamionom	Transport, lorry 7.5-16t, EURO5/RER S	45 kg·km	Transport 50 km od korisnika do reciklažnog centra.
Reciklaža papira	Paper, recycling, with deinking, at plant/RER S	0,9 kg	Reciklaža otpadnog papira.
<i>Izlazni tokovi</i>			
Proizvod reciklaže papira	Sulphate pulp, average, at regional storage/CH S	0,72 kg	Pulpa je „izbegnuti“ proizvod kod reciklaže papira u LCA. Od 1 kg otpadnog papira može se izdvojiti oko 0.8 kg pulpe.
Odštampani zbornik radova ETIKUM konferencije	-	1 komad	Konačni proizvod.

3. REZULTATI

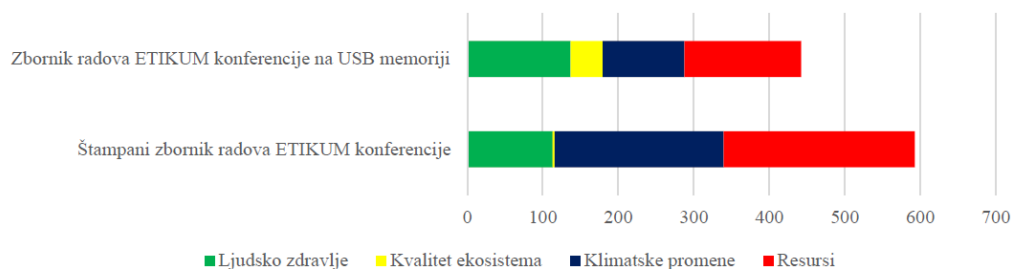
Rezultati LCA za živote cikluse štampanog zbornika radova ETIKUM konferencije i zbornika radova ETIKUM konferencije objavljenog na USB memoriji su prikazani na slikama 2, 3 i 4.



Sl. 2. Rezultati LCA za štampani zbornik radova ETIKUM konferencije



Sl. 3. Rezultati LCA za zbornik radova ETIKUM konferencije objavljen na USB memoriji



Sl. 4. Poređenje rezultata LCA štampanog i USB zbornika radova ETIKUM konferencije

4. DISKUSIJA I ZAKLJUČCI

Životni ciklus štampanog zbornika radova ETIKUM konferencije (slika 2) ima velike uticaje na životnu sredinu koji su vezani za proizvodnju papira i reciklažu zbornika na kraju životnog ciklusa. Najveći uticaji na životnu sredinu kod zbornika radova ETIKUM konferencije objavljenog na USB memoriji (slika 3) su vezani za proizvodnju štampanih ploča i čitanje zbornika primenom računara. Kao što se i može očekivati, zbornika radova ETIKUM konferencije objavljen na USB memoriji ima manji ukupan uticaj na životnu sredinu od štampanog zbornika radova ETIKUM konferencije (slika 4). Ako bi se USB memorija koristila i za druge potrebe prenosa i skladištenja podataka, razlika u ukupnom uticaju na životnu sredinu bi bila još veća. Prema tome, ukupno opterećenje životne sredine od strane zbornika objavljenog na USB memoriji bi bilo znatno manje.

Buduća istraživanja bi trebala da uključe detaljniju analizu inventara kako bi se omogućila kompletna studij LCA. Analiza osetljivosti rezultata LCA bi pružila korisne informacije o istraživanim životnim ciklusima, takođe bilo bi korisno dodati procese koji trenutno nisu uključeni u granice sistema.

5. REFERENCES

- [1] Agarski, B., Nikolić, V., Kamberović, Ž., Anđić, Z., Budak, I.: *Comparative life cycle assessment of Ni-based catalyst synthesis processes*, Journal of Cleaner Production 162, 7-15, 2017.
- [2] Moberg, A., Johansson, M., Finnveden, G., Jonsson, A.: *Printed and tablet e-paper newspaper from an environmental perspective - A screening life cycle assessment*, Environmental Impact Assessment Review 30, 177-191, 2010.
- [3] Bull, J.G., Kozak, R.A.: *Comparative life cycle assessments: The case of paper and digital media*, Environmental Impact Assessment Review 45, 10-18, 2014.

- [4] Karapetyan, A., Yaqub, W., Kirakosyan, A., Sgouridis, S.: *A Two-Stage Comparative Life Cycle Assessment of Paper-Based and Software-Based Business Cards*, Procedia Computer Science 52, 819 – 826, 2015.
- [5] Hirschier, R., Achaclooui, M.A., Hilty, L.M.: *Evaluating the sustainability of electronic media: Strategies for life cycle inventory data collection and their implications for LCA results*, Environmental Modelling & Software 56, 27-36, 2014.
- [6] Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.-J., Doka, G., Dones, R., Heck, T., Hellweg, S., Hirschier, R., Nemecek, T., Rebitzer, G., Spielmann, M.: *The ecoinvent database: Overview and methodological framework*, International Journal of Life Cycle Assessment 10, 3-9, 2005.
- [7] Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., Rosenbaum, R.: *IMPACT 2002+: a new life cycle impact assessment methodology*. International Journal of Life Cycle Assessment 6, 324-330, 2003.

Zahvalnica: Rezultati prezentovani u ovom radu su realizovani u okviru projekta "Razvoj inovativne metodologije za ekodizajn proizvoda i procesa", broj rešenja 142-451-3593/2016-02, finansiranog od strane Pokrajinskog sekretarijata za visoko obrazovanje i naučnoistraživačku delatnost Autonomne Pokrajine Vojvodine.

Autori: Doc. dr Boris Agarski, Vanr. prof. dr Igor Budak, Mast. inž. zašt. živ. sred. Milana Ilić Mićunović, Vanr. prof. dr Đorđe Vukelić, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Tel.:+381 21 4852306, Fax:+381 21 454-495. Prof. dr Borut Kosec, Univerzitet u Ljubljani, Fakultet prirodnih nauka i inženjerstva, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenija, Tel.: +386 1 2000410, Fax: +386 1 4704560
E-mail: agarski@uns.ac.rs
budaki@uns.ac.rs
milanai@uns.ac.rs
vukelic@uns.ac.rs
borut.kosec@omm.ntf.uni-lj.si

Ilić Mićunović, M., Agarski, B., Kosec, B., Nagode, A., Miroslavljević, Z.

**PERSONALNA IZLOŽENOST PEŠAKA ZAGAĐIVAČIMA VAZDUHA NA
PROMETNOJ SAOBRAĆAJNICI GRADA NOVOG SADA**

***Rezime:** Emisije motornih vozila su identifikovane kao glavni izvor zagađenja vazduha u urbanim područjima. U okviru rada ispitivana je koncentracija lako isparljivih organskih jedinjenja (VOC) i elementarni sastav pojedinačnih čestica merenih u neposrednoj blizini najfrekventnije saobraćajnice Grada Novog Sada. Tehnika merenja pomoću personalnog uzorkivača omogućuje mobilnost pešaka i procenu personalne izloženosti. Utvrđena je najveća koncentracije benzena. Ispitivanje elementarnog sastava čestica omogućio je njihovu klasifikaciju na osnovu sadržaja. Energetsko disperzivna spektroskopija (EDS) utvrdila je visok nivo ugljenika, aluminijuma i silicijuma, ali i prisustvo toksičnih metala. Rezultati studije pružaju informacije o uticaju emisije saobraćaja na urbano područje, kvalitet vazduha i javno zdravlje.*

***Ključne reči:** Personalno uzorkovanje, zagađujuće materije, VOC, EDS*

1. UVOD

Zagađenje vazduha u urbanim sredinama je jedna od najproblematičnijih tačaka sa kojim se trenutno suočava svetska populacija [1]. Problem raste sa ubrzanim porastom broja stanovnika u urbanim sredinama, lošim urbanističkim planovima, industrijskom ekspanzijom, i porastom broja i upotrebe motornih vozila. Ispitivanje kvaliteta vazduha je važno za razumevanje potencijalne izloženosti stanovništva, procene uticaja na ljudsko zdravlje i njihovu dobrobit.

Istraživanja su pokazala da se emitovane zagađujuće materije iz saobraćaja delom direktno deponuju, dok ostatak ostaje da lebdi u vazduhu dug vremenski period [2]. Materije predstavljaju kompleksnu mešavinu čestica i zagađivača. Posledica su slobodnog kretanja vozila na putu, što rezultuje resuspenzijom praškastih materija, kao i sporog kretanje vozila na saobraćajnim raskrsnicama, što izaziva nepotpuno sagorevanje goriva i emitovanja zagađivača u atmosferu [3].

Dugoročna izloženost zagađenju vazduha koje potiče od saobraćaja su povezan sa nizom negativnih uticaja na zdravlje, kao što su problemi sa disajnim putevima, ali i do povećanja morbiditet i mortalitet [4]. Svetska zdravstvena organizacija klasifikovala je izduvne gasove dizel motora u Grupu I karcinogena [1]. Pri tom, posebno je ugroženo stanovništvo gusto naseljenih gradova, gde se frekventni saobraćaj odvija u neposrednoj blizini stanovništva, u cilju povećanja mobilnosti, što istovremeno dovodi do povećava izloženost ovim zagađujućim materijama. Ispitivanje kvaliteta vazduha na

ovakvim lokacijama je značajno i zbog činjenice da su saobraćajnice okružene gustim i visokim zgradama koje formiraju ulične kanjone koje u velikoj meri ograničavaju disperziju mobilnih emisija [5].

Da bi odredili stepen ugroženosti stanovništva, na ovim lokalitetima, potrebno je izvršiti što preciznija merenja. Personalni monitoring ispituje zagađenja u disajnoj zoni učesnika, gde se uzorkivač nosi sa sobom i ne ometa kretanje, a radi procene personalne izloženost.

2. MATERIJALI I METODE

2.1 Uzorkovanje

Merenja su izvršena duž jedne od najprometnijih pešačkih staza u Gradu Novom Sadu, duž Bulevara Oslobođenja (slika 1a) u vremenskom periodu od 3h. Pešačka staza je neposredno uz frekventnu saobraćajnicu, i okružena je zgradama duž cele zone (slika 1c). Ruta obuhvata sledeće:

- Započinje od ugla Bulevara Jaše Tomića i Bulevara Oslobođenja, gde je i železnička i autobuska stanica za gradske, prigradske, međumesne i međunarodne linije prevoza.
- Ruta pešaka obuhvata pešačke prelaze na visoko frekventnim raskrsnicama, gde se ukrštaju glavni putevi, od kojih je najfrekventnija raskrsnica ulice Bulevar Oslobođenja i Futoške ulice (slika 1d).
- Duž rute se nalazi više restorana, supermarketa, tržni centar, preduzeće EPS distribucija, JP Srbijagas i Naftna industrija Srbije.



Sl. 1. Mapa uzorkovanja: a) ruta pešaka; b) pozicija uzorkivača; c) pešačka staza uz saobraćajnicu duž Bulevara Oslobođenja; d) raskrsnica ulice Bulevar Oslobođenja i Futoške ulice.

Za merenje je korišćen personalni uzorkivač EGO PLUS TT, koji radi na principu pumpe. Usisna cev se postavlja u neposrednu blizinu disajnih organa pešaka, ne dalje od 30cm (slika 1b), da bi se dobila što realnija slika o polutantima koje učesnik udiše u okruženju. Uređaj se bazira na principu vremenski integrisanih uzorkivača za kontinualno merenje, prikupljanjem zagađujućih materija na filter ili podloge.

Na uređaju su izvršene dve vrste merenja. Merenje gasova gde je kao adsorbens korišćen aktivni ugljen koji se nalazi u staklenoj cevčici (tubi). Postavka uređaja sa držačem filtera od mešavine celuloznih estara sa konusnim nastavkom prilagođena je za prikupljanje inhalativnih frakcija prašine. Prečnik filtera iznosi 25 mm, i održavanje pre i posle uzorkovanja na 25°C i 38% relativne vlažnosti vazduha. Filteri od mešavine celuloznih estara korišćeni su kao pogodni za skenirajuće elektronske mikroskope, koji zbog svoje teksture omogućavaju niža statička odbijanja čestica i manje su podložni promeni težine usled apsorpcije vlage [6].

Vremenski uslovi na dan uzorkovanja: minimalna temperatura 8°C, maksimalna 24°C, vetar severozapadni brzine 2 m/s, bez padavina.

2.2 Gasna hromatografija

Gasna hromatografija je analitička instrumentalna metoda kojom se razdvaja smeša hemijskih jedinjenja na osnovu raspodele između dve faze, pokretne i nepokretne. Pored razdvajanja hromatografija se koristi i za identifikaciju hemijskih jedinjenja. Uzorak se ubacuje u

zagrejani injektor, prolazi kroz kolonu za razdvajanje, nošen inertnim gasom, i detektuje kao serija signala na pisacu kada komponente izlaze iz kolone. U gasnoj hromatografiji mobilna faza je inertni gas (obično helijumi), a stacionarna faza je ili čvrsta ili tečnost prevučena preko čvrstih čestica koje se nalaze u koloni.

Tuba sa aktivnim ugljenom dostavljena je laboratoriji za ispitivanja na Departmanu za ekotoksikološka ispitivanja na Institutu za zaštitu na radu u Novom Sadu. Traženo je ispitivanje benzena, toluena, etilbenzena i ksilena.

U cilju dobijanja rezultata određenih supstanci prisutnih u uzorku vazduha, za analizu je korišćena metoda Q5-04-46 propisana standardom SRPS EN 14662-2 [7].

2.3 Energetsko disperzivna spektroskopija

Spektroskopska analiza radi na principu očitavanja energije koja se dobija pri udaru elektrona u atom pri čemu dolazi do oslobađanja energije. Interakcija elektronskog snopa sa površinom uzorka omogućava identifikaciju i određivanje koncentracije elemenata prisutnih u površinskom sloju. Pri ovoj analizi, fokusirani elektronski snop pada na površinu uzorka i, između ostalog, izaziva emisiju X zračenja, čija je energija karakteristična za dati pobuđeni atom, a intenzitet srazmeran koncentraciji pobuđenih atoma na mestu pada elektronskog snopa.

Filtera od mešavine celuloznih estara je prvo dva puta naparen ugljenikom, da bi uzorak bio dovoljno provodljiv za EDS analizu. EDS analiza je izvršena radi utvrđivanja sastava prikupljene

inhalativne frakcije praškastih materija.. EDS sistem je kalibrisan sa X-Checker na referentnom uzorku od čelika (stainless steel 304).

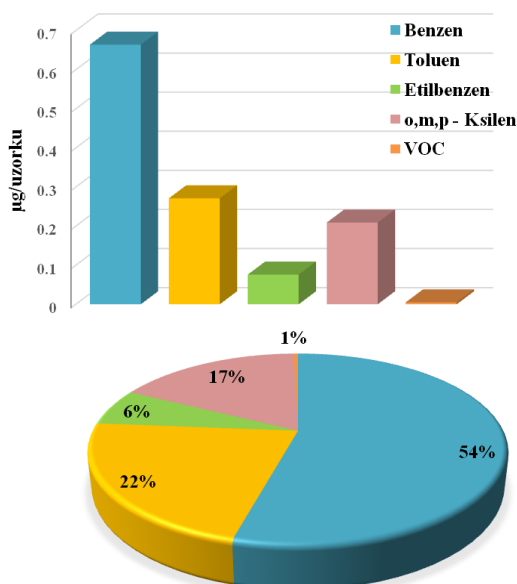
3. REZULTATI I DISKUSIJA

Nakon izvršenog merenja, na uređaju smo dobili sledeće podatke (tabela 1.):

Tabela 1. Tehnički podaci sa personalnog uređaja

Vreme uzorkovanja	Prosečna temperatura	Ukupna zapremina	Normal. zapremina
3h i 1m	28°C	145 l	141,6 l

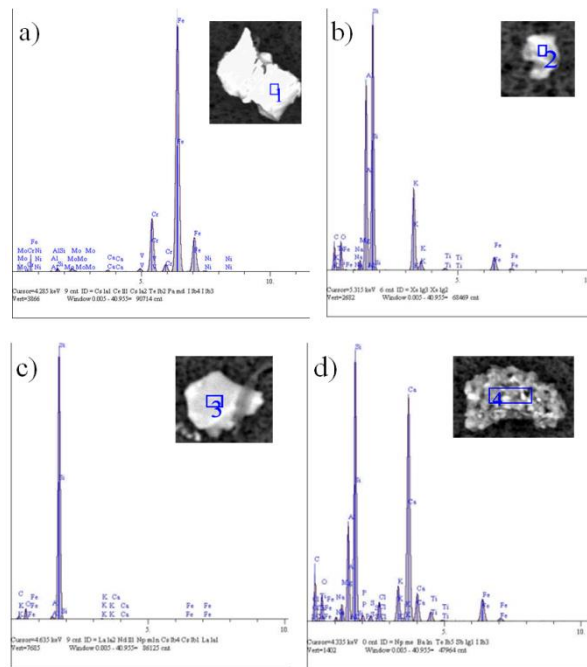
Rezultati gasne hromatografije pokazali su najveći sadržaj benzena, zatim toluena i ksilena i znatno manje etilbenzena i ostalih lako isparljivih organskih jedinjenja (slika 2). Ova jedinjenja su sastojak motornih goriva, ili se dodaju za poboljšanje njihovih performansi.



Sl. 2. Koncentracija VOC-a u uzorku

Koncentracija prikupljenih jedinjenja simulira udeo koji bi dospao u pluća pešaka tokom kretanja u ovoj zoni. Benzen je klasifikovan u grupu I kancerogenih materija. Pored toga, benzen, kao i toluen, ksilen i etilbenzen mogu da uzazovu neurološke i kardiološke smetnje, iritacije kože i očiju, kao i respiratorne probleme. EPA je utvrdila da oralna referentna doza (RfD) benzena ne bi smelada bude veća od 0,004 miligrama benzena po kilogramu telesne mase dnevno (mg/kg/d), toluena 0,08 mg/kg/d, etilbenzena 0,1 mg/kg/d, o,m-ksilena 1mg/kg/d. Stepenn inhalacije ovih jedinjenja u toku dana mnogo zavisi od brzine vetra, vlažnosti vazduha, temperature i frekvencije saobraćaja, ali ovom tendencijom nivo benzena bi prešao dnevna ograničenja, uzimajući u obzir da je tuba za adsorpciju težine svega 800mg.

EDS analiza je pokazala značajno prisustvo silicijuma, aluminijuma i gvožđa, zatim kalcijuma i kalijuma, nešto manje natrijuma, magnezijuma i titanijuma, kao i fosfora, sumpora, molibdena, nikla, volframa, horma i hlora, pored ugljenika i kiseonika (slika 3).



Sl.3. EDS analiza prikupljenih čestica

Aluminijum silikati (AlSi), silicijum dioksid (SiO₂), kalcijum karbonat (CaCO₃), oksidi gvožđa (Fe_xO_y) i kalijum oksid (K₂O) su glavne komponente u ovim česticama. Čestice bogate AlSi se sastoji od aluminijum-oksida i silicijuma sa manjom koncentracijom elementima kao što su C, Na, Mg, K, Ti i Fe (slika 3c). Ove čestice potiču od tla, gde se u glavne sastojke uključuju feldspat (Al, Si, O), kvarc (SiO₂) i minerali gline (Al i Si sa manjom količinom Fe, K i Mg).

Čestice bogate CaCO₃ uključuju kalcit (slika 3d) i smešu CaCO₃ sa SiO₂ i Fe_xO_y. Ovi čestice su ili prirodnog porekla ili se generišu prilikom rekonstrukcije/izgradnje puteva [8]. Ova čestica sadrži i visoke pikove na C, O, Ca i S, kao i manje na Na i K, što potiče od CaSO₄. Čestice mineralne prašine mogu takođe reagovati sa sumporom i azotnim oksidima u vazduhu ili „sekundarnim kiselinama“ kao što su H₂SO₄, HNO₃ i HCl, formirajući sekundarne mineralne čestice [9]. Zbog toga, poreklo čestica bogatih sa CaSO₄ može biti od prahova starih mineralnih čestica (tj. CaCO₃ čestice su reagovale sa H₂SO₄) ili direktnom emisijom soli gipsa.

Čestice bogate SiO₂ uglavnom imaju izražene pikove na samo ova dva elementa (slika 3b). Dok se čestice bogate gvožđem prepoznaju po izrazito svetloj boji (slika 3a). Ove čestice koje sadrže i Ti,

V, Cr, Ni uglavnom se klasifikuju kao čestice prelaznih metala. Takođe, imaju tamniji kontrast i velike su gustine. S obzirom da je merenje rađeno u neposrednoj blizini saobraćaja, to ukazuje da su čestice prelaznog metala uglavnom emitovane od motornih vozila (npr. abrazije guma/kočnica).

Pri tom sve ove u vazduhu lebdeće čestice mogu da putuju na velike udaljenosti imaju afinitet da sakupljaju organska i neorganska jedinjenja na svojoj površini.

4. ZAKLJUČCI

U radu je ispitivana koncentracije lako isparljivih organskih jedinjenja i elementarni sastav čestica koji su prikupljeni personalnim uzorkivačem duž pešačke staze koja se nalazi u neposrednoj blizini frekventne saobraćajnice Grada Novog Sada.

Merenje VOC-a su pokazala najveću koncentraciju benzena, koji je ujedno u kategoriji najopasnijih organskih jedinjenja po ljudsko zdravlje. Dobijeni rezultati personalne izloženosti omogućavaju dalje proračune za potencijalne opasnosti od pojedinih oboljenja.

Energetsko disperzivna spektroskopija nam je omogućila uvid u elementarni sastav čestica i njihovu klasifikaciju. Utvrđeno je prisustvo karbonatnih čestica (od procesa sagorevanja), mineralna prašina, prisustvo prelaznih metala. Prisutni su i metala kao što su aluminijum, nikl, molibden, hrom čija akumulacija u ljudskom organizmu nije poželjna i može da ima brojne negativne efekte po zdravlje ljudi.

S obzirom da rezultati personalnog uzorkivača pružaju informacije o udelu zagađujućih materija koji bi dospeli u respiratorni sistem pešaka, merenja su pokazala potrebu za poboljšanjem kvaliteta vazduha kako bi se smanjili zdravstveni rizici.

5. REFERENCE

- [1] WHO, 2012. IARC: *Diesel Engines Exhaust Carcinogenic. International Agency for Research on Cancer, World Health Organization press N 213, 12 June, 2012.*
- [2] Adiang, C.M., Monkam, D., Lenouo, A., Njeugna, E., Gokhale, S.: *Evaluating impacts of two-wheeler emissions on road side air quality in the vicinity of abusy traffic intersection in Douala, Cameroon.* Air Quality, Atmos. Health 1-12, 2016.
- [3] Adeniran, J.A., Yusuf, R.O., Olajire, A.A.: *Exposure to coarse and fine particulate matter at and around major intra-urban traffic intersections of Ilorin metropolis, Nigeria.* Atmos. Environ. 166, 383-392, 2017.
- [4] Hoek, G., Krishnan, R.M., Beelen, R., Peters, A., Ostro, B., Brunekreef, B., Kaufman, J.D.: *Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: a review.* Environ. Health 12, 43, 2013.
- [5] Agata Rakowska, A., Wong, K.C., Townsend, T., Chan, K.L., Westerdahl, D., Ng, S., Močnik, G., Drinovec, L., Ning, Z.: *Impact of traffic volume and composition on the air quality and pedestrian exposure in urban street canyon,* Atmos. Environ. 98, 260-270, 2014.
- [6] Health and Safety Laboratory, Methods for the Determination of Hazardous Substances MDHS14/3: *General methods for sampling and gravimetric analysis of respirable and inhalable dust,* 2000.
- [7] SRPS EN 14662-2 *Kvalitet vazduha ambijenta, Standardna metoda za određivanje koncentracije benzena, Deo 2: Uzorkovanje pumpom, desorpcija rastvaračem i gasna hromatografija.*
- [8] Iordanidis, A., Buckman, J., Triantafyllou, A., Asvesta, A.: *Fly ash-airborne particles from Ptolemais-Kozani area, northern Greece, as determined by ESEM-EDX,* Int. J. Coal Geol. 73, 63-73, 2008.
- [9] Maskey, S., Chae, H., Lee, K., Dan, N.P., Khoi, T.T., Parka, K.: *Morphological and elemental properties of urban aerosols among PM events and different traffic systems,* Journal of Hazardous Materials 317, 108-118, 2016.

Zahvalnica: Rezultati prezentovani u ovom radu su realizovani u okviru projekta "Razvoj inovativne metodologije za ekodizajn proizvoda i procesa", broj rešenja 142-451-3593/2016-02, finansiranog od strane Pokrajinskog sekretarijata za visoko obrazovanje i naučnoistraživačku delatnost Autonomne Pokrajine Vojvodine.

Autori: Mast. inž. zašt. živ. sred. **Milana Ilić Mićunović, Doc. dr Boris Agarski, Mast. inž. zašt. živ. sred. Zorica Miroslavljević,** Univerzitet Novi Sad, Fakultet Tehničkih Nauka, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Serbia, Tel: +381 21 485 2350, Fax: +381 21 454-495.

Prof. dr Borut Kosec, Vanr. prof. dr Aleš Nagode, Univerzitet u Ljubljani, Fakultet prirodnih nauka i inženjerstva, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenija, Phone.: +386 1 2000410, Fax: +386 1 4704560

E-mail: milanai@uns.ac.rs
agarski@uns.ac.rs
borut.kosec@omm.ntf.uni-lj.si
ales.nagode@omm.ntf.uni-lj.si
zoricavojnovic@uns.ac.rs

SCIENTIFIC CONFERENCE WITH INTERNATIONAL PARTICIPATION
ETIKUM 2017

PROCEEDINGS

Session 4:
MEASUREMENT IN THE FIELD OF
CULTURAL HERITAGE

Novi Sad, 06 – 08 December 2017.

Bosák, M.**CULTURAL HERITAGE OF MICHAEL BOSAK – AMERICAN-SLOVAK BANKER**

Abstract: Banker Michael Bosak (December 10, 1869, Okruhle, Slovakia - February 18, 1937, Scranton, Pa., USA) is one of the leading Slovak bankers in America from the early 20th century. His name is usually associated only with his signature on US dollar bank notes 5, 10 and 20 from the 1907. In addition to banking and business activities, he was actively engaged in national activities in the United States and also in Slovakia. In 1918, he was one of the signatories of the historic Pittsburgh Agreement, which was the foundation of the birth of Czechoslovakia.

Key words: Michael Bosak, US dollar bank notes, Pittsburgh Agreement

1. INTRODUCTION

Michael Bosak was born on December 10, 1869 in the village of Okruhle, located in the former Šariš County (now the district of Svidník) between the towns of Giraltovce and Svidník. A poor country, without fertile soil, industry and railways, offered little possibility for earning money. Strong young men sought employment on Hungarian great estates. For many others the way led to America.

In the summer of 1886, when he was sixteen and a half years old, Michael Bosak longed for a new world where it would be possible to earn his way more easily. He longed for America.

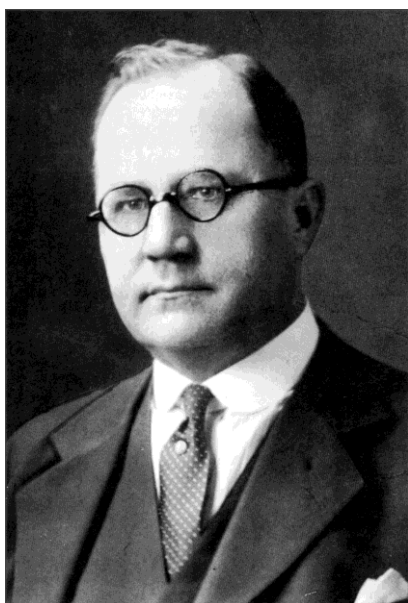


Fig. 1. Michael Bosak

Like other Slovak immigrants, he worked in a mine breaker where coal was sorted and graded. His first job as a slate picker in Stockton,

Pennsylvania, was a low paying job; he earned 75 cents a day. By 1888, Michael Bosak was working as a shifter on the construction of a new railway and earning \$1.50 a day. He still was not satisfied with this type of work and longed for something better.

In 1893, Michael Bosak as 24 years old bought a small bar, a pub in Olyphant, which dramatically changed his life. In the small "coal" town lived about thousands of Slovaks and in his pub began meetings of Slovak colony. The immigrants began to turn to "Mike", as they called him, for advice and help, especially with various financial transactions. The Slovaks trusted him and often gave him their money to save. They also wanted him to book passage on ships for themselves as well as their family members. Thus, the little inn began to change slowly into a ship travel agency.

In 1897, the little inn began selling spirits wholesale. At the same time, he opened his private bank and ship travel agency known as, MICHAL BOSAK PRIVATE BANK. It was a really interesting bank. If a countryman wanted to send money home, he went to the bank. If he wanted to send his wife a ticket on a ship, he went to the bank. If someone had disputes concerning property or had something to sell or buy, he went to the bank.

In 1902, when he was 33 years old, he helped to organize the Citizens Bank in Olyphant and also he entered into the mysteries of banking. [1]

2. THE SIGNATURE ON A DOLLAR BANK NOTES

In April 1792, the U.S. Congress adopted a monetary law that determined the dollar as the currency of the new nation and the first U.S. silver dollar came into circulation in 1794. Foreign

coins, which had been used until then, gradually stopped being valid.

As an interesting fact is stated that the word dollar is the English version of the word taler. Taler was abbreviated term for joachimsthaler, silver coin, which was minted in the early 16th century in the Czech Jáchymov. Subsequently, the word taler was customized for coin currency.

The first paper dollars that the U.S. government issued were "Demand Notes" released in 1861 based on the law from 17th July 1861. According to the green color on the reverse side were those money and other types of U.S. paper money afterwards called "Greenbacks". By the Act of 1862, another kind of currencies "United States Notes" were modified for issuing. [2]



Fig. 2. "Greenbacks"

Banknotes "National Bank Notes" were in the years 1863-1928 the most common tender in the USA. They were issued by several thousand private banks to which the U.S. government, under the National Banking Act of 25th February 1863, confer rights to issue for upcoming 20 years. All the notes had the same look and differed only by the name of bank, number of granted emission rights, signatures and mark of area where the Bank had its seat. [4]

All kinds of paper money issued by the United States in the years 1861 - 1928 as the official legal tender of the United States are valid until present, although they were gradually withdrawn from circulation. Sometimes we talk about them as "old series" or "large format". It is obvious that the collector value of majority of these tenders is several times higher than nominal value.

In 1929, 10th July was a "large format" of U.S. paper money with dimensions of 189x79 mm replaced by "small format", which is also known as the 1928 series; the dimension is 156x66 mm.

In the years 1861-1929 about 140 different shapes were made and more than 1,200 variants of notes. By the introduction of currencies of "small format" in 1928, system of currency representation was introduced. Tenders with the same nominal value of all kinds have for the obverse and reverse site same prescribed pattern. At the same time, portraits of presidents were

moved from the left side to the middle of the notes. [3]

Name Michael Bosak was well respected and he easily achieved prominence in the banking industry. The American government allowed certain banks to issue bank notes at that time. The First National Bank of Olyphant, Pa. received such permission, and thus Bosak's name was printed on an American bank note. His signature, as President of the First National Bank of Olyphant, Pa., can be found on the five-, ten- and twenty-dollar bank notes issued on June 25, 1907. [2]



Fig. 3. Signature of Michael Bosak on the banknotes

3. SIGNATURE ON THE PITTSBURGH PACT

T. G. Masaryk, during his visit to the United States in May 1918, took part in the meeting of the committee of the Czecho-Slovak National Council. After welcoming him, Masaryk was shown the Cleveland Agreement and asked to give his opinion. The proposal for the Agreement was prepared by Jozef K. Tvrzický, Secretary of the Czech National Association in the USA. Together with representatives of the Slovak League, they accepted it at a joint conference in Cleveland on October 22-23, 1915. Here is the text:

THE CLEVELAND AGREEMENT

"The Czech National Association and Slovak League in America have drawn up - for the purpose of acting together and proceeding in unison for the attainment of political freedom and for the independence of the Czech and Slovak nation - the agreement based on the following Program.

Program:

1. The independence of Czech lands and Slovakia.
2. Unification of the Czech and the Slovak Nations in a federation, with the total national autonomy of Slovakia with its own parliament, own state administration, total cultural freedom with full use of the Slovak language, own

financial and political administration in the state Slovak language.

3. Franchise - universal, secret, and direct.

4. Form of government - personal union with a democratic state system, similar to that of England.

5. These points create the basis of a bilateral agreement and can be supplemented or widened respectively only on the basis of an agreement between both sides. The Czech National Association and the Slovak League both have the right to make changes if needed." [6]

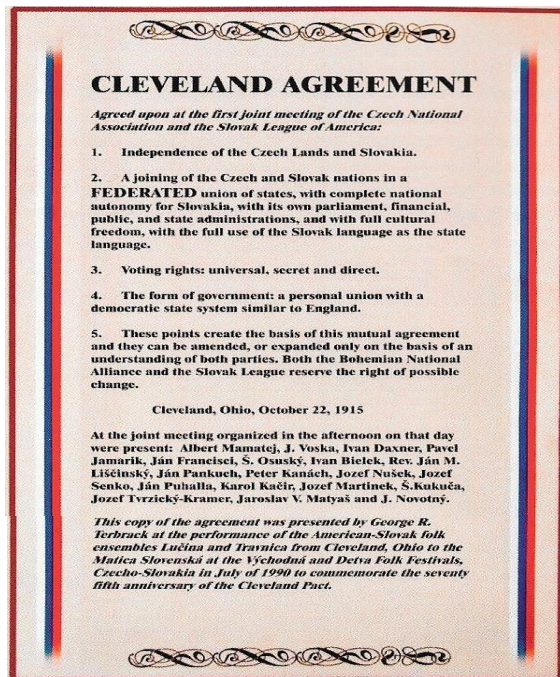


Fig. 4. The Cleveland Agreement

On behalf of American Slovaks, the Agreement was signed by A. Mamatey and I. Daxner. The Agreement was a manifestation of the effort of Czechs and Slovaks living in the United States to draw up a political agreement related to the common proceedings leading to the liberation of the Slovak and Czech Nations from the Magyar-German yoke. The text of the Cleveland Agreement was published for the first time in national newspapers on November 24, 1915.

Prof. T. G. Masaryk did not agree with the form of the new state as it had been declared in the Cleveland Agreement. He took his pen, and with the words "we will do it this way", in a bold hand he wrote a new agreement...

THE PITTSBURGH PACT

"The Czecho-Slovak Agreement drawn up in Pittsburgh, Pa., on May 30, 1918. Representatives

of Slovak and Czech organizations in the United States, the Slovak League, the Czech National Association and the Association of Czech Catholics in the presence of the Chairman of the Czecho-Slovak National Council, Prof. Masaryk, discussed the Czecho-Slovak question and presented the following program declarations and adopted the following resolution:

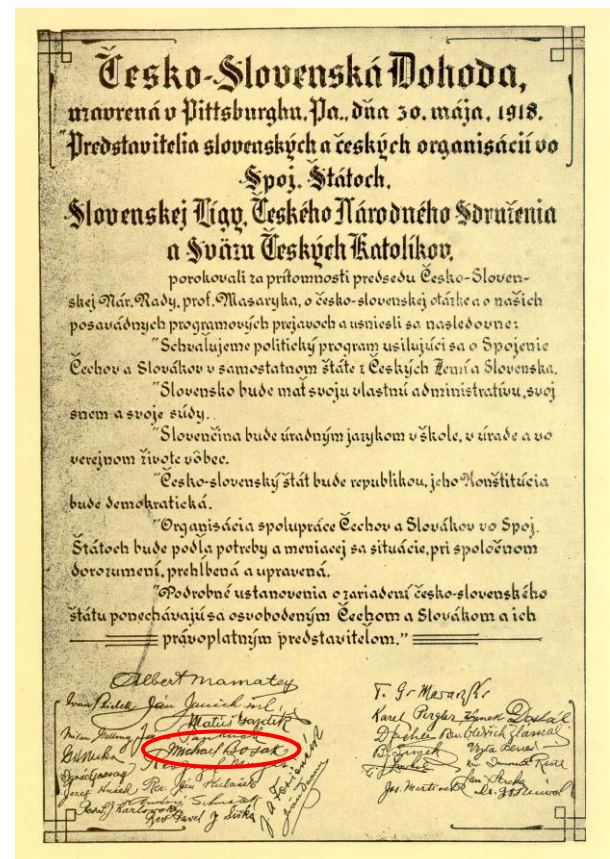


Fig. 5. The Pittsburgh Pact

We authorize the political program that endeavors to connect the Czechs and Slovaks into an independent state consisting of Czech lands and Slovakia.

Slovakia will have its own administration, its own Parliament and its own courts.

The Slovak language will be the official language in schools, offices and public life.

The Czecho-Slovak State will be a republic, its constitution will be democratic.

The cooperation of Czechs and Slovaks in the USA will be organized according to their needs and changing situation and will be expanded and modified in accordance with the agreement of both sides.

Detailed decrees related to arrangements of a Czecho-Slovak state are left to the Czechs and Slovaks and their legal representatives." [6]

The American historian, V.S. Mamatey, posed the question: "Why was T. G. Masaryk so

compliant to Slovak requests and why did he promise everything to us?" In his answer, he analyzed the problematic situation in the context of American policy concerning Eastern and Central Europe:

"The Pittsburgh Agreement was drawn up to influence American policy. It was created in a time when Masaryk was supposed to visit the American government and ask it for support related to Czecho-Slovak matters. At that time, Wilson was said to insist on the principle of self-determination in national disputes. If Masaryk had not relieved the doubts of American Slovaks by accepting the Pittsburgh agenda, many of them would have been able to frustrate his plans, despite his leadership role before the American public and political circles. But after final assurances, they supported him." [5]

Because the Agreement was written only in pen, organizers of this meeting had it rewritten in calligraphic form. The date of this Agreement shows May 30, 1918. In fact, it was written and signed on May 31, 1918. Four days after the Pittsburgh Pact had been signed, Masaryk visited the State Department where he met Minister Lansing. On June 19, 1918, he visited the White House where he received support and sympathy from President Wilson.



Fig. 6. President T.G. Masaryk (second from left) with Michael Bosak (third from left) in Czechoslovakia

All the participants did not sign the Pittsburgh Pact at the same time and for that reason the signatures look unorganized. T. G. Masaryk signed it on November 14, 1918 in Washington, shortly before his return to Europe, where he was already elected President. American Slovaks welcomed his election with satisfaction. Masaryk signed the Agreement although he knew he would not keep it. Bosak, as a member of the Czecho-Slovak National Council, also signed the Pact.

Later, on February 21, 1920, there was disappointment and indignation when the Temporary National Council in Prague accepted the Constitution of the ČSR. The Constitution mentioned only a single Czechoslovak Nation with no regard to the accepted Pittsburgh Pact.

4. CONCLUSION

Slovak organizations exist in America until today and results of their work are not represented only by building churches and schools. Organizations paid their attention at the beginning of the 20th century also to Slovakia, where they sent food, medical supplies and funds for the reconstruction of the destroyed Slovakia during the 1st World War. And it cannot be forgotten that thanks to their support the Pittsburgh agreement with signature of Michael Bosak - a basic document during the establishment of Czechoslovakia after the 1st World War was signed in May 30, 1918 in Pittsburgh.

5. REFERENCES

- [1] Bosák, M., Bosák, R.: *Michal Bosák, americký bankár zo Šariša*, Polygraf Print, Prešov, 1997, 204 pp., ISBN 80-968607-9-8.
- [2] Bosák, M., Bosák, R.: *História Bosákovej banky*, Vienala, s.r.o., Košice, 2007, 140 pp., ISBN 978-80-8073-810-5.
- [3] Friedberg, R.: *Paper Money of the United States*, Ninth Edition, Krause Publications, Wisconsin, 1997.
- [4] Hickman, J., Oakes, D.: *Standard Catalog of National Bank Notes*, Krause Publications, Wisconsin, 1998.
- [5] Minár, I.: *Americkí Slováci a Slovensko 1880-1980*, Bradlo, Bratislava, 1994, 217 pp, ISBN 80-7127-040-76.
- [6] Švorc, P.: *Zrod republiky*, Slovo, Košice, 1991, 132 pp., ISBN 80-85291-08-8

Authors: Prof.h.c. Ing. Martin Bosák, PhD., Faculty of Business Economy with seat in Košice, University of Economics in Bratislava, Tajovského 13, 041 30 Košice, Slovak Republic

E-mail:

martin.bosak@euke.sk

**SCIENTIFIC CONFERENCE WITH INTERNATIONAL
PARTICIPATION
ETIKUM 2017
NOVI SAD, SERBIA, DECEMBER 6-8, 2017**

**Miljević, B., Mauko Pranjic, A. Vučetić, S., van der Bergh, J.M., Sever Škapin, A.,
Ranogajec, J.**

**COMPUTED TOMOGRAPHY STUDY OF THE CRACKS MORPHOLOGY AND
BACTERIAL PROPAGATION IN CONCRETE STRUCTURES**

***Abstract:** Propagation of cracks in concrete is very important for deeper understanding of degradation processes and future healing mechanisms of historical objects. Classic methods for investigation of porosity proved to be useful for determining the cracks distribution, but not for determining their morphology and interconnection. Aiming to develop new method for concrete self-healing, it is crucial to determine the limits of method based on bacterial propagation inside the cracks. We have performed X-ray computed tomography (CT) on samples with and without bacteria. The results were compared with the surface morphology characterized by scanning electron microscopy.*

***Key words:** cultural heritage, X-ray computed tomography, self-healing concrete, cracks*

1. INTRODUCTION

Several methods for investigation of total porosity, namely Hg intrusion method, low temperature nitrogen adsorption and water absorption are useful for determination of cracks distribution in a concrete material. However, using these methods it is not possible to determine the cracks morphology and their interconnection. It would be of a great scientific and technological importance to make a 3D imaging of the cracked concrete structure by computed X-ray tomography method.

Computed tomography is a technique for non-destructive testing, developed in the 1970s, originally for medical purposes - for recording internal organs or soft tissue which the X-rays go through and, therefore, could not be recorded with fixed absorption radiography (RTG). Although the method itself was proposed much earlier (at the beginning of the 20th century), it could not be put into operation due to the complex three-dimensional reconstruction for which computer use was necessary. With the development of computer technology, the CT method emerged. Later development of increasingly sophisticated sources and X-ray radiation detectors resulted in a very high resolution which has opened up a series of possibilities for the use of CT for testing of technologically newly developed materials, as well as historical, archaeological ones.

The principle of the three-dimensional (3D) X-ray computed tomography is based on a different phase shift of the X-ray radiation when passing through the tested material at different angles of radiographic recording due to the heterogeneity of

the sample, whether it is a porous structure, a microstructure or domains in a structure that absorbs X-rays differently. The X-ray absorptive recordings of the examined object are performed from many angles, making a full circle. On the basis of the obtained projections a 3D reconstruction (tomogram) is made. The obtained volume depiction can have a resolution of up to one micrometre per pixel in laboratory systems in which the radiation beam is focused, while using the synchrotron and parallel X-ray beams, the resolution can be increased to the order of 100 nm per pixel.

Laboratory systems for testing of materials by computed tomography are described in several recent scientific papers [1,2], while the use of synchrotron radiation in art, archaeology and cultural heritage studies is described in the chapter of the book [3].

Computed tomography as a method for volumetric examination of the material interior opens up a number of possibilities and its basic advantages are reflected in the non-destructiveness, non-invasiveness, and particularly in the ability to observe the microstructure within the examined body, which is not possible using traditional radiographic methods. Particular emphasis should be placed on the possibility of three-dimensional reconstruction of the tested material, i.e. its interior and the possibility of testing biological material that very poorly absorbs or almost does not absorb X-ray radiation. These facts have already greatly contributed to the development of a diagnostic method for recording internal organs in medicine, while the CT method itself is less used to test materials.

In addition to the stated advantages provided by this highly applicable non-destructive method for visualizing the interior of the material, computed tomography carries some disadvantages and constraints. Firstly, in order to achieve a very good resolution it is necessary to do sampling, which is no longer a non-invasive material analysis. In the conservation and restoration sense, sampling can be justified if the analysed object is a small fraction of the construction material of a historical object whose microstructure is to be determined. Secondly, it is necessary to mention a restriction in terms of the analysed object's shape. Namely, the credible three-dimensional view of the two-dimensional object cannot be reproduced. Today, methods such as laminography [4] that overcome this problem are already being developed to test thin coatings. There are other minor technical challenges (not discussed here) regarding the X-ray beam collimation, the selection of the appropriate filter in the recording, the proper focusing and sample setting, the selection of the detector distance, etc.

Using the computed tomography for materials testing in cultural heritage could be very interesting, as this technique can be applied to various materials, regardless of material's ability to absorb X-ray radiation. Thus, it is possible to examine historical construction materials such as stone, brick, mortar, as well as various metals, glass, wood, plastic or any other material of inorganic or organic origin. In literature there are examples of the use of computed tomography on stone substrates for examination of their microstructure or porosity [5], or for determination of the consolidants' penetration [6]. The CT technique was used for examination of ancient Greek bronze coins [7] and medieval swords, historical objects made of wood [8] and the paintings on a wooden surface, as well as the research on wax seals [9]. To examine the whole Egyptian mummies [10] a special multi-detector CT method was applied. In addition to testing the interior of a material and its degradation, computed tomography is also used for the purpose of digital storage and virtual display with the aim of museum archiving and dissemination [5].

Regarding the application of micro-organisms in the protection of cultural heritage objects, various aspects of both desalinization and consolidation, as well as possible self-healing of rock or concrete material [11], are under development. There are several methods which use bacterial approach to stop crack propagation in concrete structures. Therefore, it would be of high scientific relevance to determine the limits of the bacterial propagation inside the cracks.

2. EXPERIMENTAL

For the purpose of studying the internal microstructure, i.e. the appearance of pore and their connection (porous structure) as well as the penetration of bacteria (*Pseudomonas stutzeri*) within the concrete material, computed tomography scans were performed using laboratory CT system *Xradia MicroXCT-400* at the Slovenian National Building and Civil Engineering Institute in Ljubljana, Slovenia. The scanning parameters were $U=80$ kV, $P=10$ W, 1000 frames per circle with the exposure time of 30 s. The resolution achieved was 1.1 μm . For the 3D visualization of the tomography reconstruction the *TXM3DViewer* software was used.

The experiments were carried out on three different types of samples: "B" a blank sample without bacteria, "S" a sample with the bacterial suspension and "P" the sample with the bacteria firstly mixed with a poultice [12] and then applied.

Complementary to CT scanning, the scanning electron microscopy (SEM) measurements were performed on the same samples in order to compare different imaging characterization techniques. The SEM analysis setup was *JEOL 5500 LV* scanning electron microscope with energy dispersive spectroscopy (EDS) analyser *OXFORD*.

3. RESULTS AND DISCUSSION

As an example of the results of the macro-CT imaging of the samples, the cross-section slices are shown in the figures 1.a)-c) while the figure 1.d) shows a 3D tomogram of the measured sample. The macro-CT measurements were performed with the resolution of 7 $\mu\text{m}/\text{pixel}$. The crack inside the concrete sample is clearly visible, as well as the aggregate inclusions. However, the microbial material cannot be seen at this magnification. Therefore, after the macro-CT measurements, a small piece (2 mm x 1 mm) of each sample was taken for the micro-CT measurements. The maximal resolution achieved was 1.1 $\mu\text{m}/\text{pixel}$. For illustration purposes, the figure 2 shows the results of the μCT measurements on the sample S, the cross-section slices (fig. 2.a)-c)) and the 3D tomogram (fig. 2.d)). The inner morphology can be seen and the bright spots in the gap (fig. 2.c)-d)) might indicate the presence of the bacterial agglomerates.

In order to compare the volumetric CT method with the surface sensitive imaging method, all of the samples were scanned with scanning electron microscopy at different magnifications. Figure 3 shows the SEM images which depict the bacterial

material (bright features) distributed on the concrete sample surface. Both images were recorded at the magnification of 10,000 times. Comparing these two SEM images, one of the sample P (fig. 3. left) and another of the sample S (fig. 3. right), it can be concluded that the microbial agglomerates have bigger dimensions when the bacterial suspension was applied on the concrete than in the case when the poultice, previously mixed with bacteria, was applied.

4. CONCLUSION

In this paper, the principles of the computed tomography as a volumetric technique for the imaging of the material's inner structure were presented. Particularly, the state-of-the-art use of the CT method applied for the investigation of cultural heritage objects was considered.

The results of the computed tomography study of the cracks morphology and the bacterial propagation in concrete structures were presented and discussed regarding a different application of microbial material. The volumetric CT imaging results were compared to the surface sensitive scanning electron microscopy images measured at the same samples.

5. ACKNOWLEDGEMENT

The short term scientific mission under the reference COST-STSM-ECOST-STSM-CA15202-200317-084111 within the EU project COST CA 15202 "Self-healing as preventive Repair of CONcrete Structures - SARCOS" is greatly acknowledged.



Fig. 1. CT images of the sample "P" scanned with the resolution of 7 μ m per pixel: cross-section slices (a, b and c) and a volumetric view (d).

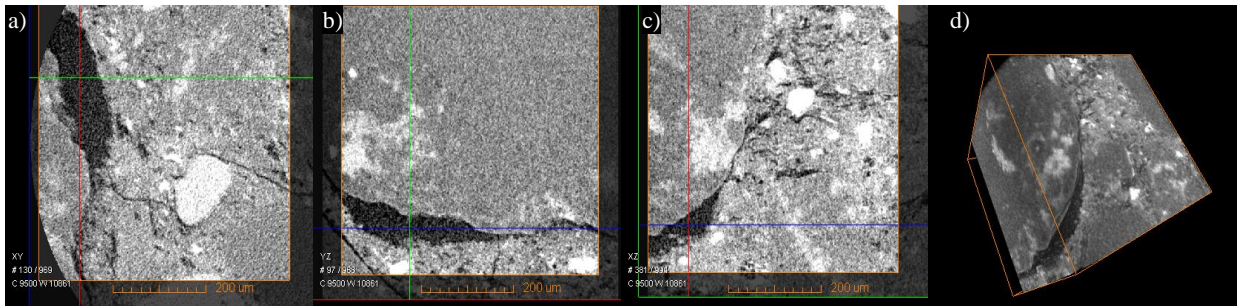


Fig. 2. Micro-CT images of the sample "S" scanned with the resolution of 1.1 μ m per pixel: cross-section slices (a, b and c) and a volumetric view (d).

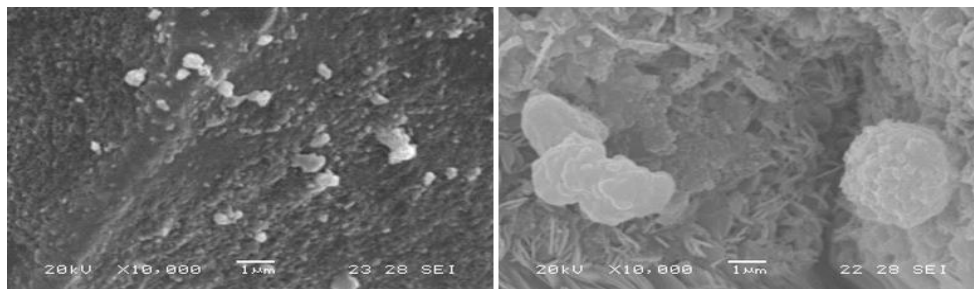


Fig. 3. SEM images of the sample P (left) and of the sample S (right)

6. REFERENCES

- [1] Auditore, L., Barna, R. C., Emanuele, U., Loria, D., Trifiro, A., & Trimarchi, M. *X-ray tomography system for industrial applications*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 266(10), 2138–2141 (2008)
- [2] Bultreys, T., Boone, M. A., Boone, M. N., De Schryver, T., Masschaele, B., Van Hoorebeke, L., & Cnudde, V. *Fast laboratory-based micro-computed tomography for pore-scale research: Illustrative experiments and perspectives on the future*. Advances in Water Resources, 95, 341–351 (2016)
- [3] Creagh, D. Chapter 1 *Synchrotron Radiation and its Use in Art, Archaeometry, and Cultural Heritage Studies*. Physical Techniques in the Study of Art, Archaeology and Cultural Heritage, 2, 1–95 (2007)
- [4] Dik, J., Reischig, P., Krug, K., Wallert, A., Coerdts, A., Helfen, L., & Baumbach, T. *Three-dimensional imaging of paint layers and paint substructures with synchrotron radiation computed μ -laminography*. Journal of the American Institute for Conservation, 48(3), 185–197 (2009)
- [5] Abel, R. L., Parfitt, S., Ashton, N., Lewis, S. G., Scott, B., & Stringer, C. *Digital preservation and dissemination of ancient lithic technology with modern micro-CT*. Computers and Graphics (Pergamon), 35(4), 878–884 (2011)
- [6] Slavíková, M., Krejčí, F., Žemlička, J., Pech, M., Kotlík, P., & Jakůbek, J. *X-ray radiography and tomography for monitoring the penetration depth of consolidants in Opuka - the building stone of Prague monuments*. Journal of Cultural Heritage, 13(4), 357–364 (2012)
- [7] Griesser, M., Traum, R., Vondrovec, K., Vontobel, P., & Lehmann, E. *Application of X-ray and neutron tomography to study antique Greek bronze coins with a high lead content*. Mater. Sci. Eng., 37, 1–5 (2012)
- [8] Zhang, X., Blaas, J., Botha, C., Reischig, P., Bravin, A., & Dik, J. *Process for the 3D virtual reconstruction of a microcultural heritage artifact obtained by synchrotron radiation CT technology using open source and free software*. Journal of Cultural Heritage, 13(2), 221–225 (2012)
- [9] Karch, J., Bartl, B., Dudak, J., Zemlicka, J., & Krejci, F. *Non-destructive imaging of fragments of historical beeswax seals using high-contrast X-ray micro-radiography and micro-tomography with large area photon-counting detector array*. Micron, 91, 22–28 (2016)
- [10] Cesarani, F., Martina, M. C., Ferraris, A., Grilletto, R., Boano, R., Marochetti, E. F., Donadoni, A. M., Gandini, G. *Human Mummies*. AJR:180, 597–606 (2003)
- [11] Wang, J., Dewanckele, J., Cnudde, V., Van Vlierberghe, S., Verstraete, W., De Belie, N. *X-ray computed tomography proof of bacterial-based self-healing in concrete*. Cement & Concrete Composites 53, 289–304 (2014)
- [12] Vučetić, S., Ranogajec, J., Markov, S., Vidaković, A., Hiršenberger, H., Bera, O.: *Development and modeling of the effective bioactive poultices for reducing the nitrate content in building materials*, Construction and building materials, 506-513 (2017)

Authors: Dr Bojan Miljević, Dr Snežana Vučetić, John Milan van der Bergh, Prof. Dr Jonjaua Ranogajec, University of Novi Sad, Faculty of Technology, Bul. cara Lazara 1, 21000 Novi Sad, Serbia, Tel: +381 21 485 3623.

E-mail: miljevic@uns.ac.rs
snezanap@uns.ac.rs
milanbergh@tf.uns.ac.rs
janjar@uns.ac.rs

Dr Alenka Mauko Pranjic, Prof. Dr Andrijana Sever Škapin, Slovenian national building and civil engineering institute, Dimičeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenia, Tel: +386 1 2804-268,

E-mail: alenka.mauko@zag.si;
andrijana.skapin@zag.si

**SCIENTIFIC CONFERENCE WITH INTERNATIONAL
PARTICIPATION
ETIKUM 2017
NOVI SAD, SERBIA, DECEMBER 6-8, 2017**

Vučetić, S., Hiršenberger, H., Miljević, B., van der Bergh, J.M., Tanasić, J., Ranogajec, J.

**IN SITU MERENJA U KONZERVACIJI I RESTAURACIJI
KULTURNOG NASLEĐA**

***Rezime:** Savremena konzervacija i restauracija kulturnog nasleđa zasnivaju se na naprednim naučnim metodama i sofisticiranoj opremi u svim fazama zaštite, od dijagnostike stanja istorijskih objekata, preko različitih tretmana do dugoročnog monitoringa. Na Tehnološkom fakultetu u Novom Sadu je osnovana Laboratorija za ispitivanje materijala u kulturnom nasleđu kako bi se omogućilo da zaštita kulturnog nasleđa u Srbiji prati savremene svetske trendove. U radu su prezentovane studije slučaja ispitivanja konstitutivnih elemenata i produkata degradacije materijala nepokretnog kulturnog nasleđa i umetničkih dela, uključujući materijale neorganskog, organskog i biološkog porekla, kao i primer razvoja i primene novih multifunkcionalnih materijala za čišćenje i zaštitu.*

***Ključne reči:** kulturno nasleđe, in situ metode, degradacija materijala, istorijski objekti*

1. UVOD

Principi moderne konzervacije kulturnog nasleđa nalažu odgovoran pristup i održivost tretmana, kao i primenu dostupnih savremenih tehničkih rešenja i naučnih metoda. Sveobuhvatna zaštita istorijskih objekata otpočinje prikupljanjem podataka i istorijskih dokumenata u vezi sa objektom koji se želi zaštititi, uključujući podatke o vremenu i tehnici njegove izgradnje, upotrebi i pravnom statusu. Sledeći korak je dijagnostika stanja koja podrazumeva kvalitativnu i kvantitativnu analizu materijala ugrađenih u spomenik kulture, kao i identifikaciju i analizu prisutnih mehanizama (procesa) i uzroka degradacije, i parametara uslova sredine. Kao ishod faze dijagnostike mogu se pojaviti i odgovarajuće preporuke za narednu fazu konzervacije i restauracije.

Ovako postavljeni zadaci, da bi bili uspešno sprovedeni, zahtevaju aktivni doprinos različitih struka, tako da se u skladu sa potrebama svakog pojedinačnog objekta formira multidisciplinarni tim. U fazi dijagnostike, i kasnije u sprovođenju monitoringa, sve je značajniji doprinos nauke (tehnologije, hemije, biologije, mikrobiologije, fizike...) i naučnih metoda koje se koriste u cilju:

- karakterizacije ugrađenih materijala,
- karakterizacije i kvantifikacije oštećenja,
- utvrđivanja prisutnih mehanizama (procesa) i uzroka degradacije materijala,
- rane detekcije oštećenja koje je nemoguće identifikovati samo na osnovu vizuelne inspekcije,
- utvrđivanja kvaliteta ugrađenih materijala i selekcije materijala za konzervaciju i zaštitu na osnovu kriterijuma trajnosti i kompatibilnosti,

- davanja prognoze dalje degradacije i rizika,
- određivanja urgentnosti budućih tretmana.

Tokom i nakon sprovedenih tretmana konzervacije, restauracije i zaštite, monitoring u odgovarajućim vremenskim intervalima, obezbeđuje odgovoran pristup zaštiti i održavanju spomenika kulture. Na ovaj način se doprinosi usporavanju degradacionih procesa i dugoročnim uštedama finansijskih sredstava usled produženja trajanja sprovedenih tretmana, odnosno perioda između dve uzastopne intervencije [1-2].

Saradnja Tehnološkog fakulteta Univerziteta u Novom Sadu sa institucijama zaštite kulturnog nasleđa na ispitivanju istorijskih i razvoju novih kompatibilnih materijala za čišćenje i zaštitu istorijskih objekata započela je pre više od 10 godina i postala je prepoznat primer dobre prakse. Intersektorsko povezivanje je omogućilo da stručnjaci iz oblasti kulture, obrazovanja, nauke, ali i privrede zajednički učestvuju na više nacionalnih i međunarodnih projekata, što je doprinelo mnogo boljem razumevanju problema degradacije i zaštite u funkciji očuvanja autentičnosti, funkcionalnosti i estetskih vrednosti istorijskih objekata. Pomenuta saradnja je dovela i do formiranja Laboratorije za ispitivanje materijala u kulturnom nasleđu na Tehnološkom fakultetu u Novom Sadu.

2. LABORATORIJA ZA ISPITIVANJE MATERIJALA U KULTURNOM NASLEĐU

Laboratorija se bavi ispitivanjima konstitutivnih elemenata materijala nepokretnog i pokretnog kulturnog nasleđa, kao i produkata njihove degradacije, uključujući materijale

neorganskog, organskog i biološkog porekla. Ispitivanja koje obavlja Laboratorija obuhvataju detaljnu karakterizaciju materijala, utvrđivanje dijagnostike stanja, uzroka, mehanizama i stepena degradacije, uz davanje preporuke za optimalne postupke sanacije, konzervacije i restauracije.

Pored ispitivanja istorijskih materijala, u Laboratoriji se obavlja i naučno-istraživački rad na polju razvoja novih funkcionalnih materijala za čišćenje i zaštitu objekata. Danas je Laboratorija opremljena modernom instrumentacijom za *in situ*, Slika 1, i laboratorijska ispitivanja primenom sledećih metoda: rendgenske fluorescentne spektroskopije (XRF), infracrvene spektroskopije sa Furijeovom transformacijom (FTIR), spektrofotometrije u ultraljubičastoj i vidljivoj oblasti elektromagnetnog spektra (UV-Vis), infracrvenog (IR) termovizijskog snimanja, ispitivanja korišćenjem zeta-metra, merenja sile otpora prodiranju u materijal (DRMS), stereo-optička mikroskopija, živina porozimetrija, niskotemperaturna adsorpcija azota i mikro-indentacija.



Sl. 1. Istraživački radovi na slikama Milana Konjovića (mobilni FTIR uređaj)

2.1 Studije slučaja ispitivanja materijala kulturnog nasleđa

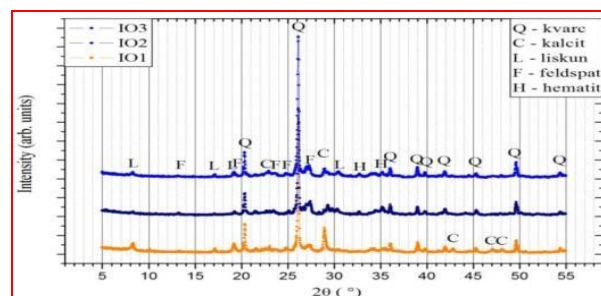
Laboratorija je učestvovala u ispitivanjima objekata kulturnog nasleđa od velikog značaja, među kojima su srednjovekovna tvrđava u Baču, Petrovaradinska tvrđava, antički rimski mozaik (Skelani), srednjovekovna bazilika Arača, manastiri Bođani, Krušedol i Bezdin, pravoslavna crkva u Bačkoj Palanci, Franjevački samostan u Baču, grob Branka Radičevića, Carska palata (Sirmijum), Gimnazija Jovan Jovanović Zmaj, Vladičanski dvor u Novom Sadu, slike Milana Konjovića, portet grofa Hadika, ikonostasi Preobraženske crkve u Sentandreji i grkokatoličke crkve u Ruskom Krsturu, kao i mnogi drugi, Slika 2. U ovom radu biće predstavljeni najznačajni rezultati istraživanja sprovedenih na

ovim istorijskim objektima i umetničkim delima.



Sl. 2. Ispitivanje ikona Manastira Bezdin upotrebom portabl FTIR uređaja

Srednjovekovna bazilika Arača je u pogledu ispitivanja sastava građevinskih materijala (opeka, maltera i stenskog materijala) jedan od reprezentativnih primera saradnje struke i nauke. Naučne metode ispitivanja ukazale su da postoji smicanje u pogledu materijala upotrebljenih za zidanje. Utvrđeno je da postoje razlike u sastavu materijala koji su ugrađeni u temelje bazilike, što je omogućilo da se ustanovi da je reč o različitim periodima izgradnje temelja, odnosno da je različita starost pojedinih celina, Slika 3.

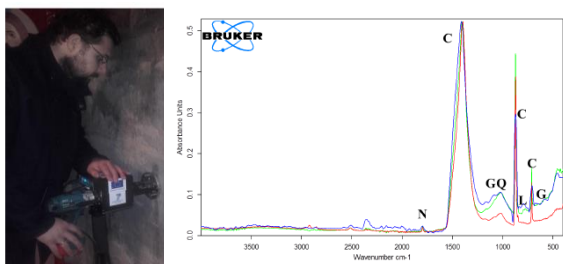


Sl. 3. XRD analiza uzoraka opeka iz istog iskopa (uzorak IO1 - prisustvo liskuna i hematita izdvajaju ovaj uzorak kao deo starije konstrukcije i stare proizvodnje opeka).

Pravoslavna crkva u Bačkoj Palanci primer je učešća Laboratorije u rešavanju svakodnevnih konzervatorskih problema. U ovoj crkvi veliki problem predstavljalo je čišćenje fresaka. Nakon dobijenih rezultata i tumačenja *in situ* merenja koje je sprovedla Laboratorija, konzervatori su vrlo brzo rešili problem i primenili adekvatnu metodologiju čišćenja.

Manastir Krušedol je još jedan primer učešća Laboratorije u ispitivanju zidnog slikarstva, Slika 4. Laboratorija je imala doprinos u utvrđivanju slikarske tehnologije i mehanizama degradacije, kao i u davanju odgovora na konzervatorske dileme. Naime, u jednom delu živopis je poprimio siv tonalitet, pa je bilo potrebno pažljivo isplanirati *in situ* ispitivanja po dubini ispitivane zone. Na osnovu rezultata ispitivanja zaključeno je

da je sivi tonalitet produkt sulfatacije. Pomoću FTIR i XRF spektroskopije konstatovano je da se sulfatacija živopisa odigrava od dubine ka površini zidnog slikarstva, Slika 4.

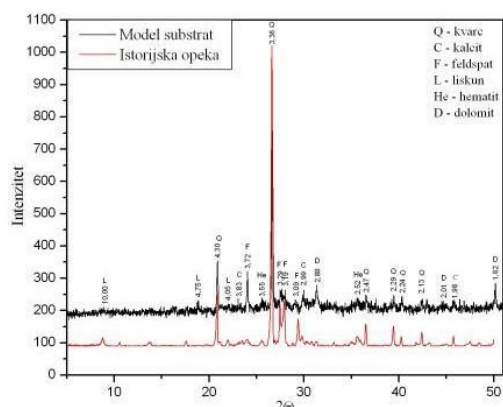


Sl. 4. Levo: prikaz postupka uzorkovanja na kontrolisanim dubina živopisa (uređaj Drilling resistance measurements, Sint Technology) i desno: rezultati FTIR analize

Tvrđava u Baču predstavlja primer holističkog pristupa konzervaciji i zaštiti materijala kulturnog nasleđa, Slika 5. Višegodišnjim periodičnim ispitivanjima sprovedenim u različitim godišnjim dobima utvrđena je tehnologija proizvodnje konstitutivnih elemenata (opeka, malter), kao i prisutni uzroci i mehanizmi degradacije.



Sl. 5. *In situ* ispitivanja na Tvrđavi u Baču - mobilni stereo-optički mikroskop



Sl. 6. Komparativna XRD analiza originalnih opeka i pripremljenih model supstrata (identičan fazni sastav)

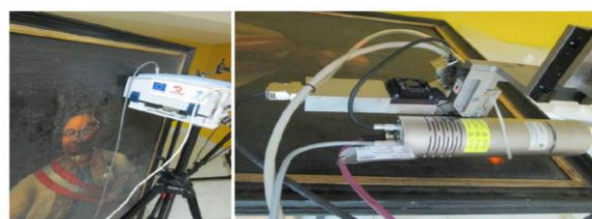
Ova saznanja omogućila su da se prepoznaju funkcije koje bi novi materijali za zaštitu trebalo

da poseduju. Proizvedeni su i veštački ostareni modeli opeka i maltera koji su imali iste karakteristike kao i originalni materijali ugrađeni u tvrđavu, Slika 6 [3]. Na laboratorijski pripremljenim i ostarelim modelima praćena je kompatibilnost i efikasnost novorazvijenih funkcionalnih materijala za samočišćenje (www.heromat.com) i desalinaciju [4], koji su nakon potvrđene kompatibilnosti i efikasnosti u laboratorijskim uslovima primenjeni na izabrane delove zidina tvrđave u Baču. Tako je njihova efikasnost potvrđena i *in situ*, Slika 7.



Sl. 7. Praćenje efikasnosti, trajnosti i kompatibilnosti materijala za samočišćenje na zidanim strukutrama tvrđave u Baču

Portret grofa Hadika primer je saradnje Laboratorije sa konzervatorima na utvrđivanju autentičnosti i starosti umetničkih dela, Slika 8. Na osnovu spovedenih *in situ* ispitivanja utvrđeno je da pigmenti korišćeni za gornji (vidljivi sloj) portreta ne odgovaraju procenjenoj starosti slike, odnosno da vidljivi sloj nije originalan, već da je reč o presliku ispod koga se nalazi još jedan portret [5]. Nakon sprovedenog konzervatorskog tretmana uklanjanja gornjeg sloja, ispitan je i originalni portret i utvrđena je slikarska tehnologija kojom je izveden, što je omogućilo njegovu restuaciju i prezentaciju u izvornom izgledu.



Sl. 8. Ispitivanja portreta Grofa Andraša Hadika pre konzervatorskog tretmana (levo: FTIR, desno: XRF)

2.2 Razvoj materijala za zaštitu

Laboratorija se pored dijagnostike stanja istorijskih objekata i umetničkih dela iz javnih i privatnih kolekcija, bavi i razvojem novih multifunkcionalnih materijala za zaštitu objekata kulturnog nasleđa. U okviru projekta HEROMAT (Protection of Cultural Heritage Objects with

Multifunctional Advanced Materials, www.heromat.com), finansiranog od strane programa FP7 Evropske komisije, u Laboratoriji je razvijen materijal koji poseduje funkciju samočišćenja, a da je pri tome neškodljiv za tretirani materijal, operatera i životnu sredinu. Nanosi se sprejem, potpuno je transparentan na svim testiranim površinama (opeka, beton, kamen, malteri, fasadne boje) i ne izaziva promenu u paropropustljivosti materijala na koji se nanosi. Njegova primena omogućava da spoljne površine istorijskih objekata i modernih građevina godinama ostanu čiste, bez potrebe za dodatnim intervencijama, čime se smanjuju učestalost intervencija čišćenja i potrebna finansijska sredstva. Pilot postrojenje za njegovu proizvodnju postavljeno je u građevinskom preduzeću HGP u Novom Sadu i uskoro će biti dostupno na tržištu. Materijal je već nanet na nekoliko istorijskih objekata gde se kontinuirano prati njegova efikasnost. Rezultati su vidljivi i na jednom delu zida Petrovaradinske tvrđave, gde je materijal nanet pre 3 godine, a razlika u boji između tretiranih i netretiranih opeka uočljiva je golim okom, Slika 9.



Sl. 9. Zona na kojoj je apliciran materijal sa funkcijom samočišćenja, fotografija 3 godine nakon aplikacija, zid na Petrovaradinskoj tvrđavi, ulaz u gornji tunel

Zaštita murala na fasadama u Novom Sadu –Laboratorija je ostvarila saradnju i sa umetničkim pokretom „Lančana reakcija“ koji oslikavanjem murala ulepšava lice Novog Sada. Materijal za samočišćenje nanet je na novooslikane murale kako bi se produžila trajnost boje i omogućila zaštita površina od nečistoća koje su posledica urbanog okruženja, aero zagađenja i mikrobioloških onečišćenja.

3. ZAKLJUČAK

Primeri prezentovani u ovom radu ukazuju na uspešne rezultate saradnje različitih sektora i struka u zaštiti i očuvanju kulturnog nasleđa.

Ističu se prednosti primene *in situ* metoda koje omogućavaju ispitivanje materijala u njegovom realnom okruženju, bez destruktivnog procesa uzorkovanja, ali zahtevaju veliku stručnost i iskustvo operatora. Prezentovani pristup saradnje nauke i struke u oblasti zaštite kulturnog nasleđa obezbeđuje kontinuitet i usklađenost u razvoju nauke i konzervatorske prakse, prenos znanja iz inostranih u domaće institucije u okviru međunarodnih projekata, ali i prenos naučnih saznanja i potreba moderne konzervacije u privredu, što je potvrđeno proizvodnjom novih materijala u preduzećima iz Srbije.

4. REFERENCE

- [1] Dohne, E., Price, A.: *Stone Conservation - An Overview of Current Research*, Second Edition, Getty Conservation Institute, California, ISBN: 978-1-60606-046-9, 2010
- [2] Fitzner, B., Heinrichs, K.: *Damage diagnosis on stone monuments – weathering forms, damage categories and damage indices*, Natural stones and weathering, Geological Institute, Ahen, Nemačka, 1997
- [3] Kramar, S., Ducman, V., Vucetic, S., Velkavrh, E., Radeka, M., Ranogajec, J.: *Characterization of the substrates from two cultural heritage sites - a preparation of model substrates*, *Materiali in Tehnologije*, 48(4), 2014
- [4] Vučetić, S., Ranogajec, J., Markov, S., Vidaković, A., Hiršenberger, H., Bera, O.: *Development and modeling of the effective bioactive poultices for reducing the nitrate content in building materials*, *Construction and building materials*, 506-513, 2017
- [5] van der Bergh, J.M., Miljević, B., Brdarić, O., Petrović, V., Vučetić, S., Ranogajec, J.: *Multi-method Analysis of the 18th Century Portrait of Count Andras Hadik de Futak*, Yococu, Madrid, Španija, 2016.

Autori: Dr Snežana Vučetić, Helena Hiršenberger, Dr Bojan Miljević, John Milan van der Bergh, Jelena Tanasić, Prof. Dr Jonjaua Ranogajec, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološki fakultet, Bul. cara Lazara 1, 21000 Novi Sad, Srbija, Tel: +381 21 485 3757; +381 21 485 36 23

E-mail: snezanap@uns.ac.rs
helena.hirschenberger@uns.ac.rs
miljevic@uns.ac.rs
milanbergh@tf.uns.ac.rs
jelenatanasic@uns.ac.rs
janjar@uns.ac.rs

Stojaković, V.

HIBRIDNI PRISTUP FOTOGRAMETRIJSKOJ REKONSTRUKCIJI SRUŠENIH OBJEKATA

***Rezime:** Objekti graditeljskog nasleđa često su ugroženi i potrebno ih je snimiti, ali nepristupačnost objekta ili njegovog dela otežava merenje. Cilj ovog rada je da pokaže hibridni pristup fotogrametrijskoj virtuelnoj rekonstrukciji srušenih objekata, koji je neophodan ako objekat više ne postoji, a dostupan niz fotografija je prilagođen ranijim fotogrametrijskim pristupima, a ne savremenim automatskim metodama. Hibridni pristup podrazumeva kombinovanje poluautomatskih metoda koje ne zahtevaju visoku oštrinu fotografija i odgovarajuće pozicije fotografa, i automatskih metoda koje omogućavaju kreiranje visokog nivoa detaljnosti.*

***Ključne reči:** graditeljsko nasleđe, fotogrametrija, virtuelna rekonstrukcija*

1. UVOD

Fotogrametrija, kao metod za merenje i modelovanje ima veoma široku primenu u oblasti graditeljskog nasleđa [1-6]. Jedna od važnih prednosti fotogrametrije je to što je pogodna za merenje nepristupačnih objekata. Objekti koje je potrebno snimiti često su i oštećeni i ugroženi, što dodatno otežava merenje, ali i povećava neophodnost preciznog beleženja stanja objekta [7].

Koji fotogrametrijski pristup je najpogodniji za kreiranje virtuelne rekonstrukcije objekta graditeljskog nasleđa zavisi od osobina dostupnog materijala, odnosno fotografija [8]. Kod postojećih objekata moguće je birati način prikupljanja podataka, međutim ako je objekat srušen ili oštećen, za virtuelnu rekonstrukciju može se koristiti samo već kreiran materijal koji često nije prilagođen softveru koji se koristi za rekonstrukciju.

Cilj ovog rada je da pokaže hibridni pristup fotogrametrijskoj rekonstrukciji srušenih objekata, koji je neophodan ako objekat više ne postoji, a dostupan niz fotografija je prilagođen ranijim fotogrametrijskim pristupima, a ne savremenim automatskim metodama. Hibridni pristup podrazumeva kombinovanje poluautomatskih metoda koje ne zahtevaju visoku oštrinu fotografija i odgovarajuće pozicije fotografa, i automatskih metoda koje omogućavaju kreiranje visokog nivoa detaljnosti. Prednosti hibridnog pristupa biće pokazane na virtuelnoj rekonstrukciji srušene kape tornja crkve svetog Rudolfa u Banoštoru. Hibridni model ukazuje na nove zaključke o oštećenjima koja su postojala na krovu 2005. godine kada su fotografije snimljene.

2. CRKVA SVETOG RUDOLFA

Crkva svetog Rudolfa u Banoštoru je građena 1910-1913. godine na imanju grofa Rudolfa Koteka (1698-1921). Telo crkve ima uobičajenu strukturu i sastoji se od naosa i ugaone apside, a sa bočne strane je dominantno postavljen toranj sa visokim prelomljenim krovom podignutim na četiri stuba sa impost kapitelima bez ukrasa, što arhitekturu ovog objekta čini specifičnom.

Zbog promena u etničkoj strukturi stanovništva Vojvodine polovinom 20. veka crkva se ne koristi, nakon čega objekat postepeno propada. Prva oštećenja na krovu naosa pojavljuju se sedamdesetih godina 20. veka, a do kraja veka krov se urušio i nakon njega unutrašnjost naosa potpuno propada. Kapa tornja je u tom periodu delimično oštećena, a srušila se usled uticaja olujnog vetra 2006. ili 2007. godine.

3. MATERIJAL

U dokumentaciji nadležnih institucija za zaštitu spomenika (Pokrajinski zavod za zaštitu spomenika kulture) ne postoji snimak crkve iz perioda u kojem su se pojavila oštećenja. Za virtuelnu fotogrametrijsku rekonstrukciju u ovom radu biće korišćena serija fotografija tornja snimljenih 2005. godine. U tom periodu kapa tornja već ima značajna oštećenja i blago je nagnuta ka južnoj strani na kojoj je u podnožju najviše oštećena. Objekat je u tom periodu nepristupačan usled gustog rastinja koje se nalazi oko i unutar objekta.

Postoji nekoliko serija fotografija koje su snimljene foto aparatom Minolta DSC veličine

senzora 8.8x6.6 mm. Kod svih fotografija korišćeno je automatsko prilagođavanje parametara foto aparata svetlosnim uslovima i slike su slikane u uspravnom ili položenom modu, u zavisnosti od kadra.

Osim rastinja u neposrednoj blizini objekta, lokacija je vrlo nepovoljna za snimanje, usled denivelacije zemljišta i rasporeda okolnih objekata i visokog zelenila koje zaklanja objekat. Potencijalne pozicije fotografa (slika 1) stoga imaju veliku varijaciju udaljenosti od objekta i ponekad nisu pogodne za upotrebu zbog zaklonjenosti rastinjem. Posledica toga je da su razni delovi objekta fotografisani u različitim serijama fotografija, odnosno da se u serijama bitno razlikuje broj fotografija i žižna daljina:

1. Serija od 80 fotografija koja prikazuje ceo objekat snimljena je korišćenjem žižne daljine od 28mm.
2. Serija od 22 fotografije koja prikazuje južnu stranu tornja snimlja je korišćenjem žižne daljine od 64mm.
3. Serija od 4 fotografije koja prikazuje severnu stranu tornja snimljena je korišćenjem žižne daljine od 70mm.
4. Serija od 11 fotografija koja prikazuje zapadnu stranu tornja snimljena je korišćenjem žižne daljine od 92mm.

Seriya 1 slikana je sa svih strana oko objekta, a pozicije sa kojih je fotografisan toranj u serijama 2, 3 i 4 su označene na slici 1.



Sl. 1. Okolina objekta - crvenom bojom je označen objekat, tamno crvenom toranj, a žutom potencijalne pozicije fotografa.

4. FOTOGRAMETRIJSKA REKONSTRUKCIJA HIBRIDNIM PRISTUPUM

Fotogrametrijski pristupi se mogu podeliti na dva grupe, poluautomatski i automatski pristupi, u zavisnosti od načina identifikacije homolognih tačaka. Poluautomatski fotogrametrijski metodi koriste tačke koje zadaje korisnik, odnosno čiju poziciju u koordinatama fotografije je potrebno manuveno obeležiti i označiti kao homologne.

Automatski pristupi podrazumevaju da se identifikacija homolognih tačaka vrši automatski, odnosno da se koristi softver koji identifikaciju vrši poređenjem boje piksela na ulaznim fotografijama.

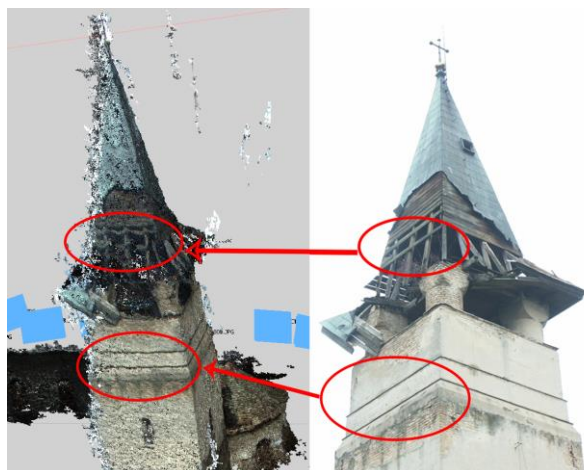
Automatskim pristupima, među kojima se najčešće koriste SfM (*structure from motion*) pristupi, može postići izuzetno visok nivo detalja i stoga je ovakav način fotogrametrijskog modelovanja postao vrlo rasprostranjen. Međutim, za korišćenje SfM metoda ne mogu se koristiti bilo kakve fotografije, već je potrebno kreirati niz fotografija koje ispunjavaju određene uslove. Neophodno je da razmak između pozicije optičkih centara fotografija bude dovoljno mali, da ekspozicija bude usklađena i ujednačena, da tačka fokusa bude ista (zbog uticaja na *principal point distance* koja je ključna u fotogrametrijskoj rekonstrukciji), da fotografije budu oštre, odnosno da se koriste odgovarajuće brzine zatvarača i blenda, da ceo objekat ulazi u granice dubinske oštine i da nepravilnosti usled oblika sočiva kao što su difrakcija i aberacije budu što manje izražene.

Sa druge strane, kod poluautomatskih pristupa nije neophodno da fotografije ispunjavaju prethodno nabrojane uslove. Potrebno je samo da tačke budu prepoznatljivije korisniku i da se svaka tačka pojavljuje bar na dve fotografije. Distanca, razmak i ekspozicija ne moraju da budu ujednačene. Fotografije ne moraju da budu potpuno oštre. Nedostatak poluautomatskih pristupa je mali nivo detalja, jer se broj lociranih tačaka ograničava na ono što korisnik može da unese, a modelovanje se vrši manuveno, i softver podržava samo modelovanje jednostavnim geometrijskim telima.

U današnje vreme automatski fotogrametrijski pristupi dominiraju u praksi snimanja graditeljskog nasleđa. Ako je objekat srušen pre pojave automatskih fotogrametrijskih metoda, dostupne fotografije često ne ispunjavaju delikatne uslove koji su neophodni za primenu takvih metoda.

Za virtuelnu rekonstrukciju crkve u Banoštru dostupne su četiri serije fotografija koje nisu prilagođene automatskim fotogrametrijskim pristupima. U prvoj seriji ima dovoljan broj fotografija ali su one različito orijentisane (uspravno/položeno) i snimane sa neujednačenih udaljenosti od objekta i često prevelike međusobe udaljenosti. Osim toga zbog različite pozicije izvora svetla u odnosu na foto aparat parametri osvetljenosti slika u seriji su različiti, te su neke slike preekspozicionirane, a neke podekspozicionirane. Softver za automatsku identifikaciju tačaka je pri orijentaciji eliminisao 26 fotografija zbog

nedovoljnog kvaliteta. Od preostalih fotografija napravljen je oblak tačaka. Uprkos tome što u seriji ima velik broj fotografija, delovi objekta su loše rekonstruisani. Kako je sve slikano istom žižnom daljinom od 28mm detalji na gornjem delu objekta su slabo vidljivi na fotografijama, što za posledicu ima da oblak tačaka ima vidne nepravilnosti (slika 2).



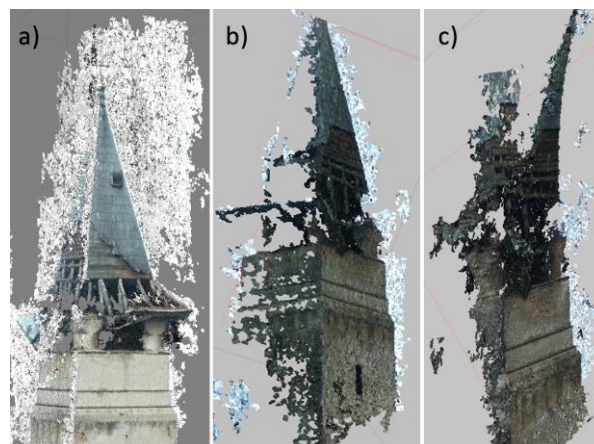
Sl. 2 . Oblak tačaka dobijen automatskom rekonstrukcijom serije 1 sa naznačenim nepravilnostima na jugozapadnoj strani tornja.

Druga, treća i četvrta serija fotografija prikazuju samo toranj, kako se vidi sa različitih strana. Pošto su snimane sa sličnog dela terena oko objekta razdaljina do objekta u svakoj seriji je ujednačena, ali je broj fotografija manji. Ekspozicija je takođe ujednačena pošto su sve fotografije u seriji slikane sa iste strane objekta.

Druga serija sadrži fotografije koje su slikane u srednjem rasponu žižnih daljina i automatska rekonstrukcija oblaka tačaka iz te serije prikazana je na slici 3a. Može se uočiti da je preeksponirano nebo uticalo na pojavu mnogih pogrešnih tačaka kod automatskog povezivanja. Takođe na krovnim gredama uočljive su slične nepravilnosti kao i kod serije 1 dok na zidu tornja nema uočljivih devijacija. Kod treće i četvrte serije je zbog velike žižne daljine nepovoljan razmak između fotografija što bitno utiče na smanjenje preciznosti. U trećoj seriji broj fotografija je veoma mali te se ne vidi dovoljno detalja na kapi tornja (slika 3b). Četvrta serija ima veći broj fotografija, ali veoma velika žižna daljina i neproporcionalno mali razmak među optičkim centrima fotografija uzrokuju da je rezultat automatske identifikacije tačaka neupotrebljiv. Na slici 3c jasno se vidi da orijentacija nije uspešna i da se pojavljuje jako zakrivljenje modela.

Uzevši u obzir nedostatke i prednosti oblaka tačaka dobijenih iz različitih serija, za virtuelnu

rekonstrukciju odabrana je serija 2 kod koje ima najviše detalja na toranjskoj kapi i najmanje devijacija.

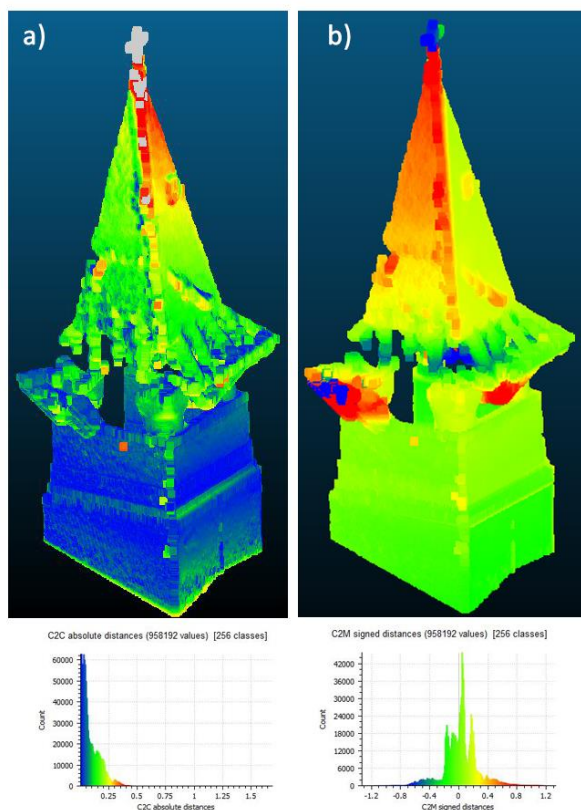


Sl. 3. Oblak tačaka dobijen automatskom rekonstrukcijom serije: a) 2, b) 3, c) 4.

Da bi se delimično umanjile devijacije koje se dobijaju krivljenjem usled nepovoljnih razmaka između optičkih centara, dobro je uvesti kontrolne tačke. Kako je krov srušen, a objekat nepristupačan za merenje, kontrolne tačke su dobijene korišćenjem poluautomatske fotogrametrijske metode kod koje problematična ekspozicija i razmaci ne umanjuju tačnost. Postavljen je lokalni koordinatni sistem iz kojeg su eksportovane koordinate kontrolnih tačaka koje su zatim uvezene u automatski sistem da bi se izvršila korekcija orijentacije i oblaka tačaka. Na tom modelu prosečna greška položaja kontrolnih tačaka je 0.15m, a greške položaja svih kontrolnih tačaka kreću se 0.06-0.28m. Kada se uporede oblak tačaka bez kontrolnih tačaka i oblak sa kontrolnim tačkama dobija se prosečna distanca 0.09m, standardna devijacija 0.09, a ukupan raspon distance je 0.00-0.40m (slika 4a).

Oblak tačaka sa kontrolnim tačkama je očišćen od suvišnih tačaka i kreiran je *mesh* model. Taj oblak tačaka, koji je dobijen hibridnim korišćenjem poluautomatskog i automatskog pristupa upoređen je sa modelom koji je dobijen samo korišćenjem poluautomatske rekonstrukcije i modelovanjem jednostavnim geometrijskim oblicima. Pri tom poređenju prosečna distanca između tačaka je 0.30m sa standardnom devijacijom 0.24. Na zidanom delu tornja nema velikih odstupanja, ali se položaj kape tronja, odnosno nagib krova usled oštećenja bitno razlikuju. U prvobitnom modelu izmeren je nagib od 1.4° ka jugoistočnoj i 0.6° ka jugozapadnoj strani. U novom modelu nagib krova je 1.9° ka jugoistočnoj strani i 4.9° ka jugozapadnoj strani. S obzirom da je toranjska kapa visine 13.9 m vrh tornja je u različitim modelima pomešten 0.78m na

najudaljenijoj tački (slika 4b).



Sl. 4. Poređenje oblaka tačaka dobijenog hibridnim pristupom sa: a) oblakom tačaka dobijenog automatskom rekonstrukcijom bez kontrolnih tačaka, b) modelom od jednostavnih geometrijskih tela dobijenim poluautomatskim pristupom. Pogled sa južne strane.

5. ZAKLJUČAK

Primenom hibridnog fotogrametrijskog pristupa kreiran je model koji se razlikuje od rezultata koji se dobijaju kada se koristi samo poluautomatski ili samo automatski pristup. Za automatsku rekonstrukciju je odabrana serija fotografija koja daje najbolje rezultate, a kontrolne tačke su dobijene pomoću poluautomatskog pristupa.

Kada uporedimo hibridni model sa modelom dobijenim poluautomatskim pristupom razlika na zidanom delu tornja je manja od 10 cm, te možemo pretpostaviti da je greška različitih pristupa modelovanju manja od te vrednosti. Razlika u nagibu kape tornja je bitno veća te možemo pretpostaviti da u prvobitnom modelu nagib ka jugozapadnoj strani koji je u novom modelu bitno veći, nije bio precizno izmeren. Jugozapadna strana tornja je u korišćenoj seriji 2 obuhvaćena na samo četiri fotografije i to slikano pod ostrim uglom, te pojava veće greške nije neočekivana. Stoga možemo zaključiti da hibridni model daje realnije rezultate o nagibu tornja.

Ograničenje ovog istraživanja je što je analizirani objekat srušen, te se ne mogu proveriti prave dimenzije i spram toga odrediti tačnost različitih modela.

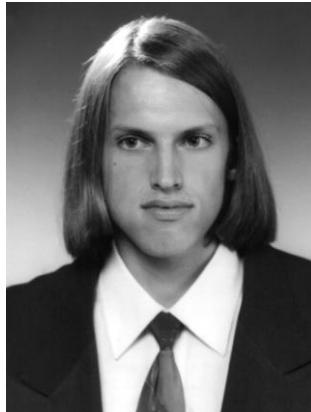
6. REFERENCE

- [1] Koutsoudis, A., Arnaoutoglou, F., and Chamzas, C.: *On 3D reconstruction of the old city of Xanthi. A minimum budget approach to virtual touring based on photogrammetry*, Journal of Cultural Heritage 8, pp. 26-31, 2006.
- [2] Lingua, A., Piumatti, P., and Rinaudo, F.: *Digital Photogrammetry: A Standard Approach to Cultural Heritage Survey*, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXIV, pp. 1-6, 2003.
- [3] Pavlidis, G., Tsiafakis, D., Tsioukas, V., Koutsoudis, A., Arnaoutoglou, F., and Chamzas, C. *Preservation of Architectural Heritage through 3D digitization*, International Journal of Architectural Computing (IJAC) in Cultural Heritage 5, pp. 221-237, 2007.
- [4] Remondino, F.: *Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning*, Remote Sensing 3, pp. 1104-1138, 2011.
- [5] Schouteden, J., Pollefeys, M, Vergauwe, M., and Vann Gool, L.: *Image-Based 3D Acquisition Tool For Architectural Conservation*, International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS) XXXIV 5/C7, pp. 301-305, 2001.
- [6] Yilmaz, H., Yakar, M., Gulec, S., and Dulgerler, O.: *Importance of digital close-range photogrammetry in documentation of cultural heritage*, Journal of Cultural Heritage 8, pp. 428-433, 2007.
- [7] Waldhäusl, P.: *Defining the Future of Architectural Photogrammetry*, International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), pp. 767-770, 1992.
- [8] Remondino, F., and El-Hakim, S.: *Image-Based 3d Modelling: A Review*. The Photogrammetric Record Journal 21, no. 115, pp. 269-291, 2006.

Autori: Prof. Dr. Vesna Stojaković
Univerzitet Novi Sad, Fakultet Tehničkih
Nauka, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000
Novi Sad, Serbia, Tel: +381 21 485 2421,
E-mail: vesna100@uns.ac.rs

IN MEMORIAM

Teach. Ass. IVAN SOVILJ-NIKIĆ, MSc. Eng. (1981 – 2017)



On Sunday, July 2, 2017, high-minded heart of Ivan Sovilj-Nikić at the age of 37 stopped working. Ivan Sovilj-Nikić was assistant-master at the Faculty of Technical Sciences in Novi Sad. He abandoned his colleagues and associates prematurely, without experiencing the realization of many ideas and goals for which he constantly advocated. By ethnicity Serb, Ivan Sovilj-Nikić was born on 17.05.1981. in Novi Sad from mother Ljiljana Nikić, a native of Fruška Gora, and father Bogdan Sovilj, a native of Lika. After finishing elementary school “Ivo Lola Ribar” and Gymnasium “Isidora Sekulić” in Novi Sad with an average grade of 5.00 and received the Vuk's diploma, he enrolled at the Faculty of Technical Sciences in Novi Sad at the Department of Production Engineering. Graduated-master thesis titled “Application of the genetic algorithm in optimizing the geometrical parameters of the hob milling tool” was defended on July 10, 2007. He was one of the best students since the founding of the Faculty of Mechanical Engineering in 1960 and the best student in the promotion of graduate engineers with an average grade of 10.00 (ten) in December 2007 at the Faculty of Technical Sciences in Novi Sad. In April, 2015, he planned to start the procedure for defense of his doctoral dissertation, but on April 6, he started a great battle for his health and life, which prevented him from defending his doctoral dissertation.

From early childhood he had the gift for making different models of various materials. The title of his dissertation also begins with the word Modeling. He imagined the last model on the Easter holiday on April 16, 2017. He designed a carriage and made its model from baked bread dough. You can see the photo of this model with this text.

In the final years of the Gymnasium, Ivan showed affinity for scientific research. His final examination in physics that was highly rated contained elements of research work and indicated that he was a young and promising researcher. In October 1999 he presented his first scientific paper as a co-author in Timisoara at a conference of young researchers. In the autumn of 2000, Ivan was a participant at the First Mediterranean Conference on Tribology in Jerusalem where he presented his work as a co-author, too. Ivan then picked up the applause of the attendees at the conference for a witty approach to the presentation of scientific research. As one of the top 100 students of all universities in Serbia, Ivan was a participant in the trip to Europe organized by the European Movement in 2005.

Along with the steps in education, Ivan cleared his way into the sport. He won a large number of medals in all ages and in all racing disciplines. He was the champion of the state and the representative of Vojvodina and the state in the most difficult technical discipline-steeplechase.

In professional work, Ivan has been a research scholar of the Ministry of Science and Technological Development since 2007 on the project Development of progressive technology for the back machining of profile tools on CNC machines at the Faculty of Technical Sciences in Novi Sad. During his doctoral studies, he gained his first pedagogical experience by engaging in exercises on Cutting tools, Tribology, Tribology and tools for CIM systems. Ivan was elected in the title assistant-master in 2012 for the narrow scientific field Tribology, maintenance and cutting tools. Ivan participated in the preparation and teaching in the following subjects: Tribology, Tribology and Maintenance, Cutting tools, Biotribology, Evolutionary Methods, Tribology and modern tools for CIM systems, Measurement and tools in precision engineering, Modern tools for CIM systems. Among the students he enjoyed high reputation, popularity and respect both as an expert and as a human being. He participated in the organization of several professional excursions for the students of Production Engineering, from which excursions to Prague, Ljubljana and Boljevac are set out.

Ivan was a young scientific researcher of great potential, which unfortunately did not fully develop. Despite his academic career premature stopped, Ivan achieved an outstanding number of scientific papers for his young age. During his work at the Faculty of Technical Sciences within the Department of Production Engineering at the Chair of Metrology, quality, ecological-engineering aspect, tools and fixtures he participated in several scientific and research projects of international and national significance where he achieved significant results. During his scientific and pedagogical career he has published over 70 scientific papers, from which four monographs of

international importance can be distinguished, 5 original scientific papers in international journals on the SCI list, more than 50 papers published and presented at international and national congresses, symposiums and conferences, more than 10 papers published in national journals. In the framework of doctoral studies and engagement at CEEPUS international projects, he stayed at technical faculties and institutes in Poland, Slovakia, Romania, Hungary, Bulgaria, Moldova, Macedonia, Croatia, Bosnia and Herzegovina.

Ivan Sovilj-Nikič's personality was characterized by numerous human and moral values, among which the most important honesty, the culture of behavior and behavior, the tendency to listen and appreciate a different opinion. Ivan was a well-educated, witty young man, an intellectual, a fan of sports and music. In everyday life he liked socializing, honest and friendly conversations. He had nice manners and spread positive energy. He was cheerful and well-off. He was a cordial and attentive colleague. Whenever he traveled somewhere, he traveled a lot, thought about others, and especially liked to treat friends and colleagues with gifts and small signs of attention.

At work among his colleagues at the Chair, Department, Faculty and University he was decorated by constructiveness and readiness for cooperation, that is, teamwork. His giftedness, intellectual and research capacity have put him in a group of highly capable and creative researchers. In a mountain called scientific research, Ivan did not stray, but he deliberately cleared his way to clearly defined goals.

Ivan has contributed immensely to the education and encouragement of young scientists in his country and abroad. Ivan was an energetic and active expert in the field of tribology. The originality and importance of his work, the success in applying the results of the research in practice and the promotion of tribology had a great significance at the national and international level. He constantly encouraged and influenced the scientific research work of students. As a creative engineer and scientist, he designed, constructed and executed several devices for testing the tribological characteristics of hob milling tools and gears.

Ivan successfully built a solid bridge between university researchers and engineers in industry. As an assistant, he significantly contributed to the graduation of engineers in tribology, tribodiagnosics, maintenance and cutting tools that they are now working in key positions in the Serbian and Republic of Srpska industries. As an author, Ivan prepared material for two patents that did not succeed to be formalized.

Ivan was the first to have the idea of forming Tribological Society of Vojvodina, but he was not able to carry it out. His influence on the development of tribology in Vojvodina was significant. Also, Ivan's tireless work on obtaining support for research projects of national importance and his efforts for the benefit of engineers have a lasting significance in the field of tribology.

Ivan loved history, theater and literature. He was able to express himself orally and in writing. He wrote and published novels. In his desk there were more notes and sketches for new novels, and in one of them he pointed out that he shared his Christian goodness with others without leaving anything to him.

The family, Chair, Department, Faculty and University have lost their valuables and wealth that cannot be compensated with anything. Ivan was a young man for an example that by his goodness, honesty, work, responsibility and, above all, high moral, labor and human qualities can never be forgotten and erased from the memory of parents, sister, colleagues, associates and friends.

A patient, thoughtful and just man, a strong person, a creative and curious intellectual, an outstanding pedagogue and a scientific researcher left us. His contribution to the education of engineers and the formation of scientific disciplines is irreplaceable. We will all remember Ivan for a long time.

Our Ivan went on Heavenly Tribological Congress to present a part of tribological results from his dissertation entitled by Modeling and Optimization of Hob Milling Process.





9788660220068